



Numerical and Experimental Investigation of the Strain Rate Effect on Tensile Properties of Graphene/Epoxy Nanocomposites

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Amini Nejad S.H.¹ MSc,
Majzoobi G.H.*¹ PhD,
Sabet S.A.R.² PhD

How to cite this article

Amini Nejad S.H, Majzoobi G.H, Sabet S.A.R. Numerical and Experimental Investigation of the Strain Rate Effect on Tensile Properties of Graphene/Epoxy Nanocomposites. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(2):499-508.

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²Composite Department, Polymer Processing Faculty, Iran Polymer & Petrochemical Institute, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Phone: -

Fax: -

gh_majzoobi@basu.ac.ir

Article History

Received: April 12, 2019

Accepted: July 13, 2019

ePublished: February 01, 2020

ABSTRACT

In this research, the effect of strain rate on the tensile behavior of the graphene/epoxy nanocomposites was investigated. The specimens were prepared for 0.05, 0.1, 0.3 and 0.5 wt.% graphene oxide and were subjected to tensile tests at different strain rates. The experimental results showed that the maximum improvements in the tensile strength, the modulus, and nanocomposite were 9%, 16%, and 0.1 wt.%, respectively. Also, the results indicated that the epoxy and its nanocomposites were sensitive to the strain rate. The rate sensitivity decreased with the increase of the graphene weight percentages. Moreover, it was shown that by increasing the strain rate, the tensile strength and modulus for pure epoxy were improved by 15.8% and 16.8%, respectively. In this study, the appropriateness and applicability of the Johnson-Cook material model for describing the stress-strain relation of the nanocomposites were examined by a combined experimental-numerical-optimization technique. The numerical simulations were carried out using Abaqus commercial program and the optimizations were performed using the Surrogate modeling. The results showed that the Johnson-cook model is not accurate at very low strain rates. However, the accuracy of the model was remarkably improved by increasing the graphene weight percentage or increasing strain rate.

Keywords Epoxy; Graphene Oxide; Strain Rate; Strength; Johnson-Cook Model

CITATION LINKS

[1] What is the choice for supercapacitors: Graphene or graphene ... [2] Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and ... [3] The fabrication, properties, and uses of graphene/polymer ... [4] Compression yielding of epoxy: Strain rate and temperature ... [5] High strain rate behavior of graphene reinforced polyurethane ... [6] Effect of graphene nanosheets (GNS) and graphite nanoplatelets (GNP) on the mechanical properties of epoxy ... [7] Preparation of epoxy nanocomposites containing well-dispersed graphene ... [8] Modeling and experimentation of multi-layered nanostructured graphene-epoxy nanocomposites for enhanced thermal and mechanical ... [9] Parametric study of strain rate effects on nanoparticle-reinforced polymer ... [10] The effect of strain-rate on the tensile and compressive behavior of graphene reinforced ... [11] Tension and compression tests of two polymers under quasi-static and dynamic ... [12] High strain rate mechanical behavior of epoxy under compressive loading: Experimental and modeling ... [13] Experimental study on mechanical properties of graphene oxide/epoxy nanocomposites in different strain ... [14] Characterization and simulation of impact behavior of graphene/polypropylene nanocomposites using a novel strain rate-dependent micromechanics ... [15] Strain rate dependent micromechanical modeling of reinforced polymers with carbon ... [16] A dynamic constitutive-micromechanical model to predict the strain rate-dependent mechanical behavior of carbon nanofiber/epoxy ... [17] Properties of graphene nanopowder and multi-walled carbon nanotube-filled epoxy thin-film nanocomposites for electronic applications: The effect of sonication time and filler ... [18] Role of graphene oxide and sonication time on mechanical properties of epoxy nanocomposites at high strain ... [19] A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high ... [20] Particle swarm with radial basis function surrogates for expensive black-box ... [21] Determination of the extended Drucker-Prager parameters using the surrogate-based optimization method for polypropylene ... [22] Surrogate model-based optimization framework: A case study in aerospace ... [23] Surrogate-based analysis and ... [24] SO-MI: A surrogate model algorithm for computationally expensive nonlinear mixed-integer black-box global optimization ... [25] Surrogate model algorithms for computationally expensive black-box global optimization ... [26] High strain rate compression of epoxy based nanocomposites ...

مطالعه عددی- تجربی اثر نرخ کرنش بر خواص کششی نانوکامپوزیت‌های گرافن- اپوکسی

شهاب امینی‌نژاد MSc

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

غلامحسین مجذوبی PhD*

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

سیدعلی‌رضا ثابت PhD

گروه کامپوزیت، پژوهشکده فرآیند پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، اثر نرخ کرنش بر رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های گرافن- اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها برای 0.5 ، 1 ، 3 و 5 درصد وزنی گرافن اکساید آماده‌سازی شدند و تحت آزمون کشش در نرخ‌های کرنش مختلف قرار گرفتند. نتایج تجربی نشان داد که حداکثر بهبود در استحکام کششی و مدول به ترتیب 9 و 16% و برای نانوکامپوزیت، 1 درصد وزنی به‌دست آمده بودند. همچنین، نتایج نشان داد که اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های آن به نرخ کرنش حساس بودند. حساسیت به نرخ با افزایش درصد‌های وزنی گرافن، کاهش یافت. علاوه بر آن نشان داده شد که با افزایش نرخ کرنش، استحکام کششی و مدول اپوکسی خالص به ترتیب $8/15$ و $8/16\%$ بهبود یافتند. در این مطالعه، تناسب و کارایی مدل ماده جانسون- کوک برای توصیف ارتباط تنش- کرنش نانوکامپوزیت‌ها، به کمک تکنیک ترکیب آزمایشی- عددی- بهینه‌سازی ارزیابی شد. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از برنامه تجاری آباکوس و بهینه‌سازی، با استفاده از مدل‌سازی جایگزینی انجام گرفت. نتایج نشان داد که در نرخ‌های کرنش خیلی پایین، مدل جانسون- کوک دقیق نیست. با این حال، با افزایش درصد وزنی گرافن یا افزایش نرخ کرنش، دقت مدل بهبود چشمگیری یافت.

کلیدواژه‌ها: اپوکسی، گرافن اکساید، نرخ کرنش، استحکام، مدل جانسون- کوک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۲

*نویسنده مسئول: gh_majzoobi@basu.ac.ir

۱-مقدمه

دستیابی به مواد پیشرفته با خواص بهبودیافته همواره مورد توجه محققان بوده است. نانوکامپوزیت‌ها از جمله مواد پیشرفته هستند که در انواع مختلفی ساخته می‌شوند. در رابطه با نانوکامپوزیت‌های پلیمری از نوع ترموست، رزین‌های مختلفی از جمله اپوکسی مورد استفاده قرار گرفته است. بهبود خواص رزین از طریق نانوذرات مختلف از جمله گرافن مورد توجه پژوهشگران بوده است. گرافن دارای سطح ویژه بالایی در حدود $2600 \text{ m}^2/\text{g}$ [1]، مدول یانگ 1 TPa [2] و استحکام کششی 130 GPa [3] است که در بهبود خواص مکانیکی رزین‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر آن، نرخ بارگذاری نیز می‌تواند منجر به تغییر رفتار و خواص ماده شود. مواد پلیمری مانند اپوکسی [4] و پلی‌یورتان [5] عموماً به نرخ کرنش حساس هستند و بررسی اثر همزمان نانوذرات و نرخ کرنش بر رفتار نانوکامپوزیت‌های پلیمری امری مهم است. در سالیان اخیر، بررسی

