

صفحه‌های پلی کربنات پر شده با سیلیکا ایزوژل: نورگیرهایی نوین با ویژگی عایق گرمایی برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها

طاهر یوسفی امیری*⁺، حسن برگزین، مریم فرهادی پور، زینب جمالی

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده: بخش عمده اتلاف گرمایی در ساختمان‌ها از طریق نورگیرها یا پنجره‌ها صورت می‌گیرد. یکی از راهکارهای ارابه شده برای بهبود عملکرد گرمایی نورگیرها، استفاده از ایزوژل‌ها به عنوان پرکننده میان صفحه‌های دو یا چند جداره نورگیرها می‌باشد. ایزوژل‌ها موادی بسیار سبک و نانوساختار با کم‌ترین ضریب انتقال گرمایی می‌باشند. همچنین عایق صوت نیز بوده و دارای عبوردهی بالای نور نیز می‌باشند، که استفاده از آن‌ها در نورگیرها را جذاب می‌کند. در این پژوهش اثر افزودن ذره‌های ایزوژل به فضای خالی میان صفحه‌های پلی کربنات که به تازگی کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های گوناگون یافته‌اند، مورد مطالعه قرار گرفت. صفحه‌های پلی کربناتی با ضخامت‌های گوناگون (۵ تا ۱۵ میلی‌متر) با ذره‌های ایزوژل پر شده و میزان کاهش اتلاف گرمایی در دماهای گوناگون (۴۰-۷۰ °C) در اثر افزودن ایزوژل اندازه‌گیری شد؛ همچنین اثر اندازه ذره‌های ایزوژل پر شده در میان صفحه‌ها در کارایی گرمایی آن‌ها نیز ارزیابی شد. اندازه ذره‌های ۳-۲ میلی‌متر، بهترین عملکرد را نشان دادند. بر اساس ضخامت صفحه، دمای کاری و اندازه ذره‌های استفاده شده، صفحه‌های پر شده با ایزوژل کاهش اتلاف گرمایی در بازه‌ی ۲۱ تا ۶۶ درصد را نشان دادند. همچنین به طور نمونه مقدار ضریب انتقال گرمایی کلی (U) صفحه ۱۰ میلی‌متری پلی کربناتی از مقدار $2,74 \text{ W/m}^2\text{K}$ در صفحه خالی به $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ در صفحه پر شده با ذره‌های ایزوژل کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: سیلیکا ایزوژل؛ صفحه‌های پلی کربنات؛ ویژگی‌های گرمایی؛ مصرف انرژی؛ ساختمان.

Keywords: Silica aerogel; Polycarbonate panes; Thermal properties; Energy consumption; Building.

مقدمه

ساختمان‌های مسکونی و تجاری حدود ۳۰ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است. افزایش هزینه انرژی به همراه افزایش مصرف انرژی در نتیجه‌ی افزایش تعداد ساختمان‌ها و بالا رفتن سطح رفاه مورد انتظار در درون ساختمان‌ها و نیز افزایش

حدود ۴۰ درصد از مصرف کل انرژی در جهان مربوط به بخش ساختمان‌ها می‌باشد و در بسیاری از کشورها سهم بخش ساختمان از سهم انرژی مصرفی در بخش صنعت و حمل و نقل بالاتر می‌باشد. مطابق گزارش‌های گوناگون کربن دی اکسید منتشر شده از

*عقد دار مکاتبات

+E-mail: yousefiamiri@znu.ac.ir

به حالت عادی بسیار محدودتر بوده و امکان انتقال گرمای جابه‌جایی از طریق آن‌ها به طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۲، ۱۱-۸]؛ بنابراین انتقال گرما به واسطه همرفت و جابه‌جایی مولکول‌های هوا از یک سمت ایروژل به سمت دیگر آن بسیار محدود می‌شود. انتقال گرمای هدایتی نیز از طریق بخش جامد ایروژل که همان ذره‌های سیلیکا می‌باشد، انجام می‌گیرد؛ ولی به دلیل حجم و جرم بسیار کم ذره‌های سیلیکا که زنجیروار در جهت‌های گوناگون به هم پیوسته‌اند و مسیرهایی پرپیچ‌وخم با اندازه‌های بسیار کوچک نانومتری ایجاد کرده‌اند و در موردهای بسیاری نیز انتهای این مسیرهای جامد، بن‌بست بوده و به سوی دوم ایروژل نمی‌رسد، انتقال گرما از طریق هدایت در مسیر این ذره‌های جامد نیز در عمل ناچیز خواهد بود.

ایروژل‌ها افزون بر هدایت گرمایی بسیار پایین، عبوردهی بالای نور و انرژی خورشیدی را دارند و تا حدودی عایق صوت نیز می‌باشند، داشتن همزمان این ویژگی‌ها استفاده از آن‌ها را به عنوان مواد عایق عبوردهنده نور (شفاف یا مات) بسیار جذاب می‌کند. آن‌ها همچنین بسیار سبک بوده و در برابر آتش و غیرسمی مقاوم می‌باشند [۱۲، ۷، ۲]. این مسئله منجر به پژوهش‌های زیادی در زمینه استفاده از گرانول‌ها و قالب‌های سیلیکا ایروژل در فضای خالی بین صفحه‌های شیشه‌های دوجداره شده است.

