



مشخصه یابی و بررسی خواص مکانیکی ماده حساس دزیمتر نانوکامپوزیت پلی استایرن/نانولوله کربن

چند دیواره

آرمین مسیبی^۱، شهریار ملکی^{۱*}، فرهود ضیائی^۲، فرح خویلو^۲، اعظم اخوان^۲

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج - ایران

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران - ایران

چکیده:

با توجه به گسترش مراکز پرتودرمانی در کشور، اندازه‌گیری دقیق میدان پرتویی جهت درمان از اهمیت خاصی برخوردار است. در پژوهش‌های پیشین توسط نویسندگان، ماده نانوکامپوزیت پلی استایرن-نانولوله کربنی چند دیواره (PS-MWCNT) به عنوان یک دزیمتر برخط به منظور اندازه‌گیری آهنگ دز در ناحیه پرتودرمانی معرفی شد. در این پژوهش، ماده دزیمتری PS-MWCNT در درصدهای وزنی مختلف 0.05، 0.28 و 1 wt% به روش ترکیب-محلولی ساخته شد. در ادامه، بررسی خواص مکانیکی این ماده شامل آزمون استحکام کششی و مشخصه یابی ساختار فیزیکی-شیمیایی آن از طریق آزمونهای XRD، FESEM، Raman Spectroscopy و FTIR در دستور کار قرار گرفت. تصاویر FESEM از پخش یکنواخت نانولوله های کربنی در بستر پلیمر دلالت داشت. آزمونهای XRD و طیف سنجی رامان به ترتیب با نشان دادن قله‌های مشخصه نانولوله کربن در زوایا و اعداد موج مشخص از صحت وجود نانولوله کربن در بستر پلی استایرن حکایت داشت. نتایج آزمون مکانیکی نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی در بستر پلیمری، از مقدار ازدیاد طول در نقطه شکست کم شده و به مقدار استحکام کششی نمونه‌ها افزوده می‌شود. همچنین آزمون FTIR در محدوده $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ بر حضور گروه‌های عاملی مختلف در تطابق با مراجع استاندارد صحت گذاری نمود.

کلیدواژه‌ها: دزیمتر، نانوکامپوزیت پلی استایرن/نانولوله کربن، خواص مکانیکی، مشخصه یابی، طیف سنجی رامان

Characterization and Evaluation of Mechanical Properties of Sensitive Material of Polystyrene/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposite Dosimeter

Armin Mosayebi¹, Shahryar Malekie^{1*}, Farhood Ziaie², Farah Khoylou², Azam Akhavan²

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX: 31485-498, Karaj, Iran.

2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

Abstract:

Due to the development of radiotherapy centers in our country, precise measurement of the radiation field for the treatment is of particular importance. In the previous studies by the authors, Polystyrene/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposite (PS-MWCNT) was introduced as a real-time dosimeter to measure the dose rate at the radiotherapy level. In this study, PS-MWCNT dosimetry material was fabricated in different weight percentages of 0.05, 0.28 and 1 wt% via the mixed-solution method. Then, the study of mechanical properties of this material, including tensile strength test and characterization of its Physico-Chemical structure through FESEM, XRD, FTIR and Raman Spectroscopy tests were on the agenda. FESEM images indicated uniform dispersion of carbon nanotubes in the polymer matrix. XRD and Raman spectroscopy tests showed the presence of carbon nanotubes in polystyrene matrix via exhibiting the characteristic peaks of carbon nanotubes at specific angles and wavenumbers respectively. The results of mechanical test showed that by increasing the weight percentage of carbon nanotubes in the polymer matrix, the amount of elongation at the breaking point decreases and the amount of tensile strength of the samples increases. Also FTIR test at the range of $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ confirmed the presence of different functional groups in accordance with standard references.

Keywords: Dosimeter, Polystyrene/Multi-Walled Carbon Nanotube Nanocomposite, Mechanical Properties, Characterization, Raman Spectroscopy.

