

## Dependence of Dielectric Constant and Mechanical Properties of Expanded Polystyrene Foam on Cell Wall Thickness

Dariusz Gudarzi, Seyed Mohammad Hosseini, Mohammad Reza Pourhosseini\*,  
Mahmoud Razavizadeh, Mohammad Khabiri, Milad Saadat Taghroodi

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

Received: 31 July 2023, accepted: 6 April 2024

### ABSTRACT

**Hypothesis:** The technology of preparing materials with desired dielectric constants is used in designing and manufacturing telecommunication equipment. Foaming of the polymers is an effective method to reduce their dielectric constant further, as the influence of the microstructural characteristics of the expanded polystyrene foams is important for their dielectric characteristics and mechanical properties. This article focuses on the effect of cell wall thickness of the expanded polystyrene foams on their dielectric constant, loss factor, hardness and resilience.

**Methods:** Many samples of the expanded polystyrene foam with different porosity and overall thickness values were prepared using a specific thermal procedure in a programmable oven. At first, the physical properties such as density and porosity of the expanded polystyrene foams were measured. Next, their microstructural characteristics such as the average cell wall thickness of the expanded polystyrene foams were investigated using a scanning electron microscope. The dielectric constant and loss factor of the samples were assessed with a vector network analyzer with a lens horn antenna. The mechanical properties of the expanded polystyrene foams were evaluated according to Shore D hardness, and the value of mechanical energy stored in them was measured by a resilience tester.

**Findings:** By increasing cell wall thickness in samples at equal overall thickness, the dielectric characteristics such as dielectric constant and dielectric loss factor increase by 12% and 53%, respectively. Moreover, the mechanical properties such as hardness and resilience reveal an increase of 40 and 42%, respectively, due to the increase of cell wall thickness in samples at the same overall thickness. While the dielectric constant and the dielectric loss factor decrease with the reduction of the overall thickness at the same cell wall thickness, the variation of the overall thickness depicts no effect on the hardness and resilience.

#### Keywords:

dielectric constant,  
mechanical properties,  
expanded polystyrene,  
foam,  
cell wall thickness

(\*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: [mrp\\_polyrc@mut.ac.ir](mailto:mrp_polyrc@mut.ac.ir)

#### Please cite this article using:

Gudarzi D., Hosseini S.M., Pourhosseini M.R., Razavizadeh M., Khabiri M., Saadat Taghroodi M., Dependence of Dielectric Constant and Mechanical Properties of Expanded Polystyrene on Cell Wall Thickness, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **36**, 509-519, 2023-2024.

# وابستگی ثابت دی‌الکتریک و خواص مکانیکی اسفنج پلی‌استیرن انبساطی به ضخامت دیواره سلول

دسترس‌پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و ششم، شماره ۵،

صفحه ۵۱۹-۵۰۹، ۱۴۰۲

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2024.3440.2254

داریوش گودرزی، سید محمد حسینی، محمدرضا پورحسینی\*، محمود رضوی‌زاده،  
محمد خیبری، میلاد سعادت تفرودی

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

دریافت: ۱۴۰۲/۵/۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۱۸

## چکیده

**فرضیه:** فناوری تهیه اسفنج‌های پلیمری با ثابت دی‌الکتریک دلخواه در طراحی و ساخت تجهیزات مخابراتی کاربرد دارد. از آنجا که اثر مشخصه‌های ریزساختاری اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی (انبساط‌یافته) بر مشخصات دی‌الکتریک و خواص مکانیکی شایان توجه است. موضوع این مقاله به اثر ضخامت دیواره سلول اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی بر ثابت دی‌الکتریک، ضریب اتلاف، سختی و جهندگی اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی متمرکز شده است.

**روش‌ها:** تعدادی نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن انبساطی با مقدار تخلخل و ضخامت کل متفاوت با استفاده از برنامه مشخص گرمایی در کوره برنامه‌پذیر تهیه شدند. ابتدا، خواص فیزیکی از قبیل جرم حجمی و مقدار تخلخل اسفنج پلی‌استیرن انبساطی تعیین شد و سپس مشخصه‌های ریزساختاری آن‌ها مانند میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها با میکروسکوپ الکترونی پویشی بررسی شدند. ثابت و ضریب اتلاف دی‌الکتریک نمونه‌های اسفنجی حاصل با دستگاه تحلیگر شبکه‌ای برداری دارای آنتن شیبوری لنزدار ارزیابی شد و خواص مکانیکی نمونه اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی طبق سختی‌سنج شور D و مقدار انرژی مکانیکی قابل ذخیره با دستگاه جهندگی سنجش شدند.

**یافته‌ها:** مشخصه‌های دی‌الکتریکی مانند ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف دی‌الکتریک اسفنج پلی‌استیرن با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها در نمونه‌های با ضخامت کل برابر، به ترتیب تا ۱۲٪ و ۵۳٪ افزایش نشان می‌دهند. همچنین خواص مکانیکی نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن از قبیل سختی و جهندگی نیز با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها در نمونه‌های با ضخامت کل برابر، به ترتیب ۴۰٪ و ۴۲٪ افزایش نشان می‌دهند. در حالی که ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف دی‌الکتریک با کاهش ضخامت کل نمونه پلی‌استیرن اسفنجی حین ثبات ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج پلی‌استیرن کاهش می‌یابد، ضخامت کل نمونه اسفنج پلی‌استیرن اثری بر مقدار سختی و جهندگی نشان نداد.

## واژه‌های کلیدی

ثابت دی‌الکتریک،

خواص مکانیکی،

پلی‌استیرن انبساطی،

اسفنج،

ضخامت دیواره سلول

\*مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

## مقدمه

با توسعه سریع شبکه ارتباطی 5G، مواد پلیمری با ثابت دی‌الکتریک کمتر از ۲/۵ و ضریب اتلاف دی‌الکتریک کم برای استفاده در دستگاه‌های ارتباطی با سرعت زیاد کاربرد پیدا کرده‌اند [۱-۲]. هنگامی که مقدار ثابت دی‌الکتریک مواد پلیمری به ۱/۵ کاهش یابد، سرعت انتقال سیگنال تا ۱/۶ برابر افزایش می‌یابد [۳]. در نتیجه، پلیمرهای با ثابت دی‌الکتریک کم، مواد جذابی برای استفاده در شبکه‌های ارتباطی با سرعت زیاد، مانند دی‌الکتریک‌های لایه‌ای استفاده‌شده در آنتن‌ها، کابل‌های ارتباطی و تجهیزات مختلف مخابراتی هستند [۴]. اسفنج‌های پلی‌استیرن به دلیل داشتن ویژگی‌هایی نظیر قیمت بسیار کم، خواص مکانیکی مناسب، عایق بودن گرمایی [۱]، قابلیت جذب انرژی ضربه قابل قبول [۲]، خواص دی‌الکتریک [۳] و جذب امواج [۴] کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف نظیر خودروسازی [۵]، بسته‌بندی [۳، ۶، ۷]، ساختمان‌سازی [۸] و مخابرات [۹] دارند.

