



بررسی تجربی اثر نرخ کرنش بر رفتار ماده الاستومری (HDPE/POE) تقویت شده با ذرات نانوسیلیکا در بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی

اسماعیل علیقلی زاده فیروزجایی¹، مجتبی یزدانی^{2*}، هادی صبوری³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران

* تبریز، صندوق پستی 51335-1396، m.yazdani@sut.ac.ir

چکیده

الاستومرها دسته ای از مواد پلیمری با ویژگی های منحصر به فرد رفتاری هستند. الاستومرها دارای دوتنوع رفتار وابسته به زمان و مستقل از زمان هستند، رفتار مکانیکی این دسته از مواد پلیمری تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار دارد. در این تحقیق اثر افزایش نانوذرات سیلیکا و نرخ بارگذاری در دو حالت شبه استاتیکی و دینامیکی بر روی رفتار کششی ماده الاستومری HDPE/POE مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا ماده الاستومری پایه با نسبت اختلاط 40% HDPE و 60% POE تولید شده و سپس با افزایش ذرات نانوسیلیکا، 4 نوع نمونه شامل 3 نوع نمونه تقویت شده 0.7%، 1% و 1.4% و یک نوع نمونه HDPE/POE ساخته شد. نمونه ها در حالت کشش شبه استاتیکی تحت نرخ کرنش های 0.04 1/s، 0.07 1/s، 0.14 1/s و 0.17 1/s قرار گرفتند و در حالت دینامیکی نیز با استفاده از فیکسچر کاملاً جدید طراحی شده بر روی دستگاه ضربه سرعت پایین (ضربه افتان) به نمونه ها بار کششی با نرخ کرنش 160 1/s و 100 1/s اعمال شده است. نتایج پژوهش نشان داده است در بارگذاری دینامیکی رفتار ماده الاستومری به شدت تابع نرخ کرنش است، افزایش نرخ کرنش سبب افزایش سطح تنش و نیروها در هر دو نوع بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی می شود. مقدار افزایش سطح نیروها در بارگذاری دینامیکی بسیار بیشتر از حالت استاتیکی است. همچنین مکانیزم جدید طراحی شده قابلیت دسترسی به داده های کششی دینامیکی مختلف را در دستگاه ضربه سرعت پایین فراهم می کند، از طرفی با افزایش درصد نانوسیلیکا استحکام کششی نمونه ها به طور محسوسی افزایش می یابد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 دی 1396
پذیرش: 23 اسفند 1396
ارائه در سایت: 30 فروردین 1397
کلید واژگان:
الاستومر
نانوسیلیکا
نرخ کرنش
ضربه افتان
مکانیزم

Experimental investigation of strain rate effect on reinforced elastomeric material behavior (HDPE/POE) under quasi static and dynamic loading

Esmail Aligholizadeh¹, Mojtaba Yazdani^{1*}, Hadi Sabouri²

1- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

* P.O.B. 51335/1996, Tabriz, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 January 2018
Accepted 14 March 2018
Available Online 19 April 2018

Keywords:

Elastomer
Nano silica
Strain rate
Drop weight impact
Mechanism

ABSTRACT

Elastomers are a group of polymeric materials that have unique properties, including time-dependent behavior and time-independent, the mechanical behavior of this material is affected by various factors. In this study, the effect of increasing the silica nanoparticles and strain rates in two quasi-static and dynamic states on the tensile behavior of HDPE / POE has been investigated. For this purpose, an elastomeric material was first created with 40% HDPE and 60% POE mixing ratio. Then with increasing Nano silica particles, 4 sample types including 3 samples 0.7%, 1% and 1.4%, and one sample of HDPE/POE was fabricated. The samples were loaded at strain rate of 0.04 1/s, 0.07 1/s, 0.11/s, 0.14 1/s and 0.17 1/s in a quasi-static tensile state. In dynamic mode, tensile load with a strain rate of 160 1/s and 100 1/s was applied to the specimens using a new fixture designed on the low velocity impact test machine (Drop weight impact test machine). In the dynamic loading, the behavior of the elastomeric material is extremely dependent on the strain rate, with increasing the strain rate the level of stress and forces in both quasi-static and dynamic loads will be increase. The increase in force levels in dynamic loading is much more than static. Also, the new designed mechanism provides access to dynamic tensile data at different strain rates in a low velocity impact machine. On the other hand, with increasing Nano silica percentage, the tensile strength of the samples is noticeably increased.

1- مقدمه

ب) خواص فرآیندی، براساس خواص مکانیکی این مواد به دو دسته پلاستیکها و لاستیکها (الاستومرها) و از لحاظ خواص فرآیندی به دو دسته کلی ترموستها و ترموپلاستها تقسیم بندی می شوند [1]. الاستومرها دارای رفتار

امروزه مواد پلیمری با توجه به خواص مطلوبشان کاربرد گسترده ای پیدا کرده اند. پلیمرها براساس دو ویژگی دسته بندی می شوند: الف) خواص مکانیکی

ویسوالاستیک (رفتار وابسته به زمان) و هایپرلاستیک (رفتار مستقل از زمان) و همچنین مقدار ناچیزی نیروهای بین مولکولی می باشد. از این مواد به دلیل مدول پایین و قابلیت شکل پذیری و تغییر شکل های بزرگ و اتلاف انرژی بالا به عنوان عامل کاهش آسیب ناشی از بارگذاری های انفجاری و ضربه ای استفاده می شود. به طور مثال یاتاقان های نگه دارنده پلیمری باعث محافظت از پل ها و ساختمان ها در برابر زلزله می شوند در این حالت این اجزا با قرار دادن یک لایه با مدول برشی پایین بین زمین و سازه باعث حرکت جسم صلب سازه می شوند [2-4]. جاذب های شوک لاستیکی با جذب انرژی شوک کمترین نیروی انتقالی به سطح محافظت شده را وارد می کنند. همچنین این مواد به وسیله جذب انرژی سبب کاهش دامنه ارتعاشات بزرگ می شوند [5]. با توجه به کاربرد وسیع این مواد امروزه با ترکیب مواد پلیمری مختلف، الاستومرهایی با خواص مکانیکی متنوع تولید می شوند.

