

Fabrication and assessment of vacuum panel with aerogel core and Enhancement its thermal performance by adding radiation opacifiers and reflectors

H. Bargozin^{1*}, Sh.Rajabi², N. Rahimi²,

1- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Zanjan

2- M. Sc. Student of Chemical Engineering, University of Zanjan

Email: Bargozin@znu.ac.ir

Abstract

Upgrading the building components of vacuum panel insulation enhances superior thermal properties in them. In this article, by making a vacuum panel with an aerogel core, the effect of radiation reflective layers and matting agents on the heat transfer coefficient of the panel has been investigated. Vacuum panels were made with aerogel blanket, aerogel blanket with multi-layer aluminum foil, aerogel blanket containing powder matting and panel containing blanket with foil and matting at the same time. The power loss of the samples was measured and compared by a power meter. Creating a vacuum and adding an aluminum reflective layer and an active carbon matting additive to the insulating panel under vacuum led to a decrease in the aerogel blanket heat transfer coefficient from 0.022 to 0.0127 W/m.K in a vacuum of 15 millitorr. In general, the results showed that creating a normal vacuum in the panel and the use of aerogel blanket and reflector layer and Activated carbon and ironoxide matting materials composite as the central material of the panel causes a 40% reduction in the heat transfer of the insulation panel compared to the aerogel blanket in atmospheric pressure.

Keywords: Vacuum insulation panel, nanoporous silica airgel blanket, heat transfer coefficient, matting

* Zanjan, University of Zanjan, Technical and Engineering Faculty, Department of Chemical Engineering

ساخت و بررسی پانل تحت خلا با هسته‌ی آبروژل و افزایش عملکرد حرارتی آن با افزودن جاذب و بازتابنده‌های تشعشع

حسن برگزین^{۱*}، شادی رجیبی^۲، نرگس رحیمی^۲،

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه زنجان

Bargozin@znu.ac.ir

چکیده

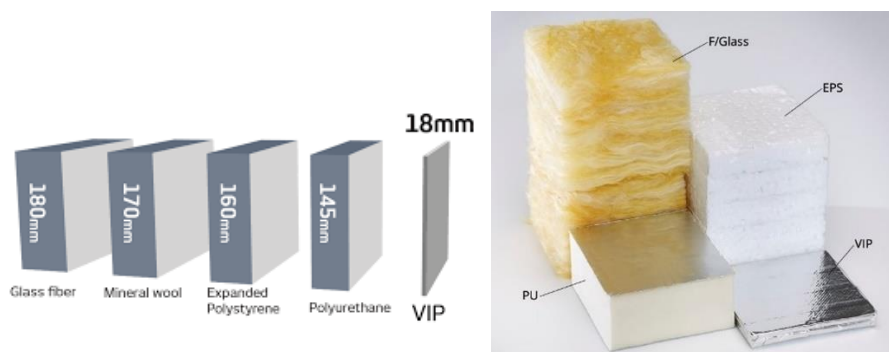
ارتقای اجزای سازنده‌ی عایق‌های پانل تحت خلا باعث تقویت ویژگی‌های حرارتی برتر در آنها می‌شود. در این مقاله با ساخت پانل تحت خلا با هسته‌ی آبروژل، به بررسی اثر لایه‌های بازتابنده تشعشع و مات‌کننده‌ها بر ضریب انتقال حرارت پانل پرداخته شده است. پانل‌های تحت خلا با پتوی آبروژل، پتوی آبروژل با فویل آلومینیوم چند لایه، پتوی آبروژل حاوی مات‌کننده پودری و پانل حاوی پتوی با فویل و مات‌کننده هم‌زمان ساخته شد. اتلاف توان مصرفی نمونه‌ها توسط دستگاه توان‌سنج اندازه‌گیری و مقایسه شد. ایجاد خلا و افزودن لایه‌ی بازتابنده‌ی آلومینیوم و افزودنی مات‌کننده کربن فعال به پانل عایق تحت خلا منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت پتوی آبروژل از 0.22 W/mK به 0.127 W/mK در خلا ۱۵ میلی‌تور شد. به‌طور کلی نتایج نشان دادند ایجاد خلا معمولی در پانل و استفاده از کامپوزیت پتوی آبروژل و لایه‌ی بازتابنده آلومینیوم و مواد مات‌کننده‌ی کربن فعال و اکسید آهن به عنوان ماده‌ی مرکزی پانل، سبب کاهش ۴۰٪ انتقال حرارت پانل عایق نسبت به پتوی آبروژل در حالت فشار اتمسفریک می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پانل عایق خلا، پتوی آبروژل سیلیکایی نانومتخلخل، ضریب انتقال حرارت، مات‌کننده

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

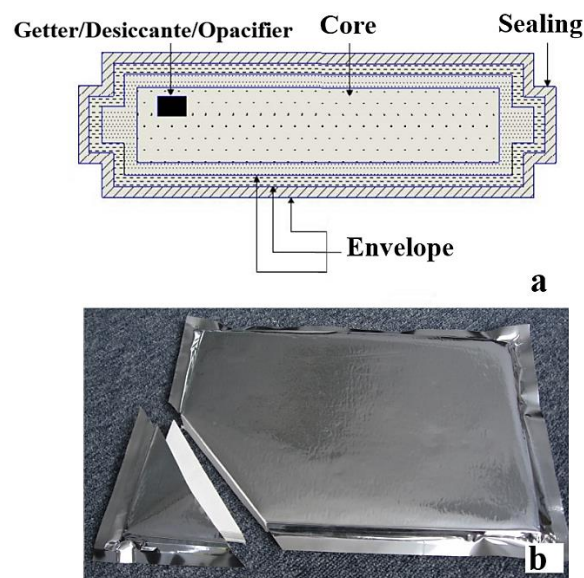
۱. مقدمه

تولید بیش تر انرژی برای تامین تقاضای جهان مدرن امروز، باعث ایجاد مشکلات محیط زیستی به دلیل گسترش استفاده از سوخت های فسیلی شده است [۱]. از طرف دیگر به کارگیری برخی از انرژی های تجدید پذیر دارای محدودیت های جغرافیایی و نیازمند هزینه های بالایی است. ساختمان ها حدود ۴۰٪ مصرف انرژی و ۳۶٪ از کل انتشار کربن دی اکسید را تشکیل می دهند [۲]. ۷۰٪ از انرژی مصرفی در ساختمان ها برای گرمایش و سرمایش ساختمان های مسکونی و تجاری است [۱] که بخش زیادی از آن اتلاف می شود. در کشور ایران بهره وری انرژی به طور محسوسی پایین تر از کشورهای پیشرفته بوده و حدود ۶/۶ برابر متوسط جهانی مصرف گاز طبیعی و حدود ۲/۲ برابر متوسط جهانی مصرف سوخت های فسیلی وجود دارد. بخش مهمی از مصرف زیاد انرژی در ایران ناشی از اتلاف بالای انرژی در ساختمان و صنایع است [۳]. یکی از این راهکارهای بهره وری در مصرف انرژی استفاده از عایق حرارتی است [۴]. مطابق با استانداردهای حرارتی اروپا، حداقل ضریب هدایت حرارتی عایق در ساختمان ها باید کم تر از 0.02 W/mK باشد [۵]. با توجه به بررسی های انجام شده در مورد وضعیت انرژی در جهان، مواد عایق معمولی از نظر حرارتی برای برطرف کردن نیازهای امروز کارآمد نیستند. پانل های عایق تحت خلا جایگزین مناسب عایق های سنتی با عملکرد حرارتی بسیار بهتر هستند که می توانند بازده عملکرد سیستم عایق را افزایش داده و در مصرف انرژی صرفه جویی محسوسی ایجاد کنند [۶، ۷]. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، استفاده از عایق های سنتی نسبت به عایق های مدرن حجم بسیار بیشتری از فضای مفید ساختمان را اشغال می کند.



شکل ۱. مقایسه ی ضخامت مورد نیاز انواع مواد عایق ساختمان برای رسیدن به اتلاف حرارت یکسان [۸]
Figure 1. Comparison of the required thickness of different building insulation materials to achieve the same loss [8]

عایق VIP^۱ یک پانل با هسته‌ی متخلخل حفره‌باز است که تحت خلا قرار گرفته و داخل فویل چندلایه، آب‌بندی حرارتی شده است [۹]. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود هر VIP از سه بخش ماده‌ی مرکزی (هسته)، حفاظ و جاذب تشکیل شده است [۱۰]. پانل‌های عایق تحت خلا در حوزه‌ی ساختمان، لوازم خانگی، یخچال‌ها، وسایل حمل و نقل، ظروف مواد حساس به دما، صنایع برودتی، صنایع هوافضا و غیره کاربرد دارند [۱۱].



شکل ۲. الف) بخش‌های مختلف VIP و ب) برش عرضی از آن [۱۲]
Figure 2. a) different section of VIP and b) cross section of it [12]

ماده‌ی مرکزی باید دارای ساختار منافذ باز و رسانایی گرمایی پایینی باشد. با کوچک‌تر شدن اندازه حفرات در هسته و ایجاد ساز و کار نفوذ نادرسی^۲ در ابعاد نانومتری، می‌توان ضریب هدایت حرارت پایین مورد نظر را در فشار بالاتر به دست آورد چرا که ایجاد فشارهای خیلی پایین نیاز به تجهیزات خاص و گران دارد [۱۱]. حفاظ برای حفظ خلا و جلوگیری از نفوذ گاز در VIP است. معمول‌ترین نوع حفاظ، کامپوزیت فویل آلومینیومی سه لایه است که دارای یک لایه‌ی مانع آلومینیومی مرکزی بین یک لایه بیرونی پلی‌اتیلن ترفتالات^۳ برای مقاومت در برابر خراش و یک لایه پلی‌اتیلن^۴ داخلی برای آب‌بندی است. به اتصال حرارتی بین محیط داخل و خارج عایق، به دلیل تفاوت

¹ Vacuum insulated panel

² Knudsen

³ Polyethylene Terephthalate (PET)

⁴ Polyethylene (PE)

در هدایت حرارتی هسته و حفاظ پل حرارتی می‌گویند؛ پل حرارتی با افزایش ضخامت حفاظ آلومینیومی افزایش می‌یابد [۱۳]. برای جلوگیری از شکست خلا ناشی از نفوذ رطوبت و گازها از لایه محافظ، آزاد شدن گازهای جذب شده در عایق و افزایش هدایت حرارتی VIP ناشی از آنها، جاذب‌های مختلف به عایق اضافه می‌شوند [۱۴]. جاذب‌ها عمدتاً در دو بخش دسیکانت^۱ به عنوان جاذب بخار آب و گتر^۲ به عنوان جاذب گازها استفاده می‌شوند. گترها معمولاً در خلاهای قوی که احتمال آزاد شدن گازهایی مثل هیدروژن وجود دارد، استفاده می‌شوند. آلیاژ لیتیوم-باریم (Li-Ba) می‌تواند گازهای فعال را در دمای اتاق بدون فعال‌سازی حرارتی جذب کند [۱۵]. کربن فعال ضمن عملکرد مناسب در جذب بخار آب، سطح ویژه زیادی ($472-240 \text{ m}^2/\text{g}$) دارد که آن را مستعد جذب بالای هیدروژن می‌کند [۱۶]. سیلیکاژل نیز بیش‌ترین میزان جذب بخار آب (به دلیل آبدوستی و مساحت سطح بالا) را دارد [۱۵]. برای کاهش رسانایی تابشی نیز مواد بازتاباننده و مات‌کننده‌ها^۳ اضافه می‌شوند؛ یک مات‌کننده‌ی رایج، کاربید سیلیکون است که هزینه بالایی دارد [۹، ۱۷]. بائتنس^۴ و همکاران با افزودن کربن سیاه به هسته‌ی آبروژل باعث بهبود عملکرد VIP با جذب و کاهش انتقال حرارت تشعشی شدند [۹]. ژنگ^۵ و همکاران اکسید کبالت و اکسید کلسیم را به عنوان جاذب رطوبت و گازهای احتمالی باقی‌مانده یا نفوذ کرده معرفی کردند [۱۶].