پژوهش‌های عملی و مدل‌سازی‌های گوناگونی اثر جایگزینی شیشه‌های دو جداره مرسوم با شیشه‌های دو جداره پر شده با ایروژل را بر مصرف سالیانه انرژی، بار سرمایشی و گرمایشی و نیز ویژگی‌های نوری و صوتی آن‌ها را در ساختمان‌های گوناگون با شرایط آب و هوایی گوناگون مورد مطالعه قرار داده‌اند و نتیجه‌های به دست آمده از آن‌ها نشان‌دهنده قابلیت بالای این فناوری در کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها در کنار نورگیری مناسب آن‌ها می‌باشد [۱۷-۱۲، ۸، ۶، ۳، ۱]. قابلیت استفاده از نورگیرهای پر شده با ایروژل در نماهای ساختمان؛ افزون بر آب و هوای سرد در آب و هوای گرم و داغ نیز تأیید شده است [۵]. هر دو نوع ایروژل‌های مونولیتی و گرانولی مورد پژوهش قرار گرفته‌اند؛ برای نمونه با استفاده از ایروژل‌های مونولیتی با ضخامت حدود ۱۵ mm مقدار U پایین‌تر از $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ و عبور ۷۵ درصدی نور خورشید و با ضخامت ۲۰ mm مقدار U پایین‌تر از $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ و عبوردهی ۷۵ درصدی نور خورشید به دست آمده است [۲۰-۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر پنجره‌های دو جداره با استفاده از ایروژل گرانولی و مونولیتی تهیه شده و نتیجه شده که نمونه‌های مونولیتی از هر دو لحاظ گرمایی و نوری دلخواه‌تر می‌باشند،

نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، منجر به پژوهش در زمینه ساخت و توسعه مواد و فناوری‌های نوینی شده است که بتوانند مصرف انرژی در ساختمان‌ها را کاهش دهند [۳-۱]. یکی از راهکارها در این زمینه، کاهش هدررفت انرژی از سطح‌ها و دیواره‌های ساختمان‌ها با به کار بردن عایق‌های قوی و پیشرفته گرمایی در آن‌ها می‌باشد. پنجره‌ها تأثیر اصلی را در عملکرد انرژی ساختمان دارند و تا ۵۰ درصد از اتلاف انرژی در ساختمان‌ها به ویژه در ساختمان‌های با تعداد پنجره‌ها یا روشنایی زیاد مانند ساختمان‌های غیرمسکونی می‌تواند از پنجره‌ها صورت گیرد [۴]. پنجره‌ها نقش تأمین روشنایی و نور خورشید را برای ساختمان دارند که نقش به‌سزایی در راحتی و سلامتی ساکنان ساختمان دارد. آن‌ها همچنین امکان تهویه طبیعی ساختمان و تأمین هوای تازه را نیز فراهم می‌کنند؛ ولی از سوی دیگر، نسبت به همه سطوح ساختمان مانند دیوارها و سقف و کف، ضعیف‌ترین مقاومت گرمایی را داشته و بیش‌ترین اتلاف گرمایی از آن‌ها صورت می‌گیرد؛ بنابراین، برای رسیدن به عملکرد بهینه، از سویی برای کاهش اتلاف انرژی پنجره‌ها باید کم‌ترین ضریب انتقال گرمایی و عبوردهی جریان گرما را داشته باشند و از سوی دیگر برای افزایش روشنایی و بهبود دید و کاهش مصرف انرژی الکتریکی، باید ویژگی عبوردهی نور در آن‌ها نیز تا حد امکان بالا باشد. همچنین بهتر است، تا حد کافی عایق صوت بوده و از عبور سروصدا جلوگیری کنند [۷-۲]. برای تأمین این اهداف ایده‌ها و طرح‌های گوناگونی ارائه شده است. یکی از امیدبخش‌ترین آن‌ها استفاده از سیلیکا ایروژل در میان صفحه‌های شیشه‌های دوجداره می‌باشد. در حال حاضر عمومی‌ترین سامانه‌ی مورد استفاده برای نورگیرها، شیشه‌های دوجداره می‌باشد. ایروژل‌ها از نانوذره‌هایی که در یک شبکه سه بعدی به هم پیوسته‌اند و به وجود آورنده یک ساختار بسیار متخلخل می‌باشند، تشکیل شده‌اند. ایروژل‌ها سبک‌ترین جامدهای تجاری موجود با ساختار نانومتخلخل تا تخلخل ۹۹ درصد می‌باشند. اندازه حفره‌های آن‌ها به طور عموم در بازه‌ی ۲-۵۰ nm می‌باشد. کم‌ترین هدایت گرمایی را در میان جامدها داشته و هدایت گرمایی آن‌ها حتی می‌تواند، پایین‌تر از هوا باشد. عملکرد گرمایی چشمگیر آن به دلیل ساختار نانومتخلخل و اندازه بسیار ریز ذره‌های جامد (۲-۵ nm) می‌باشد. ۸۵-۹۹ درصد حجم ایروژل‌ها را حفره‌هایی تشکیل می‌دهند که با هوا پر شده‌اند. حفره‌های پر پیچ و خم که اندازه متوسط آن‌ها نیز از اندازه مسیر آزاد متوسط مولکول‌های هوا کوچک‌تر و جابه‌جایی مولکول‌های هوا در میان این حفره‌ها نسبت

جدول ۱- ویژگی‌های ذره‌های ایزوژل به کار رفته

سطح ویژه (m ² /g)	حجم تخلخل (cm ³ /g)	اندازه متوسط حفره‌ها (nm)	دانسیته (g/cm ³)
۳۶۰	۳٫۳	۳۶	۰٫۱

گونگون این صفحه‌ها خالی بوده و از هوا پر می‌شود، که منجر به عملکرد گرمایی بهتر آن‌ها می‌شود [۲۵، ۲۶]. از این رو، در پژوهش حاضر برای ارزیابی و بررسی چگونگی اثرگذاری استفاده از ایزوژل‌ها در میان لایه‌های صفحه‌های پلی کربناتی، فضای خالی بین صفحه‌های پلی کربنات با ذره‌های ایزوژل پر شده و عملکرد گرمایی آن‌ها نسبت به صفحه‌های معمولی و میزان کاهش مصرف انرژی در اثر افزودن ایزوژل به فضای درون صفحه‌های مورد مطالعه قرار گرفته است.

بخش تجربی

فضای خالی بین لایه‌های صفحه‌های پلی کربنات با اندازه‌های ۲۵ cm ۲۵ cm به طور کامل با ذره‌های ایزوژل پر می‌شود. ایزوژل‌های به کار رفته از شرکت پاکان آتیه نانودانش تهیه شده‌اند که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ ارایه شده‌اند.