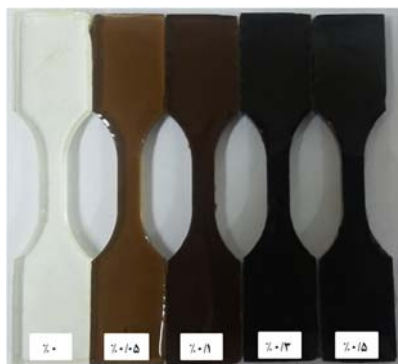
رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت‌های گرافنی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

شکرپه و همکاران [6]، به بررسی اثر دو نوع گرافن با قطر و ضخامت متفاوت، بر خواص کششی اپوکسی پرداختند. ایشان نمونه‌های کششی را برای درصد‌های وزنی مختلف تحت آزمایش قرار دادند و مشاهده نمودند که گرافن با ضخامت کمتر، اثر بیشتری بر بهبود خواص دارد و بهبود $15/7$ درصدی برای استحکام کششی گزارش شد. هایکینگ و همکاران [7]، نمونه‌های 4 و 8 درصد وزنی گرافن اکساید- اپوکسی را تهیه نمودند. نتایج تجربی ایشان بیانگر بهبود محدود مدول و افزایش بیش از 30 درصدی استحکام کششی بود. عطیف و همکاران [8]، بهبود خواص مختلف مکانیکی اپوکسی را به کمک گرافن چند لایه، بررسی تجربی نمودند. در گزارش آنها بهبود 26 و 43 درصدی مدول و استحکام کششی، برای 1 و 8 درصد وزنی گرافن گزارش شد. سلطانی‌نیا و همکاران [9]، به بررسی اثر نرخ‌های کرنش $1-100$ بر خواص اپوکسی تقویت‌شده با گرافن، نانوالیاف کربن و نانولوله کربنی پرداختند که اثر مثبت نرخ کرنش بر بهبود خواص نمونه‌ها گزارش شد. اثر نرخ‌های کرنش $1-100$ بر رفتار کششی و فشاری اپوکسی تقویت‌شده با 25 و 5 درصد وزنی گرافن، توسط شادلو و همکاران [10] مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات ایشان بیانگر رابطه مستقیم بین بهبود استحکام و مدول فشاری نمونه‌ها، با افزایش نرخ کرنش و درصد وزنی گرافن بود. رفتار کششی و فشاری پلیمرهای پی‌ام‌ام ای (PMMA; Polymethyl Methacrylate) و اپوکسی تحت نرخ‌های بارگذاری مختلف شبه‌استاتیک و بالا، توسط چن و همکاران [11] مورد بررسی قرار گرفت. افزایش چشمگیر استحکام برای هر دو حالت فشاری و کششی با تغییر رژیم بارگذاری از شبه‌استاتیک تا دینامیک گزارش شد. از دیگر مشاهدات ایشان تغییر الگوی شکست از حالت نرم به تُرد با افزایش نرخ بارگذاری بود. نایک و همکاران [12]، به بررسی رفتار اپوکسی خالص در نرخ‌های $1-683$ پرداختند و نتیجه‌گیری نمودند که استحکام و مدول فشاری اپوکسی با افزایش نرخ، بهبود یافته است. ایشان از قانون توانی نیز برای پیش‌بینی استحکام نمونه‌ها در نرخ بالا استفاده نمودند. در تحقیقی دیگر زارعی‌دارانی و همکاران [13]، نمونه‌های گرافن- اپوکسی را تحت نرخ‌های محدود استاتیکی و دینامیکی مورد آزمایش قرار داده‌اند. ایشان مشاهده نمودند که در نرخ‌های بالا، درصد‌های وزنی پایین گرافن تغییر محسوسی در استحکام اپوکسی ایجاد نمی‌نماید و در مقابل اثرگذاری گرافن در نرخ‌های شبه‌استاتیک مشهودتر است. پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری، تحت بارگذاری‌های مختلف دارای رفتارهای ویژه‌ای هستند و از این رو محققین سعی در پیش‌بینی رفتار این مواد دارند. شکرپه و جنیدی [14]، مدلی را از تلفیق مدل میکرومکانیکی هالپین- تسای و مدل گلدبرگ ارایه نموده‌اند. ایشان دقت مدل را برای نانوکامپوزیت گرافن- پلی‌پروپیلن، از طریق آزمون چارپی مورد ارزیابی قرار داده‌اند که تطابق مناسب بین مدل و نتایج آزمایشگاهی گزارش شد. مشابه پژوهش مذکور،

مطالعه عددی- تجربی اثر نرخ کرنش بر خواص کششی نانوکامپوزیت‌های گرافن- اپوکسی ۵۰۱
 شکل ۱، نمونه‌های کششی ساخته شده را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نمونه‌ها دارای طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۷۰، ۱۴/۵ و ۴ میلی‌متر هستند.

جدول ۱ زمان‌های آلتراسونیک انتخاب شده برای درصدهای وزنی مختلف نانوگرافن

درصد وزنی گرافن	زمان آلتراسونیک (دقیقه)
۰/۰۵	۴۵
۰/۱	۶۵
۰/۳	۱۲۰
۰/۵	۲۱۰



شکل ۱) نمونه‌های کششی ساخته شده

۳-۲- آزمایش‌ها

آزمون‌های کشش شبه‌استاتیک به کمک دستگاه سنتام، در حالت کنترل- جابجایی و برای چهار سرعت متفاوت فک انجام شده است. از اکستنسومتر برای ثبت دقیق جابجایی ناحیه گیج نمونه‌ها استفاده شده و تکرارپذیری آزمایش‌ها نیز با ۵ آزمایش بررسی شده است. قابل ذکر است که نرخ‌های کرنش حاصل از آزمایش‌ها برابر با ۰/۰۰۱۵، ۰/۰۰۳، ۰/۰۱۵ و ۰/۰۳۵ هستند.

۳-۳- شبیه‌سازی

۱-۳- مدل اجزای محدود

به منظور شبیه‌سازی نمونه‌های آزمون کشش، مدلی سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس ایجاد شده است. المان‌های مدل از نوع ۸ گره‌ای ۶ وجهی انتخاب شده‌اند و تعداد المان‌ها برای رسیدن به دقت قابل قبول در نتایج برابر با ۳۰۷۲ عدد تعیین شده است. شکل ۲، نمونه مدل‌سازی شده را نمایش می‌دهد.

۲-۳- مدل ماده

از مدل ماده جانسون- کوک [19] برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. این مدل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon_p^n)(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_m - T_{ref}} \right)^m \right) \quad (1)$$

این معادله اثرات کرنش پلاستیک، نرخ کرنش و تغییرات دمایی را در نظر می‌گیرد. با صرف نظر از تغییرات دمایی، مدل جانسون- کوک

شکریه و همکاران [15]، مدلی مشابه را برای پیش‌بینی منحنی تنش- کرنش ارائه نموده و دقت آن را برای نمونه‌های کششی نانولوله کربنی- پلی‌پروپیلن و نانولوله کربنی- اپوکسی مورد بررسی قرار دادند. در بین مدل ماده‌های مختلف، مدل جانسون- کوک از رایج‌ترین آنها است که عموماً برای فلزات مورد استفاده قرار گرفته است. شکریه و همکاران [16]، به بررسی این مدل برای نانوکامپوزیت‌های نانوالیاف کربن- اپوکسی پرداختند و مشاهده نمودند که این مدل منحنی تنش- کرنش پلاستیک را با خطا پیش‌بینی می‌نماید.