مواد مرکزی بخش عمده‌ای از VIP را تشکیل می‌دهند، بنابراین اثرات محیط‌زیستی آن بیش‌تر به ماده‌ی مرکزی نسبت داده می‌شود [۱۱، ۱۸]؛ همچنین تا حد زیادی ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی VIPها را تعیین می‌کند [۱۲]. ماده‌های مرکزی قابل استفاده در VIP شامل فوم‌های پلی‌اورتان یا پلی‌استایرن [۱۱]، فیبر شیشه‌ای [۱۸]، میکروسیلیس [۱۱]، آبروژل [۱۹] و غیره است.

تنپیه‌ریک^۶ و همکاران از میکروسیلیس آب دوست به عنوان هسته‌ی VIP استفاده کردند که می‌توانست یک هدایت حرارتی پایدار تا فشار حدود 10 mbar را حفظ کند؛ همچنین به دلیل خشک‌کنندگی ذاتی سیلیس باعث افزایش طول عمر VIPها می‌شد [۲۰]. در تحقیقی دیگر از پتوی منعطف سیلیکا آبروژل به عنوان ماده‌ی مرکزی VIP با هدف کاهش رسانایی حرارتی توسط بائتنس و همکاران استفاده شد؛ آنها بردهای فشرده از این مواد را به عنوان یکی از بهترین هسته‌های VIP می‌دانستند [۹]. شی^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۳ بهینه‌ترین مقدار برای

¹ Desiccant

^۲ Getter

³ Opacifier

⁴ Baetens

^۵ Zheng

⁶ Tenpierik

⁷ Xie

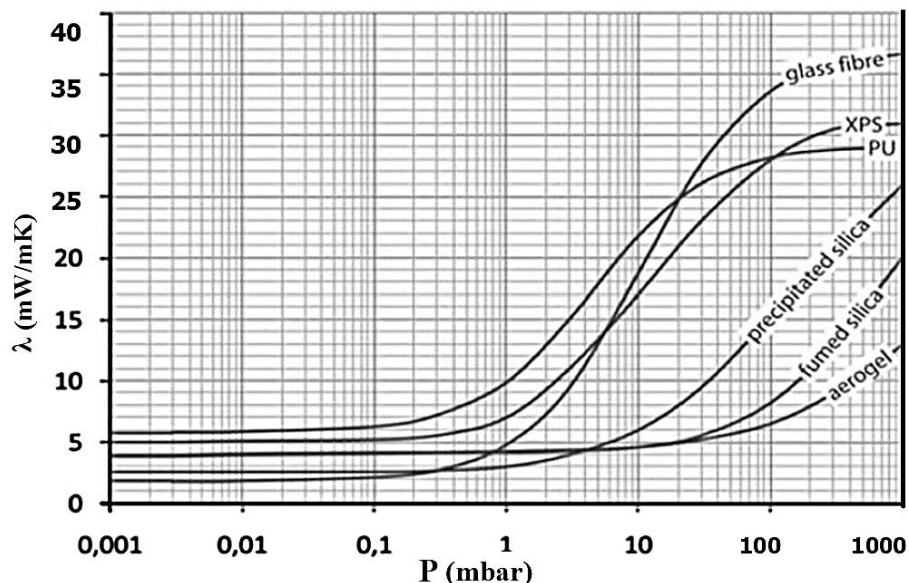
رسانایی حرارتی را در هسته‌ی آبروژل با چگالی 120 kg/m^3 معرفی کردند [۲۱]. در سال ۲۰۱۷ لیانگ^۱ و همکاران به تقویت آبروژل با فیبر شیشه‌ای برای افزایش مقاومت مکانیکی جهت استفاده در هسته‌ی VIP پرداختند. طبق نتایج آن‌ها، افزودن ۳٪ حجمی آبروژل با فیبر شیشه‌ای، باعث بهبود مقاومت فشاری از ۰/۱ به ۲ Mpa شد در حالی که رسانایی حرارتی آن با افزایش ناچیزی به 0.139 W/mK رسید. همچنین توانستند با تقویت ۶/۶٪ حجمی آبروژل با فیبر شیشه‌ای به رسانایی حرارتی 0.039 W/mK برسند؛ آن‌ها این درصد را بهینه‌ترین میزان تقویت برای رسیدن به پایین‌ترین رسانایی حرارتی دانستند و تقویت بیشتر از ۲۰٪ حجمی را به دلیل افزایش رسانایی پیشنهاد نمی‌دهند [۱۹].

در شکل ۳ برخی از مواد عایق از نظر هدایت حرارتی در فشارهای مختلف مقایسه شده است. استفاده از عایق معمولی به عنوان ماده‌ی مرکزی برای VIPها، نیاز به کاهش بسیار بالای فشار دارد. کاهش زیاد فشار باعث افزایش هزینه و نیازمند زمان طولانی و تجهیزات خاص است [۹، ۲۲]. همچنین پایدار ماندن خلاهای زیاد در مرور زمان با توجه به عوامل مختلفی که باعث شکست خلا می‌شوند، بسیار سخت است. یکی از بزرگترین مزایای استفاده از آبروژل‌ها در هسته‌ی عایق‌های پانل تحت خلا، حذف نیاز به ایجاد فشارهای بسیار کم است [۱۸].

آبروژل‌های سیلیکایی دارای نانو ساختار سه بعدی از نانوذرات به هم چسبیده‌ی تصادفی و بی شکل اکسید سیلیس هستند که حفرات نانومتری در آنها ایجاد می‌شود. متوسط قطر منافذ آن‌ها بین $30\text{--}100 \text{ nm}$ است؛ این منافذ $86\text{--}99\%$ حجم کل آبروژل را دارند. در دمای محیط آبروژل خالص دارای رسانایی حرارتی 0.12 W/mK بوده و پتوی آبروژل ضریب 0.02 W/mK را در دمای 20°C دارا است [۹، ۲۳]. اندازه منافذ نانویی و تخلخل بالا خواص فیزیکی، حرارتی، نوری و صوتی قابل توجهی در آبروژل ایجاد کرده است [۱۱]. این ماده نسبت به سایر عایق‌ها گران است اما با توجه به کارایی بالای آن، مقرون به صرفه خواهد بود. آبروژل‌ها انعطاف‌پذیری بالایی در تنظیم خواص ساختاری و ترکیب شیمیایی دارند و توانمندی‌های آنها تنها به خواص ذاتی آبروژل‌های خالص ختم نمی‌شود؛ بلکه می‌توان با افزودن و تلفیق ذرات گوناگون در ماتریس آنها، نسل جدیدی از مواد با خواص و قابلیت‌های گوناگون ارائه کرد [۲۴]. آبروژل‌های سیلیکایی به دلیل ساختار نانومتخلخل، توانایی بیش‌تری برای حفظ رسانایی حرارتی پایین‌تر در فشار بالا دارند و از این رو به عنوان بهترین ماده برای پانل‌های عایق خلا با میزان کاهش فشار کم و متوسط در نظر گرفته می‌شوند. همچنین در صورت آسیب دیدن VIP، عایق آبروژل همچنان عملکرد خود را حفظ می‌کند، زیرا آبروژل بدون خلا نیز عایق بسیار قوی حرارتی است [۲۵]. علاوه بر این پتوهای آبروژل تقویت‌شده حالت یکپارچه و منعطف دارند که با مقاومت مکانیکی بالای کششی، خمشی و فشاری خود،

¹ Liang

کار نصب را در سطوح هندسی پیچیده بسیار راحت کرده و کاهش کارایی در حالت تحت فشار ندارند. همچنین پتوهای آبروژل با اصلاح سطح فوق آب گریز شده و به مرور زمان دچار افت کارایی نمی گردند.



شکل ۳. تاثیر فشار بر هدایت حرارتی مواد عایق مختلف [۱۱]

Figure 3. The effect of pressure on the thermal conductivity of different insulating materials [11]

در کنار مزایای فراوان VIP، نقاط ضعفی وجود دارد که عبارتند از عدم تعیین قطعی طول عمر، حساسیت بسیار بالای حفاظ و آببندی آن، دشوار بودن حفظ خلا در خلاهای بسیار بالا، امکان نفوذ گازها داخل VIP و غیره [۹] که این مشکلات تا حد زیادی با استفاده از پتوی آبروژل کاهش محسوس می یابند.

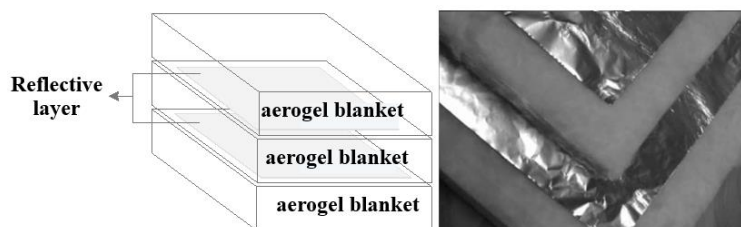
نوع دیگری از عایق‌هایی که در شرایط خلا بسیار بالا استفاده می‌شوند، سیستم‌های عایق چندلایه است که شامل لایه‌های بسیار نازک بازتابنده‌ی تشعشع مانند طلا یا نقره است که توسط جداکننده‌هایی عایق با رسانایی کم از هم جدا شده‌اند. در خلاهای بسیار بالا و نزدیک به خلا مطلق، نبود گاز و مواد رسانا سبب می‌شود که تنها عامل انتقال حرارت تشعشع باشد. در عایق‌های چند لایه، هر لایه مانند سپر حرارتی بازتاب‌دهنده تشعشع عمل نموده و مانع از انتقال حرارت می‌گردد. تعداد لایه‌ها برای سیستم‌های MLI^۱ می‌تواند ۱۰۰-۱ لایه یا بیشتر باشد [۲۲]. [۲۶]. دنگ^۲ و همکاران طی آزمایشات خود دریافتند که افزایش چگالی لایه‌ها در هر سانتی‌متر از MLI باعث

^۱ Multy-layer insulation

^۲ Deng

افزایش رسانایی حرارتی عایق می‌شود. طبق گزارش آن‌ها، بهینه‌ترین حالت MLI با تعداد لایه‌ی ۴۰-۵۰ در هر اینچ است [۲۶]. MLI دارای کاربردهای مختلف به خصوص کاربردهای برودتی می‌باشد؛ مانند ذخیره‌سازی یا انتقال مایعات برودتی مانند هلیوم، هیدروژن، نیتروژن، اکسیژن، حفاظت حرارتی در اکتشاف فضا، تحقیقات در دمای پایین برای بسیاری از آزمایشگاه‌ها و غیره.

