

Polymerization  
Quarterly, 2024  
Volume 14, Number 4  
Pages 52-64  
ISSN: 2252-0449

# A Review of the Physical and Mechanical Properties of EVA/NR Foam

Sajjad Darreh Khandan, Mahmoud Razavizadeh\*, Mohammad Reza Pourhosseini, Mohammad Khabiri, and Milad Saadat Tagharoodi

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

Received: 12 May 2024, Accepted: 29 December 2024

## Abstract

Polymer foams are porous materials that have a large number of tiny air pores in their structure. Among the different types of these foams, ethylene vinyl acetate (EVA) foam is one of the most widely used in various industries such as packaging, shoes, automotive, and bumpers. The physical and mechanical properties of EVA foams are affected by changes in cell structure, concentration, type of crosslinking and blowing agents, process parameters, and other factors. To achieve the desired properties in these foams, it is possible to combine them with other rubbers. Combining two or more polymers in order to produce a product with the required properties for specific uses has gained great importance in the industry. Due to its high tensile strength, good flexibility at low temperatures, excellent resilience, resistance to permanent deformation, and good tear strength, natural rubber (NR) can be successfully blended with EVA to form foams with uniform cell size and favorable physical and mechanical performance. Nowadays, the preparation of EVA/NR foams and blending them with other polymer materials have become one of the important topics in polymer research to improve their performance under various conditions. In the present paper, the effective factors and their effects on the properties of EVA/NR foams, including physical, mechanical, and structural properties are comprehensively reviewed.

## Key Words

ethylene vinyl acetate,  
natural rubber,  
foam, EVA/NR foam,  
physical and mechanical properties

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: razavi@mut.ac.ir

## مروری بر خواص فیزیکی و مکانیکی اسفنج EVA/NR

سجاد دره‌خندان، محمود رضوی زاده، محمدرضا پورحسینی، محمد خیبری، میلاد سعادت تفرودی

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت،

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۹

اسفنج‌های پلیمری، مواد متخلخل هستند که درون ساختار آن‌ها تعداد زیادی منافذ ریز هوا وجود دارد. از میان انواع مختلف این اسفنج‌ها، اسفنج اتیلن وینیل استات (EVA) به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین آن‌ها در صنایع مختلف چون بسته‌بندی، کفش، خودروسازی و ضربه‌گیرها استفاده می‌شود. خواص فیزیکی و مکانیکی اسفنج‌های EVA متأثر از تغییرات ساختار سلولی، غلظت و نوع عوامل اتصال عرضی و پفزا، پارامترهای فرایند و سایر عوامل است. برای دستیابی به خواص مطلوب در این اسفنج‌ها، امکان ترکیب آن‌ها با سایر لاستیک‌ها وجود دارد. ترکیب دو یا چند پلیمر به‌منظور تولید محصولی با خواص مورد نیاز برای مصارف خاص، اهمیت زیادی در صنعت پیدا کرده است. لاستیک طبیعی (NR) به‌دلیل استحکام کششی زیاد، انعطاف‌پذیری مناسب در دماهای کم، جهندگی عالی، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی و استحکام پارگی مناسب، می‌تواند با موفقیت با EVA ترکیب شده و اسفنج‌هایی با اندازه سلولی یکنواخت و عملکرد فیزیکی و مکانیکی مطلوب ایجاد کند. امروزه، تهیه اسفنج‌های EVA/NR و ترکیب آن‌ها با سایر مواد پلیمری، به یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های پلیمری تبدیل شده است تا عملکرد آن‌ها را در شرایط مختلف بهبود بخشد. در این مقاله، عوامل مؤثر و اثر آن‌ها بر خواص اسفنج‌های EVA/NR، از جمله خواص فیزیکی، مکانیکی و ساختاری به‌طور جامع مرور شده است.

بسپارش

فصلنامه علمی

سال چهاردهم، شماره ۴،

صفحه ۶۴-۵۲، ۱۴۰۳

ISSN: 2252-0449

### چکیده



سجاد دره‌خندان



محمود رضوی زاده



محمدرضا پورحسینی



محمد خیبری



میلاد سعادت تفرودی

### واژگان کلیدی

اتیلن وینیل استات،

لاستیک طبیعی،

اسفنج،

اسفنج EVA/NR،

خواص فیزیکی و مکانیکی

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

razavi@mut.ac.ir

## مقدمه

اسفنج‌های پلیمری دسته مهمی از مواد هستند که ساختار آن‌ها از دو بخش ماتریس پلیمری و هوا تشکیل شده است. این مواد به دلیل نسبت استحکام به وزن زیاد، سبکی، استحکام ضربه‌ی عالی، عایق الکتریکی و عملکرد بالشتکی (خاصیت جذب، توزیع نیروها و ارتعاشات به وسیله اسفنج‌ها) به‌طور گسترده در صنایع خودروسازی، هوافضا، دریایی، الکترونیک، بسته‌بندی و سایر حوزه‌ها استفاده می‌شوند [۱،۲]. ترکیب دو یا چند پلیمر به‌منظور تولید محصول با خواص مورد نیاز برای مصرف‌های خاص، اهمیت زیادی در صنعت پیدا کرده است. ترکیب پلیمرها می‌تواند محصول منحصر به فردی با خواصی ترکیبی از اجزای جداگانه را ایجاد کند [۳]. ترکیب پلیمرها را می‌توان به‌عنوان روش مقرون به‌صرفه برای تهیه ماده‌ای با خواص مورد نیاز در کاربردهای مختلف در نظر گرفت.

آگاهی از رفتار مخلوط‌های پلیمری از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، زیرا این آگاهی می‌تواند در بهینه‌سازی عملیات شکل‌دهی مؤثر باشد. ترکیب لاستیک با پلاستیک به‌منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، به‌دلیل ناسازگاری بیشتر این ترکیب‌ها، فرایند چالش‌برانگیزی است [۴،۵]. در میان پلیمرهای موجود، اتیلن وینیل استات (EVA) یکی از پلیمرهای محبوب و پرکاربرد در صنایع مختلف محسوب می‌شود. این پلیمر دارای انعطاف‌پذیری عالی در دماهای کم بوده و مقاومت زیادی در برابر روغن‌ها، اکسایش، مواد شیمیایی و تابش فرابنفش دارد [۶]. اسفنج EVA معمولاً به‌دلیل نقص ساختار سلولی (اندازه سلول غیریکنواخت)، استحکام کششی ضعیف و مانایی فشاری زیاد محدودیت‌هایی در استفاده بالقوه برای کاربردهای اسفنجی دارد. لاستیک طبیعی (NR) به‌دلیل استحکام کششی زیاد و مقاومت مناسب در برابر تغییر شکل دائمی، می‌تواند با موفقیت با EVA ترکیب شود تا مواد اسفنجی با اندازه سلول یکنواخت و عملکرد مکانیکی مطلوب فراهم کند [۷]. در این مقاله، نمای کلی از عوامل مختلف و اثر آن‌ها بر خواص فیزیکی و مکانیکی اسفنج‌های EVA/NR ارائه می‌شود.

جدول ۱- خواص اسفنج EVA [۱۲].

مقدار	خواص گرمایی	مقدار	خواص فیزیکی و مکانیکی
۴۷-۱۰۰	دمای ذوب (°C)	۹۴۰-۹۶۰	چگالی (kg/cm <sup>3</sup> )
۷۵-۹۵	دمای نرمی (°C)	۵-۶	استحکام کششی (MPa)
۲-۳۰	سرعت جریان مذاب (g/۱۰min)	۹۰۰-۱۱۰۰	ازدیاد طول (%)
۶۵-۸۵	شاخص ذوب (g/۱۰min)	۸-۱۴	استحکام پارگی (kN/m)
۴۱-۸۹	دمای بلورش (°C)	۱۸-۶۰	مانایی فشاری (%)

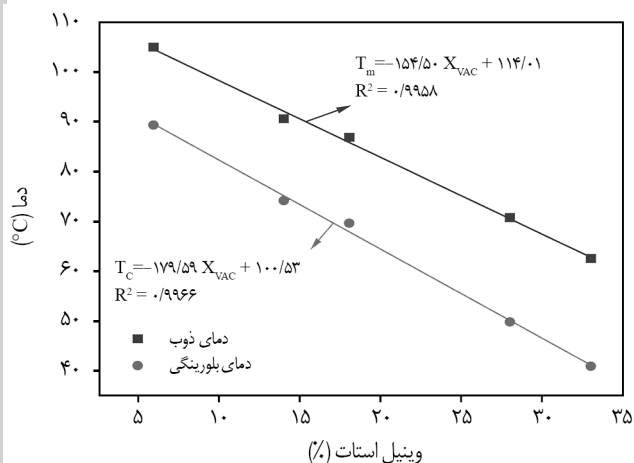
شکل ۱- ساختار شیمیایی EVA [۶].

