

ارزیابی مشخصات عملکردی دزیمر صفحه موازی نانو کامپوزیت PVA/MWCNT-OH در

مقابل پرتوهای گاما در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه

INC29-1328

سیدرشید حسینی اقدام^۱، سید محمود رضا آقامیری^۱ و شهریار ملکی^۲

دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه پرتوپزشکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

چکیده:

در این تحقیق، یک دزیمر نانو کامپوزیت بر پایه پلی وینیل الکل/نانولوله کربنی چند جداره هیدروکسیل (PVA/MWCNT-OH) جدید برای پرتوهای فوتون طراحی و ساخته شده است. دزیمر صفحه موازی با حجم حساس ۰/۴۰ سانتی متر مکعب با نانو کامپوزیت PVA/MWCNT-OH ساخته شده که مجهز به رابط تا پاسخ آن در برابر تابش توسط یک الکترومتر استاندارد ثبت شود. مشخصات عملکردی دزیمر نانو کامپوزیت خانگی (HNC) در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه (SSDL) با پرتودهی دستگاه Picker V9 Co-60 مورد بررسی قرار گرفت. حساسیت دزیمر HNC حدود سه برابر بیشتر از دزیمرهای استاندارد مرجع (۰/۳۵ سانتی متر مکعب اتافک یونش صفحه موازی ROSS) بود. تست‌های عملکرد دیگری مانند جریان نشستی، پاسخ خطی بر اساس دز تابش، پاسخ اشباع، اثر قطبیت، وابستگی جهت، اندازه میدان و وابستگی انرژی انجام شد. تمامی نتایج به دست آمده با استاندارد IEC 60731 مطابقت خوبی داشتند که اخیراً در ژورنال Measurement منتشر شده است [۲]. بنابراین، دزیمر HNC برای روش‌های دزیمتری معمول در میدانهای پرتوی فوتون مناسب است.

کلید واژه ها: دزیمتری - نانو کامپوزیت - طراحی و ساخت - تست‌های عملکردی - آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه

مقدمه

دزیمتری پرتوهای یونساز یک موضوع مهم در مراکز رادیوتراپی، تشخیصی و هسته‌ای است. در حال حاضر، نانوکامپوزیت‌های پلیمر کاربردهای متنوعی به‌عنوان حسگر، آشکارساز و دزیمتر برای پرتوهای یونساز ارائه نموده‌اند [۱-۱۳]. دزیمتری پرتوهای یونساز مورد استفاده در مراکز رادیوتراپی یکی از اهداف اصلی این مطالعه است، بنابراین مکانیسم‌های برهمکنش آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. فرآیند دزیمتری پرتوهای فوتونی بر اساس برهمکنش آن با ماده است [۱۴، ۱۵]. محتمل‌ترین مکانیسم‌های برهمکنش پرتو فوتون عبارتند از: پراکندگی هم‌دوس، جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید جفت یون است. پراکندگی هم‌دوس که به‌عنوان پراکندگی کلاسیک یا پراکندگی رایلی نیز شناخته می‌شود، شامل برهمکنشی است که یک فوتون از نزدیک الکترون هسته می‌گذرد و در زوایای کوچک پراکنده می‌شود [۱۶]. این پدیده برای فوتون کم انرژی (کمتر از 10 keV) و مواد با عدد اتمی بالا بیشتر احتمال دارد رخ دهد [۱۷، ۱۸]. لازم به‌ذکر است که پرتوهای یونیزان مانند فوتون از طریق برهمکنش با نانوکامپوزیت‌های پلیمری به دلیل جابجایی اتمی می‌تواند ساختار کریستالی را تغییر دهد و باعث ایجاد انواع رویدادها نظیر آزاد شدن الکترون‌های ثانویه، یونش، برانگیزش و شکستن پیوند ساختارهای اتمی ماده شود [۱۹، ۲۰، ۴، ۵، ۷، ۱۹].

انواع مختلفی از اتاقک‌های یونش مانند اتاقک‌های استوانه‌ای مثل Farmer و Pinpoint، Semiflex و همچنین اتاقک‌های صفحه موازی مثل Roos و Advanced Markus وجود دارند که معمولاً برای دزیمتری پرتوهای یونساز در پرتودرمانی استفاده می‌شوند [۲۰-۲۴]. علاوه بر این، مواد با عدد اتمی سبک مانند پلیمرهای آلی، از طریق پراکندگی کامپتون، کارایی و حساسیت بالایی را برای دزیمتری تابش فوتون فراهم می‌کنند. برای انتخاب مناسب‌ترین دزیمتر برای دزیمتری فوتون باید جنبه‌های مختلفی را در نظر گرفت. پاسخ خطی به دز جذب شده، پایداری کوتاه‌مدت و بلندمدت، وابستگی به انرژی، اندازه میدان و وابستگی زاویه‌ای، وابستگی به آهنگ دز، تکرارپذیری، زمان‌های خیزش^۱ و نزول^۲ همگی مورد نیاز هستند، اما کافی نیستند. اخیراً می‌توان کاربرد گسترده فریک ژل، پلیمر ژل و دزیمتر نانوکامپوزیت پلیمر را با کاربردهای بالقوه در آشکارسازی و دزیمتری، به ویژه در انرژی‌های سطح پایین را مشاهده نمود [۱-۲۵، ۸، ۷، ۵، ۳-۲۹].

با این حال، این تحقیق بر پایه یک پلیمر جدید و نانولوله کربن چند جداره متمرکز شده است. با توجه به اینکه عدد اتمی موثر (Z_{eff}) نانوکامپوزیت پلیمری با حداکثر اختلاف ۳/۲ درصد به بافت نرم نزدیک است، بنابراین می‌توان از آن به‌عنوان یک دزیمتر دقیق برای تخمین دز دریافتی بدن انسان استفاده نمود. دزیمتر HNC محدودیت ابعادی ندارد و در ابعاد کوچک قابل تولید است. حساسیت دزیمترهای HNC به پارامترهای محیطی مانند دما، فشار و رطوبت در مقایسه با اتاقک‌های یونش به دلیل جامد بودن حجم حساس آن کمتر است، بنابراین پاسخ پایدارتری را ارائه می‌دهد.

