



بررسی ضریب هدایت حرارتی و مقاومت فشاری عایق‌های حرارتی شیشه سلولی

سهراب ویسه^{۱*}، مهناز مظلومی‌ثانی^۲

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

۲. کارشناس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

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

چکیده

در راستای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان و تأسیسات و رویکرد توسعه پایدار، عایق‌کاری حرارتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شیشه سلولی یا فوم شیشه یکی از انواع مصالح عایق‌کاری حرارتی نوین در ایران است که دارای خواص فیزیکی و حرارتی مناسب برای کاربردهای خاص است. با توجه به آغاز تولید شیشه سلولی در کشور لازم است خواص فیزیکی و حرارتی این عایق‌های حرارتی بررسی شود. این فراورده صلب است و از شیشه منبسط با یک ساختار سلول بسته ساخته می‌شود. قسمت عمده آن از شیشه ساخته شده است و جزء عایق‌های معدنی محسوب می‌شود. مزایای آن شامل سبکی، مقاومت مکانیکی زیاد و خواص مناسب عایق‌کاری حرارتی و صوتی آن است. این ماده مقاوم در برابر رطوبت، آتش و خوردگی است و در بهره‌برداری درازمدت، دارای عملکرد خوب در محیط‌های نامناسب و مهاجم است. این مصالح در عایق‌کاری حرارتی ساختمان، تأسیسات ساختمانی، صنایع نفت، صنایع شیمیایی و سایر مصارف استفاده می‌شوند. با استفاده از نتایج آزمون‌های انجام شده در پژوهشی با این عنوان بر روی نمونه‌های شیشه سلولی، رابطه ریاضی بین ضریب هدایت حرارتی با چگالی و همچنین بین مقاومت فشاری و چگالی ظاهری این فراورده‌ها تعیین و نمودارهای مربوط ترسیم شد. بررسی‌ها نشان داد ضریب هدایت حرارتی، مقاومت فشاری با افزایش چگالی ظاهری به طور خطی افزایش می‌یابد. با استفاده از روش آزمون غیرمستقیم، با اندازه‌گیری چگالی ظاهری نمونه‌های شیشه سلولی و در دست داشتن نمودار رابطه بین ضریب هدایت حرارتی و چگالی ظاهری از یک سو و مقاومت فشاری و چگالی ظاهری از سوی دیگر می‌توان مقادیر ضریب هدایت حرارتی و مقاومت فشاری را با دقت قابل قبولی تخمین زد.

کلید واژگان

شیشه سلولی، عایق حرارتی، ضریب هدایت حرارتی، چگالی، مقاومت فشاری

Investigating the Thermal Conductivity and Compressive Strength of Cellular Glass Thermal Insulations

Sohrab Veiseh^{1*}, Mahnaz Mazloomisani²

1. Head of Building Materials and Products Department, Building and Housing Research Center

2. Expert at Building Materials and Products Department, Building and Housing Research Center

* P.O. Box 13145-1696, Tehran, Iran, veiseh@bhrc.ac.ir

Abstract

In order to save energy in buildings and building installation and regarding to sustainable development approach, thermal insulation is of particular importance. Cellular glass (CG) or foam glass is one of new thermal insulation materials in Iran that has suitable physical and thermal properties for special applications. Due to the beginning of the production of cellular glass in the country, it is necessary to examine the physical and thermal properties of these thermal insulation products. CG is a rigid insulating material made of expanded glass with a closed cell structure. This product is made of glass and considered as mineral insulation. Its advantages include lightweight, high mechanical strength and its suitable thermal and acoustical insulation properties. Because it is resistant to moisture, fire and corrosion, it has the advantage of good performance in long-term use in harsh and aggressive environments as thermal insulation. CG is used in thermal insulation of buildings, building installation, oil industry, chemical industries and other applications. Using the results of the experiments performed in this study on the CG samples, the mathematical relationships between the thermal conductivity with density and also compressive strength with apparent density of these products were determined and the relevant graphs were drawn. Studies have shown that thermal conductivity and compressive strength increase linearly with increasing apparent density. Using the indirect test method, by measuring the apparent density of CG samples and using the relationships between thermal conductivity and apparent density on the one hand and compressive strength and apparent density on the other hand, the thermal conductivity and the compressive strength values can be estimated with acceptable accuracy.

Keywords

Cellular Glass, Thermal Insulation, Thermal Conductivity, Density, Compressive Strength