در دهه های اخیر برای بهبود خواص مواد پلیمری از پرکننده های مختلفی نظیر گرافن، سیلیکا، نانولوله های کربنی، دوده و... استفاده شده است. که در این میان استفاده از این مواد در مقیاس نانو در پروژه های تحقیقاتی رشد چشم گیری داشته است [6-8]. نانوذره های سیلیکون دی اکسید که به عنوان نانو ذره های سیلیکا یا نانوسیلیکا شناخته می شود با فرمول شیمیایی SiO_2 در طبیعت به صورت کوآرتز یافت می شود. این ماده به دلیل پایداری بالا، میزان سمی بودن پایین در پزشکی و به دلیل خواص الکتریکی مناسب برای ساخت فیبرهای نوری در زمینه مخابرات کاربرد دارد البته حدوداً 95% از مصرف نانوسیلیکا در زمینه های عمرانی و صنعتی برای بهبود خواص مکانیکی مواد است [7,8].

پلی اتیلن (PE) دسته ای از ترموپلاستیک ها هستند که از طریق پلیمریزاسیون گاز اتیلن (C_2H_4) به دست می آیند و به دلیل سختی مناسب، مقاومت شیمیایی بالا، کنترل پذیری فرایند و خواص حرارتی خوب کاربرد گسترده ای یافتند. سه دسته پرکاربرد این ماده، پلی اتیلن سبک (LDPE)، پلی اتیلن سنگین (HDPE) و پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) می باشند. به دلیل مقاومت پایین و انعطاف پذیری بالا LDPE نسبت HDPE و UHMWPE از این ماده برای ساخت ظروف پلاستیکی سبک استفاده می شود ولی از HDPE به دلیل استحکام کششی بالا در ساخت لوله های بزرگ انتقال مایعات و گازها استفاده می شود، از طرفی پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا بعد از پخت تبدیل به یک گرماسخت واقعی با استحکام کششی و مقاومت به ضربه بالا خواهد شد تا جایی که امروزه از آن در ساخت الیافی برای جلیقه های ضد گلوله به عنوان جایگزینی برای کولار استفاده می شود [9]. با وجود استحکام کششی بالا HDPE، این ماده سختی بالایی دارد که سبب تردی بالا و کاهش مقاومت به ضربه آن می شود، بدین منظور برای بهبود مقاومت به ضربه و انعطاف پذیری پلی اتیلن سنگین از ترکیب این ماده با مواد پلیمری دیگری نظیر پلی اولفین الاستومرها (POE) به عنوان آلیاژهای پلیمری استفاده می شود. هرچند POE ها سبب بهبود مقاومت به ضربه می شوند ولی باعث کاهش مدول نیز می شوند.

پلی اولفین الاستومرها ابتدا در سال 1993 به وسیله کمپانی دینوپ الاستومر با برند اکتیج ساخته شده اند. در واقع POE ها، اتیلن-اکتن کوپلیمر (EOC) هستند که با استفاده از کاتالیست پیشرفته اینسایت و فرایندهای کنترل ساخت جدید سنتز شده است. این ماده نسبت به EPR و EPDM در بهبود خواص ضربه بسیار موثرتر است، همچنین تزریق این ماده در دستگاه اکسترودر دو محوره نسبت به EPDM آسان تر می باشد [10,11].

برای ساخت آلیاژ پلیمری نظیر آلیاژ پایه پلی اتیلن عموماً از روش اختلاط مذاب استفاده می شود. در این روش نانوذره های تقویت کننده و گرانول های پلیمری مدنظر به طور جداگانه درون اکسترودر ریخته می شود که نسبت به روش های دیگر مثل روش محلولی به دلیل استفاده از حلال های شیمیایی خطرات زیست محیطی کمتری دارد و به روش های ساخت صنعتی نزدیکتر است.

در سالیان گذشته محققانی بسیاری به بررسی تجربی، عددی و تحلیلی رفتار مکانیکی الاستومرهای مختلف تحت بارگذاری های متنوع پرداختند. مینگ و همکاران در سال 2003 به بررسی رفتار تنش کرنش لاستیک EPDM در نرخ کرنش های مختلف پرداختند. با تحلیل داده های تجربی آن ها دریافتند، در نرخ کرنش های پایین رفتار تنش کششی ماده به شدت تابع نرخ کرنش است همچنین میزان آسیب وارده بر نمونه های تحت کشش تابع بیشترین نسبت ارتجاعی است که هر نمونه تحمل می کند [12].

بویس و همکاران در سال 2006 به بررسی مواد الاستومری تحت بار ضربه ای پرداختند. آن ها در این تحقیق به بررسی رفتار ضربه ای الاستومرهای تراکم ناپذیر ترموپلاستیک پرداختند و پس از تطابق نتایج تجربی با نتایج حاصل از شبیه سازی دریافتند که رفتار این مواد با استفاده از مدل مونی ریولین قابل پیش بینی است [13].

تامرو همکاران در سال 2009 به بررسی رفتار ضربه ای پوشش فولادی-الاستومری تحت بار ضربه ای بالستیک پرداختند. آن ها برای پوشش لایه فولادی الاستومری از پلی یورا استفاده کردند و مشاهده نمودند در نرخ تغییر شکل های بالا رفتار هایپرلاستیک ماده حاکم بوده و مدل انرژی کرنشی اگدن برای پیش بینی رفتار ماده در این نرخ بارگذاری بسیار مناسب است [14].