## اتیلن وینیل استات

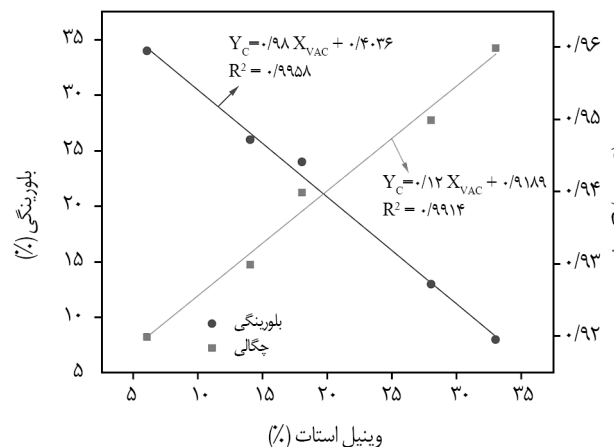
کوپلیمر EVA الاستومر گرمانرمی است که به‌طور هم‌زمان انعطاف‌پذیری و استحکام مناسبی دارد. این کوپلیمر شامل دو بخش گرمانرم و الاستومری است. با توجه به ساختار شیمیایی این ماده (شکل ۱)، بخش گرمانرم آن شامل پلیمرهایی نظیر پلی‌اتیلن کم‌چگالی (LDPE) و وینیل استات (VA) بوده و نسبت این دو بخش بر ویژگی‌های محصول نهایی اثرگذار است. به‌طور کلی، افزایش مقدار VA باعث نرم‌تر شدن پلیمر می‌شود، درحالی‌که کاهش آن، پلیمر را سفت‌تر و بلورینگی را افزایش می‌دهد [۸].

با افزایش مقدار VA در EVA، خواصی نظیر انعطاف‌پذیری و حل‌پذیری در حلال‌های آلی بهبود می‌یابد. همچنین، این افزایش می‌تواند به شفافیت بیشتر در ساختار پلیمری منجر شود. به‌عبارت دیگر، مقدار VA در ساختار پلیمر اثر مستقیم بر خواص فیزیکی و شیمیایی آن دارد. مقدار VA در EVA معمولاً بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ وزن کل متغیر است و این محدوده براساس نیازها و ویژگی‌های مدنظر در کاربردهای صنعتی مختلف تنظیم می‌شود [۹-۱۱]. خواص فیزیکی، مکانیکی و گرمایی اسفنج EVA در جدول ۱ آورده شده است.

خواص فیزیکی اسفنج EVA با توجه به مقدار VA متغیر است. این اسفنج‌ها ارزان‌تر از NR و نرم‌تر و بادوام‌تر از اسفنج‌های PE هستند. افزایش براین، اسفنج‌های EVA سبک‌تر بوده و مقاومت الکتریکی بیشتری دارند. همچنین، این اسفنج‌ها به‌دلیل فرایندپذیری، قابلیت شناوری با جذب آب کم، عایق بودن در برابر صدا و گرما، مقاومت در برابر شرایط جوی بسیار کاربردی هستند [۱۲]. اسفنج



شکل ۳- وابستگی مقدار وینیل استات به دمای ذوب و دمای بلورینگی [۱۱].



شکل ۲- وابستگی مقدار وینیل استات به چگالی و بلورینگی [۱۱].

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش مقدار VA دماهای ذوب و بلورینگی کاهش می‌یابد. ویژگی‌های ساختاری کوپلیمرهای EVA تحت تأثیر عواملی چون مقدار VA، شاخه‌های مولکولی و وزن مولکولی و توزیع آن هستند. گرانروی زیاد در تنش برشی برای کوپلیمرهای EVA با توزیع وزن مولکولی گسترده مشاهده می‌شود، اما با افزایش تنش برشی، گرانروی کوپلیمرهای EVA با توزیع وزن مولکولی باریک، کاهش می‌یابد. این کوپلیمر دارای زنجیرهای مولکولی کوتاه و بلندی هستند که هر دو به‌طور درخور توجهی بر ویژگی‌های EVA اثرگذارند.

شاخه‌های زنجیر بلند تمایل به درهم‌تنیدگی دارند که پاسخ کشسان مذاب را افزایش می‌دهند. درحالی‌که شاخه‌های زنجیر کوتاه باعث می‌شوند که بلورینگی بخش‌های PE از دست برود. درمقابل خواصی مانند نفوذپذیری گاز، شفافیت نوری، چگالی و ضریب اصطکاک بهبود می‌یابد. این ویژگی‌ها با مقدار VA مرتبط هستند، درحالی‌که سفتی و دمای ذوب به درجه بلورینگی و وزن مولکولی ماده بستگی دارند [۶].

### کاربرد و اقتصاد اسفنج EVA

در سال ۲۰۲۲، ارزش بازار جهانی اسفنج‌های پلیمری، ۱۲۸ میلیارد دلار تخمین زده شد. با سرعت رشد مرکب سالانه ۶/۳٪، پیش‌بینی می‌شود، این ارزش تا سال ۲۰۳۰ به ۱۷۰/۱ میلیارد دلار برسد. بخش بسته‌بندی دارای بزرگ‌ترین سهم از بازار است. این افزایش تقاضا به دلیل استفاده از اسفنج‌های پلیمری سبک‌وزن در بسته‌بندی مواد غذایی و لوازم الکترونیکی رخ داده است. در میان اسفنج‌های پلیمری، اسفنج‌های پلی‌اولفین بیشترین توجه را در بازار جهانی به خود جلب کرده‌اند. این به دلیل کاربرد گسترده اسفنج‌های نرم برپایه

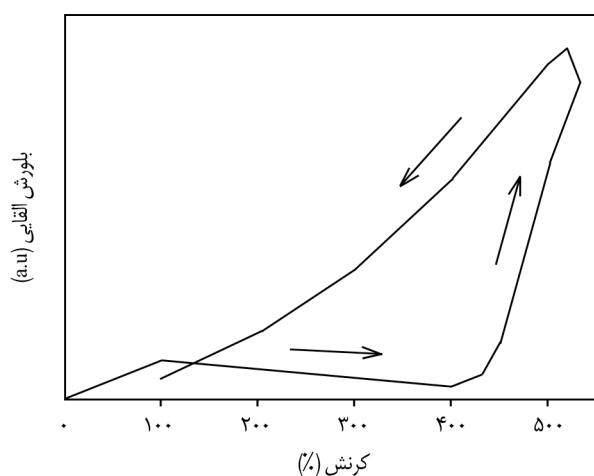
EVA دارای ساختار سلول بسته با حباب‌های کوچک هواست. این ساختار سلول-بسته باعث می‌شود، اسفنج EVA از جذب مایعات جلوگیری کند و برای کاربردهای مختلف، گزینه برتری باشد. همچنین، این اسفنج دارای کیفیت عالی در اتلاف انرژی، مقاومت در برابر اکثر مواد شیمیایی از جمله روغن، سوخت، آب نمک و مواد قلیایی است. افزون‌براین، اسفنج EVA ضدآلودگی (antipollution) و لکه است. با این حال باید گفت، این ماده با اکسندادهای قوی ناسازگار بوده و در انواع حلال‌های هیدروکربنی خطی و تری‌کلرواتان حل‌پذیر است [۱۳].

### درصد وزنی وینیل استات

ویژگی‌های فیزیکی کوپلیمرهای EVA تحت تأثیر درصد VA قرار دارند. با افزایش غلظت VA، به دلیل کاهش درجه بلورینگی، سختی، استحکام کششی، سختی سطح و مقاومت شیمیایی کوپلیمر EVA کاهش می‌یابد. در ساختار زنجیر EVA، وجود تعداد زیادی گروه VA باعث می‌شود تا بخش‌های زنجیر PE در شبکه بلوری به شدت مختل شوند. مطابق شکل ۲، این مسئله بر ترتیب و چگالی زنجیرهای PE بلند در EVA اثرگذار است و باعث کاهش بلورینگی آن می‌شود. کاهش میزان VA به افزایش نسبت زنجیر PE منجر می‌شود که برای تشکیل چیدمان منظم بخش‌های زنجیر اهمیت دارد و باعث تشکیل ناحیه بلوری بزرگ‌تر و افزایش بلورینگی می‌شود. گروه‌های قطبی VA به‌طور تصادفی روی زنجیر اصلی توزیع می‌شوند که موجب کاهش بلورینگی بخش‌های زنجیر می‌شود. بلورش EVA عمدتاً تحت تأثیر مقدار VA است. هرچه مقدار VA بیشتر باشد، EVA بلورینگی کمتری دارد. زیرا ناحیه بلوری دارای آرایش زنجیری متراکم نسبت به ناحیه بی‌شکل است [۱۱].

