

## Experimental Study on the Effect of Pentanediol as a Chain Extender on the Mechanical Properties of MDI Polyurethane Foams

Iman Nateghi-Boroujeni, Gholamhossein Liaghat\*, and Hamed Ahmadi

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box 14115-146, Tehran, Iran

Received: 18 November 2018, accepted: 4 September 2019

### ABSTRACT

**Hypothesis:** Energy-absorbing materials and structures have many uses, especially in protecting human lives. As a result, interest in discovering the applied new materials have increased. Polyurethane foams are used in a variety of energy absorbers. In this study, the mechanical properties of a pentanediol-reinforced methylene diphenyl diisocyanate (MDI) polyurethane foam have been investigated.

**Methods:** Foams were prepared by direct mixing of the reactants. Standard samples have been developed to study the compressive and tensile properties. The specimens were made by adding 5 and 10% pentanediol to a same polyurethane compound. Quasi-static strength and compression tests have been performed and the results have been reported. The microstructure of the foam has been investigated using scanning electron microscopy (SEM).

**Findings:** Comparison of the results showed that, despite the strengthening of the compressive strength of the polyurethane foams by adding some other chain-extenders, the compressive properties of polyurethane foams, including the strength and absorbed energy with the pentanediol as an additive, are not significantly altered, but the elastic modulus and plateau modulus increased significantly. The specific absorbed energy of foam is also increased by adding 5 and 10 percent pentanediol to 11.7% and 12.6%, respectively. The results of tensile tests also showed a high sensitivity to the addition of pentanediol. With addition of 10% pentanediol, strength, fracture strain and foam toughness increased by 37.9%, 57.1% and 137.5%, respectively. The elastic modulus of the tensile samples was also increased by 6.9% in adding 10% pentanediol. Also, the results showed that the substance exhibited smaller cells and a more uniform structure by adding 1,5-pentane diol.

#### Keywords:

polyurethane foam,  
mechanical properties,  
quasi-static,  
pentanediol  
chain-extender

(\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [ghlia530@modares.ac.ir](mailto:ghlia530@modares.ac.ir)

#### Please cite this article using:

Nateghi-Boroujeni I., Liaghat G., adn Ahmadi H., Experimental Study on the Effect of Pentanediol on the Mechanical Properties of MDI Polyurethane Foams, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 317-326, 2019.

# بررسی تجربی اثر زنجیرافزای پنتان دی ال بر خواص مکانیکی اسفنج‌های پلی‌یورتان بر پایه MDI

ایمان ناطقی بروجنی، غلامحسین لیاقت\*، حامد احمدی

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۶

دریافت: ۱۳۹۷/۸/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۱۳

## چکیده

**فرضیه:** مواد و سازه‌های جاذب انرژی در حفاظت از جان انسان‌ها کاربردهای زیادی دارند، از این رو، علاقه‌مندی به کشف مواد جدید کاربردی در این زمینه افزایش یافته است. اسفنج‌های پلی‌یورتان در انواع جاذب‌های انرژی استفاده می‌شوند. در این مطالعه، خواص مکانیکی اسفنج پلی‌یورتان بر پایه متیلن دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات (MDI) تقویت شده با زنجیرافزای پنتان دی‌ال بررسی شده است.

**روش‌ها:** اسفنج‌ها با روش اختلاط مستقیم واکنش‌دهنده‌ها تهیه شده و برای بررسی خواص فشاری و کششی، نمونه‌های استاندارد تهیه شدند. نمونه‌ها با افزودن دو مقدار ۵ و ۱۰٪ پنتان دی‌ال به ترکیب ثابت پلی‌یورتان ساخته شدند. سپس، آزمون‌های فشار و کشش شبه‌ایستا انجام و نتایج گزارش شده است. ریزساختار اسفنج با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) بررسی شد.

**یافته‌ها:** مقایسه نتایج نشان داد، با وجود تقویت استحکام فشاری اسفنج‌های پلی‌یورتان با افزودن برخی از سایر زنجیرافزاها، خواص فشاری اسفنج‌های پلی‌یورتان بررسی شده در پژوهش پیش رو، شامل استحکام و انرژی جذب شده با افزودنی پنتان دی‌ال تغییر محسوسی نکرد. اما مدول کشسانی و مدول ناحیه نیرو ثابت (ناحیه مسطح) آن به شدت افزایش یافت. انرژی ویژه جذب شده اسفنج نیز با افزودن ۵ و ۱۰٪ پنتان دی‌ال به ترتیب ۱۱/۷ و ۱۲/۶٪ افزایش یافت. نتایج آزمون‌های کشش نیز حساسیت شدیدی نسبت به افزودن پنتان دی‌ال نشان داد. به طوری که با افزودن ۱۰٪ پنتان دی‌ال، استحکام، کرنش شکست و چقرمگی اسفنج به ترتیب ۳۷/۹، ۵۷/۱ و ۱۳۷/۵٪ زیاد شد. مدول کشسانی کششی نمونه‌ها نیز با افزودن ۱۰٪ پنتان دی‌ال، ۶/۹٪ افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد، ماده با افزودن ۵،۱-پنتان دی‌ال سلول‌های کوچک‌تر و ساختار یکنواخت‌تری نشان داد.

## واژه‌های کلیدی

اسفنج پلی‌یورتان،  
خواص مکانیکی،  
شبه‌ایستا،  
پنتان دی‌ال،  
زنجیرافزا

## مقدمه

در دنیای مدرن امروزی، انواع اسفنج‌های پلیمری در عایق‌های صوت و گرما، ضربه‌گیرها و صنایع دریایی و هوایی بسیار کاربرد دارند. از مزیت اسفنج‌های پلیمری می‌توان به چگالی کم آن‌ها اشاره کرد. اسفنج‌های پلی‌یورتان از انواع اسفنج‌های پلیمری پرکاربرد هستند که طی واکنش دوجزئی ساخته می‌شوند. این اسفنج‌ها بسته به نوع واکنش‌دهنده‌ها یا تغییر نسبت مقدار واکنش‌دهنده‌ها، کاتالیزگر یا سایر افزودنی‌ها می‌توانند نرم، نیمه‌سخت یا سخت باشند [۱]. اسفنج پلی‌یورتان بر پایه متیلن دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات (MDI) ساختار سلول بسته و رفتار اسفنج سخت را دارد.

