

Effect of Cell Morphology on Energy Absorption of Nitrile Rubber Foam

Javad Toulabi, Mohammad Khabiri*, Mohammad Reza Pourhossainy,
Mohamoud Razavizadeh, and Milad Saadat Tagharoodi

Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology,
P.O.Box 15875-1774, Iran

Received: 5 July 2020, accepted: 18 January 2021

ABSTRACT

Hypothesis: High energy absorption capacity of rubber foam, during the large compression deformations of cell structure, is an important variable that is considered by engineers as a design criterion. In this respect, the energy absorption behavior of acrylonitrile butadiene rubber (NBR) foam with different densities was studied by efficiency and acutest parameters.

Methods: The closed cell NBR foams with densities of 0.51, 0.63, 0.72 and 0.79 g/cm³ were prepared by changing the amount of compound in the equal volume of the mold. The cell morphology and compressive properties of the foams were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and compression tests, respectively.

Findings: The cell morphology analysis has indicated that by decreasing the foam density, the average cell diameter becomes larger, the number of cells per unit volume decreases and the cell size distribution becomes heterogeneous. In the compression test, by decreasing density from 0.79 to 0.51 g/cm³, the plateau stress decreases from 750 to 246 kPa and the corresponding stress with the maximum efficiency decreases from 1.13 to 0.27 MPa. In the low stress range, 0.3 MPa, by decreasing density from 0.79 to 0.51 g/cm³, the energy absorption of foam changes from 0.39 to 0.009 MJ/m³. As a result, in the low stress range, lower density foams show more energy absorption. While in the high stress range, higher density foams absorb more energy. For example, in the 1.3 MPa stress, the energy absorption of foams with the density 0.51 g/cm³ and 0.79 g/cm³ is about 0.88 MJ/m³ and 0.1 MJ/m³, respectively. Therefore, the energy absorption capacity of the foam depends on the density and stress range, which determines the maximum allowable stress of the foam based on its density.

Keywords:

rubber foam,
nitrile rubber,
energy absorption,
efficiency parameter,
ideality parameter

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mkhabiry283@gmail.com

Please cite this article using:

Toulabi J., Khabiri M., Pourhossainy M.R., Razavizadeh M., and Saadat Tagharoodi M., Effect of Cell Morphology on Energy Absorption of Nitrile Rubber Foam, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **33**, 497-507, 2021.

اثر شکل‌شناسی سلول بر جذب انرژی اسفنج لاستیک نیتریل

جواد طولابی، محمد خبیری*، محمد رضا پورحسینی، محمود رضوی‌زاده، میلاد سعادت تفرودی

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

چکیده

فرضیه: ظرفیت جذب انرژی زیاد اسفنج لاستیکی متغیر مهمی است که به دلیل تغییر شکل‌های فشاری بزرگ ساختار سلول، به‌عنوان ملاک طراحی مورد توجه طراحان قرار می‌گیرد. در این پژوهش، رفتار جذب انرژی اسفنج لاستیک آکریلونیتریل بوتادی‌ان (NBR) با چگالی‌های متفاوت بر اساس متغیرهای کارایی و آرمانی مطالعه شده است.

روش‌ها: اسفنج‌های سلول‌بسته NBR با چگالی‌های ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۷۲ و ۰/۷۹ g/cm³ و تغییر مقدار آمیزه در حجم ثابت قالب تهیه شدند. شکل‌شناسی و خواص فشاری اسفنج‌ها به ترتیب با میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) و آزمون فشاری بررسی شدند.

یافته‌ها: بررسی شکل‌شناسی سلول نشان داد، با کاهش چگالی اسفنج، قطر متوسط سلول بزرگ‌تر، تعداد سلول‌ها در واحد حجم کمتر و توزیع اندازه سلول ناهمگن می‌شود. در آزمون فشاری با کاهش چگالی از ۰/۷۹ g/cm³ به ۰/۵۱ g/cm³ تنش مسطح از ۷۵۰ kPa به ۲۴۶ kPa و تنش متناظر با بیشینه کارایی از ۱/۱۳ MPa به ۰/۲۷ MPa کاهش می‌یابد. در محدوده تنش‌های کم ۰/۳ MPa، جذب انرژی اسفنج با کاهش چگالی از ۰/۷۹ g/cm³ به ۰/۵۱ g/cm³ به ترتیب ۰/۰۳ MJ/m³ و ۰/۰۹ MJ/m³ تغییر می‌کند. در نتیجه در محدوده تنش‌های کم، اسفنج‌های با چگالی کمتر جذب انرژی بیشتری را نشان می‌دهند. در حالی که در محدوده تنش‌های زیادتر اسفنج با چگالی بیشتر جذب انرژی بیشتری دارد. به‌عنوان مثال، در محدوده تنش ۱/۳ MPa، جذب انرژی اسفنج با چگالی‌های ۰/۵۱ و ۰/۷۹ g/cm³ به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۱ MJ/m³ است. بنابراین، ظرفیت جذب انرژی اسفنج به چگالی و محدوده تنش وابسته است که حداکثر تنش مجاز اسفنج بر اساس چگالی آن تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی

اسفنج لاستیکی،
لاستیک نیتریل،
جذب انرژی،
متغیر کارایی،
متغیر آرمانی.

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mkhabiry283@gmail.com,

مقدمه

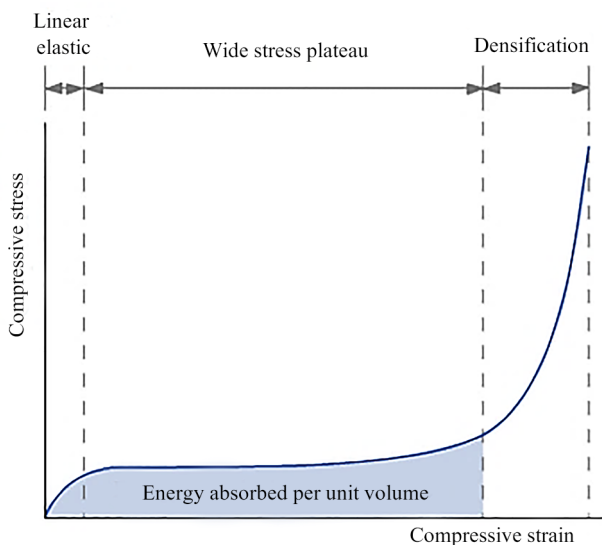
خواص ویژه اسفنج‌های لاستیکی موجب توسعه این مواد در سه دسته عمده عایق گرمایی، جاذب انرژی و مصارف ساختاری شده است [۴-۱]. این مواد از لحاظ صرفه اقتصادی و آسانی ساخت مورد توجه طراحان و پژوهشگران صنایع در حوزه جاذب‌های انرژی قرار گرفته‌اند [۵]. لازمه کاربری ویژه قطعات اسفنجی در محیط‌های مهاجم هیدروکربنی و روغنی، ساخت اسفنج‌های بر پایه الاستومرهای مقاوم به این محیط‌ها را مطرح کرده است. در این راستا، اسفنج‌های الاستومری نیتریلی گزینه مناسبی هستند [۶].

