



## بررسی تجربی و تحلیلی رفتار فشاری نانوکامپوزیت پلی کربنات تقویت شده با نانورس و گرافن اکسید در نرخ کرنش پائین

حسین ملک محمدی<sup>1</sup>، غلامحسین مجذوبی<sup>2\*</sup>، جواد پاینده پیمان<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

\* همدان، صندوق پستی 651754161، gh\_majzoobi@basu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 97/9/11

پذیرش: 97/10/16

### کلیدواژگان:

پلی کربنات

گرافن اکسید

رس

تنش تسلیم فشاری

منحنی تنش-کرنش

در این پژوهش، اثرات نانورس اصلاح شده کلوزیت 20A و گرافن اکسید بر رفتار فشاری نانوکامپوزیت پلی کربنات مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها با روش تزریق تهیه گردیده و از روش مستریج برای توزیع بهتر نانو در فاز زمینه استفاده شده است. مستریج نانورس از روش مستقیم به کمک دستگاه اکسترودر و مستریج گرافن اکسید به کمک روش حلال ساخته شده است. نمونه‌های نانوکامپوزیت رس و گرافن اکسید به ترتیب در سه درصد وزنی 0.5%، 1%، 3% و 0.3%، 0.6%، 0.9% ساخته شده‌اند. آزمون فشار در سه نرخ کرنش  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ ،  $10^{-2}$ ،  $10^{-1} s^{-1}$  در دمای محیط به کمک دستگاه یونیورسال سنتام انجام گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم افزایش می‌یابد. همچنین، بهترین درصد وزنی رس و گرافن اکسید 1% و 0.6% بود که به ترتیب باعث بهبود 7.6% و 6.2% در تنش تسلیم فشاری گردید. در ادامه، مدلی به منظور پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش فشاری در نرخ‌های مختلف بر اساس اصلاح مدل جی‌سل-جوناس ارائه گردید. مدل ارائه شده به خوبی منحنی تنش-کرنش را در نرخ‌های مختلف پیش‌بینی نمود. در پایان، بر اساس ترکیب مدل ارینگ و مدل میکرومکانیکی تورسانی و همکاران مدلی برای توصیف تنش تسلیم نانوکامپوزیت بر اساس درصد وزنی فیلر و نرخ کرنش ارائه شده است.

## Experimental and analytical study of the compression behavior of graphene oxide and nano-clay reinforced polycarbonate nanocomposites at low strain rates

Hossein Malek-Mohammadi<sup>1</sup>, Gholamhossein Majzoobi<sup>2\*</sup>, Javad Payandehpeyman<sup>2</sup>

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

2- Department of Mechanical Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

\* P.O.B. 651754161, Hamedan, Iran, gh\_majzoobi@basu.ac.ir

### Keywords

Polycarbonate

Graphene oxide

Nanoclay

Compressive yield stress

Diagram Stress-Strain

### Abstract

In this study, the effects of Cloisite 20A modified nanoclay and graphene oxide on the compression behavior of polycarbonate nanocomposite were examined by experiment. Samples were prepared based on injection and the masterbatch method was used for a better dispersion of nano particles in the matrix phase. The masterbatch of nanoclay was prepared through the direct method using an extruder, and the masterbatch of graphene oxide was prepared using the solvent method. The clay reinforced nanocomposite were prepared for three weight percentages of 0.5%, 1%, 3%, and samples of graphene oxide nanocomposites were produced for 0.3%, 0.6%, 0.9%. The compression test was performed at three strain rates of  $\dot{\epsilon} = 10^{-3}$ ،  $10^{-2}$ ،  $10^{-1} s^{-1}$  at ambient temperature using the universal testing machine, Santam. The results showed that, by increasing the strain rate, the yield stress is increased. Moreover, the best weight percentage of clay and graphene oxide was 1% and 0.6%, respectively, which made improvement of 7.6% and 6.2% in the compression yield stress, respectively. Additionally, a model was proposed for predicting the compressive stress-strain curve at various strain rates based on a modified G'sell-Jonas model. The proposed model could reasonably predict the stress-strain curves at the applied strain rates. Finally, based on the combination of Eyring model and the micromechanical model of Turcsanyi et al., a model was proposed for describing the yield stress of the nanocomposite based on volume percentage of filler and strain rate.

### 1- مقدمه

هستند [1]. از طرفی، پلی کربنات یکی از پلیمرهای مهندسی آمورف ترموپلاستیک است که به دلیل خواص ویژه آن از قبیل مقاومت در برابر ضربه، خواص شیمیایی، مقاومت در برابر خمش و کشش، عایق حرارتی، به عنوان یک

پلیمرها در مقایسه با فلزات به دلیل استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی، چگالی کمتر، اغلب نسبت به قیمت آن‌ها دارای عملکرد بهتری

### Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Malek-Mohammadi, H. Majzoobi, G.H. and Payandehpeyman, J., "Experimental and analytical study of the compression behavior of graphene oxide and nano-clay reinforced polycarbonate nanocomposites at low strain rates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 3, pp. 427-434, 2019.

به دلیل تشکیل پدیده کلوخه‌ای خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. اثرات هیبریدی نانو صفحات گرافن و نانو رس بر استحکام ضربه‌ای نانو کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن با استفاده از روش طراحی رویه پاسخ توسط پایگانه و همکاران [18] بررسی گردید. آن‌ها نشان دادند که با افزایش درصد نانو ذرات، خواص ضربه‌ای به دلیل تشکیل پدیده کلوخه‌ای و ایجاد تمرکز تنش کاهش می‌یابد. میکروسختی نانو کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با دو نوع فیبر شامل، نانو رس و کلسیم کربنات توسط پاینده پیمان و همکاران [19] بررسی گردید. آن‌ها از مدل دراگر-پراگر برای شبیه‌سازی آزمون ویکرز در آبکوس استفاده نمودند و همچنین، نشان دادند که استفاده از مدل دراگر-پراگر با انتخاب زاویه اتساع مناسب نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل‌های ماکرومکانیکی و میکرومکانیکی دارد.

