

بررسی طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون و رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / نانواکسید گرافن

محمد کوهکن^۱، علی اکبر مهماندوست خواجهداد^۱ و حامد خسروی^{۲*}

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۲- گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده: طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون به حجم آزاد پلیمرها در مقیاس اتمی حساس است. به همین دلیل در سالیان اخیر، این روش به‌عنوان فناوری منحصر به فردی برای اندازه‌گیری اندازه حفره‌های تشکیل‌دهنده حجم آزاد در پلیمرها مورد استفاده قرار گرفته است. روش طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون، با قابلیت تعیین اندازه، شکل و غلظت حفره‌ها می‌تواند به‌عنوان ابزار شناسایی مکمل در کنار سایر روش‌های تجربی میکروسکوپی مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون برای بررسی نمونه‌های پلیمری زمینه اپوکسی، حاوی درصدهای وزنی مختلف نانواکسید گرافن (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد)، مورد مطالعه قرار گرفت. از ایزوتوپ پرتوزای ^{22}Na با فعالیت حدود $5\ \mu\text{Ci}$ به‌عنوان چشمه پوزیترون‌دهنده استفاده شد. از آشکارسازهای سوسونز پلاستیکی سریع ایرانی مدل NT-850 با زمان صعود تب کمتر از ۲ نانوثانیه استفاده شد. قدرت تفکیک زمانی سیستم با استفاده از ایزوتوپ پرتوزای ^{60}Co ، برابر ۲۲۵ پیکوثانیه اندازه‌گیری شد. همچنین آزمون کشش تک‌محوری روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که کم‌ترین میزان حجم حفرات آزاد ($83/87\ \text{A}^3$) مربوط به نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانواکسید گرافن است که کاهش حدود ۸ درصدی حجم حفرات آزاد در این نمونه در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص ($90/97\ \text{A}^3$) را نشان می‌دهد. با افزایش حجم حفره‌های آزاد، استحکام کششی کاهش یافت. بالاترین استحکام کششی مربوط به نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانواکسید گرافن با مقدار $51/1$ مگاپاسکال بود که افزایش ۱۸ درصدی استحکام کششی در این نمونه در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص ($43/3$ مگاپاسکال) مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون، نانوکامپوزیت، اپوکسی، نانواکسید گرافن، استحکام کششی.

Investigation of Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy and Tensile behavior of Graphene Oxide/Epoxy Nanocomposites

Mohammad Koohkan¹, Ali Akbar Mehmandoost-Khajeh-Dad¹ and Hamed Khosravi^{2*}

1- Department of Physics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT

Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy (PALS) is sensitive to the free volume in polymers at the atomic scale. For this reason, in recent years, this method has been used as a unique technology to measure the size of the voids forming the free volume in polymers. The PALS method, with the ability to determine the size, shape and concentration of pores, can be used as a complementary identification tool alongside other macroscopic experimental methods. In this research, PALS was employed to investigate the epoxy-matrix polymeric samples containing different weight percentages of graphene oxide (0.1, 0.3, 0.5 and 0.7%). A ^{22}Na radioisotope with an activity of $\sim 5 \mu\text{Ci}$ was used as the positron source. Iranian fast plastic detectors (model NT-850) with a signal rise time of < 2 nanoseconds were used. The time resolution of our PALS system was measured 225 picoseconds, with a ^{60}Co radioisotope source. Uniaxial tensile tests were also performed on the samples. The results showed that the lowest free pore volume (i.e. 83.87 \AA^3) was related to the sample containing 0.3 wt% graphene oxide, which shows a decrease of about 8% in the free pore volume in this sample compared to the pure epoxy one (i.e. 90.97 \AA^3). With increasing the volume of pores within the sample, the tensile strength decreased. The best tensile behavior was obtained for the sample containing 0.3 wt% graphene oxide (i.e. 51.1 MPa), which showed an 18% increase in tensile strength compared to the pure epoxy sample (i.e. 43.3 MPa).

Keywords: Positron annihilation lifetime Spectroscopy, Nanocomposite, Epoxy, Graphene oxide, Tensile strength.

۱- مقدمه

استحکام کششی گرافن به ترتیب حدود ۱/۱ TPa و ۱۳۰ GPa است. اکسید گرافن نوع خاصی از ساختارهای گرافنی به شمار می رود که دارای گروه های عاملی اکسیژن شامل؛ اپوکسید، هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل هستند و به طور گسترده در ساخت نانوکامپوزیت ها مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از چالش های پیش روی ساخت این دسته از کامپوزیت ها، دشواری توزیع یکنواخت نانوذرات در زمینه می باشد که دستیابی به خواص مطلوب، نظیر استحکام بالا را مشکل می سازد (۳ و ۴).

نتایج تحقیقات مختلف نشان می دهد که خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ها را می توان از طریق افزودن نانوغرافن بهبود داد (۵-۷). اما با این وجود، میزان بهبود بسته به ریزساختار گرافن و برهمکنش آن با زمینه می تواند متفاوت باشد. Wang و همکاران (۸) نشان دادند که بهبود ۴۰ درصدی استحکام کششی و ۹۵ درصدی مدول یانگ را می توان از طریق افزودن ۳ درصد وزنی اکسید گرافن اصلاح شده در زمینه پلی آمید به دست آورد.