جذب انرژی اسفنج الاستومری در فرایند فشرده‌سازی به ظرفیت زیاد کرنش‌پذیری مکانیکی (قابلیت تغییرشکل بزرگ) این مواد مرتبط است. تعیین محدوده کرنش‌پذیری اسفنج‌های الاستومری به طراحی دقیق نیاز دارد [۷]. سازوکارهای اصلی حاکم بر رفتار مکانیکی اسفنج پلیمری در جذب انرژی، خمش پل‌ها و کشش دیواره‌های سلولی است که به چگالی اسفنج، ریزساختار سلولی از قبیل اندازه، شکل و نوع سلول (باز یا بسته) و خواص مکانیکی توده پلیمر وابسته است [۸-۱۰]. ساخت اسفنج با تخلخل و خواص مشخص، به بررسی عوامل طراحی فرمول‌بندی (نوع لاستیک، نوع و درصد عامل پفزا، عامل پخت، دوده و نانوذرات) و فرایندی (دما و زمان پیش‌پخت و نیز دما، زمان و فشار پخت و اسفنج‌شدن) نیاز دارد [۱۱]. Najib و همکاران [۱۲] سدیم بی‌کربنات به‌مقدارهای ۰.۴، ۰.۸ و ۱.۰ phr را به‌عنوان عامل شیمیایی پفزا به لاستیک طبیعی اضافه کردند. افزایش غلظت سدیم بی‌کربنات موجب افزایش تعداد سلول‌ها، کوچک‌تر شدن آن‌ها و در نهایت همگن‌تر شدن ساختار اسفنج سلول بسته شده است. افزایش مقدار سدیم بی‌کربنات، موجب کاهش چگالی و افزایش هوای حبس‌شده و نیز اتلاف و جذب انرژی می‌شود. جذب زیاد انرژی در اسفنج با چگالی کمتر، ناشی از تغییرشکل بزرگ، خمش و کماتش دیواره سلولی است [۱۳، ۱۴]. Eraki و همکاران [۱۵] افزایش حلقه اتلاف انرژی در بارگذارهای تنش-کرنش متناوب را در اسفنج لاستیکی NBR با درصدهای متفاوتی از عامل پفزای آزودی‌کربن‌آمید (ADC) نشان دادند. Mahmoud و همکاران [۱۶، ۱۷] از عامل پفزای ADC در ساخت اسفنج لاستیکی NBR و EPDM استفاده کردند. نتایج نشان داد، با افزایش درصد عامل پفزا، چگالی ظاهری، مدول فشاری و کششی، استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی اسفنج کاهش می‌یابد. در نتیجه نوع و غلظت عامل پفزا بر اساس گرمای واکنش و سازوکار تجزیه آن‌ها، یکی از عوامل مؤثر بر درجه پخت دیواره سلول اسفنج و در نتیجه خواص مکانیکی آن است [۱۸].

رفتار تنش-کرنش فشاری اسفنج‌ها سه ناحیه به شرح زیر دارد:

- ۱- پاسخ کشسان در تغییرشکل کوچک، که طی آن ساختار سلولی به‌طور یکنواخت و جزئی فشرده شده و مقدار کمی انرژی جذب می‌شود.
- ۲- مرحله فروپاشی کشسانی، که در آن خمش موضعی در نقاط ضعف ساختار سلولی رخ می‌دهد. در اثر رخداد پی‌درپی این پدیده مقدار زیادی از خمش دیواره در سراسر ساختار گسترش می‌یابد. این ناحیه دارای مسطح (plateau) گسترده است که تغییرشکل بزرگ را در تنش تقریباً ثابت نشان می‌دهد. از ویژگی‌های شاخص اسفنج‌های لاستیکی جاذب انرژی، ناحیه مسطح گسترده در منحنی تنش-کرنش بوده که سطح زیر منحنی در این ناحیه نشانگر انرژی جذب‌شده بر واحد حجم اسفنج است.
- ۳- فاز متراکم (densification) که در آن ساختارهای سلولی روی هم فرومی‌ریزند و موجب سختی چشمگیر ماده می‌شود. در این ناحیه مطابق شکل ۱، نمودار تنش-کرنش روند افزایشی شدیدی نشان می‌دهد [۱۹-۲۱].

در شکل ۱، با وجود مشاهده این سه منطقه متفاوت از هم، مرز دقیق و واضحی میان نواحی تنش-کرنش فشاری تشخیص‌پذیر نیست. Li و همکاران [۲۱، ۲۲] مرز دقیق میان این نواحی و خواص جذب انرژی اسفنج پلیمری را با به‌کارگیری دو متغیر کارایی (efficiency) و آرمانی (ideality) تعیین و ارزیابی کردند. Mahapatra و همکاران [۸] اثر عامل پفزا را بر خواص فشاری و جذب انرژی لاستیک اتیلن



شکل ۱- رفتار فشاری اسفنج لاستیکی [۵].

Fig. 1. Compressive behavior of rubber foam [5].

تجربی

مواد

فهرست مواد اولیه استفاده‌شده در ساخت آمیزه اسفنج لاستیکی به‌همراه نام تجاری و شرکت سازنده هر یک از مواد در **جدول ۱** آمده است. لاستیک سنتزی نیتریل نوع Krynac 3345 F با مقدار ۳۳٪ آکریلونیتریل و گرانروی (۱۰۰°C) ۴۵ ML 1+4 از شرکت Latex تهیه شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

برای آمیزه‌سازی فرمول‌بندی اسفنج لاستیکی از مخلوط‌کن دوغلتنکی W150AP ساخت شرکت Kolin آلمان با قطر ۱۵ cm و عرض ۳۵ cm استفاده شد. این دستگاه قابلیت تنظیم دما در گستره ۱۲۰°C-۲۵°C تنظیم سرعت‌های دورانی غلتک‌ها ۵۰-۱۰ rpm و نیز به‌منظور اعمال تنش برشی در آمیزه، تغییر سرعت نسبی غلتک‌ها نسبت به هم را در محدوده ۱/۵-۱ دارد. در مرحله اول آمیزه‌سازی، لاستیک نیتریل (NBR) در دمای ۴۰°C به مدت ۲ min روی مخلوط‌کن دوغلتنکی فرایند شد. در مراحل بعدی، مقادیر مشخصی از مواد کمک‌فرایندی، پخت و سایر افزودنی‌های لازم روی غلتک به آمیزه اضافه شدند. پس از آماده‌سازی، آمیزه به مدت ۲۴ h استراحت داده شد. فرمول‌بندی آمیزه استفاده‌شده که در جدول ۱ آمده است، برای ساخت تمام نمونه اسفنج‌های لاستیکی یکسان بود. ساخت اسفنج با روش قالب‌گیری فشاری دو مرحله‌ای (اسفنج‌شدن و پخت) با دستگاه پرس گرم انجام شد. مرحله اسفنج‌شدن در دمای ۱۴۵°C، زیر فشار ۱۰ bar به مدت ۳۰ min و مرحله پخت در دمای ۱۶۰°C و ۳۰ min انجام شد. نمونه‌های اسفنجی NBR-0.6، NBR-0.7 و NBR-0.8 به ترتیب با چگالی‌های مدنظر ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ g/cm³ با تغییر مقدار جرم آمیزه

پروپیلن دی‌ان مونومر (EPDM) مطالعه کردند و نشان دادند، ظرفیت جذب انرژی اسفنج به چگالی و اندازه تنش اعمالی وابسته است. آن‌ها با تعیین محدوده جذب انرژی اسفنج EPDM به کمک متغیرهای کارایی و آرمانی، امکان طراحی و انتخاب اسفنج با چگالی مناسب را برای کاربردی ویژه فراهم کردند.

