



تعیین همبستگی چگالی با تنش فشاری و ضریب هدایت حرارتی عایق حرارتی پلی استایرن منبسط

سهراب ویسه^{۱*}، مهناز مظلومی ثانی^۲

۱. عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۲. کارشناس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

* تهران، صندوق پستی ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵، behs.bhrc.ac.ir، veiseh@bhrc.ac.ir

چکیده

یکی از مهمترین عوامل در انتخاب عایق حرارتی مناسب برای کاربردهای ساختمانی مقدار ضریب هدایت حرارتی آن است. عوامل تاثیرگذار دیگر عبارتند از: مقاومت در برابر نفوذ بخار آب، جذب آب و مقاومت‌های مکانیکی. برای اندازه‌گیری بعضی از این خواص آزمایش‌های سخت و زمان‌بر لازم است اما تعیین چگالی فرآورده ساده و سریع انجام می‌گیرد. چنانچه بتوان ارتباط بین پارامترهای فوق و چگالی را با انجام تعداد زیادی آزمایش به دست آورد، با اندازه‌گیری چگالی می‌توان با تقریب خوب بعضی از این خواص را برآورد کرد. در این مقاله رابطه تنش فشاری و ضریب هدایت حرارتی فرآورده‌های فوم پلی استایرن منبسط (EPS) با چگالی‌های متفاوت بررسی می‌شود. آزمون تعیین چگالی، ضریب هدایت حرارتی و تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل در مورد حدود ۲۰۰ نمونه EPS تولید داخل کشور انجام شد. بررسی نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد با افزایش چگالی EPS مقدار ضریب هدایت حرارتی به طور غیرخطی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی EPS مقدار تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل به طور خطی افزایش می‌یابد. در این مقاله روابط بین پارامترهای یاد شده شرح داده می‌شود.

کلید واژه‌ها

عایق حرارتی، پلی استایرن منبسط، چگالی، تنش فشاری

Relationship between Density, Compressive Stress, and Thermal Conductivity of Expanded Polystyrene Insulation

Sohrab Veiseh^{1*}, Mahnaz Mazloomisani²

1. Head of Building Materials and Products Department, Building and Housing Research Center, P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran

TeleFax: 9821-88384185, Email: veiseh@bhrc.ac.ir

2. Expert at Building Materials and Products Department, Building and Housing Research Center, P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran

TeleFax: 9821-88384185, Email: mazloomisani_m@bhrc.ac.ir

Abstract

One of the most important factors in selecting thermal insulation products for building applications is thermal conductivity. Other factors include resistance to water vapor permeability, water absorption and mechanical properties. Determination of some of these properties is difficult and time-consuming. But determination of the density is simple, fast and cheap. If the relationships between these properties and density can be achieved by performing a lot of experiments, with measuring the density some of these properties can be estimated with good approximation. In this paper, the relationship between compressive stress and thermal conductivity with density of expanded polystyrene products (EPS) is studied. Tests for determination of density, thermal conductivity and compressive stress at 10% deformation of domestic EPS products were conducted for about 200 samples. Experimental results show that with increasing density of EPS, thermal conductivity non-linearly decreases. On the other hand, compressive stress at 10% deformation increases linearly with increase of EPS density. In this paper, the relationships between the above mentioned parameters were studied.

Keywords

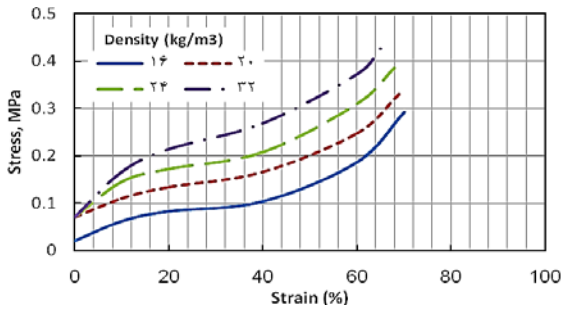
Thermal insulation, expanded polystyrene, density, compressive stress

۱- مقدمه

ساختار سلولی بسته پر شده از هوا، ساخته می‌شود. تخته پلی استایرن منبسط فرآورده عایق کاری صلب (قالب‌گیری شده، یا به طور پیوسته فوم شده) با سطح مقطع و شکل مستطیل است که در آن ضخامت به طور قابل

پلی استایرن منبسط (EPS) مصالح پلاستیکی سلولی صلبی است که از قالب‌گیری دانه‌های پلی استایرن قابل انبساط یا یکی از کopolymerهای آن، با

حال، متغیرهایی مانند نوع مواد خام مورد استفاده، هندسه قطعه قالب‌گیری شده و شرایط فرآیند بر خواص محصول و عملکرد آن اثر دارند. چنانچه در منحنی‌های تنش/ کرنش شکل ۲ نشان داده شده است، مقاومت فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل اغلب به عنوان ترازوی برای حداقل مقدار جذب انرژی در زیر بارگذاری در نظر گرفته می‌شود [۳].



