پوشش‌های مبتنی بر ایروژل به‌عنوان عایق‌هایی نو در ساختمان‌ها

طاهر یوسفی امیری[1*]، حسن برگزین[2]، رقیه محمودی[3]

۱و۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه زنجان

۳- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، شرکت پاکان آتیه نانودانش

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۶/۳۱

پیام‌نگار: yousefiamiri@znu.ac.ir

چکیده

بخش ساختمان سهم عمده‌ای از مصرف انرژی در جهان را به خود اختصاص داده است. کاهش اتلافهای حرارتی از ساختمان می‌تواند در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها سهم بسزایی داشته باشد و این امر با عایق‌سازی مؤثر ساختمان‌ها میسر می‌شود. در این مورد، مواد عایق حرارتی شامل ایروژل‌ها توجه زیادی به خود جلب کرده است. مطالعات مختلفی در زمینه ساخت پوشش‌های عایق با افزودن ایروژل برای کاربرد روی دیوار و بهره‌مندی از مزایای حرارتی، صوتی و گرمایی- رطوبتی آنها انجام شده است. در این مقاله تحقیقات انجام شده روی این پوشش‌های عایقِ جالب که می‌توانند بر سطوح داخلی و خارجی دیوارها در ساختمان‌ها نصب شوند، مرور شده و نتایج مربوط به عملکرد آنها در مقایسه با پوشش‌های مرسوم ارائه شده است. از لحاظ معیارهای عملکرد بررسی شده، پوشش‌های ایروژلی نتایج بسیار مطلوبتر و جذابتری نسبت به پوشش‌های معمولی نشان داده‌اند.

کلیدواژه‌ها: پوشش داخلی و خارجی ساختمان، ایروژل، عایق، عملکرد.

۱. مقدمه

ساختمان‌ها در سال ۲۰۰۵ حدود ۸/۳ گیگاتن کربن دی اکسید به جو زمین گسیل کرده‌اند که این مقدار بیش از ۳۰٪ کل گازهای گلخانه‌ای منتشرشده در بسیاری از کشورهای پیشرفته را به خود اختصاص می‌دهد. عایق‌سازی مجتمع‌های مسکونی و تجاری یکی از اقدامات مقرون به صرفه برای کاهش گازهای گلخانه ای و نیز کاهش مصرف انرژی محسوب می‌شود. از این رو، عایق‌های حرارتی متداول از گذشته و هم اکنون در ساختمان‌ها مصرف می‌شوند. ضخامت زیاد این عایق‌ها موجب کاهش مساحت و افزایش وزن ساختمان می‌شود و بر جزئیات ساختمان‌های پیچیده تاثیر می‌گذارد[۱].

متوسط دمای سطح کره زمین تقریبا ۰/۸ °C افزایش یافته است (سال۲۰۱۴) که دو سوم این مقدار تنها در سه دهه اخیر اتفاق افتاده است. امروزه دانشمندان توافق دارند که گرمایش زمین در درجه اول ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای تولید شده درنتیجهٔ فعالیت‌های بشر همچون سوزاندن سوختها، فسیلی و جنگل‌زدایی است. تحقیقات و مدلسازی آب و هوا مشخص کرده است که در طول قرن ۲۱ دمای جهانی سطح کره زمین حداقل ۱/۱ °C تا ۲/۹ °C افزایش خواهد یافت. در نتیجه، تلاش‌های

* زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

بسیاری در جهت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر انجام می‌شود. بنابراین، تحقیقات روی کاهش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بیش از پیش حائز اهمیت است[۲].

استفاده از عایق حرارتی در ساختمان‌ها موجب کاهش مصرف انرژی و کوچک شدن اندازه وسایل گرمایشی و سرمایشی می‌شود. مخصوصاً، در مورد ساختمان‌های قدیمی که از لحاظ عایق‌بندی در وضعیت مناسبی نیستند و مقدار اتلاف حرارتی در آنها بالاست، استفاده از عایق‌هایی با عملکرد خوب به‌منظور بازسازی ضروری است. بنابراین، استفاده از عایق‌های حرارتی سبک با عملکرد خارق‌العاده بر مبنای ایروژل در ساختمان‌های تازه‌ساز و بازسازی ساختمان‌های قدیمی، راه حل مناسبی محسوب می‌شود[۳].

سیلیکا ایروژل ماده‌ای نانومتخلخل، ابر عایق و بسیار سبک است. این ماده تخلخل بالای ۹۰٪، رسانایی حرارتی بسیار پایین (تا ۰/۰۱ W/mK) و چگالی کم (حدود ۵۰ Kg/m^3) دارد و به‌عنوان جایگزینی جدید و مناسب برای عایق‌های متداول به‌منظور استفاده در ساختمان‌ها مطرح شده است. محدویت عمدهٔ این مواد در بازار ساختمان، قیمت بالای آنهاست. تلاش‌های بسیاری به‌منظور بهبود عملکرد عایق و کاهش هزینهٔ تولید روی ایروژل‌ها انجام شده است[۷-۴و۲].

شفافیت ایروژل‌ها کاربردشان را برای عایق‌سازی پنجره‌ها و نماها امکان‌پذیر می‌کند. صفحه‌ها و پتوهای ایروژل را برای عایق‌سازی دیوارها و زمین می‌توان به‌کار گرفت. بهبود عملکرد حرارتی چوب و فولاد با استفاده از عایق ایروژل به صورت آزمایشگاهی نیز مطالعه شده است[۳].