تهیه اسفنج از مواد پلیمری، روش بسیار مؤثری برای کاهش ثابت دی‌الکتریک آن‌هاست [۱۰-۱۴]. Chen و همکاران [۱۵] اثر غلظت‌های مختلف (۱۰٪ وزنی تا ۴۰٪ وزنی) نیکل-روی-کبالت فریت (NZCFO) را بر خواص مغناطیسی و استحکام فشاری اسفنج پلی‌متاکریل‌ایمید (PMI) بررسی کردند. آنان دریافتند، در بسامد ۱۲ GHz با افزایش مقدار نیکل-روی-کبالت فریت (NZCFO) میانگین اندازه سلول از ۱۷۰ μm تا ۳۰۰ μm افزایش و ثابت دی‌الکتریک از ۲/۷۴ تا ۲/۸۳ افزایش می‌یابد. Tran و همکاران [۱۶] اثر پارامترهای شکل‌شناسی (اندازه سلول، چگالی سلولی و ضخامت دیواره) اسفنج میکروسولولی (PMMA/MWCNTs) را بر رسانندگی الکتریکی در مقدار نانوذره ثابت بررسی کرده و مقادیر رسانندگی الکتریکی را با حالت‌های اسفنج‌نشده مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند، برای دستیابی به اسفنج‌های مشابه با ثابت دی‌الکتریک کم، اندازه سلول کوچک، چگالی سلول زیاد و ضخامت دیواره نازک مورد نیاز است. در پژوهشی Ma و همکاران [۱۷] خواص مکانیکی و دی‌الکتریک فشاری، دینامیکی و دی‌الکتریک اسفنج‌های پلی‌کربنات میکروسولولی با توزیع‌های اندازه سلولی تک‌وجهی یا دووجهی ساخته‌شده با کربن دی‌اکسید ابربحرانی سازگار با محیط را بررسی کردند. این پژوهش آشکار کرد، خواص دی‌الکتریک اسفنج‌های پلی‌کربنات میکروسولولی فقط به تخلخل کل بستگی دارد و به توزیع اندازه سلول یا ریزساختار اسفنج پلی‌کربنات بستگی ندارد و با افزایش تخلخل، ثابت دی‌الکتریک اسفنج پلی‌کربنات میکروسولولی به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین چگالی نسبی بیشتر به مدول ذخیره و اتلاف دی‌الکتریک زیادتر منجر می‌شود و اسفنج‌های دوساختاری (bimodal) به‌طور

شایان توجهی خواص مکانیکی فشاری و دینامیکی را در مقایسه با اسفنج‌های تک‌ساختاری (unimodal) با چگالی نسبی یکسان بهبود می‌بخشند.

Wang و همکاران [۱۸] خواص مکانیکی و دی‌الکتریک اسفنج‌های پلی‌آریلن اترنیتریل (PEN) را بررسی کردند و دریافتند، با افزایش اندازه سلول از ۱۰۰ μm به ۳۶۰ μm ثابت دی‌الکتریک از ۱/۲۵ به ۱/۳۳ در ۱۰۰۰ Hz افزایش می‌یابد. افزون بر این، اسفنج‌های PEN خواص مکانیکی بسیار خوبی را با مدول ویژه تا ۱۰۲۷ MPa·cm<sup>3</sup>/g و ازدیاد طول در شکست بیش از ۲۲٪ نشان می‌دهند. همچنین این اسفنج‌ها به اندازه کافی انعطاف‌پذیرند تا بدون شکستگی به‌طور مکرر خم و راست شوند. دستیابی هم‌زمان به خواص دی‌الکتریک بسیار کم و عملکرد مکانیکی عالی، رقابت اسفنج‌های PEN را برای کاربرد در دستگاه‌های میکروالکترونیک تشدید می‌کند.

خواص مختلف اسفنج‌های پلی‌استیرن به‌ویژه خواص مکانیکی و ثابت دی‌الکتریک به هر دو خواص ماتریس پلیمری و ساختار سلولی بستگی دارد. اندازه سلول‌ها، تراکم سلول‌ها، ضخامت دیواره سلول‌ها، همگنی ساختار سلولی و مقدار تخلخل معیارهای مهم در بررسی کیفیت ساختار سلولی اسفنج‌های پلی‌استیرن است [۱۹]. Liao و همکاران [۲۰] اثر انواع گرافن (بلند، کوتاه و ترکیبی) بر فرایند اسفنج‌شدن، ساختار سلولی، ثابت دی‌الکتریک و آستانه نفوذ را در فرایند اسفنج نانوکامپوزیتی گرافن-پلی‌استیرن با استفاده از کربن دی‌اکسید در دما و فشار مختلف مطالعه کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد، یک درصد حجمی گرافن بیشترین ثابت دی‌الکتریک در اسفنج پلی‌استیرن ایجاد می‌کند. همچنین مشخص شد، اسفنج‌های تهیه‌شده در شرایط اسفنج‌سازی ۷۰°C، ۲۰ MPa و ۸۰°C سلول‌های کوچک‌تری داشته و تراکم سلول و رسانندگی الکتریکی بیشتری با افزودن گرافن نشان می‌دهند.

تاکنون در مقالات مختلف اثر ریزساختار بر خواص مکانیکی و دی‌الکتریک اسفنج‌های پلیمری بررسی شده است. در مطالعه حاضر افرون بر اثر ریزساختار اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی، اثر ضخامت نمونه اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی بر خواص دی‌الکتریک و خواص مکانیکی بررسی شده است. به‌همین منظور ابتدا اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی با ضخامت و ریزساختار متفاوت به روش‌های مختلف تهیه شد. سپس، عوامل ساختاری آن‌ها از قبیل میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها و مقدار تخلخل اسفنج پلی‌استیرن انبساطی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی پویشی بررسی شد و اثر آن‌ها بر ثابت دی‌الکتریک و خواص مکانیکی اسفنج پلی‌استیرن انبساطی ارزیابی شد.

## تجربی

## مواد

برای ساخت اسفنج پلی استیرن انبساطی از محصول پلی استیرن انبساطی پتروشیمی تبریز با کد مشخصه HS-321، چگالی  $0.3 \text{ g/cm}^3$ ، اندازه دانه  $1-0.7 \text{ mm}$  و  $5/2\%$  وزنی پنتان طبیعی استفاده شد.