Email: smaleki@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

به منظور اندازه‌گیری آهنگ دز در میدان‌های پرتویی در سطح پرتودرمانی، معمولاً از تجهیزات پیچیده‌ای نظیر اتا‌فک یونش و الکترومتر استفاده می‌شود. با توجه به گران قیمت بودن این تجهیزات و همچنین وجود تحریم‌های اعمالی جهت واردات این گونه تجهیزات، ایده طراحی و ساخت یک سیستم دزیمتری آنالین و مقرون به صرفه بر پایه ماده نانوکامپوزیت پلیمر-نانولوله کربنی برای اولین بار مطرح گردید و دانش فنی در زمینه طراحی و ساخت این سیستم دزیمتری جدید در داخل کشور فراهم گردید. در پژوهش‌های پیشین توسط نویسندگان، ماده نانوکامپوزیت پلی استایرن-نانولوله کربنی چند دیواره (PS-MWCNT) به عنوان یک دزیمتر برخط به منظور اندازه‌گیری آهنگ دز در ناحیه پرتودرمانی معرفی شد [۱-۴]. در حین پرتودهی گاما، به واسطه اندرکنش‌های مختلف نظیر اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید جفت، جفت الکترون-حفره‌هایی درون ماده نانوکامپوزیت ایجاد می‌شود، که با اعمال ولتاژ مناسب، ضمن جلوگیری از بازترکیب یون‌ها، اثر پرتو به صورت یک سیگنال الکتریکی در مدار به صورت تغییر جریان یا ولتاژ الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. افزودن نانولوله‌های کربنی به بستر پلیمری در کسر وزنی خاصی موسوم به آستانه گذر الکتریکی (EPT)، منجر به افزایش چند مرتبه‌ای رسانندگی الکتریکی کامپوزیت مذکور می‌شود. نتایج تحقیقات قبلی محققان این طرح نشان داد که بهترین ناحیه برای دزیمتری پرتوهای گاما با استفاده از کامپوزیت پلیمر/نانولوله کربن، نزدیک ناحیه EPT است [۴-۷]. حساسیت پذیری یا به عبارتی کمترین آهنگ دز قابل آشکارسازی ($MDDR^1$) برای پرتوهای گاما در این دسته کامپوزیتها از طریق کنترل درصد وزنی نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری قابل تغییر است. عوامل مختلفی بر پاسخ آشکارساز مذکور تأثیرگذار هستند؛ از جمله درصد بلورینگی بستر پلیمری، درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، ضخامت کامپوزیت و سایر عوامل. مطالعات تجربی و نظری تیم پژوهشی حاضر نشان داده که اندازه‌گیری تابشهای گاما در محدوده آهنگهای دز تشخیصی-درمانی از مرتبه چند mGy/min توسط این دسته دزیمترها محقق شده است [۲-۱۲]. استحکام مکانیکی یک دزیمتر در بلند مدت از جمله مسائلی است که بایستی لحاظ شود. همچنین پخش همگن نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری تأثیر به‌سزایی در ویژگی‌های دزیمتری ماده نانوکامپوزیت‌های پلیمری دارد. لذا در پژوهش حاضر، بررسی خواص مکانیکی ماده دزیمتر نوظهور PS/MWCNT شامل تستهای استحکام مکانیکی و کششی نمونه‌های نانوکامپوزیت و همچنین مشخصه‌یابی ساختار فیزیکی-شیمیایی این ماده از طریق آزمونهای FTIR, XRD, FESEM و Raman Spectroscopy مورد بررسی قرار گرفت.