اسفنج‌های پلی‌یورتان کاربردهای زیادی در سازه‌های کامپوزیتی دارند. نیک‌نژاد و همکاران [۲] و نیز رضایی و همکاران [۳]، اثر اسفنج‌های پلی‌یورتان را در سازه‌های استوانه‌ای بررسی کردند. تقویت اسفنج می‌تواند اثر زیادی بر نتایج داشته باشد و کاربرد این سازه‌ها را گسترش دهد. بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه درباره آثار افزودن مواد گوناگون از جمله نانوذرات، نانوالیاف و مواد شیمیایی به اسفنج‌های پلی‌یورتان است. Cao و همکاران [۴] نشان دادند، نانوذرات سیلیکا استحکام فشاری اسفنج پلی‌یورتان را بهبود می‌بخشد. Bernal و همکاران [۵] اثر نانوپرکننده‌های کربنی را بر خواص فیزیکی اسفنج‌های پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند، افزودن نانوپرکننده‌های کربنی نه تنها خواص اسفنج پلی‌یورتان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه بر سینتیک اسفنج‌شوندگی و پلیمرشدن نیز اثرگذار است. Prociaka و همکاران [۶] در اسفنج سخت پلی‌یورتان که پلی‌ال آن از مشتقات نفتی بود، سه نوع زیست‌پلی‌ال بر پایه روغن دانه‌های کلزا با ساختارهای شیمیایی مختلف را جایگزین کرده و نتیجه مقایسه و ارزیابی‌ها را گزارش کردند. ساختار شیمیایی زیست‌پلی‌ال‌ها اثر شایان توجهی بر واکنش‌پذیری پلی‌یورتان داشت و با جایگزینی هر یک از آن‌ها، رفتار ماده شکننده‌تر شد. Liu و Wang [۷] ماده تأخیرانداز شعله با نام Za-AMP را سنتز کرده و با هدف بهبود خواص تأخیراندازی شعله و خواص فیزیکی و مکانیکی به اسفنج‌های سخت پلی‌یورتان اضافه کردند. با افزودن ۱۰٪ از آن، استحکام فشاری ماده ۶۷/۹٪ افزایش و نیز رسانندگی گرمایی آن کاهش یافت. Czlonkaa و همکاران [۸] از فراورده جانبی حین تولید نشاسته به اندازه ۰/۱٪ تا ۵٪ وزنی به‌عنوان پرکننده برای تقویت اسفنج‌های سخت پلی‌یورتان استفاده کردند. نتایج نشان داد، با افزودن ۰/۱٪ وزنی از آن به اسفنج، استحکام فشاری تا ۲۳۰ KPa بهبود یافت. همچنین، افزودن مقادیر زیادی افزودنی، اثر منفی بر شکل‌شناسی سلول‌ها داشت و به کاهش خواص مکانیکی و فیزیکی

اسفنج‌های اصلاح‌شده منجر شد. Murata و همکاران [۹] نیز با سنتز پلی‌ال پلی‌استری با استفاده از دی‌اتیل پنتان‌دی‌ال، پلی‌یورتان جدید تهیه کرده و مقاومت آبکافت و خواص مکانیکی آن را بررسی کردند. اسفنج جدید مقاومت آبکافت عالی، بیشترین انعطاف‌پذیری و کمترین سختی را نشان داد. Rashmi و همکاران [۱۰] برای تکمیل و بهبود فرایند اسفنج‌شوندگی در قالب‌های در حال دوران، اسفنج‌های پلی‌یورتان گرم‌انرم با پف‌زای آب را توسعه دادند. آن‌ها از زنجیرافزای زیستی و سنتزی ۳،۱-پروپان‌دی‌ال بدین منظور استفاده کرده و اثر مقادیر مختلف زنجیرافزا، عامل پف‌زا و کاتالیزگر را بر اسفنج‌شوندگی و خواص مکانیکی، فیزیکی و شکل‌شناسی اسفنج بررسی کردند. نتایج نشان داد، چگالی، استحکام فشاری و مدول اسفنج‌ها با افزایش مقدار عامل پف‌زا کاهش و با افزایش زنجیرافزا افزایش یافته است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد، زنجیرافزا اثر شایان توجهی بر اندازه سلول‌ها نداشته است و می‌توان از این زنجیرافزا برای تهیه اسفنج‌های پلی‌یورتان بدون تضعیف خواص ماده استفاده کرد. در مطالعه مشابهی Mariappan و همکاران [۱۱] اثر پلی‌ال، عامل پف‌زا و زنجیرافزای ۴،۱-پنتان‌دی‌ال را بر خواص مکانیکی اسفنج سخت پلی‌یورتان بررسی کردند. افزودن زنجیرافزا خواص مکانیکی را بهبود بخشید، اما در مقادیر زیاد اثر معکوس داشت. در مطالعه دیگری درباره فرایند بازیافت PET که در آن پلیمر تجزیه می‌شود و وزن مولکولی کاهش می‌یابد، آثار این تجزیه با افزودن زنجیرافزا به افزایش ۶۷٪ وزن مولکولی و ۵٪ تا ۳۰۰٪ خواص مکانیکی به‌ویژه کرنش شکست منجر شد [۱۲]. Kairyte و همکاران [۱۳] اثر محصولات زیستی مثل نشاسته ذرت و روغن کلزا را به‌عنوان زنجیرافزا، بر خواص مکانیکی و فیزیکی شامل چگالی، رسانندگی گرمایی، اندازه سلول‌ها و استحکام فشاری را در راستا و عمود بر راستای اسفنج‌شوندگی اسفنج پلی‌یورتان بررسی کردند. افزودن نشاسته ذرت و روغن کلزا به‌ترتیب به کاهش و افزایش خواص مکانیکی منجر شد. پنتان‌دی‌ال ترکیب آلی با فرمول شیمیایی  $C_5H_{12}O_2$  است که در واکنش پلی‌یورتان‌ها به‌عنوان زنجیرافزا نقش ایفا می‌کند و موجب بلندترشدن زنجیرهای پلیمری می‌شود. از این رو ممکن است، به تغییراتی در خواص مکانیکی اسفنج مطالعه‌شده در پژوهش حاضر منجر شود. بنابراین با توجه به نیازمندی این زمینه به بررسی علمی، هدف پژوهش حاضر بررسی اثر افزودن درصد اندکی پنتان‌دی‌ال بر خواص مکانیکی اسفنج سخت پلی‌یورتان بر پایه MDI بود و رفتار و خواص این اسفنج‌ها در فشار و کشش بررسی شد. در نهایت، مطالعه‌ای درباره افزودن زنجیرافزای ۵،۱-پنتان‌دی‌ال به اسفنج سخت پلی‌یورتان یافت نشد و اثر این افزودنی بر خواص مکانیکی

اسفنج‌های سخت پلی‌یورتان هنوز جای بررسی دارد.

