

Optimization of solid and radiation thermal conductivity of polymeric foams using response surface method based on a novel theoretical model

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hasanzadeh R.¹ PhD,
Azdast T.^{*1} PhD,
Doniavi A.¹ PhD,
Eungkee Lee R.² PhD

How to cite this article

Hasanzadeh R, Azdast T, Doniavi A, Eungkee Lee R. Optimization of solid and radiation thermal conductivity of polymeric foams using response surface method based on a novel theoretical model. Modares Mechanical Engineering. 2019; 19(9): 2165-2173.

ABSTRACT

Polymeric foams are one of the best candidates for thermal insulation. Accordingly, to investigate the thermal insulation properties of polymeric foams has attracted the attention of scientific communities in recent years. In this study, optimization of thermal insulation properties of polymeric foams is performed from solid and radiation thermal conductivities points of view. In this regard, a theoretical model based on cell size and foam density is developed. The results of the developed theoretical model are verified in comparison to various experimental results. Based on the results, the error of the theoretical model is lesser than 5%. Decreasing the foam density increases and decreases the solid and radiation thermal conductivity, respectively. Also, the radiation thermal conductivity is decreased by reducing the cell size. Response surface method (RSM) is applied in order to optimize the solid and radiation thermal conductivities. The results illuminate that the foam density of 23.5 kg.m⁻³ and cell size of 53 μ m are the optimum conditions. At the optimum conditions, both of the solid and radiation thermal conductivities are lesser than 3 mW/mK. According to the results, the data obtained from developed theoretical model and RSM are in a good agreement. The total thermal conductivity is 30 mW/mK at optimum conditions which is a desirable value at aforementioned cell size range.

Keywords Theoretical Model; Foam Density; Cell Size; Thermal Conductivity; Response Surface Method

CITATION LINKS

[1] Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004-2015) ... [2] Thermoplastic foams: Processing, manufacturing ... [3] Tension, compression and shear fatigue of a closed cell ... [4] Polymeric foams. In: Othmer K. Kirk-Othmer encyclopedia ... [5] Towards a new generation of polymeric foams ... [6] Modelling of thermal transport through a ... [7] An overview of renewable energy companies in ... [8] Role of renewable energy sources in environmental ... [9] Photovoltaic thermal module concepts and their ... [10] A global review of energy consumption, CO₂ ... [11] Ultra-tough and super thermal-insulation nanocellular ... [12] Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation ... [13] Highly anisotropic crosslinked HDPE foams with a controlled ... [14] Handbook of polymeric foams and foam ... [15] A multi-criteria decision analysis on injection ... [16] Polymer nano-foams for insulating applications ... [17] Experimental validation of the Knudsen effect in ... [18] Advanced bimodal polystyrene/multi-walled carbon nanotube ... [19] Low-density and structure-tunable microcellular ... [20] Development of high thermal insulation and compressive ... [21] Heat transfer in microcellular polystyrene ... [22] Correlation between structure and thermal conductivity ... [23] Thermal properties predictive model for ... [24] Radiative properties of extruded polystyrene ... [25] Heat transfer in one-dimensional micro-and ... [26] Role of elastic strain energy in cell nucleation of ... [27] Investigation of cell wall thickness and impact ... [28] Generalization and modelling of rigid polyisocyanurate ... [29] Experimental characterization and theoretical ... [30] Extinction coefficient of polyolefin ... [31] Dependence of thermal properties of expandable ... [32] Present and future trends in the atmospheric ... [33] Nanocellular polymer foams as promising high ... [34] Low density thermoplastic nanofoams nucleated ... [35] Mechanical properties of microcellular and ... [36] Key production parameters to obtain transparent ... [37] Preparation of microcellular low-density PMMA nanocomposite foams ... [38] Polymer nanocomposite foams. Composites Science ...

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran

²Dr. Foam Canada Research Center, Canada, Toronto, Canada

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran. Postal code: 1531157561
Phone: +98 (44) 31942854
Fax: +98 (44) 12773591
t.azdast@urmia.ac.ir

Article History

Received: April 30, 2018

Accepted: February 06, 2019

ePublished: September 01, 2019

بهینه‌سازی ضرایب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی فوم‌های پلیمری با استفاده از روش رویه پاسخ براساس یک مدل تئوری جدید

رزگار حسن‌زاده PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

طاهر ازدست PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

علی دنیوی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

ریچارد یونگکیلی PhD

مرکز تحقیقاتی دکتر فوم کانادا، تورنتو، کانادا

چکیده

فوم‌های پلیمری یکی از بهترین کاندیداها به‌منظور ساخت عایق‌های حرارتی هستند. بر همین اساس بررسی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری، در سالیان اخیر مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر بهینه‌سازی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری از دو جنبه ضریب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی صورت گرفته است. به این منظور مدلی تئوری بر مبنای چگالی فوم و اندازه سلولی ارائه شده است. صحت مدل تئوری ارائه‌شده در قیاس با نتایج تجربی متعددی به اثبات رسیده است. نتایج گویای این است که خطای مدل تئوری ارائه‌شده کمتر از ۵٪ است. همچنین نتایج نشان دادند که با کاهش چگالی فوم، ضریب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. ضمن اینکه کاهش اندازه سلولی سبب کاهش ضریب هدایت حرارتی تشعشعی می‌شود. به‌منظور بهینه‌سازی ضرایب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی از روش طراحی آزمایش رویه پاسخ استفاده شد. نتایج حاکی از این بود که چگالی فوم $233/5$ کیلوگرم بر متر مکعب و اندازه سلولی 53 میکرومتر، شرایط ساختاری بهینه هستند که در این شرایط هر دو ضریب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی کمتر از 3 میلی‌وات بر متر کلون است. مطابق نتایج آشکار شد که داده‌های حاصل از مدل تئوری ارائه‌شده و روش رویه پاسخ تطابق مطلوبی با یکدیگر دارند. در این شرایط بهینه، ضریب هدایت حرارتی کلی فوم پلیمری تقریباً 30 میلی‌وات بر متر کلون خواهد بود که در بازه اندازه‌های سلولی مذکور، مقدار بسیار مطلوبی است.

کلیدواژه‌ها: مدل تئوری، چگالی فوم، اندازه سلولی، ضریب هدایت حرارتی، روش رویه پاسخ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷

*نویسنده مسئول: t.azdast@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

توسعه فوم‌های پلیمری در دهه ۱۹۳۰ میلادی با فوم‌های ماکروسلولی پلی‌استایرن با اندازه‌های سلولی بزرگ‌تر از 100 میکرومتر شروع شد^[1]. پیشرفت فوم‌های پلیمری با توسعه روش فوم‌کردن حالت جامد توده‌ای ادامه یافت و فوم‌های ریزسلولی با اندازه سلولی کوچک‌تر از 100 میکرومتر در دهه ۱۹۸۰ میلادی حاصل شد^[2]. هدف از تولید فوم‌های پلیمری، کاهش چگالی ماده بدون آسیب‌رساندن به خواص آن و کاهش هزینه‌های ماده مصرفی بود^[3].