در سال 2012 کیم و همکاران مقایسه ای بین رفتار مواد مونی ریولین، نئوهوکن و اگدن روی لاستیک کلروپن انجام دادند. آن ها دریافتند مدل مونی ریولین و نئوهوکن به آسانی قادر به پیش بینی رفتار لاستیک کلروپن می باشند، ولی هر دو مدل در تغییر شکل بزرگ لاستیک کلروپن دچار محدودیت هستند، در نتیجه برای این نوع تغییر شکل ها مدل اگدن را پیشنهاد دادند [15].

در سال 2013 کوشا به بررسی رفتار مکانیکی، رئولوژیکی و کاربردهای آلیاژ پلی پروپیلن و پلی اولفین الاستومر پرداخته است. وی مشاهده نمود با افزایش درصد بخش الاستومری در نمونه های مختلف تهیه شده، مدول یانگ پلی پروپیلن در بازه مشخصی از بارگذاری به شدت کاهش یافته و به همین نسبت چقرمگی ماده پایه پس از ترکیب با پلی اولفین تا 15 برابر اولیه افزایش یافته است [16].

در سال 2016 برناردی و همکاران به بررسی رفتار الاستومرهای بر پایه سیلیکون تحت کرنش های بالا با کاربرد در زمینه پزشکی پرداختند. آن ها با در نظر گرفتن کرنش های مختلف توانستند مدلی را برای این مواد در کاربردهای پزشکی ارائه دهند [17].

با توجه به مطالعه تحقیقات گذشته و در نظر گرفتن مزایا و معایب روش های ساخت نمونه ها، در این تحقیق برای ساخت نمونه ها HDPE/POE از روش اختلاط مذاب با استفاده از دستگاه مخلوط کن داخلی، اکسترودر و دستگاه تزریق پلاستیک استفاده شده است. در ساخت نمونه الاستومری پایه از نسبت اختلاط 40% پلی اتیلن سنگین و 60% پلی اولفین استفاده شده است، سپس با افزودن ذرات نانوسیلیکا به ماده الاستومری پایه سه نوع نمونه



Fig. 1 fabricated specimen by injection molding

شکل 1 نمونه های ساخته شده با قالب‌گیری تزریقی

به‌منظور گرفتن تصاویر SEM و آنالیز EDX ابتدا نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در کوره خلا در دمای 50 درجه سانتی‌گراد نگهداری شده سپس نمونه‌ها در نیتروژن مایع قرار داده و شکسته شدند. به‌دلیل وجود جز الاستومری در ماده پایه برای تصاویر بهتر نمونه‌ها بعد از شکستن از سمت سطح مقطع شکست به مدت 3 ساعت درون هپتان مایع قرار داده شده و اچ شدند.

برای انجام آزمون کشش شبه استاتیکی از دستگاه کشش 5 تنی استفاده شده است. بدین منظور نرخ کرنش‌های 0.04 1/s، 0.07 1/s، 0.1 1/s، 0.14 1/s و 0.17 1/s به چهار نوع نمونه تهیه شده اعمال شده است همچنین برای استخراج داده‌های دقیق و با توجه به تغییر طول زیاد نمونه‌ها در طول فرایند کشش از اکستنسیومتر کورس بلند استفاده شده است. به‌منظور افزایش دقت داده‌های استخراج شده، آزمون کشش از هر نوع نمونه تهیه شده با 3 بار تکرار انجام شده است، (شکل 2).

در مرحله بعد برای انجام آزمون دینامیکی کشش از دستگاه ضربه سرعت پایین (وزنه افتان) و فیکسچر تبدیل بار جدید برای اولین بار استفاده شده است (شکل 3). این دستگاه به‌وسیله دو پیچ 4 متری قرار داده شده ضربه‌زننده را در راستای میل راهنماها بلند کرده و در طول آن حرکت می‌دهد، ضربه زننده با استفاده از مکانیزم قفل کننده دستگاه نگه‌داشته شده و در ارتفاع دلخواه قرار می‌گیرد.

شتاب‌سنج مورد استفاده در این دستگاه با نام ساینوسرا CA-YD-111 می‌باشد که دارای حساسیت 0.0054 pC/ms^2 ، دامنه فرکانس 2-10 kHz، حد شوک 50000g و رزونانس نصب شده 45 kHz می‌باشد.



Fig.2 Santam tensile test machine (5Ton)

شکل 2 دستگاه کشش 5 تن ساخت شرکت سنتام

تقویت شده با 0.7%، 1% و 1.4% حاوی ذرات نانوساخته شده است. با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال و دستگاه ضربه سرعت پایین با فیکسچر جدید نصب شده بر روی آن از نمونه الاستومری پایه و سه نمونه تقویت شده آزمون کشش شبه‌استاتیکی و دینامیکی در نرخ کرنش‌های مختلف صورت گرفت. و نتایج آن با استفاده از مشاهده‌ها و نمودارهای به‌دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

2- مطالعات آزمایشگاهی

2-1- مواد اولیه

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد در این تحقیق برای ساخت نمونه از پلی‌اتیلن سنگین (HDPE)، پلی‌اولفین الاستومر (POE) یا اتیلن-اکتن کاپلیمر (EOC) و از ذرات نانوسیلیکا به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. HDPE مورد استفاده از محصولات پتروشیمی جم با نام تجاری HDPE 52505/UV و پلی‌اولفین الاستومر به‌کار برده شده از کمپانی LG Chem تحت نام تجاری LG: LC370 می‌باشد، که مشخصات آن‌ها در جدول 1 آورده شده است. همچنین از ذرات نانوسیلیکا کمپانی اونیک با نام تجاری Aerosil R8200 به‌عنوان تقویت کننده استفاده می‌شود.