۱- مقدمه

شیشه سلولی^۱ یا فوم شیشه^۲ با علامت اختصاری CG، مصالح عایق‌کاری حرارتی صلبی است که از شیشه منبسط با یک ساختار سلول بسته ساخته می‌شود. این فرآورده‌ها نسل جدیدی از عایق‌های حرارتی محسوب می‌شوند. از مزایای آن به عنوان یک مصالح ساختمانی می‌توان به وزن کم، مقاومت زیاد و خواص عایق‌کاری حرارتی و صوتی اشاره کرد. قسمت عمده این عایق حرارتی از شیشه ساخته شده است و جزء عایق‌های معدنی محسوب می‌شود. این ماده به وسیله حرارت دادن مخلوطی از شیشه‌های خرد شده یا دانه‌ای و یک ماده دمنده (ماده شیمیایی فوم‌ساز) مانند کربن یا سنگ آهک ساخته می‌شود. علاوه بر شیشه بازیافتی، از شن و ماسه، سنگ آهک و سایر مواد طبیعی به عنوان ماده اولیه این فرآورده استفاده می‌شود. پودر شیشه از شیشه‌های بازیافتی، مانند: لامپ‌ها، لوله‌ها و بطری‌های شیشه‌ای بازیافتی، مانیتور کامپیوتر، صفحات تلویزیون، شیشه پنجره‌ها و خودروهای اسقاطی و ضایعات شیشه موجود در کارخانه‌ها فراهم می‌شود. در نزدیکی نقطه ذوب شیشه، ماده دمنده گازی آزاد می‌کند که فوم‌سازی را در شیشه انجام می‌دهد. پس از خنک‌سازی، مخلوط به یک ماده صلب و با منافذ سلول بسته پر شده با گاز که بخش بزرگی از حجم آن را تشکیل می‌دهد، تبدیل می‌شود. شیشه سلولی که به آن شیشه متخلخل نیز می‌گویند پر از منافذ کوچک باز یا بسته است. سهم این منافذ ۸۰ تا ۹۰ درصد کل حجم این ماده را تشکیل می‌دهد و قطر منافذ ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر و بعضی از آنها به کوچکی چند میکرون است. خمیره این فرآورده، شیشه است. لذا جذب آب بسیار کمی دارد. سلول‌های داخلی آن بسته‌اند و هیچ پدیده موبینگی و نفوذی در آن وجود ندارد. در واقع این عایق حرارتی با داشتن خاصیت نفوذناپذیری در برابر رطوبت دارای ضریب هدایت حرارتی پایین برای دوره‌های طولانی مدت است و با تغییرات محیطی مقدار ضریب هدایت حرارتی آن تغییر نمی‌کند. شیشه سلولی دارای مقاومت مکانیکی زیاد است و تغییرات آن با چگالی ظاهری متناسب است. این ماده می‌تواند فرسایش و بار محیط خارجی را بیش از سایر مواد عایق حرارتی تحمل کند. ترکیب خواص مقاومت فشاری زیاد و عایق رطوبتی، شیشه سلولی را برای لوله‌های آب زیرزمینی و پی‌های مخازن، عایق حرارتی مناسبی می‌سازد. مقاومت این ماده در برابر آتش عالی است. گستره دمای کاربرد آن حدوداً بین ۲۰۰- تا ۴۳۰ درجه سلسیوس است. ضریب انبساط حرارتی آن بسیار کم ($6/0C/ - 9 \times 10^{-6}$) و قابل برگشت است. بنابراین، خواص آن برای مدت طولانی تغییر نمی‌کند و پایداری خوبی دارد. شیشه سلولی دارای عملکرد عایق‌کاری صوتی خوب و جذب زیاد امواج صوتی است. خواص رنگ‌پذیری شیشه سلولی خوب است و آن را به عنوان ماده عایق حرارتی تزئینی می‌توان به کار برد [۲۱].

در دهه ۱۹۳۰، شرکت سنت گوبن فرانسه برای اولین بار شیشه سلولی را با کربنات کلسیم به عنوان عامل ایجاد فوم تولید کرد و در سال ۱۹۳۵ ثبت اختراع شد. بعدها، در سال ۱۹۳۹، اتحاد جماهیر شوروی به صورت آزمایشگاهی فوم شیشه‌ای را در مؤسسه شیمیایی مندلیف تولید کرد و کاربرد آن به عنوان بلوک‌های سبک برای شناورها بود [۳].

در طی روزهای آخر جنگ جهانی دوم، از این فرآورده در شبکه‌های زیردریایی در بندرهای ایالات متحده آمریکا استفاده شد. در اواسط دهه ۱۹۴۰ میلادی، عایق حرارتی شیشه سلولی در ایالات متحده آمریکا با عنوان

فوم گلس (یا شیشه اسفنجی) معرفی شد. بعدها که مشخص شد شیشه سلولی خواص حرارتی خوبی دارد، در سال ۱۹۴۱ برای اولین بار به همراه بلوک‌های بتنی به عنوان عایق حرارتی در ساختمان‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. از سال‌های ۱۹۵۰ استفاده از شیشه‌های سلولی در تأسیسات برودتی رایج شد. در این زمان، عایق شیشه سلولی به بازارهای تأسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی راه یافت. پانل‌های فوم گلس در سراسر جهان برای نماهای ساختمان، عایق حرارتی برای تولید مواد شیمیایی و پالایشگاه‌های نفت استفاده می‌شود. در سال ۲۰۰۷ شرکت گالپور (آلمان) و در ۲۰۱۰ شرکت پینوسکلو (اوکراین) پانل‌های فوم شیشه‌ای را از بطری‌های شیشه‌ای و شیشه پنجره‌های بازیافتی تولید کرده‌اند [۳].

شرکت پیتمبورگ کورنینگ پیشگام در تکنولوژی عایق‌های حرارتی و ارائه راهکارها برای طیف گسترده‌ای از مراحل در صنایع است. این کمپانی در سال ۱۹۳۷ میلادی در آمریکا تأسیس شد. به دلیل تقاضای روزافزون برای عایق شیشه سلولی، در سال ۱۹۶۵ کمپانی مذکور حضور خود را در اروپا با تأسیس یک مرکز بزرگ در بلژیک گسترش داد.

شیشه سلولی توسط شرکت پیتمبورگ کورنینگ ایالات متحده آمریکا از شیشه بازیافتی، مواد فوم‌ساز، افزودنی اصلاح‌کننده و شتاب‌دهنده فوم‌ساز ساخته می‌شود. پس از پودر ریز کردن و مخلوط کردن یکنواخت، آن را در دمای بالا ذوب می‌کنند. سپس، مذاب به فوم تبدیل شده و سرد می‌گردد. این ماده شامل تعداد زیادی از حباب‌های یکنواخت با قطر ۱ تا ۲ میلی‌متر است. شیشه سلولی جذب‌کننده صوت بیش از ۵۰ درصد حباب‌های سلول باز دارد و شیشه سلولی عایق حرارتی بیش از ۷۵ درصد حباب‌های سلول بسته دارد که می‌تواند مطابق با الزامات استفاده، از طریق تغییرات در پارامترهای فنی تولید، تنظیم شود. از آن زمان، دو کارخانه دیگر نیز در اروپا تأسیس شده است. در سال ۲۰۰۵، تولیدات ایالات متحده آمریکا با افزایش ظرفیت قابل توجهی همراه بوده است. علاوه بر این، پیتمبورگ کورنینگ آسیا بخش مهمی از نیازهای جهانی را تأمین می‌کند [۳].