علاوه بر موارد ذکر شده اخیراً دو نوع ماده بر پایه ایروژل، شامل پوشش‌های داخلی و خارجی دیوارها بر پایه ایروژل[1] و بتن‌های سبک و عایق بر پایه ایروژل در ساختمان‌ها بررسی و استفاده شده است. کاربرد انواع ایروژل در بتن‌ها موجب کاهش ضریب رسانایی حرارتی و کاهش چگالی می‌شود. علاوه بر این، مشاهده شده است که ایروژل‌ها در خلال هیدراته شدن مواد سیمان پایدارند و مقاومت فشاری آنها قابل قبول است. نتایج تحقیقات مربوط به کاربرد ایروژل‌ها در بتن امیدوارکننده بوده است. در مورد پوشش‌های عایق بر مبنای ایروژل نیز نتایج چشمگیری به‌دست آمده است. پوشش‌های مرسوم عمدتا شامل آب، گچ و سیمان و ماسه است که به صورت ملات درست شده و بر این پایه که سمت داخلی دیوار یا سمت خارجی آن به کار روند، نسبت این اجزا تغییر می‌کند. در پوشش‌های مبتنی بر ایروژل، ایروژل به عنوان جزء بعدی به این پوشش‌ها افزوده می‌شود. پوشش‌های عایق بر مبنای ایروژل، به دلیل بهبود عملکرد حرارتی ساختمان بدون ایجاد تغییرات خاص و اساسی در ساختمان، مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از پوشش‌های عایق ایروژل در ساختمان یک راه حل هوشمندانه برای کاهش اتلافهای حرارتی در ساختمان‌های موجود به شمار می‌رود[۹و۸و۵].

بهبود عملکرد حرارتی ساختمان را می‌توان با افزودن لایه نازک عایق روی دیوار انجام داد. پوشش‌های عایق بر مبنای ایروژل را بر روی دیوارها می‌توان به صورت داخلی و یا خارجی به کار برد. پوشش‌های عایق سمت خارجی دیوارها با محیط بیرون و شرایط باد، باران، یخبندان و تابش آفتاب در تماس‌اند، پس باید از استحکام بیشتری برخوردار باشند. به همین دلیل، به کار بردن آنها در ساختمان ملاحظات بیشتری طلب می‌کند و هزینه‌اش هم بیشتر است. از همین رو، مطالعات بیشتری باید در این زمینه انجام گیرد[۳]. بنابراین، کاربرد پوشش‌های عایق سمت داخلی دیوارها در ساختمان‌ها بیشتر مورد توجه است، به طوری که با کاربرد پوشش‌های عایق داخلی بر مبنای ایروژل با ضخامت کم، می‌توان به عملکرد مطلوب حرارتی دست یافت[۱۰]. در این مقاله به معرفی مواد بسیار جالب ایروژل و پوشش‌های عایق بسیار مطلوب مبتنی بر ایروژل، بر اساس تحقیقات انجام شده، خواهیم پرداخت و عملکرد پوشش‌های عایق بر پایه ایروژل و کاربرد آنها در ساختمان را ارزیابی می‌کنیم.

۲. ساخت پوشش‌های عایق ایروژل پایه

دستگاه تهیه پوشش در محل مصرف (ساختمان) و روش نصب پوشش‌های عایق حاوی ایروژل، از جانب بوراتی[2] و همکارانش[۵] ارائه شده است. ایروژل به‌کار رفته در این پوشش‌های عایق، حفره‌هایی با ابعاد نانو دارد و حدود ۹۰٪ تا ۹۸٪ آن را هوا تشکیل می‌دهد. این پوشش با مخلوط کردن آهک طبیعی با گرانول‌های ایروژل با درصدهای متفاوت تولید می‌شود.

1. Aerogel-Based Renders and Plasters

2. Buratti

اجازه داده می‌شود هوا به مخلوط جذب شود کـه در نهایـت چگـالی پوشش تا ۹۰٪ کاهش می‌یابد. برای تهیه پوشـش عـایق درصـدهای مختلف ایروژل به کلسیم هیدروکسید (با کیفیت بالا) اضافه می‌شود. ابتدا فقط ۵۰٪ حجمی ایروژل به مخلـوط اضـافه مـی‌شـود کـه بـه رسانش حرارتی W/mK ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ منجر می‌شود. برای رسـیدن به مخلوط یکنواخت حـاوی ذرات ایـروژل، آب را بـه آرامـی بـه آن اضافه می‌کنند. محصول نهایی با مخلوط کردن کلسیم هیدروکسـید با ذرات ایروژل در ظرف مناسب تهیه می‌شود. به‌منظور جلوگیری از پودر شدن گرانول‌های ایروژل این مرحله باید به آرامی و دقیق اجـرا شود. ابعاد اولیه گرانول‌های ایروژل معمولاً ۳ تا ۴ میلی‌متـر و شـکل آنها هم نامنظم است. بعـد از مرحلـه مخلـوط کـردن، گرانـول‌هـای ایروژل تقریباً شکسته می‌شـوند ولـی کـاملاً پـودر نمـی‌شـوند و در مخلـوط نهـایی ابعـاد ذرات ایـروژل در حـدود ۰/۱ تـا ۲ میلـی‌متـر خواهد بود. ابعاد گرانول‌های ایروژل نباید خیلی کوچـک باشـد زیـرا پوشش آبگریز و خاصیت چسبانندگی تضعیف می‌شود؛ در حالی کـه رسـانندگی حرارتـی ثابـت بـاقی مـی‌مانـد. در شـکل (۱)، مراحـل مخلوط کردن اجزای مختلف برای تهیه پوشش را مشاهده می‌کنیـد (گرانول ایـروژل، کلسـیم هیدروکسـاید و آب). ایـن پوشـش جدیـد همزمـان دافـع آب و نسـبت بـه بخـار آب تراواسـت و نسـبت بـه پوشش‌های متداول تنفس‌پذیری بیشتری دارد و سطح آن مرطـوب نمی‌شود. بنابراین، با بهره‌گیری از پوشش بر پایه ایـروژل میعـان در داخل دیوارها، که موجب ایجاد کپک می‌شود، کاهش می‌یابد[۵].