2-2- تهیه نمونه

برای ساخت نمونه‌ها از روش اختلاط مذاب استفاده شده است ابتدا گرانول‌های HDPE، POE و نانوذرات سیلیکا، در دستگاه مخلوط کن داخلی با نام برابندر اینترنال میکسر به منظور ساخت محصول ابتدایی تقویت شده در دمای 190 درجه سانتی‌گراد و با دور 60 rpm ریخته شد. سپس مجموعه‌های ساخته شده در مرحله قبل با استفاده از دستگاه اکسترودر دو پیچ Werner & Pfleiderer ZSK-25 با نسبت طول به قطر $L/D = 40$ (40) در دمای 190 درجه سانتی‌گراد و دور 65 rpm با مقادیر مورد نیاز HDPE و POE ترکیب شده و نمونه‌های تقویت شده حاوی 0.7%، 1% و 1.4% نانو ذرات سیلیکا ساخته شده‌اند.

پس از ساخت گرانول‌های تقویت شده با درصد‌های موردنظر و گرانول‌های ماده الاستومری پایه (HDPE/POE) در مرحله بعد این گرانول‌ها با استفاده از دستگاه تریب به نمونه‌های کششی (شکل 1) براساس استاندارد ASTM D638 تبدیل شده‌اند [18].

شایان ذکر است نمونه‌های تولید شده به روش تزریق به دلیل عدم دخالت دست نمونه‌های بسیار دقیق و با کیفیت‌تری نسبت به روش‌های دیگری نظیر روش پرس داغ می‌باشد.

2-3- آزمون‌ها

در این مرحله ابتدا از نمونه‌های تهیه شده در مرحله قبل تصاویر SEM گرفته شده و آنالیز EDX انجام شده است، سپس با استفاده از دستگاه کشش 5 تنی ساخت شرکت سنتام و دستگاه ضربه سرعت پایین با فیکسچر جدید به ترتیب آزمون کشش شبه استاتیکی و دینامیکی صورت گرفت.

جدول 1 خواص مواد

Table 1 material properties

نوع ماده	شاخص مذاب (gr/10min)	چگالی (gr/cm ³)
HDPE5250/UV	5	0.952
POE-LG:LC370	0.87	3

این فیکسچر از دو گلوله ننگ‌دارنده با چهار ننگ‌دارنده در بالا و پایین، 8 میله دمبلی لولایی شکل، چهار گیره کوچک لولایی شکل به منظور بارگذاری تک محوره و دو محوره، 12 پین کروم دو طرفه، دو میله راهنما سنگ خورده، دو یاتاقان لغزشی و یک صفحه انتقال بار متحرک در بالا تشکیل شده است. شایان ذکر است که برای بارگذاری چند محوره می‌توان چهار گیره لولایی انتهایی را با گیره‌های مخصوص دیگر تغییر داد.

برای انجام آزمون کشش دینامیکی ریل‌های راهنما و گلوله پایینی روی صفحه هدف دستگاه بسته می‌شود. به منظور استخراج لحظه‌ای کرنش، کرنش‌سنج‌های در نظر گرفته شده روی نمونه بسته شده روی فیکسچر چسبانده می‌شود تا با استفاده از سیستم پردازش داده بتوان مقدار کرنش را همزمان با استخراج شتاب اندازه‌گیری نمود (شکل 5).

ضربه زننده پس از برخورد به صفحه متحرک متصل به یاتاقان‌های لغزشی بار ضربه‌ای را به هشت میله لولایی شکل منتقل کرد سپس این نیرو از طریق گیره‌ها به نمونه وارد شده و نمونه‌ها تحت کشش قرار می‌گیرند (شکل 6).

3- تحلیل نتایج

1- تصاویر SEM و آنالیز EDX

همان‌طور که تصاویر SEM (شکل 7، 8 و 9) نشان می‌دهد دو فاز HDPE و POE به خوبی با یکدیگر ترکیب شده و فاز کلی زمینه به صورت یکنواخت می‌باشد، همچنین همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود ذرات نانو به صورت

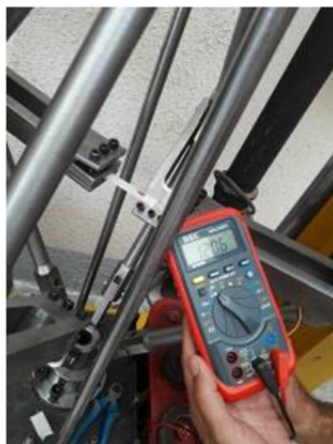


Fig. 5 Install and set strain gage on samples

شکل 5 نصب و تنظیم کرنش‌سنج بر روی نمونه‌ها



Fig. 6 specimen deformations after loading

شکل 6 تغییر شکل نمونه بعد از بارگذاری

در نهایت ضربه زننده با استفاده از سیلندره‌های پنوماتیکی نصب شده از سیستم قفل رها شده و روی نقطه هدف که در واقع همان فیکسچر تبدیل بار جدید طراحی شده می‌افتد.

فیکسچر تبدیل بار جدید طراحی شده (شکل 4) به وسیله نگارنده‌گان این پژوهش هم قابلیت تبدیل بارهای فشاری به بار کششی و ایجاد کشش یک محوره، دو محوره و چند محوره را در دستگاه کشش یونیورسال به منظور بارگذاری شبه استاتیکی روی نمونه‌ها را دارد و از طرف دیگر این فیکسچر جدید توانایی نصب روی دستگاه ضربه سرعت پایین به منظور انجام کشش تک محوره، دو محوره و چند محوره دینامیکی و تبدیل بار ضربه‌ای به کششی را دارا می‌باشد.