براساس گزارش "آینده فوم‌های پلیمری تا ۲۰۱۹"، بازار جهانی فوم‌های پلیمری در سال ۲۰۱۳ حدود $19/1$ میلیارد تن بود^[4]. این بازار رقمی حدود 87 میلیارد دلار را به خود اختصاص داد که شامل استفاده از فوم‌های پلیمری در صنایعی نظیر خودروسازی، هوافضا، بسته‌بندی، ساخت‌وساز و غیره بود. علاوه بر این، انتظار می‌رود که این بازار با رشدی پیوسته به $25/1$ میلیارد تن در سال ۲۰۱۹ برسد^[5]. این ارقام چشمگیر نشان از کاربرد بسیار وسیع و روبه‌رشد فوم‌های

پلیمری دارد. از مهم‌ترین دلایل کاربرد گسترده فوم‌های پلیمری می‌توان به دو خاصیت متمایز این مواد شامل خواص مکانیکی خوب و خواص عایق حرارتی و صوتی چشمگیر اشاره کرد. به‌طور مثال، فوم‌های پلی‌اورتان صلب به‌عنوان عایق‌های حرارتی در ساخت‌وساز استفاده می‌شوند، فوم‌های پلی‌استایرن به‌عنوان عایق در ساخت‌وساز و بسته‌بندی کاربرد دارند و فوم‌های پلی‌وینیل‌کلراید، خواص عایق حرارتی خوب و استحکام مکانیکی بالایی را از خود نشان داده‌اند و بر همین اساس مواد مناسبی برای ساندویچ پانل‌ها هستند^[5].

جامعه جهانی با یک تقاضای عظیم به‌منظور کاهش میزان مصرف انرژی‌های فسیلی روبه‌رو است؛ زیرا این منابع رو به اتمام هستند و از طرفی دیگر حجم عظیمی از آلاینده‌های مضر برای محیط زیست را آزاد می‌سازند. توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین صرفه‌جویی و حفظ انرژی دو راهکار متفاوت برای جواب‌گویی به تقاضای ذکرشده هستند^[6]. انرژی‌های تجدیدپذیر علی‌رغم سرمایه‌گذاری‌ها و توجهات ویژه‌ای که به آنها مبذول شده است، آن‌طور که انتظار می‌رود سودبخش نیستند چرا که در حال حاضر تقریباً 15% تقاضای کل انرژی جهانی را به خود اختصاص داده‌اند^[7]. بنابراین توسعه روش‌های صرفه‌جویی در انرژی به‌منظور کاهش موثر اتلاف انرژی، حیاتی‌تر می‌شوند.

عایق‌های حرارتی، نقش مهمی در حفظ انرژی و بهبود بازدهی مصرف انرژی به‌ویژه در ساختمان‌های مسکونی و صنعتی که بیش از 40% اتلاف انرژی را به خود اختصاص داده‌اند، ایفا می‌کنند^[10]. فوم‌های پلیمری یکی از پرکاربردترین مواد عایق حرارتی هستند که امروزه پس از پشم‌های معدنی در رتبه دوم قرار گرفته‌اند^[11, 12]. البته شایان ذکر است که فوم‌های پلیمری، برتری‌های دیگری مانند خواص مکانیکی عالی، نصب و استفاده آسان و هزینه پایین در قیاس با سایر مواد عایق حرارتی دارند^[13, 14].

فوم‌های پلیمری از نقطه‌نظر اندازه سلولی به چهار دسته مختلف تقسیم می‌شوند^[15] که شامل فوم‌های مرسوم با اندازه سلولی بزرگ‌تر از 100 میکرومتر، فوم‌های ریزسلولی با اندازه سلولی بین 10 تا 100 میکرومتر، فوم‌های میکروسلولی با اندازه سلولی بین 1 تا 10 میکرومتر و فوم‌های نانوسلولی با اندازه سلولی کوچک‌تر از 1 میکرومتر هستند.

همان‌طور که عنوان شد، فوم‌های پلیمری یکی از بهترین گزینه‌ها به‌عنوان مواد عایق حرارتی در راستای صرفه‌جویی در مصرف انرژی هستند. بر همین اساس، در سالیان اخیر توجهات ویژه‌ای در جوامع علمی به خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری معطوف شده است. ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری (λ_f) ناشی از چهار مکانیزم مختلف است^[16]:

(۱) ضریب ناشی از گاز داخل فوم (λ_g)

(۲) ضریب ناشی از بخش جامد (λ_s)

(۳) ضریب ناشی از تشعشع (λ_r)

(۴) ضریب ناشی از جابه‌جایی گاز داخل سلول‌ها (λ_c)

بنابراین:

$$\lambda_f = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_r + \lambda_c \quad (1)$$

نوتاریو و همکاران در سال ۲۰۱۵^[17] به بررسی تجربی اثر اندازه سلولی روی ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری پرداختند. ایشان در تحقیق خود نتوانستند همزمان به فوم‌هایی با اندازه سلولی و چگالی پایین دست یابند هر چند که در یک چگالی یکسان، نشان دادند که با کاهش اندازه سلولی، ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری کاهش می‌یابد. گونگ و همکاران در سال

هدایت حرارتی ناشی از گاز نیازمند دستیابی به خواص منحصر به فرد است. بنابراین در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی ضرایب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی در اولویت کار قرار می‌گیرد.

۲- روش تئوری و مدل توسعه‌یافته

همان‌طور که بیان شد، یکی از اهداف تحقیق حاضر، ارایه یک مدل تئوری به‌منظور تخمین ضرایب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری براساس اندازه سلولی و چگالی فوم است. بنابراین فرض می‌کنیم که اندازه سلولی (φ_c) و چگالی فوم (ρ_f) مشخص است.

نسبت حجم فوم (V_f) به حجم پلیمر مصرفی در فوم (V_p) را نسبت انبساط گفته و با φ نشان می‌دهند (رابطه (۲)) [26, 27]:

$$\varphi = \frac{V_f}{V_p} = \frac{V_g + V_p}{V_p} \quad (2)$$

که در این رابطه، V_g حجم گاز داخل فوم است. می‌توان به راحتی نشان داد که با صرف نظر کردن از جرم گاز داخل فوم در مقابل جرم پلیمر، نسبت انبساط را می‌توان به صورت نسبت چگالی پلیمر (ρ_s) به چگالی فوم، تعریف کرد (رابطه (۳)):

$$\varphi = \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (3)$$

چگالی سلولی به صورت تعداد سلول‌های موجود در واحد حجم نمونه تعریف شده و به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$N = \left(\frac{n}{A}\right)^3 \times \varphi \quad (4)$$

که در این رابطه، N چگالی سلولی برحسب cell/cm^3 و n تعداد سلول‌های موجود در مساحت مشخص A از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع نمونه فوم شده است.