شکل ۲ نمودار تنش فشاری - تغییر شکل EPS در چگالی‌های متفاوت [۳]

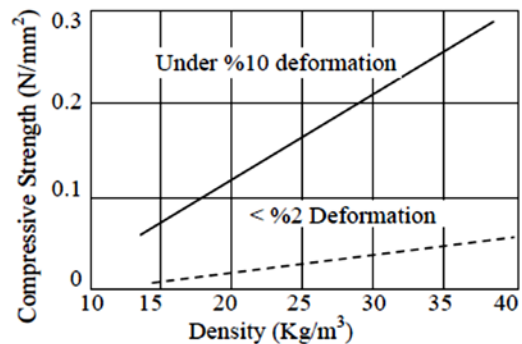
آزمون‌های فشاری، منعکس‌کننده تنش و یا تغییر شکل تحت شرایط افزایش بار در کوتاه مدت است. اگر فوم پلی‌استایرن در معرض شرایط بارگذاری خمشی یا فشاری درازمدت قرار گیرد تغییر شکل ممکن است به صورت خزش افزایش یابد. علاوه بر متغیرهای ماده و فرآیند در معرض قرارگیری در حداکثر دمای کاربرد توصیه شده 73°C خواص مکانیکی را تا حدی تحت تاثیر قرار خواهد داد [۳].

در جدول ۱ برخی از خواص فیزیکی و حرارتی EPS ارائه شده است [۴].

توجهی کوچک‌تر از سایر ابعاد است. از انواع پلی‌استایرن منبسط می‌توان به پلی‌استایرن منبسط کندسوز شده (حاوی ماده کندسوزکننده (HBCD) و پلی‌استایرن حاوی ذرات گرافیت (به عنوان بازتابنده فرسوخ که عملکرد حرارتی را بهبود می‌دهد) اشاره نمود [۱].

فوم پلی‌استایرن منبسط (EPS) که یکی از عایق‌های متداول است، به صورت تخته در اندازه‌های مختلف برای عایقکاری حرارتی دیوارهای پیرامونی، بام و کف پائین‌ترین طبقه قابل استفاده است. از مزایای EPS قیمت قابل قبول، در دسترس بودن، محکم و پایدار بودن آن، مقاومت در برابر نفوذ بخار آب و خواص حرارتی مناسب می‌باشد [۱].

با توجه به چگالی بسیار کم در مقایسه با مواد مشابه دیگر، مقاومت فشاری فوم پلی‌استایرن بیشتر است. مقاومت EPS تحت فشار و مقاومت در برابر تغییر شکل با زیاد شدن چگالی افزایش می‌یابد (شکل ۱) [۲].



شکل ۱ مقاومت فشاری EPS در برابر چگالی و تغییر شکل [۲]

خواص مکانیکی فوم پلی‌استایرن تا حد زیادی به چگالی بستگی دارد. به طور کلی، خصوصیات مقاومتی با افزایش چگالی بهتر می‌شود. با این

جدول ۱ مثالی از خواص نوع EPS [۴]

EPS250	EPS200	EPS150	EPS100	EPS70	واحد	
خواص مکانیکی						
۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۷۰	kPa	مقاومت فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل
۱۰۰	۹۰	۷۰	۴۵	۲۰	kPa	مقاومت فشاری در ۱٪ تغییر شکل
۳۵۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۱۵	kPa	مقاومت خمشی
خواص حرارتی						
۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۶	۰/۰۳۸	W/m.K در 10°C	ضریب هدایت حرارتی
۲۹/۴۱	۲۹/۴۱	۲۸/۵۷	۲۷/۷۸	۲۶/۳۲	m.K /W در 10°C	ضریب مقاومت حرارتی
سایر خواص						
۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	kg/m ³	چگالی اسمی

در چگالی‌های زیاد و یکسان ضریب هدایت حرارتی به‌طور کلی به قطر متوسط سلول فوم EPS وابسته نیست. در حالی که در چگالی‌های فوم کمتر، ضریب هدایت حرارتی با افزایش قطر متوسط سلول فوم در محدوده چگالی‌های فوم از ۱۰ تا ۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب کاهش می‌یابد.