در تولید شیشه سلولی پودر ساییده‌شده شیشه به همراه یک ماده هوازا مانند زغال‌سنگ آسیاب شده به درون قالب فلزی ریخته می‌شود و قالب درون کوره با دمای تقریبی ۱۰۰۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد. پودر شیشه بر اثر حرارت زیاد ذوب می‌شود و زغال‌سنگ نیز بر اثر سوختن گازهایی تولید می‌کند. خروج گازها از مذاب شیشه باعث ایجاد ساختار سلولی شیشه می‌شود. پس از آن مراحل سرد شدن انجام می‌شود که هر چه این مرحله با سرعت کمتری انجام شود، ساختار سلولی شیشه همگن‌تر خواهد بود. پس از سرد شدن، بلوک‌ها از قالب خارج و بسته‌بندی می‌شوند [۴].

شیشه سلولی به دلیل ماهیت ساختاری خود به عنوان یک ماده جامد شیشه‌ای و عموماً سلول بسته، تمام خواص مقاومت در برابر آب شیشه را حفظ می‌کند. آب و بخار آب را جذب نمی‌کند. یعنی میعان و یخ‌زدگی و تورم در عایق حرارتی صورت نمی‌گیرد و نتیجتاً از خوردگی جلوگیری می‌شود و یکنواختی عملکرد عایق حرارتی را موجب می‌گردد.

در کاربردهای دمای پایین و سیستم‌های برودتی، منبع جذب رطوبت از طریق نفوذ بخار آب است که می‌تواند هم به شکل مایع و هم به شکل یخ ظاهر شود. چنانچه دمای سطح خارجی عایق حرارتی نسبت به سطح تجهیزات افزایش یابد، میزان نفوذ بخار آب افزایش می‌یابد و میعان اتفاق می‌افتد. نفوذ بخار آب عایق شیشه سلولی حداقل ۱۰۰ تا ۱۰۰،۰۰۰ بار کمتر از دیگر عایق‌های حرارتی است. در نتیجه استفاده از این عایق حرارتی نیازی به بخاربند ندارد [۵].

¹ Cellular Glass (CG)

² Foam Glass

با آن که وزن آن در مقایسه با عایق‌های دیگر نسبتاً بیشتر است، نسبت مقاومت به وزن شیشه سلولی ایده‌آل است.

ترکیب این خواص که در محدوده بزرگی از کاربردها تحت تأثیر دما قرار نمی‌گیرد، طراحی با استفاده از این عایق حرارتی را برای سامانه‌های عایق حرارتی برابر ساده می‌سازد [۵].

در مورد بسیاری از عایق‌های حرارتی، مانند: فوم‌های پلیاستیکی، الیاف معدنی و سیلیکات کلسیم به جای مقاومت فشاری از تنش فشاری در تغییرشکل معین استفاده می‌شود. محدوده این تغییرشکل بین ۵ تا ۲۵ درصد برای چگالی‌های مختلف است. اما تنش فشاری در ده درصد تغییرشکل، بیش از همه کاربرد دارد. در مورد شیشه سلولی چون تغییرشکل کم است، از مقاومت فشاری استفاده می‌شود.

اثرهای زمان و دما به پیچیدگی‌های رفتار فشاری عایق‌های حرارتی افزوده می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که تنش فشاری در ده درصد تغییرشکل فوم‌های فنلی و پلی‌یورتان با افزایش دما از ۲۰ تا ۱۳۰ درجه سلسیوس به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در آزمون‌های دیگر فوم پلی‌یورتان وقتی تحت فشار کم ۲MPa برای تنها ۷۵ روز قرار گرفت، تا ۱۰ درصد کاهش ضخامت یافت. در بازه بزرگی از دماهای کاربرد، زمان و دما اثر قابل چشم‌پوشی بر خزش و مقاومت فشاری عایق حرارتی شیشه سلولی دارد [۵].

فوم شیشه سلولی با مقاومت فشاری ۶MPa از اکثر عایق‌های حرارتی دیگر، استحکام بیشتری دارد. این مقدار مقاومت فشاری یکی از چهار رده مقاومت فشاری شیشه سلولی است. هنگامی که مقاومت فشاری زیاد مورد نظر است، آماده‌سازی مناسب سطوح برای جلوگیری از تمرکز تنش بی‌مورد، لازم است [۵].

عدم پایداری ابعادی می‌تواند باعث تورم، انقباض، انقباض و خم شدن سیستم عایق کاری حرارتی شود که در نهایت، منجر به ایجاد پل حرارتی بین عایق حرارتی و تجهیزات می‌شود و عملکرد عایق حرارتی را غیرقابل پیش‌بینی می‌کند.

عملکرد عایق کاری حرارتی، متناسب با یکپارچگی سیستم و پایداری ابعادی عایق حرارتی است. ابعاد شیشه سلولی ثابت است، زیرا شیشه نه از بین می‌رود و نه جمع می‌شود. لذا بدون انحراف، خم شدن یا خزش باقی می‌ماند. شیشه سلولی به دلیل پایداری ابعادی در شرایط ویژه دما و رطوبت به هیچ عنوان شرایط ایجاد این مشکلات را ندارد [۵].

یکی از عوامل مؤثر بر پایداری ابعادی، تغییرات برگشت‌پذیر در دمای پایین (ضریب انقباض حرارتی) است. ضریب انقباض حرارتی یک ماده در زمان خنک شدن، اغلب به ترکیب شیمیایی آن مربوط می‌شود. ضریب انقباض حرارتی عایق‌های حرارتی آلی، مانند: فوم‌های پلیاستیکی، پنج تا ده برابر بیشتر از فلزاتی است که توسط آنها عایق کاری حرارتی شده‌اند. این امر باعث می‌شود که در هنگام سرد شدن سیستم تأسیساتی، درزهای عایق حرارتی باز شود که نه تنها یک مسیر حرارتی ایجاد می‌کند، بلکه آب‌بندی درزها را کاملاً از بین می‌برد [۵].