طرفی، به دلیل طول زنجیر و وجود گروه‌های جانبی زیاد روی زنجیر لاستیک، آزادی حرکت مولکول‌ها محدود می‌شود. بنابراین لاستیک‌ها به‌طور هم‌زمان رفتار گران‌رو و خواص کشسانی-گران روکشسانی نشان می‌دهند. لازم است برای دستیابی به خواص کشسانی و حذف رفتار گران‌روی در لاستیک‌ها، باید از حرکت لغزشی زنجیرها جلوگیری کرد. این کار با ایجاد پیوندهای عرضی به‌وجود می‌آید. بنابراین، برخلاف پلاستیک‌ها که به دلیل نداشتن خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، امکان استفاده از آن‌ها به‌شکل پخت‌نشده وجود ندارد، لاستیک‌ها نیاز به ایجاد پیوندهای عرضی و ترکیب با سایر افزودنی‌ها دارند تا این خواص بهبود یابند [۱۷]. وقتی لاستیک طبیعی تحت کشش قرار می‌گیرد، در اثر اعمال تنش، حالت بلوری در آن به‌وجود می‌آید. این پدیده در لاستیک پخت‌شده و نشده آن مشاهده می‌شود. شکل ۴، طول کشش جهت‌گیری زنجیرهای مولکولی NR را نشان می‌دهد، اما تا حدود ۴۰٪ کرنش در دمای ۲۵ °C، بلورش انجام نمی‌گیرد [۱۸].

در نواحی بیش از ۴۰٪ کرنش، بلورینگی ناشی از آن رخ می‌دهد و به‌شدت افزایش می‌یابد. هنگامی که انقباض شروع می‌شود، به نظر می‌رسد که بیشتر بلورهای ناشی از کرنش به بلورهای ثانویه تغییر می‌کنند که به تنش کمکی نمی‌کنند. این افزایش درجه بلورینگی به کرنش بستگی ندارد، بلکه وابسته به زمان است. بلورهای القاشده باید با بلورینگی‌های ایجاد شده در طول کشش متفاوت باشند [۱۸]. از میان لاستیک‌ها، NR به دلیل منشأ طبیعی، دسترس‌پذیری، تجدیدپذیری و خواص مکانیکی و الکتریکی مناسب زمینه ایده‌آل برای تولید اسفنج است. اسفنج NR به دلیل وزن سبک، عایق گرمایی خوب و جذب صدا در بسیاری از کاربردها استفاده می‌شود. این



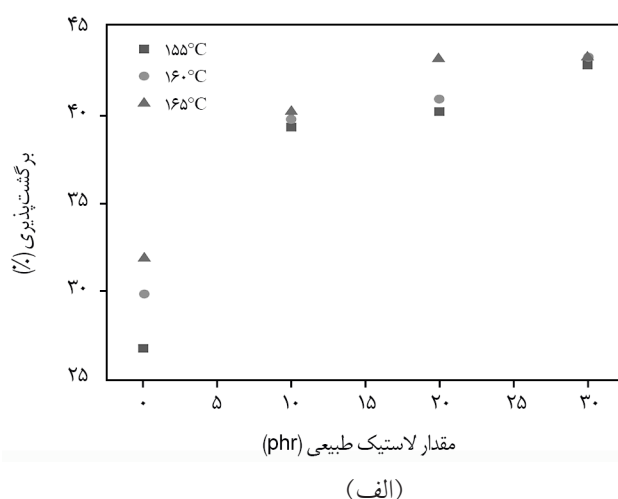
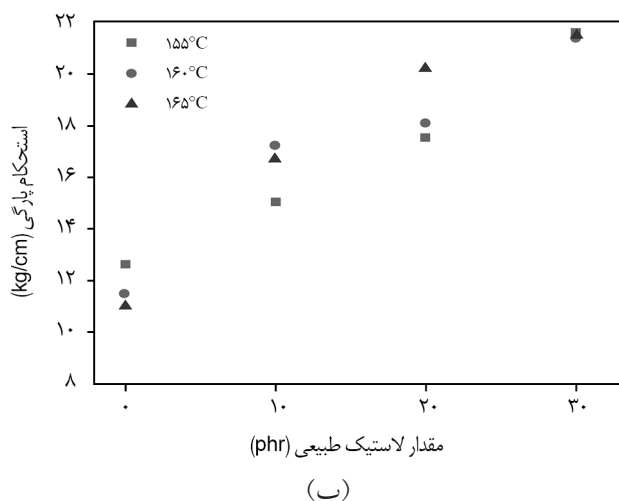
شکل ۴- رفتار بلورش-کرنش لاستیک طبیعی طی کشش در دمای ۲۵ °C [۱۸].

پلی‌اولفین در محصولات مختلف از جمله تجهیزات شناوری، ضربه‌گیرها، کفش‌ها و غیره است. اسفنج‌های EVA با توجه به مزایایی مانند بازیافت‌پذیری، پایداری و دوام طولانی‌مدت، به‌طور عمده در صنعت محبوبیت یافته‌اند. در سال ۲۰۲۱، ارزش بازار EVA نزدیک به ۸/۸۴ میلیارد دلار گزارش شد و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۲ با سرعت رشد سالانه بیش از ۲/۴٪ به ۱۱/۳۷ میلیارد دلار افزایش یابد. استفاده گسترده از EVA در بخش‌های مختلف مانند کفش و اسفنج، بسته‌بندی، کشاورزی، پنل‌های خورشیدی، داروسازی و غیره عامل اصلی رشد این بازار در آینده است.

براساس تحلیل بازار، استفاده از EVA در تولید اسفنج و کفش به‌عنوان بازارهای سودآورتر گزارش شده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ این بخش‌ها به درآمد ۲/۸ میلیارد دلاری دست یابند و با سرعت رشد ۳٪ در دوره ارزیابی گسترش پیدا کنند. با توجه به تقسیم‌بندی EVA به سه دسته کم‌چگالی، چگالی متوسط و پرچگالی، در سال ۲۰۲۵ بیش از ۳۱٪ بازار، EVA کم‌چگالی، ۲۸٪ با چگالی متوسط و تقریباً ۱۹٪ پرچگالی خواهد بود. صنایعی نظیر اسفنج، داروسازی، کفش و بسته‌بندی از EVA با چگالی متوسط بهره می‌برند. پیش‌بینی می‌شود، سهم بازار جهانی EVA تا سال ۲۰۳۲ به ۶۰۰ میلیون دلار آمریکا افزایش یابد [۱۴]. اسفنج‌های EVA به دلیل ویژگی‌های فیزیکی متنوع و روش‌های ساخت مختلف، دارای کاربردهای بالقوه‌ای هستند. پیچیدگی ساختاری، اندازه و چگالی سلول‌ها و چگالی کل اسفنج، همگی بر خواص فیزیکی این ماده اثرگذارند. به‌عنوان مثال، اسفنج‌هایی که اتصال‌های عرضی دارند، می‌توانند حجم ماده را تا ۱/۷۵ برابر تا ۱/۲ برابر حجم اولیه افزایش دهند. از کاربردهای اسفنج‌های EVA می‌توان به صنایع خودروسازی، بسته‌بندی، تولید کف‌پوش‌ها، ضربه‌گیرها و اسفنج‌های بهداشتی اشاره کرد [۱۵]. تغییرات ساختار سلول‌ها و چگالی اسفنج می‌تواند باعث بهبود و تغییر ویژگی‌های فیزیکی اسفنج‌ها شده و آن‌ها را برای استفاده در بسیاری از صنایع مختلف مناسب سازد. همچنین، اسفنج EVA اغلب در کفش‌ها استفاده می‌شود، به‌ویژه در زیره کفش که راحتی و ایمنی بیشتری را به پاها ارائه می‌دهد [۱۶].

### لاستیک طبیعی

لاستیک‌ها به دلیل داشتن دمای انتقال شیشه‌ای کم در دمای محیط رفتاری شبیه مایعات گران‌رو نشان می‌دهند. در اثر اعمال نیرو، زنجیرهای NR در دمای بیش از دمای انتقال شیشه‌ای دارای قابلیت چرخش آزاد، جابه‌جایی و پیچش‌های مختلف هستند. از



شکل ۵- تغییر: (الف) برگشت پذیری و (ب) استحکام پارگی EVA/NR با میزان NR و دمای اسفنج شدن [۱۹].

