



بررسی خصوصیات مکانیکی و الکتریکی ورق ترکیب پلی اورتان-گرافن

عرفان اوجی^۱ | فاطمه استواری^{۱*} | علیرضا کشاورز^۲ | حسین مختاری^۱

۱- گروه حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲- گروه فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده: در این پژوهش، خواص الکتریکی و مکانیکی ورق انعطاف پذیر پلی اورتان-گرافن (P/G) بررسی شد. نتایج نشان می دهد که افزودن گرافن (G) منجر به ایجاد مسیرهای رسانا در بستر پلیمر می شود. با افزایش کسر جرمی G در ترکیب، مدول یانگ افزایش و استحکام کششی کاهش می یابد. P/G با ۵ درصد وزنی گرافن، مقاومت بالایی در محدوده پوست انسان از خود نشان می دهد که کرنش کششی خوبی نیز دارد (۱۵۴٪). همچنین، افزون بر مقاومت ورق خوب P/G با ۲۰ درصد وزنی (۱۳۵ اهم بر مربع)، تغییرات نسبی مقاومت به عنوان تابعی از زاویه خمش و کشش اندازه گیری شد و نتایج نشان می دهد که برگشت پذیری و قابلیت خوبی به عنوان کاربردهای الکترونیکی پوشیدنی و حسگر کرنش دارد.

واژگان کلیدی: پلی اورتان، گرافن، ورق های منعطف، هدایت الکتریکی، حسگر کرنش

*ostovari@yazd.ac.ir

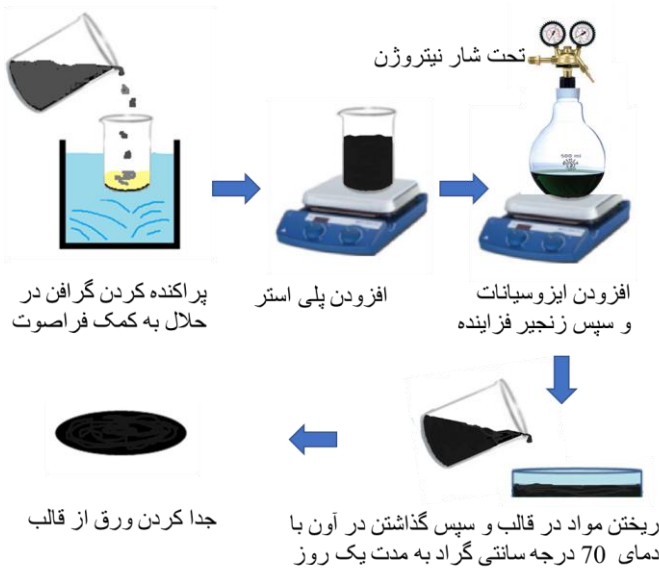
پلی اورتان ها (P) به دلیل برخی ویژگی برتر مانند دوام، سختی، ازدیاد طول، استحکام و مدول بالا بسیار محبوب هستند، یکی از بخش های اصلی پلی اورتان، ایزوسیانات است که شامل گروه هایی با پایانه های NCO- هستند (که با توجه به ساختار شیمیایی آنها مانند وجود و عدم وجود حلقه بنزن به آروماتیک و آلیفاتیک تقسیم بندی می شوند) [۵]. نانومواد شامل نانوذرات فلزی (نقره، طلا، و غیره)، نانوذرات بسپاری رسانا (پلی آنیلین (PANI)، پلی پیرول (PPy)، پلی تیوفن (PTh) و پلی اتیلن دیوکس-تیوفن (PEDOT) و مواد مبتنی بر کربن (نانولوله های کربنی CNT و گرافن) [۷،۸] می توانند به عنوان یک پرکننده رسانا در بستر بسپار استفاده شوند [۱]. افزون بر این، ویژگی های فیزیکی با تغییر اندازه، دما و یا در اثر اغتشاشات خارجی مانند میدان الکتریکی یا فشار قابل تغییر و تنظیم هستند [۹-۱۳]. در میان نانومواد، گرافن به دلیل مزایای برترش مانند نسبت سطح به حجم بالا، تحرک پذیری بالای حامل ها، ویژگی ویژه حرارتی، مغناطیسی و

۱- مقدمه

نیاز به وسایل الکترونیکی قابل حمل، سبک و منعطف در دنیای امروز اجتناب ناپذیر است. ترکیب های بسپاری رسانا می توانند در مقابل مواد رسانای سنگین، حجیم و شکننده امروزی، مزایای بیشتری را داشته باشند به طوری که با حفظ ویژگی های مکانیکی، خصوصیات الکتریکی را نیز دارا باشند. بسپارهای رسانای انعطاف پذیر مانند صفحه نمایش انعطاف پذیر، دستگاه های الکترونیکی پوشیدنی، آنتن های قابل کشش، محافظ تداخل الکترومغناطیس (EMI)، حسگرهای نظارت بر سلامت و موارد دیگر، توجه زیادی را در پژوهش های علمی و صنعت به خود جلب کرده اند [۱-۳]. این ترکیبات معمولاً با قرار دادن نانومواد رسانا به عنوان پرکننده در بستر بسپارها ساخته می شوند [۱،۴]. بسپارهای عایق مانند اپوکسی، پلی آمید و پلی اورتان می توانند به عنوان بسترهای انعطاف پذیر استفاده شوند. در بین بسپارها،

حلال و اتیلن گلیکول به عنوان زنجیر فزاینده (شرکت مرک، خلوص ۹۹٪) استفاده شده است.