نانوکامپوزیت ها دسته ای پرکاربرد از مواد به شمار می روند که معمولاً حاوی یک یا چند جز با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند. نانوکامپوزیت ها از دو فاز تشکیل می شوند که فاز اول در واقع زمینه محسوب می شود و می تواند از جنس پلیمر، فلز و یا سرامیک باشد. فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر هستند که به عنوان تقویت کننده به منظور اهداف خاصی از قبیل استحکام، سفتی، هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و غیره در زمینه توزیع می شوند (۱).

نانوغرافن^۲، به دلیل خواص بسیار مطلوبش، از مهم ترین نانوساختارهای مورد استفاده در کامپوزیت ها است. گرافن یک لایه دوبعدی (2-D) با ضخامت یک اتم از شبکه کربنی sp^2 است که به علت خواص ویژه آن شامل؛ نسبت ابعادی و مساحت سطحی بالا در کنار مدول بسیار بالا و خواص الکتریکی و حرارتی فوق العاده بالا، در تحقیقات بنیادی و کاربردی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۲). مدول یانگ و

Wan و همکاران (۹) نشان دادند که خواص خمشی و کششی در کنار پایداری حرارتی و چقرمگی شکست زمینه اپوکسی در حضور اکسید گرافن اصلاح شده با ترکیب سیلانی، بهبود قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهند. Jamali و همکاران (۱۰) نشان دادند رفتار سایشی زمینه‌های اپوکسی با افزودن نانو اکسید گرافن بهبود قابل توجهی از خود نشان می‌دهد. در این تحقیق، ۰/۳ درصد وزنی نانوگرافن به‌عنوان درصد مطلوب افزودن جهت بهبود رفتار سایشی گزارش شده است.

طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون^۳ روشی شناخته شده برای اندازه‌گیری اندازه، ساختار و غلظت جاهای خالی در مواد مختلف از قبیل آلیاژها، نیمه‌هادی‌ها، سرامیک‌ها و پلیمرها با حساسیتی بهتر از ۱ ppm به شمار می‌رود. این روش می‌تواند حجم آزاد، نقص‌ها و حفره‌هایی با ابعادی از مرتبه ۰/۱ تا چند ده نانومتر را تشخیص دهد (۱۴-۱۱).

در روش طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون، پوزیترون‌های ساطع شده از یک ایزوتوپ پرتوزا وارد نمونه مورد مطالعه شده و در زمانی از مرتبه چند پیکوثانیه، بخش زیادی از انرژی جنبشی خود را از دست داده و حرارتی می‌شوند. پوزیترون حرارتی می‌تواند مستقیماً با یک الکترون اتمی نابود شود. ماحصل نابودی پوزیترون با یک الکترون اتمی، با احتمال بالا، خلق دو پرتو گاما است. خلق تعداد بیشتر پرتو گاما، احتمالی نزدیک به صفر دارد. به‌علاوه، احتمال جفت شدن پوزیترون حرارتی با یک الکترون اتمی و تشکیل ساختاری موسوم به پوزیترونیوم نیز وجود دارد که گاهی آن را اتم پوزیترونیوم نیز می‌خوانند. احتمال تشکیل پوزیترونیوم شدیداً به ساختار محیط میزبان وابسته است. شکل‌گیری پوزیترونیوم در موادی مثل پلیمرها که ساختار نسبتاً بازی دارند محتمل‌تر است. پوزیترونیوم به دو حالت تشکیل می‌شود. حالت یکتایه با اسپین کل صفر، پاراپوزیترونیوم و حالت سه تاییه با اسپین کل یک، اورتوپوزیترونیوم نام دارند. در غیاب تبدیلات اورتو-پارا، ۲۵ درصد از اتم‌های پوزیترونیوم در حالت یکتایه و ۷۵ درصد در حالت سه تاییه تشکیل می‌شوند. طول عمر پاراپوزیترونیوم در

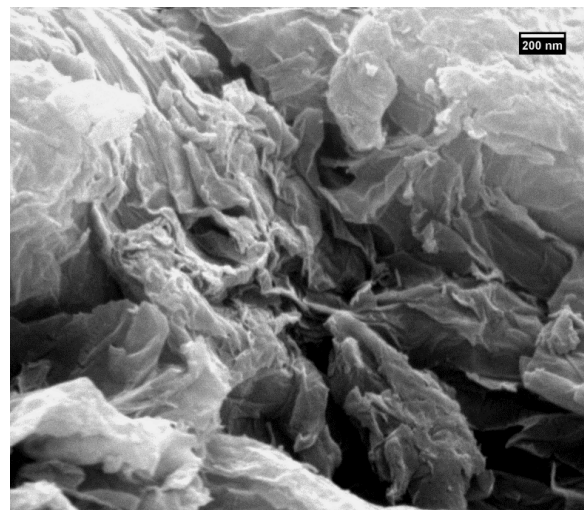
حالت نابودی خود به خودی و تبدیل شدن به دو پرتو گاما، ۱۲۵ پیکوثانیه است که در حدود طول عمر پوزیترون آزاد در بطن ماده چگال است. نابودی دوگامایی برای اورتوپوزیترونیوم در خلأ ممنوع است، بنابراین با طول عمری حدود ۱۴۲ نانوثانیه به سه گاما واپاشی می‌کند. اورتوپوزیترونیوم درون ماده سرنوشت متفاوتی پیدا می‌کند و با احتمال بالا، طی سازوکاری به نام برچینش، با نیمه عمری بیش از یک نانوثانیه به دو گاما و امی پاشد.