هدف از این تحقیق طراحی و ساخت یک دزیمتر صفحه موازی بر اساس نانوکامپوزیت PVA/MWCNT-OH به‌عنوان ماده حجم حساس است که بر ویژگی‌های دزیمتری تحت تابش پرتو فوتون Co-60 تمرکز دارد. با توجه

^۱ Rise-time

^۲ Fall-time

به پاسخ مناسب دزیمتر HNC، در دسترس بودن و ارزان بودن مواد تشکیل دهنده آن نسبت به دزیمترهای معمولی، استفاده از نانوکامپوزیت برای اهداف دزیمتری معرفی شده است.

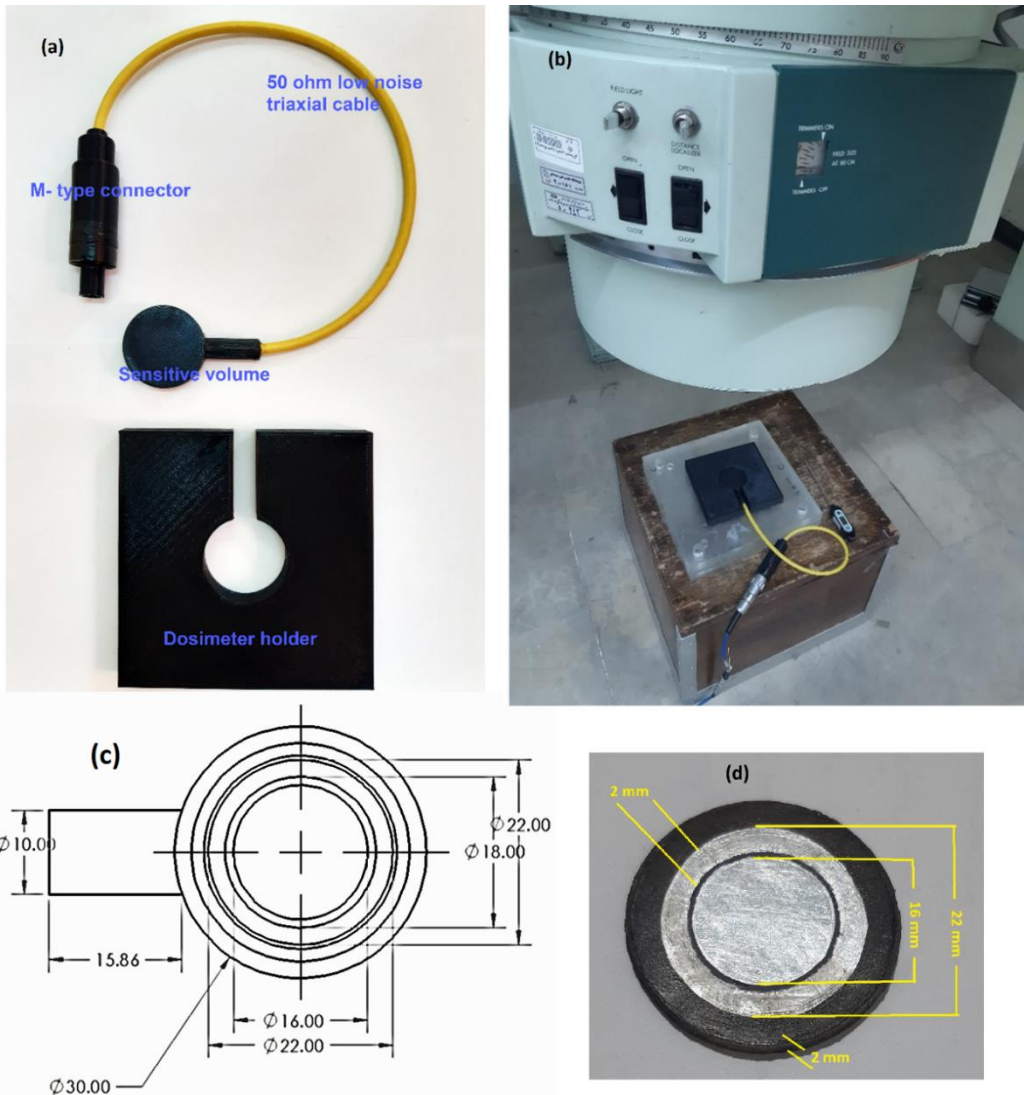
مواد و روش‌ها

گرانول پلیمر PVA (Shanghai Chemex Group Ltd, Chin) با خلوص ۹۵/۷ درصد، جرم مولی ۸۶/۰۹ گرم بر مول، وزن مولکولی ۲۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ و چگالی ۱/۱۹ گرم بر سانتی مترمکعب تهیه شدند. نانولوله کربن با خلوص ۹۵٪ MWCNT-OH (US Nano Inc) و با چگالی ۲/۱ گرم بر سانتی مترمکعب، ۳/۷۰٪ OH-wt، قطر داخلی ۵-۱۰ نانومتر، قطر خارجی ۲۰-۳۰ نانومتر، طول ۱۰-۳۰ میکرومتر، $SSA > 110 \text{ m}^2/\text{g}$ و رسانایی الکتریکی بزرگتر از ۱۰۰ S/m از US NANO Inc خریداری شد. آب مقطر با 6.5-7pH از شرکت Digi-Shimi تهران تهیه شد. از ورق آلومینیومی با ضخامت ۱۰۰ میکرومتر (پارس آلومینیوم، ایران) با چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی متر مکعب و خلوص ۹۹/۸۵ درصد به عنوان الکتروود استفاده شد. همانطور که گفته شد، حجم حساس دزیمتر HNC ترکیبی از پلیمر PVA و MWCNT-OH است. هر دزیمتر شامل حجم حساس، الکترودها، پوشش حجم حساس، کابل و کانکتور می‌باشد. برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی دو روش محلولی و مذاب وجود دارد. در روش محلولی، کنترل بیشتری روی نمونه وجود دارد و فرایند ساخت با دقت بیشتری انجام می‌شود. بنابراین از روش محلولی برای ساخت مواد حجم حساس استفاده شد. بدین منظور پلیمر PVA با استفاده از همزن مغناطیسی مجهز به صفحه داغ در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در ۲۰۰ سانتی متر مکعب آب مقطر حل شد (لازم به ذکر است که پلیمر PVA در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در آب حل می‌شود) مطابق شکل ۱. از سوی دیگر، برای وضعیت پراکندگی بهتر پودر MWCNT-OH در بستر PVA، درصدهای وزنی مختلف بین ۰-۰/۰۵ از نانو لوله در بستر پلیمر در ۵۰ سانتی متر مکعب آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از دستگاه پروب اولتراسوند پراکنده شد. در نهایت، هر دو محلول پلیمر PVA و MWCNT-OH با یکدیگر مخلوط شده و در قالب‌های سیلیکونی ریخته شده تا در شرایط محیطی به مدت ۳ روز خشک شوند. سپس مواد خشک شده خرد شده و داخل قالب‌های فلزی استوانه‌ای فولادی به قطر ۲۴ میلی‌متر و ارتفاع ۲ میلی‌متر برای پرس گرم در فشار ۲۰۰ اتمسفر در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شدند.