برای ساخت ورق P/G از طریق بسپارسازی همزمان، ابتدا نانوصفحات گرافن با ۵ و ۲۰ درصد وزنی در حلال (DMSO) به کمک فراصوت و هم زدن مداوم پخش و سپس، به پلی استر با هم زدن مداوم تحت حرارت (۳۰ درجه سانتی گراد) افزوده شد تا مایعی همگن به دست آید. سپس، HDI و پس از آن از اتیلن گلیکول به عنوان زنجیر فزاینده تحت حرارت (۵۰ درجه سانتی گراد) و شار نیتروژن افزوده شد. ترکیب نهایی تا اتمام واکنش با همزن مغناطیسی هم زده شد. در نهایت، محلول ترکیبی روی قالب ریخته شد و حدود یک روز در آن در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت تا حلال تبخیر و نمونه پخت شود (مراحل ساخت در شکل ۱ ترسیم شده است).



شکل ۱: مراحل ساخت لایه‌های P/G.

در نهایت، تمامی نمونه‌ها با اندازه یکسان تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. مقاومت الکتریکی ورق با اندازه‌گیری جریان در ولتاژهای متفاوت و طبق رابطه‌ی (۱) محاسبه شد.

$$R = \frac{V}{I} = R_s \frac{L}{w} \quad (1)$$

در این رابطه R_s ، w ، L ، V و I به ترتیب مقاومت ورق، عرض، طول، ولتاژ و جریان نمونه هستند. در بسپارهای عایق، پرکننده

مکانیکی [۱۴-۱۹] به عنوان یک گزینه‌ی ایده‌آل مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. ترکیب گرافن با پلی‌اورتان می‌تواند ویژگی نهایی را اصلاح و همچنین، هزینه فرایند را پایین نگه دارد [۲۰]. بیشتر تحقیقات بر ترکیب‌های بسپاری بر بهبود ویژگی الکتریکی و مکانیکی متمرکز شده است که اکثراً از روش‌های پیچیده‌ای استفاده کرده‌اند [۴ و ۲۱-۳۳]. در گزارش‌های نزدیک به این پژوهش که مبتنی بر پلی‌اورتان-گرافن است، مواد، روش ساخت و پاسخ‌دهی کاملاً متفاوت است [۳۰]، در اکثر آنها از پرکننده‌های دیگری در کنار گرافن جهت تقویت خصوصیات فیزیکی استفاده شده‌است، مانند استفاده از ترکیب نانو بلورهای سلولز و اکسید گرافن کاهش یافته در بستر پلی‌اورتان با استفاده از روش ترکیب محلول [۴]، و استفاده از نانوذرات نقره و گرافن در بستر پلی‌اورتان با روش رییسندگی الکتریکی [۳۳]. تمایز این مطالعه در استفاده از گرافن تنها به عنوان پرکننده است همچنین در مطالعات نزدیک تغییرات مقاومت نسبت به کشش مورد مطالعه قرار نگرفته است.

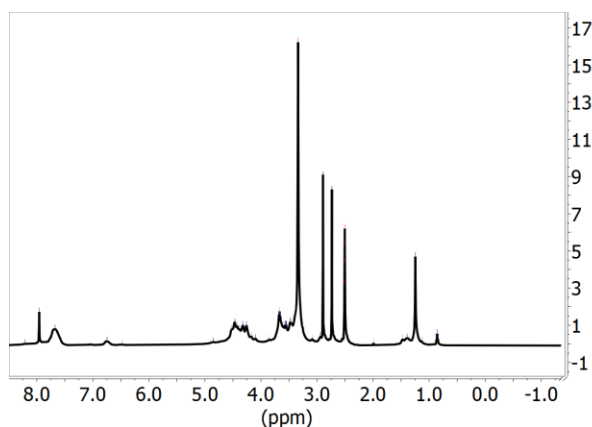
در این مقاله، ورق‌های ترکیبی پلی‌اورتان-گرافن رسانای انعطاف‌پذیر (P/G) از طریق بسپارش همزمان (in-situ polymerization) با ایزوسیانات HDI (به عنوان یک ایزوسیانات آلیفاتیک، بومی و کم‌خطرتر (عدم حلقه بنزن) با ویژگی الاستیسه خوب) ساخته شدند. سپس، ویژگی ساختاری ترکیب مورد مطالعه قرار گرفت و در انتها، نیز ویژگی‌های مکانیکی ورق ترکیبی P/G با دو درصد وزنی متفاوت از گرافن (۵ و ۲۰ درصد وزنی به ترتیب با برچسب P/G۵ و P/G۲۰) به عنوان پرکننده بررسی شد.