کونسولاتی و همکاران (۱۵) قابلیت استفاده از روش طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون جهت اندازه‌گیری حجم آزاد در پلیمرها را نشان داده‌اند. تحقیقات زیادی نشان می‌دهد که برهمکنش سطحی بین مولکول‌های زمینه پلیمر و نانو پرکننده‌ها، مهم‌ترین عامل در ایجاد خواص ماکروسکوپی بهینه یک نانوکامپوزیت است. شارما و پوجارا روش طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون و مدل‌های لازم برای محاسبات اندازه، چگالی و توزیع اندازه حفره‌های حجم آزاد در نانوکامپوزیت‌های پلیمری را مرور کرده‌اند (۱۶). بیگانه و همکاران طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون و پهن‌شدگی دوپلری گاما‌های نابودی را جهت تعیین حجم آزاد چهار پلیمر با ساختار الکترونی مشابه، ولی از سه گروه پلیمری متفاوت C-H، C=O و C-F، به‌کار گرفته و وجود حفراتی با شعاع ۳ نانومتر در این پلیمرها را گزارش کرده‌اند (۱۷). شیرازی نیا و همکاران چهار نوع کامپوزیت پرکاربند دندانپزشکی را به مدت ۲۰ و ۴۰ ثانیه تحت تابش نور فرابنفش قرار داده و نشان دادند که حجم آزاد شکل گرفته در نمونه‌ها، به مدت زمان تابش‌دهی بستگی دارد (۱۸).

مطابق بررسی‌های انجام شده، تاکنون گزارش جامعی در ارتباط با طیف‌سنجی نابودی پوزیترون در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/نانو اکسید گرافن و ارتباط آن با رفتار کششی نمونه‌ها یافت نشد. بنابراین، در تحقیق حاضر، این روش طیف‌سنجی برای مطالعه حجم حفرات آزاد در نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی/نانو اکسید گرافن حاوی درصد‌های وزنی مختلفی از

جدول ۱- مشخصه‌های نانو اکسید گرافن

قطر (میکرومتر)	ضخامت (نانومتر)	تعداد لایه‌ها	سطح ویژه (مترمربع بر گرم)	درصد خلوص
۱۰-۵۰	۳/۴-۷	۶-۱۰	۱۰۰-۳۰۰	۹۹



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نانوصفحات اکسید گرافن.

۲-۲- ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی

در تحقیق حاضر، ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی طی مراحل زیر ساخته شدند:

(۱) ابتدا ۶۰ گرم رزین اپوکسی به‌عنوان ماده زمینه، درون یک بشر پلاستیکی ریخته شده و سپس با توجه به درصد وزنی‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷، مقدار لازم از نانواکسید گرافن به‌عنوان تقویت‌کننده، به رزین اپوکسی اضافه شد.

(۲) ترکیب حاصل به مدت ۱۵ دقیقه توسط یک همزن مکانیکی با سرعت بالا (۱۸۰۰ دور بر دقیقه)، به‌منظور توزیع نانوذرات در رزین اپوکسی همزده شد.

(۳) برای از بین بردن کلوخه‌های موجود، مخلوط اپوکسی-نانواکسید گرافن به مدت ۳۰ دقیقه تحت امواج فراصوت با دستگاه هموژنایزر پرابی تحت توان ۱۲۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز قرار گرفت. به‌منظور جلوگیری از افزایش دما در حین فرایند، ظرف حاوی مخلوط، در حمام آب و یخ قرار داده شد. این مرحله به‌منظور پخش همگن نانواکسید گرافن در رزین اپوکسی صورت گرفت.

(۴) در مرحله بعد، سخت‌کننده (هاردنر) به‌عنوان عامل پخت به نسبت وزنی ۱ به ۱۰ با رزین اپوکسی به مخلوط اضافه و به آرامی به مدت ۳ دقیقه همزده شد.

(۵) مخلوط حاصله به آرامی درون قالب سیلیکونی که از قبل به وسیله اسپری روان‌کننده به‌خوبی تر شده بود، ریخته شده و پس از ۲۴ ساعت، نمونه‌ها از درون قالب خارج شدند.