مهم‌ترین مشکل عملیاتی MLI، ایجاد خلاهای بسیار بالا است؛ در خلاهای معمولی عایق‌های MLI کارایی خاصی نخواهند داشت. لایه‌های زیاد با فاصله نزدیک، تخلیه‌ی زیر ۰/۱ mtorr بین تمام لایه‌ها را دشوار می‌کنند. فاصله‌ی نزدیک لایه‌ها، مقاومت مکانیکی MLI را نیز کاهش می‌دهد. برای رفع محدودیت‌ها و مشکلات سیستم MLI، سیستم‌های عایق کامپوزیت ترکیبی لایه‌ای^۱ (LCI) شامل پتوی آبروژل و لایه‌های MLI توسط پروفیسور فزمایر، رئیس مرکز تحقیقات فضایی کندی سازمان ناسا پیشنهاد شده است [۲۲]. ترکیب لایه‌های بازتابنده‌ی آلومینیومی با پتوی منعطف آبروژل منجر به دستیابی به یک عایق VIP خاص می‌شود که در محیط معمولی به دلیل داشتن چند لایه آبروژل و در خلا بالا به دلیل دارا بودن چندین لایه بازتاب دهنده MLI، باعث رسانایی حرارتی بسیار پایین و کارایی بالا می‌شود. این ویژگی در کاربردهای هوا و فضا که در آن سفینه‌ها در زمین دارای فشار اتمسفر بوده و در فضا دارای فشار خلا مطلق می‌باشند بسیار کاربردی است. علاوه بر این هم افزایش عملکرد آبروژل و MLI سبب شده است تا نیاز به ایجاد خلاهای بسیار پایین کاهش داشته باشد. نتیجه‌ی این کار می‌تواند باعث دستیابی به ضریب انتقال حرارت پایین‌تر از ۰/۰۰۱ W/mK شود [۲۲]. در شکل ۴ تصاویر این سیستم ترکیبی قابل مشاهده است.



شکل ۴. شکل واقعی و شماتیک از ترکیب MLI و پتوی منعطف آبروژل [۲۲]

Figure 4. The real and schematic form of the combination of MLI and aerogel blanket [22]

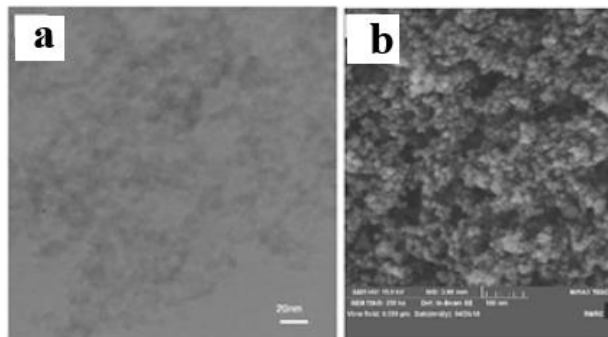
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند این پژوهش برای اولین بار در ایران به ساخت، بررسی و توسعه‌ی پانل عایق تحت خلا و حذف چالش‌ها و ضعف‌های موجود در این زمینه پرداخته است؛ مانند بهبود مواد استفاده شده و ارتقا

^۱ Layer composite insulation

ویژگی‌های حرارتی عایق از جمله به کار بردن لایه‌های بازتابنده‌ی تشعشع و جاذب‌های تشعشع. با آزمودن توسط دستگاه توان‌سنج و دستگاه گرماسنج حرارتی، پانل عایق تحت خلا با ویژگی‌های عایقی برتر حاصل شده است. با توجه به ضریب انتقال حرارت عایق‌های مورد استفاده در ایران و بررسی منابع، رسیدن به ضریب انتقال حرارت بسیار پایین برای اولین بار در ایران اتفاق افتاده است. این محصول در فناوری عایق‌سازی نه تنها یک پیشرفت مهم در این زمینه را نمایش می‌دهد، بلکه منجر به صرفه‌جویی قابل توجه در انرژی و تاثیر محیط زیستی مطلوبی نیز می‌شود. در بخش مواد و روش‌ها، به جزئیات فنی پروژه پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

VIP‌های ساخته شده در این پژوهش از پتوی منعطف آیروژل نانومتری با ضخامت یک سانتی‌متر به عنوان هسته و مایلار^۱ سه لایه با ضخامت ۲۰۰ nm به عنوان حفاظ تشکیل شده‌اند. پتوهای آیروژل از شرکت پاکان آتیه‌ی نانودانش تهیه شده است. تصویر آنالیزهای انجام شده روی این پتوهای منعطف در شکل ۵ و خواص آن در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۵. آنالیزهای الف (SEM و ب) TEM پتوی منعطف آیروژل پاکان آتیه نانودانش

Figure 5. a) TEM and b) SEM analyzes of Pakan Atiyeh Nanoscience's flexible aerogel blanket

جدول ۱. خواص پتوی منعطف پاکان آتیه‌ی نانودانش

Table 1. Properties of flexible aerogel blanket of Pakan Atiyeh Nanoscience

Property title	Heat transfer coefficient	Density (kg/m ³)	Longitudinal linear shrinkage at 649 °C	Transverse linear shrinkage at 649 °C	Pore size (nm)	Specific surface area

^۱ Mylar

	(W/mK at 20 °C)					(m ² /g)
Property size	0/022	0/222	0/12%	0/22%	20-30	489

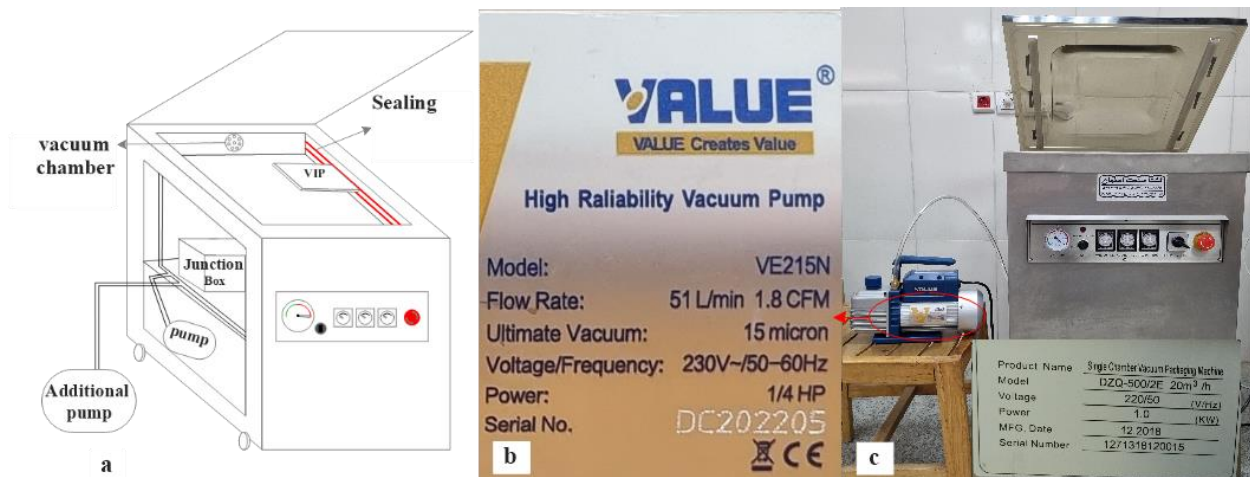
در ادامه با اضافه کردن لایه‌های بازتابنده‌ی ورق طلایی بسیار نازک یا فویل آلومینیوم ۷ μm و ساخت LCI با تعداد لایه‌های مختلف، تاثیر آنها بر عملکرد حرارتی پانل بررسی شد. همچنین با افزودن پودرهای جاذب میکرونیزه کربن فعال (CAS.No7440-44-0) شرکت آریاناشیمی و اکسید آهن (III) (CAS.No1309-37-1) شرکت تمادکالا داخل پانل، تاثیر آنها نیز بر روی عملکرد حرارتی عایق بررسی شد. مشخصات این مواد در جدول ۲ آورده شده است. نمونه‌های ساخته شده طی شرایط مختلف، از جمله پتوهایی با ضخامت‌های مختلف به صورت تک و دو لایه در فشار خلا ۱۵ micron، مورد آزمایش قرار گرفتند. داخل برخی از VIPها برای حذف اعوجاج سطح از طلق پلی اتیلن شفاف با ضخامت ۱ mm به عنوان روکش در دو طرف سطح استفاده شده است.

جدول ۲. اطلاعات و خواص فیزیکی و شیمیایی افزودنی‌های استفاده شده

Table 2. Information and physical and chemical properties of the used additives

Material	CAS number	molecular formula	Molecular weight	melting point (°C)	Density (g/cm ³)	Physical form	Solubility in water
Activated carbon	7440-44-0	C	12/011	Less than 3500	1/5	Black powder	insoluble
Iron trioxide	1309-37-1	Fe ₂ O ₃	159/69	1538	5/242	Red powder	soluble

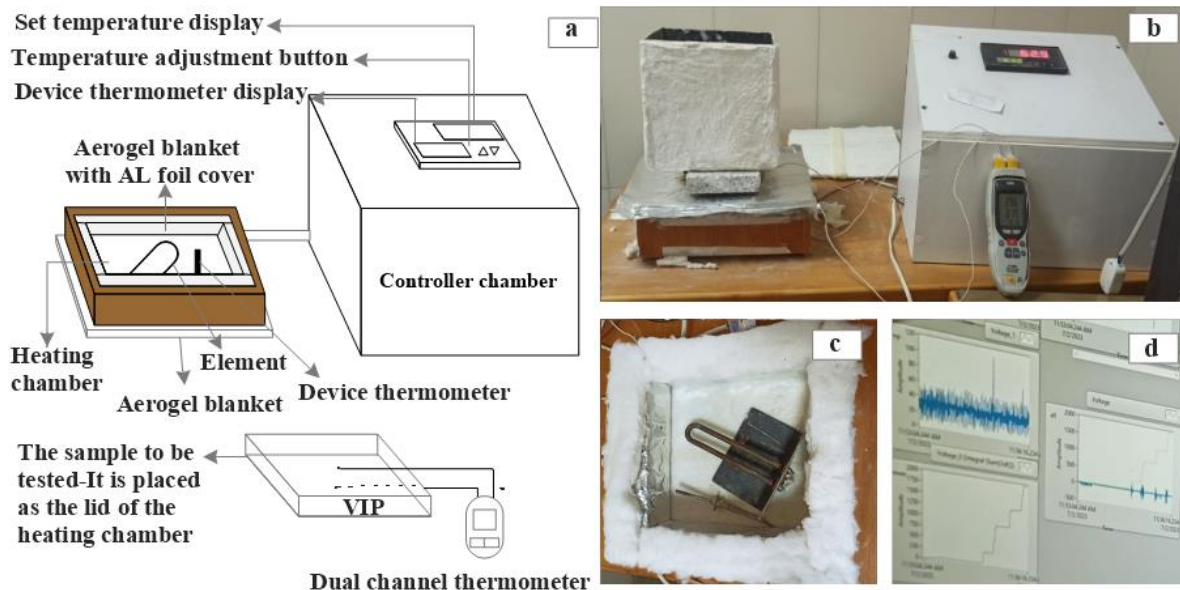
پتوی منعطف آیروژل در ابعاد مورد نظر برش و داخل حفاظ آلومینیومی قرار داده شد. برای ایجاد خلا از دستگاه خلا تک کابین مدل DZQ-500/2 E با قدرت کاهش فشار تا ۱۵۰ mtorr ساخت شرکت گشتا صنعت اصفهان استفاده شده است؛ نمونه داخل کابین دستگاه قرار گرفته و با شروع کار دستگاه، فشار داخل کابین کاهش یافته تا به خلا مورد نظر رسیده و سپس لبه‌های باز عایق تحت حرارت آب‌بند شده‌اند. برای رسیدن به خلاهای قوی‌تر، پمپ پشتیبان VALUE مدل VE215N به کار گرفته شده است؛ این پمپ قدرت کاهش فشار تا ۱۵ mtorr را دارد. در شکل ۶ تصاویر تجهیزات به کار گرفته شده قابل مشاهده است.