شکل ۱: انحلال پلیمر PVA در ۲۰۰ سی سی آب مقطر به کمک همزن مغناطیسی و پایش دمای محلول در طول فرایند انحلال.

یکی از دلایلی که پلیمر PVA و محلول MWCNT-OH مستقیماً در قالب‌های استوانه‌ای فلزی برای تهیه حجم حساس ریخته نشد این بود که در هنگام خشک شدن نمونه، احتمال ایجاد حفره‌های هوایی در داخل حجم حساس وجود دارد. در حالی که با استفاده از روش پرس داغ، نمونه به دست آمده بدون حفره با حالت پراکندگی همگن به دست می‌آید. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، از ورق آلومینیوم ۱۰۰ میکرومتر برای ساخت الکترودهای آند و کاتد به ترتیب با قطر ۱۶ و ۲۲ میلی‌متر و پهنای ۲ میلی‌متر استفاده شد. همچنین از فناوری چاپگر سه‌بعدی استفاده شد و پوشش حجمی حساس با مواد پلی لاکتیک اسید (PLA) ساخته شد مطابق شکل ۲. برای اتصال دزیتر ساخته شده به الکترومتر، کانکتوری شبیه کانکتور نوع M- ساخت شرکت PTW آلمان طراحی شد.



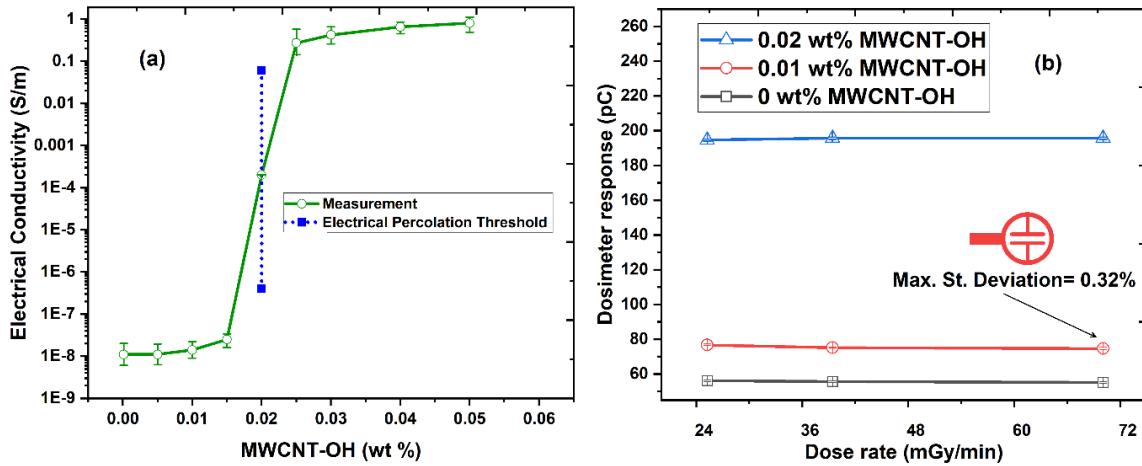
شکل ۲: a. دزیمر ساخته شده نانو کامپوزیت به همراه نگهدارنده ی آن b. پرتو دهی با دستگاه کبالت Piker. c. کاور طراحی شده برای دزیمر با نرم افزار Solid works. d. حجم حساس ساخته شده به همراه الکترودهای آلومینیومی و جزئیات آن‌ها.

بحث و نتایج

بررسی نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت

نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت در غلظت‌های مختلف (۰ تا ۰/۰۵ درصد) با ضخامت ۲ میلی متر و قطر ۲۲ میلی متر به صورت تجربی تهیه شدند. سپس مقاومت الکتریکی هر نمونه در ولتاژ ثابت ۱۰۰۰ ولت از طریق یک تستر عایق دیجیتال (ایتالیا، Techno Team) اندازه‌گیری شد. بنابراین، هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت برای درصد‌های مختلف MWCNT-OH از طریق رابطه $R = \rho \frac{L}{A}$ تعیین شد، که در آن R ، ρ ، L و A به ترتیب مقاومت، مقاومت ویژه، ضخامت و سطح مقطع نمونه نانوکامپوزیت هستند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، آستانه گذر الکتریکی (EPT) در ۰/۰۲ درصد وزنی از نانولوله کربن رخ داده است. برای نمونه های ۰،

۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ درصد وزنی، تست پرتودهی نیز انجام شد و نتایج به دست آمده در شکل ۳ نمایش داده شد.



شکل ۳: (a) هدایت الکتریکی PVA/MWCNT-OH جهت بدست آوردن ناحیه EPT. (b) پاسخ نمونه‌های مختلف نانو کامپوزیت بر حسب آهنگ دز برای دز ثابت ۱۰ سانتی گری (خطاهای اندازه‌گیری شده برای دز در شکل بصورت میله‌ای نمایش داده شده‌اند اما بدلیل پایین بودن مقادیر قابل دید نیستند، بزرگترین خطا موجود زوم شده و در شکل قرار داده شده است).

مطابق نمودار ۳b. پاسخ تمامی نمونه‌ها با چشمه کبالت برای ۱۰ سانتی‌گری دز ارزیابی شد. پاسخ دزیمر برای نمونه با درصد وزنی صفر، بسیار پایین بود؛ دلیل این عامل باز ترکیب زوج یون‌های تولید شده در داخل پلیمر خالص است. پاسخ دزیمتری برای نمونه ۰/۰۲ درصد وزنی در مقایسه با پلیمر خالص نسبتاً بیشتر شد. این عامل بدلیل حضور نانولوله کربن در بستر پلیمری است. نانولوله‌ها باعث می‌شوند زوج-یون‌های تولید شده در اثر تابش یونساز در داخل نمونه به‌روش جهش^۳ و تونل زنی^۴ به سمت الکترودها هدایت شوند. اما در حالت کلی چون کسر نانولوله‌های کربن مقدار کافی نیست و به‌دنبال آن اثر پرکولیشن الکتریکی صورت نگرفته، هنوز کسر زیادی از زوج یون‌های تولید شده در اثر تابش یونساز باز ترکیب می‌شوند و تنها کسر معدودی از آنها جمع‌آوری می‌شوند. بنابراین پاسخ نمونه ضعیف است.