شیشه سلولی دارای ضریب انقباض حرارتی کم و برگشت‌پذیر است. از آنجا که این ضریب بسیار نزدیک به ضریب فولاد و بتن است که عایق کاری حرارتی می‌شوند، عملاً جابه‌جایی در اتصالات عایق حرارتی در طول سیکل‌های گرما و سرما سیستم رخ نمی‌دهد. علاوه بر آن، فوم‌ها در دماهای پایین، به دلیل انقباض دچار ترک‌خوردگی می‌شوند. در آزمایش‌ها بر روی یک سیستم دو لایه پلی‌یورتان، تحت شرایط یخبندان، اتصالات به

تخته‌های عایق حرارتی شیشه سلولی باید فقط از سلول‌های شیشه‌ای عایق رطوبت و عایق گاز تشکیل شده باشند که بدون استفاده از یک ماده چسباننده به هم متصل شده‌اند. مواد تأیید شده فوم‌ساز، مواد کربنی به عنوان مثال کربنات منیزیم، کربنات کلسیم (CaCO₃) یا سولفات کلسیم (CaSO₄)، زغال‌سنگ یا کک، آب شیشه و سرباره آلومینیوم هستند. تخته‌ها ممکن است بر روی یک یا هر دو طرف با پوشش‌های قیر، ورقه‌های شیشه‌ای یا پوشش‌های پایه معدنی روکش شوند. از پلاستیک‌ها مانند PVC نباید به عنوان روکش استفاده شود. مواد افزودنی مانند افزودنی‌های هیدروفوبیک (آبگریز یا دافع آب) با شیشه سلولی استفاده می‌شود [۶].

در فرآیند ساخت عایق شیشه سلولی لوله‌ای بسته به سفارش و با توجه به ضخامت و اندازه لوله با دستگاه برش CNC لوله‌های ۲ یا چند تکه تولید می‌گردد که در این روش چند عایق حرارتی تخته‌ای با چسب مخصوص بر روی یکدیگر متصل و سپس برش داده می‌شود [۴].

از آنجا که این ماده عایق رطوبت، مقاوم در برابر آتش و خوردگی است و دارای عملکرد بهره‌برداری درازمدت حتی در محیط‌های نامناسب و مهاجم است، به عنوان عایق کاری حرارتی، مخازن در زیرزمین، هوای آزاد، محیط قابل اشتعال، مرطوب و در معرض حمله شیمیایی است. شیشه سلولی به طور گسترده‌ای در عایق حرارتی دیوار، صنایع نفت، صنایع شیمیایی، کاهش نوفه اتاق دستگاه‌های صنعتی، جاذب صدا در موانع صوتی در بزرگراه‌ها، صنایع انتقال برق، محصولات نظامی و غیره استفاده می‌شود.

شیشه سلولی به عنوان ماده عایق حرارتی سبز محافظت‌کننده محیط زیست شناخته می‌شود. این مصالح عایق کاری حرارتی به دلیل داشتن ماهیت ساختاری اش خواص ویژه‌ای نسبت به دیگر مصالح عایق حرارتی دارد که دامنه کاربرد آن را وسیع‌تر و ایمن‌تر می‌کند. ضریب هدایت حرارتی نوعی شیشه سلولی حدود ۰/۰۴ وات بر متر کلون است. دامنه کاربرد این عایق حرارتی از ۲۶۸- درجه سلسیوس تا ۴۸۲ درجه سلسیوس است [۵].

آب مایع، ضریب هدایت حرارتی تا ۲۰ برابر بیشتر از اکثر مواد عایق حرارتی دارد و ضریب هدایت حرارتی یخ ۱۰۰ بار بیشتر است که تهدیدی جدی برای سیستم‌هایی که در معرض یخ زدن هستند، ایجاد می‌کند.

عملکرد عایق حرارتی را بیش از همه عوامل، رطوبت (به شکل‌های مایع، بخار یا یخ) تخریب می‌کند. مقاومت در برابر رطوبت عایق‌های حرارتی باعث پایداری عملکرد حرارتی آن می‌شود. در بعضی موارد فقط ۴ درصد حجمی جذب رطوبت، می‌تواند ۷۰٪ کارایی حرارتی را کاهش دهد [۷].

این ویژگی عایق حرارتی شیشه سلولی که به‌طور عمده از شیشه تشکیل شده و غیر قابل اشتعال است، امتیاز بسیار خوبی برای آن محسوب می‌شود. طبقه‌بندی رفتار آتش آن مطابق با استاندارد EN 13501-1 کلاس A1 است. لذا انبارش و کار کردن با آن خطرناک نیست [۵].

شیشه سلولی دچار پوسیدگی نمی‌شود و در برابر حشرات مقاوم است زیرا ماده‌ای غیرآلی است. بنابراین، به عنوان عایق حرارتی بدون خطر، به ویژه در پایه‌ها و خاک محسوب می‌شود. هیچ احتمالی برای لانه‌سازی، پرورش یا جوانه زدن بذر در آن وجود ندارد [۵].

این عایق حرارتی دارای مقاومت فشاری زیاد حتی در بارگذاری‌های درازمدت است و به دلیل هندسه سلولی آن بدون تغییرشکل باقی می‌ماند. در برخی کاربردها، مقاومت فشاری برای عملکرد سیستم حیاتی است و باید به عنوان پیش‌نیاز هنگام انتخاب مصالح لحاظ شود. علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی این ماده نیز در مقایسه با سایر عایق‌های حرارتی زیاد است.

دمایی ۱۲۱ تا ۴۲۷ درجه سلسیوس، به روش‌های اجرایی خاصی برای عایق حرارتی لوله نیاز باشد. برای کاربردهای خاص، محدوده‌های دمای واقعی باید بین تولیدکننده و خریدار توافق شود. اگر آهنگ تغییر دما بیش از ۹۴ درجه سلسیوس در ساعت باشد، امکان دارد عایق حرارتی شیشه سلولی ترک‌های تنش‌ی نشان دهد [۹].