## تجربی

### مواد

برای تولید اسفنج سخت پلی‌یورتان بر پایه MDI، از دو جزء ۴،۴-متیل دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات (MDI PM-200) و پلی‌ال پلی‌استری دارای پنتان به‌عنوان عامل پفزا استفاده شد که هر دو از تولیدات شرکت ایتالیایی IPC بودند. پنتان‌دی‌ال به‌عنوان افزودنی زنجیرافزا با وزن مولی  $104/15 \text{ g/mol}$  از شرکت Merck تهیه شد.

### دستگاه‌ها و روش‌ها

#### ساخت اسفنج پلی‌یورتان

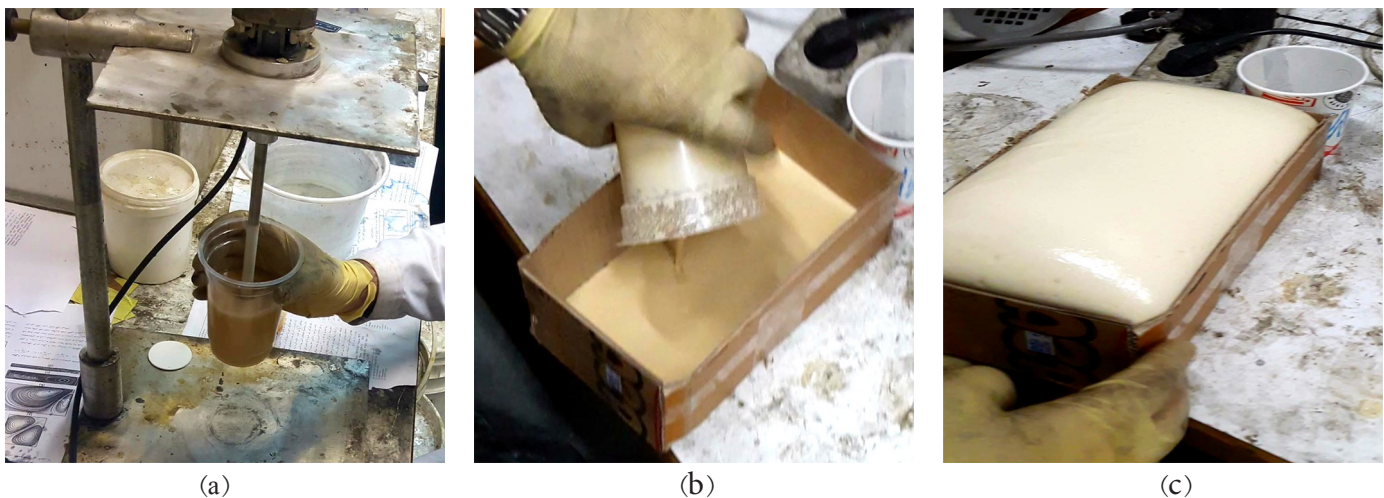
با توجه به وابستگی شدید خواص اسفنج پلی‌یورتان به شرایط آزمایشگاهی ساخت و نسبت ترکیب مقدار پلی‌ال و پلی‌ایزوسیانات، ترکیبات مختلفی از این مواد در دماهای مختلف با یکدیگر مخلوط و اسفنج‌ها تولید شدند. همچنین، آزمون‌های اولیه‌ای روی آن‌ها انجام شد. اسفنج پلی‌یورتان با نسبت ۷۰٪ وزنی ایزوسیانات و ۳۰٪ وزنی پلی‌ال برای تهیه نمونه‌ای با استحکام و جذب انرژی بیشتر در پژوهش پیش رو انتخاب شد. سپس، برای مقایسه اثر پنتان‌دی‌ال بر خواص مکانیکی اسفنج پلی‌یورتان، اسفنج‌های ترکیبی پلی‌یورتان-پنتان‌دی‌ال با دو مقدار افزودنی به مقدار ۵ و ۱۰٪ نیز تهیه شدند. اسفنج‌های ترکیبی با روش اختلاط مستقیم واکنش‌دهنده‌ها مطابق

جدول ۱ تهیه و نام‌گذاری شدند. نمونه خالص اولیه با توجه به نسبت وزنی واکنش‌دهنده‌ها ۷۰۳۰ نام‌گذاری شد و برای نمونه‌های دارای افزودنی پنتان‌دی‌ال، مقدار درصد وزنی افزودنی به انتهای نام نمونه اضافه شد (۷۰۳۰۰۵ و ۷۰۳۰۱۰).

نحوه تهیه اسفنج‌های پلی‌یورتان یکسان بود. شرایط دمایی و زمانی با آزمون و خطا تنظیم شد که در ادامه توضیح داده شده است. ابتدا، واکنش‌دهنده‌ها به مدت ۱ h درون کوره ساخت شرکت Memmert در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  پیش‌گرم شدند تا شرایط دمایی همه نمونه‌ها مشابه باشد. سپس، پنتان‌دی‌ال با پلی‌ال در همزن برشی ساخت شرکت Wisd به مدت ۱۰ min و با سرعت  $2400 \text{ rpm}$  مخلوط شد. ترکیب حاصل که دمای آن افزایش یافت، به مدت ۳۰ min در دمای  $30^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد تا به دمای اولیه برگردد. سپس، محلول دوباره ۱ min در همزن برشی با سرعت  $2400 \text{ rpm}$  همزده شد و پس از آن جزء ایزوسیانات اضافه شد. محتویات ۱۰ s در همزن با سرعت  $1200 \text{ rpm}$  مخلوط شده و در نهایت درون قالب ریخته شد. پس از ۲۰ s فرایند اسفنج‌شوندگی آغاز و حدود ۴۰ s تکمیل شد. مراحل ساخت اسفنج در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از تکمیل واکنش، نمونه در دمای  $20^{\circ}\text{C}$  در محیط آزمایشگاه سه روز باقی می‌ماند تا واکنش آن کامل و رفتار ماده تثبیت شود.