در این پژوهش، نخست نانوکامپوزیت‌های گرافن- اپوکسی برای درصدهای وزنی مختلف ساخته شده و تحت چهار نرخ کرنش متفاوت قرار می‌گیرند. سپس، تفسیر و تحلیل جامعی بر اثرات نرخ کرنش و درصدهای وزنی نانوگرافن بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها انجام می‌شود. سپس، برای نمونه‌های مختلف، ضرایب مدل ماده جانسون- کوک از طریق روش‌های نو آزمایشی- شبیه‌سازی- بهینه‌سازی همزمان استخراج خواهد شد. در پایان، به ارزیابی دقت مدل ماده در پیش‌بینی رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های ترموست پرداخته خواهد شد.

۲- مواد، ساخت نمونه و آزمایش‌ها

۱-۲- مواد اولیه

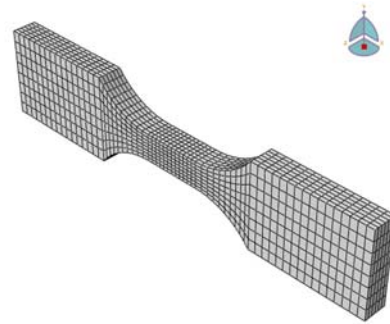
برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی Araldite LY5052 همراه هاردنر HY5052 استفاده شده است. علت انتخاب این نوع رزین ویسکوزیته پایین، آن است که پخش هرچه بهتر نانوذرات را فراهم می‌نماید. همچنین، نانوگرافن اکساید با ضخامت در حدود ۳-۶ nm به عنوان تقویت‌کننده، تهیه شده است.

۲-۲- ساخت نانوکامپوزیت‌ها

به منظور ساخت نمونه‌ها با درصدهای وزنی مختلف گرافن، در ابتدا مقدار مورد نیاز از گرافن به مقدار مشخصی از رزین اپوکسی اضافه می‌شود و به مدت ۲۰ دقیقه با همزن مکانیکی مخلوط می‌شود. سپس، به منظور جدایش کلوخه‌های نانوگرافن و پخش همگن آنها در رزین، دستگاه آلتراسونیک پرابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرآیند آلتراسونیک، پارامترهای مختلفی از قبیل زمان آلتراسونیک، توان خروجی، پالس، حجم ماده تحت آلتراسونیک، درصد وزنی نانو و غیره بر کیفیت پخش نانوذرات اثرگذار است [17]. طبق پژوهش انجام گرفته توسط مجدوبی و همکاران [18]، زمان‌های بهینه آلتراسونیک برای هر درصد وزنی گرافن به شرح جدول ۱ انتخاب شده‌اند. جزییات بیشتر از توان خروجی، پالس‌ها و شرایط آلتراسونیک در مرجع [18] ذکر شده است. قابل ذکر است که حین فرآیند آلتراسونیک، مخلوط گرافن- اپوکسی درون حمام یخ قرار می‌گیرد تا دمای آن تحت کنترل قرار گیرد.

پس از فرآیند آلتراسونیک، هاردنر با نسبت ۳۸ به ۱۰۰ و به مدت ۵ دقیقه با محلول ترکیب می‌شود. مخلوط تهیه شده به درون قالب‌های سیلیکونی ریخته شده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای محیط و سپس، ۷ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد پخت می‌شود.

دارای ۴ ثابت شامل A, B, n و C بوده که به‌ترتیب متناظر با تنش تسلیم، ضریب سخت‌شوندگی، توان سخت‌شوندگی و ضریب نرخ کرنش هستند. همچنین، $\dot{\epsilon}$ و $\dot{\epsilon}_0$ به‌ترتیب معرف نرخ کرنش و نرخ کرنش مرجع هستند.



شکل ۲) مدل اجزای محدود نمونه کششی

۴- تعیین ضرایب مدل ماده جانسون- کوک

۴-۱- روش بهینه‌سازی جایگزینی

به‌منظور تعیین ثابت‌های مدل جانسون- کوک، از روش معکوس بر پایه ترکیب نتایج تجربی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده شده است. در این روش، تفاوت بین منحنی‌های نیرو- جابجایی تجربی حاصل از آزمایش کشش و شبیه‌سازی به‌عنوان تابع هدف (Objective Function) در نظر گرفته می‌شود و این تابع بر اساس روش بهینه‌سازی جایگزینی (Surrogate Optimization) بهینه می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی جایگزینی روشی موثر است [20] که به‌صورت گسترده در روش اجزای محدود غیرخطی (NFEM) مورد استفاده قرار می‌گیرد [21, 22]. روش جایگزینی، دارای چهار گام است که عبارت‌اند از: الف) نمونه‌های اولیه به کمک روش‌های طراحی آزمایش (DOE) انتخاب می‌شوند؛ ب) شبیه‌سازی برای این نمونه‌ها انجام می‌شود؛ پ) مدل جایگزینی ساخته می‌شود و از بهینه‌سازی این مدل، دسته جدیدی از نمونه‌ها به‌دست می‌آیند، ت) مراحل ب تا پ مجدداً تکرار می‌شوند تا به همگرایی مطلوب دست یافته شود [21]. در ادامه، توضیحاتی در رابطه با مراحل فوق ارائه خواهد شد.

۴-۲- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش روشی مهم برای تولید نمونه‌های اولیه طراحی به‌منظور ساخت مدل جایگزینی است. تاکنون، روش‌های مختلفی برای تولید نمونه‌های اولیه رایج شده‌اند [23] که در این پژوهش از روش ال‌اچ‌اس (LHS) یا مکعب لاتین (Latin Hypercube Sampling) استفاده می‌شود.

۴-۳- ساخت مدل جایگزینی، بهینه‌سازی و تعیین ثابت‌های مدل

ساختار مدل جایگزینی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$f(x) = S(x) + e \quad (۲)$$

در این رابطه، $f(x)$ ، $s(x)$ و e به‌ترتیب تابع هدف، مدل جایگزینی و تابع خطای تصادفی هستند. مدل‌های جایگزینی متنوعی برای تخمین تابع $f(x)$ استفاده شده‌اند. برای مسایل پیچیده و غیرخطی

شدید، مدل تابع شعاعی پایه (RBF; Radial Basic Function) توصیه شده است [21]. این تابع در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر تابع $f(x)$ در نقاط نمونه انتخاب‌شده، $x_i = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ دارای مقادیر $f(x_i) = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]$ باشد، تابع شعاعی $S(x)$ به شرح زیر تعریف می‌شود [24]:

$$S(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \phi(\|x - x_i\|) + p(x) \quad (۳)$$

در رابطه فوق، $\|\cdot\|$ نرم اقلیدسی، λ_i پارامتر مجهول، $p(x)$ تابع چند جمله‌ای خطی و ϕ تابع شعاعی هستند. برای تابع شعاعی فرم‌های متعددی پیشنهاد شده‌اند [25] که از این بین، فرم مکعبی به‌صورت $\phi = r^3$ برای بهینه‌سازی جایگزینی توصیه شده است [20]. به‌منظور تعیین پارامترهای مجهول مدل جایگزینی، رابطه (۳) به فرم ماتریسی زیر قابل بازنویسی است [21]:

$$\begin{pmatrix} \phi & P \\ P^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_i \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \end{pmatrix} \quad (۴)$$