۲- روش و مواد

در این پژوهش، از مواد اولیه، هگزامتیلن دی ایزوسیانات HDI (از شرکت ملی پتروشیمی ایران) به عنوان ایزوسیانات، رزین پلی استر (شرکت نانوسنجش یاران محیط) به عنوان بخش نرم پلی‌اورتان، نانوصفحات گرافن (شرکت اکسیر؛ EX-700350 با مشخصات مساحت سطح 50.0 m^2 و وزن ملکولی 12 g/mol) به عنوان پرکننده رسانا، دی‌متیل سولفوکسید DMSO به عنوان

نوارهای جذب در منطقه $2865-2968\text{ cm}^{-1}$ به ارتعاشات کششی متقارن و نامتقارن گروه‌های آلیفاتیک $-\text{CH}_2-$ و CH_3 اختصاص داده می‌شوند. افزون بر این، نوار جذبی گروه NCO- به‌طور کامل در حدود 2270 cm^{-1} ناپدید شده است، که نشان‌دهنده واکنش کامل ایزوسیانات با گرافن و پلی‌ال‌ها است. وجود نوار 1730 cm^{-1} کربونیل اورتان را نشان می‌دهد. ارتعاش خمشی NH و ارتعاش کششی C-O-C نیز به ترتیب در 1250 cm^{-1} و 1117 cm^{-1} سانتی‌متر ظاهر شده است [37-35].

ساختار شیمیایی ترکیبات P/G20 توسط رزونانس مغناطیسی هسته $^1\text{H-NMR}$ پشتیبانی شد. در طیف NMR (شکل 3)، گروه‌های NH در اورتان به دلیل مجاورت با ورق گرافن به میدان پایین ($6.55-6.95$ و $7.53-7.92$) منتقل شدند. اتم‌های هیدروژن در گروه‌های کاربامات ($\text{CH}_2\text{-O-CONH}$) و استر ($\text{CH}_2\text{-O-CO}$) که در مجاورت اکسیژن قرار می‌گیرند، به‌عنوان یک پیک وسیع در محدوده $4.05-4.65\text{ ppm}$ مشاهده می‌شود. پیک در ناحیه $3.20-3.70\text{ ppm}$ مربوط به گروه (O-CH_2) و پیک در 2.88 ppm مربوط به پایانه‌های CH_2 در HDI ($\text{CH}_2\text{-NHCO}$) وجود دارد. اتم‌های هیدروژن در گروه متیلن که به کربونیل ($\text{CH}_2\text{-COO}$) متصل است در 2.73 ppm ظاهر شده‌اند. تغییرات شیمیایی سایر گروه‌های متیلن در بخش HDI در $0.70-1.30\text{ ppm}$ مشاهده می‌شود [38-41]. با توجه به نتایج FTIR و $^1\text{H-NMR}$ ، نانوترکیب P/G با موفقیت ساخته شده است.



شکل 3: طیف $^1\text{H-NMR}$ از نمونه P/G20

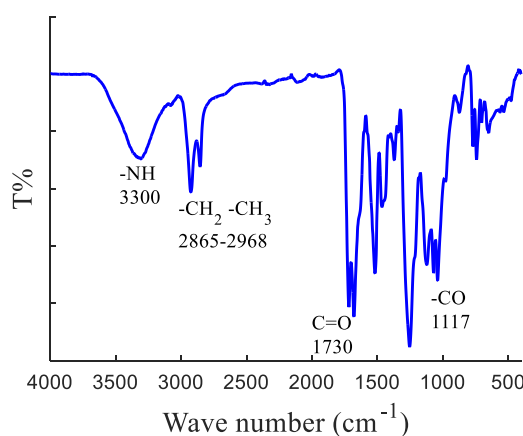
رسانا وظیفه رسانایی را بر عهده دارند. برای غلظت پرکننده سه ناحیه عایق، نفوذ و ناحیه رسانا وجود دارد [34].

خصوصیات ساختاری ترکیب‌های ساخته شده از طریق تبدیل فوریه فرسوخ (FTIR) و آنالیز $^1\text{H-NMR}$ انجام شد. طیف FTIR نانوترکیب‌ها برای شناسایی ساختار شیمیایی آنها با استفاده از طیف‌سنج Bruker TENSUR II FTIR در محدوده طول موج $4000-400\text{ cm}^{-1}$ گرفته شده است. طیف $^1\text{H-NMR}$ در محلول (DMSO-d_6) از طریق دستگاه Bruker Avance III 400-MHz، و بررسی میکروسکوپی تصاویر SEM مربوط به نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Tescan VEGA 3 به دست آمده است.

اندازه‌گیری جریان-ولتاژ (IV-28، IRASOL، ایران) برای تعیین رفتار الکتریکی، و همچنین، ویژگی مکانیکی نمونه‌ها با دستگاه تست Tensile Universal (TB5T) انجام شد. سرعت گسترش 5 میلی‌متر در دقیقه و لودسل 100 نیوتن بود. نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM E8M-04 با ضخامت 0.3 mm آماده و سپس، مورد آزمایش قرار گرفتند.