#### تهیه نمونه‌ها

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ابعاد نمونه‌های آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM D 1621 [۱۴]،  $30 \times 50 \times 50 \text{ mm}$  و ابعاد نمونه‌های دمبلی شکل آزمون کشش مطابق استاندارد ISO 1926 [۱۵] تعیین شد.



شکل ۱- مراحل ساخت اسفنج.

Fig. 1. Foam production steps.



آزمون‌ها با پنج نمونه تکرار همراه با انحراف معیار گزارش شد. همچنین، ساختار سلولی اسفنج‌ها با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) ساخت شرکت X-pro تصویربرداری شد. بدین منظور، مقطع برش عمود بر راستای اسفنج‌شوندگی اسفنج‌ها برای رسانایی کافی با لایه ۳۰ nm طلا اندود شد و زیر میکروسکوپ الکترونی ۱۲/۵ kV قرار گرفت.

آزمون‌های فشار با دستگاه Universal ساخت شرکت Santam در سرعت بارگذاری ۳ mm/min انجام شد که تقریباً شبه‌ایستا است. بارگذاری جابه‌جایی محور است و تمام نمونه‌ها تقریباً تا کرنش ۶۰٪ بارگذاری شدند که به‌خوبی فراتر از کرنش چگالش است. از نمودار نیرو-جابه‌جایی به‌دست‌آمده با تقسیم جابه‌جایی بر طول اولیه نمونه و نیرو بر سطح مقطع عمود بر راستای بارگذاری، نمودار تنش-کرنش حاصل شد. مراحل زمانی حین آزمون فشار در شکل ۲ نشان داده شده است.

آزمون‌های کشش نیز با دستگاه Universal ساخت شرکت Santam در سرعت بارگذاری ۳ mm/min انجام شد که تقریباً شبه‌ایستا است.

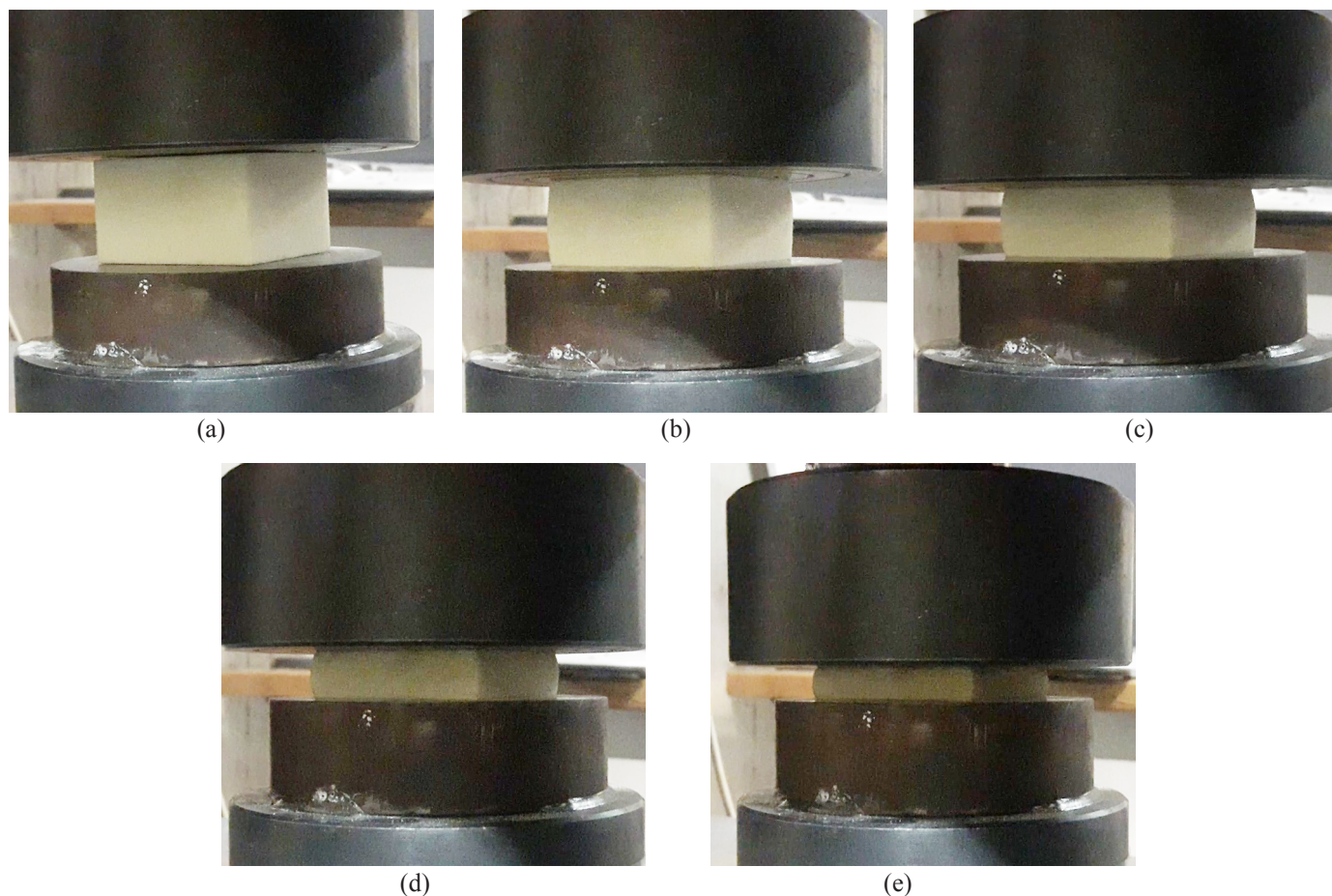
جدول ۱- نام، ترکیب و چگالی نمونه‌ها.

Table 1. Name, composition and density of specimens.