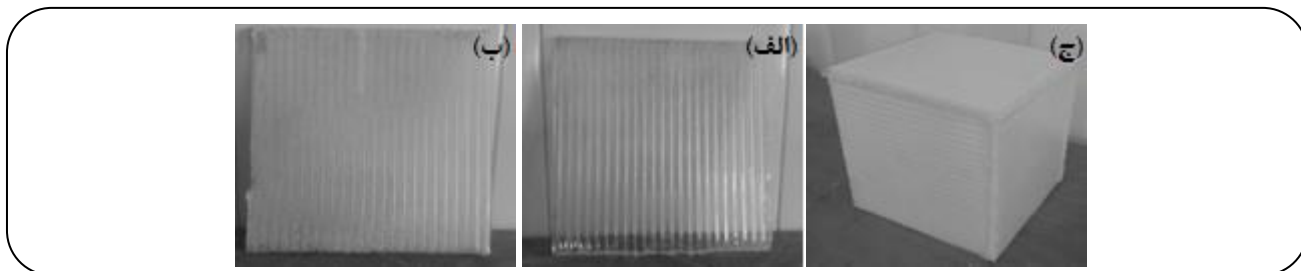
حال با استفاده از صفحه‌های پلی کربنات بدون ایزوژل و صفحه‌ها پیر شده با ایزوژل محفظه‌هایی مکعبی ساخته می‌شوند. نمونه‌ای از صفحه‌ها و محفظه ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری و مقایسه عملکرد گرمایی صفحه‌ها با ایزوژل و صفحه‌های بدون ایزوژل، درون هر یک از محفظه‌های تهیه شده با این صفحه‌ها، یک المنت گرمایی (منبع گرمایش) به همراه یک حسگر دما در درون محفظه قرار داده می‌شود و میزان مصرف انرژی درون محفظه‌های گوناگون برای ثابت نگه‌داشتن دمای درون محفظه اندازه‌گیری می‌شود. به صورت مستمر، دمای درون محفظه اندازه‌گیری شده و به جعبه کنترلی ارسال می‌شود و متناسب با مقدار آن توان ورودی المنت گرمایی برای ثابت نگه‌داشتن دما تنظیم و روشن و خاموش می‌شود. اطلاعات مربوط به دما و توان مصرف شده توسط المنت در مدت زمان انجام آزمایش تحت نرم افزار Labview به رایانه ارسال شده و این اطلاعات ثبت می‌شود؛ بنابراین تحت شرایط گوناگون می‌توان میزان انرژی مصرف شده در درون محفظه‌های تهیه شده با صفحه‌های گوناگون را

به گونه‌ای در مقایسه با پنجره‌ی معمولی، پنجره پر شده با ایزوژل مونولیتی کاهش ۵۵ درصدی تلفات گرمایی و کاهش ۲۵ درصدی عبور نور را در پی داشته است، در حالی که مقدار کاهش تلفات گرمایی و کاهش عبوردهی نور در پنجره پر شده با گرانول‌های ایزوژل به ترتیب ۲۵ و ۶۶ درصد بوده است. همچنین مقدار U از ۲٫۷ W/m²K در پنجره معمولی به ۰٫۶ W/m²K در پنجره پر شده با ایزوژل مونولیتی کاهش می‌یابد [۲]. هرچند ایزوژل‌های مونولیتی عملکرد گرمایی و نوری بهتری دارند ولی تولید آن‌ها محدود به مقیاس‌های کوچک بوده و هزینه بالایی دارد و از سوی دیگر به دلیل مقاومت مکانیکی پایین، احتمال شکست آن‌ها در حمل و نقل و نصب بسیار زیاد است [۴]. با استفاده از ایزوژل‌های گرانولی با اندازه ذره‌های گوناگون، میزان کاهش تلفات گرمایی تا ۶۳ درصد به دست آمده است و برای پنجره‌های با ضخامت ۱۴ mm مقدار U از ۲٫۸۶ W/m²K برای پنجره معمولی به ۱٫۰۵ W/m²K برای پنجره پر شده با ذره‌های ایزوژل کاهش یافته است [۴].

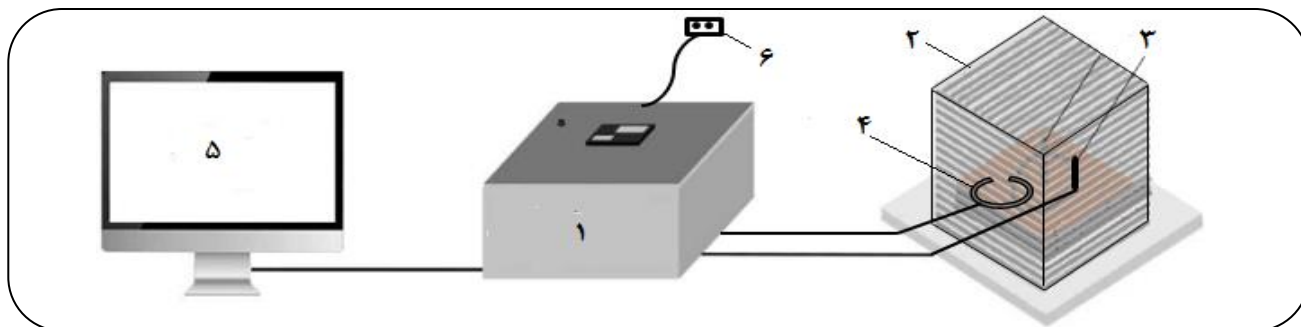
مطالعه اثر اندازه ذره‌های ایزوژل و ضخامت فضای خالی میان دو جداره بر عملکرد پنجره ایزوژلی، از سویی اثر مستقیم اندازه ذره‌ها و اثر وارون ضخامت پنجره بر میزان عبور نور و ضریب سایه را نشان می‌دهد و از سوی دیگر نشان‌دهنده تأثیر بیش‌تر ضخامت نسبت به اندازه ذره‌ها می‌باشد [۲۱]. در مطالعه‌ای دیگر برای پنجره‌ای با ضخامت ۷٫۵ mm، با کاهش اندازه ذره‌های ایزوژل از ۲٫۷ mm به ۰٫۴۱ mm مقدار عبور نور مرئی و نور خورشید به ترتیب از ۳۱٫۰۶ و ۳۹٫۰۱ به ۲۲٫۶۳ و ۲۴٫۰۴ درصد و مقدار U از ۱٫۸۳ به ۱٫۵۳ W/m²K کاهش یافته است. مقدار U برای پنجره بدون ایزوژل ۳٫۱۷ W/m²K بوده است [۲۲]. در برخی مطالعه‌ها نیز ویژگی‌های نوری پنجره‌های پر شده با ایزوژل افزون بر اندازه‌گیری‌های عملی بر مبنای مدل‌های ارایه شده نیز استخراج شده است [۲۳، ۲۴].