Fig. 3 Low velocity impact test machine (Drop Weight)

شکل 3 دستگاه ضربه سرعت پایین استفاده شده



Fig. 4 New designed loading fixture

شکل 4 فیکسچر تبدیل بار جدید طراحی شده

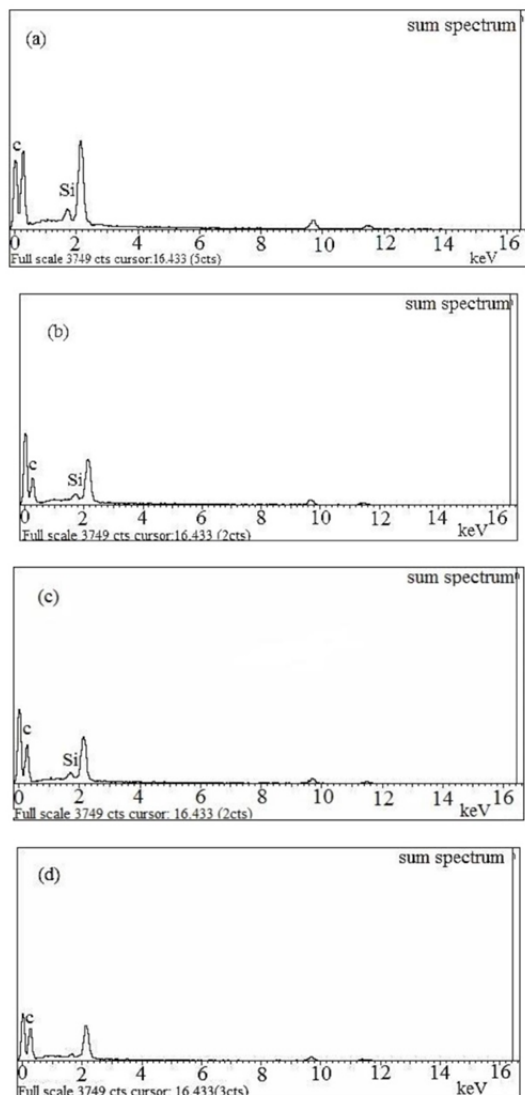


Fig. 10 EDX analysis diagram (a) 1.4 % (b) 1 % (c) 0.7% (d) pure blend
 شکل 10 نمودارهای مربوط به آنالیز EDX، (a) 1.4% (b) 1% (c) 0.7% (d) نمونه بدون نانو

3-2- بررسی رفتار کششی تحت بار شبه استاتیکی و دینامیکی

با توجه به مطالب بیان شده در قسمت قبل در آزمون استاتیکی، نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال تحت نرخ کرنش‌های مختلف قرار گرفتند. در بارگذاری استاتیکی نیرو زمان کافی برای انتقال به زنجیره‌های مولکولی را دارد و به تدریج سبب باز شدن گره و تاب این زنجیره‌ها می‌شود، از طرفی با دقت در نمودارهای استخراج شده در "شکل 11" مشخص می‌شود با افزایش مقدار درصد نانو ذرات سیلیکا، این ذرات به صورت موانعی در مقابل اعمال تدریجی نیرو به زنجیره‌ها قرار گرفته در نتیجه سبب افزایش نیرو مورد نیاز باز شدن تاب‌ها و گره‌ها می‌شود به همین دلیل مقاومت کششی ماده و سطح تنش و نیروها در این نوع بارگذاری به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در این نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش نرخ بارگذاری چون نیرو زمان کافی برای اعمال به زنجیره‌ها و غلبه بر موانعی نظیر نانوذرات و پیچ و تاب‌های بزرگ و کوچک مولکولی ندارد، در نتیجه به دلیل کاهش زمان انتقال نیرو و عدم لغزش آسان زنجیره‌ها به ازای مقدار تغییر شکل معین یا افزایش نرخ کرنش، سطوح تنش مخصوصا در نرخ بارگذاری شبه استاتیکی

ذرات سفید رنگ به خوبی در فاز زمینه توزیع شده‌اند و هیچ‌گونه ناپوستگی مربوط به کلوخه شدن و تجمع ذرات اتفاق نیافتاده است، از طرفی همان‌گونه که در تصاویر دیده می‌شود هیچ‌گونه شبکه‌بندی¹ در نمونه‌ها با درصد‌های مختلف به وجود نیامده است، در نتیجه نمونه‌های ساخته شده فاقد عیوب ساختاری می‌باشند. همچنین نمودارهای مربوط به آنالیز EDX (شکل 10) پیک Si را در درصد‌های مختلف نانو نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود با افزایش درصد نانو ارتفاع قله مربوط به Si به نسبت افزایش یافته و در ماده الاستومری پایه، قله مربوط به ذرات Si دیده نمی‌شود.