تاکنون مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی منحنی‌های تنش-کرنش پلیمرهای ترموست و ترموپلاستیک وابسته به نرخ کرنش و دما ارائه گردیده است. برخی از این مدل‌های ارائه شده، از مدل جانسون-کوک الهام گرفته شده‌اند [20-25] و برخی دیگر براساس مدل‌های ویسکوالاستیک-پلاستیک [26-28] می‌باشد. محاسبه ضرایب برخی از این مدل‌ها نیازمند انجام آزمایش‌هایی مانند آنالیز مکانیکی دینامیکی است، که بر پیچیدگی آن می‌افزاید. باتوجه به پیشینه مطالعات، بیشتر کارهای انجام شده در زمینه نانوکامپوزیت‌های پلی‌کربنات به بررسی خواص شیمیایی، مورفولوژی و خواص کششی و یا خمشی پرداخته‌اند. بنابراین، در این پژوهش، به بررسی اثرات نرخ کرنش بر رفتار فشاری نانوکامپوزیت‌های پلی‌کربنات تقویت شده با نانو رس اصلاح شده کلوزیت 20A و گرافن اکسید پرداخته شده است. به‌منظور توزیع بهتر فیبر در ماتریس از روش مستریج استفاده گردید. مستریج نانو رس از روش مستقیم و مستریج گرافن اکسید از روش حلال تهیه شد. نمونه‌های فشاری براساس تزریق تهیه می‌شوند. در ادامه، آزمون فشار به کمک دستگاه ستام در سه نرخ مختلف در دمای محیط انجام گرفت. در بخش تحلیلی، بر اساس مدل جی‌سل-جوناس [20-22]، مدلی برای پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش فشاری نانو کامپوزیت در نرخ‌های مختلف در دمای محیط ارائه گردید. مدل ارائه شده به خوبی توانایی پیش‌بینی کرنش نرمی و کرنش سختی را دارا می‌باشد. همچنین، در پایان، براساس ترکیب مدل ارینگ [29] و مدل میکرومکانیک تورسانی و همکاران [30] مدلی وابسته به نرخ کرنش و درصد فیبر برای پیش-بینی تنش تسلیم فشاری نانوکامپوزیت‌ها ارائه می‌شود.

## 2- مواد، ساخت و روش آزمایش

### 2-1- مواد

در این تحقیق، پلی کربنات با نام تجاری ماکرولون 2807 تهیه شده از شرکت بایر آلمان دارای شاخص مذاب 10 گرم بر 10 دقیقه و چگالی 1200 کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان ماتریس انتخاب شده است. برای تقویت این ماده، نانوصفحات گرافن اکسید تهیه شده از شرکت نانوتک کشور هند با ضخامت متوسط 4.5 نانومتر، قطر متوسط 7.5 میکرومتر، مساحت سطح متوسط 120 m<sup>2</sup>/g و چگالی بالک 0.42 g/cc مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، نانو رس اصلاح شده با نام تجاری کلوزیت 20A، محصول شرکت بی‌واکی با چگالی 1.77 g/cm<sup>3</sup> است. کلروفورم استفاده شده نیز از شرکت سیگما آلدریج خریداری شده است.

زمینه پلیمری متداول در مواد کامپوزیت، کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون به خصوص اتومبیل‌سازی، صنایع هوایی و الکتریکی پیدا کرده است [2]. این ماده عموماً تحت بارگذاری‌های مختلف می‌باشد. بنابراین، پاسخ مکانیکی پلی-کربنات در سرعت‌های مختلف تغییر شکل باید دقیقاً مشخص شود، که در این رابطه پژوهش‌های مختلفی انجام گرفته است. به عنوان مثال، بلومنتال و همکاران [3] به بررسی اثرات نرخ کرنش و دما بر پلی‌کربنات و پلکسی‌گلس پرداختند. آن‌ها نشان دادند که پلکسی‌گلس وابستگی شدیدی به دما و نرخ کرنش دارد در حالی که، وابستگی پلی‌کربنات به نرخ کرنش نسبت به پلکسی-گلس کمتر است. اثرات نرخ کرنش و دما بر تنش تسلیم فشاری پلی‌کربنات و پلی‌ونیلین‌دی‌فلوراید نیز توسط شیویور و همکاران [4] بررسی گردید. مطابق نتایج تحقیق آن‌ها، خواص فشاری وابسته به نرخ کرنش و دما می‌باشد و با آن‌ها تغییر می‌کند. اومار و همکاران [5] اثرات نرخ کرنش را بر روی سه پلیمر پلی‌کربنات، پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که تنش تسلیم، مدول فشاری و مقاومت فشاری متناسب با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. ناکای و یوکویاما [6] به وسیله هاپکینسون فشاری و اینسترون به بررسی اثرات نرخ کرنش در دمای محیط بر چهار پلیمر صنعتی از جمله پلی‌کربنات پرداختند و گزارش کردند که استفاده از مدل رامبرگ-اسکوت در پلی‌کربنات، ای‌بی‌اس و پی‌وی‌سی توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش فشاری دارد.

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانو رس به واسطه نسبت ابعادی بالا و فصل مشترک بزرگ خواص فوق‌العاده‌ای از جمله فیزیکی، حرارتی و مکانیکی حتی در درصدهای وزنی پائین با توجه به پلیمرهای خالص نشان می‌دهند [7-10]. همچنین، گرافن اکسید یک ساختار دوبعدی از یک لایه منفرد شبکه لانه زنبوری کربنی می‌باشد که با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد و عالی آن از قبیل: رسانایی، استحکام در سال‌های اخیر توجه زیادی را در تحقیقات به خود جلب کرده است [11]. به عنوان مثال، موی و همکاران [12]، به‌صورت تجربی اثرات نرخ کرنش فشاری و درصد وزنی نانو کامپوزیت پلی‌کربنات تقویت شده با نانو رس اصلاح شده کلوسایت 25A را پیش‌بینی نمودند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش درصد وزنی و نرخ کرنش، تنش تسلیم افزایش یافته است. اثرات نانو رس اصلاح شده کلوسایت 25A بر خواص مکانیکی توسط الکس و همکاران بررسی گردید. درصد وزنی نانو رس‌ها در این پژوهش 1.5٪، 2.5٪، 3.5٪ و 5٪ بود. آن‌ها نشان دادند که نانو رس منجر به بهبود تنش تسلیم کششی می‌گردد [13]. کاتجا و همکاران [14] نشان دادند که نانو رس‌های اصلاح شده با مونتموریلونیت منجر به بهبود رفتار کششی و ضربه شاری پلی‌کربنات می‌گردد. کینگ و همکاران [15] اثرات نانو گرافیت با درصد وزنی بالا بر خواص الکتریکی، حرارتی، مدول خمشی و کششی نانو کامپوزیت پلی‌کربنات را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش درصد وزنی گرافیت، مدول کششی و خمشی افزایش می‌یابد. آل-لافی و سانگ [16] به بررسی تأثیرات نرخ‌های کرنش پائین و بالا بر نانو کامپوزیت پلی‌کربنات تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی چند دیواره پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که نانو لوله‌های کربنی باعث افزایش مقاومت به ضربه، انرژی شکست ضربه و چقرمگی شکست ضربه می‌گردد، به‌گونه‌ای که 1% وزنی نانو لوله‌های کربنی باعث افزایش 320% و 350% در حداکثر بار و انرژی شکست ضربه شده است. شکریه و جنیدی [17] خواص کششی و ضربه‌ای نانو کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن تقویت شده با نانو گرافن را مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها برای توزیع بهتر گرافن در زمینه از روش پوشش‌دهی استفاده نمودند و همچنین، نشان دادند که بهترین درصد وزنی گرافن 0.5% است و با افزایش درصد وزنی