Wang و همکاران [۱۳] اثر اسفنج‌شدن بر جذب انرژی لاستیک EPDM را بررسی کردند. در این پژوهش نشان داده شد، برای جذب انرژی در تنش‌های کم، اسفنج کم‌چگالی به دلیل تغییرشکل زیاد مناسب است. اما در تنش‌های زیاد، اسفنج با چگالی بیشتر انتخاب می‌شود. در بحث طراحی اسفنج با کاربری ویژه، انتخاب چگالی صحیح اسفنج نیازمند محاسبات و طراحی دقیق است. اگر چگالی خیلی کم باشد، پیش از اینکه انرژی کافی جذب شود، سلول‌ها له می‌شوند. اگر چگالی بیش از حد زیاد باشد، تنش پیش از جذب انرژی کافی از مقدار بحرانی فراتر می‌رود.

در مطالعه حاضر، ارتباط رفتار جذب انرژی اسفنج سلول‌بسته لاستیک نیتریل (NBR) با ریزساختار آن بر اساس بارگذارهای فشاری و با هدف بهینه‌سازی انتخاب اسفنج برای کاربری معین ارزیابی شد. بدین منظور، نمونه اسفنج‌های NBR با چگالی ۰/۵۱ g/cm³ تا ۰/۷۹ g/cm³ و ریزساختارهای مختلف در شرایط و سازوکار اسفنج‌شدگی یکسان (ثابت بودن نوع و ترکیب درصد اجزای آمیزه از جمله عامل پف‌زا در نمونه‌های مختلف) با تغییر جرم آمیزه در حجم ثابت قالب ساخته شدند. مشخصات ریزساختاری اسفنج NBR شامل تعداد، اندازه و توزیع اندازه سلول در چگالی‌های متفاوت بررسی شد. سپس، خواص جذب انرژی اسفنج با نمودار جذب انرژی، متغیرهای کارایی و آرمانی و ارتباط آن با ریزساختار اسفنج ارزیابی شد.

جدول ۱- فرمول‌بندی پایه و مشخصات مواد اولیه استفاده‌شده در طراحی و تهیه اسفنج لاستیک نیتریل.

Table 1. Basic formulation and specifications of raw materials used in the design and preparation of nitrile rubber foam.

Materials	Amount (phr)	Additive type	Trade name	Produced
Nitrile rubber (NBR)	100	Rubber	Krynac 3345	Francis
Zinc oxide (ZnO)	5	Activator	Zinc Oxide	Rangineh Pars, Iran
Stearic acid	2	Processing aid	Palmera	KLK, Malaysia
Sulphur	1.5	Curing agent	Sulphur	Flexcis
Tetramethylthiuram disulphide (TMTD)	1.5	Coactivator	TMTD	MERCK, Germany
Baking soda	6	Foaming agent	NC-220	Shandong Donglin, China

$$V_f = 1 - \frac{\rho_{foam}}{\rho_{rubber}} \quad (6)$$

V_f , d , N به ترتیب تعداد سلول در واحد حجم، قطر متوسط سلول و کسر حجمی حفره است. آزمون فشاری با دستگاه Hiwa 200 (ساخت ایران) و سرعت 5 mm/min مطابق با استاندارد ASTM D575 انجام شد.

نتایج و بحث

ریز ساختار اسفنج

در شکل ۲، نتایج آزمون میکروسکوپی الکترونی پوشی نمونه‌های اسفنجی (جدول ۲) NBR-0.6، NBR-0.7 و NBR-0.8 به همراه پردازش آماری ریزساختار نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، توزیع سلولی در نمونه اسفنج‌های چگال‌تر، باریک‌تر بوده و قله توزیع اندازه سلول به مقدارهای کمتر انتقال یافته است. به عنوان مثال، پنخس اندازه سلول از محدوده 330-110 μm در نمونه شکل ۲ (a) به محدوده 250-150 μm در نمونه شکل ۲ (b) و در نهایت به محدوده 250-90 μm در نمونه شکل ۲ (c) کاهش یافته است. نتایج حاصل از مطالعات آماری اندازه سلول در شکل ۲ نشان داده شده است. چگالی سلولی (N) نمونه‌های شکل ۲ (a)، (b) و (c) به ترتیب 115، 118 و 127 n/cm^3 و متوسط اندازه سلول (d) آن‌ها به ترتیب 221، 193 و 168 μm است. این نتایج نشان داد، در اسفنج‌های با چگالی بیشتر، چگالی سلول افزایش و متوسط عددی اندازه سلول کاهش یافته است. سازوکار اسفنجی شدن در مطالعه ارتباط میان چگالی و ریزساختار اسفنج، تعیین کننده است. نمونه‌های اسفنجی با چگالی‌های متفاوت با تغییر مقدار آمیزه در حجم ثابت ساخته شدند. این موضوع سبب می‌شود تا در نمونه‌های چگال‌تر که از مقدار جرم آمیزه بیشتری در حجم ثابت استفاده شده است، عامل پف‌زای بیشتری وجود داشته باشد. با افزایش مقدار عامل پف‌زا در واحد حجم، هسته‌گذاری سلول بیشتر می‌شود و در نتیجه تعداد سلول در واحد حجم افزایش می‌یابد. البته این پدیده، سلول‌هایی با ابعاد کوچک‌تر را به وجود می‌آورد [25].

شکل ۳ رابطه چگالی اسفنج با اندازه سلول، تعداد سلول بر واحد حجم و چگالی اتصال‌های عرضی را نشان می‌دهد. دیده می‌شود، با کاهش چگالی اسفنج، چگالی اتصال‌های عرضی کاهش یافته است. فرایند ساخت اسفنج لاستیکی شامل دو مرحله اسفنج شدن

در حجم ثابت قالب استوانه‌ای و براساس کنترل مقدار انبساط حجمی آمیزه تهیه شدند. قالب استوانه‌ای دارای قطر 3 cm و ارتفاع 1/2 cm بود. افزایش جرم آمیزه در حجم ثابت قالب، موجب انبساط حجمی کمتر آمیزه و در نتیجه افزایش چگالی آن می‌شود.

چگالی اسفنج مطابق استاندارد ASTM D 3575 محاسبه شد. همچنین، مطابق استاندارد ASTM D 471 تغییرات وزنی و حجمی نمونه‌ها در معرض حلال تولوئن در دمای محیط اندازه‌گیری و مقدار کسر حجمی پلیمر در حلال (v_r) محاسبه شد. سپس، با استفاده از معادله Flory-Rhener (معادله ۱)، وزن مولکولی متوسط میان اتصال‌های عرضی شیمیایی در نمونه‌های مختلف به دست آمد:

$$-[-\ln(1-v_r)-v_r+\chi v_r^2]=V_s v_e \left[v_r^{1/3} - \frac{v_r}{2} \right] \quad (1)$$

در این معادله، v_e چگالی اتصال‌های عرضی، V_s حجم مولی حلال تولوئن و χ ضریب برهم‌کنش میان لاستیک آکریلونیتریل بوتادی‌ان و حلال تولوئن است. مقدار V_s و χ به ترتیب 106/2 cm^3/mole و 0/472 تخمین زده شد [23].