۲. روش کار

ابتدا ماده پلی استایرن با نماد تجاری GPPS-1540 از پتروشیمی تبریز تهیه شد. در ادامه نانولوله کربنی چند دیواره با قطر 50 nm و طول $50\text{ }\mu\text{m}$ دارای هدایت الکتریکی $10^5\text{--}10^7\text{ S/m}$ از شرکت US Nano تهیه شد. حلالهای شیمیایی دی کلرومتان و تولوئن از شرکت مرک آلمان خریداری شد. چسب نقره تولید داخل نیز به منظور ساخت الکترود بر نمونه‌های نانوکامپوزیت تهیه شد. قالب‌های فولادی به ابعاد $22 \times 10\text{ mm}^2$ به ضخامت 1 mm برای ساخت دزیمتر تهیه شد. به منظور ساخت نانوکامپوزیت PS/MWCNT در درصدهای وزنی مختلف، از روش مخلوط-محلولی^۲ بهره‌گیری شد. بدین منظور در ابتدا مقدار مشخصی نانولوله کربن چند دیواره درون حلال دی کلرومتان ریخته شد و در دستگاه همزن اولتراسونیک به مدت یک ساعت فراصوت دهی^۳ شد. سپس مقدار مشخص از پلی استایرن درون 10 ml حلال تولوئن بر روی دستگاه همزن مغناطیسی به مدت دو ساعت در دمای $135\text{ }^\circ\text{C}$ قرار گرفت. روی آن با فویل آلومینیوم پوشانده شد تا از تبخیر حلال در دمای بالا جلوگیری شود که این عمل باعث حل شدن پلیمر داخل حلال می‌شود. پس از حل شدن کامل پلیمر و بالا رفتن ویسکوزیته برای ساخت نانوکامپوزیت با درصد وزنی معین، محلول دی کلرومتان و نانولوله کربنی به محلول پلیمر و تولوئن اضافه شد. با توجه به اختلاف نقطه جوش دو حلال دی کلرومتان (نقطه جوش $39.6\text{ }^\circ\text{C}$) و تولوئن (نقطه جوش $111\text{ }^\circ\text{C}$) مشاهده شد که هنگام ترکیب نهایی این دو محلول با یکدیگر در دمای $95\text{ }^\circ\text{C}$ ، دی کلرومتان داخل ترکیب حلال دی کلرومتان و نانولوله کربنی شروع به بخار شدن کرده که باعث ایجاد کاواک‌ها یا حباب‌هایی در محلول ترکیبی شده و این عمل باعث شکستن کلوخه‌های نانولوله‌های کربنی و در نهایت پخش بهتر و یکنواخت‌تر این ذرات درون بستر پلیمری می‌گردد. در شکل ۱ نمای از مراحل ساخت و آماده‌سازی نمونه‌های نانوکامپوزیت PS/MWCNT به تصویر کشیده شده است. در این پژوهش، نانوکامپوزیت PS-MWCNT با درصدهای وزنی مختلف شامل نمونه شاهد (پلیمر خالص)، 0.05 wt\% ، 0.28 wt\% و 1 wt\% به روش مخلوط محلولی ساخته شد.

¹ Minimum Detectable Dose Rate

² Mixed-Solution

³ Ultra-sonication



شکل ۱. نمایی از مراحل ساخت و آماده سازی نمونه های نانوکامپوزیت PS/MWCNT به عنوان ماده حساس دزیومتر، (الف) قالبهای فولادی دزیومتر، (ب) پودر نانولوله کربن چند دیواره، (پ) گرانول پلی استایرن، (ت) اولتراسونیک پروبدار برای پخش نانولوله کربن در بستر پلیمر، (ث) قالبهای سیلیکون، (ج) دستگاه پرس داغ و (چ) نمونه‌های نهایی نانوکامپوزیت ساخته شده.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. آزمون FESEM

همانطوری که از شکل ۲ پیداست، نمایی از آزمون میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FESEM به ترتیب برای سه نمونه با درصد‌های وزنی 0.05 wt%، 0.28 wt% و 1 wt% در مقیاس‌های 5 μm و 1 μm به تصویر کشیده شده است. در آنالیز میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی FESEM با مدل MIRA3TESCAN-XMU، همانطوری که از این شکل‌ها پیداست، دو نمونه 0.05wt% و 0.28wt% از پخش نسبتاً همگنی نسبت به نمونه 1wt% برخوردار هستند؛ نمونه حاوی 1wt% احتمالاً به دلیل کلوخه‌ای شدن^۴ نانو لوله های کربنی به صورت یکنواخت پخش نشده است؛ البته زمان فراصوت دهی و مقدار توان دستگاه اولتراسونیک پروبدار نیز از جمله عوامل تأثیرگذار در چگونگی پخش نانو لوله های کربنی در بستر پلیمری به شمار می‌روند. این اثر در اکثر مقالات تجربی دیگران نیز گزارش شده است [۱۳، ۱۴]. درصد وزنی بهینه برای دزیمتری، قبل از آستانه گذر الکتریکی (EPT) می باشد، چون جریان تاریک در غیاب پرتو نیز باید پایین باشد تا نسبت سیگنال به نویز محسوس باشد. می‌توان گفت که روش محلولی و استفاده از سیستم اولتراسونیک پروبدار با فرکانس 20 kHz و توان 200 W روشی مفید در توزیع یکنواخت نانو لوله های کربنی در بستر پلی استایرن است. همچنین قطر نانولوله ها نیز روی شکل ها نمایش داده شده است که از ابعاد درج شده در کاتالوگ ماده (50 nm) اندکی بزرگتر بوده که به نظر می‌رسد لایه ای از پلیمر روی بدنه نانو لوله ها لایه نشانی شده باشد.