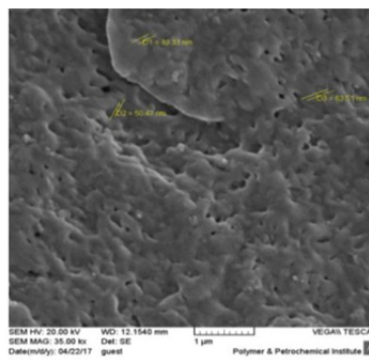


Fig. 7 SEM image for 1.4% reinforced sample with a magnification of 35000x

شکل 7 تصویر SEM نمونه 1.4% با بزرگنمایی 35000x

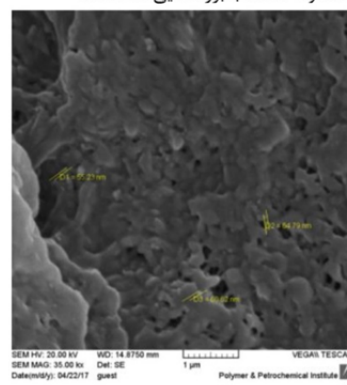


Fig. 8 SEM image for 1% reinforced sample with a magnification of 35000x

شکل 8 تصویر SEM مربوط به نمونه 1% با بزرگنمایی 35000x

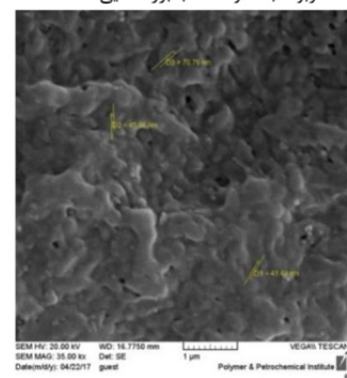


Fig. 9 SEM image for 0.7% reinforced sample with a magnification of 35000x

شکل 9 تصویر SEM مربوط به نمونه 0.7% با بزرگنمایی 35000x

¹ percolation

همچنین با استفاده از کرنش‌های محاسبه شده توسط کرنش‌سنج‌ها و نیروی به‌دست آمده، نمودار نیرو برحسب نسبت ارتجاع استخراج می‌شود. لازم به ذکر است برای استخراج داده‌ها در این آزمون از دیتالاگر منحصر به فرد طراحی شده برای دستگاه موردنظر استفاده شده است. این دیتالاگر قابلیت استخراج 100kS/s داده را داشته و می‌تواند داده‌های حاصل از سه سنسور (شتاب سنج و دو عدد کرنش سنج) را به صورت همزمان پردازش کند. تصویر a و c در "شکل 12" نمودارهای داده‌های فیلتر نشده شتاب را در حالت اولیه نشان می‌دهد که پس از فیلتر شدن به ترتیب به نمودارهای b و d تبدیل می‌شوند. به دلیل این که موج فیلتر نشده علاوه بر موج ضربه شامل

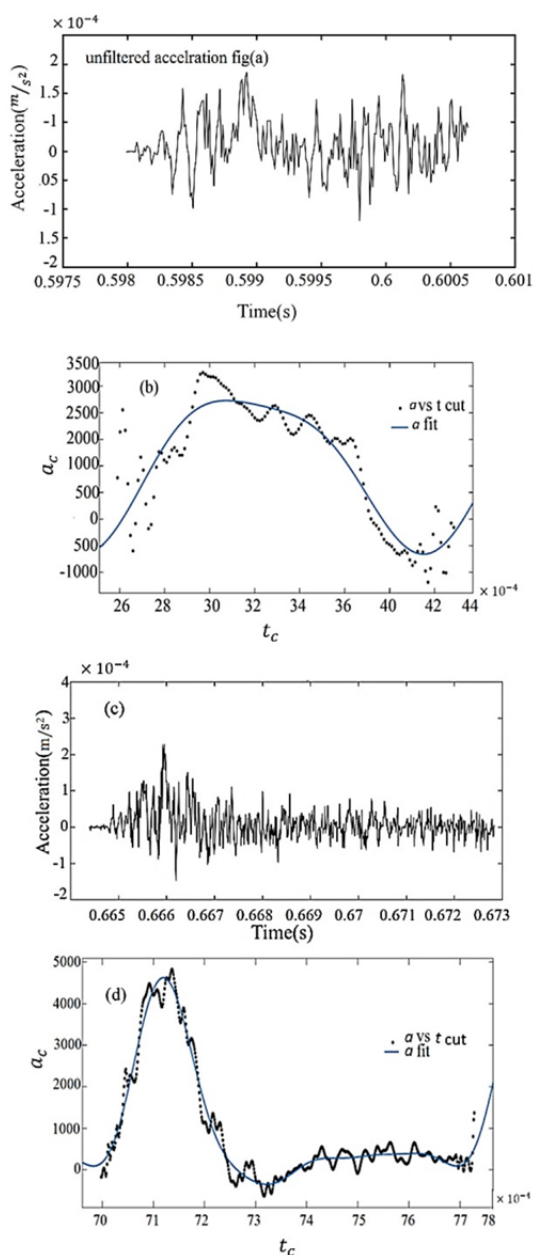


Fig. 12 unfiltered and filtered acceleration for (a) 100 1/s unfiltered (b) 100 1/s filtered (c) 160 1/s unfiltered (d) 160 1/s filtered strain rate in dynamic loading

شکل 12 شتاب اولیه و فیلتر شده برای (a) فیلتر نشده 100 1/s (b) فیلتر شده 100 1/s (c) فیلتر نشده 160 1/s (d) فیلتر شده 160 1/s

بالتر از 0.07 1/s به شدت افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد رفتار ماده در این نوع بارگذاری تابع نرخ کرنش اعمال شده می‌باشد.

در بارگذاری دینامیکی پس از برخورد ضربه زننده، در زمان‌های مساوی شتاب‌ها و کرنش‌ها برحسب تابعی از زمان استخراج می‌شوند. برای به‌دست آوردن شتاب پس از برخورد شتاب‌سنج موج‌های مختلف را اندازه‌گیری و نشان می‌دهد با انتخاب پیک مربوط به برخورد و فیلتر کردن این موج نمودار نهایی شتاب برحسب زمان به‌دست می‌آید (شکل 12). به تبع استخراج نمودار شتاب برحسب زمان و جرم پرتابه، نمودار نیرو- زمان به‌دست می‌آید.