یوسل (۲۰۰۳) ضریب هدایت حرارتی فرآورده‌های EPS با پنج چگالی (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰) را تعیین نمود. وی بیان کرد چگالی و ضریب هدایت حرارتی به‌طور معکوس متناسب‌اند. شکل منحنی معادله درجه ۲ (رابطه ۱) بود [۲].

$$y = 2 \times 10^{-5}x^2 - 0.0013x + 0.057 \quad (1)$$

توسط آزمون غیرمستقیم می‌توان یک خاصیت را با استفاده از آزمون یک یا چند خاصیت دیگر ارزیابی کرد. این در صورتی است که یک همبستگی بین آنها ایجاد شود. آزمون غیرمستقیم را می‌توان برای کاهش تعداد تناوب آزمون مستقیم نیز به کار برد. همبستگی باید توسط محاسبات آماری مناسب، برای مثال تحلیل رگرسیون بر اساس آزمون‌های ابتدایی کافی برای هر واحد (خط) تولید، تعیین شود و آن را باید در فواصل زمانی تجویز شده و بعد از تغییرات یا اصلاحات صورت گرفته، در صورتی که امکان تاثیر در همبستگی را داشته باشند، دوباره بررسی کرد.

برای هر روش کار آزمون غیرمستقیم که در محل تولید انجام می‌شود، روش نمونه‌برداری و معیار انطباق، برای خاصیت غیرمستقیم، باید با در نظر گرفتن همبستگی مربوط میان خواص مورد نظر تعیین شود. نتیجه استفاده از آزمون غیرمستقیم باید حداقل همان تراز اطمینان خاصیت مربوط را هنگام استفاده از آزمون مستقیم به دست دهد. در صورت اختلاف نظر باید از روش آزمون مشخص شده برای خاصیت مورد نظر در استاندارد فرآورده مربوط استفاده شود [۷].

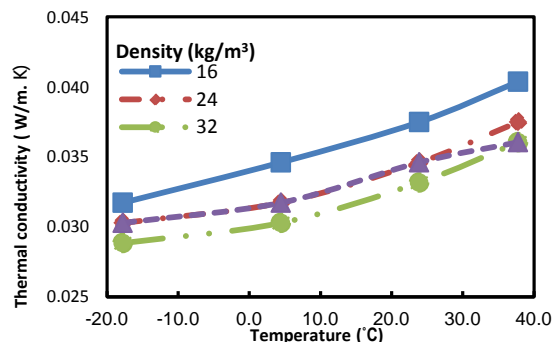
اگر آزمون غیرمستقیم به کار رود، همبستگی بین خواص غیرمستقیم و آنچه مستقیماً آزمون شده، باید شناخته شود. در این روش باید خواص بر اساس فاصله پیش بینی ۹۰٪ یک طرفه محاسبه شود. در این زمینه تنش فشاری در تغییر شکل ۱۰٪ و ضریب هدایت حرارتی را می‌توان به‌طور غیرمستقیم با استفاده از چگالی ظاهری و همبستگی ریاضی برقرار شده آن با این خواص، ارزیابی نمود.

در این مقاله، رابطه چگالی با تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل از یک سو و رابطه چگالی با ضریب هدایت حرارتی پلی استایرن منبسط از سوی دیگر با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

۲-۱ تعیین ضریب هدایت حرارتی: این آزمایش با دستگاه جریان حرارت‌سنج^۳ (HFM) مطابق استاندارد ملی ایران ۸۶۲۱: سال ۱۳۸۵ "فرآورده‌های عایق کاری حرارتی- تعیین مقاومت حرارتی به وسیله لوح گرم محافظت شده و روش جریان حرارت سنج فرآورده‌های با مقاومت حرارتی زیاد و متوسط، روش آزمون" انجام شد. در دستگاه جریان حرارت‌سنج، چگالی نرخ جریان حرارت به وسیله دو جریان حرارت سنج که در مقابل آزمون قرار دارند، اندازه‌گیری می‌شود. دستگاه جریان حرارت‌سنج مورد استفاده شامل یک واحد گرم‌کننده، دو جریان حرارت‌سنج و یک واحد

مهمترین ویژگی عایق‌های حرارتی ضریب هدایت حرارتی آنهاست. ضریب هدایت حرارتی عایق‌های مختلف، بستگی به اختلاف دما بین سطوح عایق، چگالی، رطوبت ماده و سایر موارد دارد. معمولاً هرچه دما بالاتر رود، ضریب هدایت حرارتی عایق‌ها نیز افزایش می‌یابد. ضریب هدایت حرارتی EPS با چگالی و دمای محیط مطابق با شکل ۳ تغییر می‌کند [۳].