$$v_r = \frac{\frac{x_r}{\rho_r}}{\frac{x_r}{\rho_r} + \frac{x_s}{\rho_s}} \quad (2)$$

$$x_s = \frac{m_{sw} - m_d}{m_{sw}} \quad (3)$$

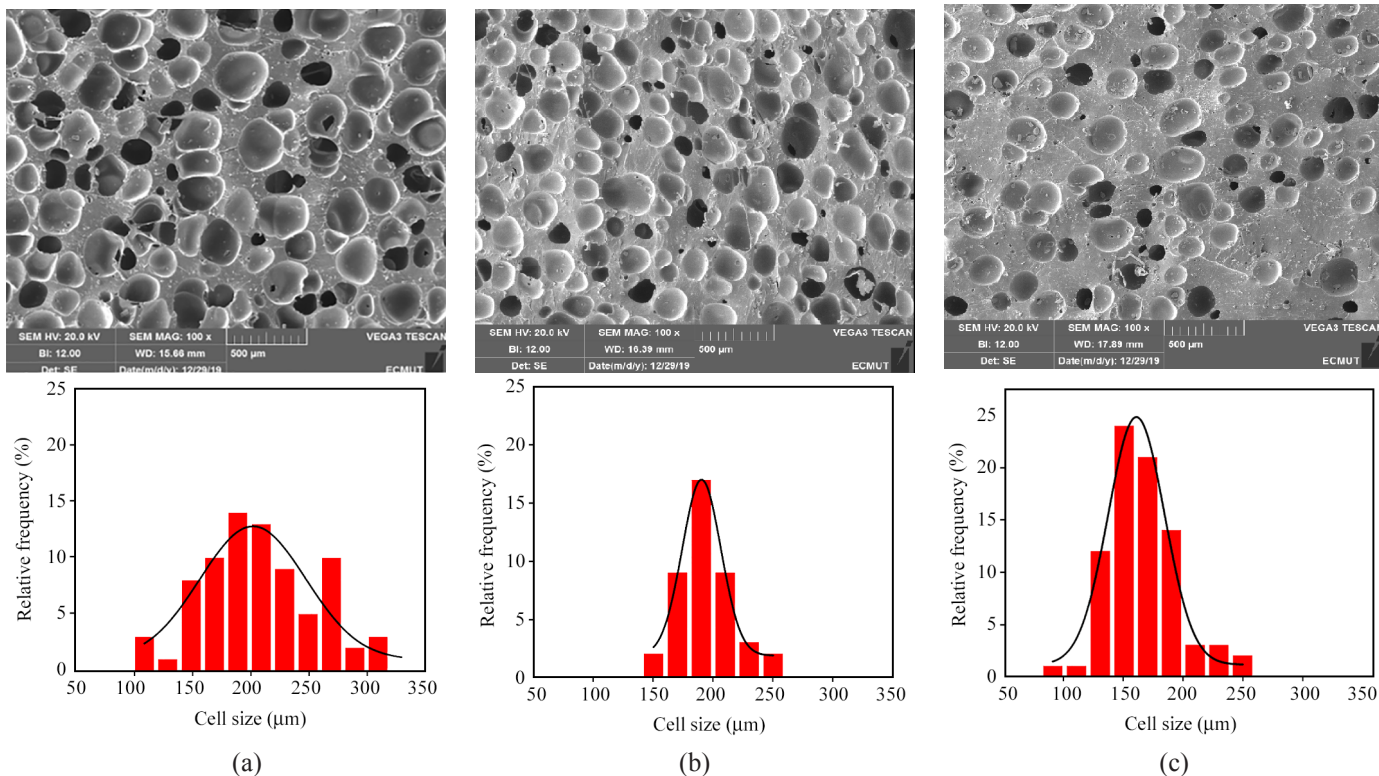
$$x_r = 1 - x_s$$

به ترتیب ρ_s ، ρ_r ، x_s ، x_r چگالی لاستیک و حلال، چگالی لاستیک و حلال و m_d و m_{sw} به ترتیب وزن نمونه متورم و خشک هستند. همچنین، اثر کسر حجمی حلال حبس شده در حفره‌های اسفنج در محاسبه چگالی اتصال‌های عرضی در نظر گرفته شد.

میکروسکوپ الکترونی پوشی (SEM) مدل VEGA3 TESCAN با بزرگ‌نمایی 100x و توان 20 kW، به کمک نرم‌افزار Image j برای بررسی ساختار نمونه‌ها به کار گرفته شد. تعداد سلول در واحد حجم یا چگالی سلولی، اندازه متوسط سلول و کسر حجمی حفره‌ها از معادله‌های (۴) و (۵) به دست آمد [24]:

$$N = \frac{6}{\pi d^3} \left(\frac{\rho_{rubber}}{\rho_{foam}} - 1 \right) \quad (4)$$

$$d = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (5)$$



شکل ۲- شکل‌شناسی و توزیع اندازه سلول اسفنج نیتریل با چگالی‌های مختلف: (a) NBR-0.6، (b) NBR-0.7، و (c) NBR-0.8

Fig. 2. Morphology and cell-size distribution of nitrile foam with various densities: (a) NBR-0.6, (b) NBR-0.7, and (c) NBR-0.8.

اسفنجی نسبت به نمونه توده لاستیک نیتریل (NBR-bulk) رفتار فشاری متفاوتی دارند. منحنی تنش- کرنش نمونه‌های اسفنجی دارای سه ناحیه کشسان خطی، مسطح و متراکم است که مطابق نظریه Gibson-Ashby ناحیه کشسان خطی در اسفنج سلول‌بسته با سه نوع

(هسته‌گذاری و رشد سلول) و پخت (تثبیت ساختار) است. طی مرحله اسفنج‌شدن، در نمونه‌های با چگالی کمتر فشار گاز ناشی از تجزیه عوامل پف‌زا سبب بزرگ‌تر شدن اندازه سلول و در نتیجه نازک‌شدن دیواره سلول می‌شود. نازک‌شدن دیواره سلول اثر مخربی بر اتصال‌های عرضی دارد. بنابراین، رشد سلول در اسفنج با چگالی کمتر، کاهش چگالی اتصال‌های عرضی را به همراه دارد. بنابراین، رشد اندازه سلول در اسفنج با چگالی کمتر و نازک‌شدن دیواره سلول، موجب کاهش چگالی اتصال‌های عرضی می‌شود [۲۶].

آزمون فشاری

رفتار تنش-کرنش فشاری اسفنج لاستیک نیتریل با چگالی‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل نمونه‌های

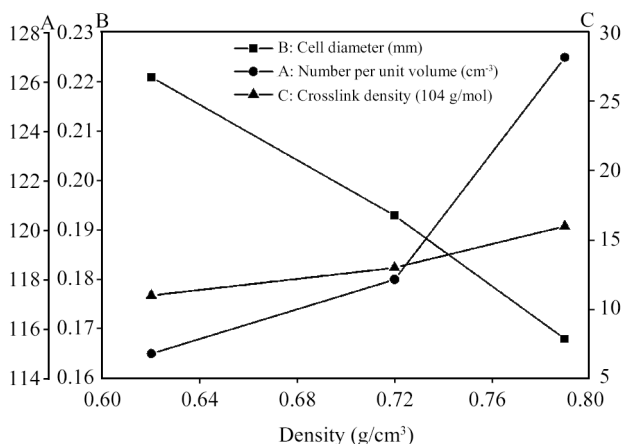
جدول ۲- چگالی اسفنج‌های لاستیکی.

Table 2. Density of rubber foams.

Sample	NBR-0.05	NBR-0.6	NBR-0.7	NBR-0.8	NBR-bulk
Density (g/cm ³)	0.51	0.63	0.72	0.79	1.04

شکل ۳- اثر چگالی اسفنج بر اندازه سلول، تعداد سلول بر واحد حجم و چگالی اتصال عرضی.

Fig. 3. Effect of foam density on cell size, number of cell per unit volume and crosslink density.