به تازگی، استفاده از صفحه‌های پلی کربنات در بخش‌های نورگیر بناهای گوناگون مانند سوله‌ها، ساختمان‌های تجاری و اداری و کشاورزی به دلیل وزن کم و استحکام مناسب آن‌ها و مقاومت در برابر آب و هواهای متنوع و نیز احتراق و تابش فرابنفش^(۱) گسترش یافته است. همچنین از نظر هزینه و خطرهای ناشی از شکستن نیز نسبت به سامانه‌های شیشه‌ای مرسوم اولویت دارند. این صفحه‌ها به صورت دو یا چند لایه در هندسه‌ها، رنگ‌ها و ضخامت‌های گوناگون ساخته شده و به بازار ارایه می‌شوند. فضای بین لایه‌های

(۱) Ultra-Violet



شکل ۱- الف) صفحه پلی کربنات خالی، ب) صفحه پلی کربنات پر شده با ایروزل، ج) نمونه محفظه ساخته شده برای آزمون‌های گرمایی.



شکل ۲- مجموعه آزمایشگاهی به کار رفته برای انجام تست‌های گرمایی. ۱: جعبه کنترلی، ۲: محفظه ساخته شده با صفحه‌های پلی کربناتی، ۳: حسگر دما در درون محفظه (برای اندازه‌گیری دمای درون محفظه و ارسال آن به جعبه کنترلی)، ۴: المنت گرمایی در درون محفظه (منبع گرمایش برای تنظیم دمای درون محفظه که از جعبه کنترلی دستور می‌گیرد)، ۵: رایانه: اطلاعات دما و توان صرف شده توسط المنت در طول زمان آزمایش به رایانه منتقل و ثبت می‌شود. ۶: منبع برق.

زمان ۲ ساعت ثبت می‌شد. شمای کلی سامانه‌ی آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است.

نتیجه‌ها و بحث

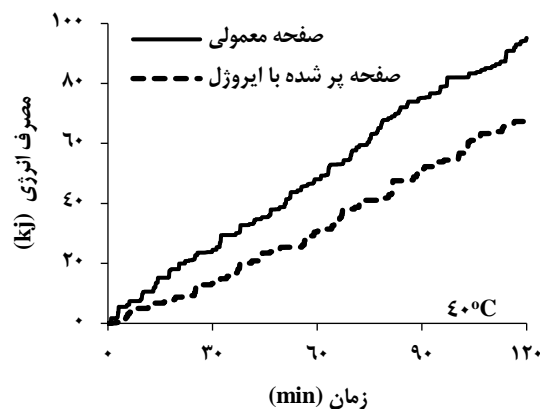
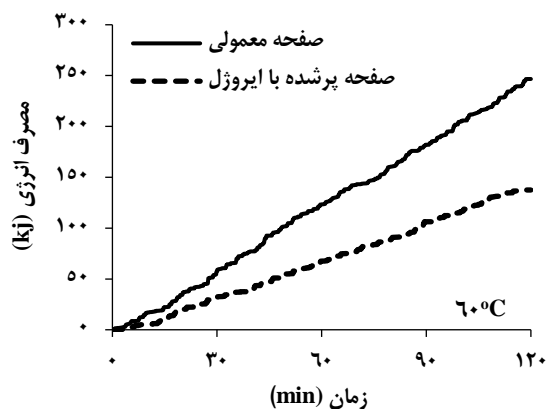
با استفاده از مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده و نرم افزار به کار رفته، می‌توان انرژی مصرفی المنت‌های گرمایی درون محفظه‌ها را برای ثابت نگه داشتن دمای درون محفظه را محاسبه کرد. نمونه‌ای از خروجی‌های نرم افزار در شکل ۳ نشان داده شده است. در این نمونه آزمایش‌ها ضخامت صفحه‌های پلی کربناتی ۱۰ mm بوده و با ایروزل پودری با اندازه ذره‌های زیر $6 \mu\text{m}$ پر شده‌اند. در این شکل، انرژی مصرفی المنت در طول زمان از لحظه شروع آزمایش ارایه شده است. مدت زمان انجام تمامی آزمایش‌های ۲ ساعت بوده است. نمودارها نشان‌دهنده‌ی آن است که برای نمونه اتلاف گرمایی در دمای 40°C از 95 kJ در صفحه معمولی به 67 kJ در صفحه پر شده با ایروزل و نیز در دمای 60°C از 246 kJ در صفحه معمولی به 137 kJ در صفحه پر شده با ایروزل کاهش می‌یابد، که به ترتیب بیانگر کاهش ۴۴ و ۴۶ درصدی اتلاف گرمایی در اثر استفاده از ذره‌های ایروزلی می‌باشند؛ همان‌گونه که

اندازه‌گیری کرده و به دست آورد. دمای درون محفظه بالاتر از دمای بیرون محفظه (دمای اتاق) انتخاب می‌شود. به دلیل خروج گرما از طریق دیواره‌های محفظه، برای ثابت نگه‌داشتن دمای درون محفظه لازم خواهد بود که گرمای اتلافی توسط المنت گرمایی جبران شود؛ بنابراین هرچه دیواره‌های محفظه عایق‌تر باشند، میزان توان مصرفی المنت برای ثابت نگه‌داشتن دمای درون محفظه کم‌تر خواهد بود.