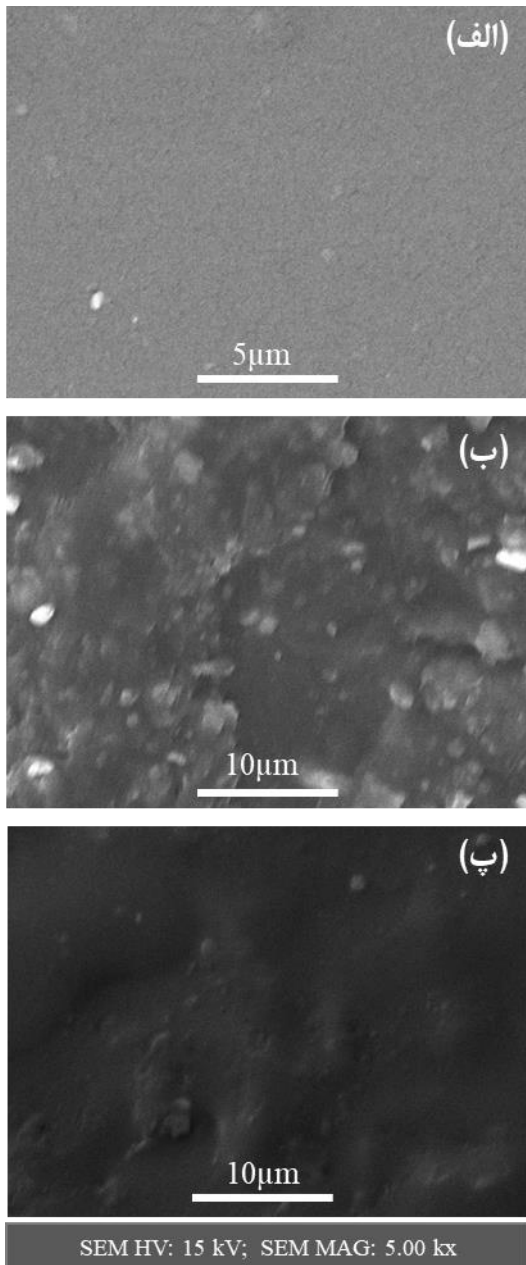
3- بحث و نتایج

طیف FTIR ترکیب P/G20 در شکل 2 نشان داده شده است. نوار جذبی در 3300 cm^{-1} به دلیل پیوندهای اورتان NH- با پیوند هیدروژنی است و همچنین، عدم وجود نوار در 3400 تا 2400 cm^{-1} به معنی واکنش کامل زنجیر فزاینده (عدم وجود گروه O-H) است.



شکل 2: نمودار FTIR از نمونه P/G20

بستر بسیار افزایش می‌یابد که منجر به تضعیف خصوصیت مکانیکی می‌شود [۴،۴۲].



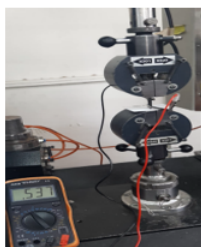
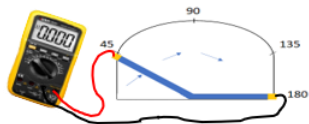
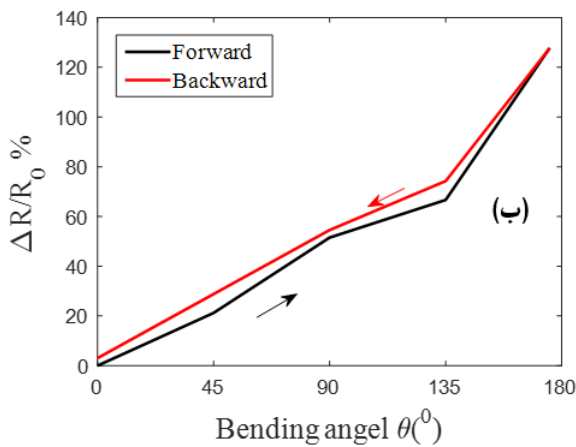
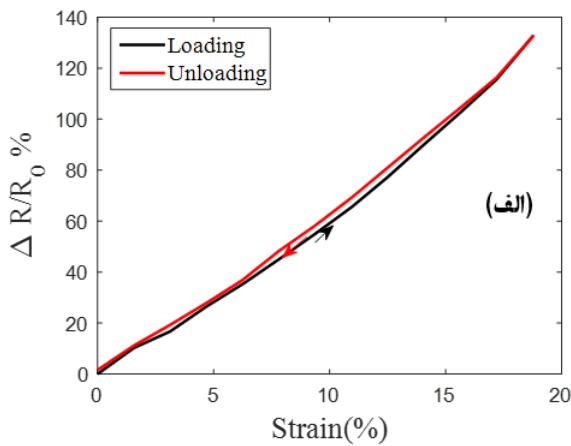
شکل ۴: تصاویر SEM از نمونه‌های (الف) پلی‌اورتان خالص، (ب) P/G۵، و (پ) P/G۲۰

برای غلظت پرکننده سه ناحیه عایق، نفوذ و رسانا وجود دارد [۳۴]، که با توجه به پاسخ ماده به رفتار الکتریکی و همچنین کمک از تصاویر SEM می‌توان ناحیه مورد نظر را حدس زد.