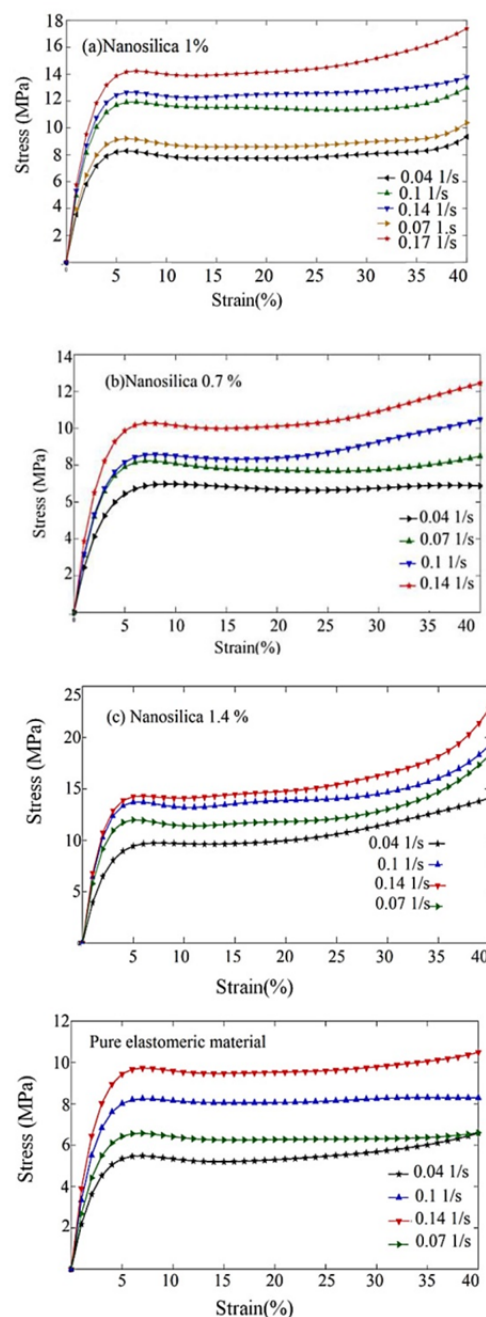


Fig. 11 quasi static loading at different loading (a) 1% (b) 0.7% (c) 1.4 % (d) pure blend

شکل 11 بارگذاری شبه استاتیکی در نرخ کرنش‌های مختلف (a) 1% (b) 0.7% (c) 1.4%

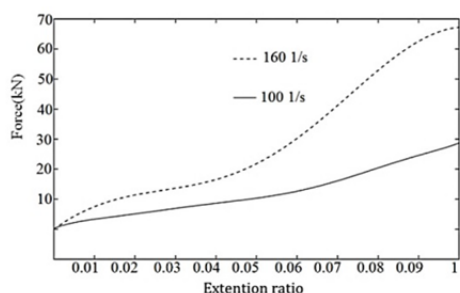


Fig. 14 dynamical loading under tow strain rate for 1% reinforced sample

شکل 14 بارگذاری دینامیکی تحت دو نرخ کرنش مختلف برای نمونه 1%

باید توجه داشت در آزمون کشش دینامیکی چسباندن غیرصحیح کرنش سنج‌ها، مقارن نیستن نمونه‌ها، سرخوردن نمونه‌ها از فک‌های طراحی شده و اصطکاک موجود در لوله‌ها و یاتاقان‌های لغزشی می‌تواند سبب بروز خطا در داده‌های خروجی مساله شود. بنابراین انجام این آزمایش باید با دقت و احتیاط بالا در شرایط ایده‌آل انجام شود.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار ماده الاستومری (HDPE/POE) تقویت شده با استفاده از نانوذرات سیلیکا تحت نرخ کرنش‌های مختلف شبه‌استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای اعمال نرخ کرنش‌های مختلف در حالت دینامیکی از یک مکانیزم جدید تبدیل نیرو استفاده شده است که قادر به تبدیل بارگذاری ضربه‌ای به بار کششی دو محوره و تک محوره می‌باشد.

بررسی داده‌های استخراج شده از آزمون‌های شبه‌استاتیکی و دینامیکی نشان می‌دهد: افزایش مقدار درصد نانوذرات سیلیکا سبب افزایش مقاومت کششی ماده و سطح تنش و نیروها در بارگذاری استاتیکی می‌شود. با افزایش نرخ بارگذاری سطوح تنش مخصوصاً در نرخ بارگذاری شبه‌استاتیکی بالاتر از 0.07 1/s به شدت افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده وابستگی رفتار ماده در این نوع بارگذاری به نرخ کرنش اعمال شده می‌باشد. در بارگذاری‌های دینامیکی در یک نرخ کرنش مشخص با افزایش مقدار نانوسلیکا در ماده الاستومری پایه مقدار نیرو نیز افزایش می‌یابد، مقدار افزایش نیرو و سطح تنش در حالت استاتیکی با افزایش مقدار ذرات نانو بیشتر از مقدار افزایش و بهبود آن در بارگذاری دینامیکی است، یعنی تاثیر ذرات نانو در بهبود استحکام کششی در حالت استاتیکی بیشتر است. در حالت دینامیکی جذب انرژی در نرخ کرنش‌های پایین تر بیشتر از نرخ کرنش‌های بالاتر صورت می‌گیرد. همچنین مکانیزم جدید طراحی شده به‌خوبی قابلیت اعمال بارهای دینامیکی مد نظر در حالت‌های مختلف بارگذاری را دارا می‌باشد، و می‌توان از آن به عنوان یک مکانیزم کاملاً جدید در بارگذاری‌های کششی چند محوره در حالت استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار داد.

5- مراجع

- [1] J. M. G. Cowie, *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Material*, Third Edition, pp. 75-107, Boca Raton: CRC Press, 1991.
- [2] J. M. Kelly, *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, pp. 19-59, London, Springer-Verlag, 1997.
- [3] J. D. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymers*, pp. 114-251, New York, John Wiley and Sons, 1980.
- [4] L. E. Nielsen, R. F. Landel, *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, pp. 43-87, M. Dekker, New York, 1994.
- [5] A. N. Gent (editor), *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, second Edition, pp. 11-47 Hanser Publishers, Munich, 2001.