آزمایش (شکل 2) با استفاده از دستگاه تزریق تولید می‌شوند. درصدهای مختلف کامپوزیت‌های تولیدی و کدبندی آن‌ها در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1 جزئیات ترکیب نمونه‌ها

کد نمونه	نوع فیلر	درصد وزنی
PC	-	0
PC03GO	گرافن اکسید	0.3
PC06GO	گرافن اکسید	0.6
PC09GO	گرافن اکسید	0.9
PC05NC	رس	0.5
PC1NC	رس	1
PC3NC	رس	3

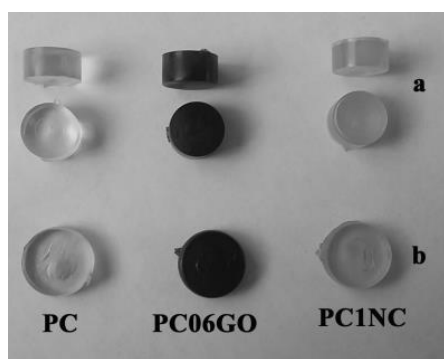


Fig. 2 The shape of specimens after injection a) before b) after compressive test

شکل 2 نمونه‌های تولیدی بعد از تزریق (الف) قبل از تست فشار (ب) بعد از تست فشار

### 3-2- آزمایش فشار

آزمون فشار روی نمونه‌های نانو کامپوزیت تهیه شده با قطر 10 و طول 5 میلی‌متر با استفاده از دستگاه یونیورسال سنتام در سه نرخ  $\dot{\epsilon} = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$  و در دمای محیط انجام شد. به منظور کاهش اثر اصطکاک در آزمون فشار، از گریس در سطح تماس نمونه و فک دستگاه استفاده گردید. هر آزمایش حداقل پنج بار تکرار شده و میانگین نتایج گزارش گردید.

### 3- مدل سازی رفتار الاستیک-پلاستیک فشاری کامپوزیت

در این بخش، یک مدل ساختاری جدیدی بر اساس اصلاح مدل جی-سل-جوناس [20-22] ارائه شده است. مدل جی-سل-جوناس با رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma = C_1 \{e^{C_2 \epsilon^2}\} \{1 - e^{-C_3 \epsilon}\} \{\dot{\epsilon}^{C_4}\} \{e^{C_5 T}\} \quad (1)$$

در این مدل،  $\sigma$ ،  $\dot{\epsilon}$ ،  $T$  به ترتیب بیانگر تنش، کرنش، نرخ کرنش و دما و  $C_i$  ( $i = 1 \dots 5$ ) ضرایب مجهول این مدل ماده می‌باشند. در رابطه (1)، عبارتهای  $\{1 - e^{-C_3 \epsilon}\}$  و  $\{e^{C_2 \epsilon^2}\}$  بیانگر کرنش سختی و قسمت الاستیک غیرخطی می‌باشند. این مدل توانایی پیش‌بینی کرنش نرمی را ندارد. مدل جی-سل-جوناس برای پیش‌بینی کرنش نرمی و اصلاح کرنش سختی به صورت رابطه (2) اصلاح می‌گردد.

### 2-2- روش ساخت

به منظور توزیع همگن‌تر نانو ذرات رس در زمینه پلیمری، ابتدا یک مستریج 10% وزنی نانو رس به وسیله اکسترودر دو مارپیچه تهیه (شکل 1الف) و سپس با استفاده از پلی کربنات خالص به درصدهای دلخواه رقیق گردید. مستریج 5% نانو گرافن اکسید به روش محلولی تهیه شده است. شکل 1ب شماتیک ساخت مستریج پلی کربنات-گرافن اکسید را نشان می‌دهد. به طور خلاصه، ابتدا مقداری پلی کربنات مورد نیاز برای ساخت مستریج به یک ظرف حاوی کلروفورم اضافه می‌شود و تحت همزن مغناطیسی و دمای  $60^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد تا به طور کامل گرانول‌های پلی کربنات حل شوند. در مرحله بعد، گرافن اکسید به مدت 30 دقیقه توسط یک دستگاه مافوق صوت با توان خروجی 180 وات و فرکانس 20 کیلوهرتز در حضور کلروفورم انرژی داده می‌شود تا لایه‌های گرافن اکسید از هم باز شوند. سپس، این لایه‌های باز شده به محلول کلروفورم/پلی کربنات اضافه می‌گردد و به مدت 3 ساعت تحت همزن مغناطیسی و دمای  $50^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد تا محلول یکنواختی از پلی کربنات و گرافن اکسید تهیه گردد.