تصاویر SEM از سطح پلی‌اورتان خالص و ترکیب با ۵ درصد وزنی P/G۵ و ۲۰ درصد وزنی P/G۲۰ در شکل ۴ (الف)، (ب) و (پ) به ترتیب با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده است. از آنجا که بسیار پلی‌اورتان یک بستر عایق است، دلیل رسانندگی الکتریکی این بسیار نانو صفحات گرافن است. همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود پراکندگی ذرات گرافن در سطح بستر بسیار مشهود است، که با اتصال آنها به هم مسیر رسانا تشکیل می‌شود و شاهد خصوصیات الکتریکی هستیم. در نمونه ۵ درصد وزنی شکل ۴ (ب) با وجود پراکندگی خوب ذرات، بین آنها فاصله وجود دارد و کلوخیدگی ذرات محسوس است با این وجود و مسیرهای رسانا در برخی جهات ایجاد شده‌اند. اما در نمونه ۲۰ درصد وزنی شکل ۴ (پ) صفحات گرافن تقریباً کل سطح را پوشش داده‌اند و از تمام جهات این مسیرها ایجاد شده است. در تصاویر SEM ساختار ورق‌ای با جهت‌گیری نسبتاً منظم را می‌توان دید. برگه‌های شکسته گرافن نیز در برخی نقاط دیده می‌شود. این نتایج پراکندگی خوب گرافن در بستر پلی‌اورتان را نشان می‌دهد. این ساختار منظم همچنین هدایت الکتریکی و ویژگی مکانیکی ورق را تا حدودی تضمین می‌کند.

منحنی‌های تنش-کرنش (Stress-Strain) مربوط به P/G (۰، ۵، ۲۰ درصد وزنی) در شکل ۵ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر استحکام کششی و ازدیاد طول در هنگام شکست ترکیب P/G، با افزایش کسر جرمی گرافن کاهش می‌یابد، در حالی که مدول یانگ افزایش می‌یابد (جدول ۱). مقدار مدول یانگ نشان‌دهنده نرمی ورق‌ها است. همچنین، نتایج نشان دهنده پراکندگی یکنواخت خوب گرافن با ۵ درصد وزنی در بستر بسیاری است که ویژگی مکانیکی را بهبود می‌بخشد. در حالی که محتوای جرمی گرافن در ترکیب بسیاری ۲۰ درصد وزنی بیشتر است.

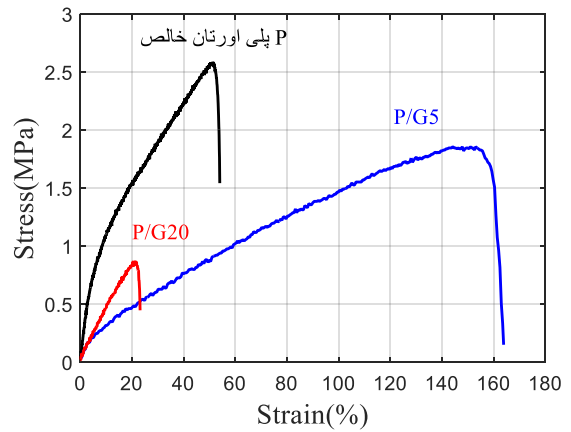
P/Gها در مقایسه با P (پلی‌اورتان خالص) دارای مدول یانگ و استحکام کششی کمتری هستند که به دلیل وجود مواد اضافی و اختلاف اندازه و نسبت آنها است. گرافن به دلیل ویژگی مکانیکی خوب در غلظت‌های پایین بهتر در بستر بسیار پراکنده می‌شود و باعث بهبود خصوصیات مکانیکی می‌شود اما در غلظت‌های بالاتر این نانو ذرات به یک دیگر متصل و کلوخه (سنگ دانه) می‌شوند و از طرفی جدایش فازی با افزودن غلظت بیشتر پرکننده در



(پ)

شکل ۶: تغییرات نسبی مقاومت به عنوان تابعی از تنش کششی و زاویه خمشی نمونه P/G۲۰ و روش اندازه گیری آزمایش به ترتیب در (الف)، (ب) و (پ) نشان داده شده است.

تغییرات نسبی مقاومت به عنوان تابعی از تنش کششی، کرنش و زاویه خمشی P/G۲۰ و نحوه‌ی راه‌اندازی آزمایش‌ها به ترتیب در شکل ۶ (الف)، (ب) و (پ) نشان داده شده است. برای این اندازه‌گیری، دو لبه انتهایی نمونه به اهم‌متر متصل می‌شود و در زاویه‌های خمشی به صورت رفت (Forward) و برگشت (Backward)، و برای اندازه‌گیری تغییرات مقاومت تحت کرنش کششی، با اعمال کشش (Loading) و حذف آن



شکل ۵: منحنی تنش-کرنش (Stress-Strain).

جدول ۱: مقادیر استحکام کششی، مدول یانگ و درصد کشش نمونه‌ها

نمونه	کششی استحکام (MPa)	مدول یانگ (MPa)	کشش %
P	۲,۵۸۹	۴	۵۱,۲۱
P/G۵	۱,۸۳	۱	۱۵۴,۷
P/G۲۰	۰,۸۷	۳,۶۷	۲۱,۶۸

ترکیب P/G با ۵ درصد وزنی گرافن، دارای مقاومت ورق الکتریکی در محدوده مقاومت پوست انسان (کیلو اهم بر مربع) است. با توجه به مقاومت بالا و تصاویر SEM می‌توان استنباط کرد که ترکیب در ناحیه نفوذی الکتریکی قرار دارد که در آن ناحیه نانوذرات گرافن در برخی جهات بسیار مسیره‌های رسانا را تشکیل داده‌اند، و وظیفه انتقال بار الکتریکی را در بستر بسیار انجام می‌دهند. در حالی که ترکیب ۲۰ درصد وزنی P/G۲۰، دارای مقاومت ورق خوبی حدود ۱۳۵ اهم بر مربع است. از طرفی با توجه به تصویر SEM پوشش کامل ذرات گرافن بر سطح و بستر بسیار مشهود است که می‌تواند دلالت بر حضور در ناحیه رسانا باشد، جایی که شبکه‌های رسانا به اندازه کافی در بستر بسیاری (P) پراکنده می‌شوند و منجر به مقاومت الکتریکی کمتر می‌شوند. با این وجود در مورد آستانه نفوذ به دقت نمی‌توان نظر داد و شاید در غلظت‌های کمتری رخ دهد (آستانه نفوذ غلظت بحرانی هست که در آن تغییرات مقاومت بصورت چشم‌گیر از عایق به سمت رسانا تغییر می‌کند) [۳۴].