شکل ۶. تصاویر الف) شماتیک دستگاه ایجاد خلا ب) مشخصات پمپ پشتیبان ج) دستگاه ایجاد خلا همراه با پمپ پشتیبان

Figure 6. pictures a) schematic vacuum creation device b) characteristics of additional pump c) vacuum creation device with backup pump

نمونه‌های ساخته شده برای بررسی کیفی ابتدایی توسط دستگاه توان‌سنج مورد آزمایش قرار گرفتند. توان‌سنج مورد استفاده در این پژوهش از محفظه‌ای از جنس چوب با ابعاد $27 \times 27 \text{ cm}^2$ و ارتفاع 7 cm بدون سطح بالا و پایین تشکیل شده است و دیواره‌های داخلی آن با پتوی آبروژل به همراه روکش آلومینیوم و کف آن یک پتوی آبروژل با ضخامت یک‌ونیم سانتی‌متر پوشانده شده است. نمونه‌ی مورد آزمایش روی سطح بالایی محفظه قرار گرفته و برای اطمینان از عدم جابه‌جایی هوا بین نمونه و محفظه، وزن‌های بدون تماس مستقیم با سطح نمونه (توسط حائل) روی آن قرار داده شده است. گرمایش سیستم توسط عنصر گرمایی که در مرکز سیستم نصب شده است انجام می‌شود. جزء دیگر توان‌سنج سیستم کنترل‌گر است که اطلاعات آزمایش توسط آن اندازه‌گیری، ثبت و به کامپیوتر ارسال می‌شود. روش کار دستگاه توان‌سنج، اندازه‌گیری توان مصرفی عنصر گرمایی برای پایدار نگه داشتن دمای داخل محفظه در دمای انتخاب شده است. برای ثبت دمای مرکز دو طرف عایق در طول آزمایش نیز از دماسنج دو کاناله استفاده شده است. در شکل ۷ تصاویری از سیستم توان‌سنج و نحوه‌ی قرارگیری عایق روی دستگاه قابل مشاهده است.

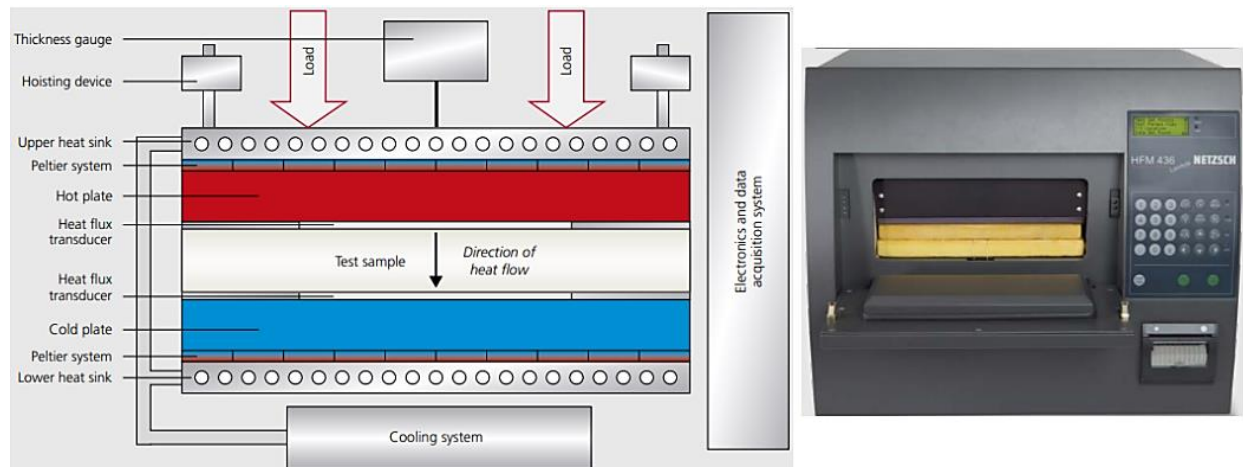


شکل ۷. تصویر الف) شماتیک و ب) واقعی سیستم توان سنج (ج) داخل محفظه‌ی توان سنج (د) نمودارهای حاصل از توان مصرفی نمونه؛ ثبت توسط سیستم توان سنج و ارسال به کامپیوتر

Figure 7. a) schematic and b) real of the powermeter system c) inside the powermeter enclosure d) Charts of the power consumed of the sample; Recorded by the powermeter system and sent to the computer

مقایسه‌ی کیفی عایق‌های پانل تحت خلا توسط دستگاه توان سنج انجام شده و عایقی که کم‌ترین اتلاف توان را ثبت کرده باشد برای اندازه‌گیری دقیق ضریب انتقال حرارت، به مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ارسال و توسط دستگاه جریان سنج حرارتی^۱ مطابق ASTM C 518 و استاندارد ملی ایران به شماره ۸۶۲۱ اندازه‌گیری شده است. نحوه‌ی کار دستگاه HFM به این شرح است که نمونه در داخل دستگاه، بین قسمت فوقانی متحرک و قسمت پایینی ثابت، قرار داده شده و سپس قسمت فوقانی با توجه به ضخامت نمونه در نزدیک‌ترین فاصله از آن تنظیم می‌شود؛ پس از شروع کار سیستم و پایدار شدن آن، جریان گرمایی ناشی از اختلاف دمای تنظیم شده (°C) (۱۰) توسط مبدل شار حرارتی طی ۵ ساعت اندازه‌گیری می‌شود و نهایتاً میانگین ضریب انتقال حرارت در این زمان اعلام می‌گردد. دقت کاری این دستگاه بسیار بالا و در حدود 0.02 W/mk است. تصویر واقعی از دستگاه HFM و تصویر شماتیک از نحوه‌ی عملکرد آن در شکل ۸ قابل مشاهده است.

¹ Heat Flow Meter- HFM



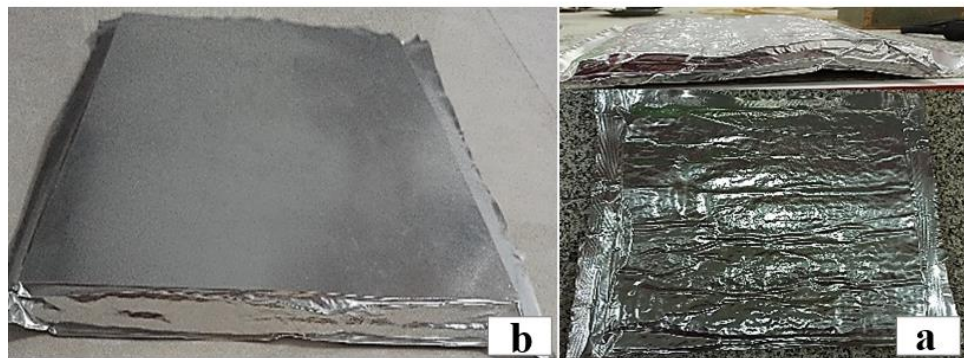
شکل ۸. سمت راست تصویر واقعی از دستگاه HFM و سمت چپ تصویر شماتیک از نحوه‌ی عملکرد آن
 Figure 8. The right side of the real image of the HFM device and the left side of the schematic image of its operation

۳- بحث و بررسی نتایج

نمونه‌های مختلفی از عایق‌های VIP بر مبنای پارامترهای مختلف ساخته شد. از اهداف این تحقیق، بررسی اثر ایجاد خلا در کاهش ضریب انتقال حرارت، بررسی اثر میزان خلا در کاهش انتقال حرارت، اثر تعداد لایه‌ها، اثر مات‌کننده پودری، اثر فویل بازتابنده، اثر اعوجاج سطح پانل، اثر ترکیبی مات‌کننده و فویل بوده است که انجام شده و نتایج گزارش شده است. برای صحت سنجی عملکرد دستگاه توان‌سنج، نمونه‌های به مرکز تحقیقات ساختمان ارسال شده تا ضرایب انتقال حرارت دقیق نمونه‌های به دست آید.

۳-۱. تاثیر تعداد لایه‌ی هسته و اعوجاج سطح بر مصرف توان VIPها

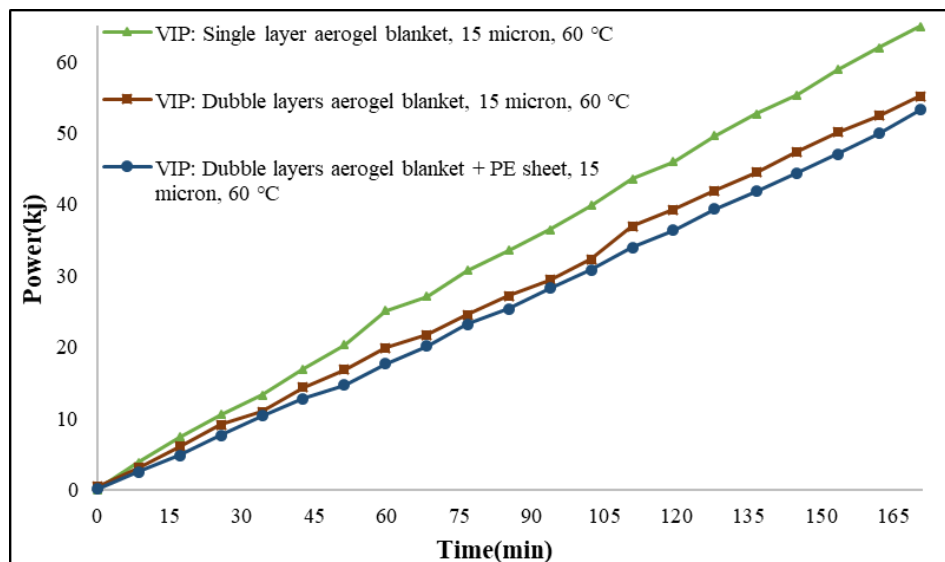
در این آزمایش به بررسی اثر تعداد لایه‌های هسته‌ی VIP و اثر اعوجاج سطح پانل بر اتلاف انرژی در دمای 60°C پرداخته شده است. تاثیر استفاده از لایه‌ی نازک پلاستیکی صلب بر اعوجاج سطح VIPها در شکل ۹ قابل مشاهده است. پتوهای آبروژل منعطف دارای سطح کاملاً صاف نیستند و در هنگام ایجاد خلا سطح ناهمواری در پانل ایجاد می‌شود و احتمال به تله افتادن هوا در چروک‌های سطح وجود خواهد داشت.