که در آن داریم:

$$P = \begin{bmatrix} x_1^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n^T & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_d \\ a \end{bmatrix}, \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} f(x_1) \\ \vdots \\ f(x_n) \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در رابطه (۴)، $\phi_{ij} = \phi(\|x_i - x_j\|)$ ماتریسی $n \times n$ است. همچنین، d بیانگر مرتبه مساله است. قابل ذکر است که در این پژوهش، تفاوت بین منحنی نیرو- جابجایی حاصل از آزمایش کشش و منحنی مربوط به شبیه‌سازی عددی، به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. در واقع تعداد k نقطه روی منحنی نیرو- جابجایی تجربی معین می‌شوند که تفاوت بین منحنی عددی و تجربی و تابع هدف در این نقاط، از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Delta f_i = |f_i^{exp} - f_i^{sim}| \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (۶)$$

$$f(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^k \Delta f_j^2} \quad (۷)$$

از آنجایی که در شبیه‌سازی‌ها از مدل جانسون- کوک، با صرف‌نظر از اثر دما استفاده می‌شود، بردار مجهولات شامل چهار ثابت مربوط به مدل ماده و یک ضریب مربوط به مدول الاستیسیته است. در شکل ۳، فلوچارت تعیین ضرایب مجهول از طریق بهینه‌سازی- شبیه‌سازی نشان داده شده است.

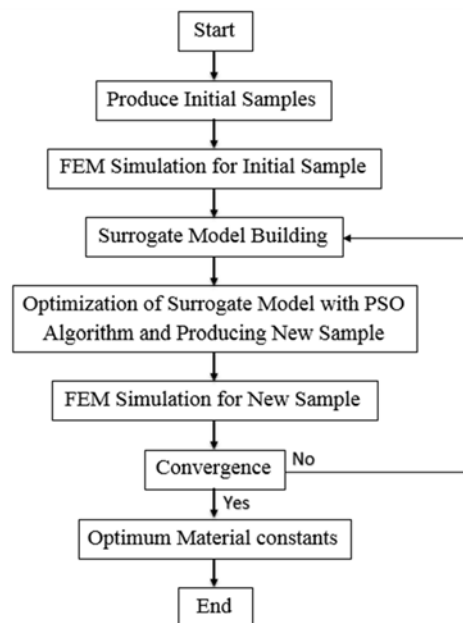
به کمک روش شرح‌داده‌شده در ابتدا، محدوده مناسبی برای ضرایب مجهول تعیین می‌شود و نمونه‌های اولیه به کمک مکعب لاتین ایجاد می‌شوند. به کمک نمونه اولیه، شبیه‌سازی انجام شده و مدل جایگزینی ساخته می‌شود. سپس، به کمک الگوریتم ازدحام ذرات (PSO; Particle Swarm Optimization)، مقدار بهینه هر ثابت تعیین می‌شود. نهایتاً، مجدداً شبیه‌سازی عددی برای نمونه بهینه‌شده انجام گرفته و معیار همگرایی بررسی می‌شود و بدین

مدول تمامی نمونه‌ها را بهبود و کرنش شکست را کاهش داده است. به‌عنوان مثال، برای اپوکسی خالص با افزایش نرخ کرنش از 5^{-1} به 15^{-1} به 0.0015 و 0.003 ، میزان کرنش شکست از حدود 0.8% به 0.6% کاهش یافته است که کاهش 25% درصدی را نشان می‌دهد. این بدین معنا است که با افزایش نرخ کرنش، رفتار ماده به سمت تردی میل می‌نماید و ماده امکان تغییر شکل پلاستیک کمتری را دارد. علت این موضوع به این صورت قابل تفسیر است که افزایش نرخ کرنش، جنبش زنجیره‌های پلیمر را کاهش داده و باعث می‌شود که در کرنش کمتر و تنش بالاتری گسیختگی رخ دهد.

اثرات همزمان افزایش نرخ کرنش و درصد وزنی گرافن در نمودارهای $a-3$ و $b-3$ به نحو واضح‌تری نمایش داده شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که خواص اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های آن وابستگی به نرخ کرنش دارند و با افزایش نرخ کرنش، هم مدول و هم استحکام بهبود می‌یابد. بالاترین استحکام و مدول الاستیسیته برای نانوکامپوزیت $1/10\%$ درصد وزنی به‌دست آمده است. از طرفی با توجه به نمودار $c-3$ ، این نکته استنباط می‌شود که با افزایش نرخ کرنش، درصد بهبود استحکام ناشی از حضور گرافن اُفت نموده است. به‌عنوان نمونه، برای نانوکامپوزیت $1/10\%$ درصد وزنی، مقدار بهبود استحکام نسبت به اپوکسی خالص برای نرخ‌های 15^{-1} و 3^{-1} 0.0015 و 0.003 از حدود 9% به $6/2\%$ کاهش یافته است. لذا، به نظر می‌رسد رفتار عمومی نمونه‌ها به این صورت است که افزایش نرخ کرنش، منجر به کاهش اثرگذاری نانوذرات می‌شود. این موضوع پیش‌تر توسط تیان و همکاران^[26] مشاهده شده است. علت را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که بیشترین سهم در بهبود استحکام در اثر افزایش نرخ کرنش، مربوط به بخش ماتریس یا همان اپوکسی است و نانوذرات در این بهبود اثر چندانی ندارند. نمودار $4-4$ این موضوع را به‌طور واضح‌تری نمایش می‌دهد. نمودار $4-4$ نشان می‌دهد که برای تمامی نمونه‌ها با افزایش نرخ کرنش، استحکام به‌طور پیوسته بهبود یافته است. از لحاظ درصد بهبود نیز، نمودار $4-b$ نمایانگر این نکته است که بالاترین درصد بهبود استحکام ناشی از افزایش نرخ کرنش (نسبت به استحکام در نرخ کرنش مرجع 15^{-1} 0.0015)، برای اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت $1/10\%$ درصد وزنی به‌ترتیب در حدود $8/15\%$ و 13% است. این به این معناست که در اثر افزایش نرخ کرنش، بیشترین سهم در بهبود استحکام متعلق به بخش ماتریس اپوکسی است که البته منطقی نیز به نظر می‌رسد؛ زیرا نانو صفحات گرافن به خودی خود دارای استحکام و مدول کششی بسیار بالایی هستند^[2,3] و انتظار می‌رود نرخ کرنش اثر چشمگیری بر خواص آنها نداشته باشد. از طرفی حضور نانوذرات، حجم بیشتری از ماتریس را اشغال می‌نماید و مانع از آن می‌شود که ماتریس وابستگی خود به نرخ را در بالاترین سطح بروز نماید. لذا، اثر مثبت افزایش نرخ کرنش بر بهبود استحکام، برای اپوکسی خالص بیشتر و برای نانوکامپوزیت‌ها کمتر است.

علاوه‌بر آن نتایج نشان می‌دهد که اثر مثبت افزایش نرخ کرنش از اثر حضور نانوذرات، در بهبود استحکام بیشتر است. به‌عنوان نمونه،

ترتیب ضرایب بهینه‌شده استخراج می‌شوند. قابل ذکر است که به کمک روش فوق، در ابتدا برای هر ماده ضرایب A ، B ، n و E در نرخ کرنش مرجع محاسبه شده است. سپس، با در نظر گرفتن ضرایب A و B به‌صورت ثابت، مدول و ضریب وابستگی به نرخ کرنش (C) برای دیگر نرخ‌ها محاسبه شده‌اند. شایان ذکر است که در این پژوهش نرخ 15^{-1} 0.0015 به‌عنوان نرخ کرنش مرجع در نظر گرفته شده است.