برای به دست آوردن همبستگی بین اندازه سلولی و چگالی سلولی، دو حالت سلول مکعبی و کروی را در نظر می‌گیریم. حجم گاز را می‌توان به صورت حاصل ضرب تعداد سلول‌ها در حجم یک سلول به دست آورد. برای حالت سلول مکعبی با طول ضلع φ_c و برای حالت سلول کروی با قطر φ_c ، حجم گاز به ترتیب مطابق روابط (۵) و (۶) حاصل می‌شود:

$$V_g = N \cdot \varphi_c^3 \quad (5)$$

$$V_g = N \cdot \frac{\pi}{6} \varphi_c^3 \quad (6)$$

بنابراین اندازه سلولی برای حالت مکعبی و کروی را برحسب اندازه سلولی و به ازای واحد حجم پلیمر، می‌توان به ترتیب مطابق روابط (۷) و (۸) ارایه داد:

$$\varphi_c = \left[V_g \cdot \frac{1}{N}\right]^{\frac{1}{3}} = \left[(\varphi - 1) \frac{1}{N}\right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$\varphi_c = \left[V_g \cdot \frac{6}{\pi N}\right]^{\frac{1}{3}} = \left[(\varphi - 1) \frac{6}{\pi N}\right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

قابل ذکر است که مقدار $\left[\frac{6}{\pi}\right]^{\frac{1}{3}}$ در رابطه (۸) تقریباً برابر ۱/۲۴ است. بنابراین در حالت کلی و صرف نظر از شکل سلولی می‌توان با در دست داشتن اندازه سلولی، چگالی سلولی را به صورت رابطه (۹) بیان کرد:

$$N = \frac{6(\varphi - 1)}{\pi \varphi_c^3} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن ساختار سلولی مطابق شکل ۱، رابطه نسبت انبساط را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) نیز به دست آورد:

$$\varphi = \frac{(\varphi_c + d_w)^3}{(\varphi_c + d_w)^3 - \varphi_c^3} \quad (10)$$

۲۰۱۷ [18] با بررسی فوم‌های پلیمری با ساختار دوگانه نشان دادند که وجود ساختار دوگانه، به صورت موثری باعث کاهش ضریب هدایت حرارتی و متعاقباً بهبود خواص عایق حرارتی می‌شود. ساختار دوگانه این فوم‌ها متشکل از سلول‌های اولیه درشت و سلول‌های ثانویه ریز بود. سلول‌های اولیه درشت سبب افزایش نسبت انبساط (کاهش چگالی) و کاهش ضریب ناشی از بخش جامد خواهد شد. از طرفی دیگر، وجود سلول‌های ثانویه ریز سبب کاهش ضریب ناشی از گاز خواهد شد. ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [19] با تولید فوم‌های پلیمری به روش توده‌ای از جنس پلی‌متیل‌متاکریلات با نسبت انبساط‌هایی به بزرگی ۲۳ برابر و اندازه‌های سلولی به کوچکی ۵ میکرومتر توانستند به ضریب‌های هدایت حرارتی $29/9 \text{ mW/mK}$ دست یابند. ژائو و همکاران در سال ۲۰۱۸ [20] توانستند با تولید فوم‌های قالب‌گیری تزریقی پلی‌پروپیلن تقویت شده با نانوالیاف پلی‌تترافلوئورواتیلن، به ضرایب هدایت حرارتی $32/4 \text{ mW/mK}$ دست یابند.

علی‌رغم دستاوردهای تجربی ارزشمند محققان در سالیان اخیر، تقریباً تمامی تحقیقات ارایه شده از لحاظ تجربی، امکان بررسی عمیق و گسترده سازوکار عایق حرارتی فوم‌های پلیمری را نداشته‌اند. از مهم‌ترین علل این امر می‌توان به تعدد پارامترهای موثر بر خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری اشاره کرد. ضمن اینکه این پارامترها، اثر متفاوتی روی مکانیزم‌های مختلف ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری (رابطه (۱)) دارند. از طرفی دیگر، کنترل همزمان پارامترهای مهم و تاثیرگذار با لحاظ کردن اثرات متقابل این پارامترها روی هم از لحاظ تجربی بسیار دشوار و چالش برانگیز است. به طور مثال گوئگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ [21] به منظور بررسی اثر افزودن نانولوله‌های کربنی چند دیواره روی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلی‌استایرن، نمونه‌های فوم با اندازه سلولی و چگالی یکسان تولید نمودند تا امکان بررسی اثر نانوذرات فراهم شود و اثر سایر پارامترهای تاثیرگذار، حذف شود. همچنین ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [19] به منظور بررسی اثر اندازه سلولی روی ضریب هدایت حرارتی، نمونه‌های فوم پلیمری در چگالی‌های یکسان تولید نمودند.

ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که از لحاظ تجربی، بررسی ضریب هدایت حرارتی کل امکان پذیر بوده ولی اندازه‌گیری مکانیزم‌های مختلف، یا امکان پذیر نبوده یا نیاز به تجهیزات ویژه‌ای مانند اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی در شرایط خلاء [17, 22] دارد. به همین دلیل نیاز به مدل‌های تئوری به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری، ضروری به نظر می‌رسد.

تاکنون مدل‌های تئوری مختلفی برای تخمین ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری ارایه شده است [23-25] اما این مدل‌ها به منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی، نیاز به خواص مختلفی مانند اندازه سلولی، چگالی فوم، قطر استرات‌ها، ضریب خاموشی فوم پلیمری و غیره دارند که اندازه‌گیری این خواص یا دشوار یا هزینه‌بر است. اندازه سلولی و چگالی فوم مهم‌ترین خواص فوم‌های پلیمری هستند که به سادگی نیز قابل اندازه‌گیری هستند. هدف اولیه تحقیق حاضر، ارایه یک روند تئوری براساس چگالی فوم و اندازه سلولی است به صورتی که فقط با در اختیار داشتن این دو خاصیت بتوان ضریب هدایت حرارتی فوم پلیمری را تخمین زد. پس از مقایسه نتایج حاصل از مدل تئوری حاضر با نتایج تجربی و صحت‌سنجی داده‌های ارایه شده، بهینه‌سازی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری به روش طراحی آزمایش‌های روبه پاسخ صورت خواهد گرفت. همان‌طور که توضیح داده خواهد شد، کاهش ضریب

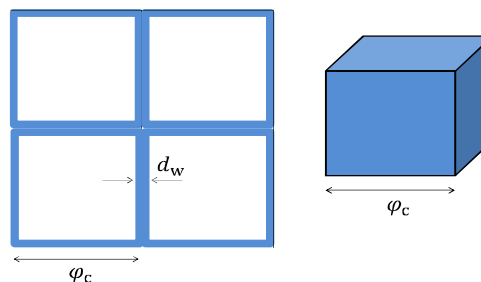
در این رابطه، d_w معرف ضخامت دیواره سلولی است. با ترکیب روابط (۹) و (۱۰) می‌توان نشان داد که ضخامت دیواره سلولی به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$d_w = \left(\sqrt[3]{\frac{\varphi}{\varphi - 1}} - 1 \right) \sqrt[3]{\frac{\varphi - 1}{N}} \quad (11)$$

ارتباط بین خواص ساختاری توسط پلاسیدو [25] به صورت رابطه (۱۲) ارائه شد:

$$d_w = \frac{\frac{\rho_f}{\rho_s} 0.348 \varphi_c^3 - 2.8 \varphi_s^2 \varphi_c + 3.93 \varphi_s^3}{1.3143 \varphi_c^2 - 7.367 \varphi_s \varphi_c + 10.323 \varphi_s^2} \quad (12)$$

که از این رابطه، φ_s ، قطر متوسط استرات‌ها، حاصل می‌شود. دیواره‌های سلولی، قسمتی از پلیمر جامد است که دو سلول را از یکدیگر مجزا کرده و استرات‌ها شامل بخشی است که در مرز مشترک سه دیواره با یکدیگر تشکیل می‌شود. این قسمت معمولاً به شکل مثلثی با اضلاع مقعر است ولی برای توصیف ساختار آن از قطر معادل دایره‌ای هم مساحت با مساحت قسمت مثلثی، استفاده می‌شود. رابطه (۱۲) از مرتبه سه بر حسب φ_s است که فقط یک ریشه قابل قبول دارد.



