

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 51335-1996، m.yazdani@sut.ac.ir

چکیده

الاستومرها دسته ای از مواد پلیمری با ویژگی‌های 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. نمونه‌ها در حالت کشش شبه استاتیکی تحت نرخ کرنش‌های 0.04 1/s، 0.14 1/s و 0.17 1/s قرار گرفتند و در حالت دینامیکی نیز با استفاده از فیکسچر کاملا جدید طراحی شده بر روی دستگاه ضربه سرعت پایین (ضربه افتان) به نمونه‌ها 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 می‌شود. مقدار افزایش سطح نیروها در بارگذاری دینامیکی بسیار بیشتر از حالت استاتیکی است. همچنین مکانیزم جدید طراحی شده قابلیت دسترسی به داده‌های کششی دینامیکی مختلف را در دستگاه ضربه سرعت پایین فراهم می‌کند، از طرفی با افزایش درصد نانوسیلیکا استحکام کششی نمونه‌ها به طور محسوس افزایش می‌یابد.

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.

(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 تقسیم‌بندی می‌شوند [1]. الاستومرها دارای رفتار

1- مقدمه
امروزه مواد پلیمری با توجه به خواص مطلوبشان کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. پلیمرها براساس دو ویژگی دسته‌بندی می‌شوند: الف) خواص مکانیکی

برای ساخت آلیاژ پلیمری نظیر آلیاژ پایه پلی اتیلن عموماً از روش اختلاط مذاب استفاده می‌شود. در این روش نانوذره‌های تقویت‌کننده و گرانول‌های پلیمری مدنظر به‌طور جداگانه درون اکسترودر ریخته می‌شود که نسبت به روش‌های دیگر مثل روش محلولی به‌دلیل استفاده از حلال‌های شیمیایی خطرات زیست محیطی کمتری دارد و به روش‌های ساخت صنعتی نزدیکتر است.

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

بویس و همکاران در سال 2006 به بررسی مواد الاستومری تحت بار ضربه‌ای پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به بررسی رفتار ضربه‌ای الاستومرهای تراکم ناپذیر ترموپلاستیک پرداختند و پس از تطابق نتایج تجربی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی دریافتند که رفتار این مواد با استفاده از مدل مونی ریولین قابل پیش‌بینی است [13].

تامرو همکاران در سال 2009 به بررسی رفتار ضربه‌ای پوشش فولادی-الاستومری تحت بار ضربه‌ای بالستیک پرداختند. آن‌ها برای پوشش لایه فولادی الاستومری از پلی‌یورا استفاده کردند و مشاهده نمودند در نرخ تغییرشکل‌های بالا رفتار هاپیرالاستیک ماده حاکم بوده و مدل انرژی کرنشی اگدن برای پیش‌بینی رفتار ماده در این نرخ بارگذاری بسیار مناسب است [14].

در سال 2012 کیم و همکاران مقایسه‌ای بین رفتار مواد مونی ریولین، نئوهوکین و اگدن روی لاستیک کلروپن انجام دادند. آن‌ها دریافتند مدل مونی ریولین و نئوهوکین به آسانی قادر به پیش‌بینی رفتار لاستیک کلروپن می‌باشند، ولی هر دو مدل در تغییر شکل بزرگ لاستیک کلروپن دچار محدودیت هستند، در نتیجه برای این نوع تغییرشکل‌ها مدل اگدن را پیشنهاد دادند [15].

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

در سال 2016 برناردی و همکاران به بررسی رفتار الاستومرهای بر پایه سیلیکون تحت کرنش‌های بالا با کاربرد در زمینه پزشکی پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن کرنش‌های 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 روش‌های ساخت نمونه‌ها، در این تحقیق برای ساخت نمونه‌ها 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% پلی‌اتیلن سنگین و 60% پلی‌اولفین استفاده شده است، سپس با افزودن ذرات نانوسیلیکا به ماده الاستومری پایه سه نوع نمونه