شکل ۹. تصویر سطح الف) VIP بدون ورق صلب پلاستیکی و ب) VIP با ورق صلب پلاستیکی

Figure 9. Surface image of a) VIP without rigid plastic sheet and b) VIP with rigid plastic sheet

نتایج اندازه‌گیری توان مصرفی در دمای 60°C این آزمایش در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. VIP دو لایه با ورق پلاستیکی نسبت به سایر عایق‌ها بهترین عملکرد را داشته است. این نتیجه در حالی است که وجود ورق‌های پلی‌اتیلن با ضریب انتقال حرارت 0.25 W/mK منجر به افزایش انتقال حرارت هدایتی شده است اما به دلیل حذف اعوجاج سطح عایق باعث کاهش انتقال حرارت کلی نهایی شده است. میزان کاهش اتلاف انرژی VIP دو لایه با ورق پلاستیکی نسبت به VIP تک لایه و دو لایه به ترتیب برابر با $21/99\%$ و $3/55\%$ شده است. دلیل این تاثیر با می‌توان به ایجاد خلا بهتر در حضور ورق‌های پلاستیکی صلب نسبت داد.

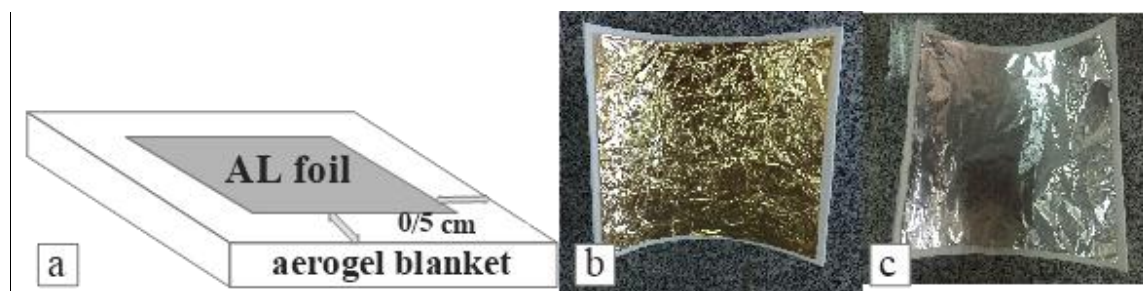


شکل ۱۰. تاثیر تعداد لایه‌های هسته‌ی VIP بر توان مصرفی آن در دمای ۶۰ °C
 Figure 10. The effect of the number of VIP core layers on its power consumed at 60°C

همچنین مشاهده می‌شود افزایش ضخامت کلی عایق از یک لایه پتوی آیروژل به دو لایه، سبب کاهش قابل توجه اتلاف انرژی می‌شود. کیفیت داده‌های به دست آمده از دستگاه توان‌سنج و تکرارپذیری آنها نشان‌دهنده دقت مناسب دستگاه برای اندازه‌گیری توان و آزمایش نمونه‌ها است. بر اساس نتیجه به دست آمده در این آزمایش، آزمایش‌های دیگر با وجود ورق پلاستیکی صلب انجام شده است. مبنای تحقیق نیز استفاده از دو لایه پتوی آیروژل در نظر گرفته شده است.

۳-۲. تاثیر افزودن لایه‌های بازتابنده بر مصرف توان پانل

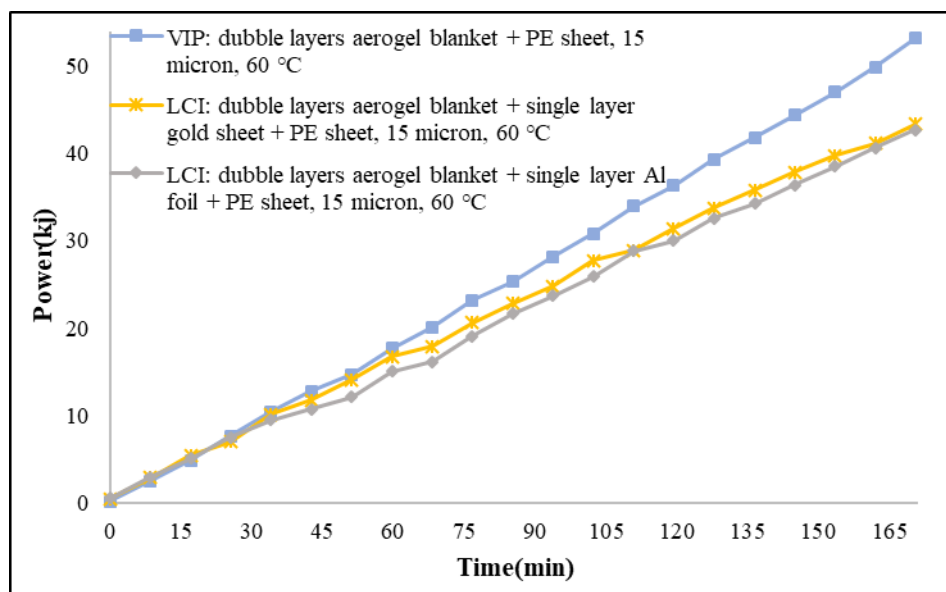
در این آزمایش به بررسی اثر لایه‌های بازتابنده‌های تشعشع شامل ورق آلومینیوم و ورق طلایی بر روی پانل حاوی ورق پلاستیکی در دمای ۶۰ °C پرداخته شده است. لایه‌ی بازتابنده در ابعاد طول و عرض نیم سانتی‌متر کوچک‌تر از لبه‌های هسته‌ی VIP در نظر گرفته شده است. دلیل این فاصله‌دهی، جلوگیری از اتصال لایه‌ها به حفاظ و عدم ایجاد پل حرارتی است. فویل آلومینیوم به شدت رسانای حرارت بوده و در صورت ایجاد پل حرارتی، می‌تواند عملکرد کل پانل تحت خلا را از بین ببرد [۱۳]. نحوه‌ی قرارگیری صفحات بازتابنده در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱. نحوه‌ی قرارگیری صفحات بازتابنده (الف) به صورت شماتیک (ب) ورق طلایی و (ج) فویل آلومینیوم جهت ایجاد LCI به عنوان هسته پانل

Figure 11. How to place reflector plates a) schematically and b) gold sheet and c) aluminum foil to create LCI as the core of the panel

نمودار این آزمایش در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. برای تعیین تاثیر لایه‌ی بازتابنده بر روی عملکرد عایق، عملکرد VIP دو لایه با ورق پلاستیکی نیز در این مقایسه آورده شده است. طبق این شکل، وجود لایه‌ی بازتابنده تشعشع با کاهش انتقال حرارت تشعشعی، انتقال حرارت کلی عایق را کاهش داده است و همچنین لایه‌ی بازتابنده-ی آلومینیوم نسبت به لایه‌ی بازتابنده‌ی ورق طلایی و VIP دو لایه با ورق پلاستیکی برتری دارد. میزان کاهش اتلاف انرژی LCI سه لایه با ورق پلاستیکی و بازتابنده‌ی فویل آلومینیوم نسبت به LCI سه لایه با ورق پلاستیکی و بازتابنده‌ی ورق طلایی و VIP دو لایه با ورق پلاستیکی به ترتیب برابر با ۱/۵۴٪ و ۲۴/۵۸٪ شده است.



شکل ۱۲. اثر تک لایه‌ی بازتابنده بر روی توان مصرفی LCI سه لایه با ورق پلاستیکی در دمای ۶۰ °C
 Figure 12. The effect of a single reflective layer on the power consumed of a three layers LCI with plastic sheet at 60°C

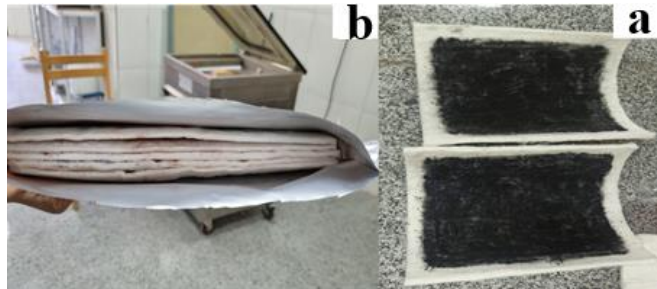
لایه‌های فویل آلومینیوم و طلا تقریباً مشابه هم عمل می‌نمایند و با توجه به هزینه پایین‌تر فویل آلومینیوم، از این لایه‌ها برای ساخت پانل در ادامه آزمایش‌ها استفاده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود افزودن لایه فویل آلومینیوم تاثیر قابل توجهی در کاهش توان مصرفی دارد که نشان می‌دهد با ایجاد خلا، سازوکار انتقال حرارت تابشی و وابستگی آن به توان سودا اهمیت پیدا کرده [۲۷] و استفاده از لایه بازتابنده می‌تواند تاثیر بسزایی داشته باشد.

۳-۳. تاثیر افزودنی مات‌کننده بر VIP دو لایه

در این آزمایش مات کننده‌های کربن فعال و اکسید آهن^۱ بر روی VIP دو لایه در دمای ۶۰ °C بررسی شده است. انواع مات کننده‌های مختلفی وجود دارد که دو مورد انتخاب شده از نظر دسترسی و هزینه کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نحوه افزودن مات کننده به عایق در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. برای جلوگیری از ایجاد پل حرارتی، پودر مات کننده با فاصله یک سانتی‌متر از لبه پتوی آبروژل اضافه می‌شود. جرم افزودنی اول که پودر کربن می‌باشد به اندازه‌ای انتخاب شده است که سطح سفید پتوی منعطف آبروژل را به طور کامل بپوشاند؛ جرم افزودنی دوم (Fe₂O₃) نیز بر اساس حجم برابر با کربن از طریق معادله ۱ [۲۸] اضافه شده است. ابتدا از ۳/۸۵ g کربن برای پوشاندن سطح سفید پتوی منعطف آبروژل استفاده شد. سپس برای بررسی تاثیر افزودنی اکسید آهن (III)، با استفاده از معادله ۱، مقدار ۱۳/۴۵ g از اکسید آهن (III) برای پوشاندن سطح سفید پتوی منعطف آبروژل استفاده شد.