شکل ۱) ساختار سلولی

کسر حجمی استرات‌ها به صورت نسبت حجم اشغال شده بخش جامد توسط استرات‌ها و مطابق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود [28]:

$$f_s = \frac{V_{struts}}{V_{struts} + V_{walls}} \quad (13)$$

که V_{walls} و V_{struts} به ترتیب حجم اشغال شده سلول توسط استرات‌ها و دیواره‌های سلولی است که مطابق رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) حاصل می‌شوند [23]:

$$V_{struts} = 2.8 \varphi_s^2 D - 3.93 \varphi_s^3 \quad (14)$$

$$V_{walls} = \frac{\rho_f}{\rho_s} 0.348 D^3 - 2.8 \varphi_s^2 D + 3.93 \varphi_s^3 \quad (15)$$

همان‌طور که در رابطه (۱) بیان شد، ضریب هدایت حرارتی کلی فوم‌های پلیمری ناشی از ۴ مکانیزم مختلف است. تحقیقات مختلف صورت گرفته [17, 19-21] نشان داده است که مکانیزم جابه‌جایی گاز داخل سلول‌ها (λ_g) بسیار ناچیز بوده و به راحتی می‌توان از آن صرف نظر کرد که به دلیل اختلاف چگالی بسیار ناچیز گاز بین نقاط مختلف سلول است که امکان جابه‌جایی گاز وجود ندارد.

بخش λ_g مطابق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود [17]:

$$\lambda_g = \frac{\epsilon_{VF}}{1 + 2K_n} \lambda_{g0} \quad (16)$$

در این رابطه، ϵ_{VF} کسر حجمی حفرات بوده و مطابق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\epsilon_{VF} = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (17)$$

$$K_n = \frac{l_{mean}}{D} \quad (18)$$

که l_{mean} متوسط مسیر آزاد مولکول‌های گاز بوده و برای هوا حدود ۷۰ نانومتر است.

بخش λ_s مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود [19, 21]:

$$\lambda_s = (1 - \epsilon_{VF}) \left(\frac{2 - f_s}{3} \right) \lambda_{s0} \quad (19)$$

که در این رابطه، λ_{s0} ضریب هدایت حرارتی پلیمر پایه بر حسب W/mK است.

بخش λ_r توسط معادله روزلند مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود [19, 20]:

$$\lambda_r = \frac{16 \sigma T_r^3}{3 K_R} \quad (20)$$

σ ثابت استفان-بولتزمن بوده و برابر $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$ است. از طرفی، T_r متوسط دما داخل فوم پلیمری بر حسب کلون است. ضریب K_R ضریب خاموشی بوده که عکس متوسط مسیر آزاد مربوط به فوتون‌های یک ماده بر حسب m^{-1} است و به صورت رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود [29]:

$$K_R = K_{struts} + K_{walls} K_{solid} \quad (21)$$

که در آن K_{walls} و K_{struts} به ترتیب بخشی از ضریب خاموشی بوده که مربوط به استرات‌ها، دیواره‌های سلولی و پارامترهایی بدون بعد هستند. K_{solid} ضریب خاموشی مربوط به پلیمر پایه است.

K_{walls} و K_{struts} به ترتیب طبق رابطه‌های (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شوند [30]:

$$K_{struts} = 4.10 \sqrt{f_s \frac{\rho_f}{\rho_s}} \quad (22)$$

$$K_{walls} = (1 - f_s) \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (23)$$

در ادامه مقاله، ابتدا صحت‌سنجی مدل تئوری ارائه شده در قیاس با نتایج تجربی معتبر، بررسی شده و پس از حصول اطمینان از دقت مدل مذکور، بررسی‌های گسترده‌ای صورت گرفته و بهینه‌سازی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری به منظور دستیابی به کمترین ضریب هدایت حرارتی توسط روش رویه پاسخ صورت خواهد گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت‌سنجی مدل تئوری

به منظور بررسی دقت مدل تئوری ارائه شده، نتایج سه تحقیق معتبر که به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰ [31]، ۲۰۱۰ [24] و ۲۰۱۵ [29] به چاپ رسیده‌اند، به عنوان معیار سنجش در نظر گرفته شدند. نتایج تجربی تحقیقات مذکور به همراه نتایج تئوری حاصل از مدل ارائه شده و همچنین خطای مدل تئوری در جدول ۱ ارائه شده است. قابل ذکر است که از بین نتایج تجربی، با توجه به تحقیقات پیشگام فوم و نیاز به فوم‌هایی با اندازه‌های سلولی کوچک‌تر، مواردی که اندازه‌های سلولی پایین‌تر از ۲۰۰ میکرومتر داشته‌اند، انتخاب شدند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، مدل تئوری ارائه شده از دقت بسیار مطلوبی برخوردار است و ضریب هدایت حرارتی را با خطای کمتر از ۵٪ تخمین می‌زند. ضمن داشتن دقت بسیار مطلوب، سادگی مدل تئوری ارائه شده و نیاز به فقط دو خاصیت اندازه

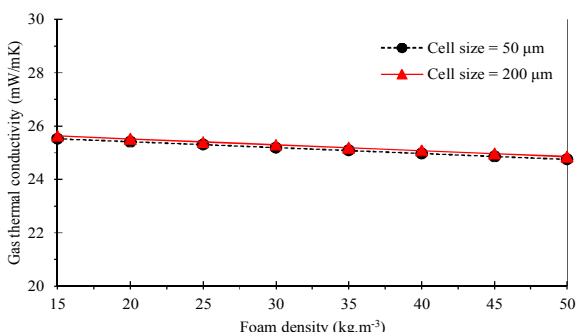
ابتدا از کلروفلوروکربن‌ها به‌عنوان گاز عایق در فوم‌های پلیمری استفاده می‌شد. این گازها به‌دلیل ضریب هدایت حرارتی بسیار پایینی که داشتند (تقریباً نصف ضریب هدایت حرارتی هوا)، عملکرد فوق عایق حرارتی به فوم‌های پلیمری می‌بخشیدند. اما این گازها تأثیر مخربی روی لایه ازن داشتند. از این رو، پروتکل مونترال ۱۹۹۶ برای منع بین‌المللی استفاده از این گازها ارایه شد [32]. پس از منع استفاده از کلروفلوروکربن‌ها، هیدروکلروفلوروکربن‌هایی مانند HCFC-22 و HCFC-141b به‌عنوان عامل فوم‌زای فوم‌های پلیمری مورد استفاده قرار گرفتند [17].

اما این عوامل فوم‌زا نیز بنا به دلایل زیست محیطی از ژانویه ۲۰۰۲ در اروپا و از ژانویه ۲۰۱۰ در آمریکا از رده خارج شدند. پس از آن استفاده از هیدروفلوروکربن‌ها رواج یافت اما پتانسیل گرمایش جهانی بالای آنها، استفاده از این مواد را محدود کرد [17]. بنابراین علی‌رغم تلاش‌های صورت‌گرفته، استفاده از گازهای عایق در فوم‌های پلیمری امکان‌پذیر نبود.