۲-۳- اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون

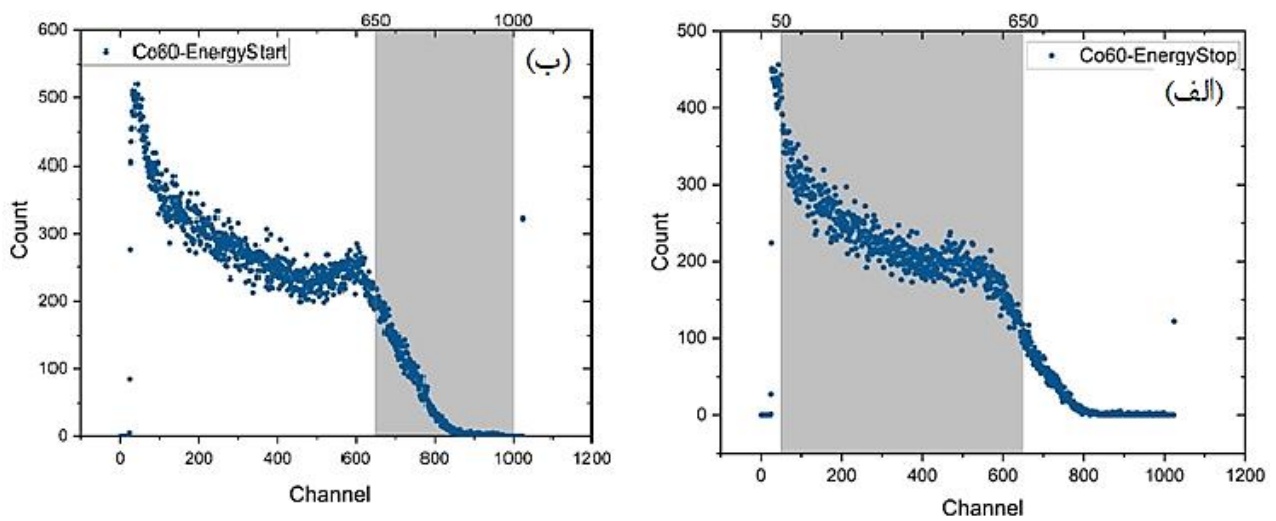
در این تحقیق، از یک سامانه همزمانی (کند- تند) طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون شامل چشمه پوزیترون‌دهنده $^{22}\text{NaCl}$ با فعالیت حدود ۵ میکروکوری (متشکل از دو لایه نازک کپتون به ضخامت ۷/۵ میکرومتر)، دو آشکارساز پلاستیک سریع، یک مدار زمان‌سنج و یک مدار انرژی‌سنج استفاده شده است. شکل (۲) طیف گامای چشمه ^{60}Co را در آشکارسازهای شروع و توقف نشان می‌دهد. محدوده‌ای از طیف گاما که

تقویت‌کننده به کار گرفته شد. همچنین با اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه‌ها، ارتباط بین حجم آزاد حفره‌ها و استحکام کششی نمونه‌ها گزارش شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد مورد استفاده

در تحقیق حاضر، از رزین اپوکسی اپون ۸۲۸ به‌عنوان فاز زمینه استفاده شد. این رزین در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد دارای ویسکوزیته ۱۱۰ تا ۱۵۰ پاسکال می‌باشد. همچنین نانوصفحات اکسید گرافن (محصول شرکت یو اس نانومتریال آمریکا) به‌عنوان فاز تقویت‌کننده در ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی به کار گرفته شدند. در جدول (۱) مشخصه‌های نانواکسید گرافن و در شکل (۱) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی^۵ این نانوصفحات آورده شده است.



شکل ۲- طیف گاماهاى چشمه ^{60}Co در آشکارسازهای توقف (الف) و شروع (ب) نشان داده شده است. محدوده ای از طیفها که برای شروع و توقف زمانسنجی استفاده شده‌اند، با نوار تیره مشخص شده است.



شکل ۳- تصویری از چیدمان آزمایشگاهی سامانه طیفسنجی طول عمر نابودی پوزیترون.

پیکوتائیه به دست آمد. تصویری از چیدمان آزمایشگاهی سامانه در شکل (۳) آمده است.

برازش و تحلیل طیفهای حاصل از اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون توسط نرم‌افزار PASCUAL انجام شد. برای هر

به‌عنوان سیگنال «شروع» و سیگنال «توقف»، جهت اندازه‌گیری قدرت تفکیک زمانی سامانه انتخاب شدند، با نوار تیره مشخص شده است. قدرت تفکیک زمانی سامانه با استفاده از یک چشمه گاما از ^{60}Co و پس از ۲۴ ساعت داده‌گیری مداوم، برابر ۲۲۵

نمونه‌ها به دست آمدند. آزمون‌ها برای هر نمونه سه بار تکرار شدند و میانگین این نتایج در قالب نمودار گزارش شد. پس از انجام آزمون کشش، سطوح شکست نمونه‌ها با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی -KYKY EM8000F مورد مطالعه قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

شکل (۵) نحوه تغییرات مؤلفه‌های دوم (τ_2) و سوم (τ_3) طیف‌های طول عمر نابودی پوزیترون در نمونه‌های نانوکامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی درصد‌های مختلف نانواکسیدگرافن را نشان می‌دهد. مؤلفه τ_2 بیانگر ترکیبی از نابودی پوزیترون در چشمه پوزیترون‌دهنده، نابودی پوزیترون آزاد در حجم نمونه، نابودی پوزیترون گیرافتاده در حفره‌ها و نابودی سه گامایی اورتوپوزیترون‌نیوم به دام افتاده در حفره‌هاست. با توجه به اینکه تمام اندازه‌گیری‌ها با چشمه پوزیترون‌دهنده یکسانی انجام شده، ثابت بودن این مؤلفه در نمونه‌های حاوی نانواکسیدگرافن، نشان‌دهنده یکسان بودن نواحی مرزی به وجود آمده در بطن نمونه‌هاست.

مؤلفه τ_3 ، صرفاً مربوط به نابودی اورتوپوزیترون‌نیوم گیرافتاده در حفره‌ها از طریق سازوکار برچینش است که مستقیماً به اندازه حفره‌های بین مولکولی شکل گرفته در ساختار نمونه‌های نانوکامپوزیت مرتبط می‌شود. تغییرات این مؤلفه در درصد‌های وزنی مختلف نانوگرافن نشان‌دهنده آن است که نانوذرات به شکل‌های متفاوتی در جاهای خالی زمینه اپوکسی منتشر شده‌اند. کاهش مقدار این مؤلفه در تمام نمونه‌های نانوکامپوزیتی نسبت به نمونه اپوکسی خالص، نشان‌دهنده جایگزینی نانواکسیدگرافن در حفرات موجود در بطن اپوکسی خالص و کاهش کلی اندازه حجم حفرات است. در ۰/۳ درصد وزنی از نانوگرافن، کم‌ترین مقدار برای مؤلفه τ_3 مشاهده می‌شود.