برای انجام آزمایش، جعبه کنترلی روشن شده و دمای مدنظر برای درون محفظه به کنترلر داده می‌شود. همان‌گونه که گفته شد، برای ایجاد اختلاف دما بین سمت درونی و سمت بیرونی محفظه، دمای کنترلی درون محفظه بالاتر از دمای بیرون محفظه که همان دمای محیط آزمایشگاه (20°C) می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به توان مصرفی پس از رسیدن دمای محفظه به دمای کنترلی مورد نظر و برای پایدار نگه داشتن دمای درون محفظه، ثبت شده و جمع‌آوری می‌شود. براساس برنامه نوشته شده، می‌توان کل توان مصرفی المنت در طول زمان را محاسبه و به دست آورد. زمان در نظر گرفته شده برای هر آزمایش ۲ ساعت بود و مقدار توان مصرفی المنت در محفظه‌های گوناگون برای مدت

جدول ۲- مقدارهای پارامترهای گوناگون مطالعه شده موثر بر میزان مصرف انرژی در محفظه ساخته شده با صفحه‌های پلی کربناتی.

اثر اندازه ذره‌های	اثر ضخامت	نوع پارامتر
۱۰ mm	۵ و ۱۰ و ۱۵ mm	ضخامت صفحه‌ها (mm)
کوچک‌تر از ۶ μm، ۳-۲ میلی‌متر و ۳-۶ میلی‌متر	کوچک‌تر از ۶ μm	اندازه ذره‌های ایزوژل
در دماهای ۷۰، ۶۰ و ۴۰ °C	در دماهای ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ °C	دمای درون محفظه (°C)



شکل ۳- مقدار مصرف انرژی در طول زمان برای صفحه ۱۰ میلی‌متری در دو دمای گوناگون.

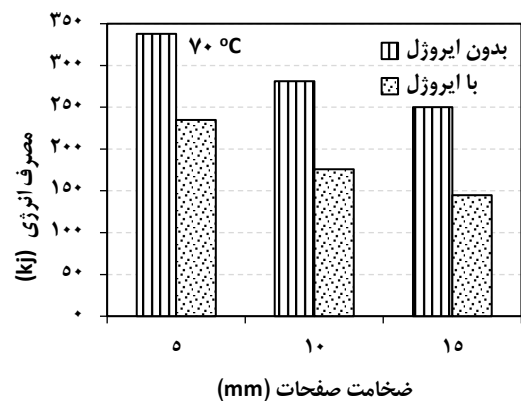
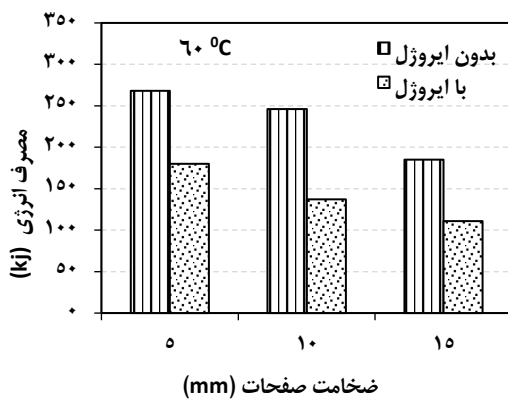
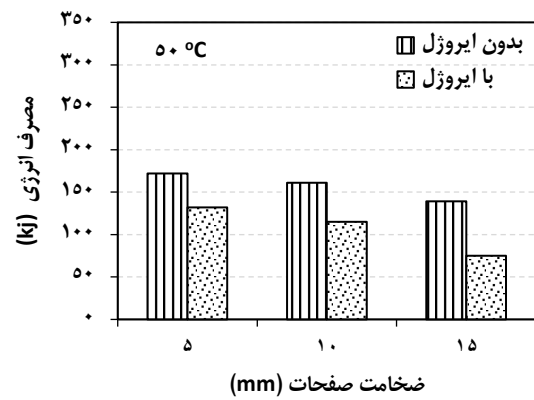
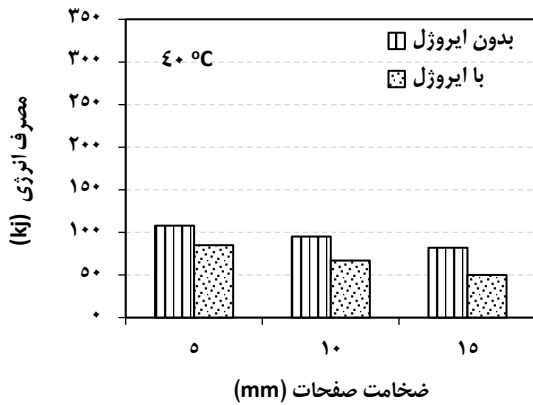
۱۰ میلی‌متری خالی و پر شده با اندازه ذره‌های گوناگون ایزوژل استخراج شده است.

اثر ضخامت صفحه‌ها

میزان مصرف انرژی برای ثابت نگه داشتن دمای درون محفظه‌ی ساخته شده با صفحه‌های پلی کربناتی با ضخامت‌های گوناگون ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. در هر ضخامت‌ی آزمایش در دماهای گوناگونی انجام گرفته است. در نمونه‌های پر شده با ایزوژل، ذره‌های ایزوژلی با اندازه زیر ۶ μm به کار رفته است. نتیجه‌های به دست آمده در شکل نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، در همه دماها با افزایش ضخامت مقدار مصرف انرژی کاهش می‌یابد. افزون بر این مسئله، با افزایش ضخامت درصد کاهش مصرف انرژی در صفحه‌های ایزوژل‌دار نسبت به صفحه‌های بدون ایزوژل با همان ضخامت افزایش می‌یابد. یعنی در ضخامت‌های بیش‌تر افزودن ایزوژل تأثیر بالاتری در کاهش اتلاف گرما دارد. برای مثال، در دمای ۴۰ °C درصد کاهش مصرف انرژی در صفحه‌های ۵ میلی‌متری از حدود ۲۱ درصد به حدود ۳۹ درصد در صفحه‌های ۱۵ میلی‌متری می‌رسد. به عنوان نتیجه کلی با استفاده از ایزوژل پودری (اندازه ذره‌های زیر ۶ μm)

در این نمودارها دیده می‌شود و در همه آزمون‌های دیگر نیز بدین گونه بوده است، مصرف انرژی تقریباً به صورت خطی با زمان افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش خطی مصرف انرژی، می‌توان گفت که اختلاف انرژی مصرف شده با استفاده از صفحه‌های گوناگون مستقل از زمان بوده و برای نمونه درصد کاهش مصرف انرژی با استفاده از صفحه ایزوژل‌دار نسبت به صفحه معمولی در صورت استفاده طولانی مدت، همان درصد کاهش مصرف انرژی به دست آمده برای تست‌های دو ساعته خواهد بود و تفاوتی با آن نخواهد داشت.