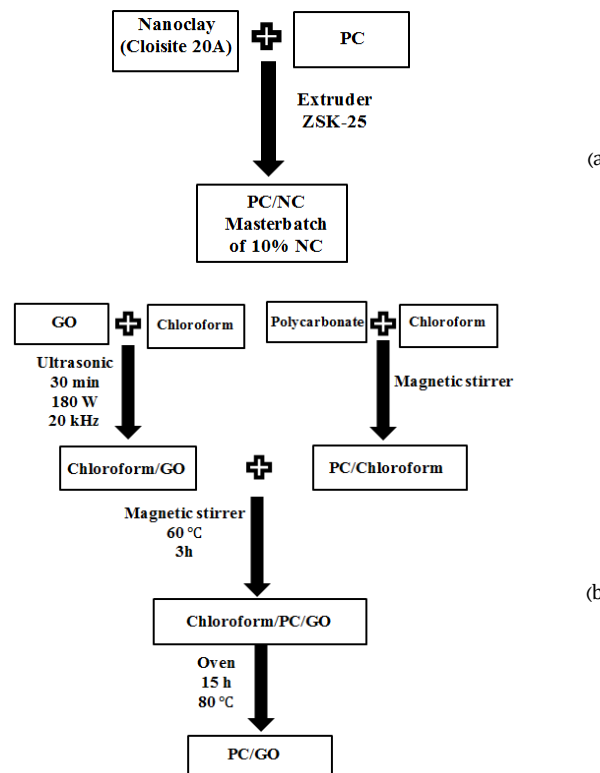


Fig. 1 schematic of fabrication process for making masterbatch a) Clay b) Graphene oxide

شکل 1 شماتیک ساخت فرآیند مستریج (الف) رس (ب) گرافن اکسید

محلول حاصل شده به مدت 15 ساعت در آن خلا در دمای  $80^\circ\text{C}$  حرارت داده شده تا کاملاً خشک شود و عاری از حلال گردد. بعد از تهیه مستریج گرافن اکسید با استفاده از پلی کربنات خالص به درصدهای دلخواه توسط اکسترودر رقیق می‌شود. اکسترودر کردن کامپوزیت‌ها با استفاده از دستگاه اکسترودر دوپیچه ZSK-25، ساخت شرکت کوپربین آلمان با قطر پیچ 25 میلی‌متر و نسبت طول به قطر 40 انجام شده است. به منظور خروج رطوبت از میان گرانول‌ها، به مدت 24 ساعت در دمای 80 درجه سلسیوس در خشک کن نگهداری می‌شوند. بعد از اطمینان از خشک شدن کامل گرانول‌ها، نمونه‌های

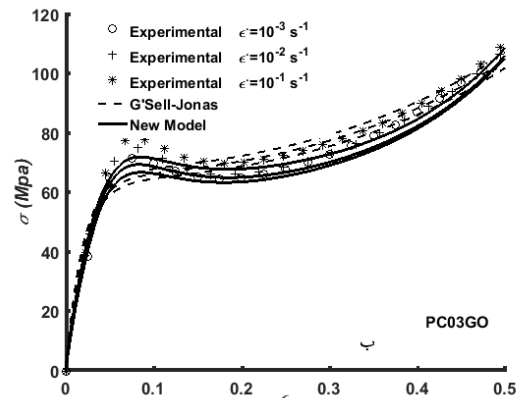
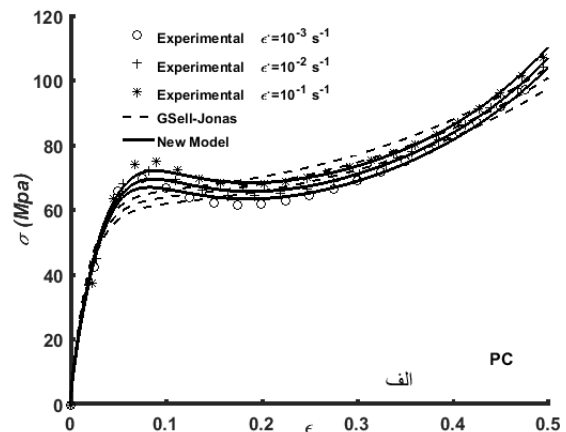
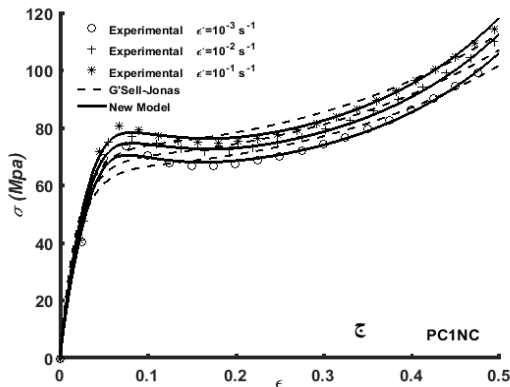
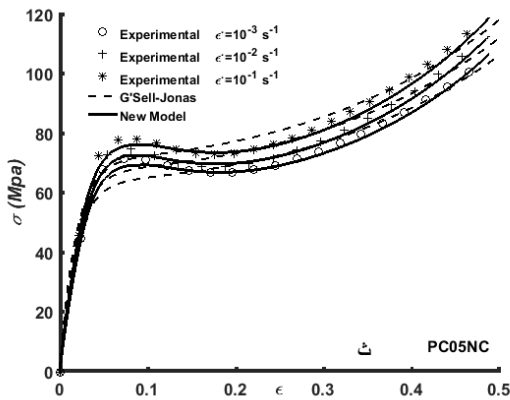
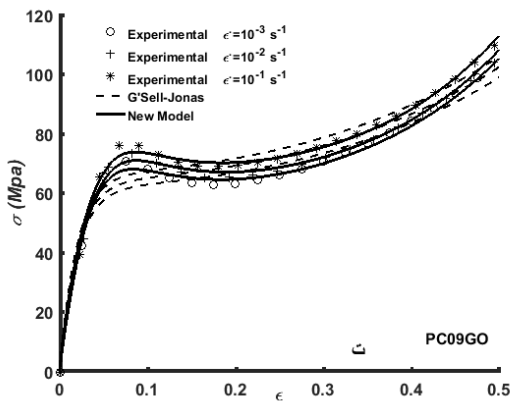
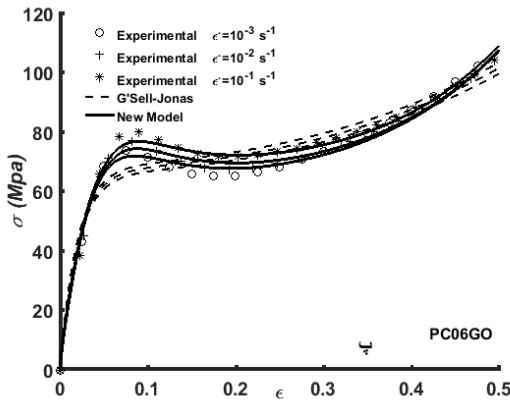
$$\sigma = C_1 \{1 - e^{-C_2 \epsilon}\} \{e^{-C_3 \epsilon} + \epsilon^{C_4}\} \{e^{C_5 \epsilon^2 + \epsilon^{C_6} - C_7}\} \{\epsilon^{C_8}\} \{e^{C_9 T}\} \quad (2)$$