در این استاندارد عایق‌های شیشه سلولی دارای هر دو کاربرد ساختمانی و صنعتی است. اما استاندارد اروپایی که مرجع استاندارد ملی ایران نیز به‌شمار می‌رود، دو استاندارد مستقل برای دو کاربرد ساختمانی و تأسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی به شکل جداگانه دارد. استانداردهای ملی ایران برای شیشه سلولی به شرح زیر است:

۱- استاندارد ملی ایران به شماره ۱۰۹۵۱: این استاندارد با عنوان "فراورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای ساختمان- فراورده‌های کارخانه‌ای- شیشه سلولی- ویژگی‌ها" به الزامات این فراورده در کاربردهای ساختمانی می‌پردازد و در سال ۱۳۹۶ تجدیدنظر شده است [۱۰]. مرجع این استاندارد ملی، استاندارد اروپایی EN 13167 است [۱۱].

هدف از تدوین این استاندارد تعیین الزامات برای فراورده‌های شیشه سلولی کارخانه‌ای، با روکش یا بدون آن برای استفاده در عایق‌کاری حرارتی ساختمان است. این فراورده‌ها به شکل تخته یا دال تولید می‌شوند. این استاندارد محصولاتی با مقاومت حرارتی کمتر از $0.07 \text{ m}^2 \text{K/W}$ و ضریب هدایت حرارتی بیشتر از 0.065 W/(m.K) در 10°C را شامل نمی‌شود [۱۰] و [۱۱].

۲- استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶۸۳۸: این استاندارد با عنوان "فراورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای تأسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی- فراورده‌های کارخانه‌ای شیشه سلولی- ویژگی‌ها" به الزامات این فراورده در کاربردهای تأسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی می‌پردازد و در سال ۱۳۹۶ تجدیدنظر شده است [۱۲]. مرجع این استاندارد ملی، استاندارد اروپایی EN 14305 است [۱۳].

هدف از تدوین این استاندارد تعیین الزامات فراورده‌های شیشه سلولی کارخانه‌ای، برای استفاده در عایق‌کاری حرارتی تأسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی با یک دمای عملکردی در محدوده تقریبی 265°C تا 430°C است. زیر دمای کارکردی 50°C - آزمون‌های ویژه‌ای درباره مناسب بودن فراورده در کاربرد موردنظر (برای مثال میعان اکسیژن) توصیه می‌شود. توصیه‌نامه تولیدکننده در همه موارد باید رعایت شود. این استاندارد محصولاتی با ضریب هدایت حرارتی بیشتر از 0.065 W/m.K در 10°C را شامل نمی‌شود [۱۲ و ۱۳].

۲- آزمون‌ها

در این تحقیق از منابع مختلف بین‌المللی با جمع‌آوری اطلاعات خواص انواع عایق‌های شیشه سلولی و ارتباط آنها با یکدیگر و ترسیم نمودارهای مربوط استفاده شده است.

همچنین، در آزمایشگاه عایق‌های حرارتی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی و حرارتی انجام شد. تعدادی از عایق‌های حرارتی شیشه سلولی وارداتی و تولید داخل کشور آزمایش شدند. در زیر شرح مختصری در مورد هر یک از آزمایش‌ها، دستگاه‌ها و روش‌های آزمایش ارائه می‌شود:

اندازه‌های باز شدند که حرارت قابل‌توجهی از دست رفت (۱۷۴٪ در سیستم‌های نیتروژن مایع) [۵].

ضریب انبساط حرارتی فوم آلی به گونه‌ای است که در دمای بالاتر (معتدل)، می‌تواند منجر به پاره شدن و خم شدن و ایجاد فشار شدید بر روی لایه‌های سدکننده و کندکننده بخار شود. اما در مورد شیشه سلولی این مشکل پیش نمی‌آید، زیرا ضریب انبساط حرارتی آن با ضریب انبساط حرارتی لوله و تجهیزات فولادی هماهنگ است. این ماده دارای تغییرات برگشت‌پذیر در دماهای متعارف است [۵].

در دماهای بالا باید از عایق‌های معدنی استفاده کرد. با افزایش دما و افزایش لوله‌ها و مخازن فلزی، برخی از عایق‌های حرارتی دچار جمع‌شدگی می‌شوند. این انقباض منجر به باز شدن اتصالات و ترک‌ها می‌شود که می‌تواند موجب ایجاد مسیر جریان حرارتی و آسیب رساندن به سدکننده‌های بخار شود. عایق حرارتی شیشه سلولی دارای ضریب برگشت‌پذیری مشابه فلزات است و دچار جمع‌شدگی نمی‌شود [۵].

دما و رطوبت همزمان در خیلی از مواد و مصالح از جمله فوم‌های پلیمری ایجاد ناپایداری ابعادی می‌کنند. بعضی از فوم‌های پلی‌یورتان در دمای 70°C درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۸۵ درصد، حدود ۳ درصد انحراف نشان می‌دهند. در مورد فوم فنلی این میزان به ۲ درصد می‌رسد. اما با عایق حرارتی شیشه سلولی می‌توان از داشتن ابعاد پایدار در این شرایط اطمینان حاصل کرد [۵].

کار با فوم شیشه سلولی راحت است، چرا که از سلول‌های شیشه‌ای نازک تشکیل شده است. لذا با ابزار ساده مانند یک تیغ ابره یا اهر دستی، می‌تواند به هر اندازه موردنظر برسد [۵].

فوم شیشه سلولی عاری از هرگونه ماده صدمه‌زننده به محیط زیست مانند کندسوزکننده و اجزای سمی است. هیچ ترکیب ناسازگار با محیط زیست ندارد. نسل‌های آینده پس از استفاده از این عایق حرارتی می‌توانند آن را بازیافت کنند و به عنوان پرکننده در محوطه‌سازی یا گرانول عایق حرارتی و یا صوتی مورد استفاده قرار دهند. عایق‌هایی که دارای تراز زیست‌محیطی مناسبی هستند، عملکرد حرارتی ثابت را در طول عمر یک ساختمان آرایه می‌دهند و محصولاتی با دوام طولانی هستند. این دو ویژگی درباره شیشه سلولی صادق است. استفاده از شیشه‌های بازیافتی در تولید این فراورده‌ها، دوستدار محیط زیست بودن آنها را افزایش می‌دهد [۸].