با استفاده از مؤلفه برچینش طول عمر نابودی اورتوپوزیترون‌نیوم در نمونه‌ها (τ_3) و به کارگیری مدل تائو-

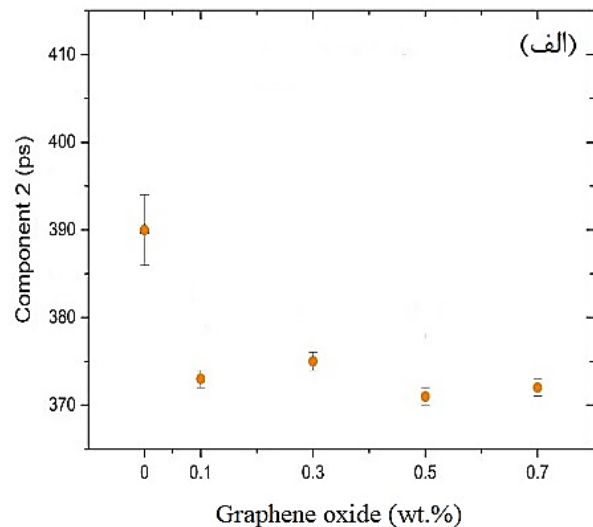
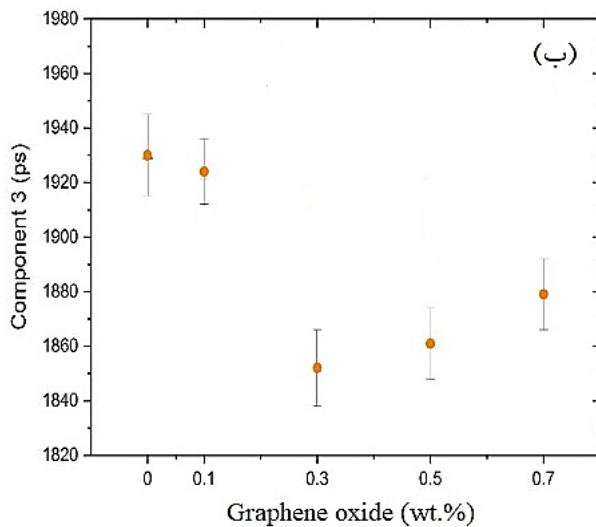


شکل ۴- نمونه‌های نانوکامپوزیتی آماده شده برای آزمون کشش تک‌محوری، حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانواکسید گرافن. نمونه رزین خالص با رنگ روشن قابل مشاهده است.

کدام از طیف‌های طول عمر نابودی پوزیترون، سه مؤلفه τ_1 (مربوط به نابودی پاراپوزیترون‌نیوم)، τ_2 (ترکیبی از نابودی پوزیترون در چشمه پوزیترون‌دهنده، نابودی پوزیترون آزاد در حجم نمونه، نابودی پوزیترون گیرافتاده در حفره‌ها و نابودی سه گامایی اورتوپوزیترون‌نیوم به دام افتاده در حفره‌ها) و τ_3 (مربوط به نابودی اورتوپوزیترون‌نیوم گیرافتاده در حفره‌ها، صرفاً از طریق سازوکار برچینش)، به ترتیب با شدت‌های I_1 ، I_2 و I_3 برازش شده است. با استفاده از مؤلفه طول عمر نابودی اورتوپوزیترون‌نیوم گیرافتاده در حفره‌ها (صرفاً از طریق سازوکار برچینش) (τ_3) و به کارگیری مدل تائو-الدراب، شعاع حفره‌های موجود در نمونه‌ها محاسبه شد.

۲-۴- آزمون کشش تک‌محوری

برای اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه‌ها از دستگاه آزمون Hounsfield: H25K مطابق استاندارد ASTM D 638 استفاده شد. نمونه‌ها در دمای اتاق با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمون قرار گرفتند. در شکل (۴) نمونه‌های نانوکامپوزیتی آماده شده برای آزمون کشش تک‌محوری نشان داده شده‌اند. مقادیر استحکام کششی نمونه‌ها از تقسیم مقدار حداکثر بار مشاهده شده روی منحنی نیرو-جابجایی بر سطح مقطع



شکل ۵- مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی درصد‌های مختلف اکسید گرافن، الف) مؤلفه دوم و ب) مؤلفه سوم.

جدول ۲- مقادیر شعاع و حجم آزاد حفرات در نمونه‌های

نانوکامپوزیتی اپوکسی/نانوآکسید گرافن		
$V_f (A^3)$	R (nm)	درصد وزنی نانوآکسید گرافن
۹۰/۹۷	۰/۲۷۹۰	صفر
۹۰/۳۸	۰/۲۷۸۴	۰/۱
۸۳/۷۸	۰/۲۷۱۵	۰/۳
۸۴/۶۷	۰/۲۷۲۴	۰/۵
۸۶/۲۶	۰/۲۷۴۱	۰/۷

افزایش یافته است که علت احتمالی آن را می‌توان به تشکیل آگلومرها در مقادیر بالای ذرات نسبت داد (۲۰).