معادله ۱

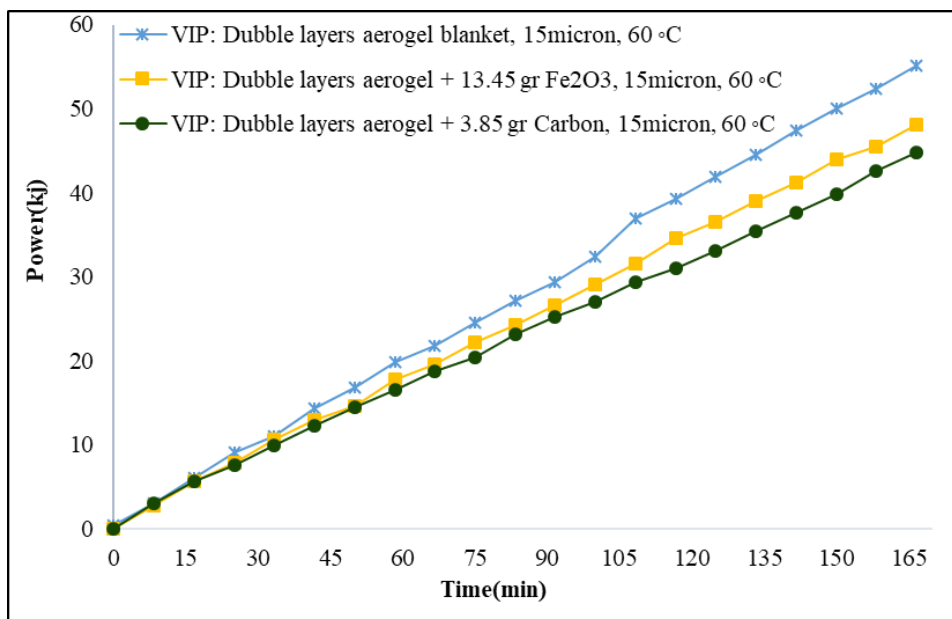
$$\rho_1 m_2 = \rho_2 m_1$$



شکل ۱۳. الف) استفاده از مات کننده کربن فعال ب) نحوه قرارگیری لایه‌های آبروژل در حفاظ
Figure 13. a) Use of activated carbon opacifier b) The placement of an aerogel layers in the envelope

نتایج این بررسی در شکل ۱۴ آورده شده است. برای بررسی بهتر نتایج از شاهد VIP دو لایه بدون افزودنی استفاده شد. VIP دو لایه با افزودنی ۳/۸۵ g کربن به ترتیب از VIP دو لایه با افزودنی ۱۳/۴۵ g اکسید آهن (III) و VIP دو لایه بدون افزودنی عملکرد بهتری داشته و کاهش انرژی مصرفی آن به ترتیب برابر با ۷/۳٪ و ۲۳/۰۶٪ است.

^۱ Fe₂O₃



شکل ۱۴. اثر افزودنی بر روی توان مصرفی عایق VIP دو لایه در دمای ۶۰ °C

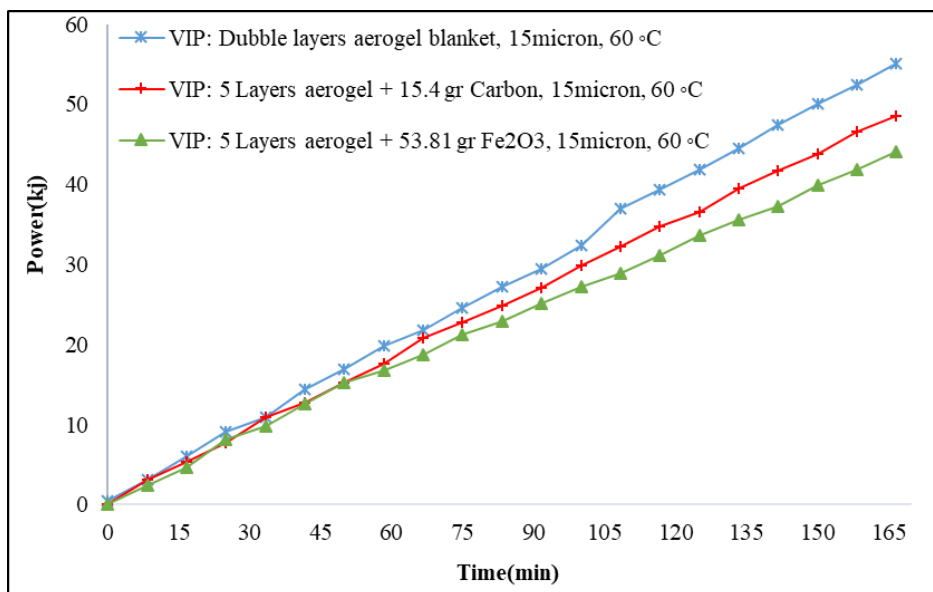
Figure 14. Additive effect on the power consumed of two layers VIP at 60°C

طبق نتایج به دست آمده، استفاده از کربن از لحاظ هزینه و مقدار مورد نیاز نسبت به اکسید آهن بهتر است. همچنین مشاهده می‌شود افزودن اکسید آهن نیز کاهش محسوسی در اتلاف انرژی ایجاد می‌کند. علاوه بر این پودر کربن مساحت سطح زیادی داشته و نقش جاذب رطوبت و گازهای اضافی را نیز می‌تواند هم‌زمان ایفا کند.

۳-۴. تاثیر افزودنی مات کننده بر VIP پنج لایه

در این آزمایش مات کننده‌های کربن فعال و اکسید آهن بر روی VIP پنج لایه در دمای ۶۰ °C بررسی شده و نتایج آن در شکل ۱۵ آورده شده است. VIP های پنج لایه دارای ضخامت نهایی برابر با VIP های سه لایه (۲ cm) هستند و از ۵ لایه پتوی منعطف آبروژل ۴ mm تشکیل شده‌اند. میزان کربن و اکسید آهن (III) اضافه شده در هر لایه از پتوی آبروژل در این مرحله برابر با مرحله‌ی قبل است که در مجموع از ۱۵/۴ g کربن و ۵۳/۸۱ g اکسید آهن (III) در هسته VIP استفاده شد. در این آزمایش هم از VIP دو لایه بدون افزودنی به عنوان شاهد استفاده شد.

VIP پنج لایه با افزودنی g ۵۳/۸۱ اکسید آهن (III) به ترتیب از VIP پنج لایه با افزودنی g ۱۵/۴ کربن و VIP دو لایه بدون افزودنی عملکرد بهتری داشته است و کاهش انرژی مصرفی آن به ترتیب برابر با ۹/۸۵٪ و ۲۴/۹۴٪ است.



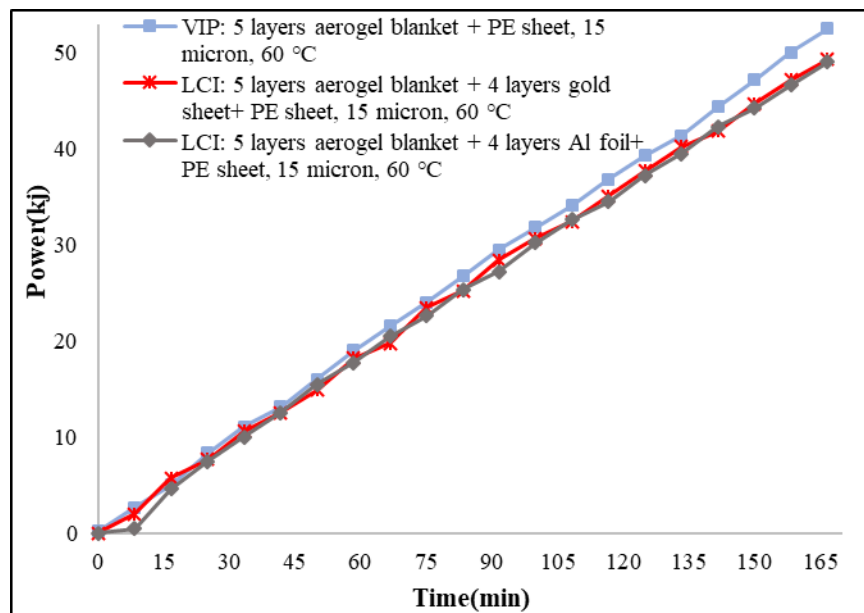
شکل ۱۵. اثر افزودنی بر روی توان مصرفی عایق VIP پنج لایه در دمای ۶۰ °C

Figure 15. Additive effect on the power consumed of five layers VIP at 60°C

ساخت پانل با پنج لایه پتوی آیروژل و افزودنی، زمان و هزینه بیشتری نسبت به پتوی آیروژل دو لایه و افزودنی دارد و با توجه به نتایج، استفاده از لایه‌های بیشتر تاثیر محسوسی در کاهش توان نداشته است و لذا استفاده از دو لایه پتوی آیروژل با ضخامت یک سانتی‌متر توصیه می‌شود. البته باید در نظر داشت عملکرد مات‌کننده‌ها تابع میزان خلا ایجاد شده در پانل بوده و ممکن است با تغییر میزان خلا، عملکرد مواد مختلف تفاوت داشته باشد. مات‌کننده کربنی عمدتاً با سازوکار جذب تشعشع حرارتی باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود و جذب تشعشع در لایه اول ممکن است نیاز به لایه‌های بعدی را نداشته باشد. ذرات پودر اکسید آهن عمدتاً نقش متفرق‌کننده و بازتاب‌کننده تشعشع را داشته و مقداری از تشعشع به لایه‌های بعدی منتقل می‌شود؛ لذا با افزایش تعداد لایه‌های اکسید آهن، کارایی انتقال حرارت بهتر شده است.

۳-۵. تاثیر لایه‌های بازتابنده بر مصرف توان پانل‌های ۹ لایه

در این آزمایش به بررسی اثر بازتابنده‌های تشعشع فویل آلومینیوم و ورق طلایی بر روی LCI ۹ لایه با ورق پلاستیکی در دمای 60°C پرداخته شده است. پانل‌های ۹ لایه از ۵ لایه پتوی منعطف آیروژل با ضخامت ۴ mm و ۴ لایه بازتابنده‌ی تشعشع فویل تشکیل شده‌اند و ضخامت نهایی عایق برابر با ۲ cm است. نمودار این آزمایش در شکل ۱۶ قابل مشاهده است؛ برای تعیین تاثیر لایه‌ی بازتابنده بر روی عایق، VIP پنج لایه با ورق پلاستیکی نیز در این مقایسه آورده شده است. طبق این شکل، LCI ۹ لایه با ورق پلاستیکی و بازتابنده‌ی فویل آلومینیوم نسبت به سایر عایق‌ها برتری داشته است. میزان کاهش اتلاف انرژی در LCI با بازتابنده‌ی آلومینیوم نسبت به LCI ۹ لایه با ورق پلاستیکی و بازتابنده‌ی ورق طلایی و VIP پنج لایه بدون بازتابنده با ورق پلاستیکی به ترتیب برابر 0.45% و 1.7% شده است.