ویسوالاستیک (رفتار وابسته به زمان) و هاپیرالاستیک (رفتار مستقل از زمان) و همچنین مقدار ناچیزی نیروهای بین مولکولی می‌باشد. از این مواد به دلیل مدول پایین و قابلیت شکل‌پذیری و تغییرشکل‌های بزرگ و اتلاف انرژی بالا به‌عنوان عامل کاهش آسیب ناشی از بارگذاری‌های انفجاری و ضربه‌ای استفاده می‌شود. به‌طور مثال یاتاقان‌های ننگ دارنده پلیمری باعث محافظت از پل‌ها و ساختمان‌ها در برابر زلزله می‌شوند در این حالت این اجزا با قرار دادن یک لایه با مدول برشی پایین بین زمین و سازه باعث حرکت جسم صلب سازه می‌شوند [2-4]. جاذب‌های شوک لاستیکی با جذب انرژی شوک کمترین نیروی انتقالی به سطح محافظت شده را وارد می‌کنند. همچنین این مواد به‌وسیله جذب انرژی سبب کاهش دامنه ارتعاشات بزرگ می‌شوند [5]. با توجه به کاربرد وسیع این مواد امروزه با ترکیب مواد پلیمری مختلف، الاستومرهایی با خواص مکانیکی متنوع تولید می‌شوند.

در دهه‌های اخیر برای بهبود خواص مواد پلیمری از پرکننده‌های مختلفی نظیر گرافن، سیلیکا، نانولوله‌های کربنی، دوده و... استفاده شده است. که در این میان استفاده از این مواد در مقیاس نانو در پروژه‌های تحقیقاتی رشد چشم‌گیری داشته است [6-8]. نانوذره‌های سیلیکون دی‌اکسید که به‌عنوان نانو ذره‌های سیلیکا یا نانوسیلیکا شناخته می‌شود با فرمول شیمیایی SiO_2 در طبیعت به‌صورت کوآرتز یافت می‌شود. این ماده به‌دلیل پایداری بالا، میزان سمی بودن پایین در پزشکی و به‌دلیل خواص الکتریکی مناسب برای ساخت فیبرهای نوری در زمینه مخابرات کاربرد دارد البته حدوداً 95% از مصرف نانوسیلیکا در زمینه‌های عمرانی و صنعتی برای بهبود خواص مکانیکی مواد است [7,8].

پلی‌اتیلن (PE) دسته‌ای از ترموپلاستیک‌ها هستند که از طریق پلیمریزاسیون گاز اتیلن (C_2H_4) به‌دست می‌آیند و به‌دلیل سختی مناسب، مقاومت شیمیایی بالا، کنترل‌پذیری فرایند و خواص حرارتی خوب کاربرد گسترده‌ای یافتند. سه دسته پرکاربرد این ماده، پلی‌اتیلن سبک (LDPE)، پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) و پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (UHMWPE) می‌باشند. به‌دلیل مقاومت پایین و انعطاف‌پذیری بالا LDPE نسبت HDPE و UHMWPE از این ماده برای ساخت ظروف پلاستیکی سبک استفاده می‌شود ولی از HDPE به‌دلیل استحکام کششی بالا در ساخت لوله‌های بزرگ انتقال مایعات و گازها استفاده می‌شود، از طرفی پلی‌اتیلن 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 جلیقه‌های ضدگلوله به‌عنوان جایگزینی برای کولار استفاده می‌شود [9]. با وجود استحکام کششی بالا HDPE، این ماده سختی بالایی دارد که سبب تردی بالا و کاهش مقاومت به ضربه آن می‌شود، بدین منظور برای بهبود مقاومت به ضربه و انعطاف‌پذیری پلی‌اتیلن سنگین از ترکیب این ماده با مواد پلیمری دیگری نظیر پلی‌اولفین الاستومرها (POE) به‌عنوان آلیاژهای پلیمری استفاده می‌شود. هرچند POE ها سبب بهبود مقاومت به ضربه می‌شوند ولی باعث کاهش مدول نیز می‌شوند.

پلی‌اولفین الاستومرها ابتدا در سال 1993 به وسیله کمپانی دپنوب الاستومر با برند انگیج ساخته شده‌اند. 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 EPDM و EPR در بهبود خواص ضربه بسیار موثرتر است، همچنین تزریق این ماده در دستگاه اکسترودر دو محوره نسبت به EPDM آسان‌تر می‌باشد [10,11].