اسفنج انرژی بیشتری جذب می کند. رابطه تجربی میان چگالی اسفنج و کرنش تراکم مطابق معادله (۷) است [۲۷]:

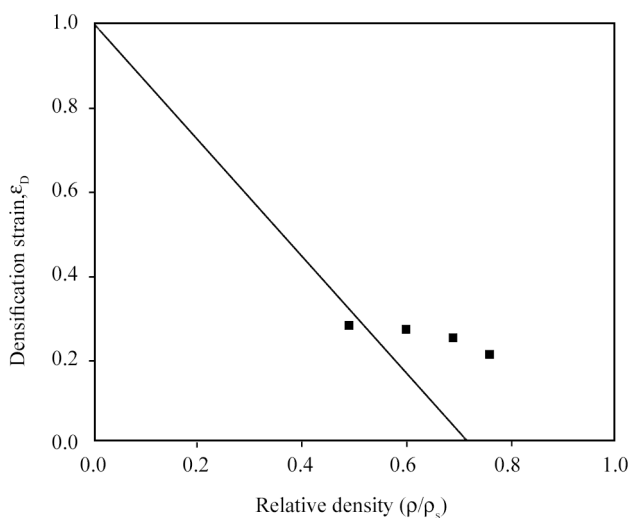
$$\epsilon_D = 1 - 1.4 \frac{\rho}{\rho_s} \quad (7)$$

ρ ، ρ_s و ϵ_D به ترتیب چگالی اسفنج، چگالی توده لاستیک و کرنش تراکم است. در شکل ۵ رابطه میان چگالی نسبی (ρ/ρ_s) و کرنش تراکم (ϵ_D) اسفنج رسم شده است. دیده می شود، اسفنج های NBR-0.5 و NBR-0.6 نسبت به دو نمونه دیگر انحراف کمتری از معادله (۷) نشان دادند. بنابراین رابطه خطی میان کرنش تراکم و چگالی نسبی در چگالی های کمتر تطابق بهتری با نتایج تجربی دارد. به طوری که Wang و همکاران [۱۳] نتایج مشابهی درباره ارتباط رفتار فشاری اسفنج لاستیکی EPDM با چگالی آن به دست آوردند.

تعیین محدوده جذب انرژی

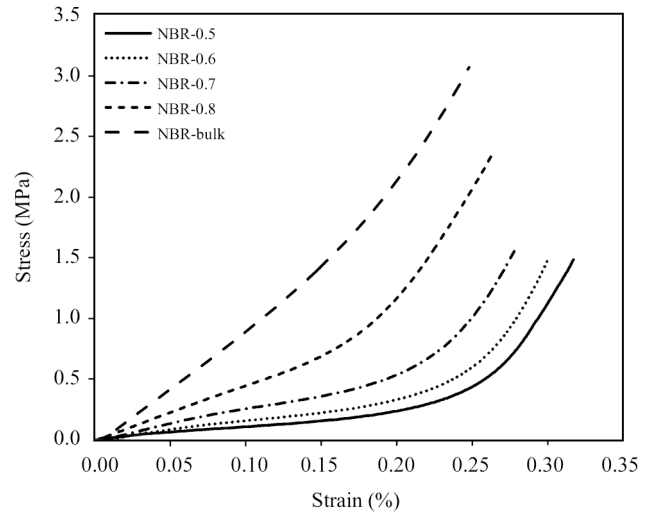
هدف از جذب های انرژی (بسته بندی و انرژی ضربه)، اتلاف انرژی جنبشی مکانیکی و نیز حفظ حداکثر تنش زیر حد مجاز است. کار انجام شده روی اسفنج به دو نوع انرژی ذخیره شده و گرمایی تبدیل می شود. کار انجام شده بر واحد حجم تا کرنش تراکم از سطح زیر منحنی تنش-کرنش محاسبه و ظرفیت جذب انرژی (W) نامیده می شود. قابلیت تغییر شکل بزرگ اسفنج موجب ظرفیت زیاد جذب انرژی در طول فشردگی می شود.

تابع جذب انرژی اسفنج بر اساس جلوگیری از اعمال بار بیش از حد



شکل ۵- اثر چگالی نسبی بر کرنش تراکم اسفنج.

Fig. 5. Effect of relative density on the densification strain of foam.



شکل ۴- رفتار فشاری نمونه های اسفنج NBR با چگالی های متفاوت.

Fig. 4. Compressive behavior of NBR foam samples with various densities.

کرنش متفاوت خمش دیواره سلول، کشش پل ها و فشار گاز داخل سلول کنترل می شود. در جدول ۳، تنش-کرنش انتهای ناحیه کشسان خطی (تنش و کرنش تسلیم به ترتیب σ_y و ϵ_y) نمونه های اسفنجی گزارش شده است. با کاهش چگالی اسفنج، ناحیه کشسان خطی کاهش یافته و ناحیه مسطح گسترده تر شده است. از طرف دیگر مطابق شکل ۴، با افزایش چگالی اسفنج، ناحیه مسطح محدود و دو ناحیه کشسان و تراکم غالب می شوند.

گسترده گی ناحیه مسطح تعیین کننده رفتار جذب انرژی در اسفنج هاست. در ناحیه مسطح، تغییر شکل های سلولی تا زمانی که اسفنج کاملاً فشرده شود (رسیدن به ناحیه تراکم) ادامه می یابد. پس از کرنش تراکم (ϵ_D)، تنش به مقدار شایان توجهی افزایش یافته و رفتار تنش-کرنش به توده لاستیک نیتریل نزدیک شده است، به طوری که ظرفیت جذب انرژی آن کاهش می یابد. در نتیجه، هر چقدر کرنش تراکم به حالت ایده آل ($\epsilon_D = 1$) نزدیک تر شود، ناحیه مسطح گسترده تر و

جدول ۳- تنش-کرنش تسلیم نمونه های اسفنج لاستیکی.

Table 3. Yield stress- strain of rubber foam samples.

Sample	Yield strain, ϵ_y (%)	Yield stress, σ_y (MPa)
NBR-0.8	0.09	0.41
NBR-0.7	0.07	0.19
NBR-0.6	0.05	0.09
NBR-0.5	0.04	0.06

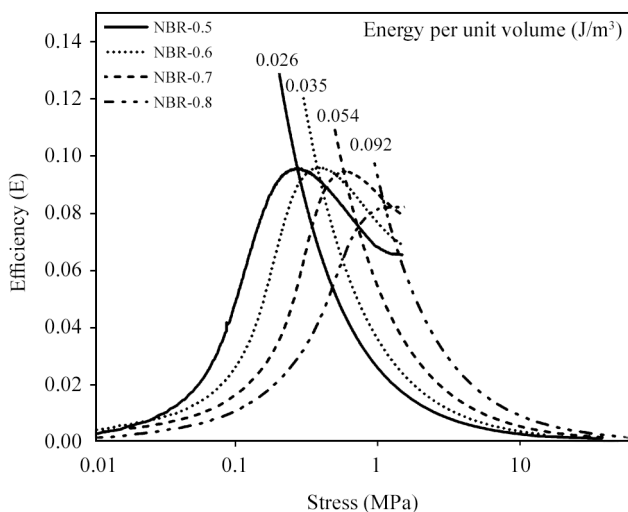
ابتدای ناحیه تراکم (ϵ_{cd}) است. همچنین متغیر آرمانی معادله (۱۰) نسبت کار انجام‌شده در تغییر شکل واقعی ماده را به کار انجام‌شده در حالت ایده‌آل (تنش ثابت طی تغییر شکل) معرفی می‌کند [۲۹-۳۱]:

$$E(\epsilon) = \frac{\int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon)} \quad (8)$$

$$\frac{E(\epsilon)}{d\epsilon} = 0 \rightarrow \epsilon = \epsilon_{cd} \quad (9)$$

$$I(\epsilon) = \frac{\int_0^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon) \cdot \epsilon} \quad (10)$$