شکل ۳) مراحل تعیین ضرایب مجهول

۵- نتایج و بحث

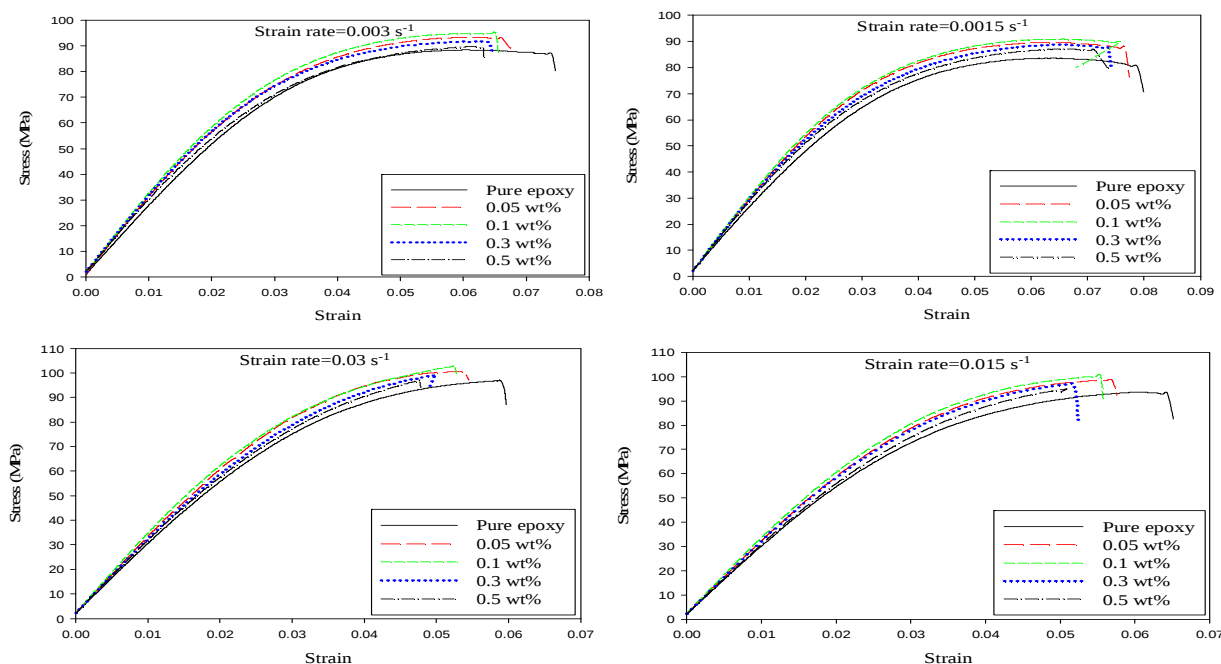
۵-۱- آزمایش‌های کشش

نمودار ۱، منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه‌های آزمایش را برای نرخ‌های کرنش مختلف نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، حضور گرافن منجر به افزایش سطح تنش و مدول نانوکامپوزیت نسبت به اپوکسی خالص شده است. بیشترین افزایش استحکام در تمامی نرخ‌ها مربوط به نمونه $1/10\%$ درصد وزنی گرافن است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در تمامی نرخ‌ها با افزایش درصد وزنی گرافن، میزان بهبود استحکام و مدول کاهش یافته، اما در عین حال همچنان نسبت به اپوکسی خالص بهبود خواص قابل مشاهده است. همچنین، مشاهده می‌شود که کرنش شکست نمونه‌ها، با افزایش درصد وزنی نانوذرات کاهش یافته است. در واقع حضور نانوذرات منجر به کاهش تغییر شکل پلاستیک ماتریس شده و رفتار ماده را به سمت ترد متمایل نموده است. به‌عنوان مثال، برای نرخ 15^{-1} 0.0015 ، کرنش شکست اپوکسی از حدود 0.65% به 0.5% ، برای $5/10\%$ درصد وزنی گرافن کاهش یافته که کاهش 23% درصدی را نشان می‌دهد.

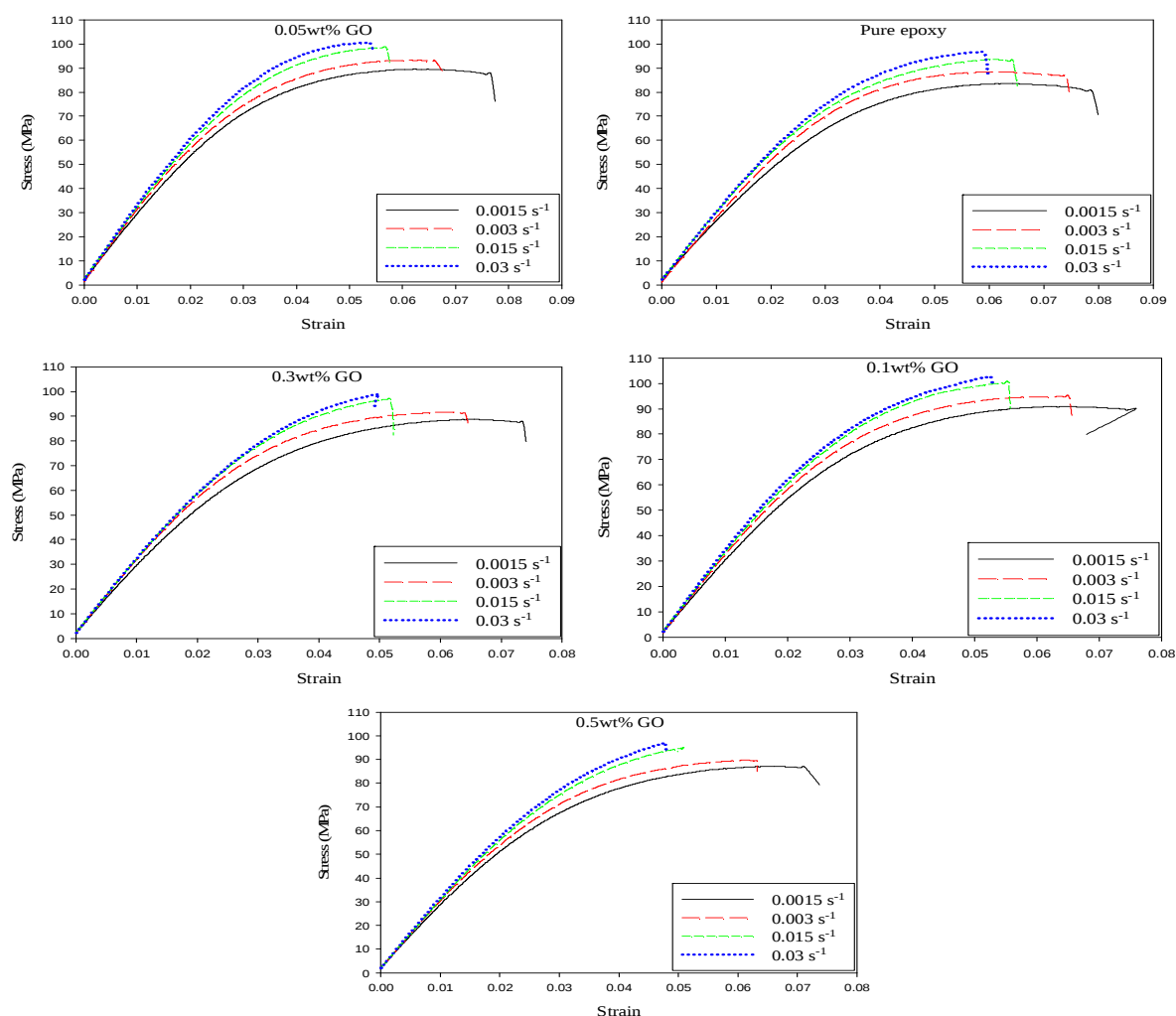
اثرات افزایش نرخ کرنش بر رفتار اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های آن، در نمودار ۲ نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، افزایش نرخ کرنش، استحکام نهایی و

نرخ کرنش از ۰/۰۰۱۵ به ۰/۰۳ s^{-1} ، بهبود ۱۳ درصدی استحکام را برای این نانوکامپوزیت در پی داشته است.