Fig. 1 fabricated specimen by injection molding

شکل 1 نمونه های ساخته شده با قالب گیری تزریقی

به منظور گرفتن تصاویر SEM و آنالیز EDX ابتدا نمونه ها به مدت 24 ساعت در کوره خلا در دمای 50 درجه سانتی گراد نگهداری شده سپس نمونه ها در نیتروژن مایع قرار داده و شکسته شدند. به دلیل وجود جز الاستومری در ماده پایه برای تصاویر بهتر نمونه ها 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 کرنش های 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 داده های دقیق و با توجه به تغییر طول زیاد نمونه ها در طول فرایند کشش از اکستنسومتر کورس بلند استفاده شده است. به منظور افزایش دقت داده های 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 به وسیله دو پیچ 4 متری قرار داده شده ضربه زننده را در راستای میل راهنماها بلند کرده و در طول آن حرکت می دهد، ضربه زننده با استفاده از مکانیزم قفل کننده دستگاه نگاه داشته شده و در ارتفاع دلخواه قرار می گیرد.

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



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 شبه استاتیکی و دینامیکی در نرخ کرنش های مختلف صورت گرفت. و نتایج آن با استفاده از مشاهده ها و نمودارهای به دست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

2- مطالعات آزمایشگاهی

1-1- مواد اولیه

همان طور که در قسمت قبل بیان شد در این تحقیق برای ساخت نمونه از پلی اتیلن سنگین (HDPE)، پلی اولفین الاستومر (POE) یا اتیلن-اکتن کوپلیمر (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 پلی اولفین الاستومر به کار برده شده از کمپانی LG Chem تحت نام تجاری LG: LC370 می باشد، که مشخصات آن ها در جدول 1 آورده شده است. همچنین از ذرات نانوسیلیکا کمپانی اونیک با نام تجاری Aerosil R8200 به عنوان تقویت کننده استفاده می شود.

2-2- تهیه نمونه

برای ساخت نمونه ها از روش اختلاط مذاب استفاده شده است ابتدا گرانول های 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 سانتی گراد و با دور 60 rpm ریخته شد. سپس مجموعه های ساخته شده در مرحله قبل با استفاده از دستگاه اکسترودر دو پیچ Werner & Pfleiderer ZSK-25 با نسبت طول به قطر $(L/D = 40)$ در دمای 190 درجه سانتی گراد و دور 65 rpm با مقادیر مورد نیاز HDPE و POE ترکیب شده و نمونه های تقویت شده حاوی 0.7%، 1% و 1.4% نانو ذرات سیلیکا ساخته شده اند.

پس از ساخت گرانول های تقویت شده با درصدهای مورد نظر و گرانول های ماده الاستومری پایه (HDPE/POE) در مرحله بعد این گرانول ها با استفاده از دستگاه تزریق به نمونه های کششی (شکل 1) براساس استاندارد ASTM D638 تبدیل شده اند [18].

شایان ذکر است نمونه های تولید شده به روش تزریق به دلیل عدم دخالت دست نمونه های بسیار دقیق و با کیفیت تری نسبت به روش های دیگری نظیر روش پرس داغ می باشد.

3-3- آزمون ها

در این مرحله ابتدا از نمونه های 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 گلوبی نگه‌دارنده با چهار نگه‌دارنده 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 گلوبی 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