باعث ایجاد برهم کنش سطحی و سازگاری میان EVA و NR شده که به ساختار سلولی و خواص مکانیکی بهتر منجر می‌شوند. با افزایش مقدار NR، حداکثر گشتاور آمیخته به دلیل گرانروی بیشتر NR در مقایسه با EVA افزایش می‌یابد. افزودن NR به اسفنج نانوکامپوزیت EVA باعث افزایش تراکم سلولی می‌شود. این موضوع به دلیل افزایش درجه اتصال عرضی آمیخته EVA/NR است که دیواره‌های محکم سلول را در برابر فروپاشی سلول مقاوم می‌سازد. با افزایش مقدار NR، تعداد سلول‌ها بیشتر و اندازه آن‌ها کوچک‌تر می‌شود. این مسئله باعث افزایش سطح سلول‌ها و بهبود بخش جامد و تراکم اسفنج می‌شود. نتایج پژوهش Julyanon نشان می‌دهد، افزایش مقدار NR در آمیخته NR/EVA/ نانورس بهبود ساختار سلولی، افزایش چگالی، استحکام کششی و بازیابی کشسانی اسفنج را به دنبال دارد.

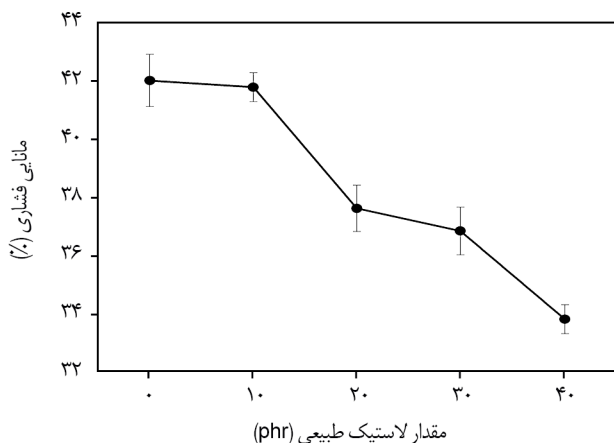
Lopattananon نقش پرکننده‌های مختلف را بر خواص اسفنج EVA/NR بررسی کرد [۲۱]. افزودن پرکننده به آمیخته EVA/NR سلول‌های بیشتر با اندازه‌های کوچک‌تر ایجاد می‌کند. بهبود سازگاری آمیخته با افزودن رس سدیم مونت‌موریلونیت (Na-MMT) موجب افزایش فاز با کشش سطحی کمتر برای تشکیل حباب و تقویت هسته سلول می‌شود. به‌طور کلی با افزایش غلظت پرکننده، تراکم سلولی نیز بیشتر می‌شود. اسفنج‌های حاوی پرکننده Na-MMT نسبت به اسفنج‌های حاوی پرکننده رس آلی، چگالی کمتری دارند. به‌طور کلی، مانایی فشاری کمتر مواد کشسانی بدین معنی است که بازیابی کشسان کمتری دارند. اسفنج‌های نانوکامپوزیتی با افزایش پرکننده تراکم سلولی بهتری دارند که امکان تولید اسفنج‌هایی با چگالی کمتری را فراهم می‌کند. طبق نتایج پژوهش Lopattananon.

ماده دارای استحکام کششی زیاد در محدوده ۲۵ MPa تا ۲۸ MPa، انعطاف پذیری خوب در دمای کم در محدوده  $-55^{\circ}\text{C}$  تا  $-50^{\circ}\text{C}$ ، مقاومت مطلوب در برابر خستگی، مقاومت خوب در برابر پارگی و سایش، مانایی فشاری کم (۱٪ تا ۳٪)، پسماند گرمایی کم و ویژگی‌های دینامیکی عالی است. درحالی‌که این ماده در برابر اکسیژن و آزون، نور فرابنفش، سوخت‌های کربنی و روغن مقاومت خوبی ندارد [۲].

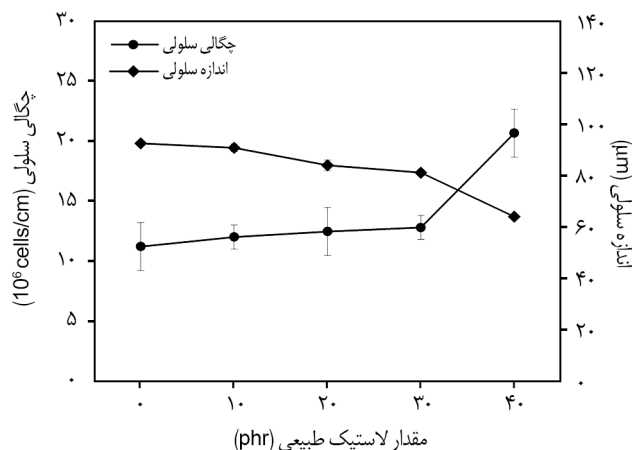
#### اسفنج EVA/NR

Kim اثر دما بر خواص فیزیکی اسفنج EVA/NR را بررسی کرد [۲۰]. نتایج نشان داد، حداکثر گشتاور با سفتی یا مدول ارتباط دارد و با افزودن NR و کاهش دمای اتصال‌دهی عرضی، سفتی آمیخته کاهش می‌یابد. این کاهش ممکن است به دلیل کاهش تراکم پیوند عرضی در دمای کم باشد. همچنین، اختلاف حداکثر و حداقل گشتاور برای آمیخته EVA/NR با افزایش مقدار NR و کاهش دمای اتصال عرضی، کاهش می‌یابد. براساس نتایج این پژوهش، کمترین چگالی اسفنج EVA در دمای  $155^{\circ}\text{C}$  حاصل شد. با این حال، کمترین چگالی آمیخته EVA/NR در همان دما به دست نیامد. با افزایش مقدار NR، جهندگی و استحکام پارگی افزایش یافته و مقاومت کششی به‌طور خطی کاهش می‌یابد. شکل ۵ نیز نتایج مطالعات Kim را نشان می‌دهد که اسفنج EVA ۹۰/NR ۱۰ در دمای  $165^{\circ}\text{C}$  دارای چگالی کمتر، بهبود جهندگی و مقاومت در برابر پارگی بیشتری نسبت به اسفنج EVA است.

Julyanon اسفنج‌های نانوکامپوزیت EVA/NR را با مقادیر مختلف نانوپرکننده تولید کرد [۲۰]. نتایج نشان داد، نانورس‌ها



(ب)

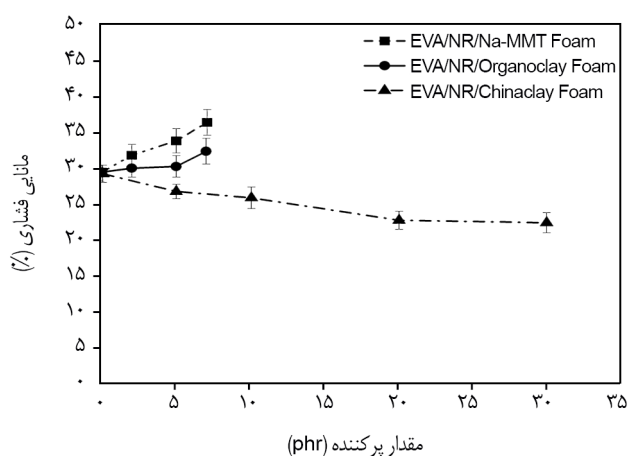


(الف)

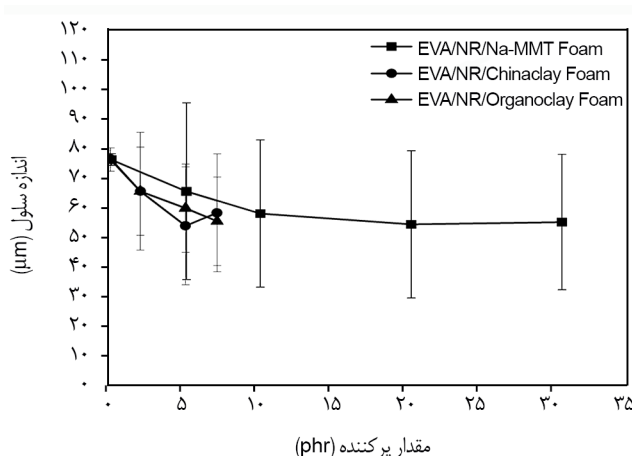
شکل ۶- (الف) مانایی فشاری و (ب) اندازه سلول و چگالی سلولی اسفنج EVA حاوی درصد وزنی‌های مختلف NR [۲۰].