تشکر و قدردانی

تشکر ویژه از حمایت‌ها و زحمات استاد فرهیخته جناب دکتر حسین مختاری، که همه‌گیری ویروس کرونا جامعه علمی را از وجود ایشان محروم کرد، یاد و خاطرشان گرامی باد.

مراجع

- [1] S. Naghdi, K. Rhee, D. Hui, S. Park, "A Review of Conductive Metal Nanomaterials as Conductive, Transparent, and Flexible Coatings, Thin Films, and Conductive Fillers: Different Deposition Methods and Applications," *Coatings*, 8, 278, 2018.
- [2] C. Xu, S. Hu, R. Zhang, H. Hu, C. Ying, F. Zhang, Q. Liu, X. Fu, "Preparation and properties of flexible conductive polydimethylsiloxane composites containing hybrid fillers," *Polymer Bulletin*, 76, 6487–6501, 2019.
- [3] Y. Wang, P. Liu, H. Wang, B. Zeng, J. Wang, F. Chi, "Flexible organic light-emitting devices with copper nanowire composite transparent conductive electrode," *Journal of Materials Science*, 54, 2343–2350, 2019.
- [4] Y. Wang, Z. Zhou, J. Zhang, J. Tang, P. Wu, K. Wang, Y. Zhao, "Properties of graphene-thermoplastic polyurethane flexible conductive film," *Coatings*, 10, 1-13, 2020.
- [5] J.O. Akindoyo, M.D.H. Beg, S. Ghazali, M.R. Islam, N. Jeyaratnam, A.R. Yuvaraj, "Polyurethane types, synthesis and applications – a review," *RSC Advances*, 6, 114453–114482, 2016.
- [6] H. Khatoun, S. Ahmad, "A review on conducting polymer reinforced polyurethane composites," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 53, 1–22, 2017.

(Unloading) ثبت می‌شوند. نتایج برگشت‌پذیری خوبی از ورق P/G₂₀ رسانا را تحت تنش-کشش و همچنین و خمش نشان می‌دهد، که می‌تواند به عنوان یک کاربرد الکترونیکی پوشیدنی و سنجش فشار مفید مطرح شود. به طور کلی خم شدن یا کشش ورق، سطح مقطع، طول (A, L از معادله ۱) و فاصله شبکه‌های رسانا در بستر بسپاری را تغییر می‌دهد. از سوی دیگر، تغییرات فشار یا هر گونه اغتشاش خارجی منجر به تغییر گاف انرژی‌های حالت‌های فرمی و ثابت دی‌الکتریک شبکه‌های رسانا (گرافن) می‌شود و در نتیجه منجر به تغییر مقاومت الکتریکی می‌شود [۹-۱۱]. همچنین، در درصدهای وزنی کمتر نمونه‌ها پاسخ قابل توجه‌ای نشان ندادند و در درصدهای بالاتر نیز محدودیت وجود دارد زیرا در ترکیبات در صورت افزایش زیاد مقدار پرکننده ورق تشکیل نمی‌شود و خصوصیات بسپار اصلی تضعیف می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

ترکیب انعطاف‌پذیر پلی‌اورتان-گرافن با کسرهای جرمی متفاوت گرافن به عنوان یک پرکننده رسانا برای ساخت ورق‌های ترکیب P/G رسانا استفاده شد. تجزیه و تحلیل خصوصیات ساختار ورق‌ها توسط طیف سنجی FTIR و ¹H-NMR تایید شد.

نتایج نشان می‌دهد که کسر جرمی گرافن تا ۵ درصد وزنی ترکیب P/G به ناحیه نفوذ می‌رود، که در آن مسیرهای رسانا در بستر بسپار ساخته می‌شوند. نتایج کششی نشان می‌دهد که با افزایش کسر جرمی گرافن در ترکیب P/G، مدول یانگ افزایش می‌یابد و همچنین، استحکام کششی کاهش می‌یابد. مقاومت بالای P/G₅ در محدوده پوست انسان (کیلو اهم بر مربع) و کرنش کششی قابل توجهی دارد. افزون بر این، مقاومت الکتریکی پایین ورق P/G₂₀ (۱۳۵ اهم بر مربع)، تغییرات نسبی مقاومت به عنوان تابعی از زاویه خمش و کرنش کششی اندازه‌گیری شد و نتایج برگشت‌پذیری خوبی را نشان می‌دهند که می‌تواند در دستگاه‌های الکترونیکی پوشیدنی مورد استفاده قرار گیرد.

and Optical Properties of FAPbBr₃ Perovskite,” *Coatings*, 11, 1341, 2021.

[14] E. Owji, H. Mokhtari, F. Ostovari, B. Darazereshki, N. Shakiba, “2D materials coated on etched optical fibers as humidity sensor,” *scientific reports*, 11, 1771, 2021.