برای نمونه ۰/۰۲ درصد، همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، حضور نانولوله‌های کربن به قدری است که در اثر اعمال اختلاف پتانسیل مابین الکترودهای نمونه، سبب ایجاد پرکولیشن الکتریکی می‌شود. بنابراین زوج-یون‌های تولید شده در داخل نمونه در اثر تابش یونساز بطور کامل به روش جهش و تونل زنی، جمع‌آوری شده‌اند و پاسخ قابل ملاحظه‌ای از نمونه دریافت شده است.

برای نمونه ۰/۰۴ درصد وزنی نانو لوله کربن، چون حضور نانولوله‌های کربن بیش از حد مجاز بوده، بنابراین نمونه رسانندگی الکتریکی بالایی پیدا کرده است. برای نمونه ذکر شده به محض اعمال اختلاف پتانسیل بین

^۳ Hopping

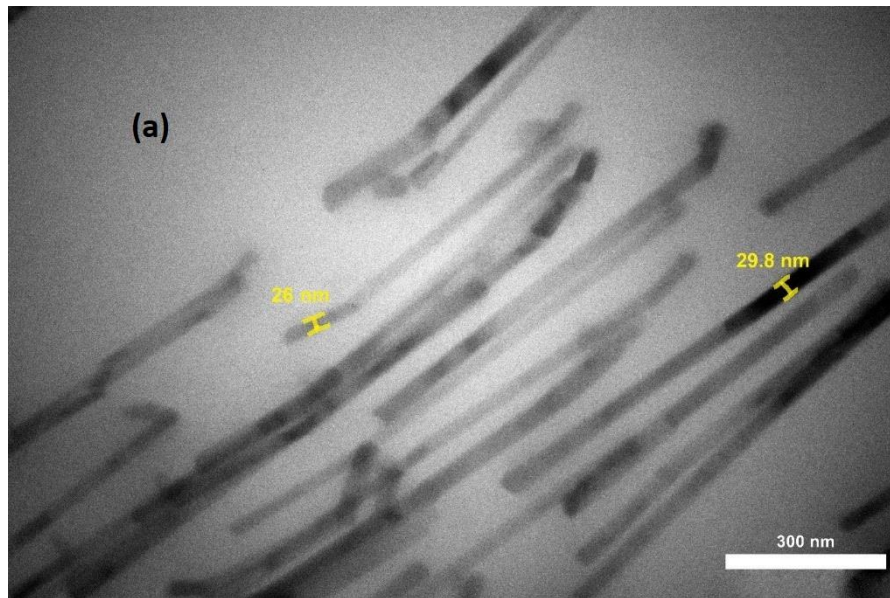
^۴ Tunneling

الکترودهای آنها توسط الکترومتر، در غیاب پرتو، الکترومتر آلام داده و هیچ پاسخی نشان نداد. لازم به ذکر است که نمونه مذکور در غیاب اختلاف پتانسیل و پرتوی تابش، در حدود 100 nC پاسخ نشان می‌داد. این عامل به دلیل بالا بودن درصد نانولوله کربن و خاصیت رسانندگی بالای نمونه است که سبب هدایت کسری از الکترون‌ها از الکتروده منفی به سمت الکتروده مثبت شود.

در پایان نانوکامپوزیت PVA/MWCNT-OH با درصد وزنی $0/02$ برای ساخت دزیتر انتخاب شد، سپس ویژگی‌های عملکردی این نمونه مورد بررسی قرار گرفت.

آنالیز TEM

به منظور بررسی وضعیت پراکندگی MWCNT-OH در ماتریس PVA، از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) استفاده شد. برای شروع، نانوکامپوزیت $0/02$ درصد به ابعاد $1 \times 1 \times 5 \text{ mm}^3$ بریده شد. قطعات برش به مدت ۳ روز در تتراکسید اسمیوم (OSO_4) نگهداری شدند. قطعات رنگ آمیزی شده قبل از برش‌های اولتراتین (70° نانومتر ضخامت) در رزین اپوکسی کم ویسکوزیته تعبیه شده بودند. سپس، ultramicrotomy با استفاده از یک Jung Reichert-Jung Ultracut- مجهز به چاقوی الماس Diatome VR 45 انجام شد. سرانجام، آنالیز TEM با استفاده از مدل Philips CM 30 (فیلیپس، هلند) در 200 کیلو ولت انجام شد [۴۲]. شکل ۴، نشان دهنده مورفولوژی و پراکندگی MWCNT-OH در نانوکامپوزیت است که با استفاده از TEM مورد بررسی قرار گرفت. طبق تصویر TEM، نانولوله‌ها به طور تصادفی در قالب لوله‌های ماکارونی مانند در ماتریس پلیمر PVA دیده می‌شوند. ضخامت متوسط MWCNT‌ها در حدود 29 نانومتر است.



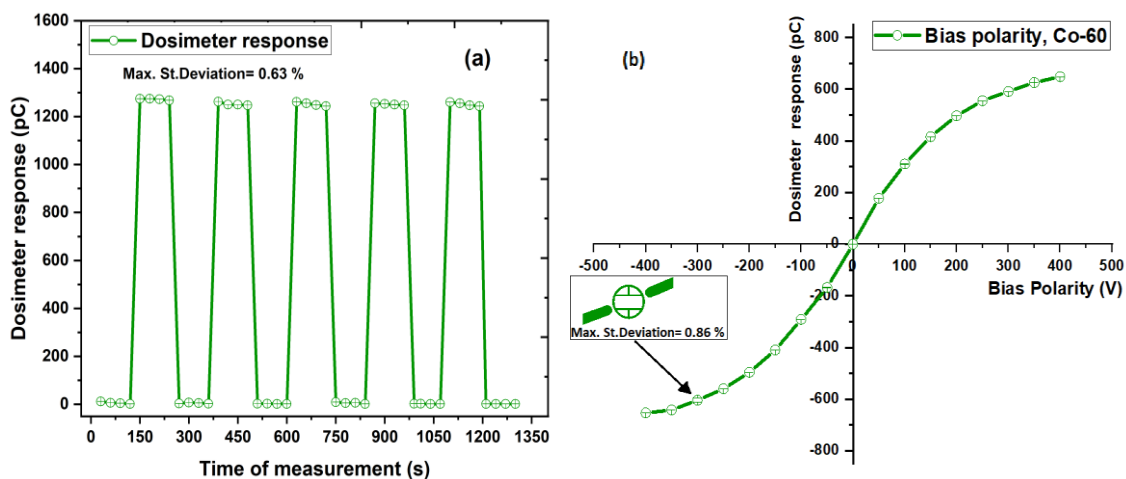
شکل ۴: تصویر TEM از نمونه $0/02$ درصد نانو کامپوزیت PVA/MWCNT-OH