در تشکیل سلول کنترل می‌شود. این شکل نشان می‌دهد، تغییرات استحکام کششی اسفنج‌های EVA/NR/PP TPV با افزایش مقدار NR پیش و پس از پیرش گرمایی را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، خواص مکانیکی پلیمرهای اسفنج به عواملی مانند فاز جامد، ساختار سلول و چگالی اسفنج، حساس هستند. استحکام کششی و افزایش طول تا پارگی مخلوط‌های EVA/NR/PP که به‌طور دینامیکی پخت شده‌اند، با افزودن NR به مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. Thongpin اثر مقدار لاستیک طبیعی اپوکسیددار شده (ENR) بر ویژگی‌ها و خواص اسفنج NR/EVA مطالعه کرد [۲۳]. استفاده از ENR به‌عنوان عامل سازگارکننده، سلول‌هایی با اندازه کوچک و چگالی بیشتر تولید می‌کند. مقدار EVA بیشتر به مقاومت بهتر در برابر پارگی منجر می‌شود. اسفنج با مقدار بیشتر NR بهتر می‌تواند

Na-MMT می‌تواند به‌عنوان سازگارکننده در ترکیب EVA ۶۰/NR ۴۰ عمل می‌کند و باعث بهبود ساختار اسفنج شود. Lopattananon اثر ترکیب لاستیک بر اسفنج‌سازی و پخت گرمانرم EVA/NR/PP را بررسی کرد [۲۲]. او EVA و NR را در ترکیبات مختلف با حفظ نسبت قسمت لاستیکی (ترکیب EVA/NR) به PP در نسبت وزنی ۶۰/۴۰ مخلوط کرد. ترکیب EVA به‌تنهایی با PP به اسفنج با چگالی سلولی کم و قطر سلول بزرگ منجر شد. با این حال با افزودن NR به ترکیب، تراکم سلول افزایش یافت و قطر سلول به‌طور درخور توجهی با کاهش نسبی EVA با NR کاهش یافت. شکل ۸، تغییر چگالی اسفنج EVA/NR/PP را با مقادیر مختلف NR نشان می‌دهد. چگالی نهایی اسفنج معمولاً با دو فرایند رقابتی یعنی هسته سلول، رشد سلول و ادغام سلولی



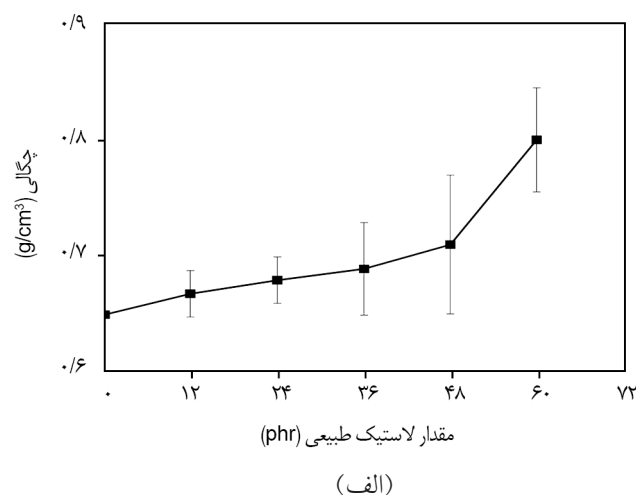
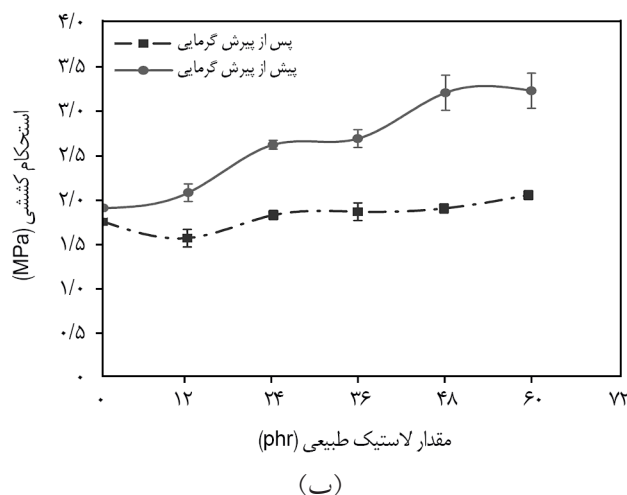
(ب)



(الف)

شکل ۷- اثر Na-MMT، رس آلی و خاک چینی بر: (الف) اندازه سلول و (ب) مانایی فشاری اسفنج EVA/NR [۲۱].



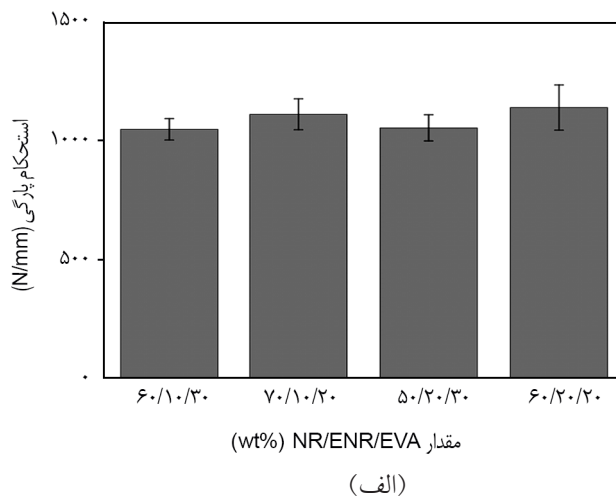
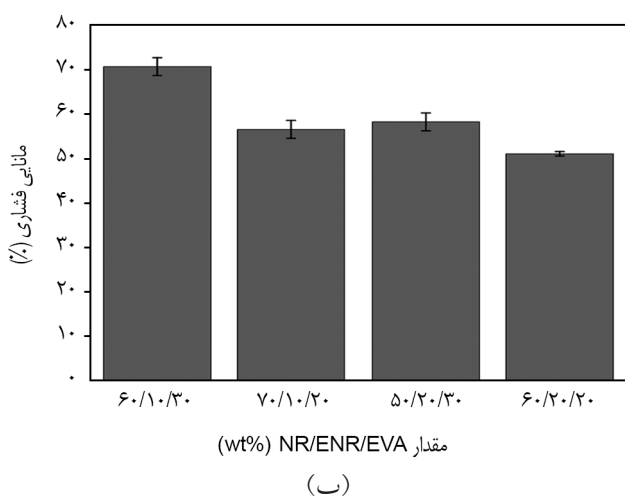


شکل ۸- (الف) چگالی و (ب) استحکام کششی اسفنج TPV EVA/NR/PP با مقادیر مختلف NR [۲۲].

EVA/NR می‌شود. افزایش تراکم سلولی اسفنج با افزایش غلظت ENR نشانگر بهبود هسته گاز آزودی‌کربن‌آمید در طول فرایند اسفنج‌سازی است. با این حال، کاهش اندک در چگالی اسفنج با افزایش ENR بسیار کمتر است. افزایش سطح مقطع سلول می‌تواند جهت‌گیری زنجیر مولکولی اسفنج‌های نانوکامپوزیت EVA/NR را سرعت بخشد که در نتیجه بهبود استحکام را به همراه دارد. مانایی فشاری اسفنج EVA/NR با افزایش مقدار ENR موجب کمتر شدن بازیابی الاستومری (elastomeric recovery) اسفنج می‌شود. کاهش چگالی باعث نازک شدن دیواره سلولی می‌شود که قابلیت کمتری برای مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی طی فشرده‌سازی دارد. در نتیجه، مانایی فشاری بیشتری را ایجاد می‌کند. افزایش مقدار ENR در آمیخته EVA/NR باعث افزایش تراکم سلول می‌شود، اما

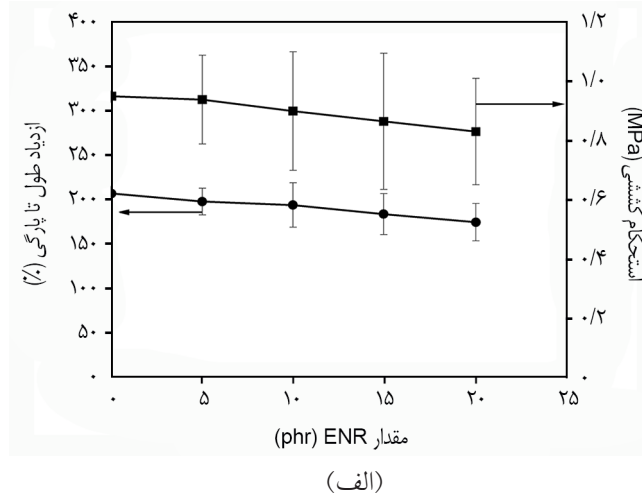
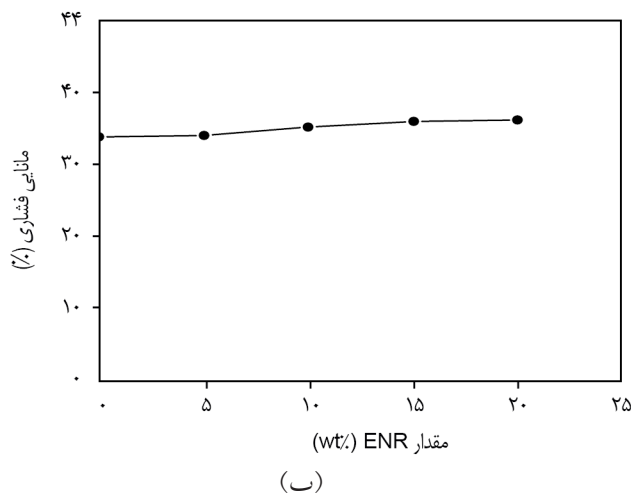
در برابر نیروی فشرده‌سازی مقاومت کند. طبق نتایج حاصل، مقدار EVA بیشتر می‌تواند تغییرشکل دائمی بهتر، یعنی مانایی فشاری بیشتری نشان دهد. همچنین، ENR می‌تواند سازگاری بهتری میان NR و EVA ایجاد و تولید اسفنج را آسان کند. ۲۰٪ ENR می‌تواند باعث توزیع طبیعی اندازه سلول اسفنج شود. مقاومت کششی به تراکم اسفنج و مقدار NR و ENR موجود در اسفنج بستگی دارد که به جهندگی بیشتر اسفنج منجر می‌شود.