در کل، این گازهای عایق دو مشکل اساسی دارند. اولاً این گازها معمولاً برای محیط زیست مضر هستند و ثانیاً نگرانی‌ها در مورد این گازها داخل سلول‌ها در طولانی‌مدت امکان‌پذیر نبوده و ناگزیر پس از مدتی از ساختار فوم خارج شده و جای خود را به هوا می‌دهند. بنابراین استفاده از هر گونه گاز عایقی در فوم‌های پلیمری، راهکار مناسبی برای کاهش ضریب ناشی از بخش گاز نبوده و هوا رایج‌ترین گاز استفاده‌شده در فوم‌های پلیمری برای کاربردهای عایق حرارتی است.

دومین راهکار به‌منظور کاهش ضریب گاز را بایستی در ساختار سلولی فوم پلیمری جست. به این منظور در ادامه، تأثیر مهم‌ترین خواص ساختاری شامل چگالی فوم و اندازه سلولی روی ضریب گاز، بررسی می‌شود. این نتایج به‌ترتیب در نمودارهای ۲ و ۳ ذکر شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، با تغییرات چگالی فوم (نمودار ۲) و اندازه سلولی (نمودار ۳)، ضریب گاز تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. هر چند که با افزایش چگالی، ضریب گاز مقدار اندکی کاهش می‌یابد ولی از آنجایی که هدف از تولید فوم، کاهش چگالی یا به عبارتی افزایش نسبت انبساط است، بنابراین افزایش چگالی نمی‌تواند راهکار مناسبی به جهت کاهش ضریب گاز و متعاقباً کاهش ضریب هدایت حرارتی کل باشد.

شایان ذکر است که با کاهش اندازه‌های سلولی به ابعاد نانومتری، ضریب گاز کاهش چشمگیری خواهد داشت [11, 17, 33]. مطابق رابطه (۱۸)، با کاهش اندازه سلولی، عدد نادنس افزایش یافته و افزایش عدد نادنس مطابق رابطه (۱۶) موجب کاهش ضریب هدایت حرارتی گاز می‌شود. به‌صورت مثال با تولید فوم‌های پلیمری با اندازه سلولی ۷۰ نانومتر (عدد نادنس برابر یک)، ضریب هدایت حرارتی گاز به یک‌سوم ضریب هدایت حرارتی هوا یعنی ۸/۷ mW/mK خواهد رسید.



نمودار ۲) اثر چگالی فوم بر ضریب گاز

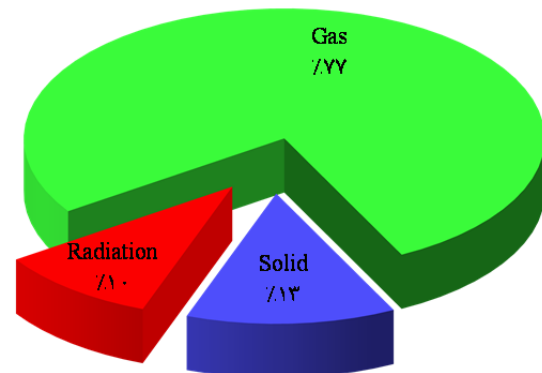
جدول ۱) صحت‌سنجی مدل تئوری در مقایسه با نتایج تجربی

شماره فوم	D (میکرومتر)	ρ_f (کیلوگرم بر مترمکعب)	λ_t (mW/mK)	λ_t (mW/mK) مدل حاضر	خطا (%)
۱ [24]	۱۰۸	۳۵	۳۴/۲	۳۲/۷	-۴/۴
۲ [29]	۲۰۰	۳۲	۳۳/۱	۳۳/۲	۰/۳
۳ [31]	۱۵۶	۱۵/۵	۳۵/۵	۳۳/۸	-۴/۸
۴ [31]	۱۴۸	۱۸/۲	۳۴/۲	۳۳/۴	-۲/۳
۵ [31]	۱۲۸	۲۲/۶	۳۳/۱	۳۳/۵	۱/۲
۶ [31]	۸۶	۲۲/۸	۳۳/۳	۳۲/۳	-۳/۰
۷ [31]	۱۹۴	۲۲/۸	۳۲/۱	۳۳/۵	۴/۴
۸ [31]	۱۶۶	۳۰/۵	۳۱/۴	۳۳/۰	۵/۱
۹ [31]	۷۵	۳۰/۶	۳۱/۹	۳۱/۸	-۰/۳
۱۰ [31]	۱۱۳	۳۳/۶	۳۱/۵	۳۲/۷	۳/۸

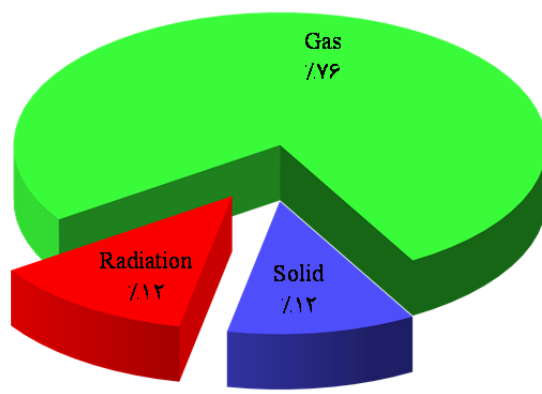
در ادامه، ابتدا تحلیل‌های گسترده‌ای بر ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری صورت گرفته و ساز و کار مکانیزم‌های مختلف بررسی شده و در انتها، بهینه‌سازی ضریب هدایت حرارتی صورت خواهد گرفت.

۳-۲- مشارکت مکانیزم‌های مختلف

نمودار ۱ میزان مشارکت سه مکانیزم مختلف ضریب هدایت حرارتی را برای فوم‌های شماره ۱ و ۲ (ارایه‌شده در جدول ۱) نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نمودار ۱ نشان می‌دهد، بیشترین سهم ضریب هدایت حرارتی متعلق به گاز داخل سلول‌های فوم است که بیش از سه‌چهارم ضریب هدایت حرارتی، از آن ناشی می‌شود. بنابراین می‌توان با کاهش ضریب ناشی از گاز، ضریب هدایت حرارتی کل را به‌صورت چشمگیری کاهش داد. اولین راهکاری که بدین‌منظور توسط محققین ارایه شد، استفاده از گازهای عایق بود.

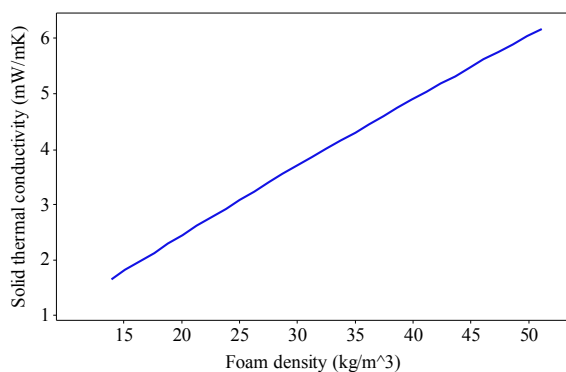


الف

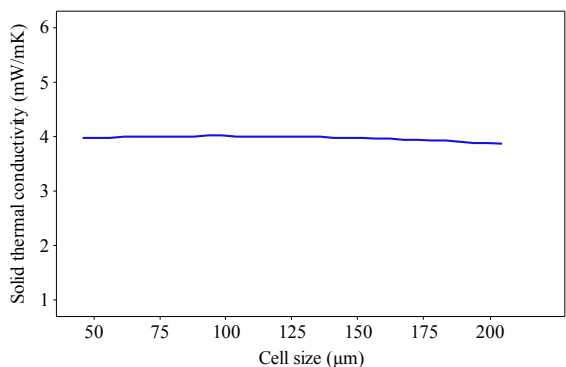


ب

نمودار ۱) مشارکت مکانیزم‌های مختلف هدایت حرارتی (الف) فوم شماره ۱ و (ب) فوم شماره ۲