اندازه‌گیری جریان نشتی و حساسیت

جریان نشتی دزیتر نانوکامپوزیت ساخته شده بر اساس استاندارد IEC 60731 [۴۳] اندازه‌گیری شد، به طوری که در مدت زمان ۵ ثانیه پس از پایان پرتودهی به مدت ۱۰ دقیقه، جریان نشتی باید به مقدار کمتر از یک درصد کاهش یابد. مطابق چهار بار اندازه‌گیری متوالی، میانگین جریان نشتی کمتر از 3 pA برای چندین

اندازه‌گیری ثبت شد. حداکثر تغییر در جریان نشتی بین چندین اندازه‌گیری ۱/۱ درصد است. مطابق شکل a.۵. با روشن و خاموش کردن پرتودهی به دزیمتر نانوکامپوزیت ساخته شده، توالی زمانی پاسخ دزیمتر ساخته شده اندازه‌گیری شد. توالی زمانی پاسخ دزیمتر نانوکامپوزیت تا ۱۲۰۰ ثانیه در طول پرتودهی با کبالت ۶۰ آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه بررسی شد مدت زمان جمع‌آوری بار الکتریکی برای هر اندازه‌گیری ۳۰ ثانیه بود (برای هر دو حالت روشن و خاموش بودن پرتودهی). برای باریکه تابشی کبالت-۶۰ دزیمتر، عمق cm ۵ در فانتوم اسلب ساخته شده از پلاستیک معادل آب با ابعاد $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ که این عمق مکانی است که دز توسط دزیمتر اتاقک یونش طبق پروتکل IAEA TRS 398 تعیین شده است [۶۰]. پرتودهی برای اندازه‌میدان مرجع $10 \times 10 \text{ cm}^2$ در فاصله SSD استاندارد (cm ۸۰ برای کبالت-۶۰ و cm ۱۰۰ برای شتابدهنده‌های خطی درمانی) انجام شد [۱۹]. اندازه‌گیری‌ها چهار بار (برای جریان‌های تاریک و جریان‌های نشتی) با حداکثر ۰/۳۲ درصد انحراف استاندارد (1σ) تکرار شد. همچنین، تغییر پاسخ کمتر از ۲ درصد پس از حدود ۱۲۰۰ ثانیه تابش در مقایسه با اندازه‌گیری اولیه همانطور که در شکل a.۵ نشان داده شده است، مشاهده شد.

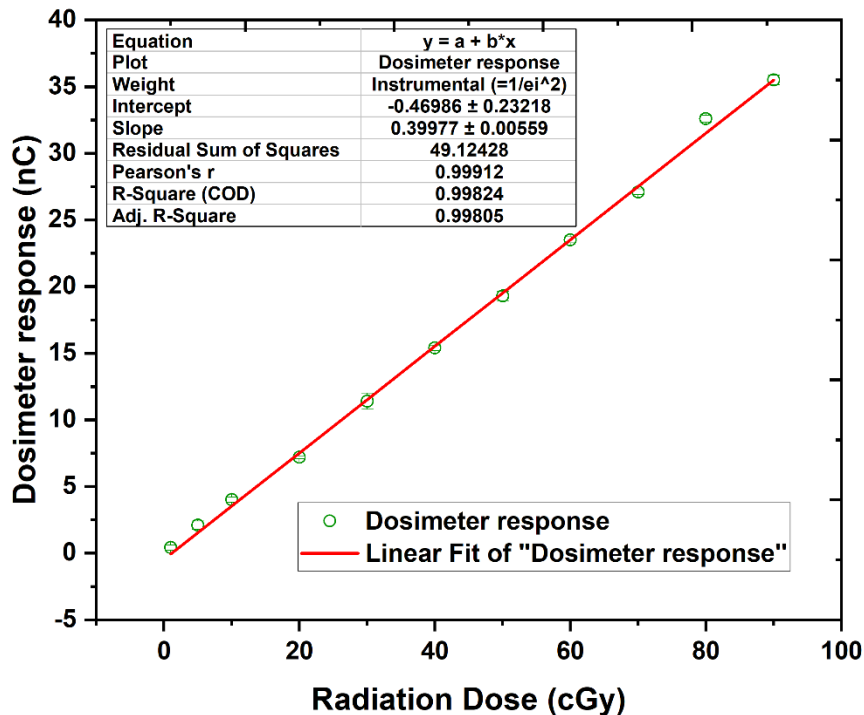
برای تعیین ولتاژ کاری دزیمتر نانوکامپوزیت، آزمون منحنی اشباع ضروری است. بنابراین پاسخ دزیمتر نانوکامپوزیت در دو بایاس قطب مثبت و منفی با تغییر ولتاژ از -۴۰۰ به +۴۰۰ ولت با طول گام ۵۰ ولت رسم شد. لازم به ذکر است که مدت زمان ۳۰ ثانیه به عنوان فرکانس نمونه برداری در نظر گرفته شد. برای جمع‌آوری بار الکتریکی مطابق شکل b.۵، رشد پاسخ دزیمتر نانوکامپوزیت تا ۲۵۰ ولت قابل توجه است، اما پس از آن، تغییرات کمتری تا ۴۰۰ ولت وجود دارد، بنابراین می‌توان ۴۰۰ ولت را به عنوان ولتاژ کاری این دزیمتر در نظر گرفت. لازم به ذکر است که اگر پاسخ دزیمتر نانوکامپوزیت تا ۱۰۰۰ ولت ادامه یابد، با الکترومتر دیگری مانند SuperMAXTM (USA, Standard imaging)، اشباع پاسخ ممکن است واضح تر دیده شود. در نهایت، توصیه می‌شود که اختلاف بین جریان‌های یونش اندازه‌گیری شده در پتانسیل قطبش مثبت و منفی باید کمتر از ۵/۰ درصد برای هر کیفیت پرتو تابشی باشد. اثر قطبیت با تغییر پاسخ دزیمتر بین پتانسیل قطبش مثبت و منفی مشاهده می‌شود [۴۴]. اثر قطبیت به طراحی دزیمتر و شرایط پرتودهی بستگی دارد [۴۴]. به‌طور کلی، طبق توصیه‌های بین‌المللی (IEC, ۱۹۹۷)، اثر قطبش نباید از حد توصیه شده ۱ درصد تجاوز کند [۴۵]. حداکثر اثر قطبی مقدار ۰/۴۸ درصد برای دزیمتر نانوکامپوزیت به‌دست آمد.