Specimen name	Isocyanate (wt %)	Polyol (wt %)	PD (wt %)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
7030	70	30	0	127±5%
703005	66.65	28.55	4.8	113±3%
703010	63.6	27.3	9.1	120±3%

### شناسایی

برای تعیین خواص مکانیکی اسفنج‌ها شامل، مدول کشسانی، استحکام فشاری و کششی، کرنش شکست، جذب انرژی و جذب انرژی ویژه، باید آزمون‌های کشش و فشار زیادی انجام شود. چگالی اسفنج‌ها نیز طبق استاندارد ASTM D1622 [۱۶] با اندازه‌گیری ابعاد و وزن نمونه‌ها با اندازه ۳۰×۵۰×۵۰ mm محاسبه شد. میانگین نتایج

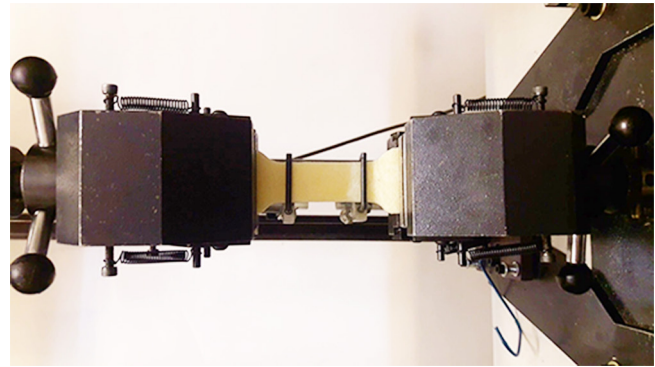


شکل ۲- مراحل آزمون فشار

Fig. 2. Compression test steps.

را محدود کند. بنابراین، فقط مقدار اندکی از آن‌ها برای بهبود خواص مکانیکی اسفنج‌ها کافی است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش مقدار افزودنی از ۵٪ به ۱۰٪، چگالی اسفنج افزایش یافته است. مطابق جدول ۱ افزودن ۵٪ از آن باعث افزایش اسفنج‌شوندگی و کاهش چگالی شد. از طرفی موجب بلندتر شدن زنجیرهای پلیمر شد. بنابراین با افزایش مقدار آن به ۱۰٪، اسفنج‌شوندگی کندتر شده و چگالی اسفنج افزایش یافت.

نتایج آزمون‌های فشار سه نمونه ۷۰۳۰۰۵، ۷۰۳۰۱۰ و ۷۰۳۰۱۰ با یکدیگر در شکل ۵ مقایسه شدند. خواص مکانیکی فشاری اسفنج از نمودارها استخراج و میانگین آن‌ها در جدول ۲ درج شده است. با توجه به نتایج، با افزودن پنتان‌دی‌ال، استحکام فروریزش شبه‌ایستای نمونه‌ها تقریباً تغییری نکرده است، درحالی که افزودنی‌هایی مانند نانوذرات سیلیکا [۴]، نانوپرکننده‌های کربنی [۵] و [۷] Za-AMP باعث افزایش استحکام فشاری اسفنج پلی‌یورتان می‌شوند. زنجیرافزای ۳،۱-پروپان‌دی‌ال [۱۰] و ۴،۱-بوتان‌دی‌ال [۱۱] نیز بر استحکام فشاری اثر مثبت داشته‌اند. مدول کشسانی فشاری نمونه‌های ۷۰۳۰۰۵ و ۷۰۳۰۱۰ به ترتیب ۵۳/۸ و ۷۹/۹٪ افزایش یافت. مدول ناحیه نیرو ثابت (ناحیه مسطح) نیز در نمونه‌های مزبور به ترتیب ۱۰۰ و ۱۸۴٪ زیادت‌تر شد. دیده می‌شود، افزایش طول زنجیرهای پلیمری، به افزایش نیروی اصطکاک میان زنجیرهای درهم‌تنیده منجر شده و موجب افزایش سفتی ماده زیر بار فشاری شده است. کرنش را که در آن چگالش آغاز می‌شود و تنش ناحیه نیرو ثابت از تنش فروریزش فراتر می‌رود، کرنش چگالش می‌نامند. کرنش چگالش با افزودن پنتان‌دی‌ال در نمونه‌های ۷۰۳۰۰۵ و ۷۰۳۰۱۰ به ترتیب ۴/۵ و ۹٪ کاهش یافت. در نهایت، با در نظر گرفتن تغییرات استحکام، مدول کشسانی و کرنش چگالش می‌توان نتیجه گرفت، جزء سوم سبب افزایش جزئی ظرفیت جذب انرژی ماده (سطح زیر نمودار نیرو-



(a)



(b)

شکل ۳- (a) آزمون کشش و (b) نمونه کشش.

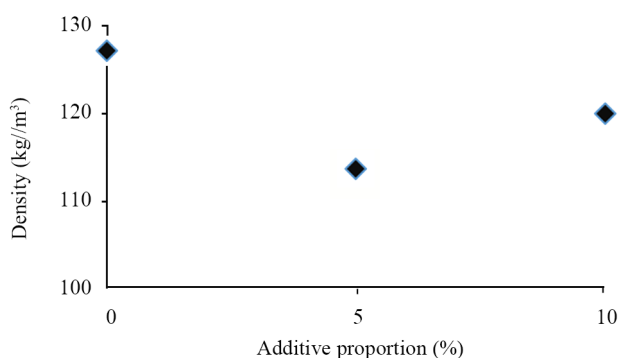
Fig. 3. (a) Tension test and (b) tension specimen.

فاصله‌گیره‌های حسگر جابه‌جایی‌سنج مطابق شکل ۳، ۵۰ mm بود. در دو انتهای نمونه‌های آزمون کشش، برای پیشگیری از لغزش نمونه، ورق سمباده چسبانده شد.