اسپری مستقیم این پوشش عایق ایروژل بر روی سطح داخلی دیـوار آجـری در محـل مصـرف را در شـکل (۲) مشـاهده مـی‌کنـیم. همانطور که مشاهده می‌شود، مرحلـه نصـب ایـن پوشـش‌هـا حتـی بر روی دیوارهای بـا شـکل هندسـی پیچیـده بسـیار آسـان اسـت. بنابراین، به منظور کاربرد پوشـش‌هـای ایـروژل پایـه، گرانـول‌هـای ایروژل که در مقیاس صنعتی تهیه شده‌اند، با ملات به صورت خشک مخلوط و سپس مخلوط خشک در کیسه ذخیره و به محل اسـتفاده حمل می‌شود. در محل مصرف، آن را با آب مخلوط می‌کننـد تـا بـه گرانروی مناسـب بـرای مصـرف بـه صـورت اسـپری بـر روی دیـوار برسد[۳].

(الف) (ب) (پ)

شکل ۱. مراحل مختلف مخلوط و تهیه کردن پوشش عایق حاوی ایروژل: (الف) مواد اولیه؛ (ب) مرحله مخلوط کردن؛ (پ) ترکیب نهایی پوشش عایق[۵].

شکل ۲. نحوه به‌کارگیری پوشش‌های عایق حاوی ایروژل بر روی دیوار[۳].

۳. عملکرد پوشش‌های عایق ایروژل پایه

در این بخش عملکرد پوشش‌های عایق حاوی ایروژل را بررسی می‌کنیم. مهمترین مشخصات این پوشش‌های عایق بهبود عملکرد حرارتی، صوتی و خاصیت تنفس‌پذیری نسبت به بخار آب است. پوشش‌های جدید، رسانایی حرارتی بسیار پایین‌تری (حدود ۹۰٪ کمتر) در مقایسه با عایق‌های متداول دارند و در مقایسه با پوشش‌های عایق متداول ضریب جذب صوتی آنها نیز بهتر است. با بررسی خاصیت تراوایی آنها نسبت به بخار آب، نشان داده می‌شود که پوشش‌های عایق حاوی ایروژل، از توانایی مؤثر کاهش مقدار رطوبت در دیوار برخوردارند[۵].

۳-۱ عملکرد حرارتی

عملکرد حرارتی نوع جدید پوشش‌های عایق بر پایه گرانول‌های سیلیکا ایروژل را استال[1] و همکارانش بررسی کرده‌اند. این پوشش شامل گرانول‌های سیلیکا ایروژل آبگریز (۶۰٪ تا ۹۰٪ حجمی)، چسباننده معدنی (غیر سیمانی) و نیز افزودنی‌هایی است که عملکرد پوشش را بهبود می‌بخشند. این پوشش‌ها را می‌توان برای دیوارها به صورت دستی یا با دستگاههای گچ‌کاری به‌کار برد. رسانایی حرارتی نمونه‌ها با دستگاه صفحه گرم محافظ‌دار[2] که برای نمونه‌های کوچک با رسانایی حرارتی کم طراحی شده، اندازه‌گیری شده است. اندازه نمونه‌ها ۶۵mm×۶۵mm و ضخامت آنها ۱۲mm تا ۱۳mm است. برای مقایسه، رسانایی حرارتی ۵ نوع پوشش متداول موجود در بازار نیز اندازه گیری شده‌اند. برای تمام پوشش‌ها رسانایی حرارتی نمونه‌هایی که با دستگاه گچ کاری تهیه شده‌اند، بیشتر از نوع تهیه شده دستی است. این امر ناشی از اضافه شدن آب بیشتر به پوشش‌ها هنگام استفاده از دستگاه گچ کاری است. رسانایی حرارتی با افزایش فشار در مرحله تهیه پوشش‌ها (مخلوط کردن با آب)، به دلیل ورود آب مایع بر اثر فشار بالا به داخل حفره‌های سایز نانو گرانول‌های ایروژل، افزایش می‌یابد. رسانایی حرارتی اندازه‌گیری شده برای پوشش‌های ایروژلی W/mK ۰/۰۲۵ و چگالی آن Kg/m^3 ۲۰۰ است. مطابق مندرجات جدول (۱)، مقدار رسانایی حرارتی در مقایسه با پوشش‌های متداول موجود در بازار بسیار کمتر است (۰/۰۶۵W/mK تا ۰/۱۰۳). استفاده از این عایق به‌منظور محدود کردن اتلاف‌های حرارتی از طریق پل‌های حرارتی در ساختمان‌های قدیمی و تازه‌ساز مفید است[۱۱].

جدول ۱. مقایسه رسانایی حرارتی و چگالی پوشش حاوی ایروژل با پوشش‌های متداول موجود در بازار[۱۱].