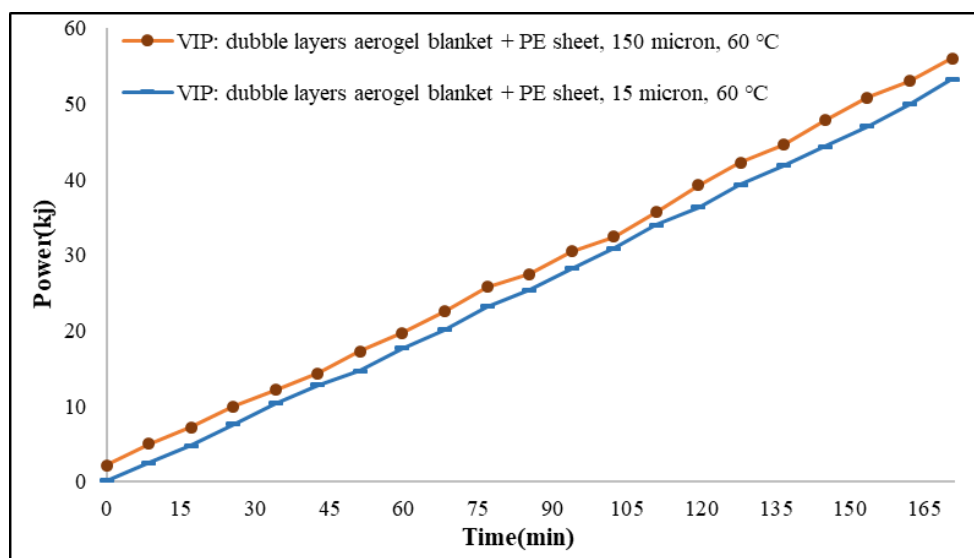
شکل ۱۶. اثر لایه‌های بازتابنده بر توان مصرفی LCI نه لایه با ورق پلاستیکی در 60°C
 Figure 16. The effect of reflective layers on the power consumed of nine layers LCI with plastic sheet at 60°C

فویل آلومینیوم و طلا مشابه هم عمل می‌کنند که در آزمایش قبل نیز نتیجه تقریباً مشابه به دست آمد. فویل‌های بازتابنده همانند سپر حرارتی عمل می‌کنند و بخشی از تشعشع را بازتابیده و بخشی را نیز عبور می‌دهند. با افزایش تعداد لایه‌ها، در مجموع میزان تشعشع بازتابیده شده افزایش یافته و توان مصرفی کاهش می‌یابد. این

نتیجه مشابه نتیجه برای مات‌کننده اکسید آهن است که با افزایش تعداد لایه‌های بازتاباننده، عملکرد پانل بهبود می‌یابد.

۳-۶. تاثیر میزان خلا بر مصرف توان عایق پانل

در این آزمایش به بررسی اثر میزان خلا بر روی VIP در دمای 60°C پرداخته شده است. اولین نمونه توسط دستگاه خلا بدون اتصال پمپ پشتیبان به آن با فشار داخلی 150 micron و نمونه دوم با اتصال پمپ پشتیبان به دستگاه خلا با فشار داخلی 15 micron ساخته شد. نتایج بررسی این دو عایق توسط دستگاه توان‌سنج در شکل ۱۷ آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با کاهش فشار VIP از فشار داخلی 150 micron به فشار داخلی 15 micron میزان کاهش اتلاف انرژی $5/16\%$ شده است؛ بنابراین با کاهش فشار خلا میزان اتلاف انرژی کاهش می‌یابد و عملکرد بهتری در ذخیره انرژی دارد. این برتری در شرایطی اتفاق افتاده است که پمپ مورد استفاده، آزمایشگاهی بوده و به دلیل عدم تجهیزات موردنیاز برای ثبت دقیق فشار داخلی عایق، اطمینان از ایجاد فشار بسیار پایین 15 mtorr وجود ندارد؛ بدیهی است در صورت استفاده از پمپ‌های صنعتی قوی‌تر، اختلاف انرژی مصرفی بیش‌تر دیده خواهد شد. تاثیر میزان خلا در کاهش ضریب انتقال حرارت خطی نبوده و ایجاد خلای زیاد نیاز به تجهیزات خاص و گران‌قیمت دارد. استفاده از پتوی آیروژل با حفرات نانومتری سبب می‌شود تا بدون نیاز به خلای شدید، عایق قوی ایجاد شود.



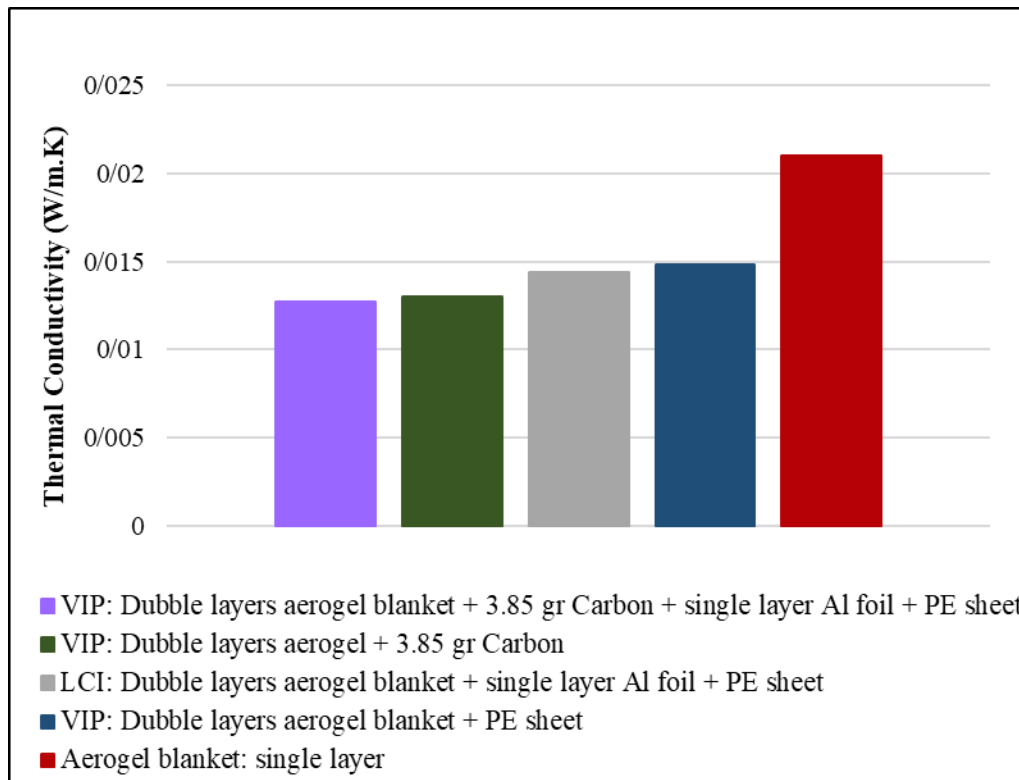
شکل ۱۷. تاثیر میزان خلا VIP بر روی توان مصرفی آن در دمای 60°C

Figure 17. The effect of VIP vacuum on power consumption at 60°C

حفظ خلا در عایق‌های پانلی عامل بسیار مهمی بوده و عدم آب‌بندی صحیح می‌تواند سبب شکست خلا و کاهش کارایی پانل گردد. در این پروژه از روش‌های مختلفی برای آب‌بندی استفاده شد و نمونه‌ها در مدت شش ماه مورد بررسی قرار گرفت. برخی از نمونه‌ها در مدت کم‌تر از یک هفته دچار شکست خلا شده بودند. با توجه به اینکه ارسال نمونه به مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و انجام تست حدود ۲ ماه زمان لازم داشت؛ لذا باید آب‌بندی نمونه‌ها دقیق انجام می‌شد. دستگاه ایجاد خلا دارای سیستم اتوماتیک پرس حرارتی با ضخامت یک سانتی‌متر بوده و برای افزایش کیفیت آب‌بندی، نمونه‌ها دو بار تحت پرس و با محل پرس با فاصله نسبت به هم قرار گرفتند. استفاده از چسب در لبه‌ها، استفاده از چسب نواری و غیره نتیجه مناسبی نداشت. با توجه به ایجاد گرد در هنگام کار با آیروژل، لبه‌های نمونه‌ها کاملاً تمیز شد تا آب‌بندی با بهترین کیفیت انجام شود. نتایج ارسال نمونه‌ها و ضرایب به دست آمده نشان داد که آب‌بندی مناسب بوده و در دو ماه دچار شکست نشده است. لازم به ذکر است با توجه به ابعاد کوچک پانل‌ها ($27 \times 27 \times 2 \text{ cm}^3$)، نفوذ مقادیر بسیار جزئی هوا به داخل پانل سبب شکست کامل خلا شده و ضرایب به دست آمده برای پانل باید بیش‌تر از 0.002 W/mK می‌شد. این ضریب برای پتوی آیروژل در اتمسفر بوده و وجود فویل آلومینیوم نیز باعث افزایش آن می‌شود. با این وجود نتایج بسیار کم‌تر به دست آمد که حفظ آب‌بندی را تایید می‌کند.

۴. مقایسه نمونه‌های VIP با اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت با دستگاه HFM

برای صحت سنجی نتایج دستگاه توان‌سنج، نمونه‌های مختلفی به مرکز تحقیقات مسکن، راه و شهرسازی ارسال شد تا ضریب انتقال نمونه‌های با ابعاد ۳۰ در ۳۰ در ۲ سانتی‌متر با دستگاه HFM 436 مدل نچ آلمان اندازه‌گیری گردد. دقت این دستگاه 0.002 W/mK بوده و نتایج در شکل ۱۸ نشان داده شده است. نمونه پتوی آیروژل در فشار اتمسفر نیز با همین دستگاه اندازه‌گیری شده است. نتایج اثر محسوس ایجاد خلا، استفاده از فویل آلومینیوم، مات‌کننده و ترکیب مات‌کننده و فویل آلومینیوم را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸. نمودار میله‌ای ضریب انتقال حرارت در دمای ۱۰ °C

Figure 18. Bar chart of heat transfer coefficient at 10°C

بررسی اثر تعداد لایه‌ی هسته بر توان مصرفی VIP نشان داد که افزایش تعداد لایه‌ی هسته، اتلاف توان VIP را به دلیل افزایش ضخامت عایق کاهش می‌دهد. همچنین اضافه کردن ورق پلی‌اتیلن به VIP سبب تخلیه بهتر و کامل‌تر پانل از هوا شده و سبب کاهش بیش‌تر ضریب انتقال حرارت شد. ایجاد خلا ۱۵ mtorr و حذف اعوجاج سطح بر روی پتوی منعطف آیروژل، اثر خود را با کاهش ضریب انتقال حرارت از ۰/۰۲۲ به ۰/۰۱۴۸ W/mK نشان داد؛ به عبارت دیگر، ضریب انتقال حرارت به میزان ۴۸/۶۵٪ کاهش یافت؛ این در حالی است که وجود ورق پلاستیکی انتقال حرارت پانل را افزایش می‌دهد. این کاهش اتلاف توان توسط توان‌سنج به طور کیفی اثبات شده بود.