همچنین، مقدار متوسط مصرف انرژی برای تولید صنعتی شیشه سلولی در مقایسه با دیگر عایق‌های حرارتی کمتر است که این خود بر تأثیرات مثبت زیست‌محیطی شیشه سلولی صحت می‌گذارد. مطالعات و ارزیابی‌های گوناگون کیفیت اکولوژیکی عایق حرارتی شیشه سلولی و ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی داده‌هایی که توسط مؤسسه BTU در مورد پارامترهای مختلف، مانند: طول عمر، انرژی نهفته، قیمت، ضریب هدایت حرارتی، هزینه‌های دفع یا بازیافت جمع‌آوری شده است، منجر به نتایج متفاوت شاخص سودمندی (R) برای هر گروه از محصولات می‌شود. هرچه مقدار R بالاتر باشد، ارزیابی محصول بهتر خواهد بود [۸].

شیشه سلولی در ایالات متحده آمریکا به‌گونه‌ای تولید می‌شود که حداقل الزامات داده شده در ASTM C552 "استاندارد ویژگی برای عایق حرارتی شیشه سلولی" را برآورده سازد. در دامنه کاربرد این استاندارد آمده است که ویژگی‌های آن شامل ترکیب، اندازه‌ها، ابعاد و خواص فیزیکی عایق حرارتی شیشه سلولی، برای استفاده بر روی سطوحی است که دمای کار آنها بین 268 - تا 427 درجه سلسیوس است. ممکن است برای کاربرد در محدوده

۱-۲- تعیین ضریب هدایت حرارتی و مقاومت حرارتی

چگالی به‌صورت نسبت جرم به حجم آزمون تعیین می‌شود. آزمون‌ها بخش‌هایی از فرآورده با اندازه کامل یا آزمون‌های به‌کاررفته در سایر آزمون‌ها (به‌شرط آن‌که برآثر آزمون تغییری در خواص آن‌ها ایجاد نشده باشد) بود. شکل آزمون‌ها مکعب مستطیل بود تا به‌راحتی بتوان حجم آن‌ها را محاسبه کرد. آزمون‌ها در شرایط دمایی $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی (50 ± 5) درصد تا رسیدن به جرم ثابت قرار گرفتند. حجم آزمون‌ها با استفاده از اندازه‌گیری ابعاد خطی و ضخامت آزمون‌ها محاسبه گردید. هر آزمون با فواصل اندازه‌گیری $0/001$ گرم، با دقت $0/5$ درصد با ترازوی دیجیتال سارتوریوس مدل LP1200S توزین شد. چگالی ظاهری، ρ ، به kg/m^3 تقسیم جرم آزمون به kg بر حجم آزمون به m^3 محاسبه و با رقم معنی‌دار ارایه شد [۲۰ و ۲۱].

۲-۵- اندازه‌گیری مقاومت فشاری

آزمون مطابق استاندارد ملی ایران شماره ۷۱۱۷: سال ۱۳۸۳، "فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- تعیین رفتار فشاری، روش آزمون"، انجام شد [۲۲]. آزمون‌ها با ابعاد $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ بریده و 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 مقاومت فشاری قرار گرفت و میانگین آن به‌عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته شد. آزمون‌ها حداقل برای مدت ۶ ساعت در دمایی $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ نگهداری شدند. آزمایش در دمایی $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ انجام گردید. آزمون به‌طور مرکزی بین دو ورق دستگاه آزمایش فشاری قرار گرفت. ضخامت تحت همان پیش‌بار اندازه‌گیری گردید [۲۲ و ۲۳]. این آزمون به‌وسیله فک متحرک با سرعت ثابت جابه‌جایی که برابر $0/1 \text{ d}$ در دقیقه بود به آزمون فشار وارد شد که در آن، d ضخامت آزمون بر حسب میلی‌متر است. مقاومت فشاری، σ ، بر حسب kPa ، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$\sigma = 1000 \frac{F}{A} \quad (1)$$

که در آن، F نیروی مربوط به شکست به نیوتن و A مساحت مقطع عرضی آزمون، به میلی‌مترمربع است.

۲- نتایج و بحث

آزمون غیرمستقیم وسیله‌ای است که توسط آن 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 شده باشد. آزمون غیرمستقیم را می‌توان برای کاهش تعداد تناوب آزمون مستقیم نیز به‌کاربرد.

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 صورت‌گرفته، در صورتی‌که امکان تأثیر 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

این آزمایش با دستگاه جریان حرارت‌سنج (HFM) مطابق استاندارد ملی ایران ۸۶۲۱: سال ۱۳۸۵ "فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- تعیین مقاومت حرارتی به‌وسیله لوح گرم محافظت‌شده و روش جریان حرارت‌سنج فرآورده‌های با مقاومت حرارتی زیاد و متوسط، روش آزمون" انجام شد [۱۴]. در دستگاه جریان حرارت‌سنج، چگالی نرخ جریان حرارت به‌وسیله دو جریان حرارت‌سنج که در مقابل آزمون قرار دارند، اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه یک چگالی نرخ جریان حرارت ثابت، یکنواخت و یک‌جهتی در داخل آزمون همگن با سطوح تخت موازی، به شکل دال برقرار می‌کند. دستگاه جریان حرارت‌سنج مورد استفاده شامل یک واحد گرم‌کننده، دو جریان حرارت‌سنج و یک واحد سردکننده است. آزمون بین صفحه‌های گرم و سرد قرار داده می‌شود. جهت جریان حرارت از بالا به پایین است [۱۴ و ۱۵].

در آزمایش‌های انجام‌شده در این مرکز، از دستگاه HFM ساخت کارخانه نچ مدل HFM 436/3/1E، استفاده شد. طول و عرض آزمون‌های آزمایش‌شده حدود $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ و ضخامت آزمون‌ها بین 50 mm تا 70 mm بود. دمایی متوسط 10°C انتخاب شد. دستگاه مورد استفاده به یک بخش سنسج مرکزی، با مساحت $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ یک بخش محافظ در اطراف آن، تقسیم می‌شود.