نام پوشش	رسانندگی گرمایی (W/mK)	افزودنی‌های پوشش	چگالی (kg/m^3)
پوشش ۱	۰/۱۰۳	پرلیت، چوب پنبه	۴۳۲
پوشش ۲	۰/۰۹۹	معدنی	۴۷۸
پوشش ۳	۰/۰۶۷	پلی استایرن انبساطی (EPS)	۲۹۷
پوشش ۴	۰/۰۷۲	پلی استایرن انبساطی (EPS)	۳۱۸
پوشش ۵	۰/۰۷۲	پلی استایرن انبساطی (EPS)	۲۵۰
پوشش ایروژل پایه	۰/۰۲۵	ایروژل	۲۰۰

به‌منظور ارزیابی امکان بالقوهٔ کاربرد پوشش‌های عایق ایروژل پایه، مقایسه این روش با روش‌های عایق‌سازی متداول نیز انجام شده است. چگالی گرانول‌های خالص سیلیکا ایروژل حدود Kg/m^3 ۵۰ تا Kg/m^3 ۲۰۰ و رسانایی حرارتی آن W/mK ۰/۰۱۳ تا W/mK ۰/۰۱۸ است. در جدول (۳)، رسانایی حرارتی و چگالی انواع مختلف پوشش‌های عایق موجود در بازار به همراه پوشش‌های ایروژل پایه مقایسه شده است. مقدار ضریب رسانایی حرارتی بسته به نوع و چگالی پوشش، برای پوشش‌های عایق متداول به‌کار رفته در این کار، در حدود W/mK ۰/۲۹ تا W/mK ۰/۷ است. همانطور که مشاهده می‌شود، کمترین ضریب رسانایی حرارتی مربوط به پوشش‌های عایق جدید ایروژل پایه است. برای پی بردن به تأثیر افزودن ایروژل بر خواص پوشش حاصل، یکی از نمونه‌های موجود در بازار انتخاب و درصدهای حجمی مختلف ایروژل به آن اضافه شده است. چگالی پوشش عایق با اضافه شدن درصد ایروژل کاهش می‌یابد. رسانایی حرارتی به‌دلیل ماهیت متخلخل ماده ایروژل نیز ۹۰ تا ۹۷ درصد کاهش می‌یابد، به طوری که با افزودن ۸۰٪

1. Stahl
2. Guarded Hot-Plate

ایروژل از W/mK ۰/۵ برای پوشش معمولی، به W/mK ۰/۰۵ برای پوشش حاوی ایروژل کاهش می‌یابد[۵].

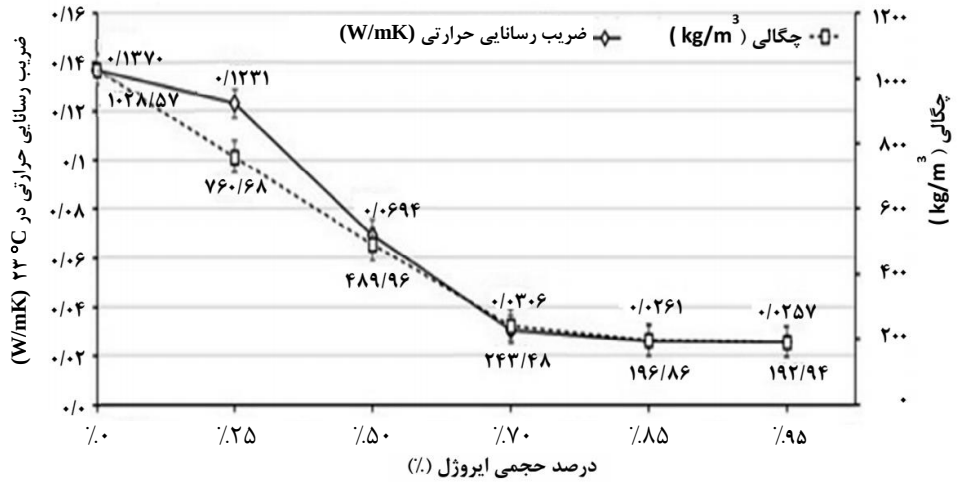
جدول ۲. مقایسه رسانایی حرارتی و چگالی انواع مختلف پوشش‌های موجود در بازار با پوشش‌های حاوی ایروژل.

پوشش‌ها	چگالی (kg/m^3)	رسانندگی گرمایی (W/m K)
ملات پوششی با اندازه‌های مختلف ریزدانه‌ها	۶۰۰	۰/۲۹
ملات پوششی با اندازه‌های مختلف ریزدانه‌ها	۱۰۰۰	۰/۴۷
ملات پوششی با اندازه‌های مختلف ریزدانه‌ها	۱۲۰۰	۰/۵۸
پوشش آهک پایه	۱۴۰۰	۰/۷
پوشش گچ پایه	۱۲۰۰	۰/۳۵
پوشش طبیعی بدون ایروژل	۲۲۰۰	۰/۵
پوشش ایروژل پایه (۸۰٪ تا ۹۰٪)	۳۰۰-۲۷۵	۰/۰۵-۰/۰۴۵
پوشش ایروژل پایه (۹۱٪ تا ۹۵٪)	۱۳۶-۱۲۶	۰/۰۲۱-۰/۰۱۹
پوشش ایروژل پایه (۹۶٪ تا ۹۹٪)	۱۲۵-۱۱۵	۰/۰۱۶-۰/۰۱۴

در مطالعه دیگری[۱۲] نیز اثر درصد حجمی ایروژل اضافه شده در پوشش بر چگالی و رسانایی حرارتی پوشش نهایی بررسی شده است که نتایج آن را در شکل (۳) مشاهده می‌کنید که به وضوح نشان می‌دهد با افزایش درصد ایروژل رسانایی حرارتی و چگالی پوشش کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که رسانایی حرارتی از W/mK ۰/۱۴ برای پوشش بدون ایروژل به W/mK ۰/۰۳ برای پوشش دارای ۷۰٪ ایروژل (حدود ۵ برابر) کاهش می یابد. نتیجه مشابهی نیز در مطالعه دیگری[۱۳] به‌دست آمده است که علاوه بر کاهش حدود ۵ برابری ضریب رسانایی حرارتی، بر اساس نتایج آزمایش‌ها، محاسبات و مدلسازی‌ها، گزارش شده است که پوشش حاوی ۷۰٪ ایروژل خاصیت حرارتی خود را تا ۲۰ سال کاملاً حفظ می کند. در تحقیق دیگری[۱۴] رسانایی حرارتی از W/mK ۱/۵۱۲ برای پوشش بدون ایروژل به W/mK ۰/۱۱۸ برای پوششی که ۸۰٪ ایروژل در آن به کار رفته است، کاهش یافته است.