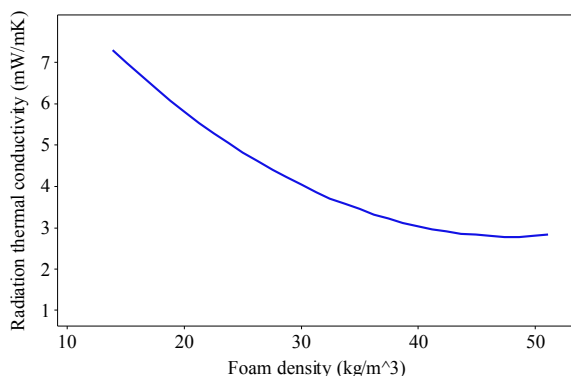


الف

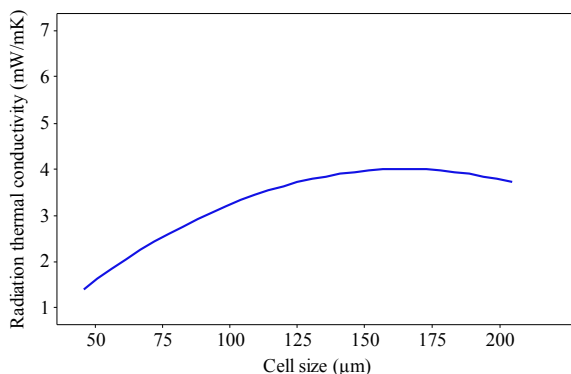


ب

نمودار ۴) اثر الف (چگالی فوم و ب) اندازه سلولی روی ضریب جامد



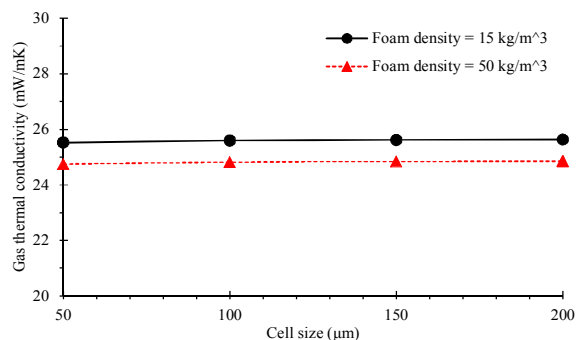
الف



ب

نمودار ۵) اثر الف (چگالی فوم و ب) اندازه سلولی روی ضریب تشعشعی

۳-۲-۳- بهینه‌سازی: در ادامه، بهینه‌سازی همزمان ضرایب جامد و تشعشعی صورت می‌گیرد. به این منظور از ابزار بهینه‌سازی چندهدفه روش رویه پاسخ کمک گرفته شد. هدف اولیه، پیدا کردن شرایطی تعریف شد که در آن هر دو ضریب جامد و تشعشعی بین



نمودار ۳) اثر اندازه سلولی بر ضریب گاز

۳-۳- روش رویه پاسخ

۳-۳-۱- بررسی پارامتری: چگالی فوم و اندازه سلولی به‌عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شوند. بر همین اساس، جدول طراحی آزمایش‌ها مطابق جدول ۲ خواهد بود. قابل ذکر است که تمامی تحلیل‌های رویه پاسخ، در نرم‌افزار مینی‌تب صورت گرفته است. همچنین نتایج مربوط به ضرایب ناشی از جامد و تشعشعی براساس مدل تئوری ارائه شده در مقاله حاضر، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲) طراحی آزمایش‌ها و نتایج ضرایب جامد و تشعشعی

آزمایش	ρ_f (کیلوگرم بر مترمکعب)	D (میکرومتر)	λ_s (mW/mK)	λ_r (mW/mK)
۱	۲۰	۱۷۸	۲/۴	۵/۷
۲	۳۳	۱۲۵	۴/۰	۳/۷
۳	۳۳	۱۲۵	۴/۰	۳/۷
۴	۲۰	۷۲	۲/۴	۳/۹
۵	۳۳	۱۲۵	۴/۰	۳/۷
۶	۳۳	۲۰۰	۳/۹	۴/۰
۷	۳۳	۵۰	۴/۰	۱/۷
۸	۳۳	۱۲۵	۴/۰	۳/۷
۹	۵۰	۱۲۵	۶/۱	۲/۵
۱۰	۳۳	۱۲۵	۴/۰	۳/۷
۱۱	۴۵	۷۲	۵/۵	۱/۹
۱۲	۱۵	۱۲۵	۱/۸	۷/۷
۱۳	۴۵	۱۷۸	۵/۴	۳/۰

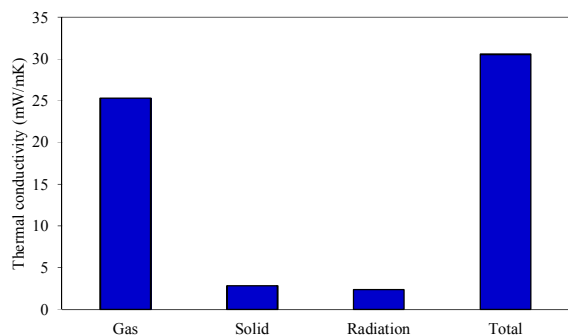
با واردکردن این نتایج در نرم‌افزار مینی‌تب، اثرات پارامترهای در نظر گرفته شده روی ضرایب جامد و تشعشعی به‌ترتیب مطابق نمودارهای ۴ و ۵ حاصل شد.

مطابق نمودار ۴، با کاهش چگالی فوم، ضریب جامد به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. با کاهش چگالی فوم، سهم پلیمر خالص کاهش یافته و سبب کاهش ضریب جامد می‌شود ولی مطابق نمودار ۵، کاهش چگالی، موجب افزایش ضریب تشعشعی خواهد شد. به‌دلیل کاهش سهم پلیمر جامد و افزایش سهم هوا در فوم پلیمری، میزان تشعشع بیشتری از فوم پلیمری عبور کرده و ضریب تشعشعی افزایش می‌یابد. مطابق نمودار ۴، تغییرات اندازه سلولی تاثیر محسوسی روی ضریب جامد ندارد در حالی که نمودار ۵ نشان می‌دهد که کاهش اندازه سلولی باعث کاهش ضریب تشعشعی می‌شود. این اثر را بدین‌گونه می‌توان توجیه کرد که با کاهش اندازه سلولی، تعداد سلول‌های موجود در یک حجم ثابت افزایش پیدا می‌کند. افزایش تعداد سلول‌ها به معنی افزایش دیواره‌ها و استرات‌های سلولی است که نقش اساسی را در میرایی تشعشع ایفا کرده و سبب کاهش ضریب تشعشعی خواهند شد.

بهینه‌سازی ضرایب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی فوم‌های پلیمری با استفاده از... ۲۱۷۱
مترمکعب و اندازه سلولی ۵۳ میکرومتر) تقریباً ۳۰ mW/mK خواهد بود که برای فوم‌های پلیمری در بازه ریزسلولی و فاقد هر گونه گاز عایق، مقدار بسیار مطلوبی است.