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

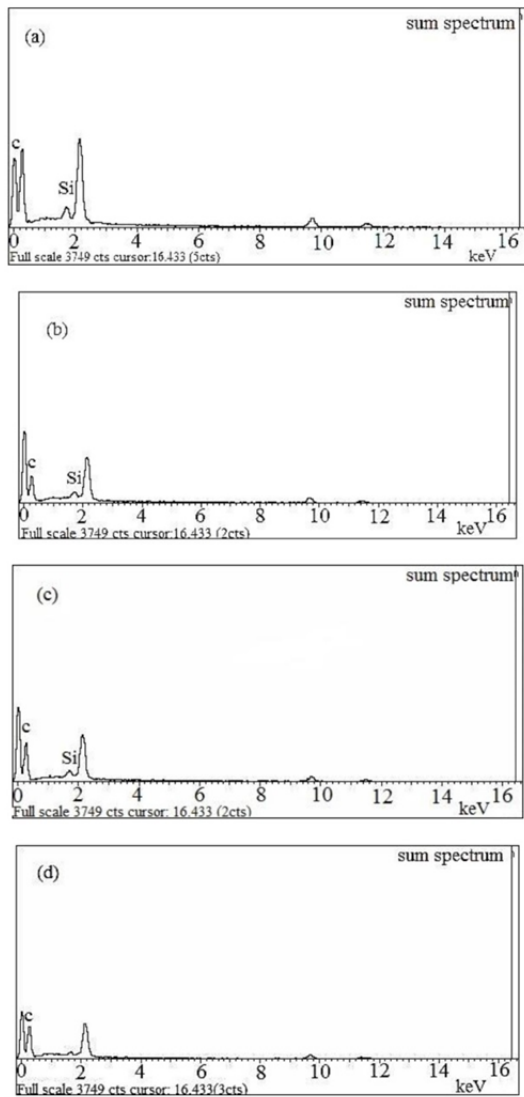


Fig. 10 EDX analysis diagram (a) 1.4% (b) 1% (c) 0.7% (d) pure blend
 شکل 10 نمودارهای مربوط به آنالیز EDX. (a) 1.4% (b) 1% (c) 0.7% (d) نمونه بدون نانو

2-3- 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 موردنیاز 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 ناپیوستگی 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.