شکل ۵: (a) تحول زمانی پاسخ دزیومتر ۰/۰۲ درصد وزنی PVA/MWCNT-OH نانوکامپوزیت، (b) پاسخ اشباع برای دزیومتر HNC ساخته شده تابعی از ولتاژ اعمالی در میدان کبالت-۶۰.

خطی بودن و تکرارپذیری

بررسی خطی بودن پاسخ دزیومتر در میدان پرتو کبالت-۶۰، مطابق چیدمان ذکر شده در شکل ۶ برای محدوده دزهای مختلف تا ۹۰ cGy انجام شد. سپس پاسخ دزیومتر بر حسب دز مورد انتظار توسط اتافک یونش اندازه‌گیری شده ترسیم شد [۱۹]. برای ارزیابی تکرارپذیری، دزیومتر در دز ثابت ۱۰۰ cGy پرتو دهی شده و ده بار اندازه‌گیری متوالی تحت شرایط آزمایشی مشابه صورت گرفت. سپس تکرارپذیری دزیومتر از ضریب تغییرات ده اندازه‌گیری محاسبه شد [۱۹].

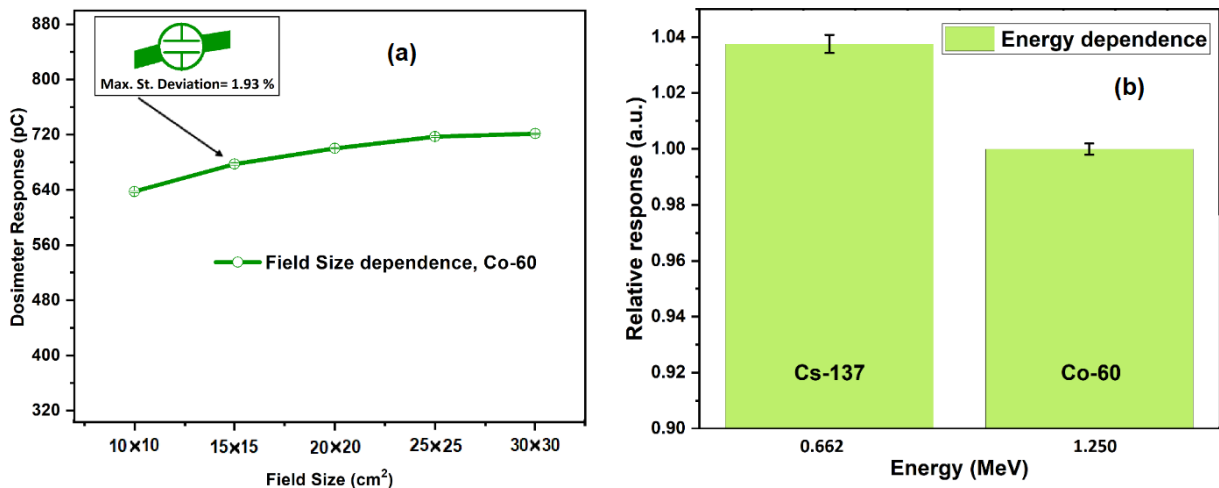


شکل ۶: ارزیابی خطی بودن پاسخ دزیومتر PVA/MWCNT (۰/۰۲ درصد وزنی) در میدان کبالت-۶۰. (مطابق شکل بیشترین خطای اندازه‌گیری شده ۰/۰۲ درصد برای مقدار دز ۳۰ سانتی گری است که در شکل بصورت میله‌ای نشان داده شده است)

وابستگی به انرژی و اندازه میدان پرتو

برای اندازه‌گیری وابستگی انرژی دزیمتر HNC، مطابق شکل ۷b، پاسخ دزیمتری با همان نرخ دوز با استفاده از دو منبع گاما Co-60 و Cs-137 اندازه‌گیری شد. با توجه به استاندارد IEC 60731، پاسخ دزیمتر برای انرژی تابشی مختلف باید کمتر از ۰.۵٪ در مقایسه با Co-60 باشد. پاسخ دزیمتر HNC برای Cs-137 ۳/۷۶ درصد بیشتر از Co-60 در همان نرخ دوز ۷/۰۶ میلی‌گری در دقیقه بود. بنابراین، پاسخ دزیمتر HNC مستقل از انرژی تابش، در بازه انرژی مورد مطالعه است.

برای بررسی وابستگی به‌اندازه میدان، دزیمتر HNC تا سرعت دوز ۳۹/۴۵ mGy/min در فاصله منبع تا سطح ۸۰ سانتی‌متر (SSD) برای اندازه میدان در محدوده ۱۰×۱۰ تا ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع با استفاده از پرتوهای گاما Picker V9 تابش شد. وابستگی اندازه میدان دزیمتر HNC با استفاده از مقادیر نسبی ارزیابی شد. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، تغییر در پاسخ دزیمتر با اندازه میدان تابشی ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع در مقایسه با ۱۰×۱۰ سانتی‌متر مربع، ۱۱/۶ درصد بود. همچنین حداکثر تغییرات پاسخ دزیمتر در چهار اندازه‌گیری قابل تکرار در هر اندازه میدان کمتر از ۰/۲٪ بود. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که وابستگی به ابعاد میدان تابش برای دزیمتر ساخته شده مناسب نیست، دلیل این امر ممکن است به دلیل اندازه بزرگ دزیمتر که در تحقیقات آتی نیاز به بررسی دارد. اما به‌طور کلی با افزایش اندازه میدان، انتظار می‌رود که پاسخ دزیمتر به دلیل افزایش شدت پرتو فرودی افزایش یابد که با نتایج کار حاضر مطابقت کامل دارد.