در این رابطه،  $C_i$  ( $i = 1 \dots 9$ ) ضرایب مجهول مدل ماده هستند که با استفاده از تکنیک برازش منحنی بر نمودارهای تنش-کرنش در نرخ‌های مختلف تعیین می‌شوند.

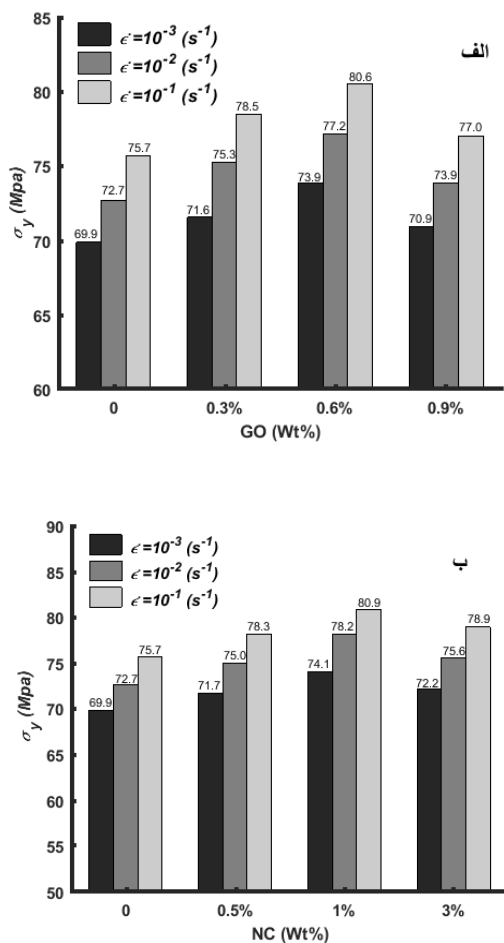
منحنی‌های تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش در نرخ کرنش‌های مختلف برای نانو کامپوزیت پلی کربنات با درصد‌های مختلف فیلر در شکل 3 نشان داده شده‌اند. در این شکل، منحنی‌های به دست آمده از روابط 1 و 2 نیز نشان داده شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل 3 مشاهده می‌شود، برای تمام نرخ کرنش‌ها، نمونه‌های کامپوزیتی پلی کربنات ابتدا رفتار ارتجاعی را تجربه می‌کنند و سپس به نقطه تسلیم می‌رسند. بعد از تسلیم، به علت شکل‌گیری باندهای موضعی ماده دچار رفتار کرنش نرمی می‌شود و به دنبال آن به علت جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری، ماده دچار رفتار کرنش سختی می‌گردد [31]. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم به نرخ کرنش و درصد فیلر حساس می‌باشند، به‌گونه‌ای که با افزایش نرخ کرنش و درصد فیلر خواص افزایش می‌یابند.

همان‌گونه که از شکل 3 مشخص است، هر دو مدل جی‌سل-جوناس و جی‌سل-جوناس اصلاح شده (معادلات 1 و 2) رفتار ماده را در حالت الاستیک به خوبی پیش‌بینی می‌کنند و دقت مدل حاضر به دلیل در نظر گرفتن کرنش نرمی ماده، در حالت پلاستیک بهتر می‌باشد.

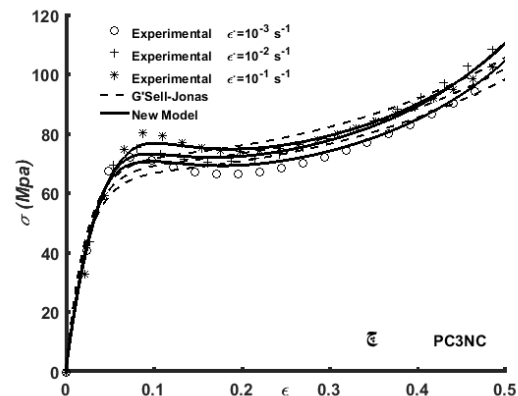


اثر نرخ کرنش بر تنش تسلیم نانو کامپوزیت‌ها در شکل 4 ترسیم شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش نرخ کرنش از  $10^{-3}$  تا  $10^{-1}$ ، تنش تسلیم پلی کربنات خالص به علت کاهش حرکت زنجیره‌های پلیمری، حدود 8.3% افزایش یافته است. همچنین، اضافه نمودن فیلرها با استحکام بخشی نابه‌جایی‌ها منجر به کاهش حرکت پذیری زنجیره‌های پلیمری، افزایش سختی و در نتیجه بهبود تنش تسلیم فشاری می‌گردد به گونه‌ای که بهترین درصد وزنی گرافن اکسید و رس به ترتیب 0.6% و 1% و درصد بهبود آن به ترتیب 6.2% و 7.6% است.



**Fig. 4** Effects of strain rate on the yield stress a) PC/GO b) PC/NC  
 شکل 4 اثر نرخ کرنش بر تنش تسلیم الف) پلی کربنات/ گرافن اکسید ب) پلی کربنات/ رس

پیش‌بینی تنش تسلیم پلی کربنات خالص طبق مدل ارینگ (رابطه 3) در شکل 5 ترسیم شده است. همچنین، تنش تسلیم نانو کامپوزیت‌ها (رابطه 5) با نتایج آزمایشگاهی برحسب درصدهای مختلف نانو در نرخ کرنش‌های مختلف در شکل 6 آورده شده است.