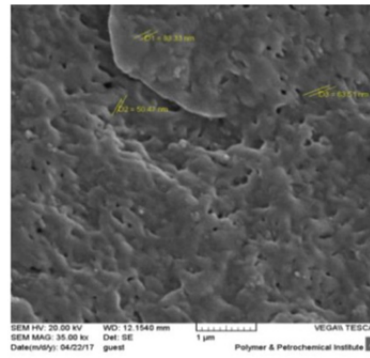


Fig. 7 SEM image for 1.4% reinforced sample with a magnification of 35000x

شکل 7 تصویر SEM نمونه 1.4% با بزرگنمایی 35000x

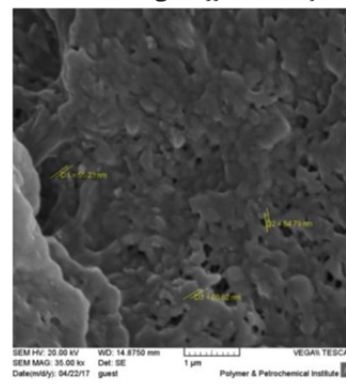


Fig. 8 SEM image for 1% reinforced sample with a magnification of 35000x

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

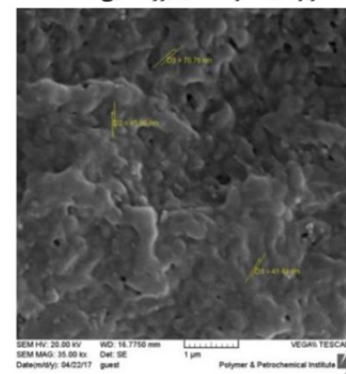


Fig. 9 SEM image for 0.7% reinforced sample with a magnification of 35000x

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

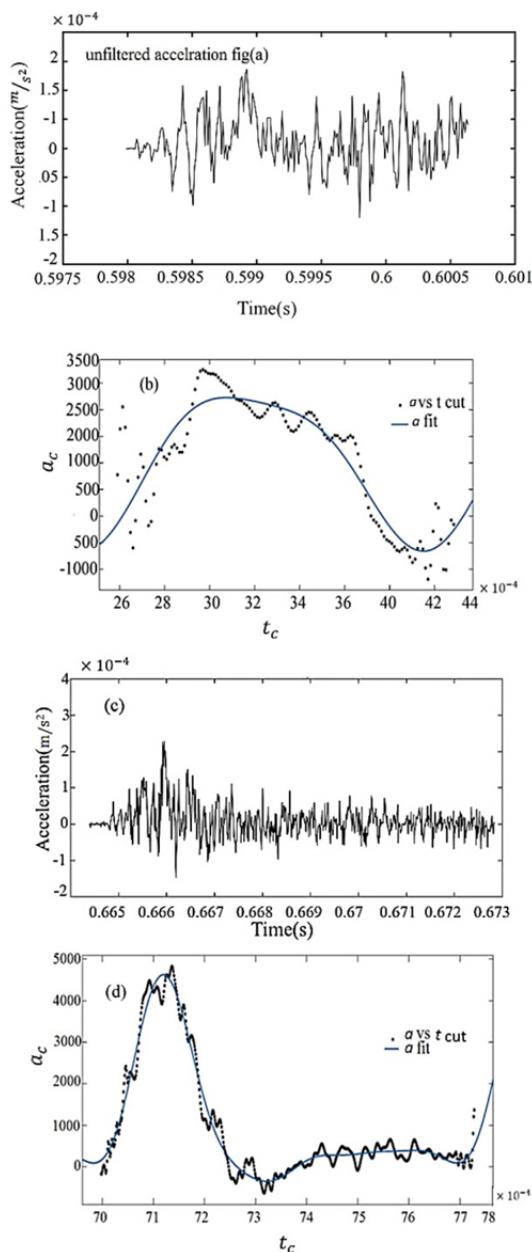


Fig. 12 unfiltered and filtered acceleration for (a) 100 1/s unfiltered (b) 100 1/s filtered (c) 160 1/s unfiltered (d) 160 1/s filtered strain rate in dynamic loading

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 زنده، 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.

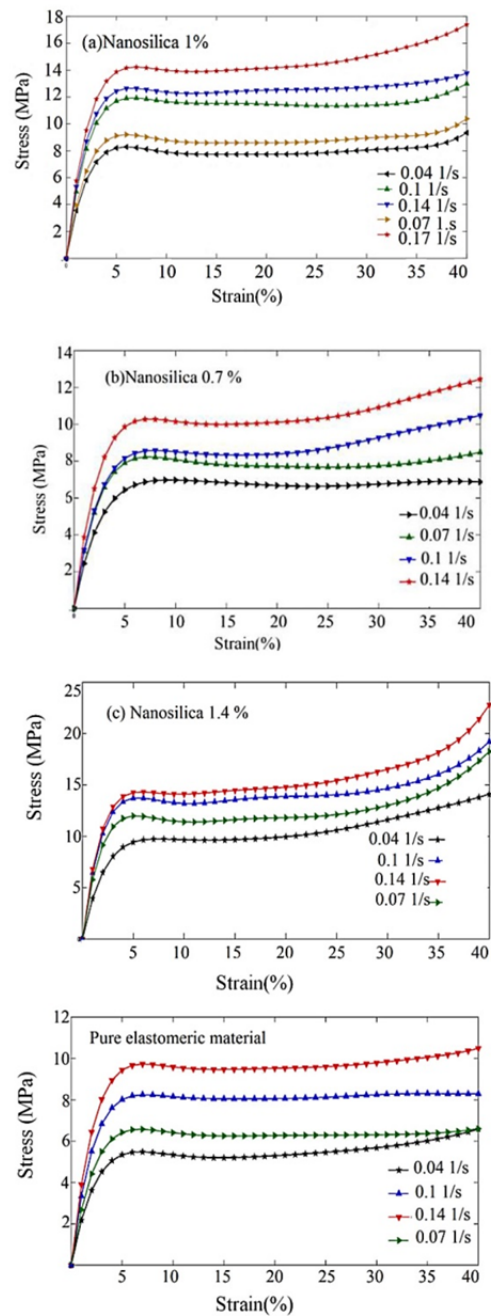


Fig. 11 quasi static loading at different loading (a)1% (b)0.7% (c)1.4 % (d) pure blend

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

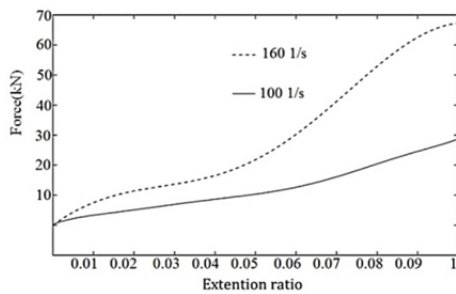


Fig. 14 dynamical loading under tow strain rate for 1% reinforced sample

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

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

4- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار ماده الاستومری (HDPE/POE) تقویت شده با استفاده از نانوذرات سیلیکا تحت نرخ کرنشهای مختلف شبه استاتیکی 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 ضربه ای به بار کششی دو محوره و تک محوره می باشد.