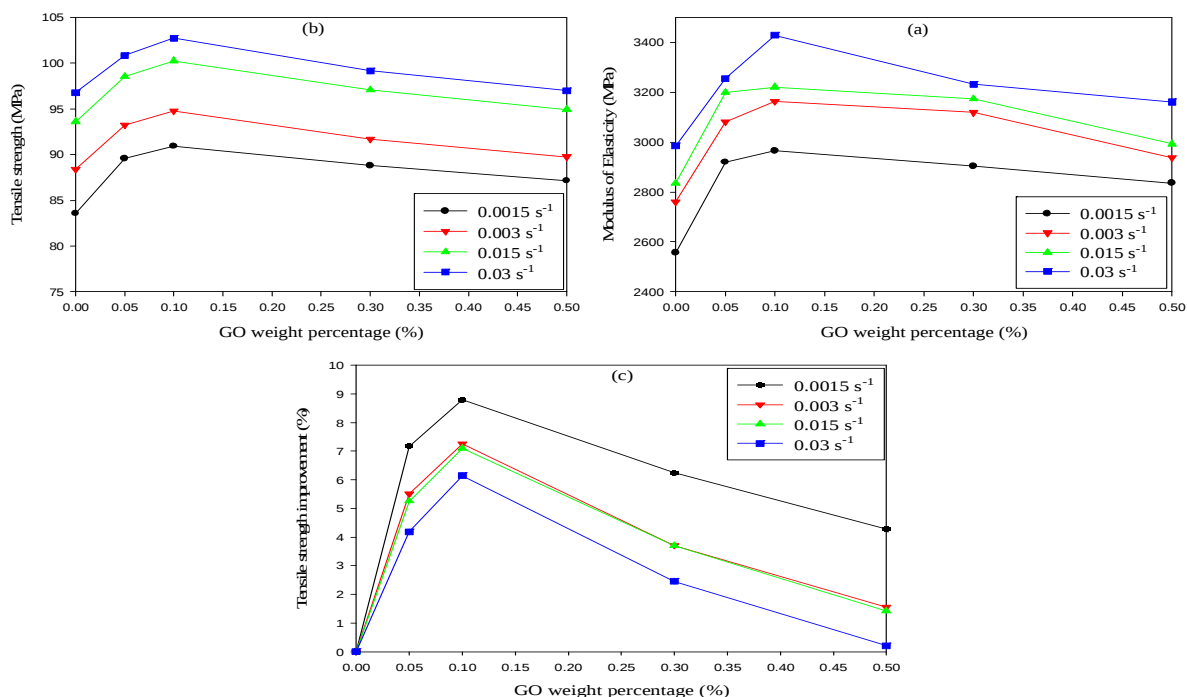
برای نرخ‌های کرنش مورد نظر در نانوکامپوزیت ۱/۰ درصد وزنی، بالاترین درصد بهبود استحکام حدود ۹٪ بوده، در حالی که افزایش



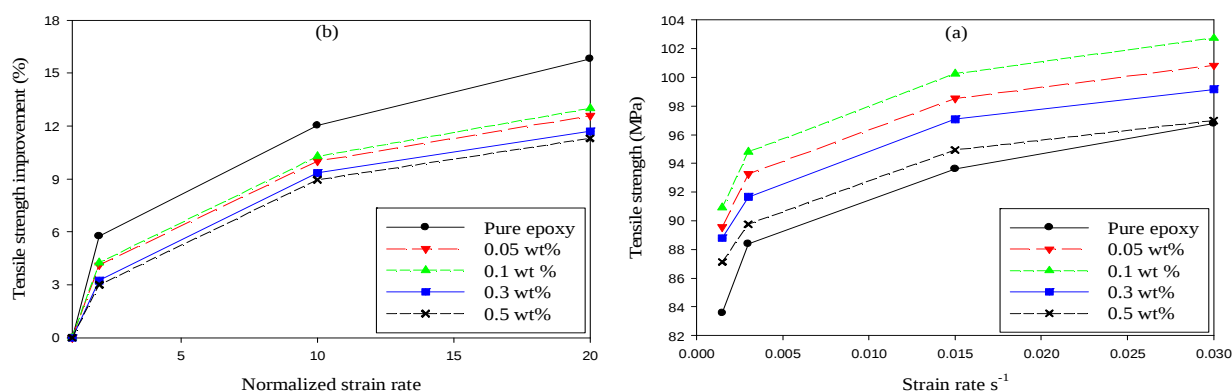
نمودار ۱) منحنی تنش-کرنش نمونه‌های آزمایش در نرخ‌های کرنش مختلف



نمودار ۲) منحنی تنش-کرنش اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های آن



نمودار ۳) منحنی تغییرات مدول الاستیسیته (a)، استحکام کششی (b)، درصد بهبود استحکام کششی (c) نمونه‌ها در برابر درصد وزنی گرافن برای نرخ‌های مختلف کرنش



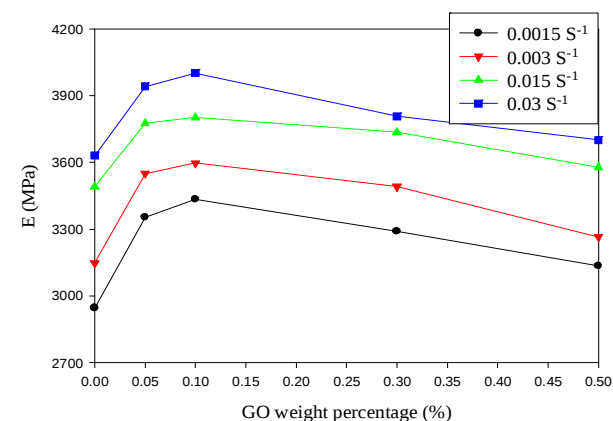
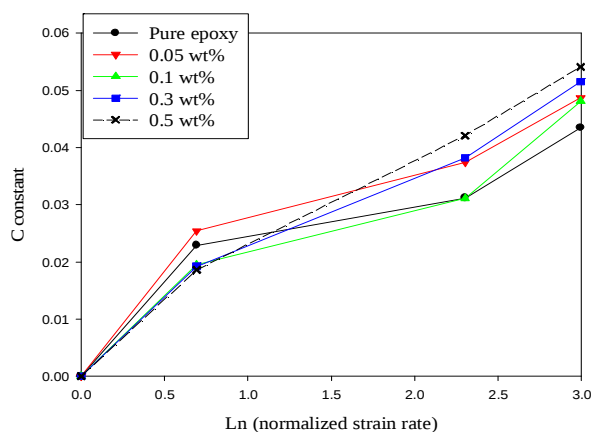
نمودار ۴) منحنی تغییرات استحکام کششی (a) و درصد بهبود استحکام کششی (b) نمونه‌ها در برابر نرخ کرنش برای نمونه‌های مختلف