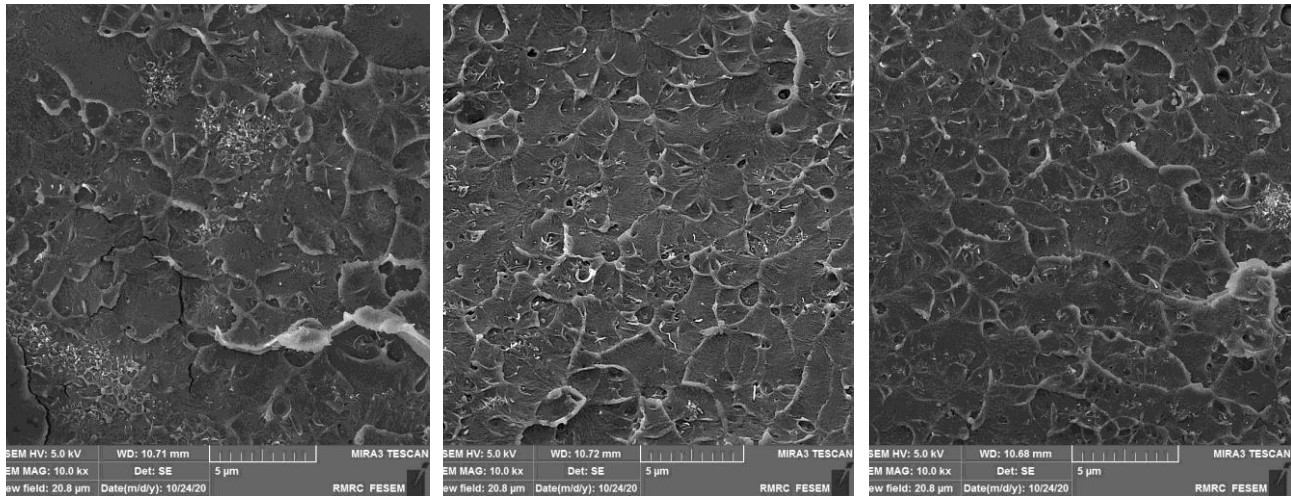
۳.۲. نتایج XRD

در شکل ۳ نتیجه آزمون XRD بر روی نمونه نانوکامپوزیت MWCNT-PS 1 wt% به تصویر کشیده شده است. همانگونه که از این شکل پیداست، وجود قله در زاویه 16° مربوط به پلی استایرن با فرمول (C₈H₈)_n و دو قله در زوایای 30 و 43 درجه مربوط به حضور MWCNT در بستر PS است. این نتیجه در توافق با سایر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌باشد [۱۵، ۱۶].

⁴ Agglomeration

۳.۳ نتایج طیف سنجی رامان

در شکل ۴ آنالیز طیف سنجی رامان پودر MWCNT به تصویر کشیده شده است. همانطوری که از شکل پیداست، باندهای D و G در به ترتیب اعداد موج 1344 cm^{-1} و 1575 cm^{-1} معرف مقدار نقص های ساختاری و خلوص گرافیت می باشد؛ البته در 2680 cm^{-1} نیز باند G' قابل مشاهده بوده که بیانگر مد ثانویه ارتعاش اتمهای کربن MWCNT می باشد. نتایج این آنالیز در تطابق با سایر پژوهش‌های مشابه است [۱۷، ۱۸].

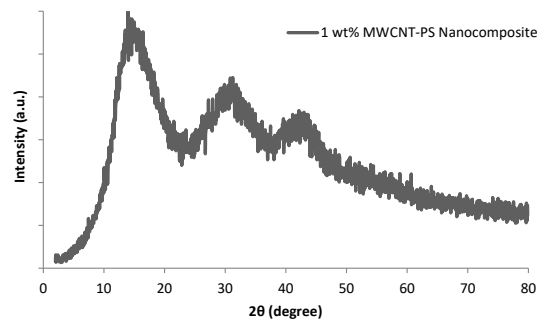


(پ)

(ب)

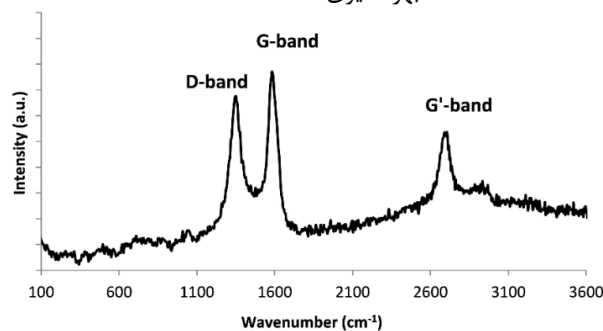
(الف)