پارامترهای اصلی مؤثر و قابل تغییر در ساخت این صفحه‌ها شامل ضخامت صفحه و اندازه ذره‌های ایزوژل به کار رفته در درون آن‌ها می‌باشد. همچنین از لحاظ کاری نیز، این صفحه‌ها در ساختمان‌ها با شرایط آب و هوایی گوناگون به ویژه دمای متفاوت استفاده خواهند شد. بنابراین، در این مقاله اثر دو پارامتر یعنی ضخامت صفحه‌های پلی کربنات در هر دو حالت پر شده با ایزوژل و بدون ایزوژل و اندازه ذره‌های ایزوژل استفاده شده در میان صفحه‌ها در دماهای گوناگون، بر میزان مصرف انرژی مطالعه شده است. مقدارهای مطالعه شده این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین مقدار ضریب انتقال گرما کلی برای صفحه‌های



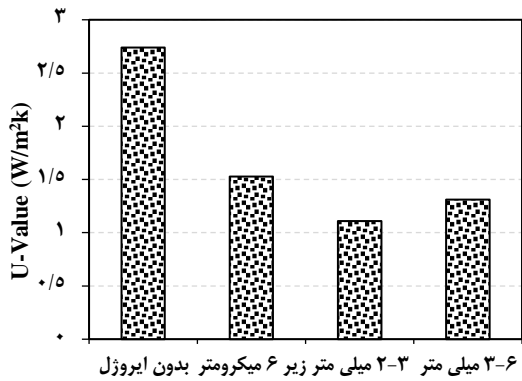
شکل ۴- مصرف انرژی (اتلاف گرما) در محفظه‌های ساخته شده با صفحه‌های پلی کربناتی با ضخامت‌های گوناگون با و بدون ایروژل در دماهای متفاوت. اندازه ذره‌های ایروژل به کار رفته زیر ۶ میکرون می باشد.

پایین بوده و پودر آن وزن بسیار کمی دارد، احتمال فشردگی و روی هم نشستن ذره‌ها نسبت به پودر مواد مرسوم کم بوده و ذره‌ها بسیار ریز پودر به طور قوی بر روی هم نمی‌نشینند و در فضای بین ذره‌ها هوا باقی می‌ماند و تخلخل میکرومتری بین ذره‌های پودر ایجاد می‌شود. به هر حال با افزایش اندازه ذره‌های تخلخل بستر افزایش می‌یابد؛ به طوری که برای اندازه ذره‌های زیر $6 \mu\text{m}$ ، $3-2 \text{ mm}$ و $3-6 \text{ mm}$ میزان تخلخل ایجاد شده برای بستر به ترتیب ۱۱، ۲۶ و ۳۱ درصد بوده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، کم‌ترین عبور گرما برای اندازه ذره‌های $3-2 \text{ mm}$ با تخلخل ۲۶ درصد بوده است. اندازه ذره‌های زیر $6 \mu\text{m}$ هر چند تخلخل بستر کم‌تری نسبت به اندازه ذره‌های $3-2 \text{ mm}$ دارند، اما به دلیل اندازه ذره‌های کوچک‌تر مسافت نفوذ گرما از طریق خود ذره‌های ایروژل کاهش می‌یابد و ذره‌های ایروژلی به دلیل اندازه بسیار کوچک مقاومت زیادی در مقابل انتقال گرما ایجاد نمی‌کنند. همچنین به دلیل اندازه ذره‌های

درصد کاهش مصرف انرژی در ضخامت‌های و دماهای گوناگون به کار رفته، در بازه‌ی ۲۱-۴۶ درصد قرار دارد.

اثر اندازه ذره‌های ایروژل

اثر اندازه گرانول‌های ایروژل بر میزان مصرف انرژی در دماهای گوناگون در شکل ۵ نشان داده شده است. ضخامت صفحه پلی کربنات به کار رفته 10 mm می‌باشد و اندازه ذره‌ها به کار رفته شامل ذره‌های زیر $6 \mu\text{m}$ ، $3-2 \text{ mm}$ و $3-6 \text{ mm}$ می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود، در تمامی آزمایش‌های صفحه‌های پر شده با ذره‌های $3-2 \text{ mm}$ کم‌ترین عبور گرما و مصرف انرژی را دارند و بالاترین اتلاف انرژی در صفحه‌های پر شده با ذره‌های زیر $6 \mu\text{m}$ دیده می‌شود. در اندازه ذره‌های میکرومتری، اندازه روزنه‌های بین ذره‌ها نیز میکرومتری خواهد بود، البته نسبت به پودر مواد دیگر حجم این تخلخل بیش‌تر خواهد بود؛ زیرا دانسیته ایروژل بسیار



شکل ۶ - مقدار ضریب انتقال گرمای کلی صفحه پلی‌کربنات ۱۰ mm پر شده با ذره‌های ایزوژل با اندازه‌های گوناگون در مقایسه با صفحه پلی‌کربنات معمولی.