شکل ۳ نمودار ضریب هدایت حرارتی EPS در برابر دما در چگالی‌های مختلف [۳]

EPS به اندازه کافی انعطاف‌پذیر است. بنابراین، انبساط حرارتی آن مشکلی در روش‌های مختلف عایق‌کاری به وجود نمی‌آورد. محدوده دمای کاربرد EPS را می‌توان در محدوده ۱۵۰- تا ۸۰ درجه سلسیوس به کار برد [۴].

بنابر نظر لاکاتوس^۱ و کالمار^۲ (۲۰۱۳) تحلیل ضریب هدایت حرارتی عایق‌های حرارتی مختلف در کاربردهای آن، در خانه‌های غیرفعال و با انرژی تقریباً صفر بسیار با اهمیت است. ایشان نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در مورد ضریب هدایت حرارتی عایق‌های EPS با ضخامت‌ها و مقدار منافذ هوایی متفاوت را ارائه کردند [۵].

کاهش ضریب هدایت حرارتی توسط افزایش تعداد دانه‌های EPS در واحد حجم فراهم می‌شود. در این حالت بین دانه‌ها فضای خالی کمتری وجود خواهد داشت. این کاهش در ضریب هدایت حرارتی تا رسیدن به مقدار بهینه مطلوب است [۲].

یک روش برای بهبود بازدهی رفتار عایق حرارتی فوم پلی استایرن دانه‌ای (EPS)، کاهش ضریب هدایت حرارتی از طریق کاهش بخش تابش آن با بزرگ‌سازی تنظیم شده اندازه سلول فوم دانه‌هاست. این مورد با تعیین وابستگی اندازه سلول و ضریب هدایت حرارتی در چگالی‌های فوم دانه در محدوده وسیعی با استفاده از نمونه‌های فوم پلی استایرن منبسط مورد بررسی قرار گرفت. این فوم‌ها دارای اندازه سلول کوچک متداول و همچنین اندازه سلول بزرگ بودند [۶].

بر اساس وابستگی اندازه سلول به چگالی در فوم‌های EPS با سلول‌های کوچک، معادله‌ای نیز برای فوم‌های با سلول‌های بزرگتر داده شد. در قطر متوسط یکسان سلول‌های فوم (در حدود ۵۰ تا ۳۵۰ میکرومتر)، با کاهش چگالی فوم، ضریب هدایت حرارتی EPS افزایش می‌یابد [۶].

1 Lakatos
2 Kalmár

3 Heat flow meter

شد. تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییرشکل، $\bar{\sigma}_{10}$ ، بر حسب kPa ، با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_{10}} \quad (2)$$

که در آن F_{10} نیروی مربوط به کرنش ۱۰ درصد به نیوتن و A_0 مساحت مقطع عرضی آزمون به میلی‌متر مربع است.

۳. نتایج و بحث

از عوامل مؤثر برای انتخاب عایق حرارتی مناسب مقدار ضریب هدایت حرارتی فرآورده عایق است. عوامل تاثیرگذار دیگر عبارتند از: مقاومت در برابر نفوذ بخار آب، جذب آب و مقاومت‌های مکانیکی. اندازه‌گیری بعضی از این خواص آزمایش‌هایی سخت و زمان‌بر است اما تعیین چگالی فرآورده ساده و سریع انجام می‌گیرد. چنانچه بتوان ارتباط بین پارامترهای فوق و چگالی را با انجام تعداد زیادی آزمایش به دست آورد، با اندازه‌گیری چگالی می‌توان با تقریب خوب بعضی از این خواص را برآورد کرد. این روش آزمون غیرمستقیم نامیده می‌شود.

برای انطباق داده‌های مقادیر ضریب هدایت حرارتی و تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییرشکل در برابر چگالی EPS، از نرم افزار Datafit که به‌طور معمول، برای تجزیه و تحلیل آماری و رسم نمودارها در کاربردهای آماری، علمی و مهندسی به‌کار می‌رود، استفاده شد. با استفاده از این برنامه می‌توان رگرسیون خطی یا غیرخطی بر روی داده‌ها را به دست آورد.