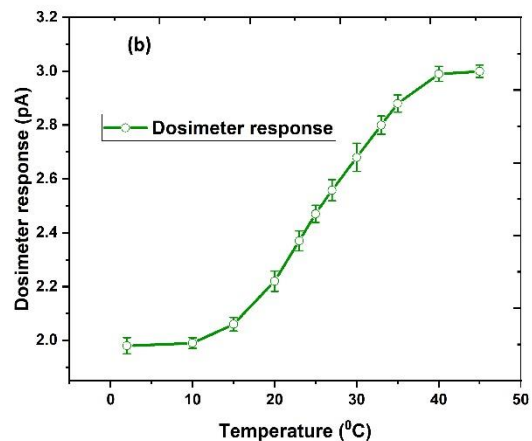


شکل ۷: تغییرات پاسخ دزیمتر با ابعاد میدان پرتو و همچنین تغییرات پاسخ آن با انرژی پرتو

بررسی اثر دما

اثر دما یکی از مهمترین پارامترهایی است که می‌تواند بر پاسخ دزیمترها تأثیر بگذارد. در دزیمترهای حاوی حجم حساس با هوای آزاد، چگالی هوا با دما تغییر می‌کند که در آن پاسخ دزیمتر بر این اساس تحت تأثیر قرار می‌گیرد. یکی از مزایای دزیمتر ارائه شده در این کار این است که حجم حساس آن جامد است و تغییرات دما نسبت به دزیمترهایی که حجم حساس آنها هوا است، تأثیر کمتری دارد. به‌طور کلی، اثر دما از ۰-۴۰ درجه

سانتی گراد برای دزیمر HNC ساخته شده بررسی شد. برای این منظور حجم حساس به مدت ۳۰ دقیقه در دمای صفر درجه سانتیگراد نگهداری شد. سپس بلافاصله به الکترومتر متصل شد و میزان جریان الکتریکی در دماهای مختلف تا ۲۰ درجه سانتی گراد ثبت شد. سپس حجم حساس مطابق شکل ۸. در داخل کوره داغ قرار داده شد و تغییرات دما توسط دماسنج کالیبره شده آزمایشگاه SSDL بررسی شد و همزمان با اعمال ولتاژ ۴۰۰ ولت مقدار جریان الکتریکی ثبت شد. از دما ۰ تا ۲۰ درجه سانتیگراد، تغییر قابل توجهی در پاسخ دزیمر وجود نداشت و مقدار جریان الکتریکی ۲ pA ثابت شد. سپس کوره داغ را روشن کرده و دمای آن را روی ۴۵ درجه سانتیگراد تنظیم شد. با گرم شدن کوره و افزایش دما، دما توسط دماسنج کنترل می‌شد، همچنین مقدار جریان الکتریکی ایجاد شده در غیاب اشعه توسط الکترومتر به‌طور همزمان ثبت شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از دمای بین ۲۰-۴۰ درجه سانتی گراد، جریان الکتریکی نشت شده به سرعت افزایش یافت، اما از دمای ۴۰-۴۵ درجه سانتی گراد، پاسخ دزیمر تقریباً تغییر نکرد. با افزایش دما، رسانایی کامپوزیت PVA-MWCNT افزایش می‌یابد. برای توجیه این رفتار می‌توان به این نکته اشاره کرد که افزایش دما منجر به افزایش رسانایی جهشی در پلیمر-نانوکامپوزیت می‌شود. این تأثیر در یافته‌های Das و همکاران [۵۲] مشاهده می‌شود. در طول اندازه‌گیری، چهار داده در هر دما ثبت شد و میانگین آن‌ها گزارش شد، حداکثر تغییر پاسخ دزیمر بین کمترین و بالاترین دما ۱/۱ pA بود. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که دما تأثیر محسوسی بر پاسخ دزیمر ندارد.



شکل ۸: نمایی از ست‌آپ و رفتار دزیمر ساخته شده در دماهای مختلف مابین ۰ تا ۴۵ درجه سانتی گراد

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ویژگی‌های عملکردی دزیمر صفحه موازی HNC مبتنی بر نانوکامپوزیت پلی‌وینیل‌الکل/ نانولوله کربنی چند جداره هیدروکسیل (PVA/MWCNT-OH) به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول، هدایت الکتریکی مربوط به حجم حساس ماده MWCNT-OH در کسرهای وزنی مختلف تعیین شد. بنابراین، نمونه ۰/۰۲ درصد وزنی به عنوان حجم حساس مناسب از نظر آستانه نفوذ الکتریکی معرفی شد. در مرحله پرتودهی و اندازه‌گیری، برخی از ویژگی‌های دزیمری این ماده مورد بررسی قرار گرفت. جریان نشتی دزیمر HNC حدود ۳ pA با حداکثر تغییرات ۱/۱ درصد اندازه‌گیری شد که مطابق با استاندارد IEC 60731 بود. پاسخ دزیمر در ولتاژ کاری ۴۰۰ ولت اشباع گردید. وابستگی پاسخ دزیمر به آهنگ دز در دز تابشی cGy

۱۰ اندازه‌گیری شد که در توافق با استاندارد IEC 60731 و سایر مطالعات مشابه بود. حداکثر تغییر در پاسخ دزیومتر در مقادیر مختلف دز کمتر از ۲٪ بود. همچنین خطی بودن پاسخ دزیومتر HNC بر اساس دز تابشی تا 90 cGy اندازه‌گیری شد که ضریب همبستگی $R^2=0.9980$ به دست آمد. پاسخ دزیومتر به زاویه پرتودهی و انرژی پرتو مطابق با استاندارد IEC 60731 بود. برای بزرگترین زاویه پرتو، پاسخ تقریباً 0.978 برابر پرتو مستقیم بود. برای وابستگی به انرژی، پاسخ پرتودهی گاما ^{137}Cs $1/0.37$ برابر چشمه ^{60}Co بود. پاسخ برای بزرگترین اندازه میدان پرتویی تقریباً $1/132$ برابر کوچکترین میدان پرتویی ($10 \times 10\text{ cm}^2$) بود. پاسخ دزیومتر به میزان 1 pA بین 0 تا 40 درجه سانتیگراد افزایش یافت. حساسیت دزیومتر HNC در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه (SSDL) برابر $99/92\text{ nC/Gy.cm}^3$ ارزیابی شد. حساسیت دزیومتر HNC حدود سه برابر بیشتر از دزیومترهای اتاقک یونش مرجع مانند صفحه موازی Roos (PTW, Freiburg, آلمان) بود که nC/Gy.cm^3 $34/28$ بود. ضریب کالیبراسیون برای دزیومتر HNC برابر $(\text{Gy/C}) \times 10^7 / 2/50$ ارزیابی شد. نتایج نشان داد که ماده PVA/MWCNT-OH می‌تواند یک گزینه مناسب برای دزیمتری میدان‌های پرتویی گاما با کاربردهای متعدد در سطح درمانی باشد.