**Fig. 3** A comparison between the predicted and the experimental stress-strain curves of polycarbonate nanocomposites at the different strain rates for a) PC b) PC03GO c) PC06GO d) PC09GO e) PC05NC f) PC1NC g) PC3NC

شکل 3 مقایسه بین منحنی‌های تنش-کرنش پیش‌بینی شده و آزمایشی در نرخ کرنش‌های مختلف برای نانو کامپوزیت پلی کربنات الف) PC ب) PC03GO پ) PC06GO ت) PC09GO ج) PC1NC چ) PC05NC

#### 4- مدل سازی رفتار تنش تسلیم فشاری

در این بخش، با ترکیب مدل ارینگ [29] و مدل میکرومکانیک تورسانی و همکاران [30] مدلی به منظور پیش‌بینی تنش تسلیم نانو کامپوزیت‌ها برحسب نرخ کرنش و درصد فیلر ارائه می‌گردد. مدل ارینگ با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{kT}{V_0} \exp\left(\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_c}}\right) \quad (3)$$

که در آن،  $\sigma_y$ ،  $k$ ،  $T$  و  $\dot{\epsilon}$  به ترتیب، تنش تسلیم، ثابت بولتزمن، دمای آزمایش و نرخ کرنش می‌باشند. مدل فوق دارای سه ثابت  $\sigma_0$ ،  $V_0$  و  $\dot{\epsilon}_c$  است. مدل میکرومکانیک تورسانی و همکاران به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$\sigma_{y,c} = \sigma_{y,M} \left[ \frac{1 - V_p}{1 + 2.5V_p} \right] \exp(BV_p) \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $\sigma_{y,c}$  و  $\sigma_{y,M}$  تنش تسلیم کامپوزیت و ماتریس،  $V_p$  کسر حجمی فیلر و  $B$  ثابت مدل ماده می‌باشد که باید تعیین گردد. رفتار تنش تسلیم پلی کربنات خالص توسط رابطه (3) بیان می‌گردد. بنابراین، تنش تسلیم نانو کامپوزیت پلی کربنات را می‌توان با ترکیب روابط (3) و (4) به صورت رابطه زیر بیان نمود:

$$\sigma_{y,c} = \left( \sigma_0 + \frac{kT}{V_0} \exp\left(\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_c}}\right) \right) \left[ \frac{1 - V_p}{1 + 2.5V_p} \right] \exp(BV_p) \quad (5)$$

برای پیش‌بینی تنش تسلیم نانو کامپوزیت‌ها، ابتدا ضرایب مجهول مدل ارینگ (رابطه 3) برای پلی کربنات خالص استخراج و سپس ضریب مجهول  $B$  در رابطه (5) برای نانو رس و گرافن اکسید براساس تکنیک برازش منحنی محاسبه گردیده است.

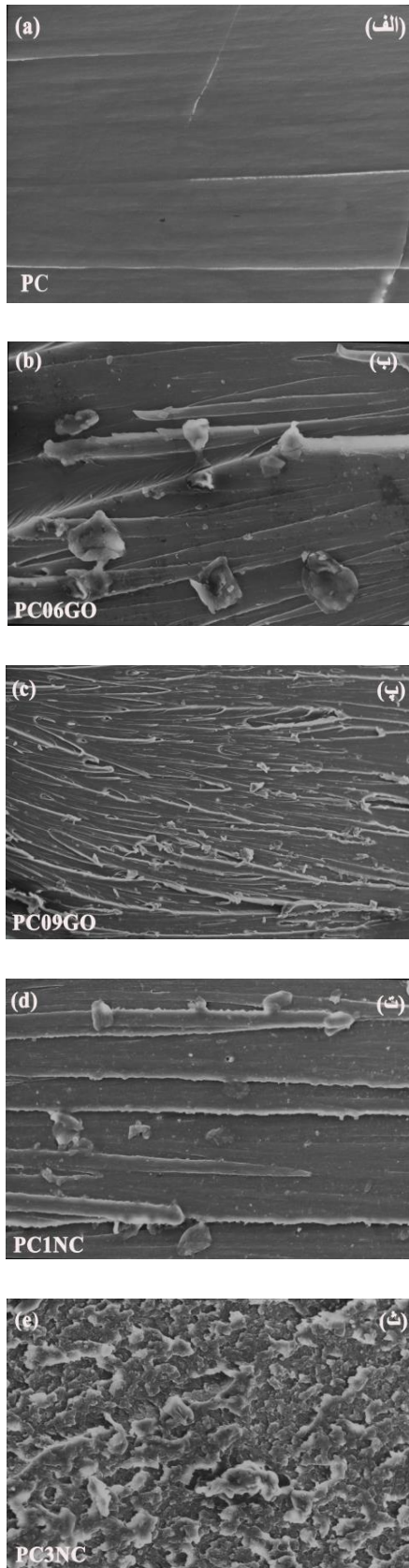


Fig. 7 SEM images from surface of composites' sample a) PC b) PC06GO c) PC09GO d) PC1NC e) PC3NC

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌های کامپوزیتی الف) PC3NC ب) PC06GO پ) PC09GO ت) PC1NC ث) PC3NC

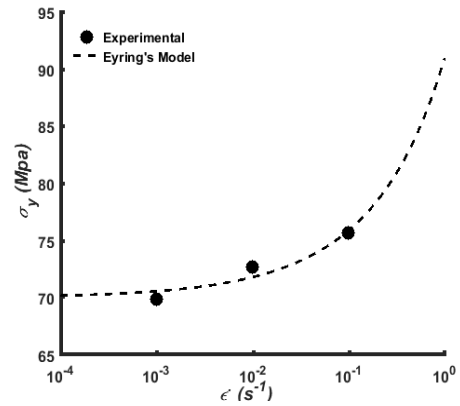


Fig. 5 A comparison between the experimental yield stress and the results predicted by the Eyring's model for pure polycarbonate  
شکل 5 مقایسه تنش تسلیم آزمایشی با نتایج مدل ایرینگ برای پلی کربنات خالص

