

Experimental Optimization of Bubble-Embedded Sandwich Panel Insulation Layers in Refrigeration Systems By Taguchi Method

Esmaeil Fotuhi¹, Masumeh Rostamabadi^{2*} , Mohamad Nikian¹

¹ Mechanical Engineering Department, Tak. C., Islamic Azad University, Takestan, Iran

² Civil Engineering Department, BuZ. C., Islamic Azad University, BuinZahra, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: July 07, 2026

Revised: August 02, 2026

Accepted: August 18, 2026

ePublished: October 19, 2026

ABSTRACT

Thermal insulators of sandwich panel type play a significant role in reducing energy consumption in buildings and industry. The ultimate performance of sandwich panels depends on the type of core insulation, the facing materials, and the quality of bonding between layers. In the present study, the simultaneous combination of four insulating layers polyurethane, EPS (expanded polystyrene), ABS, and bubble foam in the sandwich panel structure of a refrigerator wall was experimentally investigated. The number of layers and the thickness of each of the aforementioned materials can affect the heat transfer coefficient and, consequently, the compressor off-time duration of the refrigerator. The Taguchi method was employed to design the experiments involving different numbers and thicknesses of the four materials. A bi-objective optimization was considered, including maximizing the compressor off-time (as a thermal performance criterion) and minimizing the manufacturing cost (as an economic criterion). By constructing a refrigerator box and embedding the insulation layers according to the Taguchi-suggested layout in one of its walls, the compressor off-time was recorded. The results showed that, if cost is not taken into account, the sandwich panel consisting of one EPS layer, one 8-mm polyurethane layer, one ABS layer, and one 8-mm bubble foam layer yields the longest compressor off-time. However, when considering the foam manufacturing cost, the optimal sandwich panel comprises one EPS layer, one ABS layer, and one bubble foam layer without the polyurethane layer; this configuration simultaneously provides the maximum compressor off-time and the minimum cost. Moreover, compared with insulations containing EPS, polyurethane, and ABS without bubble foam, the optimal insulation achieves a 25% reduction in energy consumption.

Keywords: Bubble-Embedded Foam, Sandwich Panel, Taguchi, Bi-Objective Optimization, Thermal Insulation.

How to cite this article

Fotuhi E, Rostamabadi M, Nikian M, Experimental Optimization of Bubble-Embedded Sandwich Panel Insulation Layers in Refrigeration Systems By Taguchi Method. Modares Mechanical Engineering; 2027;27(01):17-27.

*Corresponding author's email: Rostamabadi@iau.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-1698-211X



Copyright© 2027, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.



بهینه‌سازی تجربی لایه‌های عایق ساندویچ پنل حبابدار در سیستم‌های تبرید با روش تاگوچی

اسماعیل فتوحی^۱، معصومه رستم آبادی^{۲*}، محمد نیکیان^۱

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، تاکستان، ایران
^۲ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا، ایران