## دستگاهها و روشها

ساخت نمونهها با دو قالب فلزی استوانه‌ای انجام شد. قطر داخلی قالبها  $20 \text{ cm}$  و ارتفاع قالب اول  $1 \text{ cm}$  و ارتفاع قالب دوم  $3 \text{ cm}$  است. قاعده پایین و بالای قالب را دو صفحه فلزی تشکیل می‌دهد که توسط تعدادی پیچ یکدیگر ملحق می‌شوند. در صفحه فلزی بالا و پایین تعدادی حفره (۱۵ عدد) ریز به قطر  $1 \text{ mm}$  برای خروج گاز پنتان دانه‌های پلی استیرن انبساطی ایجاد شد. با توجه به حجم مشخص قالبها و دانستن چگالی نمونه‌های مورد نیاز، وزن دانه‌های پلی استیرن انبساطی برای تولید نمونه‌های با چگالی‌های  $0.2$ ،  $0.3$ ،  $0.4$  و  $0.5$  محاسبه و توزین شد. در مرحله بعد برای تولید هر نمونه، دانه‌های پلیمر درون قالب به روش دستی ریخته شد و در کوره طی فرایند شکل‌دهی، پخت نمونه به صورت دو مرحله‌ای انجام شد. بدین صورت که ابتدا قالب در کوره در دمای  $100^\circ\text{C}$  و زمان  $60 \text{ min}$  قرار داده شده و در مرحله دوم پس از گذشت  $60 \text{ min}$  دمای آن از  $100^\circ\text{C}$  به  $115^\circ\text{C}$  تغییر یافت و در همان دما به مدت  $35 \text{ min}$  باقی ماند. سپس، قالب از کوره خارج و در معرض جریان هوای سرد قرار داده شد. پس از رسیدن دمای قالب به دمای محیط پیچ‌های قالب باز شده و نمونه از آن خارج شد. به هر نمونه یک کد داده شد.

برای تولید نمونه‌های EPS1، EPS2، EPS3 و EPS8 با چگالی  $0.3 \text{ g/cm}^3$ ، از قالب با ارتفاع  $3 \text{ cm}$  استفاده شد و برای نمونه‌های EPS4، EPS5، EPS6 و EPS7 با چگالی‌های به ترتیب  $0.2$ ،  $0.3$ ،  $0.4$  و  $0.5 \text{ g/cm}^3$  از قالب با ارتفاع  $1 \text{ cm}$  استفاده شد. برای ایجاد چگالی‌های کم و ایجاد تفاوت در ضخامت دیواره سلولها مقداری از دانه‌های پلی استیرن پیش از فرایند پخت پیش‌پف شده و هنگام بارگذاری در قالب با دانه‌های پیش‌پف نشده با نسبت محاسبه‌شده، مخلوط و درون قالب ریخته شد و فرایند پخت انجام شد.

## چگالی

چگالی اسفنج مطابق استاندارد ASTM D-3575 محاسبه شد. مقدار تخلخل  $V_{ir}$  از معادله (۱) محاسبه شد.  $\rho_f$  چگالی اسفنج و  $\rho_p$  چگالی پلیمر است:

$$V_{ir} = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad (1)$$

## میکروسکوپ الکترونی پویشی

میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل XL300 ساخت شرکت Philips هلند، به کمک نرم‌افزار Image-j برای بررسی ساختار نمونه‌ها به کار گرفته شد. تعداد سلول در واحد حجم یا چگالی سلولی، اندازه متوسط سلول، کسر حجمی سلولها و ضخامت دیواره سلولی به ترتیب از معادله‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) به دست آمد [۲۱]:

$$N = \frac{6}{\pi d^3} \left( \frac{\rho_{Ps}}{\rho_{Foam}} - 1 \right) \quad (2)$$

$$d = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (3)$$

$$V_f = \frac{\rho_{Foam}}{\rho_{Ps}} \quad (4)$$

$$\delta = d \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}}} - 1 \right) \quad (5)$$

$N$ ،  $d$  و  $V_f$  به ترتیب تعداد سلول در واحد حجم یا چگالی سلول، اندازه متوسط سلول و کسر حجمی سلولهاست.

## خواص دی الکتریک

اجزای اصلی در اندازه‌گیری خواص دی الکتریک شامل دستگاه تحلیل گر شبکه و آنتن شیبوری لنزدار است. برای اندازه‌گیری مشخصات دی الکتریک نمونه از سامانه اندازه‌گیری متشکل از دو آنتن باند  $x$  لنزدار روبه‌روی هم استفاده شد. مقادیر بخش حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف نمونه‌ها به وسیله تابع طراحی شده در نرم‌افزار Matlab برای تعیین مقادیر نام‌برده از پارامترهای پراکنندگی به دست آمده است. برای محیط رسانای خطی معادله ماکسول و ارتباط بخش حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف مطابق با معادله‌های (۶) تا (۸) است [۲۲]:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (6)$$

$\epsilon_0$  و  $\epsilon_r$  به ترتیب گذردهی و گذردهی خلأ مواد ثابت دی الکتریک هستند و معادله:

$$\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r \quad (7)$$

نسبت مقدار اتلاف به ذخیره ضریب اتلاف است و با معادله (۸) تعریف می‌شود:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \quad (8)$$

به دست می‌آید. برخی اسفنج‌های تولیدی با میانگین ضخامت دیواره سلول‌های برابر و برخی دارای ساختار کنترل‌شده با افزایش تدریجی ضخامت دیواره سلول‌ها بودند.

تصاویر میکروسکوپی به خوبی نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها، تراکم سلول‌ها تقریباً ۷۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین نتایج در جدول ۱ نشان می‌دهد، با افزایش مقدار تخلخل از ۵۰٪ به ۸۰٪، میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها، حدود ۲۱  $\mu\text{m}$  افزایش می‌یابد.

### خواص دی‌الکتریک

در جدول ۲ نتایج آزمون اندازه‌گیری مشخصات دی‌الکتریک نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن انبساطی در بسامد ۱۰ Hz نشان داده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، ثابت دی‌الکتریک نمونه‌ها از ۱/۲۱۹ تا ۱/۴۳۰ در تغییر است. در حالی که همه نمونه‌ها از جنس پلی‌استیرن انبساطی هستند، تغییر در تخلخل، ضخامت دیواره سلول‌ها و تراکم سلول‌های نمونه‌ها باعث تغییر قابل ملاحظه در ثابت دی‌الکتریک آن‌ها شده است. مقایسه نمونه‌های EPS4، EPS5، EPS6 و EPS7 نشان می‌دهد، در عین دارا بودن ضخامت یکسان به ترتیب تخلخل آن‌ها کاهش یافته است. با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها ثابت‌های دی‌الکتریک ۱۲٪ و ضرایب اتلاف نمونه‌ها ۵۳٪ افزایش می‌یابد. طبق نتایج با کاهش تخلخل و افزایش چگالی، ضخامت دیواره سلول‌ها افزایش می‌یابد. به عبارتی ثابت دی‌الکتریک

انرژی اتلافی به وسیله اسفنج جذب می‌شود. بنابراین برای اینکه اسفنج امواج را به خوبی عبور دهد و باعث اتلاف آن نشود، باید تا حد امکان  $\tan\delta$  آن کوچک باشد.