برای نشان دادن اثر حفرات آزاد بر رفتار مکانیکی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، آزمون کشش تک‌محوری بر روی آن‌ها صورت گرفت که در شکل (۶) منحنی‌های نیرو بر حسب جابجایی در درصد‌های وزنی مختلف نانوآکسید گرافن آورده شده است. در ادامه، با تقسیم حداکثر نیروها بر سطح مقطع، مقادیر استحکام کششی نمونه‌ها محاسبه شد که در جدول (۳) این اعداد گزارش شده است. بیش‌ترین مقدار استحکام کششی مربوط به نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن

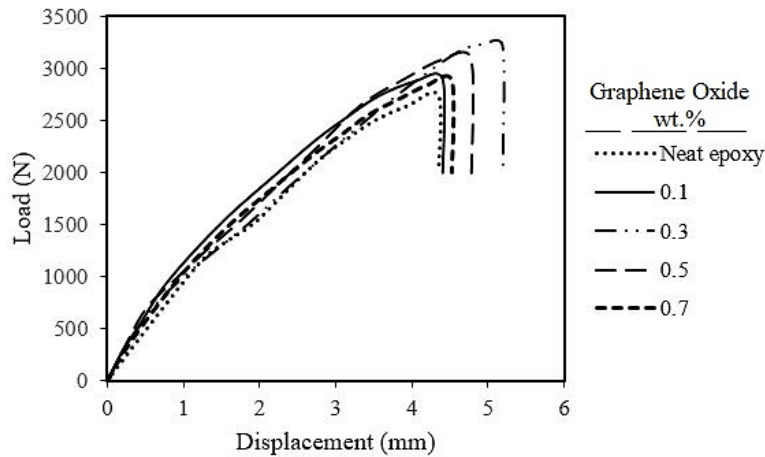
الدراب (رابطه ۱)، شعاع حفره‌های موجود در نمونه‌ها (R) محاسبه شد (۱۹). در ادامه، با داشتن مقادیر شعاع، حجم حفرات (V_f) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید.

$$\lambda_{TE}(R) = \frac{1}{\tau_3} = \lambda_A \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R}\right) \right] \quad (1)$$

$$V_f = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (2)$$

در رابطه فوق، ΔR ضخامت لایه الکترونی موجود در جداره حفره است که معمولاً برابر ۰/۱۶۶ نانومتر در نظر گرفته می‌شود. λ_A میانگین نرخ نابودی اورتوپوزیترونیم در ماده است که برابر ۲ نانوثانیه فرض می‌شود.

در جدول (۲)، مقادیر شعاع و حجم آزاد حفرات (محاسبه شده با استفاده از روابط ۱ و ۲) در نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی/نانوآکسید گرافن حاوی درصد‌های وزنی مختلف تقویت‌کننده نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج جدول (۲) مشهود است، کم‌ترین شعاع و حجم حفرات آزاد مربوط به نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن می‌باشد که کاهش حدود ۷ درصدی حجم حفرات آزاد در این نمونه در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص را نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده، (۰/۵ درصد)، حجم آزاد حفرات



شکل ۶- منحنی های نیرو بر حسب جایجایی نمونه های نانوکامپوزیتی اپوکسی/نانوآکسید گرافن حاوی درصد های وزنی مختلف نانوآکسید گرافن، تحت آزمون کشش تک محوری.

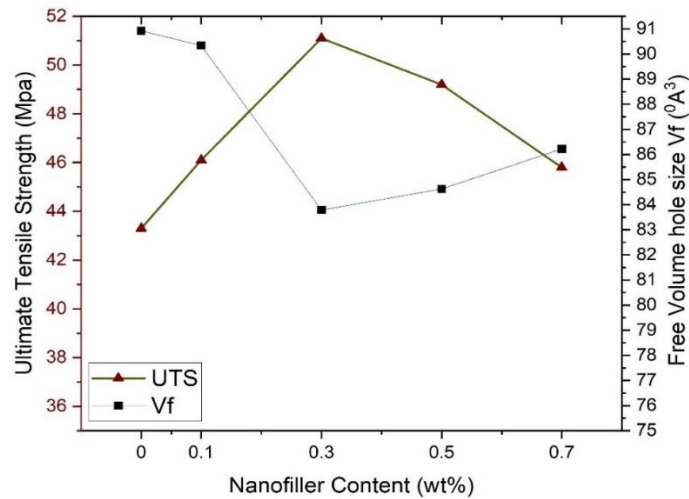
جدول ۳- مقادیر استحکام کششی نمونه های نانوکامپوزیتی اپوکسی/نانوآکسید گرافن حاوی درصد های وزنی مختلف نانوآکسید گرافن

درصد وزنی نانوآکسید گرافن	استحکام کششی (مگاپاسکال)
صفر	$43/3 \pm 2/1$
۰/۱	$46/1 \pm 2/9$
۰/۳	$51/1 \pm 1/9$
۰/۵	$49/2 \pm 2/3$
۰/۷	$45/8 \pm 2/4$