## نتایج و بحث

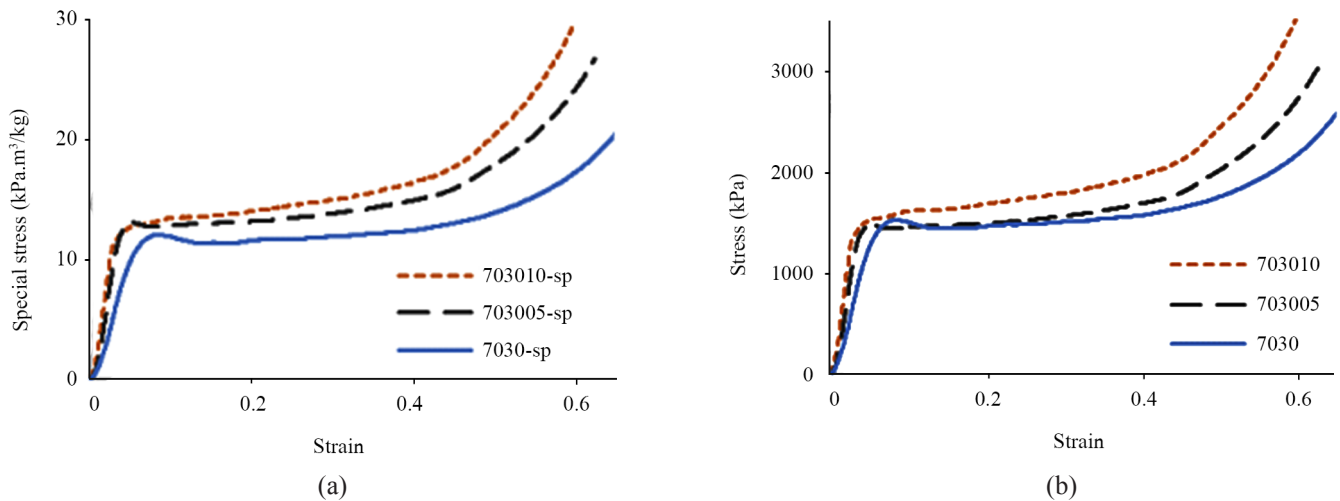
### نتایج آزمون فشار

پنتان‌دی‌ال، پلی‌الی است که در اثر واکنش با ایزوسیانات، پلی‌یورتان تولید می‌کند. اضافه کردن درصد‌های زیاد افزودنی‌ها ممکن است، به‌طور شایان توجهی چگالی اسفنج را متأثر سازد و کاربرد آن‌ها



شکل ۴- تغییرات چگالی اسفنج با افزودن پنتان‌دی‌ال.

Fig. 4. Foam density changes by adding pentanediol.



شکل ۵- نتایج آزمون‌های فشار: (a) تنش- کرنش ویژه و (b) تنش- کرنش.

Fig. 5. Compression tests results: (a) special stress-strain and (b) stress-strain.

در نمونه ۷۰۳۰۰۵، ۲۵/۵٪ و در نمونه ۷۰۳۰۱۰، ۳۷/۹٪ افزایش یافته است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، با توجه به اینکه پنتان‌دی‌ال سبب افزایش طول زنجیرهای پلیمری می‌شود، ضمن تقویت بافت ماده پلیمری، نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک و لغزش آن‌ها نیز بیشتر شده و این نتایج توجیه می‌شوند. همچنین مدول کشسانی کششی نمونه‌های ۷۰۳۰۰۵ و ۷۰۳۰۱۰ به ترتیب ۵/۶٪ و ۶/۹٪ افزایش یافت. با افزودن پنتان‌دی‌ال، تغییرات مدول کشسانی در کشش نسبت به فشار بسیار کمتر بوده است، دلیل آن می‌تواند مربوط به رفتار گرانبه‌تر متفاوت ماده در کشش و فشار باشد. کرنش شکست نیز با افزودن پنتان‌دی‌ال در نمونه‌های ۷۰۳۰۰۵ و ۷۰۳۰۱۰ به ترتیب ۳/۳۹٪ و ۱/۵۷٪ افزایش یافت. در پژوهش‌های پیشین نیز افزودن زنجیرافزای ۴،۱- بوتان دی‌ال سبب افزایش کرنش شکست اسفنج پلی‌یورتان شد [۱۱]، در حالی که جایگزینی پلی‌ال‌های نفتی با پلی‌ال‌های بر پایه روغن کلزا موجب شکننده‌تر شدن اسفنج پلی‌یورتان شد [۶]. در کل پنتان‌دی‌ال سبب افزایش سطح زیر نمودار و چقرمگی ماده شده است. با وجود اینکه ۳،۱- پروپان‌دی‌ال اثری بر

جابه‌جایی شده است. با بی‌بعد کردن نتایج نسبت به چگالی ماده خواص ویژه به دست می‌آید که در شکل ۵ (a) نشان داده شده است. انرژی ویژه جذب‌شده نیز در جدول ۲ آمده که با مقدارهای ۵٪ و ۱۰٪ افزودنی، به ترتیب ۱۱/۷٪ و ۱۲/۶٪ بیشتر شده است. میانگین انحراف معیار نتایج آزمون‌های فشار ۳/۳۸٪ بود. خواص مکانیکی اسفنج‌ها به تخلخل کلی، اندازه حفره‌ها و تغییرات اندازه حفره‌ها و نیز خواص خود ماده وابسته است.

### نتایج آزمون کشش

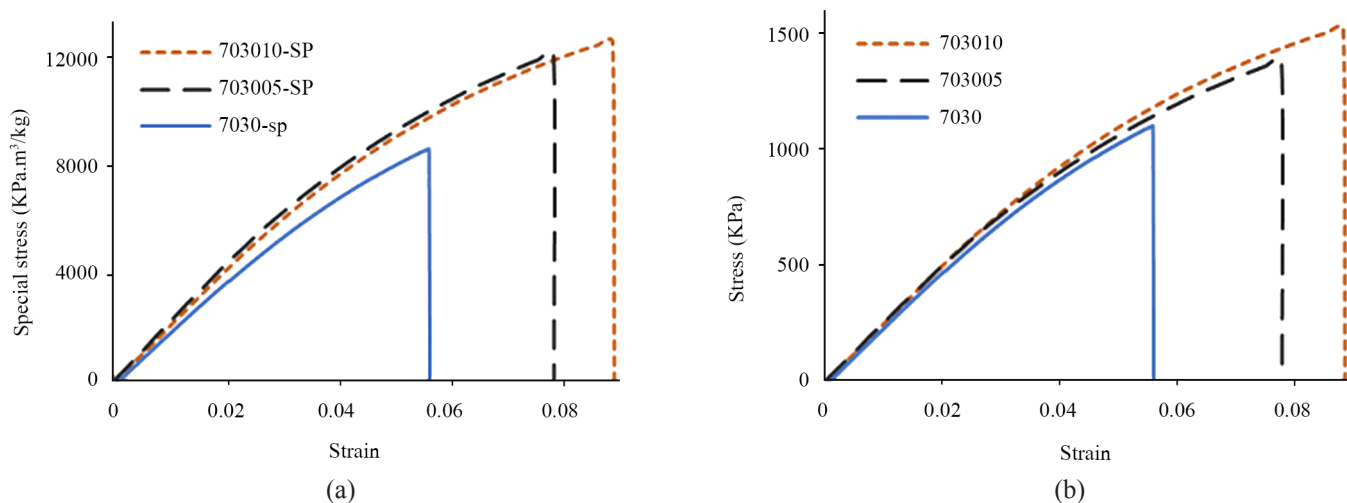
آزمون‌های کشش اسفنج‌های ترکیبی پلی‌یورتان-پنتان‌دی‌ال با دو مقدار مختلف ۵٪ و ۱۰٪ وزنی افزودنی انجام شد. هر آزمون پنج مرتبه تکرار و میانگین نتایج گزارش شد. انحراف معیار نتایج کمتر از ۸٪ بود. نتایج آزمون‌های کشش در شکل ۶ میان سه نمونه ۷۰۳۰، ۷۰۳۰۰۵ و ۷۰۳۰۱۰ مقایسه شد. خواص مکانیکی کششی اسفنج در جدول ۳ نیز درج شدند. با توجه به نتایج، با افزودن پنتان‌دی‌ال به نمونه ۷۰۳۰، استحکام نهایی شکست شبه‌ایستای اسفنج پلی‌یورتان

جدول ۲- نتایج آزمون‌های فشار.