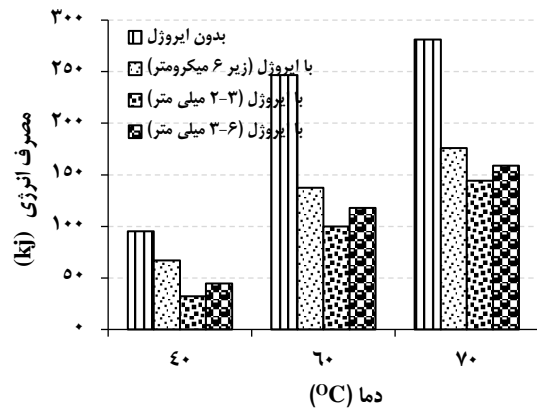
مقدارهای ضریب کلی انتقال گرما (مقدارهای U)

پارامتر مهمی که بر اساس آن می‌توان عملکرد لایه‌های پر شده با ایزوژل را مورد ارزیابی قرار داد، ضریب انتقال گرمای کلی می‌باشد که نسبتی عکس با مقاومت دیواره در مقابل انتقال گرما دارد. برای محاسبه مقدار U از رابطه زیر استفاده می‌شود:

با داشتن مقدار انتقال گرما از دیواره‌ها (Q) و اختلاف دمای دو سمت دیواره (ΔT) می‌توان مقدار U را محاسبه کرد. برای نمونه مقدار U محاسبه شده در دمای 40°C با استفاده از ایزوژل‌های با اندازه ذره‌های گوناگون در شکل نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود برای صفحه‌های ۱۰ میلی‌متری مقدار U از $2.7/4\text{ W/m}^2\text{K}$ در صفحه خالی تا $1.1\text{ W/m}^2\text{K}$ در صفحه پر شده با ذره‌های ایزوژل ۳-۲ mm کاهش می‌یابد، که معادل ۶۶ درصد کاهش اتلاف گرما از دیواره‌ها در اختلاف دمای 20°C بین دو سمت دیواره می‌باشد.

نتیجه‌گیری

عملکرد گرمایی صفحه‌های پلی‌کربنات در اثر افزودن ذره‌های ایزوژل در فضای خالی میان صفحه‌های مورد مطالعه قرار گرفت. نتیجه‌ها نشان دادند که، افزودن ایزوژل به صفحه‌های پلی‌کربنات تأثیر به‌سزایی در کاهش عبور گرما از طریق آن‌ها دارد. در ضخامت‌های بالاتر اثر افزودن ایزوژل بیش‌تر بوده و افزودن ایزوژل اتلاف گرمایی کم‌تری را نتیجه می‌دهد؛ برای نمونه در دمای



شکل ۵ - اثر اندازه ذره‌های ایزوژل بر میزان گرمای عبوری از دیواره‌های پلی‌کربناتی در دماهای گوناگون. ضخامت صفحه‌ها ۱۰ میلی‌متر می‌باشد.

ریزتر تعداد حفره‌های تشکیل شده میان ذره‌ها و به هم پیوستگی آن‌ها افزایش یافته و نفوذ گرما از طریق حفره‌ها نیز تسهیل می‌شود. با افزایش بیش‌تر اندازه ذره‌ها از ۳-۲ mm به ۶-۳ mm میلی‌متر انتقال گرما دوباره افزایش می‌یابد، در این حالت‌ها هرچند اندازه ذره‌ها افزایش یافته و انتقال گرما از طریق آن‌ها تضعیف می‌شود، ولی به دلیل افزایش تخلخل میان ذره‌ها قابلیت انتقال گرما بالاتر رفته و عامل افزایش اندازه تخلخل بر عامل افزایش اندازه ذره‌های غلبه کرده و انتقال گرما بیش‌تر می‌شود؛ بنابراین کاهش یا افزایش اندازه ذره‌ها در بازه‌های گوناگون تأثیر یکسانی ندارد و در بررسی اثر اندازه ذره‌های ایزوژل باید اثر عامل‌های گوناگون مانند اندازه ذره‌ها و حجم، اندازه و نیز تعداد حفره‌ها تشکیل شده میان آن‌ها را در نظر داشت. همان‌گونه که نتیجه‌ها نشان دادند، در اینجا، اندازه ذره‌های میانی ۳-۲ mm، به عنوان اندازه ذره‌های بهینه به دست آمدند.

نتیجه دیگری که از این آزمایش‌های به دست آمده است، آن است که با افزایش دما اختلاف اثر اندازه ذره‌ها کم‌تر شده و اختلاف مصرف انرژی بین محفظه‌های ساخته شده با اندازه ذره‌های گوناگون کاهش می‌یابد. با توجه به آن که ضریب هدایت ایزوژل خالص با تغییر دما تغییر چندانی نمی‌کند، این نتیجه‌ها نشانگر آن است که با افزایش دما سهم هوای موجود در بین ذره‌ها در انتقال گرما افزایش یافته و عمده انتقال گرما از این طریق صورت می‌گیرد؛ بنابراین اختلاف انتقال گرما در اندازه ذره‌های گوناگون کاهش می‌یابد.

پر شده با ابروژل را نشان داد؛ این نتیجه‌ها و عملکرد گرمایی چشمگیر و قابلیت بالای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها در کنار ویژگی‌های دیگر ابروژل‌ها مانند وزن بسیار کم، عبوردهی مناسب نور و کاهش عبور سروصدا، استفاده از ابروژل‌ها در نورگیر ساختمان‌ها را بسیار جذاب می‌کند.

قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت پاکان آتیه نانودانش بابت تأمین مالی انجام این پروژه کمال سپاس را دارند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۴

۴۰ °C، اختلاف اتلاف گرمایی بین صفحه خالی و صفحه پر شده با ابروژل در ضخامت ۵ mm، حدود ۲۱ درصد به دست آمد، در حالی که این اختلاف در صفحه ۱۵ mm، برابر ۳۹ درصد بود، یا در دمای ۵۰ °C، درصد کاهش مصرف انرژی در صفحه‌های ۵ و ۱۵ میلی‌متری در اثر افزودن ابروژل به ترتیب ۲۳ و ۴۶ درصد به دست آمد. همچنین مطالعه اثر اندازه ذره‌ها، عملکرد بهتر ذره‌های ۲ تا ۳ میلی‌متری را نسبت به ذره‌های میکرونی و ذره‌های ۳-۶ میلی‌متری نشان داد؛ برای نمونه برای صفحه‌های ۱۰ mm، در دمای ۴۰ °C، میزان کاهش مصرف انرژی در اثر افزودن ابروژل، به ترتیب برای ذره‌های زیر ۶ میکرون، ۳-۲ mm و ۳-۳ mm حدود ۳۰، ۶۶ و ۵۳ درصد به دست آمد. محاسبه مقدار U در یک شرایط نمونه قابلیت کاهش مقدار آن را از ۲/۷۴ W/m²K در صفحه خالی به ۱/۱ W/m²K در صفحه