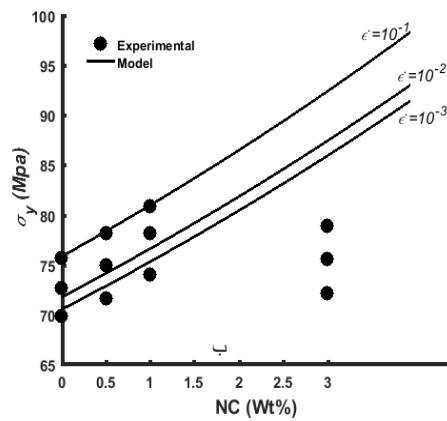
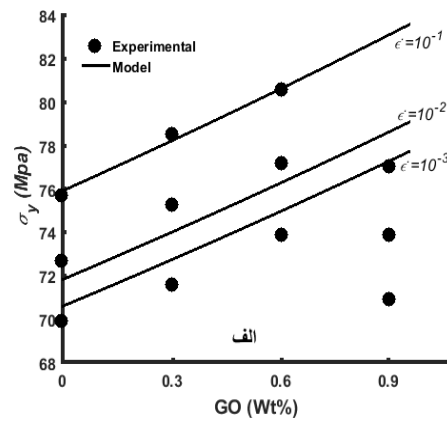


Fig. 6 Comparison of experimental yield stress obtained at the different strains rate with the results provided by the proposed model  
شکل 6 مقایسه تنش تسلیم به دست آمده از آزمایش و مدل ارائه شده در نرخ کرنش‌های مختلف الف) پلی کربنات/نانو رس ب) پلی کربنات/گرافن اکسید

- Strain Rate Loading," *Material and Design*, Vol. 32, No. 8–9, pp. 4207–4215, 2011.
- [6] Nakai, K., Yokoyama, T., "Uniaxial Compressive Response and Constitutive Modeling of Selected Polymers Over a Wide Range of Strain Rates," *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 15–27, 2015.
- [7] Fareed, M. A., Stamboulis, A., "Effect of Nanoclay Dispersion on the Properties of a Commercial Glass Ionomer Cement," *International Journal of Biomaterials*, 2014.
- [8] Najafi, A., Kord, B., Abdi, A., Ranaee, S., "The Impact of the Nature of Nanoclay on Physical and Mechanical Properties of Polypropylene/reed Flour Nanocomposites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 25, No. 6, pp. 717–727, 2012.
- [9] Hossen, M. F., Hamdan, S., Rahman, M. R., Rahman, M. M., Liew, F. K., Lai, J. C., "Effect of Fiber Treatment and Nanoclay on the Tensile Properties of Jute Fiber Reinforced Polyethylene/clay Nanocomposites," *Fibers and Polymers*, Vol. 16, No. 2, pp. 479–485, 2015.
- [10] Babaei, I., Madanipour, M., Farsi, M., Farajpoor, A., "Physical and Mechanical Properties of Foamed HDPE/Wheat Straw Flour/Nanoclay Hybrid Composite," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 56, pp. 163–170, 2014.
- [11] Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J.W., Potts, J.R., Ruoff, R.S., "Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications," *Advanced Materials*, Vol. 22, No. 39, pp. 3906–3924, 2010.
- [12] Al-Lafi, W., Jin, J., Song, M., "Mechanical Response of Polycarbonate Nanocomposites to High Velocity Impact," *European Polymer Journal*, Vol. 85, No. Supplement C, pp. 354–362, 2016.
- [13] Hsieh, A.J., Moy, P., Beyer, F.L., Madison, P., Napadensky, E., Ren, J., Krishnamoorti, R., "Mechanical Response and Rheological Properties of Polycarbonate Layered-Silicate Nanocomposites," *Polymer Engineering And Science*, Vol. 44, No. 5, pp. 825–837, 2004.
- [14] Katja, N., Vuorinen, J., Villman, V., Suihkonen, R., Ja'rvela", P., Sundelin, J., Lepisto, T., "Characterization of Twin-Screw-Extruder Compounded Polycarbonate Nanoclay Composites," *Polymer Engineering And Science*, Vol. 49, No. 4, pp. 631–640, 2009.
- [15] King, J.A., Via, M.D., Morrison, F.A., Wiese, K.R., Bearch, E.A., Cieslinski, M.J., Bogucki, G.R., "Characterization of Exfoliated Graphite Nanoplatelets/Polycarbonate Composites: Electrical and Thermal Conductivity, and Tensile, Flexural, and Rheological Properties," *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 9, pp. 1029–1039, 2012.
- [16] Moy, P., Weerasooriya, T., Chen, W., "Mechanical Response of Polycarbonate Nano-Composites as a Function of Strain Rate and Weight Percent of Nano-Silicate Clay Loading," *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1: Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, Vol. 1, pp. 17–20, 2018.
- [17] Shokrieh, M.M., Joneidi, V.A., "Manufacturing and Experimental Characterization of Graphene / Polypropylene Nanocomposites." In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 11, pp. 55–63, 2014.
- [18] Payganeh, G., Ghasemi, I., Rahmani, M., Kazemnejad, A., "An Investigation on the Impact properties of Nanocomposite Based on Polypropylene / Graphene Nanosheets / Nano Clay Using Response Surface Methodology," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 271–279, 2015.
- [19] Payandehpeyman, J. Majzooobi, Gh. and Bagheri, R., "Experimental, Analytical and Numerical Investigation of

همان گونه که مشاهده می شود مدل فوق دارای دقت قابل قبولی برای پیش بینی تنش تسلیم می باشد، اما با افزایش درصد وزنی فیلرها، فاصله بین صفحات کم و احتمال برهم کنش بین سطح فیلرها و تاثیر نیروهای واندروالسی ذاتی موجود در بین صفحات افزایش می یابد که منجر به چسبندگی ذرات و تشکیل پدیده کلوخه ای خواهد شد [33,32]. در این حالت، تنش تسلیم کاهش می یابد به گونه ای که مدل فوق در درصدهای بالا قابلیت پیش بینی خود را به کلی از دست می دهد. شکل 7 تصاویر میکروسکوپی از سطح نمونه ها را نشان می دهد. شکل 7-الف مربوط به نمونه بدون فیلر می باشد. مشاهده می شود که پلی-کربنات خالص دارای سطحی هموار است اما با افزایش درصد وزنی تقویت کننده ها، به علت مقاومت فیلرها در برابر رشد ترک دارای باندهای برشی زیادی خواهد شد.