Table 2. Compression tests results.

Specimen name	Strength (kPa)	Elastic moduli (MPa)	Plateau moduli (MPa)	Densification strain	Absorbed energy (J)	Specific absorbed energy (J.m <sup>3</sup> /kg)
7030	1525±6%	34.4±5%	0.38±3%	0.44±5%	44.4±4%	0.349±3%
703005	1475±4%	52.9±4%	0.76±1%	0.42±2%	44.6±3%	0.390±2%
703010	1535±5%	61.9±4%	1.08±1%	0.40±3%	47.2±3%	0.393±3%





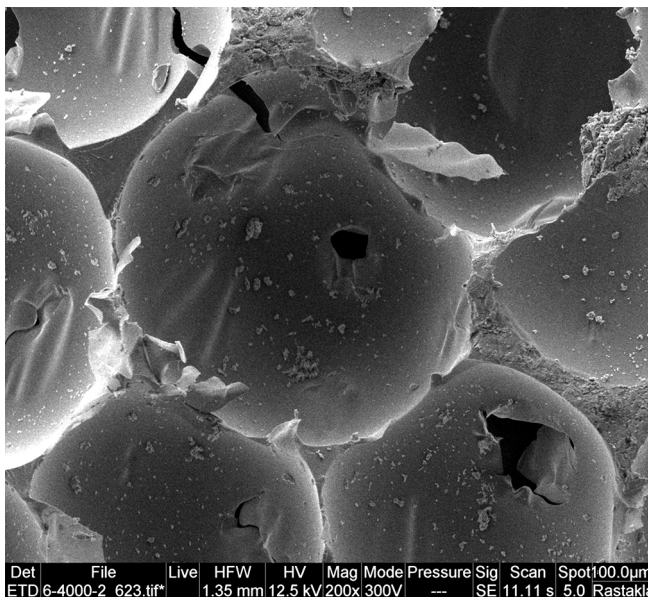
شکل ۶- نتایج آزمون های کشش: (a) تنش- کرنش ویژه و (b) تنش- کرنش.

Fig. 6. Tensile tests results: (a) special stress-strain and (b) stress-strain.

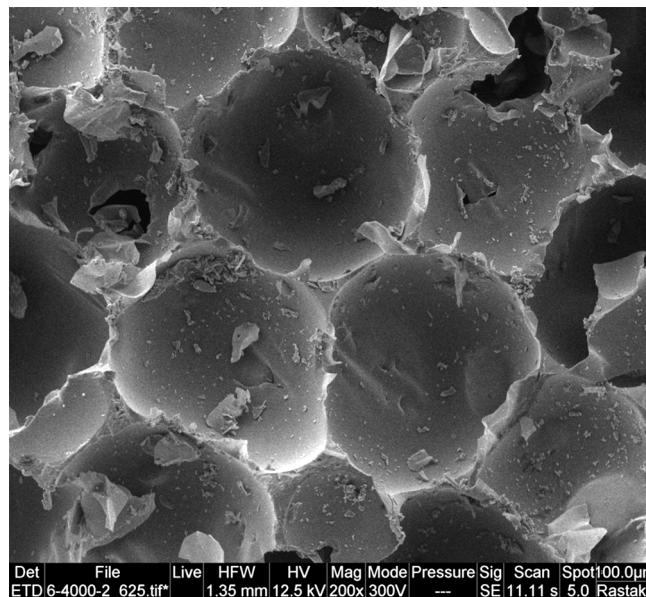
جدول ۳- نتایج آزمون های کشش.

Table 3. Tensile tests results.

Specimen name	Elastic moduli (MPa)	Strength (kPa)	Failure strain	Toughness (J)
7030	23.2±12%	1102±9%	0.056±9%	0.4±8%
703005	24.5±10%	1382±7%	0.078±6%	0.7±7%
703010	24.8±10%	1520±7%	0.088±8%	0.95±8%



(a)



(b)

شکل ۷- تصاویر SEM اسفنج های پلی یورتان: (a) ۷۰۳۰ و (b) ۷۰۳۰۰۵.

Fig. 6. SEM images of PU foams: (a) 7030 and (b) 703005.



اسفنج‌های پلی‌یورتان به شرایط دمایی ساخت آن‌ها وابسته است. با افزودن مقدار اندکی پنتان‌دی‌ال به اسفنج سخت پلی‌یورتان، تا ۱۰٪ وزنی، ضمن تقویت ماتریس پلیمری و اثر بر میکروساختار اسفنج، خواص مکانیکی اسفنج بهبود یافته است، به طوری که در اسفنج‌های سخت پلی‌یورتان با افزودن ۵ و ۱۰٪ پنتان‌دی‌ال به ترتیب، ۵۳/۸ و ۷۹/۹٪ مدول کشسانی فشاری و ۱۰۰ و ۱۸۴٪ مدول ناحیه نیرو ثابت افزایش یافت. در حالی که استحکام فشاری تغییر محسوسی نکرد و کرنش چگالش اسفنج به ترتیب ۴/۵ و ۹٪ کاهش یافت. با در نظر گرفتن تغییرات خواص مکانیکی فشاری ماده در نهایت با افزودن ۵ و ۱۰٪ پنتان‌دی‌ال به اسفنج سخت پلی‌یورتان به ترتیب، ۰/۴۵ و ۶/۳٪ انرژی جذب‌شده و ۱۱/۷ و ۱۲/۶٪ انرژی ویژه جذب‌شده در فشار افزایش یافت. همچنین با افزودن ۵ و ۱۰٪ پنتان‌دی‌ال به اسفنج سخت پلی‌یورتان خواص مکانیکی ماده در کشش نیز به طور شایان توجهی بهبود یافت، به طوری که کرنش شکست به ترتیب ۳۹/۳ و ۵۷/۱، ۲۵/۵ و ۳۷/۹٪ استحکام کششی و ۵/۶ و ۶/۹٪ مدول کشسانی کششی ماده افزایش یافت. در نهایت، با در نظر گرفتن تغییرات خواص مکانیکی کششی ماده با افزودن ۵ و ۱۰٪ پنتان‌دی‌ال به اسفنج سخت پلی‌یورتان چقرمگی ماده نیز به ترتیب ۷۵ و ۱۳۷/۵٪ افزایش یافت.