۳-۱ رابطه بین رفتار فشاری و چگالی ظاهری

آزمون تعیین چگالی و تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییرشکل، بر روی تعداد ۶۸ نمونه فرآورده‌های EPS داخل کشور انجام شد و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در این آزمون‌ها محدوده چگالی متوسط کمتر از $15 kg/m^3$ و چگالی زیاد بیش از $15 kg/m^3$ در نظر گرفته شد. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب رابطه نیرو در برابر تغییرشکل نمونه‌های EPS با چگالی متوسط و چگالی زیاد را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش چگالی قابلیت تحمل بار افزایش یافته است.

سردکننده است. آزمون بین صفحه‌های گرم و سرد قرار داده می‌شود. جهت جریان حرارت از بالا به پایین است.

در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، از دستگاه HFM ساخت کارخانه نج^۱ مدل HFM 436/3/1E، استفاده شد. طول و عرض آزمون‌های آزمایش شده حدود $300 mm \times 300 mm$ و ضخامت آزمون‌ها بین $35 mm$ تا $50 mm$ بود. دمای متوسط $10^\circ C$ انتخاب شد.

دستگاه مورد استفاده به یک بخش سنجش مرکزی، با مساحت $100 mm \times 100 mm$ و یک بخش محافظ در اطراف آن، تقسیم می‌شود. برای اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی یک نمونه منفرد پلی‌استایرن منبسط تغییرات بین نتایج آزمایش‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کم (عمدتاً کمتر از ± 1 درصد) بود.

۲-۲ اندازه‌گیری چگالی ظاهری: آزمایش مطابق استاندارد ملی ایران ۷۱۱۸:

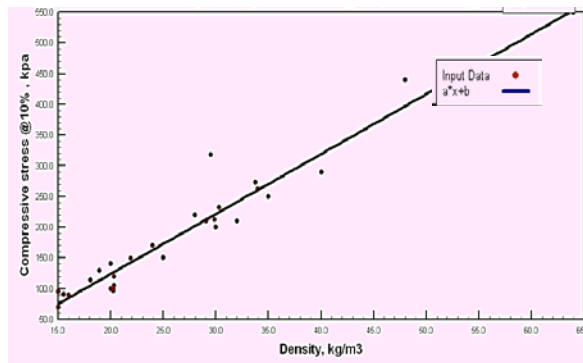
سال ۱۳۸۳ "فرآورده‌های عایق کاری حرارتی - تعیین چگالی ظاهری، روش آزمون" انجام شد. شکل آزمون‌ها مکعب مستطیل بود تا به راحتی بتوان حجم آنها را محاسبه کرد. آزمون‌ها در شرایط دمای $(23 \pm 2)^\circ C$ و رطوبت نسبی (5 ± 5) درصد تا رسیدن به جرم ثابت قرار گرفتند. ابعاد خطی آزمون‌ها مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۷۲۹۸: سال ۱۳۸۳ "مصالح ساختمانی، فرآورده‌های عایق کاری حرارتی، تعیین ابعاد خطی آزمون‌ها - روش آزمون" و استاندارد ملی ایران ۷۱۱۴: سال ۱۳۸۳، "فرآورده‌های عایق کاری حرارتی - تعیین ضخامت، روش آزمون" اندازه‌گیری شد. حجم آزمون‌ها با استفاده از این اندازه‌گیری‌ها محاسبه گردید. هر آزمون با فواصل اندازه‌گیری $0.01/0$ گرم، با دقت 0.5 درصد با ترازی دیجیتال سارتوریوس^۲ مدل LP1200S توزین شد. چگالی ظاهری، ρ ، به kg/m^3 با تقسیم جرم آزمون به kg بر حجم آزمون به m^3 محاسبه و با ۳ رقم معنی‌دار ارائه شد.