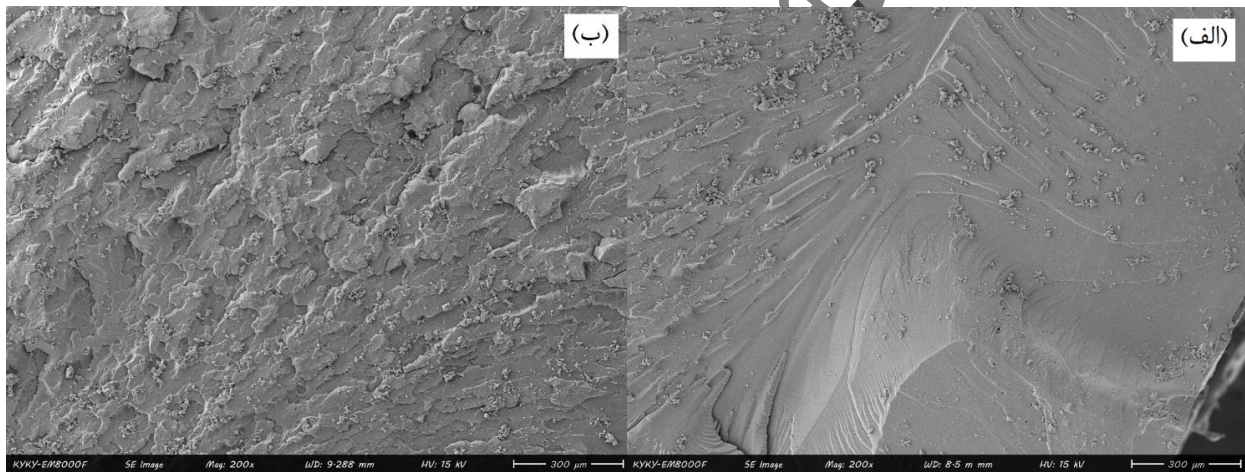
برای مقایسه تأثیر حجم حفرات آزاد بر استحکام کششی نمونه های نانوکامپوزیتی حاوی درصد های وزنی مختلف نانوآکسید گرافن، مقادیر استحکام کششی و حجم حفرات آزاد نمونه ها به صورت نمودار در شکل (۷) رسم شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود رابطه معکوسی بین استحکام کششی و حجم حفرات آزاد در نمونه ها وجود دارد. این بدان معناست که با افزایش حجم حفرات، استحکام کششی کاهش و با کاهش حجم حفرات، استحکام کششی نمونه ها افزایش یافته است. در نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن که دارای کم ترین مقدار حجم حفرات است، بیش ترین میزان استحکام کششی قابل مشاهده است.

سطوح شکست نمونه های اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن (به عنوان

است. میزان استحکام کششی برای نمونه اپوکسی خالص $43/3$ مگاپاسکال است که با افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن مقدار استحکام نمونه به $51/1$ مگاپاسکال افزایش یافته است که بهبود ۱۸ درصدی را نشان می دهد. علت بهبود استحکام کششی در حضور نانوآکسید گرافن را می توان به سطح ویژه بالای این نانو ذرات نسبت داد که باعث افزایش میزان برهمکنش زمینه و تقویت کننده می شود (۲۱). همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود در درصد های وزنی بالاتر نانو ذرات (۰/۵ و ۰/۷ درصد) به احتمال زیاد به علت تشکیل آگلومره های ذرات، استحکام کششی نمونه ها روند نزولی از خود نشان می دهد. در حقیقت، تجمع ذرات در زمینه، به علت ایجاد مراکز تمرکز تنش، جوانه زنی و اشاعه ترک را تسهیل کرده و از این طریق باعث افت استحکام کششی می شود (۲۲).



شکل ۷- ارتباط استحکام کششی با حجم حفرات آزاد در نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانوآکسید گرافن.



شکل ۸- سطوح شکست نمونه‌های الف) اپوکسی خالص و ب) نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون و رفتار استحکام کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی شامل زمینه اپوکسی حاوی درصد‌های وزنی متفاوت نانوآکسید گرافن مورد مطالعه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱) در نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن، کم‌ترین مقدار حجم حفرات آزاد مشاهده شد. در ارتباط با این نمونه، کاهش حدود ۷ درصدی حجم حفرات آزاد در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص مشاهده شد.

نمونه با بالاترین میزان استحکام کششی) با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تصویربرداری شد که تصاویر آن در شکل (۸) آورده شده است. همان‌طور که از تصویر (۸-الف) مشهود است، سطح شکست مربوط به نمونه اپوکسی خالص نسبتاً صاف و هموار بوده که مؤید وجود شکست ترد در این نمونه می‌باشد. اما در مقابل، سطح شکست نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانوآکسید گرافن ناهموار است (شکل ۸-ب). این بدان معناست که وجود نانوآکسید گرافن در زمینه به‌عنوان موانعی در برابر اشاعه ترک عمل کرده و باعث انحراف مسیر رشد ترک می‌شود (۲۱).

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سیستان و بلوچستان برای انجام تحقیق حاضر قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

۲) بالاترین میزان استحکام کششی مربوط به نمونه نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانواکسید گرافن بود که در ارتباط با این نمونه، بهبود ۱۸ درصدی استحکام کششی در مقایسه با نمونه اپوکسی خالص قابل مشاهده بود.

۳) مقایسه نتایج استحکام کششی و حجم حفرات آزاد نمونه‌ها موید این واقعیت بود که رابطه معکوسی بین استحکام کششی و حجم حفرات آزاد در نمونه‌ها وجود دارد.