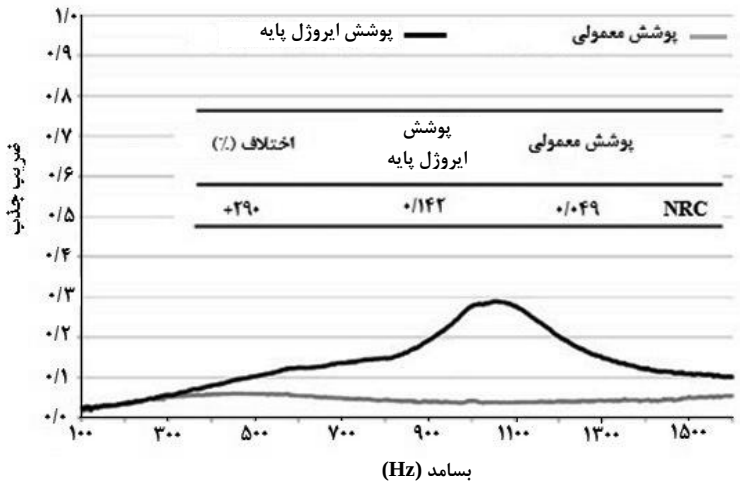
۳-۲ عملکرد صوتی

در تحقیقاتی که بوراتی و همکارانش[۸و۵] انجام داده‌اند، خاصیت جذب صدا برای پوشش‌های ایروژل پایه ارزیابی شده است. در یکی از این مطالعات[۸] که نتیجه آن را در شکل (۴) مشاهده می‌کنید، عملکرد صوتی پوشش ایروژل پایه نسبت به پوشش معمولی بهبود یافته است. به گونه‌ای که بیشینهٔ جذب در بسامد حدود ۱۱۰۰ Hz، معادل ۰/۲۹ شده است، در حالی که مقدار این بیشینه برای پوشش معمولی حدود ۰/۰۵ است. مقدار ضریب کاهش صدا (NRC)[1] برای پوشش ایروژل پایه حدود سه برابر شده است.



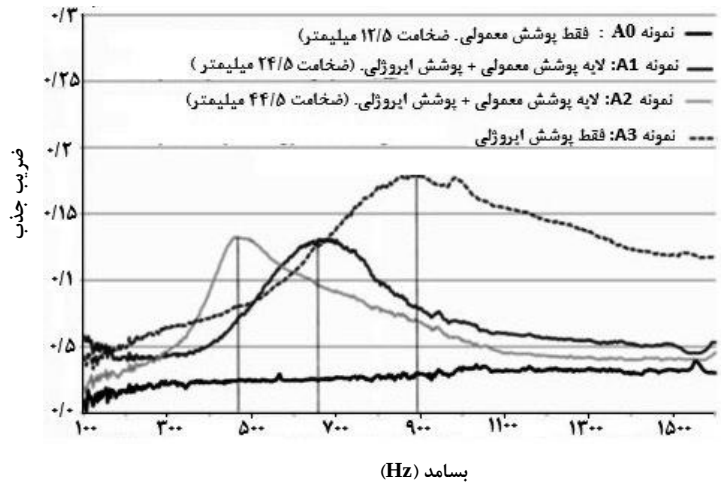
شکل ۳. تغییرات ضریب رسانایی حرارتی و چگالی پوشش با درصد حجمی ایروژل به کار رفته در پوشش[۱۲].

1. Noise Reduction Coefficient



شکل ۴. مقایسه ضریب جذب بسامد معمولی بین پوشش مرسوم و پوشش ایروژل پایه[۸].

در مطالعه‌ای دیگر[۵] که آزمونهای صوتی با استفاده از دستگاه لوله کانتس[1] به‌منظور تخمین ضریب جذب صدا در مواد مختلف، انجام شده‌اند، پوشش آهک طبیعی با حدود ۸۰٪ گرانول ایروژل بر روی آستر یا لایه گچ با ضخامت ۱۲/۵ mm به‌کار رفته است. آزمون اولیه تنها با در نظر گرفتن لایه گچ (A0) برای یافتن مقدار مرجعی برای مقایسه، انجام شده است. دو نوع پوشش عایق ایروژل با ضخامت‌های ۳۰ mm و ۱۰ mm بر روی لایه آزمایش شده است. بر روی هر دو نمونه ۲ mm پوشش نهایی نیز قرار گرفته است و درنهایت ضخامت آنها، به ترتیب، ۲۴/۵ mm(نوع A1) و ۴۴/۵ mm (نوع A2) است. در شکل (۵) متوسط ضریب جذب بسامد متداول برای نمونه‌ها را مشاهده می‌کنید. مطابق شکل، ضریب جذب A0 کمتر از بقیه است و با افزایش ضخامت پوشش، نمودار به سمت بسامد کمتر منتقل می‌شود. برای ضریب جذب نمونه A1 و A2 دو بیشینه، به ترتیب، در محدوده ۷۰۰ Hz تا ۸۰۰Hz و ۴۰۰ Hz تا ۵۰۰Hz مشاهده می‌شود. خواص صوتی پوشش عایق ایروژل به تنهایی و با حذف لایه کوت شده نهایی (A3) اندازه‌گیری شده است. مشاهده می‌شود که ضریب جذب A3 بیشتر از بقیه است و لایه کوت شده نهایی رفتار صوتی را بدتر می‌کند. مقادیر ضریب انتشار جذب پوشش‌های پرشده با ایروژل خیلی زیاد نیستند (کوچکتر از ۰/۲) و با وجود جذب چند برابری صوت نسبت به پوشش‌های معمولی، به دلیل مطلوب بودن ضخامت کم برای پوشش‌های ایروژل پایه بر روی دیوار، عملکرد آنها به منظور عایق صوتی خیلی برجسته نیست.