### سختی

سختی نمونه‌های اسفنج‌شده با سختی‌سنج شور Shore D مدل HIVA 500 ساخت شرکت HIVA، مطابق استاندارد ASTM D2240 اندازه‌گیری شد.

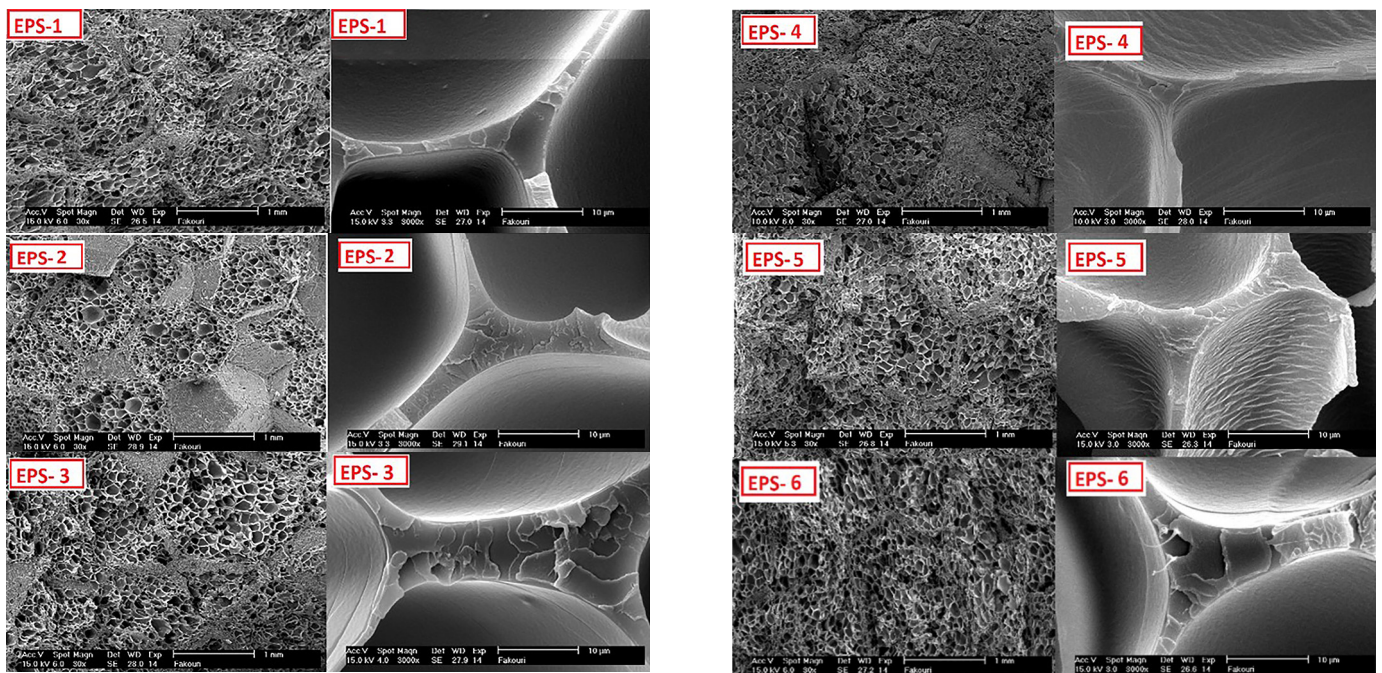
### جهندگی

آزمون رفتار جهندگی و انعطاف‌پذیری اسفنج با دستگاه جهندگی مدل HIVA 300 ساخت شرکت HIVA مطابق با استاندارد عملیاتی (91) ASTM-D1054 انجام شد.

## نتایج و بحث

### میکروسکوپی الکترونی پویشی

در شکل ۱، نتایج آزمون میکروسکوپی الکترونی پویشی نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن انبساطی نشان داده شده است. با تغییر در فرایند تولید و تغییر قالب، اسفنج‌هایی با ضخامت و ساختاری متفاوت



شکل ۱- تصاویر SEM اسفنج‌های پلی‌استیرن.

Fig. 1. SEM images of polystyrene foams.

جدول ۱- نتایج تحلیل تصاویر SEM اسفنج‌های پلی استیرن.

Table 1. The results of SEM image analysis of polystyrene foams.

Sample	Average cell size ( $\mu\text{m}$ )	Cell density ( $\text{cell}/\text{cm}^3$ )	Porosity (%)	Average cell wall thickness ( $\mu\text{m}$ )	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Sample thickness (cm)
EPS1	75	$1.69 \times 10^{10}$	70±5	14.6	0.3±0.05	3±0.1
EPS2	77	$1.52 \times 10^{10}$	70±5	15.0	0.3±0.05	3±0.1
EPS3	93	$8.76 \times 10^9$	70±5	18.2	0.3±0.05	3±0.1
EPS4	65	$2.91 \times 10^{10}$	80±5	7.7	0.2±0.05	1±0.1
EPS5	77	$1.57 \times 10^{10}$	70±5	14.9	0.3±0.05	1±0.1
EPS6	82	$1.08 \times 10^{10}$	60±5	23.9	0.4±0.05	1±0.1
EPS7	86	$0.786 \times 10^{10}$	50±5	35.6	0.5±0.05	1±0.1
EPS8	75	$6.59 \times 10^9$	70±5	14.5	0.3±0.05	3±0.1

ضخامت یکسان به ترتیب کاهش یافته است. در تخلخل‌های متفاوت با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها ثابت دی الکتریک افزایش می‌یابد و از مقدار عبور امواج الکترومغناطیس در اسفنج کاسته می‌شود. رفتار غیرخطی ثابت دی الکتریک در برابر افزایش ضخامت دیواره ناشی از تغییرات ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج با تخلخل‌های متفاوت در نمونه‌ها بوده است که بعید نیست، ناشی از نبود دقت کافی یا توزیع در مقدار متوسط محاسبه شده برای ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج باشد، بنابراین در ادامه با استفاده از خواص کشسانی مانند سختی یا جهندگی این نکته ارزیابی می‌شود.