Lopattananon اثر ENR بر آمیخته NR/EVA/نانورس و اصلاح ساختار آمیخته EVA/NR را از طریق افزایش سازگاری سطحی میان EVA و NR همراه با پراکندگی نانورس را مطالعه کرد [۲۴]. وجود نانورس به بهبود ساختار سلول‌های اسفنج و کاهش چگالی آن منجر شده و باعث افزایش استحکام و کاهش رسانندگی گرمایی آمیخته



شکل ۹- (الف) استحکام پارگی و (ب) مانایی فشاری اسفنج NR/ENR/EVA در مقادیر مختلف NR، ENR و EVA [۲۳].

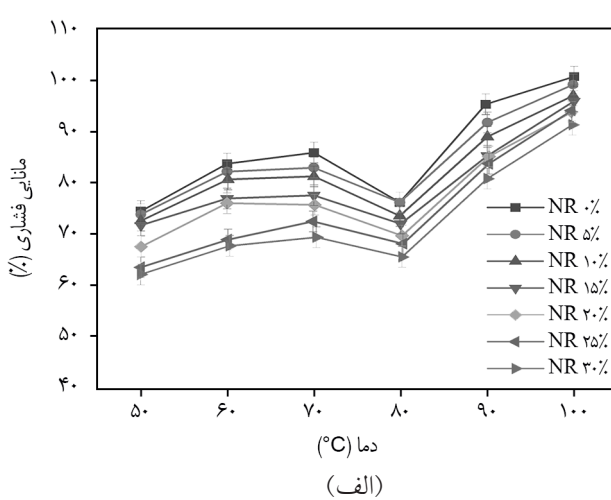
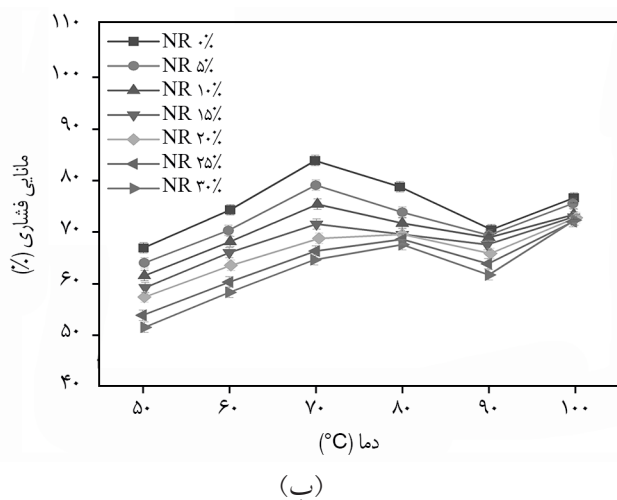




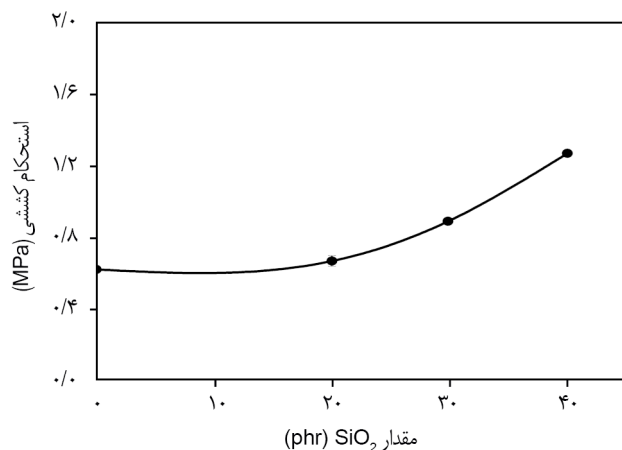
شکل ۱۰- (الف) استحکام کششی و (ب) مانایی فشاری اسفنج‌های EVA/NR/NC-ENR به‌عنوان تابعی از مقدار EN [۲۴].

در نمونه‌های EVA معمولی مقداری بود که تنها تغییر ضخامت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، با افزایش مقدار NR، مانایی فشاری تمایل به کاهش دارد. مانایی فشاری اسفنج EVA/NR با افزایش مقدار NR بدون توجه به دما کاهش می‌یابد. در پژوهشی اثر افزودن  $\text{SiO}_2$  به آمیخته EVA/NR را مطالعه کرد [۲۶]. افزودن  $\text{SiO}_2$  به تراکم سلولی بیشتر، اندازه سلول کوچک‌تر، حجم آزاد کمتر و نیز استحکام کششی و بازیابی الاستومری بیشتر منجر می‌شود. مطابق نتایج به‌دست‌آمده (شکل ۱۲ الف) مشاهده می‌شود، استحکام کششی اسفنج EVA/NR/ $\text{SiO}_2$  با افزایش  $\text{SiO}_2$  بیشتر می‌شود. همچنین، مانایی فشاری اسفنج با افزایش مقدار  $\text{SiO}_2$  کاهش می‌یابد. وجود  $\text{SiO}_2$  باعث بهبود تأخیراندازی شعله اسفنج‌های نانوکامپوزیت EVA/NR می‌شود.

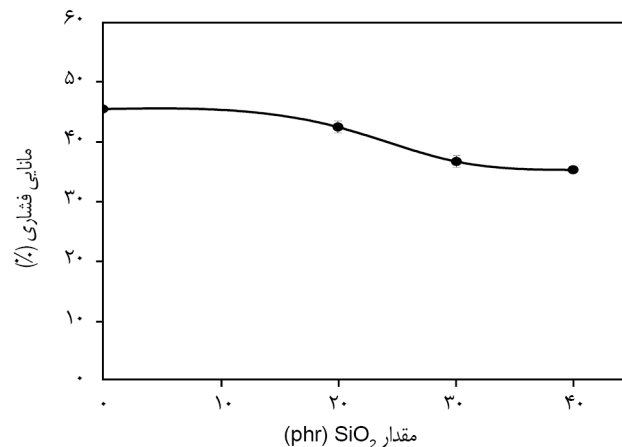
اثری بر اندازه سلول‌های اسفنج ندارد. همچنین، چگالی اسفنج با افزایش مقدار سازگارکننده به آرامی کاهش می‌یابد. آمیخته‌های اسفنج‌های نانوکامپوزیتی با مقادیر بیشتر ENR، رسانندگی گرمایی کمتری ارائه می‌دهند که نشانگر بهبود عایق گرمایی است. Jang [۲۵]، مانایی فشاری اسفنج EVA را با درصد‌های VA مختلف در دماهای متفاوت مطالعه و بررسی کرد. وی دریافت، با افزایش مقدار VA در EVA و دما، مانایی فشاری نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد، با افزایش دما به  $60^\circ\text{C}$  و  $70^\circ\text{C}$  مقدار مانایی فشاری افزایش یافته است. با افزایش دما تا  $80^\circ\text{C}$  روند کاهش در مقدار مانایی فشاری مشاهده می‌شود و در دماهای بیش از  $80^\circ\text{C}$ ، مانایی فشاری نمونه‌های EVA ۱۹٪ VA و EVA ۲۸٪ VA معکوس می‌شود. بدین معنی که ضخامت نمونه‌ها به‌جای افزایش، به‌طور درخور توجهی کاهش می‌یابد. اما مانایی فشاری



شکل ۱۱- مانایی فشاری اسفنج‌های EVA/NR با غلظت‌های مختلف NR: (الف) EVA19/NR (ب) EVA28/NR [۲۵].



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- مقایسه: (الف) مانایی فشاری و (ب) استحکام کششی اسفنج‌های نانوکامپوزیت EVA/NR/SiO<sub>2</sub> حاوی درصد وزنی‌های مختلف SiO<sub>2</sub> [۲۶].