با استفاده از معادله‌های (۸) و (۹) و داده‌های تنش-کرنش فشاری، متغیرهای کارایی و آرمانی برای اسفنج‌های NBR-0.5، NBR-0.6، NBR-0.7 و NBR-0.8 محاسبه شدند. کارایی جذب انرژی اسفنج NBR برحسب تنش در چگالی‌های متفاوت در شکل ۷ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، متغیر کارایی مقدار بیشینه‌ای دارد که با تغییر چگالی اسفنج در تنش‌های متفاوت دیده می‌شود. با کاهش چگالی اسفنج، نقطه بیشینه کارایی در تنش‌های کمتر ظاهر شده و منحنی آن گسترده می‌شود. با توجه به معادله (۸)، حاصل ضرب کارایی در تنش ($E \times \sigma$)، انرژی بر واحد حجمی است که طی کرنش فشاری به وسیله اسفنج جذب می‌شود. این حاصل ضرب برای هر سطح از انرژی مقدار ثابتی است که به‌عنوان خطوط انرژی ثابت

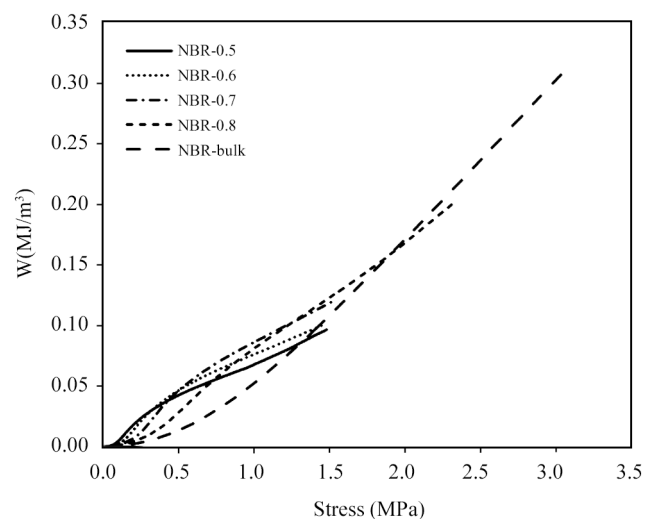


شکل ۷- کارایی جذب انرژی اسفنج‌های NBR محاسبه‌شده از منحنی‌های تنش-کرنش.

Fig. 7. Efficiency of energy absorption of NBR foams calculated from stress-strain curves.

مجاز روی اجسام تعریف می‌شود. بنابراین در طراحی اسفنج، ظرفیت جذب انرژی با حداکثر فشار مجاز محدود می‌شود. شکل ۶ جذب انرژی برحسب تنش فشاری هر اسفنج را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، رابطه پیچیده‌ای میان جذب انرژی و چگالی اسفنج وجود دارد. به‌عنوان مثال، در تنش ۰/۳ MPa، اسفنج NBR-0.5، $0/03 \text{ MJ/m}^3$ انرژی را جذب می‌کند، در حالی که اسفنج NBR-0.8، فقط $0/009 \text{ MJ/m}^3$ انرژی را جذب کرده و بقیه انرژی را منتقل می‌کند. پس در محدوده تنش‌های کم، اسفنج با چگالی کمتر انرژی بیشتری را جذب می‌کند. این رفتار به دلیل خمش و پیچش دیواره و پل‌های سلولی در تغییر شکل بزرگ بروز می‌کند. در محدوده تنش ۱/۳ MPa اسفنج NBR-0.5، $0/08 \text{ MJ/m}^3$ انرژی جذب می‌کند، در حالی که اسفنج NBR-0.8، $0/1 \text{ MJ/m}^3$ انرژی جذب می‌کند. بنابراین، در محدوده تنش‌های زیاد اسفنج با چگالی بیشتر، جذب انرژی بیشتری دارد و اسفنج با چگالی کم در ناحیه تراکم قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، ظرفیت جذب انرژی در اسفنج به چگالی و محدوده تنش وابسته است و حداکثر تنش مجاز برای اسفنج بر اساس چگالی آن بهینه می‌شود.

متغیرهای کارایی و آرمانی، عملکرد جذب انرژی در اسفنج‌ها با ریزساختار متفاوت را ارزیابی و با یکدیگر مقایسه می‌کنند [۲۸]. همچنین این دو متغیر امکان طراحی و انتخاب اسفنج مناسب برای جذب انرژی در محدوده تنش مشخص را فراهم می‌کنند. متغیر کارایی معادله (۸) کار انجام‌شده طی تغییر شکل را نسبت به تنش معادل آن بیان می‌کند. بیشینه منحنی کارایی-کرنش معادله (۹) بیانگر کرنش در



شکل ۶- اثر تنش بر جذب انرژی اسفنج با چگالی‌های متفاوت.

Fig. 6. Effect of the stress on energy absorption of foam with various densities.

از طرفی، بیشینه مقدار آرمانی نیز تعیین کننده نقطه شروع رفتار ایده آل اسفنج لاستیکی است. در رفتار ایده آل تغییر شکل ناحیه مسطح در تنش ثابت (تنش مسطح) واقع می شود. در حقیقت، حداکثر مقدار متغیر آرمانی پس از ناحیه کشسان در منحنی تنش- کرنش نمایان می شود. مرحله ای که خمش و کشش دیواره شروع شده و گاز داخل سلول متراکم می شود. بنابراین، می توان از بیشینه مقدار متغیر آرمانی که نشانگر انتهای ناحیه کشسان و ابتدای ناحیه مسطح است، برای تعیین حد پایین بارگذاری در طراحی اسفنج های نیتریل بهره برد. در نتیجه برای کاربردهای جاذب انرژی، اسفنجی مناسب است که از کارایی زیاد و توزیع پهن منحنی در اطراف نقطه بیشینه آرمانی برخوردار باشد. تنش معادل ناحیه مسطح که از معادله (۱۱) برای اسفنج با چگالی های متفاوت استخراج شده در جدول ۳ آمده است. در معادله (۱۱)، σ_{pl} و ϵ_y ، به ترتیب تنش مسطح و کرنش تسلیم هستند. این نتایج نمایانگر روند کاهش تنش ناحیه مسطح با کاهش چگالی اسفنج است.