شکل ۲. نمایی از آزمون FESEM روی نمونه های مختلف الف) (0.05 wt% ، ب) (0.28 wt% و پ) (1 wt%



شکل ۳. نمایی از آزمون XRD روی نمونه نانوکامپوزیت 1 wt% MWCNT-PS

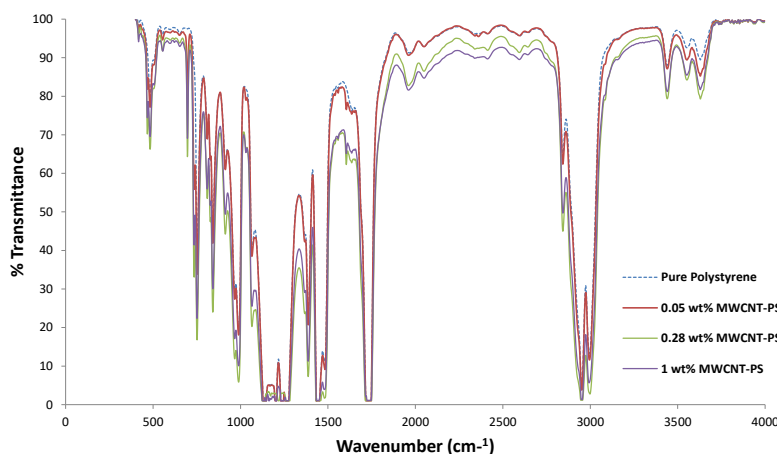
شایان ذکر است که به منظور طیف سنجی رامان از دستگاه Takram P50C0R10 با لیزر Nd YAG ، طول موج 532 nm ، توان 100 mW ، قدرت تفکیک طیف 10 cm^{-1} و در بازه $100\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ بهره گیری شد.



شکل ۴. نمایی از آزمون طیف سنجی رامان بر روی نمونه MWCNT

۳.۴ نتایج FTIR

به منظور بررسی ترکیبات شیمیایی نانوکامپوزیت PS/MWCNT، مطابق شکل ۵، طیف FTIR از نمونه‌های مختلف به روش طیف عبوری^۵ در محدوده عدد موج $400-4000\text{ cm}^{-1}$ انجام شد. همانطوری که از شکل ۵ پیداست، محدوده $1700-1750\text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروههای C=O بوده که در تطابق با کار تجربی خان و دیگران است [۱۹]. همچنین در محدوده 3025 cm^{-1} کشش C-H^۶ مربوط به حلقه آروماتیک پلی استایرن قابل مشاهده است. همچنین چندین باند مربوط به باند دوگانه کربن-کربن مربوط به کشش ارتعاشی حلقه آروماتیک در محدوده عددهای موج 1600 cm^{-1} و 1492 cm^{-1} و 1452 cm^{-1} قابل مشاهده است. همچنین جذب در محدوده 500 cm^{-1} مربوط به مدهای ارتعاشی مختلف PS می‌باشد. این موضوع با سایر مقالات مرتبط تطابق خوبی نشان می‌دهد [۲۰].



شکل ۵. طیف FTIR نانوکامپوزیت PS/MWCNT در کسرهای وزنی مختلف.

۳.۵ بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها

به منظور انجام تستهای مکانیکی بر روی نمونه‌های مختلف نانوکامپوزیت MWCNT-PS، مطابق شکل ۶، ابتدا نمونه‌های مذکور از طریق یک قالب استاندارد (دمبلی شکل) آماده شد. در شکل ۷ نتایج تستهای استحکام کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست نمونه‌های نانوکامپوزیت MWCNT-PS با استفاده از دستگاه کشش HIWA-200 در کسرهای وزنی مختلف به تصویر کشیده شده است. نتایج آزمون مکانیکی نشان داد که با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری، از مقدار ازدیاد طول در نقطه شکست کم شده و به مقدار استحکام کششی نمونه‌ها افزوده می‌شود. البته عوامل مختلفی از جمله کلوخگی نانو لوله‌های کربنی در کسرهای وزنی بالا (در اینجا نمونه 1 wt%) و همچنین وجود نقص‌های ساختاری موجود در نمونه نانوکامپوزیت می‌تواند در تعیین مقدار نهایی استحکام کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست تأثیرگذار باشد.