چکیده

عایق‌های حرارتی از نوع ساندویچ پنل، در کاهش مصرف انرژی در ساختمان و صنعت نقش به سزایی دارند. عملکرد نهایی ساندویچ پنل‌ها به نوع عایق هسته و رویه‌ها و نیز کیفیت اتصال لایه‌ها وابسته است. در پژوهش حاضر ترکیب همزمان چهار لایه عایق پلی‌اورتان، یونولیت، ABS و فوم حبابدار در ساختار ساندویچ پنل دیواره یخچال به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد لایه‌ها و ضخامت هریک از جنس‌های مذکور می‌تواند در ضریب انتقال حرارت و لذا مدت زمان خاموش ماندن کمپرسور یخچال تاثیرگذار باشد. روش تاگوچی برای طراحی آزمایشات ترکیب چهار ماده مذکور با تعداد و ضخامت‌های متفاوت استفاده شد. بهینه‌سازی دو هدفه شامل بهینه‌سازی زمان خاموش ماندن کمپرسور (به عنوان معیار عملکرد حرارتی) و کمینه‌سازی هزینه ساخت (به عنوان معیار اقتصادی) مدنظر قرار گرفته است. با ساخت یک جعبه یخچال و تعبیه لایه‌های عایق بر اساس چیدمان پیشنهادی تاگوچی در یکی از دیواره‌های یخچال، زمان خاموش ماندن کمپرسور یخچال ثبت شد. نتایج نشان داد چنانچه بحث هزینه در نظر گرفته نشود، ساندویچ پنلی با یک لایه یونولیت، یک لایه پلی‌اورتان با ضخامت ۸ میلی‌متر، یک لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار ۸ میلی‌متری دارای بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور است. اما، با در نظر گرفتن هزینه ساخت فوم، ساندویچ پنلی با یک لایه یونولیت، یک لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار و بدون لایه پلی‌اورتان عایق بهینه است؛ که همزمان بهینه‌سازی زمان خاموش ماندن کمپرسور را با کمینه‌سازی هزینه داراست. همچنین در عایق بهینه نسبت به عایق‌هایی که حاوی سه جنس یونولیت، پلی‌اورتان و ABS هستند و در آنها فوم حبابدار استفاده نشده است، ۲۵ درصد کاهش مصرف انرژی رخ داده است.

کلیدواژه‌ها: ساندویچ پنل، فوم حبابدار، تاگوچی، بهینه‌سازی دودهدفه، عایق حرارتی.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله

مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۲۷

نحوه ارجاع به این مقاله

فتوحی اسماعیل، رستم آبادی معصومه، نیکیان محمد، بهینه‌سازی تجربی لایه‌های عایق ساندویچ پنل حبابدار در سیستم‌های تبرید با روش تاگوچی، مهندسی مکانیک مدرس، ۲۷-۱۷: ۲۷(۰۱): ۱۴۰۵.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Rostamabadi@iaui.ac.ir

*شناسه ارجید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۲۲۱X-۱۶۹۸-۰۰۰۳-۰۰۰۰



۱- مقدمه

بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان و صنعت، مستلزم استفاده از عایق‌های حرارتی با رسانندگی پایین است. ساندویچ پنل‌ها به عنوان سیستم‌های پیشرفته‌ای متشکل از دو لایه رویی مقاوم و یک هسته عایق مرکزی، عملکرد حرارتی و سازه‌ای ممتازی ارائه می‌دهند [۱]. این پنل‌ها ضمن کاهش چشمگیر تلفات حرارتی، نسبت استحکام به وزن بالا و سرعت نصب قابل توجهی دارند [۲]. با این حال، عملکرد نهایی آن‌ها به نوع عایق هسته و کیفیت اتصال لایه‌ها وابسته است. تاکنون تحقیقات گسترده‌ای در زمینه عایق‌های حرارتی با رویکردهای متنوع تجربی، عددی و آماری انجام شده است. گیمیک و همکاران (۲۰۲۶) یک مدل تحلیلی برای بهینه‌سازی ضخامت عایق در فضاهایی با شرایط مرزی حرارتی غیریکنواخت (مانند یخچال‌ها و سردخانه‌ها) ارائه نمودند. رویکرد مبتنی بر قانون دوم ترمودینامیک که مصرف انرژی کلی را ۳.۳٪ کاهش می‌دهد [۳]. هو و همکاران (۲۰۲۵) به ارزیابی حرارتی دیوارهای کامپوزیت چندلایه با لایه‌های ضخیم PIR (polyisocyanurate) برای سردخانه با استفاده از شبیه‌سازی عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و اعتبارسنجی تجربی پرداختند. نتایج نشان داد مقادیر ضریب انتقال حرارت بین ۰.۴۶۶ تا ۰.۸۱۰ وات بر متر در کلون محاسبه شد. دقت شبیه‌سازی با داده‌های تجربی کمتر از ۰.۵٪ خطا داشته است [۴]. جابیر ماروا و همکاران (۲۰۲۵). مطالعاتی برای بهینه‌سازی هدایت حرارتی مواد کامپوزیت ساخته شده از PLA (Polylactic acid) خالص، PLA حاوی مس و PLA حاوی الیاف چوب با ضخامت‌های ۰/۴ تا ۲ میلی‌متر و تراکم ۴۰ تا صددرصدی، انجام دادند و نشان دادند تراکم بیشترین تأثیر را بر انتقال حرارت دارد [۵]. ژنگ، و همکاران (۲۰۲۵) برای بهینه‌سازی پارامترهای حرارتی از دیوار عایق دو لایه حاوی مواد تغییر فاز دهنده استفاده نمودند. پارامترهای بهینه‌سازی شامل دمای تغییر فاز، گرمای نهان، رسانایی حرارتی و ضخامت می‌باشد. پس از بهینه‌سازی، عملکرد حرارتی دیوار در تابستان ۵۹.۳٪ و در زمستان ۱۳۸.۲٪ بهبود یافت [۶]. اهرام سیاه و همکاران (۲۰۲۵) عایق‌بندی مواد محفظه خنک‌کننده را با استفاده از مخلوطی از خاک اره چوب ساج و الیاف باگاس که قبلاً در محلول NaOH قلبایی غوطه‌ور شده بودند، اصلاح کردند تا خواص مکانیکی الیاف بهبود یافته و مقدار رسانایی حرارتی ماده کاهش یابد. بهینه‌ترین نتایج با ترکیب ۵۰٪ خاک اره و ۵۰٪ الیاف باگاس با غلظت ۱۵٪ به دست آمد. مقدار رسانایی به دست آمده ۰/۲۹ وات بر متر در کلون و چگالی ۰/۴۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. این ترکیب به دلیل سازگاری بیشتر با محیط زیست، پتانسیل جایگزینی یونولیت را دارد [۷]. تااو و همکاران (۲۰۲۰) در داخل محلول پلی وینیل، کربنات کلسیم را با درصد‌های مختلف اضافه نمودند. پس از ارتعاش و التراسونیک نمودن محلول و استفاده از اسید، آهک داخل محلول را بخار نموده و محیط متخلخل را در فوم