## نتیجه‌گیری

در حین اسفنج‌سازی که باعث ادغام سلول‌ها با یکدیگر می‌شود. ترکیب EVA با لاستیک‌ها از جمله NR، خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوبی را ارائه می‌دهد. اندازه سلول یکنواخت‌تر، مانایی فشاری کمتر، استحکام فشاری و جهندگی بیشتر در ترکیب با درصد EVA60/NR40 مشاهده می‌شود. در نهایت، انتخاب و تنظیم ترکیبات و متغیرهای فرایند می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در ایجاد اسفنج‌های EVA با خواص و کاربردهای مختلف و متنوع عمل کند. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند، اسفنج‌های EVA به‌عنوان یک ماده پلیمری بسیار محبوب در صنایع مختلف استفاده می‌شوند.

اسفنج‌های EVA به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد و کاربردهای گسترده‌ای که دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و ساختاری این اسفنج‌ها تحت تأثیر ترکیبات مختلف و متغیرهای فرایند قرار می‌گیرند که این عبارات اصطلاحات مختلفی را شامل می‌شوند. وجود مقدار زیاد VA باعث نرمی پلیمر می‌شود، درحالی‌که وجود مقدار کمتر VA، پلیمر را سفت‌تر و بلوری به‌نظر می‌رساند. با توجه به استحکام مذاب ضعیف EVA

## مراجع

- Jin F.L., Zhao M., Park M., and Park S.J., Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review, *Polymers*, **11**, 953-976, 2019.
- Roštami-Tapeh-Esmail E., Vahidifar A., Esmizadeh E., and Rodrigue D., Chemistry, Processing, Properties, and Applications of Rubber Foam, *Polymers*, **13**, 1565-1618, 2021.
- Ganesh B. and Unnikrishnan G., Cure Characteristics, Morphology, Mechanical Properties, and Aging Characteristics of Silicone Rubber/Ethylene Vinyl Acetate Blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, **99**, 1069-1082, 2006.
- Ajitha A.R. and Thomas S., Compatibilization of Polymer Blends, Elsevier, 1-29, 2020.
- Jansen P., Amorim M., Gomes A.S., and Soares B.G., Use of EVA-Containing Mercapto Groups in Natural Rubber-EVA Blends. I. Mechanical, Thermal, and Morphological Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **58**, 101-107, 1995.
- Henderson A.M., Ethylene-Vinyl Acetate Copolymers: A General Review, *IEEE Electr. Insulation Mag.*, **9**, 30-38, 1993.
- Walong A., Thongnuanchan B., Sakai T., and Lopattananon N., Influence of Silicon Dioxide Addition and Processing Methods on Structure, Thermal Stability and Flame Retardancy of EVA/NR Blend Nanocomposite Foams, *Prog. Rubber*, **37**, 49-65, 2021.
- Chanda M. and Roy S.K., Industrial Polymers, Specialty Polymers, and Their Applications, *CRC*, **74**, 163-327, 2008.
- Chen N., *The Effects of Crosslinking on Foaming of EVA*, PhD. Thesis, University of Toronto, Canada, 2012.
- Díez E., Rodríguez A., Gómez J.M., and Galán J., TG and DSC as Tools to Analyse the Thermal Behaviour of EVA Copolymers, *Elastom. Plast.*, **53**, 792-805, 2021.

11. Jia Y. and Zhang J., Thermal Conductivity of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymers with Different Vinyl Acetate Contents Dependent on Temperature and Crystallinity, *Thermochim. Acta*, **708**, 141-179, 2022.
12. KK S., Verma R., and Kumar L., Ethylene-Vinyl Acetate Foam, In *Polymeric Foams: Fundamentals and Types of Foams*, *ACS Symposium Series*, **1**, 205-221, 2023.
13. Pauffer P., Gibson L.L., and Ashby M.F., Cellular Solids Structure and Amp Properties, *Pergam. Press. Cryst. Res. Technol.*, **25**, 1038-1038, 1990.
14. Global Polymer Foam Market Size and Share Report, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polymer-foam-market>, 2022.
15. Tsai Y.J. and Powers C., The Influence of Footwear Sole Hardness on the Probability of Slip-Induced Falls in Young Adults, *Gait Posture.*, **24**, 80-81, 2006.
16. Bagheri Z.S., Li Y., Fekr A.R., and Dutta T., The Effect of Wear on Slip-Resistance of Winter Footwear with Composite Outsoles: A Pilot Study, *Appl. Ergon.*, **99**, 103611, 2022.
17. Abdelmouleh M., Boufi S., Belgacem M.N., and Dufresne A., Short Natural-Fibre Reinforced Polyethylene and Natural Rubber Composites: Effect of Silane Coupling Agents and Fibres Loading, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 1627-1639, 2007.
18. Toki S., Fujimaki T., and Okuyama M., Strain-Induced Crystallization of Natural Rubber as Detected Real-Time by Wide-Angle X-ray Diffraction Technique, *Polymer*, **41**, 5423-5429, 2000.
19. Kim M.S., Park C.C., Chowdhury S.R., and Kim G.H., Physical Properties of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer/natural rubber Blend Based Foam, *J. Appl. Polym. Sci.*, **94**, 2212-2216, 2004.
20. Julyanon J., Kaesaman A., Sakai T., and Lopattananon N., Improvement of Structure and Properties of Nanocomposite Foams Based on Ethylene-Vinyl Acetate/Natural Rubber/Nanoclay: Effect of NR Addition, *Key Eng. Mater.*, **659**, 418-422, 2015.
21. Lopattananon N., Julyanon J., Masa A., Kaesaman A., Thongpin C., and Sakai T., The Role of Nanofillers on Natural Rubber/Ethylene Vinyl Acetate/Clay Nanocomposite in Blending and Foaming, *Vinyl Addit. Technol.*, **21**, 134-146, 2015.
22. Lopattananon N., Wangpradit N., Nakason C., and Kaesaman A., Effect of Rubber Composition on Foaming and Properties of EVA/NR/PP Thermoplastic Vulcanisates (TPVs), *Rubber Res.*, **17**, 80-95, 2014.
23. Thongpin C., Muanwong A., Yanyongsak J., and Lorphaitoon P., Effect of ENR Contents on Cure Characteristic and Properties of NR/ENR/EVA Foam, *Mater. Sci. Forum.*, **889**, 45-50, 2017.
24. Lopattananon N., Julyanon J., Masa A., and Thongnuanchan B., Effect of The Addition of ENR on Foam Properties of EVA/NR/Clay Nanocomposites, *Int. Polym. Proc.*, **33**, 42-51, 2018.
25. June B.K., Park G.W., Yu J.K., Kim H.J., Kim D.G., Kim M. et al., Study of Compression Set of Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Foams, *Polym.-Korea*, **44**, 264-269, 2020.
26. Walong A., Thongnuanchan B., Uthaipan N., Sakai T., and Lopattananon N., Enhancing Cellular Structure, Mechanical Properties, Thermal Stability and Flame Retardation of EVA/NR Blend Nanocomposite Foams By Silicon Dioxide-Based Flame Retardant, *Prog. Rubber*, **38**, 70-88., 2022.