مراجع

- [1] Berardi U., [The Development of a Monolithic Aerogel Glazed Window for an Energy Retrofitting Project](#), *Applied Energy*, **154**: 603-615 (2015).
- [2] Buratti C., Moretti E., [Experimental Performance Evaluation of Aerogel Glazing Systems](#), *Applied Energy*, **97**: 430-437 (2012).
- [3] Cotana F., Pisello A. L., Moretti E., Buratti C., [Multipurpose Characterization of Glazing Systems with Silica Aerogel: In-Field Experimental Analysis of Thermal-Energy, Lighting and Acoustic Performance](#), *Building and Environment*, **81**: 92-102 (2014).
- [4] Gao T., Jelle B. P., Ihara T., Gustavsen A., [Insulating Glazing Units with Silica Aerogel Granules: the Impact of Particle Size](#), *Applied Energy*, **128**: 27-34 (2014).
- [5] Ihara T., Gao T., Grynning S., Jelle B. P., Gustavsen A., [Aerogel Granulate Glazing Facades and Their Application Potential from an Energy Saving Perspective](#), *Applied Energy*, **142**: 179-191 (2015).
- [6] Gao T., Ihara T., Grynning S., Jelle B. P., Lien A. G., [Perspective of Aerogel Glazings in Energy Efficient Buildings](#), *Building and Environment*, **95**: 405-413 (2016).
- [7] Buratti C., Moretti E., [Glazing Systems with Silica Aerogel for Energy Savings in Buildings](#), *Applied Energy*, **98**: 396-403 (2012).
- [8] Garnier C., Muneer T., McCauley L., [Super Insulated Aerogel Windows: Impact on Daylighting And Thermal Performance](#), *Building and Environment*, **94**: 231-23 (2015).
- [9] Cha J., Kim S., Park K. W., Lee D. R., Jo J. H., Kim S., [Improvement of Window Thermal Performance Using Aerogel Insulation Film for Building Energy Saving](#), *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **116**: 219-224 (2014).

- [10] 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).
- [11] Rubin M., Lampert C. M., [Transparent Silica Aerogels for Window Insulation](#), *Solar Energy Materials*, **7**: 393-400 (1983).
- [12] Abdul Mujeebu M., Ashraf N., Alsuwayigh A. H., [Effect of Nano Vacuum Insulation Panel and Nanogel Glazing on the Energy Performance of Office Building](#), *Applied Energy*, **173**: 141-151 (2016).
- [13] Huang Y., Niu J-l., [Energy and Visual Performance of the Silica Aerogel Glazing System in Commercial Buildings of Hong Kong](#), *Construction and Building Materials*, **94**: 57-72 (2015).
- [14] Huang Y., Niu J-l., [Application of Super-Insulating Translucent Silica Aerogel Glazing System on Commercial Building Envelope of Humid Subtropical Climates – Impact on Space Cooling Load](#), *Energy*, **83**: 316-325 (2015).
- [15] Abdul Mujeebu M., Ashraf N., Alsuwayigh A., [Energy performance and Economic Viability of Nano Aerogel Glazing and Nano Vacuum Insulation Panel in Multi-Story Office Building](#), *Energy*, **113**: 949-956 (2016).
- [16] Chen Y., Xiao Y., Zheng S., Liu Y., Li Y., [Dynamic Heat Transfer Model and Applicability Evaluation of Aerogel Glazing System in Various Climates of China](#), *Energy*, **163**: 1115-1124 (2018).
- [17] Wang H., Wu H., Ding Y., Feng J., Wang S., [Feasibility and Optimization of Aerogel Glazing System for Building Energy Efficiency in Different Climates](#), *International Journal of Low-Carbon Technologies*, **10**: 412-419 (2015).
- [18] Jensen K. I., Schultz J. M., Kristiansen F. H., [Development of Windows Based on Highly Insulating Aerogel Glazings](#), *Journal of Non-Crystalline Solids*, **350**: 351-357 (2004).
- [19] Schultz J. M., Jensen K. I., [Evacuated Aerogel Glazings](#), *Vacuum*, **82**: 723-729 (2008).
- [20] Schultz J. M., Jensen K. I., Kristiansen F. H., [Super Insulating Aerogel Glazing](#), *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **89**: 275-285 (2005).
- [21] Lv Y., Wu H., Liu Y., Huang Y., Xu T., Zhou X., et al., [Quantitative Research on the Influence of Particle Size and Filling Thickness on Aerogel Glazing Performance](#), *Energy and Buildings*, **174**: 190-198 (2018).
- [22] Lv Y., Huang R., Wu H., Wang S., Zhou X., [Study on Thermal and Optical Properties and Influence Factors of Aerogel Glazing Units](#), *Procedia Engineering*, **205**: 3228-3234 (2017).
- [23] Liu Y., Chen Y., Li Y., Zheng S., [Solar Extinction Coefficient of Silica Aerogel Calculated through Integral Model and Experimental Data](#), *Procedia Engineering*, **205**: 1253-1258 (2017).
- [24] Reim M., Körner W., Manara J., Korder S., Arduini-Schuster M., Ebert H.-P., Fricke J. [Silica Aerogel Granulate Material for Thermal Insulation and Daylighting](#). *Solar Energy*, **79**: 131-139 (2005).

- [25] Moretti E., Zinzi M., Carnielo E., Merli F., [Advanced Polycarbonate Transparent Systems with Aerogel: Preliminary Characterization of Optical and Thermal Properties](#), *Energy Procedia*, **113**: 9-16 (2017).
- [26] Moretti E., Zinzi M., Merli F., Buratti C., [Optical, Thermal, and Energy Performance of Advanced Polycarbonate Systems with Granular Aerogel](#), *Energy and Buildings*, **166**: 407-417 (2018).