نانوکامپوزیت‌های ترموست، مدل جانسون- کوک در نرخ‌های کرنش بالاتر دقت مناسبی را ارائه می‌دهد. در واقع با افزایش نرخ بارگذاری، نمونه‌های پلیمری تغییر شکل پلاستیک کمتری دارند و رفتاری متمایل به ترد ارائه می‌دهند که مدل جانسون- کوک در این شرایط کارکرد مناسبی دارد. همان طور که نمودار ۶ نشان می‌دهد، علاوه بر نرخ بارگذاری، حضور درصدهای وزنی بالاتر برای نانوگرافن نیز منجر شده است که دقت شبیه‌سازی‌ها بهبود یابد. لذا می‌توان نتیجه‌گیری نمود که هرچه درصد وزنی گرافن یا نرخ کرنش بیشتر شود، مدل جانسون- کوک پیش‌بینی‌های دقیق‌تری را برای رفتار ماده ارائه می‌دهد. قابل ذکر است که در این تحقیق با توجه به محدوده نرخ‌های آزمایش‌شده، نرخ کرنش مرجع برابر با ۰/۰۰۱۵ s⁻¹ در نظر گرفته شده و برای نرخ‌های بالاتر از این مقدار مدل جانسون- کوک ارزیابی شده و موفقیت آن نشان داده شده است. برای نرخ‌های پایین‌تر از این مقدار، نیاز به آزمایش‌های بیشتری برای بررسی مدل ماده است.

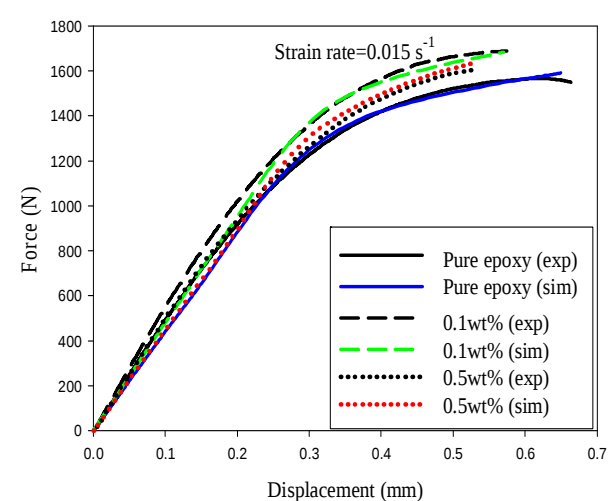
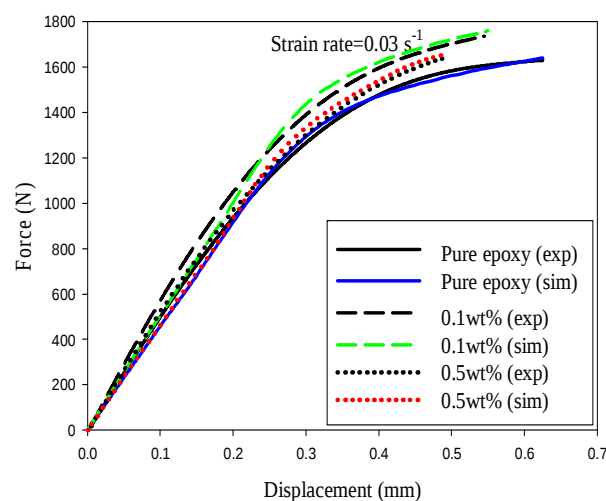
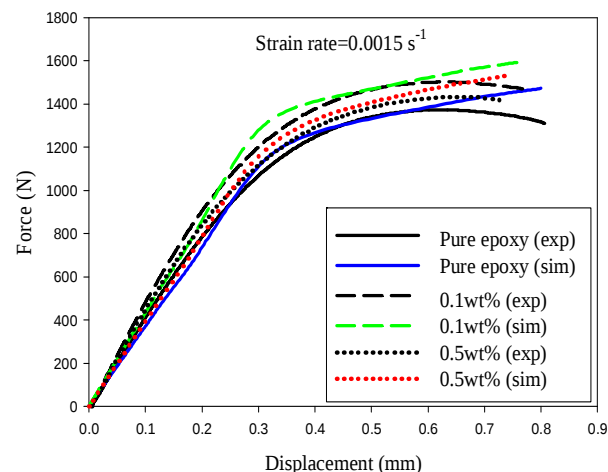
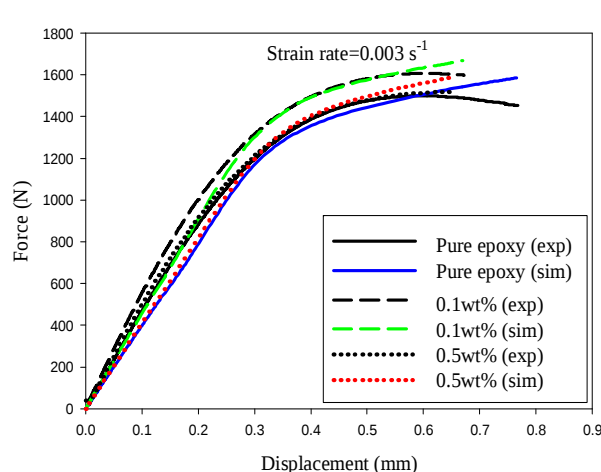
۲-۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

ضرایب A ، B و n مدل ماده جانسون- کوک که از طریق شبیه‌سازی- بهینه‌سازی همزمان در نرخ کرنش مرجع (۰/۰۰۱۵ s⁻¹) محاسبه شده‌اند، در جدول ۲ آورده شده است. همچنین، در نمودار ۵ تغییرات ضرایب E و C حاصل از بهینه‌سازی برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. قابل ذکر است که مقادیر مدول حاصل از بهینه‌سازی- شبیه‌سازی با مقادیر تجربی دارای اختلاف است که علت آن نیز رفتار ویسکوالاستیک نمونه‌های پلیمری است [21] که مدل جانسون- کوک این رفتار را در شبیه‌سازی در نظر نمی‌گیرد. در نمودار ۶ مقایسه‌ای بین منحنی‌های نیرو- جابجایی حاصل آزمایش و شبیه‌سازی، برای نمونه‌های مختلف انجام گرفته است. همان طور که مشاهده می‌شود، در نرخ کرنش ۰/۰۰۱۵ s⁻¹، منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی دارای خطای پیش‌بینی هستند، این در حالی است که با افزایش نرخ کرنش، این خطا به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. این به این معناست که برای

درصد وزنی گرافن				اپوکسی خالص	ضرایب
۰/۰	۰/۱	۰/۳	۰/۵		
۶۹/۱۸	۷۱/۶۱	۷۱/۰۳	۶۷/۵۵	۶۴/۹۳	<i>A</i> (MPa)
۱۵۹/۸۲	۱۶۰/۰۲	۱۶۱/۱۹	۱۶۳/۷۹	۱۵۸/۰۱	<i>B</i> (MPa)
۰/۶۹۰	۰/۶۶۷	۰/۷۲۰	۰/۶۴۹	۰/۶۷۰	<i>n</i>