⁵ Transmittance

⁶ Stretching



(ب)

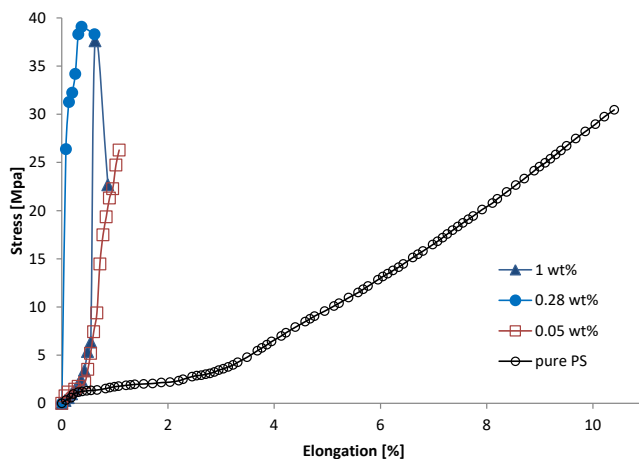


(الف)

شکل ۶. نمایی از آماده سازی نمونه های نانوکامپوزیت برای اندازه گیری خواص مکانیکی، الف) تهیه نمونه ها با استفاده از قالب استاندارد دمبلی شکل و ب) نمایی از سیستم اندازه گیری استحکام مکانیکی.

۴. نتیجه گیری

این پژوهش به منظور مشخصه یابی و بررسی خواص مکانیکی ماده حساس دزیتر نانوکامپوزیت پلی استایرن- نانو لوله کربن چند دیواره انجام شد. بدین منظور در ابتدا نمونه های نانوکامپوزیت PS/MWCNT در کسرهای وزنی مختلف یعنی پلیمر خالص و 0.05 wt%، 0.28 wt% و 1 wt% به روش ترکیب محلولی ساخته شد. در ادامه آزمونهای FTIR، XRD، Raman Spectroscopy و FESEM به منظور مشخصه یابی این ماده دزیتری انجام شد. نتایج این آزمونها ضمن تایید حضور نانو لوله کربنی چند دیواره در بستر پلی استایرن، بر پخش همگن نانو لوله های کربنی در نانوکامپوزیت صحه گذاری نمود. همچنین نتایج آزمون مکانیکی نشان داد که در اثر افزایش درصد وزنی نانولوله های کربنی در بستر پلی استایرن، مقدار ازدیاد طول در نقطه شکست کم شده و مقدار استحکام کششی نمونه ها افزوده می یابد. لذا این ماده از نظر ساختار مکانیکی می تواند به عنوان یک دزیتر برخط مورد استفاده قرار بگیرد.



شکل ۷. مقدار اندازه گیری شده استحکام مکانیکی بر حسب درصد ازدیاد طول برای چهار نمونه نانوکامپوزیت در کسرهای وزنی مختلف.

۵. تشکر و قدردانی

از کلیه همکاران پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها به خصوص همکاران آزمایشگاه پلیمر-مرکز تابش گاما آقای کامرانی و خانم نیک فرجام که در انجام این پژوهش مشارکت نموده اند، قدردانی می شود.