[15] F. Ostovari, Y. Abdi, S. Darbari, F. Ghasemi, “Effects of electromechanical resonance on photocatalytic reduction of the free-hanging graphene oxide sheets,” *Journal of Nanoparticle Research*, 15, 1551, 2013.

[16] F. Ostovari, M.K. Moravvej-Farshi, “Photodetectors with zigzag and armchair graphene nanoribbon channels and asymmetric source and drain contacts: Detectors for visible and solar blind applications,” *Journal of Applied Physics*, 120, 144505, 2016.

[17] S.G. Al-Shawi, N.A. Alekhina, S. Aravindhana, L. Thangavelu, N.V. Kartamyshev, R.R. Zakieva, “Synthesis of NiO Nanoparticles and Sulfur, and Nitrogen co Doped-Graphene Quantum Dots/ NiO Nanocomposites for Antibacterial Application,” *Journal of Nanostructures*, 11, 181–188, 2021.

[18] M. Golkar Fard, K. Yousefi, K. Yousefi, “Graphene based nanostructure interaction with human liver cancer cells,” *Advances in Applied NanoBio-Technologies*, 2, 60–71, 2021.

[19] P. Saida, G. Dmitry, K. Nafsen, B. Kristina, A. Georgiy, “Theoretical study of Graphene nanoparticles surface effects on Removal of Pharmaceuticals Contaminants from water by neural network computational method,” *Journal of Research in Science, Engineering and Technology*, 6, 15–24, 2018.

[7] M. Alem, A. Teimouri, H. Salavati, S. Kazemi, “Central composite design optimization of methylene blue scavenger using modified graphene oxide based polymer,” *Chemical Methodologies*, 1, 55–73, 2017.

[8] S.S.M. Hassan, A.H. Kamel, H.M. Hashem, E.M.A. “Bary, Drug delivery systems between metal, liposome, and polymer-based nanomedicine: A review,” *European Chemical Bulletin*, 9, 91, 2020.

[9] E. Owji, A. Keshavarz, H. Mokhtari, “Optical gain of a triple coaxial cylindrical quantum well wires laser under the geometrical effects and magnetic fields”, *Optik*, 139, 309–314, 2017.

[10] E. Owji, A. Keshavarz, H. Mokhtari, “The effects of temperature, hydrostatic pressure and size on optical gain for GaAs spherical quantum dot laser with hydrogen impurity,” *Superlattices Microstructures*, 98, 276-282, 2016.

[11] E. Owji, H. Mokhtari, A. Keshavarz, “Effects of Temperature, Pressure, and Size on Different Transitions of Optical Properties of Spherical Quantum Dot,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, 42, 1669-1675, 2017.

[12] E. Owji, A. Keshavarz, H. Mokhtari, “The effects of a geometrical size, external electric fields and impurity on the optical gain of a quantum dot laser with a semi-parabolic spherical well potential,” *Physica B: Condensed Matter*, 508, 7-11, 2017.

[13] A. Al-Kahtani, S. Tabassum, I. Raya, I. Khlewee, S. Chupradit, A. Davarpanah, M. Elveny, S. Ali, “Influence of Different Rotations of Organic Formamidinium Molecule on Electronic

- [28] E. Barjasteh, C. Sutanto, D. Nepal, "Conductive Polyamide–Graphene Composite Fabric via Interface Engineering," *Langmuir*, 35, 2261–2269, 2019.
- [29] J.T. Kim, B.K. Kim, E.Y. Kim, S.H. Kwon, H.M. Jeong, "Synthesis and properties of near IR induced self-healable polyurethane/graphene nanocomposites," *European polymer journal*, 49, 3889–3896, 2013.
- [30] L. Huang, N. Yi, Y. Wu, Y. Zhang, Q. Zhang, Y. Huang, Y. Ma, Y. Chen, "Multichannel and Repeatable Self-Healing of Mechanical Enhanced Graphene-Thermoplastic Polyurethane Composites," *Advanced Materials*, 25, 2224–2228, 2013.
- [31] C.-H. Liu, X. Yu, "Silver nanowire-based transparent, flexible, and conductive thin film," *Nanoscale research letters*, 6, 75, 2011.
- [32] J. Xie, W. Pan, Z. Guo, "Preparation of highly conductive polyurethane/polypyrrole composite film for flexible electric heater," *Journal of Elastomers & Plastics*, 53, 97–109, 2021.
- [33] Y.-L. Huang, A. Baji, H.-W. Tien, Y.-K. Yang, S.-Y. Yang, S.-Y. Wu, C.-C.M. Ma, H.-Y. Liu, Y.-W. Mai, N.-H. Wang, "Self-assembly of silver–graphene hybrid on electrospun polyurethane nanofibers as flexible transparent conductive thin films," *Carbon*, 50, 3473–3481, 2012.
- [34] M. Rahaman, A. Aldalbahi, L. Nayak, R. Giri, "Electrical Conductivity of Polymer–Carbon Composites: Effects of Different Factors, in: Carbon-Containing Polymer Composites," Springer, 159-210, 2019.
- [20] R.K. Mishra, J. Abraham, K. Joseph, K. Jayanarayanan, N. Kalarikkal, S. Thomas, "Chapter 12 - Conducting Polyurethane Composites," Elsevier, 365–399, 2017.
- [21] G.C. Ghivela, J. Sengupta, "The Promise of Graphene: A Survey of Microwave Devices Based on Graphene," *IEEE Microwave Magazine*, 21, 48–65, 2020.
- [22] Y. Wei, R. Yang, "Nanomechanics of graphene," *National Science Review*, 6, 324–348, 2019.
- [23] Y. Pang, Z. Yang, X. Xie, L.-Q. Tao, "Graphene Oxide Modified Porous Graphene for Aqueous Alcohol Detection," *IEEE Sensors Lett*, 4, 1–4, 2020.
- [24] T.T. Tung, M.J. Nine, M. Krebsz, T. Pasinszki, C.J. Coghlan, D.N.H. Tran, D. Losic, "Recent Advances in Sensing Applications of Graphene Assemblies and Their Composites," *Advanced Functional Materials*, 27, 1702891, 2017.
- [25] S. Korkmaz, İ.A. Kariper, "Graphene and graphene oxide based aerogels: Synthesis, characteristics and supercapacitor applications," *Journal of Energy Storage*, 27, 101038, 2020.
- [26] V.H. Pham, T.V. Cuong, T.T. Dang, S.H. Hur, B.-S. Kong, E.J. Kim, E.W. Shin, J.S. Chung, "Superior conductive polystyrene – chemically converted graphene nanocomposite," *Journal of Materials Chemistry*, 21, 11312, 2011.
- [27] D.R. Dhakal, P. Lamichhane, K. Mishra, T.L. Nelson, R.K. "Vaidyanathan, Influence of graphene reinforcement in conductive polymer: Synthesis and characterization," *Polymers for Advanced Technologies*, 30, 2172–2182, 2019.