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_{\epsilon_y}^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\epsilon_d - \epsilon_y} \quad (11)$$

نمودار جذب انرژی

Miltz و همکاران [۲۸] رویکرد متفاوتی را برای بهینه سازی جذب انرژی پیشنهاد دادند. در شکل ۸ جذب انرژی بهنجار شده (W/E_s) بر حسب تنش بهنجار شده (σ/E_s) برای اسفنج های با چگالی متفاوت رسم شده است. E_s مدول توده NBR و برابر ۹/۷۶ MPa است. به کمک نمودار جذب انرژی، متناسب با مقدار تنش می توان اسفنجی که بیشترین جذب انرژی را دارد، انتخاب کرد. هر منحنی تنش شانه ای (shoulder) با بیشترین جذب انرژی را دارد. بنابراین، ناحیه اطراف شانه منحنی، بهترین محدوده جذب انرژی برای هر اسفنج است. در شکل ۸ خط راست رسم شده، منحنی نمودار جذب انرژی برای هر چگالی را به دو ناحیه تقسیم می کند. معادله این خط برای اسفنج لاستیکی NBR به شکل تابعی نمایشی در معادله (۱۲) آمده است:

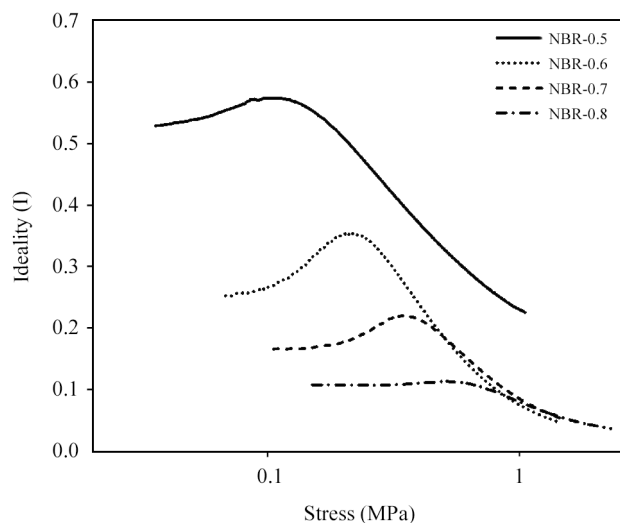
جدول ۴- تنش مسطح نمونه های اسفنج لاستیکی.

Table 4. Plateau stress of rubber foam samples.

Sample	NBR-0.5	NBR-0.6	NBR-0.7	NBR-0.8
σ_{pl} (kPa)	246	309	467	750

در شکل ۷ رسم شدند. خطوط انرژی ثابت رسم شده در منحنی شکل ۷، محدوده بیشترین کارایی جذب انرژی را برای کاربردهای مشخص تعیین می کند. این کاربردها به عنوان داده های عملکردی قطعه جاذب انرژی تعریف می شوند. با توجه به خطوط انرژی ثابت نمایان است که هر چگالی اسفنج در بیشینه کارایی خود قابلیت جذب مقدار معینی انرژی را دارد. حداکثر جذب انرژی در اسفنج های NBR-0.5، NBR-0.6، NBR-0.7 و NBR-0.8 به ترتیب ۰/۰۲۶، ۰/۰۳۵، ۰/۰۵۴ و ۰/۰۹۲ J/m^3 در تنش های ۰/۲۷، ۰/۳۹، ۰/۵۸ و ۰/۸۳ MPa هستند. با کاهش چگالی اسفنج، حداکثر انرژی در تنش های کمتر جذب می شود. پژوهش های بسیاری در بحث جذب انرژی اسفنج لاستیکی به نتایج مشابه مطالعه حاضر دست یافتند [۱۳]. بنابراین، با توجه به نوع بار اعمال شده برای جذب انرژی بهینه از اسفنج با چگالی مناسب استفاده می شود.

شکل ۸ منحنی متغیر آرمانی بر حسب تنش را برای نمونه اسفنج های لاستیکی نشان می دهد. دیده می شود، متغیر آرمانی نیز نقطه بیشینه ای دارد و در مقایسه با بیشینه کارایی در تنش کمتری ظاهر می شود. در نقطه بیشینه کارایی، اسفنج بیشترین ظرفیت جذب انرژی را دارد. پس از این نقطه به دلیل فشرده شدن ساختار اسفنج، منحنی تنش-کرنش به ناحیه متراکم وارد شده و با شیب تند افزایشی می شود. اسفنج در این ناحیه شبیه به توده لاستیک رفتار می کند. بنابراین، تنش متناظر با بیشینه کارایی ملاک حداکثر بارگذاری مجاز برای اسفنج نیتریل در کاربرد جاذب انرژی است.



شکل ۸- متغیر آرمانی (I) اسفنج های NBR محاسبه شده از منحنی های تنش-کرنش.

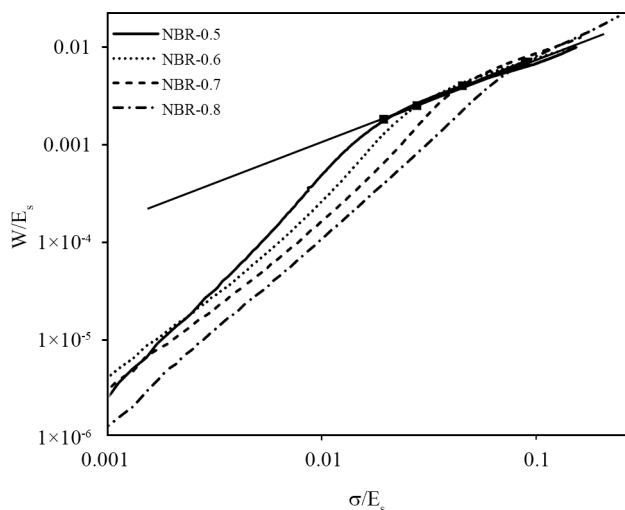
Fig. 8. Ideality parameter (I) of NBR foams calculated from stress-strain curves.

نتیجه گیری

در این پژوهش، ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار جذب انرژی اسفنج‌های لاستیکی NBR در محدوده چگالی $0.79-0.51 \text{ g/cm}^3$ برای تعیین بهینه رفتار جذب انرژی اسفنج مطالعه شده است. پردازش ریزساختار اسفنج نشان داد، با کاهش چگالی، افزون بر افزایش قطر سلول و کاهش تعداد آن‌ها در واحد حجم، توزیع ناهمگن‌تری از اندازه سلول اتفاق می‌افتد. همچنین دیده شد، با کاهش چگالی، ناحیه مسطح گسترده‌تر و اندازه تنش در این محدوده نیز کمتر می‌شود. با استفاده از متغیر کارایی، جذب انرژی بیشینه برای اسفنج‌های NBR-0.5، NBR-0.6، NBR-0.7 و NBR-0.8 به ترتیب 0.26 ، $0.35/0.054$ ، 0.39 ، 0.58 و 0.92 J/m^3 به دست می‌آید که در تنش‌های بیشینه کارایی 0.27 ، 0.39 ، 0.58 و 1.13 MPa به عنوان حداکثر تنش بارگذاری مجاز اتفاق می‌افتد. در بررسی رفتار فشاری اسفنج‌های لاستیک نیتریل مشخص شد، جذب انرژی آن‌ها به چگالی و محدوده تنش کاربردی وابسته است، به طوری که در محدوده‌های تنش کم 0.3 MPa اسفنج NBR-0.5، 0.03 MJ/m^3 انرژی را جذب می‌کند، در حالی که اسفنج NBR-0.8 فقط 0.09 MJ/m^3 انرژی را جذب کرده و بقیه انرژی را منتقل می‌کند. در محدوده‌های تنش بیش از 1.3 MPa اسفنج NBR-0.5، 0.08 MJ/m^3 انرژی و اسفنج NBR-0.8، 0.1 MJ/m^3 انرژی را جذب می‌کند.