نویزهای محیط و نویز مربوط به دستگاه هم می‌باشد در نتیجه پس از پیدا و فیلتر کردن موج حاصل از ضربه که در بازه کوچکی از محور زمان حالت فیلتر نشده است، طبیعتاً محور زمان دو نمودار با یکدیگر متفاوت خواهد بود، "شکل 13" بارگذاری در نرخ کرنش‌های 100 1/s و 160 1/s را نشان می‌دهد. در بارگذاری‌های دینامیکی مانند حالت شبه‌استاتیکی در یک نرخ کرنش مشخص با افزایش مقدار نانوسلیکا در ماده الاستومری پایه مقدار نیرو نیز افزایش می‌یابد، ولی مقدار افزایش نیرو و سطح تنش در حالت استاتیکی با افزایش مقدار ذرات نانو بیشتر از مقدار افزایش و بهبود آن در بارگذاری دینامیکی است، یعنی تاثیر ذرات نانو در بهبود استحکام کششی در حالت استاتیکی بیشتر است زیرا در حالت دینامیکی با توجه به نرخ بالای کرنش و تغییر شکل، زمان کافی برای انتقال نیرو به زنجیره‌ها و نانوذرات وجود ندارد، یعنی میزان توزیع نانوذرات بر روی تغییر شکل در این حالت تأثیری کمتری نسبت به حالت شبه‌استاتیکی دارد چون در حالت استاتیکی زمان کافی برای انتقال نیرو به زنجیره‌ها و ذرات نانو وجود دارد در نتیجه هر جز از آلیاژ تقویت شده سهم به‌سزایی در مقابل تغییر شکل ایفا می‌کنند. همچنین با توجه به "شکل 12" در حالت دینامیکی در نرخ کرنش‌های کمتر به دلیل افزایش طول ناحیه پیک مربوط به شتاب، جذب انرژی بیشتری نسبت به نرخ کرنش‌های بالاتر صورت می‌گیرد. در واقع زمانی که طول پیک نمودار مربوط به شتاب زیاد می‌شود، پرتابه زمان بیشتری را در تماس با جسم هدف بوده، و نمونه‌های کششی با افزایش طول در طول این مدت زمان انرژی پرتابه را جذب می‌کنند.

از سوی دیگر همان‌گونه که در "شکل 14" دیده می‌شود در بارگذاری دینامیکی به شدت با افزایش نرخ بارگذاری سطح نیروها افزایش می‌یابد. در واقع به دلیل این‌که در بارگذاری دینامیکی سرعت بارگذاری بالا می‌باشد، زمان کافی برای انتقال نیرو بین زنجیره‌های مولکولی وجود ندارد و ماده رفتار هایپرالاستیک از خود نشان داده و سطح نیروها به شدت نسبت به بارگذاری استاتیکی افزایش می‌یابد.

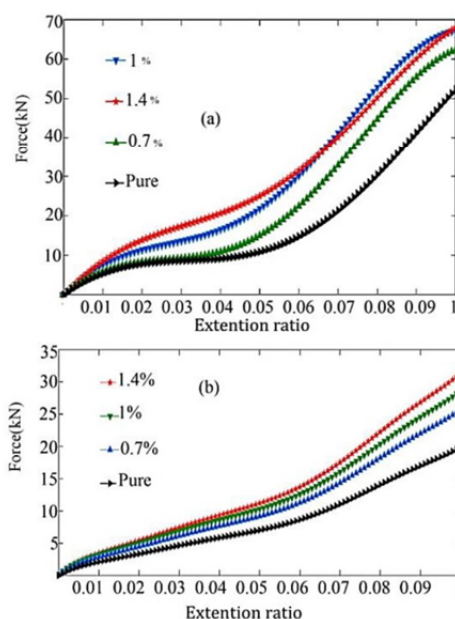


Fig.13 dynamical loading of 4 samples under (a) 160 1/s (b) 100 1/s
شکل 13 بارگذاری 4 نوع نمونه تحت دو نرخ بارگذاری دینامیکی (a) نرخ کرنش 160 1/s (b) نرخ کرنش 100 1/s

- behavior of EPDM rubber with loading rate effects, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 18, pp. 4749-4768, 2003.
- [13] P. A. Du Bois, S. Kollingb, M. Koestersc, T. Frankb, Material behaviour of polymers under impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 725-740, 2006.
- [14] El Sayed.Tamer, Mock Jr.Willis, M. Alejandro, F.Fraternali, M. Ortiz. Computational assessment of ballistic impact on a high strength structural steel/polyurea composite plate, *Journal of Computational Mechanics*, Vol. 43, No. 5, pp. 25-534, 2009.
- [15] K. Beomkeun, L. B. Seong, L. Jayone, C. Sehyun, P. Hyungmin, Y. Sanghoon, P. H. Sung, A comparison among neo-hookean model, mooney-rivlin model, and ogden model for chloroprene rubber, *Journal of Precision Engineering and Mnufacturing*, Vol. 13, No. 5, pp. 759-764, 2012.
- [16] F. Kosha, Polypropylene blends and ethylene-octenecopolymer and their applications polymerization, Vol. 3, No. 4, pp. 66-74, 2013. (inPersian فارسی)
- [17] L. Bernardi, R. Hopf, A. Ferrari, A. E. Ehret, E. Mazza, *On the Large Strain Deformation Behavior of Silicone-Based Elastomers*, *Journal of Polymer Testing*, Vol. 58, pp. 189-198, 2017.
- [18] ASTM Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D638, ASTM International, 2010.
- [6] F. AshenaiGhasemi, I. Ghasemi, M. Basiri, Experimental analysis of mechanical properties of polypropylene in Presence of graphene nano plates and polyolfine elastomer in different Manufacturing times, *Journal of Modares MechanicalEngineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 225-232, 2015. (inPersian فارسی)
- [7] R. K. Iler, *The Chemistry of Silica*, pp. 45-97, New York, Plenum Press 1979.
- [8] M. I. Ojovan, Glass formation in amorphous SiO₂ as a percolation phase transition in a system of network defects. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, Vol. 79, No. 12, pp. 632-634, 2004.
- [9] M. Steven. Kurtz, *UHMWPE Biomaterials Handbook, Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, Third Edition, pp. 3, 2015.
- [10] N. C. Nayak, D. K. Tripathy, Effect of aluminium silicate filler on morphology and physical properties of closed cell microcellular ethyleneoctene copolymer, *Journal of Materials Science*, Vol. 37 No. 7, pp. 1347-1354, 2002.
- [11] P. Svoboda, R. Theravalappil, D. Svobodova, P. Mokrejs, K. Kolomaznik, K. Mori, T. Ougizawa, T. Inoue, Elastic properties of polypropylene/ethylene-octene copolymer blends, *Journal of Polymer Testing*, Vol. 29, pp. 742-748, 2010.
- [12] M. Cheng, W. Chen, Experimental investigation of the stress-stretch