۲-۲- تعیین ضخامت

این آزمایش مطابق استاندارد ملی ایران ۷۱۱۴: سال ۱۳۸۳، "فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- تعیین ضخامت، روش آزمون" انجام شد [۱۶]. در این روش، فاصله بین سطح مبنای تخت صلبی که آزمون بر روی آن قرار می‌گیرد و یک صفحه فشار به‌طور آزاد بر سطح بالای آزمون قرار داده می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. محل اندازه‌گیری در مرکز این صفحه قرار دارد که در محل مشخص‌شده بر روی آزمون قرار داده می‌شود [۱۶ و ۱۷].

برای انجام دادن این آزمون و با توجه به اهمیت ضخامت در تعیین خواص حرارتی- مکانیکی عایق حرارتی شیشه سلولی، دستگاه ضخامت‌سنج استفاده شد. این وسیله از یک ضخامت‌سنج دیجیتالی ساخت کارخانه میتوبا و یک بازوی مجهز به یک میله باریک تشکیل شده است. بر روی انتهای بازو یک کرنش‌سنج عقربه‌ای متصل شد. برآثر تماس نوک میله باریک ضخامت‌سنج با صفحه فشار (که بر روی آزمون قرار دارد) عقربه کرنش‌سنج حرکت کوچکی می‌کند. این نشان‌دهنده شرایط مطلوب اندازه‌گیری است. با اندازه‌گیر دیجیتالی ضخامت آزمون‌ها با دقت $0/1 \text{ mm}$ اندازه‌گیری و قرائت‌ها با تقریب $0/1 \text{ mm}$ گرد شد.

۲-۳- تعیین ابعاد خطی آزمون‌ها

ابعاد خطی آزمون‌ها مطابق استاندارد ملی ایران ۷۲۹۸: سال ۱۳۸۳ تحت عنوان "مصالح ساختمانی، فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی، تعیین ابعاد خطی آزمون‌ها- روش آزمون" با استفاده از کولیس دیجیتال با دقت $0/01$ میلی‌متر اندازه‌گیری شد [۱۸]. تعداد محل‌های اندازه‌گیری به اندازه و شکل آزمون بستگی دارد که حداقل ۲ عدد است. اندازه‌گیری‌ها بدون آن‌که باعث تغییر شکل آزمون شود، انجام شد [۱۸ و ۱۹].

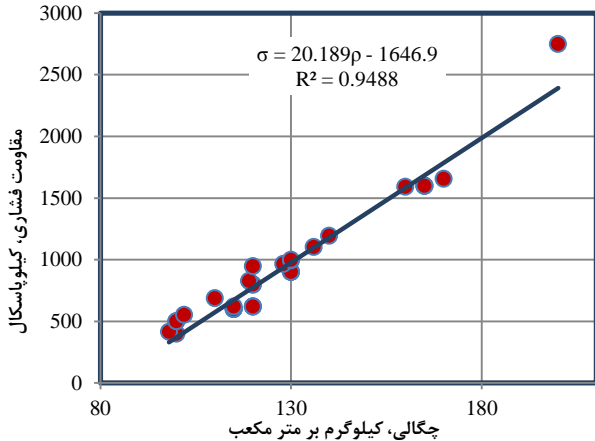
۲-۴- اندازه‌گیری چگالی ظاهری

آمایش مطابق استاندارد ملی ایران ۷۱۱۸: سال ۱۳۸۳ "فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی- تعیین چگالی ظاهری، روش آزمون" انجام شد [۲۰].

$$\sigma = 20.189\rho - 1646.9 \quad (3)$$

$$R^2 = 0.95$$

که در آن،
 σ مقاومت فشاری
 ρ چگالی
 R ضریب همبستگی



شکل ۲ تغییرات مقاومت فشاری در برابر چگالی نمونه‌های شیشه سلولی با استفاده از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش

۴- نتیجه‌گیری

شیشه سلولی یا فوم شیشه مصالح عایق‌کاری صلبی است که از شیشه منبسط با یک ساختار سلول بسته ساخته می‌شود. این ماده عایق رطوبت، مقاوم در برابر آتش و خوردگی است و دارای مزیت عملکرد بهره‌بردار درازمدت، در محیط‌های نامناسب و مهاجم به عنوان عایق حرارتی، مخازن عمیق، زیرزمین، هوای آزاد، محیط قابل اشتعال، مرطوب و در معرض حمله شیمیایی است.

با استفاده از نتایج آزمون‌های انجام شده در این مرکز بر روی نمونه‌های عایق حرارتی شیشه سلولی رابطه بین خواص فیزیکی و حرارتی تعیین و نمودارهای مربوط ترسیم شد. بررسی‌ها نشان داد ضریب هدایت حرارتی، مقاومت فشاری با افزایش چگالی به طور خطی افزایش می‌یابد.

با استفاده از روش آزمون غیرمستقیم، با اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های شیشه سلولی و با در دست داشتن نمودار رابطه بین ضریب هدایت حرارتی و چگالی ظاهری از یک سو و مقاومت فشاری و چگالی ظاهری از سوی دیگر می‌توان با دقت قابل‌قبولی مقادیر ضریب هدایت حرارتی و مقاومت فشاری را تخمین زد.

۵- منابع

- [1] Cellular Glass Insulation Guide, FOAMGLAS for the Building Envelope, www.foamglas.com.
- [2] Product Profile, The Thermal Insulation System, www.foamglas.co.uk.
- [3] Thermal insulation systems for the entire building envelope, www.foamglas.com.
- [4] Foamglas insulation-general brochure, Pittsburgh Corning March 2014, www.foamglas.com.
- [5] Foamglas insulation systems for Industrial Applications with Operating Temperatures of -268°C to +482°C, www.foamglas.com.