مطابق شکل ۳، نمونه‌های EPS1 و EPS8 دارای ضخامت کل و ضخامت دیواره سلول‌های برابر هستند. البته نمونه EPS8 از کنار هم قراردادن نمونه‌های EPS4، EPS5 و EPS6 ایجاد شده است. با مقایسه این دو نمونه مشخص شد، ثابت دی الکتریک از ۱/۴۰۵ به ۱/۲۹۸ و ضریب اتلاف از ۰/۰۱۸۴ به ۰/۰۱۶۷ کاهش می‌یابد. این روند کاهش به خوبی نشان می‌دهد، در تخلخل، ضخامت نمونه و ضخامت دیواره سلول‌های کل تقریباً برابر (روند افزایشی ضخامت دیواره سلول‌ها از نمونه EPS4 تا EPS6)، با افزایش تدریجی میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها، ثابت دی الکتریک و ضریب اتلاف کاهش می‌یابد. با توجه به این نکته مشخص است، افزایش تدریجی میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها در ضخامت نمونه و ضخامت دیواره سلول‌های کل تقریباً برابر اثر ۷/۶ درصدی بر ثابت دی الکتریک و ۳۷ درصدی بر ضریب اتلاف دارد. در یک اسفنج افزایش تدریجی ضخامت آن به ترتیب از ریز به درشت چیده شده‌اند، ثابت دی الکتریک بخش ورودی موج کمترین انتخاب می‌شود تا بیشترین موج ممکن وارد اسفنج شود. در این حالت اسفنج همانند ماده تطبیق امپدانس عمل کرده و نسبت موج ایستا ورودی

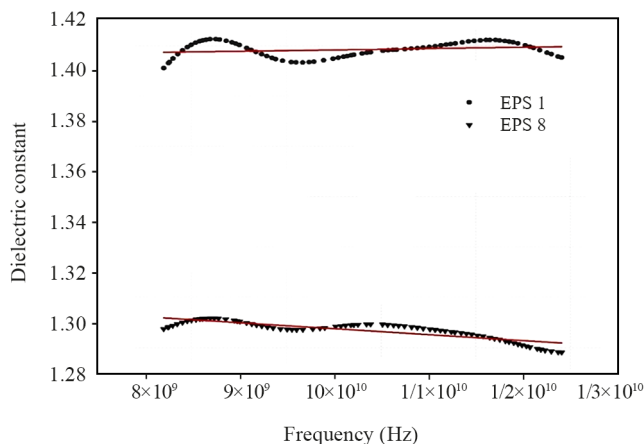
در بسامد ۸ GHz تا ۱۲ GHz با افزایش میانگین ضخامت سلول‌ها در اسفنج‌ها افزایش می‌یابد.

در محدوده بسامد ۸ GHz تا ۱۲ GHz مشخص شد، با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها در تمام بسامدهای بررسی شده ثابت دی الکتریک افزایش می‌یابد. البته در صورت برهم‌کنش فیزیکی میان اجزای اسفنج، ثابت دی الکتریک آن مطابق قانون مخلوط‌ها، رفتاری خطی نشان می‌دهد. در حالی که مطابق شکل ۲ با افزایش میانگین ضخامت سلول‌ها از ۷/۶۷  $\mu\text{m}$  تا ۳۵/۶۲  $\mu\text{m}$ ، ثابت دی الکتریک از ۱/۲۱۹ تا ۱/۳۹۶ افزایش می‌یابد. همان‌طور که از نمودار مشخص است، رفتار ثابت دی الکتریک در مقابل ضخامت دیواره سلولی رفتار تقریباً غیرخطی است، زیرا تخلخل این نمونه‌ها در عین دارا بودن

جدول ۲- مشخصات دی الکتریک اسفنج‌های پلی استیرن در بسامد ۱۰ GHz.

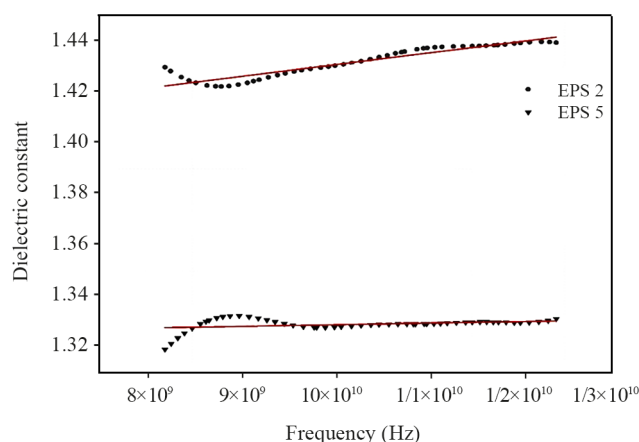
Table 2. Dielectric characteristics of polystyrene foams at 10 GHz frequency.

Sample	Loss factor	Real dielectric constant
EPS1	0.0184	1.405
EPS2	0.0241	1.430
EPS3	0.0181	1.391
EPS4	0.0020	1.219
EPS5	0.0114	1.327
EPS6	0.0030	1.354
EPS7	0.0043	1.396
EPS8	0.0167	1.298



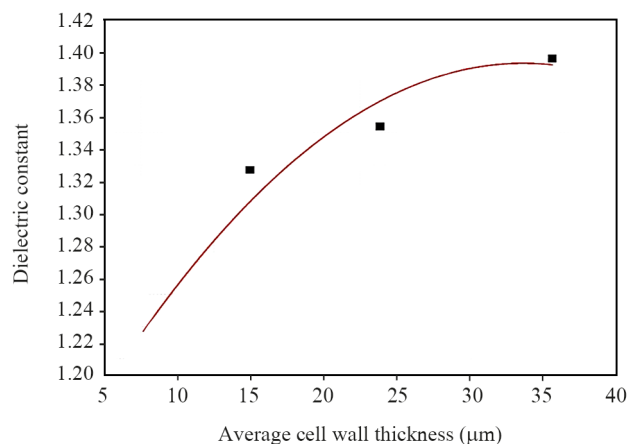
شکل ۳- ارتباط ثابت دی‌الکتریک با بسامد اسفنج‌های پلی‌استیرن.  
Fig. 3. Dielectric constant relationship with the frequency of polystyrene foams.

از نمونه با ضخامت ۳ cm است که ناشی از تعداد دیواره‌های سلول کمتر در برابر مسیر گذر موج الکترومغناطیس در اسفنج با ضخامت کمتر است. همان‌طور که مشخص است، ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف نمونه با ضخامت ۱ cm از نمونه با ضخامت ۳ cm کمتر است. این نشان می‌دهد، هر چقدر پلیمر اسفنجی در برابر مسیر امواج کمتر باشد. برهم‌کنش امواج با ماده کمتر می‌شود و انتقال‌های کوانتومی کمتری در ماده اتفاق می‌افتد و امواج الکترومغناطیس با برخورد کمتری از ماده عبور می‌کند و ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف نیز کمتر می‌شود.



شکل ۴- ارتباط ثابت دی‌الکتریک با بسامد در نمونه‌های با ضخامت متفاوت.

Fig. 4. Dielectric constant relationship with frequency in different thickness samples.