منابع:

1. Malekie, S., F. Ziaie, and A. Esmali, Study on dosimetry characteristics of polymer-CNT nanocomposites: Effect of polymer matrix. Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors Associated Equipment, 2016. 816: p. 101-105.
2. S.R.H. Aghdam, S.M.R. Aghamiri, S. Malekie, A. Mosayebi, Performance Characteristics of a Parallel Plate Dosimeter Based on PVA/MWCNT-OH Nanocomposite for Photon Beam Radiation, Measurement, 207 (2022) 112419.
3. Veiskarami, D. Sardari, S. Malekie, F.B. Mofrad, S. Kashian, Evaluation of dosimetric characteristics of a ternary nanocomposite based on High Density Polyethylene/Bismuth Oxide/Graphene Oxide for gamma-rays, Scientific Reports, 12 (2022) 1-17.
4. A. Veiskarami, D. Sardari, S. Malekie, F.B. Mofrad, S. Kashian, Computational prediction of electrical percolation threshold in polymer/graphene-based nanocomposites with finite element method, Journal of Polymer Engineering, 42 (2022) 936-945.
5. Malekie, S. and F. Ziaie, Study on a novel dosimeter based on polyethylene-carbon nanotube composite. Nuclear Instruments Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors Associated Equipment, 2015. 791: p. 1-5.
6. Mehrara, R., et al., Introducing a novel low energy gamma ray shield utilizing Polycarbonate Bismuth Oxide composite. Scientific Reports, 2021. 11(1): p. 1-13.
7. Mosayebi, A., et al., Experimental study on polystyrene-MWCNT nanocomposite as a radiation dosimeter. Radiation Physics & Chemistry, 2019. 164: p. 108362.
8. Safdari, S.M., et al., Introducing a novel beta-ray sensor based on polycarbonate/bismuth oxide nanocomposite. Scientific Reports, 2022. 12(1): p. 1-10.

9. Malekie, S., H. Shooli, and M.A. Hosseini, Assessment of new composites containing polyamide-6 and lead monoxide as shields against ionizing photonic radiation based on computational and experimental methods. *Scientific Reports*, 2022. 12(1): p. 1-15.
10. Hosseini, M.A., S. Malekie, and M. Keshavarzi, Analysis of Radiation Shielding Characteristics of Magnetite/High Density Polyethylene Nanocomposite at Diagnostic Level Using the MCNPX, XCOM, XMuDat and Auto-Zeff Programs. *Moscow University Physics Bulletin*, 2021. 76(1): p. S52-S61.
11. Hosseini, M.A., S. Malekie, and F. Kazemi, Experimental evaluation of gamma radiation shielding characteristics of Polyvinyl Alcohol/Tungsten oxide composite: A comparison study of micro and nano sizes of the fillers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022. 1026: p. 166214.
12. Shah, A.H. and T. Rizvi, Improvement in electrical and thermal behavior of polystyrene/multiwalled carbon nanotubes nanocomposites. *Measurement*, 2013. 46(4): p. 1541-1550.
13. Stan, F., R.T. Rosculet, and C. Fetecau, Direct current method with reversal polarity for electrical conductivity measurement of TPU/MWCNT composites. *Measurement*, 2019. 136: p. 345-355.
14. Knoll, G.F., *Radiation detection and measurement*. 2010: John Wiley & Sons.
15. Vahabi, S.M. and M.S. Zafarghandi, Investigations of radiation properties, photon interaction parameters and water equivalence of some polymers used in the construction of ionization chambers for low energy X-ray beams. *Measurement*, 2020. 151: p. 107210.
16. Jin, S.-H. and G.-S. Kim, Simultaneous measurements of burning velocity and temperature distribution of combustion using UV laser Rayleigh scattering. *Measurement*, 2021. 169: p. 108505.
17. Podgoršak, E.B., *Radiation physics for medical physicists*. Berlin: Springer, 2006. 1.
18. Sattari, M.A., et al., Applicability of time-domain feature extraction methods and artificial intelligence in two-phase flow meters based on gamma-ray absorption technique. *Measurement*, 2021. 168: p. 108474.
19. Feizi, S., et al., Evaluation of dosimetric characteristics of graphene oxide/PVC nanocomposite for gamma radiation applications. *Radiochimica Acta*, 2017. 105(2): p. 161-170.
20. Baghani, H.R., et al., Evaluating the performance characteristics of some ion chamber dosimeters in high dose per pulse intraoperative electron beam radiation therapy. *Physica Medica*, 2019. 58: p. 81-89.
21. Saminathan, S., et al., Dosimetric Performance of Newly Developed Farmer-Type Ionization Chamber in Radiotherapy Practice. *Technology in Cancer Research Treatment*, 2016. 15(6): p. NP113-NP120.
22. PTW, *Detectors for Ionizing Radiation including Codes of Practice*. 2020.
23. Swanpalmer, J., Reference dose determination in ^{60}Co and high-energy radiotherapy photon beams by using Farmer-type cylindrical ionization chambers—an experimental investigation. *Biomedical Physics Engineering Express*, 2020. 6(4): p. 045003.
24. Szymko, M., A. Knyziak, and M. Derlaciński, Graphite ionization chamber as an ionometric standard of absorbed dose to water for Co-60 gamma radiation. *Measurement*, 2022. 194: p. 110928.



25. Mosayebi, A., S. Malekie, and F. Ziaie, A feasibility study of polystyrene/CNT nano-composite as a dosimeter for diagnostic and therapeutic purposes. *Journal of Instrumentation*, 2017. 12(05): p. P05012.
26. Kyatsandra, S. and R. Wilkins, Total ionizing dose X-ray radiation effects on MWCNT/PMMA thin film composites. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2014. 14(1): p. 152-158.
27. E.V. Barrera, R.W., M. Shofner, M.X. Pulikkathara, R. Vaidyanathan, Functionalized Carbon Nanotube-Polymer Composites and Interaction with Radiation. H. William (Ed.), Marsh Rice University, TX, US, 2010.
28. Rabaeh, K.A., Bany Salman, N., Aldweri, F., Saleh, H., Eyadeh, M., Awad, S. and Oglat, A., Substantial influence of magnesium chloride inorganic salt (MgCl₂) on the polymer dosimeter containing N-(Hydroxymethyl) acrylamide for radiation therapy. *Results in physics*, 2021. 22, 103862,.
29. Nezhad, Z.A., & Geraily, G, A review study on application of gel dosimeters in low energy radiation dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, 2022. 179, 110015.