مربوط را هنگام استفاده از آزمون مستقیم به‌دست دهد. اگر آزمون غیرمستقیم به‌کار رود، همبستگی بین خواص غیرمستقیم و آنچه مستقیماً آزمون شده، باید شناخته شود و روش باید بر اساس فاصله پیش‌بینی ۹۰٪ یک‌طرفه محاسبه گردد. در این تحقیق، مقاومت فشاری و ضریب هدایت حرارتی را می‌توان به‌طور غیرمستقیم با استفاده از چگالی ظاهری و همبستگی ریاضی برقرار شده آن با این خواص، ارزیابی کرد.

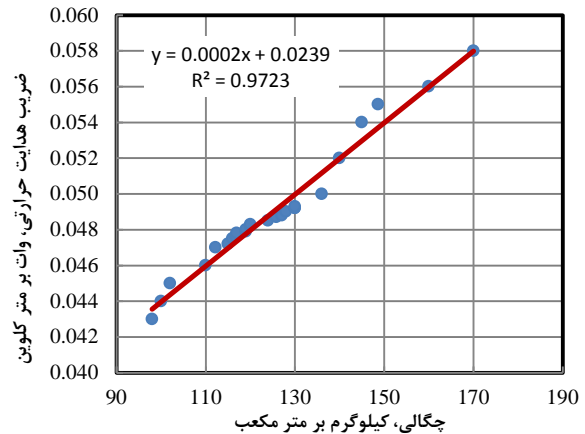
برای ارتباط بین مقاومت فشاری و چگالی ظاهری و ضریب هدایت حرارتی و چگالی ظاهری از داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. منحنی‌های شکل‌های ۱ و ۲ بر اساس این اطلاعات به‌دست آمده است که هر تولیدکننده می‌تواند به آن مراجعه کند. اگر تولیدکننده‌ای بخواهد از اطلاعات خودش استفاده کند، باید روش را برای فاصله پیش‌بینی ۱- مربوط به ۹۰٪ محاسبه و گزارش کند.

در شکل ۱ نمودار ضریب هدایت حرارتی در برابر چگالی نمونه‌های شیشه سلولی ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، چگالی و ضریب هدایت حرارتی شیشه سلولی رابطه خطی مستقیم دارد و همبستگی زیادی بین این دو پارامتر وجود دارد. معادله ۲ رابطه خطی بین دو خاصیت ضریب هدایت حرارتی و چگالی نمونه‌های شیشه سلولی را نشان می‌دهد.

$$\lambda = 0.0002\rho + 0.0239 \quad (2)$$

$$R^2 = 0.97$$

که در آن،
 λ ضریب هدایت حرارتی
 ρ چگالی
 R ضریب همبستگی



شکل ۱ تغییرات ضریب هدایت حرارتی در برابر چگالی نمونه‌های شیشه سلولی با استفاده از نتایج به‌دست آمده در این پژوهش

در شکل ۲ نمودار مقاومت فشاری در برابر چگالی نمونه‌های شیشه سلولی ترسیم شده است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شود، با افزایش چگالی مقاومت فشاری نمونه‌های شیشه سلولی افزایش می‌یابد. چنانچه در شکل مذکور دیده می‌شود، چگالی و مقاومت فشاری شیشه سلولی رابطه خطی مستقیم دارد و همبستگی زیادی بین این دو پارامتر وجود دارد. معادله ۳ رابطه خطی بین دو خاصیت مقاومت فشاری و چگالی نمونه‌های شیشه سلولی را نشان می‌دهد.

- [6] Award Guideline 0406, Cellular Glass Insulation Boards, Version, June 2015.
- [7] Thermal Conductivity of Wet Insulations, Ludwig Adams, *ASHRAE JOURNAL*, October 1974.
- [8] Ecological assessment of construction products, www.foamglas.com.
- [9] ASTM C552 – 17, Standard Specification for Cellular Glass Thermal Insulation.
- [۱۰] استاندارد ملی ایران به شماره ۱۰۹۵۱، فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای ساختمان - فرآورده‌های کارخانه‌ای - شیشه سلولی - ویژگی‌ها.
- [11] BS EN 13167, 2012+A1, 2015, Thermal insulation products for buildings -Factory made cellular glass (CG) products- Specification.
- [۱۲] استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶۸۲۸، فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای تأسیسات ساختمانی و تجهیزات صنعتی - فرآورده‌های کارخانه‌ای شیشه سلولی - ویژگی‌ها.
- [13] BS EN 14305, 2015, Thermal insulation products for building equipment and industrial installation-Factory made cellular glass (CG) products- Specification.
- [۱۴] استاندارد ملی ایران شماره ۸۶۲۱، سال ۱۳۸۵، مصالح ساختمانی - فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی - تعیین مقاومت حرارتی و ضریب هدایت حرارتی به وسیله لوح گرم محافظت‌شده و روش جریان حرارت‌سنج فرآورده‌های با مقاومت حرارتی زیاد و متوسط - روش آزمون.
- [15] EN 12667, Thermal performance of building materials and products, Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods, Products of high and medium thermal resistance.
- [۱۶] استاندارد ملی ایران شماره ۷۱۱۴، سال ۱۳۹۶، فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای ساختمان - تعیین ضخامت - روش آزمون.
- [17] EN 823, Thermal insulating products for building applications- Determination of thickness.
- [۱۸] استاندارد ملی ایران شماره ۷۲۹۸، سال ۱۳۹۶، فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای ساختمان - تعیین ابعاد خطی آزمون‌ها - روش آزمون.
- [19] EN 12085, Thermal insulating products for building applications - Determination of linear dimensions of test specimens.
- [۲۰] استاندارد ملی ایران شماره ۷۱۱۸، سال ۱۳۹۶، فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای ساختمان - تعیین چگالی ظاهری - روش آزمون.
- [21] EN 1602, Thermal insulating products for building applications- Determination of apparent density.
- [۲۲] استاندارد ملی ایران شماره ۷۱۱۷، سال ۱۳۹۶، فرآورده‌های عایق‌کاری حرارتی برای ساختمان - تعیین رفتار فشاری - روش آزمون.
- [23] EN 826, Thermal insulating products for building applications- Determination of compression behavior.