نمودار ۵) منحنی تغییرات ضرایب *E* و *C* حاصل از بهینه‌سازی برای نمونه‌های مختلف



نمودار ۶) مقایسه بین منحنی‌های نیرو- جابجایی حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی برای نرخ‌های کرنش مختلف

- 5- Phan HT. High strain rate behavior of graphene reinforced polyurethane composites [Dissertation]. Columbia: University of Missouri-Columbia; 2012.
- 6- Shokrieh MM, Esmkhani M, Shahverdi HR, Vahedi F. Effect of graphene nanosheets (GNS) and graphite nanoplatelets (GNP) on the mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Science of Advanced Materials*. 2013;5(3):260-266.
- 7- Yao H, Hawkins SA, Sue HJ. Preparation of epoxy nanocomposites containing well-dispersed graphene nanosheets. *Composites Science and Technology*. 2017;146:161-168.
- 8- Atif R, Shyha I, Inam F. Modeling and experimentation of multi-layered nanostructured graphene-epoxy nanocomposites for enhanced thermal and mechanical properties. *Journal of Composite Materials*. 2017;51(2):209-220.
- 9- Soltannia B, Haji Gholami I, Masajedian S, Mertiny P, Sameoto D, Taheri F. Parametric study of strain rate effects on nanoparticle-reinforced polymer composites. *Journal of Nanomaterials*. 2016;2016:9841972.
- 10- Shadlou Sh, Ahmadi-Moghadam B, Taheri F. The effect of strain-rate on the tensile and compressive behavior of graphene reinforced epoxy/nanocomposites. *Materials & Design*. 2014;59:439-447.
- 11- Chen W, Lu F, Cheng M. Tension and compression tests of two polymers under quasi-static and dynamic loading. *Polymer Testing*. 2002;21(2):113-121.
- 12- Naik NK, Shankar PJ, Kavala VR, Ravikumar G, Pothnis JR, Arya H. High strain rate mechanical behavior of epoxy under compressive loading: Experimental and modeling studies. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528(3):846-854.
- 13- Zarei Darani S, Naghdabadi R, Jokar E, Irajizad A. Experimental study on mechanical properties of graphene oxide/epoxy nanocomposites in different strain rates. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16(12):61-66. [Persian]
- 14- Shokrieh MM, Joneidi VA. Characterization and simulation of impact behavior of graphene/polypropylene nanocomposites using a novel strain rate-dependent micromechanics model. *Journal of Composite Materials*. 2015;49(19):2317-2328.
- 15- Shokrieh MM, Mosalmani R, Omid MJ. Strain rate dependent micromechanical modeling of reinforced polymers with carbon nanotubes. *Journal of Composite Materials*. 2014;48(27):3381-3393.
- 16- Shokrieh MM, Shamaei Kashani AR, Mosalmani R. A dynamic constitutive-micromechanical model to predict the strain rate-dependent mechanical behavior of carbon nanofiber/epoxy nanocomposites. *Iranian Polymer Journal*. 2016;25(6):487-501.
- 17- Ghaleb ZA, Mariatti M, Ariff ZM. Properties of graphene nanopowder and multi-walled carbon nanotube-filled epoxy thin-film nanocomposites for electronic applications: The effect of sonication time and filler loading. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014;58:77-83.
- 18- Majzoobi GH, Amini Nejad SH, Sabet SA. Role of graphene oxide and sonication time on mechanical properties of epoxy nanocomposites at high strain rate. *Materials Research Express*. 2019;6(6):065063.
- 19- Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. The 7th International Symposium on Ballistics, 1983 April 19-21, The Hague, The Netherlands. *Welfengarten: Tib*; 1983. pp. 541-547.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر نانوگرافن و نرخ کرنش بر رفتار کششی نانوکامپوزیت‌های گرافن- اپوکسی مورد بررسی تجربی و عددی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به شرح زیر ارایه نمود:

- بالاترین استحکام و مدول کششی برای نانوکامپوزیت ۱/۰ درصد وزنی گرافن به‌دست آمد که بهبودی حدود ۹ و ۱۶ درصدی را نسبت به اپوکسی خالص نشان می‌دهد.
- اثر نرخ کرنش بر بهبود استحکام اپوکسی خالص، بیشتر از نانوکامپوزیت آن است.
- با افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۱۵ به ۰/۳۵، حداکثر بهبود استحکام برای اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت ۱/۰ درصد وزنی، به‌ترتیب در حدود ۱۵/۸ و ۱۳٪ است.
- برای نانوکامپوزیت ۱/۰ درصد وزنی، با افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۱۵ به ۰/۳۵، بهبود استحکام نسبت به رزین خالص از حدود ۹ به ۶/۲٪ کاهش می‌یابد؛ به بیان دیگر، در نرخ‌های کرنش پایین‌تر، اثر نانوگرافن بر بهبود استحکام بیشتر است.
- روش بهینه‌سازی جایگزینی، روشی مناسب و کارآمد برای تعیین ضرایب مدل ماده جانسون- کوک است.
- مدل جانسون- کوک قابلیت پیش‌بینی رفتار اپوکسی خالص و گرافن- اپوکسی را دارد و با افزایش درصد وزنی گرافن یا افزایش نرخ کرنش، پیش‌بینی‌های با دقت بالاتری را ارایه می‌دهد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. همچنین، برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: شهاب امینی‌نژاد (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ غلامحسین مجذوبی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ سیدعلی‌رضا ثابت (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- 1- Xu B, Yue Sh, Sui Z, Zhang X, Hou Sh, Cao G, et al. What is the choice for supercapacitors: Graphene or graphene oxide?. *Energy & Environmental Science*. 2011;4(8):2826-2830.
- 2- Zhu Y, Murali Sh, Cai W, Li X, Suk JW, Potts JR, et al. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. *Advanced Materials*. 2010;22(35):3906-3924.
- 3- Du J, Cheng HM. The fabrication, properties, and uses of graphene/polymer composites. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2012;213(10-11):1060-1077.
- 4- Gómez-del Río T, Rodríguez J. Compression yielding of epoxy: Strain rate and temperature effect. *Materials & Design*. 2012;35:369-373.

- R, Tucker PK. Surrogate-based analysis and optimization. Progress in Aerospace Sciences. 2005;41(1):1-28.
- 24- Müller J, Shoemaker CA, Piché R. SO-MI: A surrogate model algorithm for computationally expensive nonlinear mixed-integer black-box global optimization problems. Computers & Operations Research. 2013;40(5):1383-1400.
- 25- Müller J. Surrogate model algorithms for computationally expensive black-box global optimization problems [Dissertation]. Tampere: Tampere University of Technology; 2012.
- 26- Tian Y, Zhang H, Zhao J, Li T, Bie BX, Luo SN, et al. High strain rate compression of epoxy based nanocomposites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016;90:62-70.
- 20- Regis RG. Particle swarm with radial basis function surrogates for expensive black-box optimization. Journal of Computational Science. 2014;5(1):12-23.
- 21- Payandehpeyman J, Majzoubi GH, Bagheri R. Determination of the extended Drucker-Prager parameters using the surrogate-based optimization method for polypropylene nanocomposites. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2016;51(3):220-232.
- 22- Mack Y, Goel T, Shyy W, Haftka R. Surrogate model-based optimization framework: A case study in aerospace design. In: Yang Sh, Ong YS, Jin Y, editors. Evolutionary computation in dynamic and uncertain environments. Heidelberg: Springer; 2007. pp. 323-342.
- 23- Queipo NV, Haftka RT, Shyy W, Goel T, Vaidyanathan