## مراجع

1. Quagliano Amado J.C., Ross P.G., Murakami L.M.S., and Dutra J.C.N., Properties of Hydroxyl - Terminal Polybutadiene (HTPB) and Its Use as a Liner and Binder for Composite Propellants: A Review of Recent Advances, *Propellants Explos. Pyrotech.*, **47**, 1-19, 2022.
2. <https://www.factmr.com/report/hydroxyl-terminated-polybutadiene-htpb-market>,
3. Thomas R., Yumei D., Yuelong H., Le Y., Moldenaers P., Weimin Y., Czigany T. et al., Miscibility, Morphology, Thermal, and Mechanical Properties of a DGEBA Based Epoxy Resin Toughened with a Liquid Rubber, *Polymer*, **49**, 278-294, 2008.
4. Thomas R., Sinturel C., Pionteck J.R., Puliylalil H., and Thomas S., In-Situ Cure and Cure Kinetic Analysis of a Liquid Rubber Modified Epoxy Resin, *Ind. Eng. Chem.*, **51**, 12178-12191, 2012.
5. Ozturk A., Kaynak C., and Tincer T., Effects of Liquid Rubber Modification on the Behaviour of Epoxy Resin, *Eur. Polym. J.*, **37**, 2353-2363, 2001.
6. Latha P., Adhinarayanan K., and Ramaswamy R., Epoxidized Hydroxy-Terminated Polybutadiene-Synthesis, Characterization and Toughening Studies, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **14**, 57-61, 1994.
7. Kou Y., Zhou W., Li B., Dong L., Duan Y.-E., Hou Q., Liu X. et al., Enhanced Mechanical and Dielectric Properties of an Epoxy Resin Modified with Hydroxyl-Terminated Polybutadiene, *Compos. Part A: Appl.*, **114**, 97-106, 2018.
8. Abdollahi H., Salimi A., and Barikani M., Synthesis and Architecture Study of a Reactive Polybutadiene Polyamine as a Toughening Agent for Epoxy Resin, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**, 2016.
9. Abdollahi H., Salimi A., and Barikani M., Synthesis and Architecture Study of a Reactive Polybutadiene Polyamine as a Toughening Agent for Epoxy Resin, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**, 44061-44074, 2016.
10. Kar S. and Banthia A.K., Synthesis and Evaluation of Liquid Amine - Terminated Polybutadiene Rubber and Its Role in Epoxy Toughening, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 2446-2453, 2005.
11. Tian X., Geng Y., Yin D., Zhang B., and Zhang Y., Studies on the Properties of a Thermosetting Epoxy Modified with Chain-Extended Ureas Containing Hydroxyl-Terminated Polybutadiene, *Polym. Test.*, **30**, 16-22, 2011.
12. Barcia F.L., Amaral T.P., and Soares B.G., Synthesis and Properties of Epoxy Resin Modified with Epoxy-Terminated Liquid Polybutadiene, *Polymer*, **44**, 5811-5819, 2003.
13. Januszewski R., Dutkiewicz M., Nowicki M., Szoltyga M., and Kownacki I., Synthesis and Properties of Epoxy Resin Modified with Novel Reactive Liquid Rubber-Based Systems, *Ind. Eng. Chem.*, **60**, 2178-2186, 2021.
14. Hosseini S.R. and Alavi Nikje M.M., Synthesis and Characterization of Novel Epoxy - Urethane Coating and Its Graphene Nanocomposites, *Polymer Compos.*, **44**, 2794-2803, 2023.
15. Nirmal C., Maithi S., Padmavathi T., Vanaja A., and Rao R., Studies on Hydroxyl Terminated Polybutadiene Toughened Phenolic Resin, *High Perform. Polym.*, **18**, 57-69, 2006.
16. Megiatto Jr. J.D., Ramires E.C., and Frollini E., Phenolic Matrices and Sisal Fibers Modified with Hydroxy Terminated Polybutadiene Rubber: Impact Strength, Water Absorption, and Morphological Aspects of Thermosets and Composites, *Ind. Crops Prod.*, **31**, 178-184, 2010.
17. Jafari F., Eslami-Farsani R., and Khalili S., Optimization of Mechanical and Thermal Properties of Elastomer Modified Carbon Fibers/Phenolic Resin Composites, *Fibers Polym.*, **22**, 1986-1994, 2021.
18. Patri M., Rath S., and Suryavansi U., A Novel Polyurethane Sealant Based on Hydroxy - Terminated Polybutadiene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **99**, 884-890, 2006.
19. Barcia F.L., Soares B.G., and Sampaio E., Adhesive Properties of Epoxy Resin Modified by End-Functionalized Liquid Polybutadiene, *J. Appl. Polym. Sci.*, **93**, 2370-2378, 2004.
20. Sheikhy H., Shahidzadeh M., and Ramezanzadeh B., An Evaluation of the Mechanical and Adhesion Properties of a Hydroxyl-Terminated Polybutadiene (HTPB)-Based Adhesive Including Different Kinds of Chain Extenders, *Polym. Bull.*, **72**, 755-777, 2015.
21. Sasidharan Achary P., Joseph D., and Ramaswamy R., Study on a Vinyl Ester/Methyl Methacrylate Based Reactive Acrylic Adhesive Toughened by Hydroxyl Terminated Polybutadiene, *J. Adhes.*, **34**, 121-136, 1991.
22. Khalaf E.S., Hassanein S.M., and Hadhoud M.K., Investigation of Mechanical Behavior for a Selected Rubber-Modified Epoxy Adhesive, *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology*, Cairo, 1-10, 26-28 May, 2009.
23. Akram N., Gurney R.S., Zuber M., Ishaq M., and Keddie J.L., Influence of Polyol Molecular Weight and Type on the Tack and Peel Properties of Waterborne Polyurethane Pressure-Sensitive Adhesives, *Macromol. React. Eng.*, **7**, 493-503, 2013.
24. Akram N., Zia K.M., Saeed M., Usman M., and Saleem S., Impact of Macrodiols on the Adhesion Strength of

- Polyurethane Pressure-Sensitive Adhesives, *J. Appl. Polym. Sci.*, **135**, 46635-46642, 2018.
25. Akram N., Zia K.M., Saeed M., Khosa M.K., Khan W.G., and Arain M.A., Compositional Effect on the Deformation Behavior of Polyurethane Pressure-Sensitive Adhesive Thin Films, *J. Appl. Polym. Sci.*, **137**, 48395-48402, 2020.
  26. Gu J., Zhang C.F., Bai Y.X., Zhang L., Sun Y.P., and Chen H.L., Divinyl Benzene Cross-Linked Htpb-Based Polyurethaneurea Membranes for Separation of P/O Xylene Mixtures by Pervaporation, *J. Appl. Polym. Sci.*, **123**, 1968-1976, 2012.
  27. Bai Y., Qian J., Yin J., Zhai Z., and Yang Y., HTPB-Based Polyurethaneurea Membranes for Recovery of Aroma Compounds from Aqueous Solution by Pervaporation, *J. Appl. Polym. Sci.*, **104**, 552-559, 2007.
  28. Malkappa K. and Jana T., Hydrophobic, Water-Dispersible Polyurethane: Role of Polybutadiene Diol Structure, *Indust. Eng. Chem.Res.*, **54**, 7423-7435, 2015.
  29. Liu Y., Liu J., Wang Z., Yuan Y., Hua J., and Liu K., Robust and Durable Superhydrophobic and Oil-Absorbent Silica Particles with Ultrahigh Separation Efficiency and Recyclability, *Micropor. Mesopor. Mat.*, **335**, 111772-111783, 2022.
  30. Nozad E., Marjani A.P., and Mahmoudian M., A Novel and Facile Semi-IPN System in Fabrication of Solvent Resistant Nano-filtration Membranes for Effective Separation of Dye Contamination in Water and Organic Solvents, *Sep. Purif. Technol.*, **282**, 120121-120135, 2022.
  31. Zhou W. and Cai J., Mechanical and Dielectric Properties of Epoxy Resin Modified Using Reactive Liquid Rubber (HTPB), *J. Appl. Polym. Sci.*, **124**, 4346-4351, 2012.
  32. Dong L., Zhou W., Sui X., Wang Z., Cai H., Wu P., Zuo J. et al., A Carboxyl-Terminated Polybutadiene Liquid Rubber Modified Epoxy Resin with Enhanced Toughness and Excellent Electrical Properties, *J. Electron. Mater.*, **45**, 3776-3785, 2016.
  33. Soares B., Leyva M., Moreira V., Barcia F., Khashtgir D., and Simão R., Morphology and Dielectric Properties of an Epoxy Network Modified by End-Functionalized Liquid Polybutadiene, *J. Polym. Sci. B: Polym. Phys.*, **42**, 4053-4062, 2004.
  34. Li Z., Yang F., Yuan J., Cong L., and Yu M., Study on Preparation and Pavement Performance of Polyurethane Modified Asphalt Based on In-Situ Synthesis Method, *Constr. Build. Mater.*, **309**, 125196-125207, 2021.
  35. Han X., Mao S., Xu S., Cao Z., Zeng S., and Yu J., Development of Novel Composite Rejuvenators for Efficient Recycling of Aged SBS Modified Bitumen, *Fuel*, **318**, 123715-123726, 2022.
  36. Huo L., Guo J., Yang F., Pan C., Hu H., Zhang K., Zhou H. et al., Esterification of Hydrogenated Hydroxyl-Terminated Polybutadiene as a High-Performance Lubricating Oil, *Ind. Eng. Chem.*, **61**, 2685-2692, 2022.
  37. Huo L., Guo J., Yang F., Pan C., Hu H., Zhang K., Zhou H. et al., Design of Linear Polymer-Based Liquid Lubricants by a Strategy of Complementary Advantages, *Polymer*, **265**, 125592, 2023.
  38. Ying W.B., Yu Z., Kim D.H., Lee K.J., Hu H., Liu Y., Kong Z. et al., Waterproof, Highly Tough, and Fast Self-healing Polyurethane for Durable Electronic Skin, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 11072-11083, 2020.
  39. Murali Sankar R., Saha S., Seeni Meera K., and Jana T., Functionalization of Hydroxyl Terminated Polybutadiene with Biologically Active Fluorescent Molecule, *Bull. Mater. Sci.*, **32**, 507-514, 2009.