۶. مراجع

- [۱] A. Mosayebi, S. Malekie, F. Ziaie, H. Daneshvar, Experimental evaluation of thermal stability of PS-MWCNT nanocomposite as a real-time dosimeter, Iranian Journal of Medical Physics, 15 (2018) 14-14.
- [۲] A. Mosayebi, F. Ziaie, S. Malekie, A. Rahimi, Fabrication of low electrical percolation threshold Polystyrene/Multi-Walled Carbon Nanotube nanocomposites via a mixed solution method with dosimetry purposes, in: E. Tel, I.H. Sarpun, H. Ozdogan, M. Sekerci (Eds.) 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), Amasya University, Amasya, Turkey, 2019, pp. 258-263.
- [۳] A. Mosayebi, S. Malekie, A. Rahimi, F. Ziaie, Experimental study on polystyrene-MWCNT nanocomposite as a radiation dosimeter, Radiat. Phys. Chem., (2019) 108362.
- [۴] A. Mosayebi, S. Malekie, F. Ziaie, A feasibility study of polystyrene/CNT nano-composite as a dosimeter for diagnostic and therapeutic purposes, Journal of Instrumentation, 12 (2017) P05012.
- [۵] S. Malekie, F. Ziaie, Study on a novel dosimeter based on polyethylene-carbon nanotube composite, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 791 (2015) 1-5.
- [۶] S. Malekie, F. Ziaie, A. Esmaeli, Study on dosimetry characteristics of polymer-CNT nanocomposites: Effect of polymer matrix, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 816 (2016) 101-105.
- [۷] S. Malekie, F. Ziaie, S. Feizi, A. Esmaeli, Dosimetry characteristics of HDPE-SWCNT nanocomposite for real time application, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 833 (2016) 127-133.
- [۸] S. Malekie, F. Ziaie, M.A. Naeini, Simulation of polycarbonate-CNT nanocomposite dosimeter based on electrical characteristics, Kerntechnik, 81 (2016) 647-650.
- [۹] A. Mosayebi, S. Malekie, F. Ziaie, H. Daneshvar, Linearity response characterization of Polystyrene/Graphene oxide nanocomposite as real-time dosimeter for therapeutic purposes, Iranian Journal of Medical Physics, 15 (2018) 391-391.
- [۱۰] A. Mosayebi, S. Malekie, F. Ziaie, H. Daneshvar, Experimental evaluation of thermal stability of PS-MWCNT nanocomposite as a real-time dosimeter Iranian Journal of Medical Physics, 15 (2018) 14-14.
- [۱۱] S. Malekie, F. Ziaie, Experimental evaluation of dose-response of high density polyethylene/multiwalled carbon nanotube nanocomposite against gamma rays through a resistive dosimeter, in: E. Tel, I.H. Sarpun, H. Ozdogan, M. Sekerci (Eds.) 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), Amasya University, Amasya, Turkey, 2019, pp. 252-257.
- [۱۲] S. Maleki, F. Ziaie, M.M. Larijani, Simulation of a novel dosimeter based on electrical characteristics of polymethyl Methacrylate-Carbon nanotube composite, Nuclear Science and Technology, 79 (2017) 53-62.
- [۱۳] S. Gong, Z.H. Zhu, S.A. Meguid, Carbon nanotube agglomeration effect on piezoresistivity of polymer nanocomposites, Poly, 55 (2014) 5488-5499.
- [۱۴] S. Gong, Z.H. Zhu, J. Li, S.A. Meguid, Modeling and characterization of carbon nanotube agglomeration effect on electrical conductivity of carbon nanotube polymer composites, J. Appl. Phys., 116 (2014) 194306.



- [۱۵] P. Sen, K. Suresh, R.V. Kumar, M. Kumar, G. Pugazhenti, A simple solvent blending coupled sonication technique for synthesis of polystyrene (PS)/multi-walled carbon nanotube (MWCNT) nanocomposites: Effect of modified MWCNT content, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1 (2016) 311-323.
- [۱۶] C. Nicolăescu, L. Olar, R. Stefan, M. Todica, C.-V. Pop, XRD and ir investigations of some commercial polystyrene samples thermally degraded, *Studia Universitatis Babes-Bolyai, Chemia*, 63 (2018).
- [۱۷] S. Malekie, M.A. Hosseini, A.R. Vatankhah, A preliminary analysis of the dosimetry properties of Nano-carbon structures in the presence of the electron beams at high doses levels, in: E. Tel, I.H. Sarpun, H. Ozdogan, M. Sekerci (Eds.) 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT), Amasya University, Amasya, Turkey, 2019.
- [۱۸] A.R. Vatankhah, M.A. Hosseini, S. Malekie, The characterization of gamma-irradiated carbon-nanostructured materials carried out using a multi-analytical approach including Raman spectroscopy, *Appl. Surf. Sci.*, 488 (2019) 671-680.
- [۱۹] M.U. Khan, V.G. Gomes, I.S. Altarawneh, Synthesizing polystyrene/carbon nanotube composites by emulsion polymerization with non-covalent and covalent functionalization, *Carbon Balance Manag.*, 48 (2010) 2925-2933.
- [۲۰] S. Mallakpour, A. Nezamzadeh Ezhieh, Preparation of polystyrene/MWCNT-Valine composites: Investigation of optical, morphological, thermal, and electrical conductivity properties, *Polymers for Advanced Technologies*, 29 (2018) 1182-1190.