شکل ۵. مقایسه ضریب جذب در بسامدهای متداول بین پوشش‌های مختلف[۵].

1. Kundt's Tube

۳-۳ عملکرد رطوبتی- گرمایی[1]

به دلیل خاصیت آب‌گریزی ایروژل، پوشش‌های مبتنی بر ایروژل دافع آب‌اند و جذب آب بر روی دیوارها را کاهش می‌دهند، در حالی که از خاصیت عبوردهی بخار آب برخوردارند و تنفس‌پذیری چنین پوشش‌هایی نسبت به پوشش‌های مرسوم بسیار بالاتر است‌که مانع از مرطوب‌شدن سطوح دیوار می‌شوند[۱۵]. عملکرد رطوبتی- گرمایی در پوشش‌های ساختمان بسیار مهم است. مشکل رطوبت به پوسیدگی چوب، رشد کپک،کیفیت پایین هوای داخل، خوردگی فلزات، آسیب رسیدن به مواد و از دست رفتن مقاومت ساختاری می‌انجامد. برای بررسی قابلیت تنفس پوشش‌های ایروژل پایه، آزمایشهای عملی توسط ابراهیم[2] و همکارانش انجام و با مدل عددی ارائه شده، مقایسه شده است. پوشش مورد بررسی شامل آب، باینـدر معدنی و/یا آلی، پودر گرانول‌های ایروژل و افزودنی‌های دیگر است که به صورت خارجی بر روی سطح دیوار به‌کار می‌رود. در شکل (۶)، این پوشش عایق ایروژل پایه را مشاهده می‌کنید. همانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از این پوشش در مقایسه با پوشش‌های متداول ساده، آسان و بسیار انعطاف‌پذیر است. ساختار یکپارچه‌ای هم دارد و شکاف‌ها را پر می‌کند. این پوشش‌ها را می‌توان هم برای ساختمان‌های تازه‌ساز و هم ساختمان‌های قدیمی به کار برد. هدف این تحقیق تجزیه‌وتحلیل مقدار رطوبت در دیوارهای دارای پوشش ایروژل پایه و مقایسه آن با سایر عایق‌های حرارتی است[۱۶].

بررسی‌های مربوط به میزان رطوبت با استفاده از نرم‌افزار WUFI مدل‌سازی شده است. مدل عددی با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی مربوط بر یک دیوار جنوبی پوشش داده شده با پوشش ایروژل پایه، تأیید شده است. ساختمان مورد بررسی در سال ۱۹۸۴ در کشور فرانسه ساخته شده است. دیوار مورد آزمایش شامل بتن (لایه خارجی با ضخامت ۰/۲۵ m)، پشم شیشه (ضخامت ۰/۱۶ m)، پلاستر (لایه پوشش داخلی با ضخامت ۰/۰۱۳ m) است که لایه پوشش ایروژل پایه با ضخامت ۰/۰۴ m بر روی سطح بتن (بر روی سطح خارجی دیوار) اعمال شده است. در جدول (۳) خواص فیزیکی و حرارتی اجزای این دیوار درج شده است. حسگر رطوبت و دما بین بتن و لایه پوشش خارجی که ایروژل پایه است، قرار داده شده است. آزمایش به مدت دو هفته در تابستان ادامه داشت. اعتبار مدل با در نظر گرفتن مقدار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده دما و رطوبت نسبی در سطح مشترک بین بتن و پوشش ایروژلی تأیید شده است. بعد از اعتبار سنجی مدل، شبیه‌سازی‌های مختلفی با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی شهر گرنوبل[3] فرانسه انجام شده است. دیوارهای عایق شده متفاوتی مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شده‌اند. نتیجه شبیه‌سازی، از لحاظ شدت خشک شدن (DR)[4] در طول چهار سال مقایسه شده است. شدت خشک شدن (آهنگ خشک‌شدگی) بنابر تعریف، عبارت است از[۱۶]:

$$\text{آهنگ خشک شدگی} = \frac{\text{مقدار آب نهایی در دیوار در انتهای دوره} - \text{مقدار آب اولیه در دیوار}}{\text{مقدار آب اولیه در دیوار}} \times 100$$

شکل ۶. پوشش عایق ارائه شده ایروژل پایه.

1. Hygrothermal
2. Ibrahim
3. Grenoble
4. Dryness Rate

جدول ۳. خواص فیزیکی و حرارتی دیوار مورد آزمایش به‌منظور اعتبارسنجی مدل[۱۶].

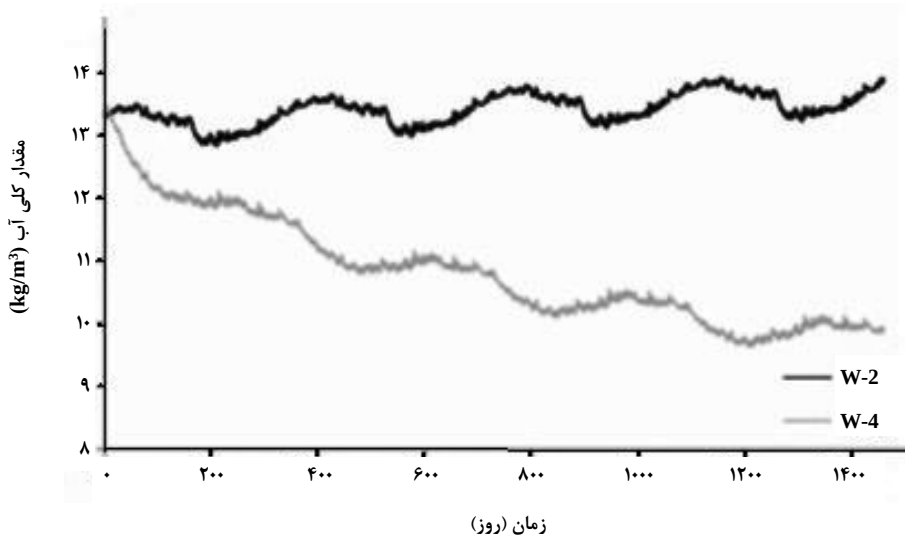
نوع لایه	ضخامت (cm)	رسانندگی گرمایی (W/mK)	ظرفیت گرمایی (J/kgK)	چگالی (kg/m^3)
پوشش داخلی	۱/۳	۰/۳۲	۸۰۰	۷۹۰
پشم شیشه	۱۶	۰/۰۴۱	۸۴۰	۱۲
بتن	۲۵	۲/۱	۸۰۰	۲۴۰۰
پوشش خارجی ایروژل پایه	۴	۰/۰۲۷	۹۹۰	۱۵۶