شکل ۲- ارتباط ثابت دی‌الکتریک با میانگین ضخامت دیواره سلول.  
Fig. 2. Dielectric constant relationship with the average thickness of the cell wall.

کمتر شده و باعث ورود بیشتر موج در اسفنج می‌شود. همین تدبیر باعث می‌شود، ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف کلی اسفنج کمتر شود. البته ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف و VSWR پارامترهای وابسته به مواد بوده و غیرمستقل هستند. کلیه خواص الکترومغناطیسی و الکترومغناطیسی مواد از انتقال‌های کوانتومی پیچیده حاصل از برهم‌کنش مواد و امواج الکترومغناطیس به وجود می‌آید. با مقایسه ثابت دی‌الکتریک اسفنج‌های EPS2 و EPS5 با تخلخل و ضخامت دیواره سلول‌های برابر مشخص شده است که در محدوده بسامد ۸ GHz تا ۱۲ GHz، ثابت دی‌الکتریک نمونه با کاهش ضخامت نمونه در تمام محدوده بسامدی کمتر از نمونه با ضخامت بیشتر است. شکل ۴ ارتباط ثابت دی‌الکتریک با بسامد را در نمونه‌های با ضخامت متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که پذیرفته شده است، هر چقدر پلیمر واقع در مسیر یا تعداد دیواره‌های سلول کمتری در برابر مسیر گذر موج الکترومغناطیس از درون اسفنج پلی‌استیرن انبساطی قرار گیرد، برهم‌کنش امواج با ماده کمتر می‌شود و انتقال‌های کوانتومی کمتری در ماده اتفاق می‌افتد و امواج الکترومغناطیس با برخورد کمتری از ماده عبور می‌کند و ثابت دی‌الکتریک نیز کمتر می‌شود. البته این پدیده با افزایش هم‌زمان ضریب اتلاف امواج الکترومغناطیس حین عبور از اسفنج‌های ضخیم‌تر قابل تأیید است.

شکل ۵ ارتباط ضریب اتلاف با بسامد را در نمونه‌های با ضخامت ۳ cm و ۱ cm نشان می‌دهد. در این شکل با مقایسه دو نمونه EPS2 و EPS5 (با تمام مشخصات برابر مطابق جدول ۱ غیر از ضخامت کلی اسفنج) مشخص شده است که در بررسی بسامد ۸ GHz تا ۱۲ GHz ضریب اتلاف نمونه با ضخامت ۱ cm در اکثر محدوده بسامدی کمتر

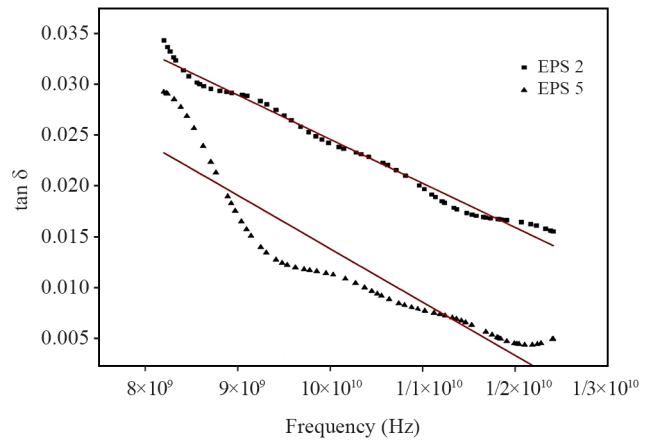
(جدول ۳). زیرا، سختی به‌عنوان مشخصه مکانیکی و تابع مدول کشسان مواد پلیمری در ضخامت دیواره سلول برابر به عواملی همچون نوع پلیمر، چگالی اسفنج و سایر موارد نیز بستگی دارد. این مشاهده دقت اندازه‌گیری سختی گزارش شده در جدول ۳ را تأیید می‌کند تا انحراف هرچند جزئی در سختی مطابق شکل ۶ را شایان توجه دانست که به‌طور مطمئنی نشانگر توزیع گسترده اندازه ضخامت دیواره سلول محاسبه‌شده برای اسفنج‌های پلی‌استیرن مورد مطالعه باشد.

### جهندگی

به‌منظور کنترل دوباره و مستقل وقوع توزیع گسترده در مقدار متوسط محاسبه‌شده برای ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج به‌عنوان دلیل تغییرات غیرخطی ثابت دی‌الکتریک در برابر ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج (مطابق شکل ۲) جهندگی اسفنج پلی‌استیرن بررسی شد، زیرا جهندگی خاصیت کشسان وابسته به اندازه و توزیع ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج است. در جدول ۴ و شکل ۷، به‌ترتیب نتایج آزمون جهندگی و ارتباط جهندگی نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن انبساطی با میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها نشان داده است. هنگامی‌که اسفنج در اثر ضربه آونگ جهندگی تغییرشکل موقتی می‌دهد، انرژی ذخیره‌شده در دیواره سلول‌های اسفنج با بازگشت اسفنج به شکل اولیه خود آزاد می‌شود. با توجه به تصویر و مقایسه نمونه‌های EPS4، EPS5، EPS6 و EPS7 که چگالی آن‌ها به‌ترتیب افزایش یافته است و ضخامت نمونه یکسانی دارند، با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها جهندگی نمونه‌ها از ۷/۴۵٪ به ۱۲/۹۱٪ افزایش می‌یابد. در آزمون جهندگی مشخص شد، رفتار جهندگی نیز در مقابل افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها رفتار غیرخطی شبیه تغییرات ثابت دی‌الکتریک با جدول ۳- نتایج آزمون سختی نمونه‌های اسفنج‌شده.

Table 3. Hardness test results of foam samples.

Sample	Average cell wall thickness ( $\mu\text{m}$ )	Hardness (Shore D)
EPS1	14.64	44 $\pm$ 5
EPS2	15.03	51 $\pm$ 5
EPS3	18.15	53 $\pm$ 5
EPS4	7.67	40 $\pm$ 5
EPS5	14.96	51 $\pm$ 5
EPS6	23.86	57 $\pm$ 5
EPS7	35.62	67 $\pm$ 5



شکل ۵- ارتباط ضریب اتلاف با بسامد در نمونه‌ها با ضخامت‌های متفاوت.

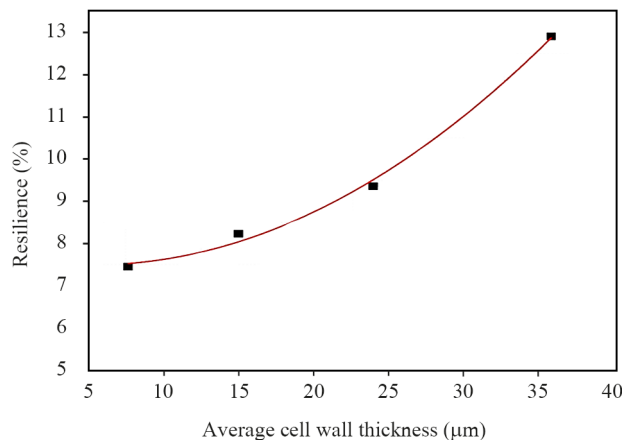
Fig. 5. Loss factor relationship with frequency in different thickness samples.