جدول (۳) نتایج ضریب هدایت حرارتی جامد و تشعشعی در حالت بهینه

روش	λ_s (mW/mK)	λ_r (mW/mK)
مدل تئوری	۲/۸۴	۲/۴۰
رویه پاسخ	۲/۸۵	۲/۹۴



نمودار (۸) ضرایب هدایت حرارتی در حالت بهینه

در تحقیق حاضر، ضمن ارایه یک مدل تئوری جدید به‌منظور تخمین ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری که فقط بر مبنای چگالی فوم و اندازه سلولی است، بهینه‌سازی ضرایب جامد و تشعشعی به روش طراحی آزمایش رویه پاسخ صورت گرفت. از آنجایی که بررسی اثر پارامترهای مختلف روی مکانیزم‌های مختلف انتقال حرارت در فوم‌های پلیمری به‌صورت تجربی بسیار دشوار است، مدل تئوری ارایه‌شده می‌تواند بسیار سودمند باشد. ضمن اینکه بررسی‌های عمیق‌تری به‌ویژه با وارد شدن به محدوده اندازه‌های سلولی میکرو و نانو نیاز خواهد بود.

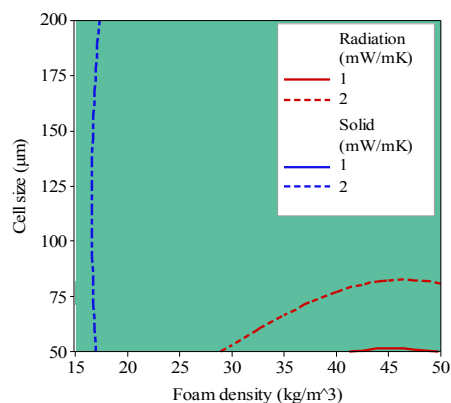
۴- نتیجه‌گیری

امروزه، بررسی خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری یکی از مهم‌ترین مباحث در جوامع علمی به‌منظور جلوگیری از هدررفت انرژی و متعاقباً حفظ منابع انرژی است. از آنجایی که ضریب هدایت حرارتی فوم‌های پلیمری متشکل از سه مکانیزم مختلف بوده و هر کدام از این مکانیزم‌ها متأثر از پارامترهای مختلفی هستند، بررسی تجربی ساز و کار ضریب هدایت حرارتی این مواد بسیار چالش‌برانگیز است. از همین رو نیاز به مدل‌های تئوری ضروری است. در تحقیق حاضر، یک مدل تئوری بر مبنای اندازه سلولی و چگالی فوم ارایه شد که ضمن داشتن دقت بسیار مطلوب (خطای کمتر از ۵٪)، می‌توان نیاز به فقط دو خاصیت ذکر شده را از برتری‌های این مدل نسبت به مدل‌های قبلی برشمرد. پس از حصول اطمینان از دقت مدل ارایه‌شده در قیاس با نتایج تجربی متعدد، بهینه‌سازی ضرایب جامد و تشعشعی به‌وسیله روش رویه پاسخ صورت گرفت و نتایج نشان داد که در شرایط بهینه، ضریب هدایت حرارتی کل حدود ۳۰ mW/mK خواهد بود که در بازه فوم‌های پلیمری ریزسلولی، مقدار بسیار مطلوبی است.

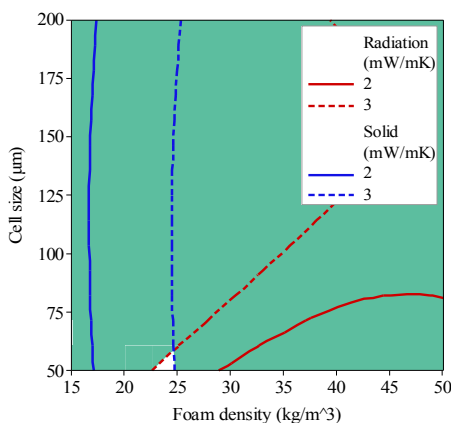
تشکر و قدردانی: نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خود را از تمامی دوستان و همکارانی که در آماده‌سازی این مقاله به هر نحوی تاثیرگذار بوده‌اند، ابراز می‌دارند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که این مقاله حاصل دستاوردهای پژوهشی ایشان بوده و این مقاله یا بخشی از

یک تا ۲ mW/mK باشند. این نتایج در نمودار ۶ ارایه شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، امکان وقوع چنین حالتی امکان‌پذیر نیست. به عبارتی دیگر، هیچ شرایط ساختار سلولی متشکل از چگالی فوم و اندازه سلولی وجود ندارد که به‌ازای آن، مجموع ضرایب جامد و تشعشعی کمتر از ۴ mW/mK باشد. در ادامه حالتی در نظر گرفته شد که ضرایب جامد و تشعشعی به‌صورت همزمان مقداری بین ۲ تا ۳ mW/mK داشته باشند. این نتایج در نمودار ۷ ارایه شده است.



نمودار (۶) امکان‌سنجی وجود حالت بهینه با فرض ضرایب جامد و تشعشعی بین ۲ mW/mK تا ۱



نمودار (۷) امکان‌سنجی وجود حالت بهینه با فرض ضرایب جامد و تشعشعی بین ۳ mW/mK تا ۲

همان‌طور که نمودار ۷ نشان می‌دهد، وجود حالتی که به‌صورت همزمان ضرایب جامد و تشعشعی کمتر از ۳ mW/mK باشند، امکان‌پذیر است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، چگالی فوم ۲۳/۵ کیلوگرم بر مترمکعب و اندازه سلولی ۵۳ میکرومتر به‌عنوان حالت بهینه انتخاب شدند.

یکی از ابزارهای مفید روش رویه پاسخ، امکان پیش‌بینی مقادیر پاسخ در شرایط بهینه است. نتایج تخمین زده‌شده توسط مدل تئوری ارایه‌شده در تحقیق حاضر و همچنین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط روش رویه پاسخ در شرایط بهینه در جدول ۳ ارایه شده است. همان‌طور که مشخص است، نتایج حاصل از مدل تئوری و روش رویه پاسخ تطابق مطلوبی با هم دارند که نشان از قابلیت اعتماد مطلوب روش رویه پاسخ دارد.

ضرایب مختلف و همچنین ضریب هدایت حرارتی کل در شرایط بهینه، در نمودار ۸ نشان داده شده است. مطابق نتایج، ضریب هدایت حرارتی در شرایط بهینه (چگالی فوم ۲۳/۵ کیلوگرم بر

آن در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده است.

تعارض منافع: نویسندگان مقاله تعهد می‌نمایند که هیچ‌گونه تعارض منافعی بین هر یک از عوامل مشارکت‌کننده در تولید این مقاله (حامیان مالی، پشتیبانان علمی و نویسندگان) وجود ندارد.