- [41] B. Gregorí Valdés, C. Gomes, P. Gomes, J. Ascenso, H. Diogo, L. Gonçalves, R. Galhano dos Santos, H. Ribeiro, J. Bordado, "Synthesis and Characterization of Isosorbide-Based Polyurethanes Exhibiting Low Cytotoxicity Towards HaCaT Human Skin Cells," *Polymers*, 10, 1170, 2018.
- [42] A. Liang, X. Jiang, X. Hong, Y. Jiang, Z. Shao, D. Zhu, "Recent Developments Concerning the Dispersion Methods and Mechanisms of Graphene," *Coatings*, 8, 33, 2018.
- [35] J. Datta, P. Kosiorrek, M. Włoch, "Synthesis, structure and properties of poly(ether-urethane)s synthesized using a tri-functional oxypropylated glycerol as a polyol," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, 155–167, 2017.
- [36] A. Bahadur, M. Shoaib, A. Saeed, S. Iqbal, "FT-IR spectroscopic and thermal study of waterborne polyurethane-acrylate leather coatings using tartaric acid as an ionomer," *E-Polymers*, 16, 463–474, 2016.
- [37] P.K. Behera, K.M. Usha, P.K. Guchhait, D. Jehnichen, A. Das, B. Voit, N.K. Singha, "A novel ionomeric polyurethane elastomer based on ionic liquid as crosslinker," *RSC Advances*, 6, 99404–99413, 2016.
- [38] N. Kasmi, M. Roso, N. Hammami, M. Majdoub, C. Boaretti, P. Sgarbossa, C. Vianello, G. Maschio, M. Modesti, A. Lorenzetti, "Microwave-assisted synthesis of isosorbide-derived diols for the preparation of thermally stable thermoplastic polyurethane," *Designed Monomers and Polymers*, 20, 547–563, 2017.
- [39] H.-Y. Mi, X. Jing, B.N. Napiwocki, B.S. Hagerty, G. Chen, L.-S. Turng, "Biocompatible, degradable thermoplastic polyurethane based on polycaprolactone-block-polytetrahydrofuran-block-polycaprolactone copolymers for soft tissue engineering," *Journal of Materials Chemistry B*, 5, 4137–4151, 2017.
- [40] A. Abbasi, G. Mir Mohamad Sadeghi, I. Ghasemi, M. Shahrousvand, "Shape memory performance of green in situ polymerized nanocomposites based on polyurethane/graphene nanoplatelets: Synthesis, properties, and cell behavior," *Polymer Composites*, 39, 4020–4033, 2018.



Investigation of mechanical and electrical properties of polyurethane-graphene composite films

Erfan. Owj¹ | Fatemeh. Ostovari^{1,*} | Alireza. Keshavarz² | Hossein Mokhtari¹

¹Department of Physics, Yazd University, Yazd

²Department of Photonics, Faculty of Physics, Shiraz University of Technology.

Abstract: In this research the electrical and mechanical properties of the flexible polyurethane-graphene (P / G) composite films were investigated. The results show that the addition of graphene (G) leads to making the conductive paths in the polymer matrix. By increasing the mass fraction of G in composition, Young's modulus increases, as well as the tensile strength decreases. P/G with 5wt% exhibits a high sheet resistance about the human skin range, which has a good tensile strain (154%). Besides the good sheet resistance of P/G with 20wt% of G (135 Ω /sq), the relative differentiation of resistance as a function of bending angle and tensile is determined, and the results show strong reversibility and capabilities as wearable electronics and strain sensing applications.

Keywords: Polyurethane, Graphene, Flexible layers, Electrical conductivity, Strain sensor.