در بررسی اثر لایه‌ی بازتابنده‌ی تشعشع بر توان مصرفی VIP مشاهده شد وجود لایه‌ی بازتابنده باعث کاهش اتلاف توان عایق‌های پانل می‌شود. با مقایسه‌ی کیفی LCI سه لایه و نه لایه توسط دستگاه توان‌سنج، برتری پانل سه لایه با دو لایه پتوی آیروژل و یک لایه بازتابنده اثبات شد؛ همچنین بازتابنده‌ی فویل آلومینیوم نسبت به ورق طلائی برتری داشته است. طبق گزارش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ضریب انتقال حرارت پانل حاوی

تک لایه‌ی بازتابنده آلومینیوم برابر با 0.144 W/mK بوده که $52/78\%$ از ضریب انتقال حرارت پتوی منعطف آبروژل کم‌تر شده است. همچنین کاهش بیش‌تر نسبت به پانل عایق حرارت آبروژل بدون فویل آلومینیوم نشان می‌دهد بازتاب انتقال حرارت تشعشع توسط تک لایه‌ی فویل آلومینیوم موثر بوده است.

با بررسی اثر افزودنی پودر جاذب بر توان مصرفی VIP، کاهش اتلاف توان پانل به دلیل جذب تشعشع توسط افزودنی پودر مشاهده شد. به‌طور کلی با مقایسه‌ی کیفی پانل‌های دو و پنج لایه‌ی حاوی افزودنی کربن فعال و اکسید آهن (III) توسط دستگاه توان‌سنج، پانل دو لایه‌ی حاوی افزودنی کربن فعال و پانل پنج لایه‌ی حاوی افزودنی اکسید آهن (III) عملکرد تقریباً برابر و بهتر از سایر پانل‌های حاوی افزودنی در کاهش توان مصرفی داشتند. طبق گزارش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی میزان ضریب انتقال حرارت پانل دو لایه‌ی حاوی افزودنی پودر کربن فعال برابر با 0.130 W/mK بوده که نسبت به پتوی منعطف تک لایه‌ی آبروژل $69/23\%$ کم‌تر است که نشان از عملکرد مناسب افزودنی‌ها است.

با توجه به نتایج آزمایش‌های قبل، برای رسیدن به ضریب انتقال حرارت پایین‌تر، عایقی با ترکیب لایه‌های بازتابنده و مات‌کننده ساخته شد؛ این عایق شامل دو لایه پتوی آبروژل با ضخامت 1 cm است که یک لایه‌ی بازتابنده آلومینیوم در میان آنها قرار گرفته و روی یکی از لایه‌های داخلی پتوی منعطف آبروژل از کربن فعال پوشانده شده است. دلیل انتخاب کربن به عنوان افزودنی، عملکرد بهتر این ماده در پانل دو لایه است. ضریب انتقال حرارت دقیق این عایق 0.127 W/mK است؛ بنابراین میزان کاهش ضریب انتقال حرارت در این عایق نسبت به پتوی منعطف آبروژل برابر با $73/22\%$ شده است. نتایج گزارش مرکز تحقیقات در شکل ۱۸ قابل مشاهده است.

۵. نتیجه‌گیری

ترکیب VIP با هسته‌ی پتوی منعطف آبروژل و استفاده از لایه‌های بازتابنده و مات‌کننده داخل آن باعث ایجاد یک عایق بسیار قوی با کاربرد گسترده در شرایط مختلف فشار و خلا را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر است:

- افزایش تعداد لایه‌های داخل VIP با کاهش اتلاف انرژی آن رابطه مستقیم دارد؛ اما این رابطه خطی نیست.
- در بررسی اثر تعداد لایه‌ی هسته و اعوجاج سطح بر مصرف توان VIPها، VIP دو لایه با ورق پلاستیکی با ضریب انتقال حرارت 0.148 W/mK نسبت به سایر عایق‌ها بهترین عملکرد را داشته است؛ دلیل این نتیجه صاف بودن کامل سطح VIP با ورق پلاستیکی و بازتاب کامل انتقال حرارت تشعشع توسط سطح

صاف و همچنین امکان ایجاد خلا بهتر با حذف مولکول‌های به دام افتاده در میان اعوجاج سطح پتوی آیروژل و حفاظ است.

- اضافه کردن لایه‌های بازتابنده به VIP منجر به کاهش اتلاف توان آن شده است.
- عملکرد لایه‌ی بازتابنده‌ی آلومینیوم نسبت به لایه‌ی بازتابنده‌ی ورق طلایی بهتر شده است.
- افزودن یک لایه فویل آلومینیوم به VIP دو لایه همراه با خلا باعث کاهش ۵۲/۷۸٪ رسانایی حرارتی آن شده و ضریب انتقال حرارت آن را به ۰/۰۱۴۴ W/mK کاهش داده است.
- افزودن مات‌کننده به VIP باعث کاهش محسوس اتلاف توان آن شده است.
- بهترین عملکرد در میان جاذب‌های تشعشع در VIP دو لایه با افزودنی پودر کربن فعال داشته است؛ ضریب انتقال حرارت عایق حاصل ۰/۰۱۳۰ W/mK به دست آمده است.
- مات‌کننده Fe_2O_3 بهترین عملکرد را در VIP پنج لایه داشته است.
- ادغام کربن فعال به عنوان مات‌کننده و فویل تک لایه‌ی آلومینیوم به عنوان بازتابنده‌ی تشعشع، منجر به دستیابی به یک عایق بسیار قوی LCI سه لایه با ضریب انتقال حرارت ۰/۰۱۲۷ W/mK شد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بدین‌وسیله از شرکت دانش‌بنیان پاکان آتیه نانودانش بابت در اختیار قراردادن تجهیزات و انواع پتوی آیروژل سیلیکایی کمال تشکر را دارند.

منابع

- [1] Zeynep Ulker, D. S., Can Erkey. (2014). *Supercritical Fluid Technology for Energy and Environmental Application* (M. F. Vladimir Anikeev, Ed. 1 ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2012-0-00267-0>
- [2] Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and Buildings*, 225, 110322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>
- [3] Yousefi amiri, T., Bargozin, H., & Mahmoudi, R. (2018). Aerogel-Based Renders and Plasters as New Insulating Materials in Buildings, *Iranian Chemical Engineering Journal*, vol. 17, no. 97, pp. 76-85, 2018, In Persian, [Online]. Available: https://www.ijche.ir/article_112627_b6409fdd6e2d6fbc4341ef1f1882363e.pdf
- [4] Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., Muraza, O., & Aditya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy

- conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1352-1365 .
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>.
- [5] Evangelisti, L., Guattari, C., & Rubeis, T. d. (2021). Preliminary analysis of the influence of environmental boundary conditions on convective heat transfer coefficients. *Journal of Physics: Conference Series*, 1868(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1868/1/012024>.
- [6] Li, C., Li, B., Pan, N., Chen, Z., Saeed, M. U., Xu, T., & Yang, Y. (2016). Thermo-physical properties of polyester fiber reinforced fumed silica/hollow glass microsphere composite core and resulted vacuum insulation panel. *Energy and Buildings*, 125, 298-309. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.013>.
- [7] Lakatos, Á., & Kovács, Z. (2021). Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods. *Energy and Buildings*, 236, 110771. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110771>.
- [8] Cuce ,E., Cuce, P. M., Wood, C. J., & Riffat, S. B. (2014). Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 273-299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>.
- [9] Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., & Gustavsen, A. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147-172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.005>.
- [10] Kim, J.-H., Kim, S.-M., & Kim, J.-T. (2017). Simulation Performance of Building Wall with Vacuum Insulation Panel. *Procedia Engineering*, 180, 1247-1255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.286>.
- [11] Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2014). Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways. *Applied Energy*, 116, 355-375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.032>.
- [12] Alam, M., Singh, H., & Limbachiya, M. C. (2011). Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions. *Applied Energy*, 88(11), 3592-3602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.040>.
- [13] Mao, S., Kan, A., & Wang, N. (2020). Numerical analysis and experimental investigation on thermal bridge effect of vacuum insulation panel. *Applied Thermal Engineering*, 169, 114980. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114980>.
- [14] Yamamoto, H., & Ogura, D. (2021). Dependence of gas permeation and adsorption on temperature in vacuum insulation panels (VIPs) containing getter materials. *Journal of Building Physics*, 45(5), 604-628. <https://doi.org/10.1177/17442591211017154>.
- [15] Di, X., Xie, Z. g., Chen, J., & Zheng, S. (2020). Residual gas analysis in vacuum insulation panel (VIP) with glass fiber core and investigation of getter for VIP. *Building and Environment*, 186, 107337. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107337>.

- [16] Yu, W. S., Zhu, Z. W., Chen, J., & Zheng, Q. (2016). Synthesis of the Getter for Vacuum Insulation Panels (VIPs) used on Marine Reefer Containers. *MATEC Web of Conferences*, 67, 06105. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166706105>.
- [17] Liang, Y., Wu, H., Huang, G., Yang, J., & Ding, Y. (2017). Prediction and Optimization of Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Panels with Aerogel Composite Cores. *Procedia Engineering*, 205, 2855-2862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.909>.
- [18] Resalati, S., Okoroafor, T., Henshall, P., Simões, N., Gonçalves, M., & Alam, M. (2021). Comparative life cycle assessment of different vacuum insulation panel core materials using a cradle to gate approach. *Building and Environment*, 188, 107501. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107501>.
- [19] Liang, Y., Wu, H., Huang, G., Yang, J., & Wang, H. (2017). Thermal performance and service life of vacuum insulation panels with aerogel composite cores. *Energy and Buildings*, 154, 606-617. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.085>.
- [20] Tenpierik, M. (2010). *Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions*. Singelstraat 1c.
- [21] Tao Xie, Y.-L. H., Zi-Jun Hub. (2012). Theoretical study on thermal conductivities of silica aerogel composite insulating material. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58, 540-552. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.11.016>.
- [22] Demko, J., Fesmire, J. E., & Shu, Q. S. (2022). *Cryogenic Heat Management*. CRC Press. <https://books.google.com/books?id=GUC9zgEACAAJ>.
- [23] Yousefi amiri, T., Bargozin, H., Farhadipour, M., & Jamali, Z. (2021), Polycarbonate sheets filled with silica aerogel: new lighting with thermal insulation properties to reduce energy consumption in buildings, *Iranian Chemical Engineering Journal*, vol. 40, no. 1, pp. 349-358, 2021, In Persian, [Online]. Available: https://www.nsmsi.ir/article_36161_49985f5c6a2eb3c1b0246138d3f76789.pdf.
- [24] Yousefi amiri, T., Bargozin, H., & Moghaddas, J. S. (2020) "Aerogel-Based Renders and Plasters as New Insulating Materials in Buildings, *Iranian Chemical Engineering Journal*, 19(108), 49-69, In Persian, https://www.ijche.ir/article_113411_cb0c06d23a37d3c53a1b73a87f1c1e89.pdf
- [25] Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., & Flores-Colen, I. (2020). A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. *Applied Energy*, 257, 114028. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114028>.
- [26] Deng, B., Yang, S., Xie, X., Wang, Y., Bian, X., Gong, L., & Li, Q. (2019). Study of the thermal performance of multilayer insulation used in cryogenic transfer lines. *Cryogenics*, 100, 114-122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2019.01.005>.
- [27] Jang, C., Kim, J., & Song, T.-H. (2011). Combined heat transfer of radiation and conduction in stacked radiation shields for vacuum insulation panels. *Energy and*

- Buildings*, 43(12), 3343-3352.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.036>.
- [28] Caltagirone, J.-P. (2023). *Conservation of mass-momentum-energy versus conservation of acceleration*. <https://hal.science/hal-04148140>