۲-۳ اندازه‌گیری تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییرشکل: مطابق استاندارد

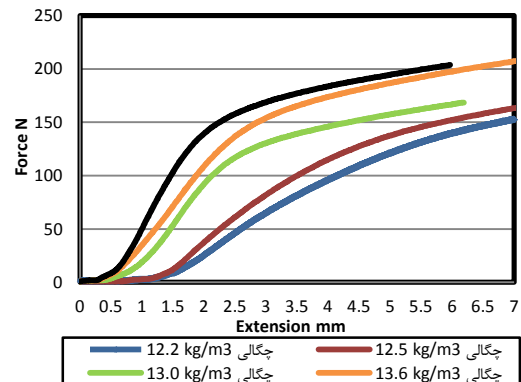
ملی ایران شماره ۷۱۱۷: سال ۱۳۸۳، "فرآورده‌های عایق کاری حرارتی - تعیین رفتار فشاری، روش آزمون"، آزمون‌ها به صورت مربع و با ابعاد حدود $50 mm \times 50 mm$ بریده شدند. ابعاد خطی مطابق با استاندارد ملی ایران شماره ۷۲۹۸: سال ۱۳۸۳ با دقت 0.5 درصد تعیین شد. پنج آزمون از هر نمونه مورد آزمایش تنش فشاری قرار گرفت و میانگین آن به عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته شد. آزمون به طور مرکزی بین دو ورق دستگاه آزمایش فشاری قرار گرفت. پیش باری معادل $50 Pa$ وارد شد. ضخامت d_0 ، تحت همان پیش بار اندازه‌گیری گردید. در این آزمون از دستگاه یونیورسال برای تعیین رفتار فشاری عایق EPS ساخت کارخانه تینوس السون^۳ مدل H5KS استفاده شد.

در این آزمون به وسیله فک متحرک با سرعت ثابت جابجایی برابر $0.1 d$ در دقیقه به آزمون فشار وارد شد که در آن d ضخامت آزمون بر حسب میلی‌متر است. میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌ها به صورت سه رقم معنی‌دار بیان

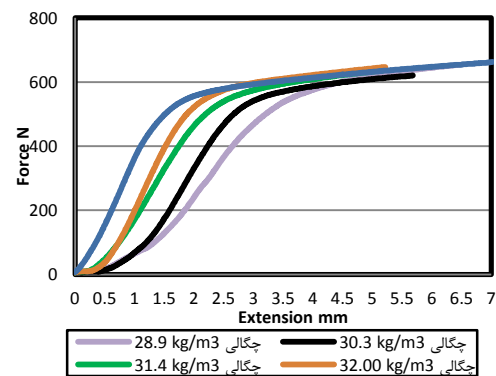
1 Netsch
2 Sartorius
3 Tinus Olson



شکل ۶ نمودار تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل در برابر چگالی EPS



شکل ۴ نمودار نیرو - تغییر شکل نمونه های EPS با چگالی متوسط



شکل ۵ نمودار نیرو - تغییر شکل نمونه های EPS با چگالی زیاد

تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل بیشتر شود. تنش فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_{10, \text{mean}} = 9.0 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \times \rho_a - 56.6 \text{ kPa} \quad (۴)$$

ضریب تعیین^۲ (همبستگی) یا R^2 برای رابطه ۵ به صورت زیر به دست آمد:

$$R^2 = 0.87 \quad (۵)$$

چنانچه تنش فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل بر اساس فاصله پیش‌بینی ۹۰٪ یک طرفه محاسبه شود، رابطه شماره ۶ به دست می‌آید. برای ایجاد سطح اطمینان مورد نظر، منحنی پیش‌بینی ۹۰٪ یک طرفه در زیر منحنی $\sigma_{10, \text{mean}}$ محاسبه شده قرار می‌گیرد.

در شکل ۷ رابطه بین تنش فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل و چگالی ظاهری برای آزمون غیرمستقیم برای ۶۸ نمونه نشان داده شده است.

$$\sigma_{10, \text{pred}} \approx 9.0 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \times \rho_a - 74.8 \text{ kPa} \quad (۶)$$

برای انطباق داده‌های مقادیر تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل در برابر چگالی ظاهری EPS برای $\rho_a \geq 13 \text{ kg/m}^3$ ، از نرم افزار Datafit استفاده شد (نمودار شکل ۶). همبستگی^۱ تنش فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل و چگالی برای فرآورده‌های EPS با استفاده از نرم‌افزار تعیین شد. معادله ۳ رابطه بین تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل و چگالی ظاهری EPS را نشان می‌دهد.

$$\lambda = a + bp \quad (۳)$$

که در آن، a (عرض از مبدأ) مقداری ثابت است و به خواص و ساختار EPS بستگی دارد. مقدار b ضریب زاویه خط رگرسیون نمودار تنش فشاری و چگالی است.