۴) در درصدهای وزنی بالاتر نانواکسید گرافن (۰/۵ و ۰/۷ درصد)، افت استحکام کششی و افزایش میزان حجم حفرات آزاد در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۳ درصد وزنی نانواکسید گرافن مشاهده شد.

واژه‌نامه

1. Nanocomposites
2. Nano-graphene
3. Positron annihilation lifetime Spectroscopy

4. US Research Nanomaterials Inc.
5. Field-emission scanning electron microscopy (FESEM)

مراجع

1. Hassan T, Salam A, Khan A, Khan SU. Functional nanocomposites and their potential applications: A review. *J Polym Res* 2021; 28: 36.
2. Urade AR, Lahiri I, Suresh KS. Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review. *JOM* 2023; 75: 614-630.
3. Yan J, Yi S, Yuan X. Graphene and its composites: A review of recent advances and applications in logistics transportation. *Pack Technol Sci* 2024; 37(4): 335-361.
4. Guo L, Chen Z, Han H, Liu G. Advances and outlook in modified graphene oxide (GO)/epoxy composites for mechanical applications. *Appl Nanosci* 2023; 13: 3273-3287.
5. Amirbeygi H, Khosravi H, Tohidlou E. Reinforcing effects of aminosilane-functionalized graphene on the tribological and mechanical behaviors of epoxy nanocomposites. *J Appl Polym Sci* 2019; 136(18): 47410.
6. Wang X, Xing W, Zhang P, Song L, Yang H, Hu Y. Covalent functionalization of graphene with organosilane and its use as a reinforcement in epoxy composites. *Compos Sci Technol* 2012; 72(6): 737-743.
7. Yao H, Hawkins SA, Sue HJ. Preparation of epoxy nanocomposites containing well-dispersed graphene nanosheets. *Compos Sci Technol* 2017; 146(3): 161-168.
8. Wang C, Lan Y, Li X, Yu W, Qian Y. Improving the mechanical, electrical, and thermal properties of polyimide by incorporating functionalized graphene oxide. *High Perform Polym* 2016; 28(7): 800-808.
9. Wan YJ, Gong LX, Tang LC, Wu LB, Jiang JX. Mechanical properties of epoxy composites filled with silane-functionalized graphene oxide. *Compos Part A* 2014; 64: 79-84.
10. Jamali N, Rezvani A, Khosravi H, Tohidlou E. A comparative study on dry-sliding wear behavior of graphene oxide/epoxy nanocomposites functionalized by amino- and epoxy-silane coupling agents. *Polym Compos* 2021; 42: 5930-5935.
11. Tayebfard E, Mehmandoost-Khajeh-Dad A.A., Khaghani M, Jafarzadeh- Khatibani M, Poorsaleh AM. Stability of a positron lifetime measurement system, and investigation the types and concentrations of defects induced by 10 MeV electron irradiation on n- and p-types Si. *Iranian J Phys Res* 2015; 15(1): 34-41.
12. Asgarian SM, Mahjour-Shafiei M, Mozaffari M, Shatooti S. Exploring the electrochemical properties of lithium-ion battery electrodes composed of vacancy-defective zinc-substituted magnetite

- nanocrystallites. *J Alloys Comp* 2024; 986: 174071.
13. Jean YC, Mallon PE. Principles and applications of positron and positronium chemistry. World Sci 2003, ISBN: 978-981-238-144-6.
 14. Selim FA. Positron annihilation Spectroscopy of defects in nuclear and irradiated materials- a review. *Mater Charact* 2021; 174: 110952.
 15. Consolati G, Nichetti D, Quasso F. Probing the free volume in polymers by means of positron annihilation lifetime Spectroscopy. *Polym* 2023; 15: 3128.
 16. Sharma S.K., Pujari P.K., Role of free volume characteristics of polymer matrix in bulk physical properties of polymer nanocomposites: A review of positron annihilation lifetime studies, *Progress in Polymer Science* 2017; 75: 31.
 17. Biganeh A, Kakuee O, Rafi-Kheiri H, Lamehi-Rachti M, Sheikh N, Yamaha E. Positron annihilation lifetime and Doppler broadening Spectroscopy of polymers. *Rad Phys Chem* 2020; 166: 108461.
 18. Shirazinia M, Mehmandoost-Khajeh-Dad A.A., Dehghani V., Mehmandoost-Khajeh-Dad J., Khaghani M., The effect of curing light intensity on free volume size in some dental composites, *Polim. Med.* 2016; 46:2.
 19. Khaghani M, Mehmandoost-Khajeh-Dad A.A. Temperature dependence of o-Ps annihilation lifetime in non-uniform cylindrical pores in comparison with ETE model. *Nuclear Instrum Methods Phys Res Sect B* 2017; 396: 11-17.
 20. Vakhshouri M. Khosravi H. Synthesis of Nickel nanoparticles on graphene oxide as a promising reinforcement for epoxy composites. *Polym Compos* 2020; 41(7): 2643-2651.
 21. Mahaki S, Khosravi H, Tohidlou E. Reinforcing effect of Fe₂O₃ nanoparticle-decorated graphene oxide on flexural and wear behaviors of epoxy composites. *J Appl Polym Sci* 2022; 139: e53228.
 22. Mohsenia F, Rezvani A, Khosravi, H, Tohidlou E. On the mechanical properties of copper oxide (CuO)-decorated graphene oxide/epoxy nanocomposites. *Polym Plast Technol Mater* 2025; 64: 158-169.

پایان کار