اندازه سلول‌های اسفنج پلی‌یورتان نداشت [۱۰]، همان‌طور که در تصاویر SEM شکل ۷ مشخص است، با افزودن ۵،۱-پنتان‌دی‌ال، سلول‌ها کوچک‌تر و ساختار یکنواخت‌تر می‌شود و تمرکز تنش‌های کوچک‌تری در ماده پدید می‌آید که به افزایش ۷۵ و ۱۳۷/۵٪ انرژی شکست یا چقرمگی در نمونه‌های ۷۰۳۰۰۵ و ۷۰۳۰۱۰ منجر می‌شود. شکل ۶ نمودار تنش-کرنش اسفنج‌ها را نشان می‌دهد. همه نمودارها در کرنش‌های کوچک خطی هستند و در کرنش‌های بیشتر کمی غیرخطی می‌شوند. این غیرخطی شدن ممکن است، به دلیل رفتار گرانوکشسان ماده پلیمر باشد که غالب شده است. انحراف معیار تقریباً بزرگی در نتایج کششی دیده شد که به دلیل ساختار متخلخل و میکرو ساختار نایکنواخت اسفنج است که اثر زیادی بر اندازه استحکام مکانیکی، به ویژه در کشش دارد [۱۷]. با مقایسه نتایج مطالعات پیشین مشهود است، زنجیرافزای ۵،۱-پنتان‌دی‌ال در فشار تغییری محسوسی ایجاد نکرده است، اما در کشش نسبت به سایر افزودنی‌ها بسیار کارآمدتر بوده و اسفنج پلی‌یورتان را تقویت کرده است.

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمون‌های تجربی مشهود است، خواص مکانیکی

## مراجع

- Chian K. and Gan L., Development of Rigid Polyurethane Foam from Palm Oil, *J. Appl. Polym. Sci.*, **68**, 509-515, 1998.
- Niknezhad A., Elahi S.A., and Liaghat G.H., Experimental Investigation on the Lateral Compression in the Foam-Filled Circular Tubes, *Mater. Des.*, **36**, 24-34, 2012.
- Rezaei B., Niknezhad A., Assaee H., and Liaghat G.H., Axial Splitting of Empty and Foam-Filled Circular Composite Tubes- An Experimental Study, *Arch. Civil Mech. Eng.*, **15**, 650-662, 2015.
- Cao X., Lee L. J., Widya T., and Macosko C., Polyurethane/Clay Nanocomposites Foams: Processing, Structure and Properties, *Polymer*, **46**, 775-783, 2005.
- Bernal M.M., Molenberg I., Estravis S., Rodriguez-Perez M.A., Huynen I., Lopez-Manchado M.A., and Verdejo R., Comparing the Effect of Carbon-Based Nanofillers on the Physical Properties of Flexible Polyurethane Foams, *J. Mater. Sci.*, **47**, 5673-5679, 2012.
- Prociaka A., Kurańska M., Cabulisb U., Ryszkowskac J., Leszczyńskac M., Urama K., and Kirpluksb M., Effect of Bio-Polyols with Different Chemical Structures on Foaming of Polyurethane Systems and Foam Properties, *Ind. Crops Prod.*, **120**, 262-270, 2018.
- Liu L. and Wang Z., High Performance Nano-Zinc Amino-Tris-(methylenephosphonate) in Rigid Polyurethane Foam with Improved Mechanical Strength, Thermal Stability and Flame Retardancy, *Polym. Degrad. Stab.*, **154**, 62-72, 2018.
- Czlonkaa S., Bertinob M.F., and Strzeleca K., Rigid Polyurethane Foams Reinforced with Industrial Potato Protein, *Polym. Test.*, **68**, 135-145, 2018.
- Murata D., Nakajima T., Tsuzaki N., Yasuda M., and Kato T., Synthesis and Hydrolysis Resistance of Polyurethane Derived from 2,4-Diethyl-1,5-Pentandiol, *Polym. Degrad. Stab.*, **61**, 527-534, 1998.
- Rashmi B.J., Rusu D., Prashantha K., Lacrampe M.F., and

- Krawczak P., Development of Water-Blown Bio-Based Thermoplastic Polyurethane Foams Using Bio-Derived Chain Extender, *J. Appl. Polym. Sci.*, **128**, 292-303, 2012.
11. Mariappan T., Khastgir D., Singha N., Manjunath B.S., and Naik Y.P., Mechanical, Morphological and Thermal Properties of Rigid Polyurethane Foam: Effect of Chain Extender, Polyol and Blowing Agent, *Cell. Polym.*, **28**, 145-158, 2009.
12. Torres N., Robin J.J., and Boutevin B., Chemical Modification of Virgin and Recycled Poly(ethylene terephthalate) by Adding of Chain Extenders During Processing, *J. Appl. Polym. Sci.*, **79**, 1816-1824, 2001.
13. Kairyte A., Vaitkus S., and Balciunas G., The Impact of Chain Extender on the Properties of Polyurethane Foam Based on Rapeseed Oil Polyol Obtained Via Chemo-Enzymatic Route, *Eng. Struct. Technol.*, **8**, 101-107, 2016.
14. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics, Annual Book of ASTM Standard, ASTM D1621, 2010.
15. International Standard Test Method for Rigid Cellular Plastics- Determination of Tensile Properties, ISO 1926, 4 th ed., 2009.
16. Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics, Annual Book of ASTM Standard, ASTM D1622, 2013.
17. Meyers M.A., Mishra A., and Benson D.J., Mechanical Properties of Nanocrystalline Materials, *Prog. Mater. Sci.*, **51**, 427-556, 2006.