### سختی

همان‌طور که در تحلیل نتایج شکل ۲ بحث شد، دلیل رفتار دی‌الکتریک غیرخطی در برابر ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج را باید در امکان چندتوزیعی بودن یا توزیع گسترده در مقدار متوسط محاسبه‌شده برای ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج جست‌وجو کرد. بنابراین سختی به‌عنوان خاصیت کشسان وابسته به اندازه و توزیع ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج بررسی شد. سختی تابع مدول کشسانی پلیمرها و ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج است. در جدول ۳ و شکل ۶، به‌ترتیب نتایج آزمون سختی و ارتباط سختی نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن انبساطی با میانگین ضخامت دیواره سلول‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ و مقایسه نمونه‌های EPS4، EPS5، EPS6 و EPS7 واضح است، چگالی این نمونه‌ها به‌ترتیب افزایش یافته است، در حالی که نمونه‌ها ضخامت یکسانی دارند، با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها سختی نمونه‌ها از Shore D ۴۰ به Shore D ۶۷ تقریباً ۴۰٪ افزایش می‌یابد. البته روند افزایش سختی حسب افزایش ضخامت محاسبه‌شده برای دیواره سلول‌ها به‌طور کامل خطی نیست. از آنجا که خطی بودن رابطه سختی با مدول و چگالی پلیمر پذیرفته شده است. از این رو، این یافته بیانگر امکان وقوع چندتوزیعی یا توزیع گسترده در مقادیر متوسط ضخامت دیواره سلول محاسبه‌شده برای اسفنج‌هاست.

همچنین با مقایسه نمونه EPS5 و EPS2 با تخلخل و ضخامت دیواره سلول‌های برابر، مشخص شده است، تغییر ضخامت نمونه اثری بر سختی نمونه اسفنج پلی‌استیرن انبساطی (Shor D ۵۱) ندارد





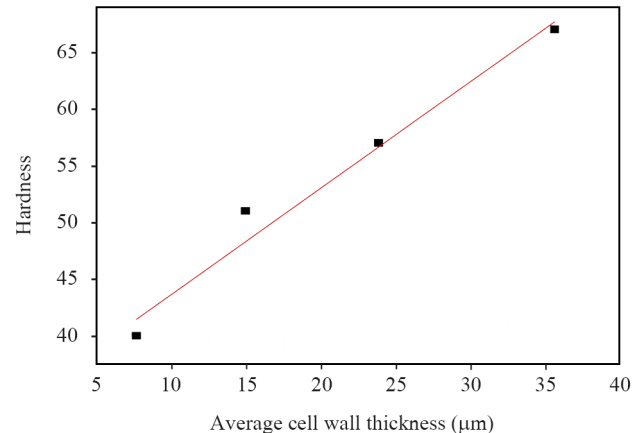
شکل ۷- ارتباط جهندگی نمونه‌های اسفنجی با میانگین ضخامت دیواره سلول.

Fig. 7. The relationship between resilience of spongy samples and the average thickness of the cell wall.

نمونه اثر محسوسی بر جهندگی (۸/۲۳٪) ندارد. این برابری مقدار جهندگی در شرایط مشابه و ضخامت متفاوت قابلیت اطمینان و دقت اندازه‌گیری جهندگی در نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن تحت آزمون را نیز تأیید می‌کند.

### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، نقش ضخامت دیواره سلول‌ها و ضخامت نمونه بر خواص دی‌الکتریک و خواص مکانیکی اسفنج‌های پلی‌استیرن انبساطی ارزیابی شده است. بدین منظور نمونه‌های اسفنج پلی‌استیرن انبساطی با مقدار تخلخل، ضخامت نمونه و میانگین ضخامت متفاوت دیواره سلول‌ها، با استفاده از کوره برنامه‌پذیر تهیه و ساختار سلولی، ثابت دی‌الکتریک، سختی و جهندگی اسفنج‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد، در تخلخل متفاوت و ضخامت یکسان نمونه، با افزایش میانگین ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج، ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف روند افزایشی دارد. همچنین در ضخامت دیواره سلول‌ها و تخلخل یکسان، با افزایش ضخامت نمونه از ۱ cm به ۳ cm ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشخص شده است، ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف نمونه‌ای که روند تدریجی افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها را داشته از نمونه با ضخامت ثابت دیواره سلول‌ها، کمتر است (در ضخامت کل برابر دیواره سلول‌ها). بلکه چپش تدریجی دیواره سلول‌های اسفنج‌ها



شکل ۶- ارتباط سختی نمونه‌های اسفنج‌شده با میانگین ضخامت دیواره سلول.

Fig. 6. The relationship between the hardness of foam samples and the average thickness of the cell wall.

افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها نشان می‌دهد. نتایج مشابه این روند غیرخطی خواص جهندگی در اسفنج‌های پلیمری در مطالعات Lopattananon نیز مشاهده شده است [۲۳]. مشاهده رفتار غیرخطی ثابت دی‌الکتریک، سختی و جهندگی اسفنج‌های پلی‌استیرن در برابر ضخامت دیواره سلول اسفنج مشخص می‌کند، توزیع اندازه سلول‌ها پهن و دارای اهمیت است، زیرا هر سه این خواص به ضخامت دیواره سلول وابستگی دارند و هرچقدر توزیع ضخامت سلول‌ها گسترده‌تر باشد، انحراف رفتار اسفنج پلی‌استیرن از مدل مخلوط‌ها یا خطی محسوس‌تر است.

همچنین مقایسه نمونه EPS2 و EPS5 با تخلخل و ضخامت برابر دیواره سلول‌ها، مشخص کرده است، مطابق جدول ۴ تغییر ضخامت

جدول ۴- نتایج آزمون جهندگی نمونه‌های اسفنج‌شده.

Table 4. The results of the resilience test of foam samples.