مراجع

- Ameli A., Nofar M., Park C.B., Pötschke P., and Rizvi G., Polypropylene/Carbon Nanotube Nano/Microcellular Structures with High Dielectric Permittivity, Low Dielectric Loss, and Low Percolation Threshold, *Carbon N.Y.*, **71**, 206-217, 2014.
- Ameli A., Nofar M., Wang S., and Park C.B., Lightweight Polypropylene/Stainless-Steel Fiber Composite Foams with Low Percolation for Efficient Electromagnetic Interference Shielding, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 11091-11100, 2014.
- Albooyeh A. and Ghasemi I., Effect of Mesoporous Silica and Hydroxyapatite Nanoparticles on the Tensile and Dynamic Mechanical Thermal Properties of Polypropylene and Polypropylene Foam, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 423-439, 2014.
- Nofar M., Ameli A., and Park C.B., A Novel Technology to Manufacture Biodegradable Polylactide Bead Foam Products, *Mater. Des.*, **83**, 413-421, 2015.
- Zhang J. and Ashby M.F., Mechanical Selection of Foams and Honeycombs Used for Packaging and Energy Absorption, *J. Mater. Sci.*, **29**, 157-163, 1994.
- Kim D.Y., Kim G.H., Nam G.M., Kang D.G., and Seo K.H., Oil Resistance and Low-Temperature Characteristics of Plasticized Nitrile Butadiene Rubber Compounds, *J. Appl. Polym. Sci.*, **136**, 47851, 2019.
- Drane P., De Jesus-Vega M., Inalpolat M., Sherwood J., and Orbey N., Inductive quantification of Energy Absorption of High-Density Polyethylene Foam for Repeated Blunt Impact, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L: J. Mater. Des. Appl.*, **234**, 531-545, 2020.
- Mahapatra S.P. and Tripathy D.K., Dynamic Mechanical Properties of Conductive Carbon Black-Reinforced Closed Cell



شکل ۹- نمودارهای جذب انرژی اسفنج‌های NBR.

Fig. 9. Energy absorption diagrams of NBR foams.

$$\frac{W}{E_s} = 0.063 \left(\frac{\sigma}{E_s} \right)^{0.9} \quad (12)$$

به عنوان مثال، در محدوده تنش کاری 0.25 ، ریزساختار اسفنج NBR-0.6 مناسب‌ترین جذب انرژی موجب می‌شود.

- Microcellular Oil-Extended EPDM Rubber Vulcanizates: Effect of Blowing Agent, Temperature, Frequency, and Strain, *J. Appl. Polym. Sci.*, **102**, 1600–1608, 2006.
9. Najib N.N., Ariff Z.M., Bakar A.A., and Sipaut C.S., Correlation between the Acoustic and dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber Foam: Effect of Foaming Temperature, *Mater. Des.*, **32**, 505–511, 2011.
 10. Saha M.C., Mahfuz H., Chakravarty U.K., Uddin M., Kabir M.E., and Jeelani S., Effect of Density, Microstructure, and Strain Rate on Compression Behavior of Polymeric Foams, *Mater. Sci. Eng. A*, **406**, 328–336, 2005.
 11. Esmizadeh E., Vahidifar A., Rostami E., Nouri Khorasani S., Ghayoumi M., and Khonakdar H.A., Effect of Carbon Black on Morphological and Mechanical Properties of Rubber Foams Produced by a Single-step Method, *J. Appl. Res. Chem. Eng.*, **1**, 49–60, 2017.
 12. Najib N.N., Ariff Z.M., Manan N.A., Bakar A.A., and Sipaut C.S., Effect of Blowing Agent Concentration on Cell Morphology and Impact Properties of Natural Rubber Foam, *J. Phys. Sci.*, **20**, 13-25, 2009.
 13. Wang B., Peng Z., Zhang Y., and Zhang Y., Compressive Response and Energy Absorption of Foam EPDM, *J. Appl. Polym. Sci.*, **105**, 3462-3469, 2007.
 14. Samsudin M.S.F., Ariff Z.M., and Ariffin A., Deformation Behavior of Open-Cell dry Natural Rubber Foam: Effect of Different Concentration of Blowing Agent and Compression Strain Rate, *AIP Conference Proceedings*, 2017.
 15. El Eraki M.H., El Lawindy A.M.Y., Hassan H.H., and Mahmoud W.E., The Physical Properties of Pressure Sensitive Rubber Composites, *Polym. Degrad. Stab.*, **91**, 1417-1423, 2006.
 16. Mahmoud W.E., El-Eraki M.H.I., El-Lawindy A.M.Y., and Hassan H.H., A Novel Application of ADC/K-Foaming Agent-loaded NBR Rubber Composites as Pressure Sensor, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 541-546, 2006.
 17. Wang B., Peng Z., Zhang Y., and Zhang Y., Rheological Properties and Foam Processibility of Precured EPDM, *J. Appl. Polym. Sci.*, **101**, 3387-3394, 2006.
 18. Sombatsompop N. and Lertkamolsin P., Effects of Chemical Blowing Agents on Swelling Properties of Expanded Elastomers, *J. Elast. Plast.*, **32**, 311-328, 2000.
 19. Brennan-Craddock J.P.J., Bingham G.A., Hague R.J.M., and Wildman R.D., Impact Absorbent Rapid Manufactured Structures (IARMS), *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2008.
 20. Gibson L.J. and Ashby M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University, 1999.
 21. Li Q.M., Magkiriadis I., and Harrigan J.J., Compressive Strain at the Onset of Densification of Cellular Solids, *J. Cell. Plast.*, **42**, 371-392, 2006.
 22. San Ha N., Lu G., Shu D., and Yu T.X., Mechanical Properties and Energy Absorption Characteristics of Tropical Fruit Durian (Durio Zibethinus), *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **104**, 103603, 2020.
 23. Teh P.L., Ishak Z.A.M., Hashim A.S., Karger-Kocsis J., and Ishiaku U.S., Effects of Epoxidized Natural Rubber as a Compatibilizer in Melt Compounded Natural Rubber-Organoclay Nanocomposites, *Eur. Polym. J.*, **40**, 2513-2521, 2004.
 24. Guriya K.C. and Tripathy D.K., Morphology and Physical Properties of Closed-Cell Microcellular Ethylene-Propylene-Diene Terpolymer (EPDM) Rubber Vulcanizates: Effect of Blowing Agent and Carbon Black Loading, *J. Appl. Polym. Sci.*, **62**, 117-127, 1996.
 25. Vahidifar A., Esmizadeh E., Rodrigue D., Khonakdar H.A., and Wagenknecht U., Towards Novel Super-Elastic Foams Based on Isoprene Rubber: Preparation and Characterization, *Polym. Adv. Technol.*, **31**, 1508-1518, 2020.
 26. Zakaria Z., Ariff Z.M., Tay L.H., and Sipaut C.S., Effect of Foaming Temperature on Morphology and Compressive Properties of Ethylene Propylene Diena Monomer Rubber (EPDM) Foam, *Malaysian Polym. J.*, **2**, 22-30, 2007.
 27. Zhang Y., Rodrigue D., and Ait-Kadi A., Polyethylene-Kevlar Composite Foams I: Morphology, *Cell. Polym.*, **22**, 279-294, 2003.
 28. Miltz J. and Ramon O., Energy Absorption Characteristics of Polymeric Foams Used as Cushioning Materials, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 129-133, 1990.
 29. Maiti S.K., Gibson L.J., and Ashby M.F., Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids, *Acta Metall.*, **32**, 1963-1975, 1984.
 30. Guriya K.C. and Tripathy D.K., Deformation and Energy-absorption Characteristics of Microcellular EPDM Rubber, *J. Appl. Polym. Sci.*, **68**, 263-269, 1998.
 31. Avalue M., Belingardi G., and Montanini R., Characterization of Polymeric Structural Foams under Compressive Impact Loading by Means of Energy-Absorption Diagram, *Int. J. Impact Eng.*, **25**, 455-472, 2001.