سهم نویسندگان: زرگار حسن‌زاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیل‌گر داده‌ها/نگارنده بحث (۳۰٪)؛ طاهر ازدست (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/تحلیل‌گر داده‌ها (۴۰٪)؛ علی دنیوی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی (۱۵٪)؛ ریچارد یونگی لی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۱۵٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

- Okolieocha C, Raps D, Subramaniam K, Altstädt V. Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004-2015) and future directions - a review. *European Polymer Journal*. 2015;73:500-519.
- Altan M. Thermoplastic foams: Processing, manufacturing, and characterization. In: Çankaya N, editor. *Recent research in polymerization*. London: IntechOpen; 2018.
- Zenkert D, Burman M. Tension, compression and shear fatigue of a closed cell polymer foam. *Composites Science and Technology*. 2009;69(6):785-792.
- Ruiz-Herrero JL, Estravis S, Rodríguez-Pérez MA. Polymeric foams. In: Othmer K. *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2015.
- Notario B, Pinto J, Rodríguez-Pérez MA. Towards a new generation of polymeric foams: PMMA nanocellular foams with enhanced physical properties. *Polymer*. 2015;63:116-126.
- Wang G, Wang C, Zhao J, Wang G, Park CB, Zhao G. Modelling of thermal transport through a nanocellular polymer foam: Toward the generation of a new superinsulating material. *Nanoscale*. 2017;9(18):5996-6009.
- Kazemilari M, Mardani A, Streimikiene D, Zavadskas EK. An overview of renewable energy companies in stock exchange: Evidence from minimal spanning tree approach. *Renewable Energy*. 2017;102(Pt A):107-117.
- Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(3):1513-1524.
- Arif Hasan M, Sumathy K. Photovoltaic thermal module concepts and their performance analysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(7):1845-1859.
- Nejat P, Jomehzadeh F, Taheri MM, Gohari M, Majid MZA. A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015;43:843-862.
- Wang G, Zhao J, Mark LH, Wang G, Yu K, Wang C, et al. Ultra-tough and super thermal-insulation nanocellular PMMA/TPU. *Chemical Engineering Journal*. 2017;325:632-646.
- Jelle BP. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. 2011;43(10):2549-2563.
- Bernardo V, Laguna-Gutierrez E, Lopez-Gil A, Rodriguez-Perez MA. Highly anisotropic crosslinked HDPE foams with a controlled anisotropy ratio: Production and characterization of the cellular structure and mechanical properties. *Materials & Design*. 2017;114:83-91.
- Mills NJ. *Handbook of polymeric foams and foam technology*. D. Klempner D, Frisch KC, editors. Munich: Carl Hanser Verlag; 1993.
- Lee RE, Hasanzadeh R, Azdast T. A multi-criteria decision analysis on injection moulding of polymeric microcellular nanocomposite foams containing multi-walled carbon nanotubes. *Plastics Rubber and Composites*. 2017;46(4):155-162.
- Forest C, Chaumont P, Cassagnau P, Swoboda B, Sonntag P. Polymer nano-foams for insulating applications prepared from CO₂ foaming. *Progress in Polymer Science*. 2015;41:122-145.
- Notario B, Pinto J, Solorzano E, De Saja JA, Dumon M, Rodríguez-Pérez MA. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams. *Polymer*. 2015;56:57-67.
- Gong P, Wang G, Tran MP, Buahom P, Zhai Sh, Li G, et al. Advanced bimodal polystyrene/multi-walled carbon nanotube nanocomposite foams for thermal insulation. *Carbon*. 2017;120:1-10.
- Wang G, Zhao J, Wang G, Mark LH, Park CB, Zhao G. Low-density and structure-tunable microcellular PMMA foams with improved thermal-insulation and compressive mechanical properties. *European Polymer Journal*. 2017;95:382-393.
- Zhao J, Zhao Q, Wang L, Wang C, Guo B, Park CB, et al. Development of high thermal insulation and compressive strength BPP foams using mold-opening foam injection molding with in-situ fibrillated PTFE fibers. *European Polymer Journal*. 2018;98:1-10.
- Gong P, Buahom P, Tran MP, Saniei M, Park CB, Pötschke P. Heat transfer in microcellular polystyrene/multi-walled carbon nanotube nanocomposite foams. *Carbon*. 2015;93:819-829.
- Lu X, Caps R, Fricke J, Alviso CT, Pekala RW. Correlation between structure and thermal conductivity of organic aerogels. *Journal of Non Crystalline Solids*. 1995;188(3):226-234.
- Placido E, Arduini-Schuster MC, Kuhn J. Thermal properties predictive model for insulating foams. *Infrared Physics & Technology*. 2005;46(3):219-231.
- Kaemmerlen A, Vo C, Asllanaj F, Jeandel G, Baillis D. Radiative properties of extruded polystyrene foams: Predictive model and experimental results. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2010;111(6):865-877.
- Ferkl P, Pokorný R, Bobák M, Kosek J. Heat transfer in one-dimensional micro-and nano-cellular foams. *Chemical Engineering Science*. 2013;97:50-58.
- Wang G, Zhao J, Yu K, Mark LH, Wang G, Gong P, et al. Role of elastic strain energy in cell nucleation of polymer foaming and its application for fabricating sub-microcellular TPU microfilms. *Polymer*. 2017;119:28-39.
- Daryadel M, Azdast T, Hasanzadeh R, Molani S. Investigation of cell wall thickness and impact strength of polypropylene microcellular nanocomposite foams produced by batch process. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018;5(1):135-142. [Persian]
- Xu J, Wu T, Sun W, Peng C. Generalization and modelling of rigid polyisocyanurate foam reaction kinetics, structural units effect, and cell configuration

34- Costeux S, Zhu L. Low density thermoplastic nanofoams nucleated by nanoparticles. *Polymer*. 2013;54(11):2785-2795.

35- Yeh SK, Liu YC, Chu CC, Chang KC, Wang SF. Mechanical properties of microcellular and Nanocellular thermoplastic polyurethane nanocomposite foams created using supercritical carbon dioxide. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017;56(30):8499-8507.

36- Martín-de León J, Bernardo V, Rodríguez-Pérez MÁ. Key production parameters to obtain transparent nanocellular PMMA. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2017;302(12):1700343.

37- Okolieocha C, Beckert F, Herling M, Breu J, Mülhaupt R, Altstädt V. Preparation of microcellular low-density PMMA nanocomposite foams: Influence of different fillers on the mechanical, rheological and cell morphological properties. *Composites Science and Technology*. 2015;118:108-116.

38- Lee LJ, Zeng C, Cao X, Han X, Shen J, Xu G. Polymer nanocomposite foams. *Composites Science and Technology*. 2005;65(15-16):2344-2363.

mechanism. *Cellular Polymers*. 2017;36(6):285-312.

29- Arduini-Schuster M, Manara J, Vo C. Experimental characterization and theoretical modeling of the infrared-optical properties and the thermal conductivity of foams. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015;98:156-164.

30- Campo-Arnáiz RA, Rodríguez-Pérez MA, Calvo B, De Saja JA. Extinction coefficient of polyolefin foams. *Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics*. 2005;43(13):1608-1617.

31- Schellenberg J, Wallis M. Dependence of thermal properties of expandable polystyrene particle foam on cell size and density. *Journal of Cellular Plastics*. 2010;46(3):209-222.

32- Montzka SA, Butler JH, Elkins JW, Thompson TM, Clarke AD, Lock LT. Present and future trends in the atmospheric burden of ozone-depleting halogens. *Nature*. 1999;398:690-694.

33- Liu Sh, Duvigneau J, Julius Vancso G. Nanocellular polymer foams as promising high performance thermal insulation materials. *European Polymer Journal*. 2015;65:33-45.