بهترین رفتار از لحاظ استعداد بالقوهٔ خشک شدن دیوار در مورد دیوارهای W4 و W5، به ترتیب، شامل لایه پوشش ایروژل با ضخامت‌های ۵ cm و ۱۰ cm و بتن ۲۰ cm، مشاهده می‌شود. در مورد این دیوارها آهنگ خشک شدن حدود ۲۳٪ بیش‌تر و علاوه بر این، آهنگ خشک شدن عایق خارجی از همه بیشتر است. وجود عایق پلی استایرن اثر نامطلوب بر خشک شدن و دفع رطوبت از دیوار می‌گذارد و به نحوی به باقی ماندن و جذب رطوبت به داخل دیوار منجر می‌شود. با این حال، کاربرد پوشش‌های خارجی ایروژل پایه، آهنگ خشک شدن دیوارهای دارای عایق حرارتی پلی استایرنی را نیز بهبود می‌بخشد (W9-W8-W7-W6). همچنین مشاهده می‌شود که وقتی ضخامت عایق داخلی پلی استایرن کمتری است (۵cm) عملکرد بهتر می‌شود (W6-W8). اضافه کردن لایه پوشش عایق ایروژل پایه بر سطح خارجی دیوارها به طور موثری خطر ناشی از رطوبت را کاهش می‌دهد. در شکل (۷) مقدار آب را در طی زمان برای دو دیوار W-2 دارای ۵ cm لایه عایق پلی استایرن به صورت داخلی، و دیوار W-4 دارای ۵ cm عایق خارجی ایروژل پایه مشاهده می‌کنید. مشاهده می‌شود که وجود عایق داخلی پلی استایرن ظرفیت خشک شدن دیوار را کاهش می‌دهد و منجر به وجود مقادیر زیاد رطوبت در داخل دیوار می‌شود.

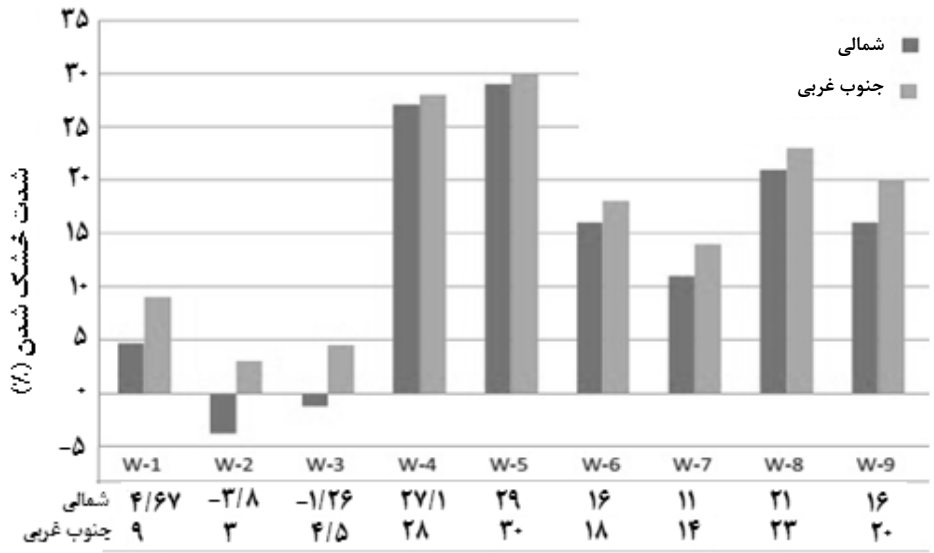
در مورد دیوار W-4 که در آن به جای عایق پلی استایرن از پوشش ایروژلی استفاده شده است، مقدار رطوبت موجود در دیوار به مرور کاهش می‌یابد. در شکل (۸) پتانسیل خشک شدن برای دیوارهای مورد بررسی در شبیه‌سازی را در موقعیت‌های شمالی و جنوبی مشاهده می‌کنید. بنابراین، کاربرد این پوشش عایق بر مبنای ایروژل در سطح خارجی دیوار آهنگ خشک شدن را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد[۱۶و۳].

جدول ۴. ساختار دیوارهای شبیه‌سازی شده[۱۶].