بررسی داده های استخراج شده از آزمون های شبه استاتیکی و دینامیکی نشان می دهد: افزایش مقدار درصد نانوذرات سیلیکا سبب افزایش مقاومت کششی ماده و سطح تنش و نیروها در بارگذاری استاتیکی می شود. با افزایش نرخ بارگذاری سطوح تنش مخصوصا در نرخ بارگذاری شبه استاتیکی بالاتر از 0.07 1/s به شدت افزایش می یابد که نشان دهنده وابستگی رفتار ماده در این نوع بارگذاری به نرخ کرنش اعمال شده می باشد. در بارگذاری های دینامیکی در یک نرخ کرنش مشخص با افزایش مقدار نانوسلیکا در ماده الاستومری پایه مقدار نیرو نیز افزایش می یابد، مقدار افزایش نیرو و سطح تنش در حالت استاتیکی با افزایش مقدار ذرات نانو بیشتر از مقدار افزایش 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 می گیرد. همچنین مکانیزم جدید طراحی شده به خوبی قابلیت اعمال بارهای دینامیکی مد نظر در حالت های مختلف بارگذاری را دارا می باشد، و می توان از آن به عنوان یک مکانیزم کاملا جدید در بارگذاری های 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 می باشد در نتیجه پس از پیدا و فیلتر کردن موج حاصل از ضربه که در بازه کوچکی از محور زمان حالت فیلتر نشده است، طبیعتا محور زمان دو نمودار با یکدیگر متفاوت خواهد بود، "شکل 13" بارگذاری در نرخ کرنش های 160 1/s و 100 1/s را نشان می دهد. در بارگذاری های دینامیکی مانند حالت شبه استاتیکی در یک نرخ کرنش مشخص با افزایش مقدار نانوسلیکا در ماده الاستومری پایه مقدار نیرو نیز افزایش می یابد، 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 زنجیره ها و نانوذرات وجود ندارد، یعنی میزان توزیع نانوذرات بر روی تغییر شکل در این حالت تاثیری کمتری نسبت به حالت شبه استاتیکی دارد چون در حالت استاتیکی زمان کافی برای انتقال نیرو به زنجیره ها و ذرات نانو وجود دارد در نتیجه هر جز از آلیاژ تقویت شده سهم به سزایی در مقابل تغییر شکل ایفا می کنند. همچنین با توجه به "شکل 12" در حالت دینامیکی در نرخ کرنش های کمتر به دلیل افزایش طول ناحیه پیک مربوط به شتاب، جذب انرژی بیشتری نسبت به نرخ کرنش های بالاتر صورت می گیرد. در واقع زمانی که طول پیک نمودار مربوط به شتاب زیاد می شود، پرتابه زمان بیشتری را در تماس با جسم هدف بوده، و نمونه های کششی با افزایش طول در طول این مدت زمان انرژی پرتابه را جذب می کنند.

از سوی دیگر همان گونه که در "شکل 14" دیده می شود در بارگذاری دینامیکی به شدت با افزایش نرخ بارگذاری سطح نیروها افزایش می یابد. در واقع به دلیل این که در بارگذاری دینامیکی سرعت بارگذاری بالا می باشد، زمان کافی برای انتقال نیرو بین زنجیره های مولکولی وجود ندارد و ماده رفتار هایپرالاستیک از خود نشان داده و سطح نیروها به شدت نسبت به بارگذاری استاتیکی افزایش می یابد.

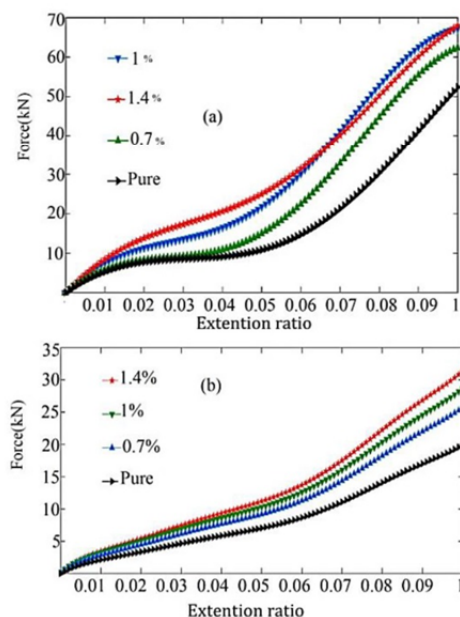


Fig.13 dynamical loading of 4 samples under (a) 160 1/s (b) 100 1/s

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. Koesterse, 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 Mnuufacturing*, 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