با افزایش چگالی تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که زیاد شدن بخش جامد، مقاومت‌های مکانیکی عایق‌های حرارتی را به طور کلی و EPS را به طور ویژه بالا می‌برد. به‌طور معمول، چگالی بیشتر باعث می‌شود که سلول‌ها کوچک‌تر شوند و پیوند بین سلول‌ها که بر اثر ذوب سطحی به وجود می‌آید بیشتر و مستحکم‌تر باشد و همچنین فاصله هوایی بین سلول‌ها نیز کمتر گردد. این موارد باعث می‌شود استحکام مکانیکی و از جمله

2 Coefficient of Determination (R2)

1 Regression

آزمون تعیین چگالی و ضریب هدایت حرارتی برای ۱۴۱ نمونه EPS انجام شد و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

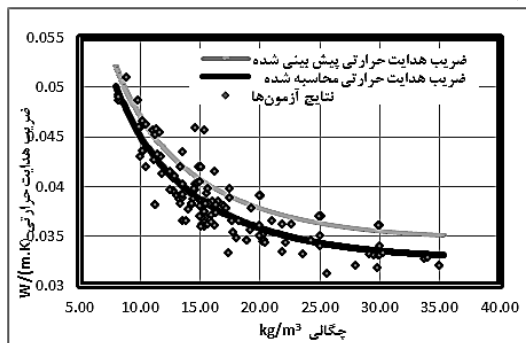
هدایت حرارتی EPS ترکیبی از سه عامل به شرح زیر است: ۱- هدایت از میان گاز درون سلولها ۲- هدایت از میان خمیره ۳- تابش از میان سلولها. برای توضیح انتقال حرارت در EPS به منظور ایجاد رابطه ریاضی بین دو پارامتر ضریب هدایت حرارتی و چگالی، فرضیات به شرح زیر بود:

- هدایت از میان گاز درون سلولها (هوا) به تغییر چگالی ماده وابسته نیست و مقداری ثابت است که این مقدار ثابت با a در معادله شماره ۷ نشان داده شده است.

چنانچه ضریب هدایت حرارتی بر اساس فاصله پیش بینی ۹۰٪ یک طرفه محاسبه شود، رابطه شماره ۵ به دست می‌آید. روشن است که برای سطح اطمینان کافی منحنی پیش‌بینی ۹۰٪ یک طرفه در بالای منحنی لامبدای متوسط قرار می‌گیرد (شکل ۱۱).

$$\lambda_{pred} \approx 0.0249W/(m.K) + 1.2 \times 10^{-4} Wm^2/(kgK) \times \rho_a + 0.21 Wkg/(m^4K) / \rho_a [W/(m.K)] \quad (9)$$

نمودار ترسیم شده در این نرم‌افزار با استفاده از نتایج آزمون‌های انجام شده مطابق شکل ۹ است.

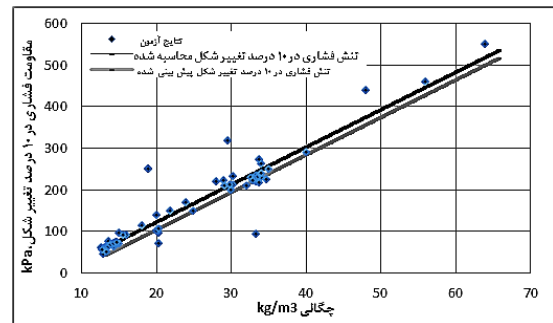


شکل ۹ رابطه بین ضریب هدایت حرارتی (در ضخامت مرجع ۵۰mm و دمای متوسط ۱۰°C و چگالی ظاهری برای آزمون غیرمستقیم، $n=141$)

۴. نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری بعضی از خواص عایق‌های حرارتی آزمایش‌هایی سخت و زمان‌بر است، اما تعیین چگالی فرآورده ساده و سریع انجام می‌گیرد. چنانچه بتوان ارتباط بین پارامترهای فوق و چگالی را با انجام دادن تعداد زیادی آزمایش به دست آورد، با اندازه‌گیری چگالی می‌توان با تقریب خوب بعضی از این خواص شامل ضریب هدایت حرارتی و تنش فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل را با آزمون غیرمستقیم برآورد کرد.