Sample	Average cell wall thickness (μm)	Resilience (%)
EPS1	14.64	8.10
EPS2	15.03	8.23
EPS3	18.15	8.35
EPS4	7.67	7.45
EPS5	14.96	8.23
EPS6	23.86	9.36
EPS7	35.62	12.91

می‌دهند. همچنین سختی اسفنج‌ها نیز تابعیت کاملاً خطی از ضخامت دیواره سلول‌های اسفنج پلی‌استیرن را نشان نمی‌دهد. مشاهده رفتار غیرخطی ثابت دی‌الکتریک، سختی و جهندگی اسفنج‌های پلی‌استیرن در برابر ضخامت دیواره سلول اسفنج مشخص می‌کند، توزیع اندازه سلول‌ها گسترده و دارای اهمیت است، زیرا هر سه این خواص به ضخامت دیواره سلول بستگی دارند و هر چقدر توزیع ضخامت سلول‌ها گسترده‌تر باشد، انحراف رفتار اسفنج پلی‌استیرن از مدل مخلوط‌ها یا خطی محسوس‌تر است.

باعث کاهش ثابت دی‌الکتریک و ضریب اتلاف در اسفنج‌ها شده است. با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها سختی افزایش می‌یابد، اما در ضخامت دیواره سلول‌های برابر، تغییر ضخامت نمونه اثری بر سختی ندارد. همچنین با توجه به نتایج آزمون جهندگی مشخص شده است، با افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها جهندگی افزایش می‌یابد، اما در ضخامت برابر دیواره سلول‌ها، تغییر ضخامت نمونه اثری بر جهندگی نداشته است. در این پژوهش مشخص شد، تمام رفتارهای وابسته به ضخامت دیواره سلول مانند جهندگی و ثابت دی‌الکتریک رفتار غیرخطی واضحی در برابر افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها نشان

## مراجع

- Jürgen S. and Wallis M., Dependence of Thermal Properties of Expandable Polystyrene Particle Foam on Cell Cize and Density, *J. Cell. Plast.*, **46**, 209-222, 2010.
- Beverte G. and Ilze Y., Deformation of Polypropylene Foam Neopolen®P in Compression, *J. Cell. Plast.*, **40**, 191-204, 2004.
- Sanchez R., Alejandro E., Gomez-Ma'riquez G., Aguilera-Gomez E., Ledesma-Orozco E.R., and Plascencia-Mora H., Numerical Analysis of Energy Absorption in Expanded Polystyrene Foams, *J. Cell. Plast.*, **56**, 411-431, 2020.
- Gehuan W., Hoong Ong S., Zhao Y., Xu Z.J., and Ji G., Integrated Multifunctional Macrostructures for Electromagnetic Wave Absorption and Shielding, *J. Mater. Chem.*, **46**, 24368-24387, 2020.
- Raps K., Daniel J., Hossieny N., Park C., and Altstädt V., Past and Present Developments in Polymer Bead Foams and Bead Foaming Technology, *Polymer*, **56**, 5-19, 2015.
- Turner A., Foamed Polystyrene in the Marine Environment: Sources, Additives, Transport, Behavior, and Impacts, *Environ. Sci. Technol.*, **54**, 10411-10420, 2020.
- Block C., Brands B., and Gude T., Packaging Materials 2. Polystyrene for Food Packaging Applications-Updated Version, *Nutr. Clin. Care*, **13**, 321-336, 2017.
- Sulong R., Hafizah N., Aisyah Syaerah Mustapa S., and Khairi Abdul Rashid M., Application of Expanded Polystyrene (EPS) in Buildings and Constructions: A Review, *J. Appl. Polym. Sci.*, **136**, 475-495, 2019.
- Bezborodov V., Kosiak O.S., Kuleshov Y.M., and Yachin V., Differential Phase Sections Based on Form Birefringence in the Terahertz Frequency Range, *Telec Rad. Eng.*, **74**, 43-59, 2015.
- Lei X., Tong L., Pan H., Yang G., and Liu X., Preparation of Polyarylene Ether Nitriles/Fullerene Composites with Low Dielectric Constant by Cosolvent Evaporation, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **30**, 18297-18305, 2019.
- Yuan C., Jin K., Li K., Diao K., Tong J., and Fang Q., Non-Porous Low-k Dielectric Films Based on a New Structural Amorphous Fluoropolymer, *Adv. Mater.*, **25**, 4875-4878, 2013.
- Wang L., Liu C., Shen S., Xu M., and Liu X., Low Dielectric Constant Polymers for High-Speed Communication Network, *Adv. Ind. Eng. Polym.*, **34**, 138-148, 2020.
- Barczew M., Kozakiewicz C., and Krucińska I., The Effect of Foam Morphology on Dielectric Properties of Closed-Cell Foams Based on High-Density Polyethylene, *Polym. Test.*, **89**, 231-245, 2020.
- Zhang Y., Yang Y., Xu Y., and Chen W., Low-Dielectric Constant Foam Materials through Polymer Blends, *Appl. Polym.*, **49**, 321-420, 2020.
- Chen W., Yao Z., Lin H., Zhou J., Haidry A., Qian Y., Guo X., and Qian K., Electromagnetic and Microwave Absorption Performance of  $Ni_{0.4}Zn_{0.4}Co_{0.2}Fe_2O_4$ /Polymethacrylimide Foam Synthesized via Polymerization, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **30**, 16991-17002, 2019.
- Tran M.P., Detrembleur C., Alexandre M., Jerome C., Thomassin J.M., The Influence of Foam Morphology of MWCNT/PMMA Nanocomposites on Electrical Conductivity, *Polymer*, **54**, 3261-2370, 2013 .
- Ma Z., Zhang G., Yang Q., Shi X., and Liu Y., Mechanical and Dielectric Properties of Microcellular Polycarbonate Foams

- with Unimodal or Bimodal Cell-Size Distributions, *J. Cell. Plast.*, **51**, 307-327, 2015.
18. Wang L., Liu X., Liu C., Zhou X., Liu C., Cheng M., Wei R., and Liu X., Ultralow Dielectric Constant Polyarylene Ether Nitrile Foam with Excellent Mechanical Properties, *Chem. Eng. J.*, **384**, 123-231, 2020.
  19. Taher A. and Hasanzadeh R., A Review on Principles and Fundamentals of Fabrication of Polymeric Foams in Regards to Increasing Cell Density/Reducing Cell Size, *Mod. Mech. Eng.*, **19**, 211-222, 2019.
  20. Xiao W., Liao X., Jiang Q., Zhang Y., Chen J., Yang Q., and Li G., Strategy to Enhance Conductivity of Polystyrene/Graphene Composite Foams via Supercritical Carbon Dioxide Foaming Process, *J. Supercrit. Fluids*, **142**, 52-63, 2018.
  21. Chimezie O., Raps D., Subramaniam K., and Altstädt V., Microcellular to Nanocellular Polymer Foams: Progress and Future Directions—A Review, *Eur. Polym. J.*, **73**, 500-519, 2015.
  22. Silaghi M.A., Polymer Dielectric Materials, In *Dielectric Materials*, IntechOpen, Novi Sad, Croatia, 1st ed., 60-85, 2012. DOI:10.5772/2781
  23. 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, *J. Vinyl Add. Technol.*, **21**, 134-146, 2015.