### 5- نتیجه گیری

در این پژوهش، از روش مستریج جهت ساخت نانو کامپوزیت پلی کربنات/گرافن اکسید و پلی کربنات/رس (کلوزیت 20A) استفاده شده است. نمونه های کامپوزیتی با استفاده از تزریق تولید و خواص فشاری در دمای محیط در سه نرخ کرنش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نهایی حاصل از این پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- 1- منحنی تنش-کرنش فشاری نانوکامپوزیتها از قسمت غیرخطی الاستیک، تسلیم، کرنش نرمی و کرنش سختی تشکیل شده است.
- 2- افزایش نرخ کرنش و اضافه نمودن فیلرها باعث محدود شدن حرکت زنجیره های پلیمری و در نتیجه منجر به بهبود خواص مکانیکی می گردد.
- 3- بیشترین میزان اثر بخشی نانو رس و گرافن اکسید به ترتیب در کامپوزیت های حاوی 1% و 0.6% وزنی می باشد. نانو رس و گرافن اکسید به ترتیب باعث بهبود 6.2% و 7.6% در تنش تسلیم می شود.
- 4- با افزایش درصد فیلرها به دلیل تشکیل پدیده کلوخه ای خواص مکانیکی کاهش می یابد.
- 5- مدل اصلاحی جی سل-جوناس به خوبی منحنی تنش-کرنش فشاری را در نرخ های مختلف توصیف می کند.
- 6- ترکیب مدل ارینگ و مدل میکرومکانیکی تورسانی و همکاران می تواند تنش تسلیم نانوکامپوزیت پلی کربنات را بر اساس تابعی از نرخ کرنش و درصد حجمی فیلر پیش بینی کند. اما این مدل قابلیت پیش بینی افت تنش تسلیم، ناشی از پدیده کلوخه ای را ندارد.

### 6- مراجع

- [1] Mazumdar, S., "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering", First ed., CRC Press, United States, pp. 25-28, 2001.
- [2] Harper, C. A., "Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites", Fourth ed., McGraw-Hill, New York, pp. 30-32, 2002.
- [3] Blumenthal, W. R., "Influence of Temperature and Strain Rate on the Compressive Behavior of PMMA and Polycarbonate Polymers," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 620, pp. 665–668, 2002.
- [4] Siviour, C. R., Walley, S. M., Proud, W. G., Field, J. E., "The High Strain Rate Compressive Behaviour of Polycarbonate and Polyvinylidene Difluoride," *Polymer*, Vol. 46, No. 26, pp. 12546–12555, 2005.
- [5] Omar, M. F., Akil, H. M., Ahmad, Z. A., "Measurement and Prediction of Compressive Properties of Polymers at High

- Polypropylene Nanocomposites Microhardness”, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 165-176, 2016.
- [20] Duffo, P., Monasse, B., Haudin, J. M., G’Sell, C., Dahoun, A., “Rheology of Polypropylene in the Solid State,” Journal of Materials Science, Vol. 30, No. 3, pp. 701-711, 1995.
- [21] G’Sell, C., and Jonas, J. J., “Determination of the Plastic Behaviour of Solid Polymers at Constant True Strain Rate,” Journal of Materials Science, Vol. 14, No. 3, pp. 583-591, 1979.
- [22] Schang, O., Billon, N., Muracciole, J., Fernagut, F., “Mechanical behavior of a ductile polyamide 12 during impact,” Polymer Engineering and Science, Vol. 36, No. 1374, pp. 541-550, 1996.
- [23] Shokrieh, M. M., Shamaei Kashani, A. R., Mosalmani, R., “A Dynamic-Micromechanical Constitutive Model to Predict the Strain Rate Dependent Shear Behavior of Neat and Reinforced Polymers with Carbon Nanofibers,” Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 7, pp. 13-21, 2015
- [24] Shokrieh, M. M., Shamaei Kashani, A. R., Mosalmani, R., “A Dynamic Constitutive-Micromechanical Model to Predict the Strain Rate-Dependent Mechanical Behavior of Carbon Nanofiber/ Epoxy Nanocomposites,” Iranian Polymer Journal, Vol. 25, No. 6, pp. 487-501, 2016
- [25] Shokrieh, M.M., Joneidi, V.A., “Characterization and Simulation of Impact Behavior of Graphene/ Polypropylene Nanocomposites Using a Novel Strain Rate-Dependent Micromechanics Model,” Journal of Composite Materials, Vol. 49, No. 19, pp. 2317-2328, 2015
- [26] Mulliken, AD., Boyce, MC., “Mechanics of the Rate-Dependent Elastic-plastic Deformation of Glassy Polymers from Low to High Strain Rates”. International Journal of Solids and Structures, Vol. 43, No. 5, pp. 1331-1356, 2006.
- [27] Buckley, CP., Dooling, PJ., Harding, J., Ruiz, C., “Deformation of Thermosetting Resins at Impact Rates of Strain. Part 2: constitutive model with rejuvenation”. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Vol. 52, No. 10, pp. 2355-2377, 2004.
- [28] Porter, D., Gould, PJ., “Predictive Nonlinear Constitutive Relations in Polymers Through Loss History”. International Journal of Solids and Structures. Vol. 46, No. 9, pp. 1981-1993, 2009.
- [29] Eyring, H., “Viscosity, Plasticity, and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates,” The Journal of Chemical Physics, Vol. 4, No. 4, pp. 283-291, 1936.
- [30] Turcsányi, B., Pukánszky, B., Tüdös, F., “Composition Dependence of Tensile Yield Stress in Filled Polymers,” Journal of Materials Science Letters, Vol. 7, No. 2, pp. 160-162, 1988.
- [31] Miehe, C., Goektepe, S., Mendez Diez, J., “Finite Viscoplasticity of Amorphous Glassy Polymers in the Logarithmic Strain Space”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 46, No. 1, pp. 181-202, 2004.
- [32] Lei, S.G., Hoa, S.V., Ton-That, M.-T., “Effect of Clay Types on the Processing and Properties of Polypropylene Nanocomposites”, Composites Science and Technology, Vol. 66, No. 10, pp. 1274-1279, 2006.
- [33] Kiss, A., Fekete, E., Pukánszky, B., “Aggregation of CaCO<sub>3</sub> Particles in PP Composites: Effect of Surface Coating”, Composites Science and Technology, Vol. 67, No. 7-8, pp. 1574-1583, 2007.