آزمون تعیین چگالی و ضریب هدایت حرارتی در مورد ۱۴۱ نمونه EPS و آزمون تعیین چگالی و تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل، بر روی ۶۸ نمونه EPS انجام شد. بررسی نتایج آزمون‌ها نشان می‌دهد با افزایش چگالی EPS مقدار ضریب هدایت حرارتی به طور غیرخطی



شکل ۷ رابطه بین تنش فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل و چگالی ظاهری برای آزمون غیرمستقیم، $n=68$

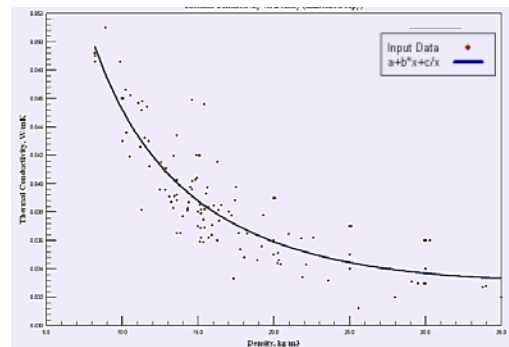
۲-۲ رابطه بین ضریب هدایت حرارتی و چگالی ظاهری

- هدایت از میان خمیره پلیمری با زیاد شدن چگالی زیاد می‌شود. این عبارت با $b.p$ در معادله ۷ نشان داده شده است.

- تابش از میان سلولها با چگالی نسبت عکس دارد و در معادله ۷ این عبارت با c/p نشان داده شده است.

معادله ۷ و شکل ۸ رابطه بین ضریب هدایت حرارتی و چگالی ظاهری فرآورده‌های EPS تولید داخل کشور را نشان می‌دهد.

$$\lambda = a + b.p + c/p \quad (7)$$



شکل ۸ نمودار ضریب هدایت حرارتی در برابر چگالی EPS

بنابراین تغییرات ضریب هدایت حرارتی در برابر چگالی یک منحنی غیرخطی است. در این منحنی در برابر افزایش چگالی تا حدود kg/m^3 ۲۵ لامبدا کاهش می‌یابد. از این پس با زیاد شدن چگالی تغییر محسوسی در ضریب هدایت حرارتی ایجاد نخواهد شد. برای تعیین همبستگی بین ضریب هدایت حرارتی متوسط، λ_{mean} ، و چگالی ظاهری ρ_a ، در محدوده چگالی نمونه‌های مورد بررسی یعنی $35 kg/m^3 \geq \rho_a \geq 8 kg/m^3$ از نرم‌افزار دینافیت استفاده شد که رابطه به دست آمد:

$$\lambda_{mean} = 0.0229W/(m.K) + 1.2 \times 10^{-4} Wm^2/(kgK) \times \rho_a + 0.21 Wkg/(m^4K) / \rho_a [W/(m.K)] \quad (8)$$

ضریب تعیین^۱ (همبستگی) یا R^2 برای رابطه ۸، $R^2 = 0.77$ به دست آمد.

1 Coefficient of Determination (R2)

کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش چگالی EPS مقدار تنش فشاری در ۱۰ درصد تغییر شکل به طور خطی افزایش می‌یابد. معادله‌های مربوط ارائه شده است. با استفاده از این معادله‌ها می‌توان با تعیین چگالی مقادیر ضریب هدایت حرارتی و تنش فشاری در ۱۰٪ تغییر شکل را به دست آورد.

۵. فهرست مراجع

- [1] Lasses, C., Maag, J., Hoibye, L., Vesterlykke, M., Lundegaard., Alternatives to flame retarded EPS in buildings, COWI, Climate and pollution agency, 2011, pp. 11-50
- [2] Yucel K. T., Basyigit C., Ozel C., Thermal Insulation Properties Of Expanded Polystyrene As Construction And Insulating Materials, 15th Symposium on Thermophysical Properties , June 22- 27, 2003, Boulder, Colorado, NIST/ASME, pp.54-66.
- [3] www.texasfoam.com, Expanded Polystyrene (EPS) Handbook, Texas foam INC.
- [4] Jablite (2011): Jablite expanded polystyrene (EPS) technical information. Vencel Resil Limited, Kent. Accessed April 2011 at: <http://www.jablite.co.uk/downloads/Jablite-Technical-Spec.pdf> Technical advantages
- [5] Lakatos A, Kalmár F, Investigation of thickness and density dependence of thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials, Materials and Structures, Vol. 46, Issue 7, 2013/6/27
- [6] Schellenberg J. , Wallis M., Dependence of Thermal Properties of Expandable Polystyrene Particle Foam on Cell Size and Density, Journal of Cellular Plastics, May 2010, vol., 46 No. 3, 209-222
- [7] Bryant, S., Lume, E., 1997. The Bryant Walling System. Concrete '97 for the Future 18th Biennial Conference, Adelaide Convention Centre, 641-649.