نماد	لایه ۱	لایه ۲	لایه ۳	لایه ۴
W-1	۲۰ cm بتن	پوشش داخلی	-	-
W-2	۲۰ cm بتن	۵ cm پلی استایرن	پوشش داخلی	-
W-3	۲۰ cm بتن	۱۰ cm پلی استایرن	پوشش داخلی	-
W-4	۵ cm پوشش ایروژلی	۲۰ cm بتن	پوشش داخلی	-
W-5	۱۰ cm پوشش ایروژلی	۲۰ cm بتن	پوشش داخلی	-
W-6	۵ cm پوشش ایروژلی	۲۰ cm بتن	۵ cm پلی استایرن	پوشش داخلی
W-7	۵ cm پوشش ایروژلی	۲۰ cm بتن	۱۰ cm پلی استایرن	پوشش داخلی
W-8	۱۰ cm پوشش ایروژلی	۲۰ cm بتن	۵ cm پلی استایرن	پوشش داخلی
W-9	۱۰ cm پوشش ایروژلی	۲۰ cm بتن	۱۰ cm پلی استایرن	پوشش داخلی



شکل ۷. ارزیابی مقدار آب در طول چهار سال در دیوارهای W-2 و W-4[۱۶].



شکل ۸. آهنگ خشک شدن برای دیوارهای مختلف[۱۶].

۴. نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله مروری بین پوشش‌های مرسوم ساختمانی و پوشش‌های عایق ایروژل پایه مقایسه صورت گرفته و امکان‌سنجی کاربرد آنها در صنعت ساختمان انجام شده است. مطالعات و تحقیقات انجام شده، بهبود قابل توجهی را در معیارهای عملکرد پوشش‌های ایروژلی، بخصوص از لحاظ حرارتی و صرفه جویی در مصرف انرژی ساختمان نشان داده‌اند. مثلاً، مشاهده شده است که ضریب رسانایی حرارتی پوشش حاوی ۷۰٪ حجمی ایروژل نسبت به پوشش معمولی بیش از ۵ برابر کاهش می یابد و این به معنای کاهش مصرف انرژی ساختمان با همین نسبت است. اهمیت این موضوع با در نظر گرفتن طول عمر و ماندگاری بیشتر پوشش ایروژلی نسبت به پوشش معمولی مضاعف می‌شود.

همچنین، مثلاً ضریب جذب صدا در بسامدهای متداول در پوشش ایروژل پایه نسبت به پوشش معمولی از ۰/۰۵ تا ۰/۲۹ افزایش یافته و افزایش سه برابری ضریب کاهش صدا را نشان داده است، این معیار به معنای جذب بیشتر صدا در دیوار و

آسایش بیشتر زندگی در داخل ساختمان است. در مورد عملکرد گرمایی- رطوبتی نیز مثلاً، آهنگ خشک شدن دیواری با ضخامت بالاتر از ۲۰ cm با افزودن 5cm پوشش ایروژلی از ۵٪ به ۲۵٪ افزایش یافته و این افزایش به معنای تنفس‌پذیری بهتر دیوار و دفع سریع‌تر رطوبت و عدم جذب رطوبت در دیوار ایروژلی است. در حالی که افزودن عایق پلی استایرینی نتیجه عکس داده و به باقی ماندن رطوبت داخل دیوار، عدم عبور بخار از میان دیوار و تخریب سریع‌تر دیوار منجر می‌شود.

مراجع

[1] Baetens, R., Jelle, B. P., Gustavsen, A., "Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review", Energy and Buildings, 43: 761-769, (2011).

[2] Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J., Riffat, S. B., "Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34: 273-299, (2014).

[3] Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E., "Aerogel Plasters for Building Energy Efficiency", in Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency, Springer, 17-40, (2016).

[4] Garrido, R., Silvestre, J. D., Flores-Colen, I., "Economic and Energy Life Cycle ssessment of aerogel-based thermal renders", Journal of Cleaner Production, 151: 537-545, (2017).

[5] Buratti, C., Moretti, E., Belloni, E., Agosti, F., "Development of Innovative Aerogel Based Plasters: Preliminary Thermal and Acoustic Performance Evaluation", Sustainability, 6: 5832-5852, (2014).

[6] Ibrahim, M., Wurtz, E., Achard, P., Biwole, P. H., "Aerogel-based coating for energy-efficient building envelopes", in 9th International Energy Forum on Advanced Building Skins, Bressanone, Italy: Proceedings of energy forum on advanced building skins, (2014).

[7] Khamidi, M. F., Glover, C., Farhan, S. A., Puad, N. H. A., Nuruddin, M. F., "Effect of silica aerogel on the thermal conductivity of cement paste for the construction of concrete buildings in sustainable cities" WIT Transactions on The Built Environment, 137: 665-674, (2014).

[8] Buratti, C., Merli, F., Moretti, E., "Aerogel-based materials for building applications: Influence of granule size on thermal and acoustic performance", Energy and Buildings, 152: 472-482, (2017).

[9] Schuss, M., Pont, U., Mahdavi, A., "Long-term experimental performance evaluation of aerogel insulation plaster", Energy Procedia, 132: 508-513, (2017).

[10] Barbero, S., Dutto, M., Ferrua, C., Pereno, A., "Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: evaluation methodology for a real cost-performance comparison", Energy and Buildings, 77: 40-47, (2014).

[11] Stahl, T., Brunner, S., Zimmermann, M., Ghazi Wakili, K., "Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications", Energy and Buildings, 44: 114-117, (2012).

[12] Berardi, U., "The benefits of using aerogel-enhanced systems in building retrofits", Energy Procedia, 134: 626-635, (2017).

[13] Berardi, U., Nosrati, R. H., "Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions", Energy, 147: 1-15, (2018).

[14] Júlio, M. d. F., Soares, A., Ilharco, L. M., Flores-Colen, I., de Brito, J., "Silica-based aerogels as aggregates for cement-based thermal renders", Cement and Concrete Composites, 72: 309-318, (2016).

[15] Berardi, U., "Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: Insights from a case study", Energy and Buildings, 159: 370-381, (2018).

[16] Ibrahim, M., Wurtz, E., Biwole, P. H., Achard, P., Sallee, H., "Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering", Energy and Buildings, 84: 241-251, (2014).