به وجود آوردند. اثرات تخلخل بر ساختار و خواص فیلم‌های متخلخل پلی وینیل با کربنات کلسیم مورد مطالعه قرار گرفت و میزان هدایت حرارتی در نمونه را کاهش دادند. در آزمایش دما، دمای نهایی نمونه با تخلخل حدود ۶۷ درصد حجمی تنها ۲۵/۲ درجه سانتیگراد بود، ۱/۲ درجه سانتیگراد بالاتر از دمای اتاق. ماده متخلخل PVC تهیه شده در این مطالعه دارای مزایای رسانایی حرارتی پایین، بازتاب خورشیدی خوب و آماده‌سازی ساده بود که چشم‌انداز کاربرد بالقوه‌ای در زمینه مواد خنک‌کننده غیرفعال دارد [۸].

ماکینده و اونی (۲۰۱۹) در تحقیقی بهبود مصرف انرژی در یخچال‌های خانگی را با استفاده از عایق مرکب مورد بررسی قرار دادند. از یک پلاستیک به ضخامت ۱/۷ میلی‌متر به عنوان عایق بیرونی، از پلی استایرن به ضخامت ۰/۶ میلی‌متر برای عایق داخلی و از فوم استایرن با ضخامت ۶۰ میلی‌متر برای عایق میانی استفاده شد. پس از آزمایش اولیه با فوم استایرن، فوم استایرن برداشته شد و به طور متوالی با عایق‌های دیگر از جمله فوم پلی‌اورتان سفت و سخت، فوم پلی‌اورتان منبسط شده، الیاف شیشه و عایق‌های کامپوزیت جایگزین شد که آزمایش‌ها به طور متوالی برای آنها تکرار شد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها بر روی شار حرارتی آنی و دمای لحظه‌ای نشان داد از بین تمام عایق‌های در نظر گرفته شده، یخچال با عایق کامپوزیت بالاترین ظرفیت نگهداری گرما را در محفظه برودتی یخچال دارد و می‌تواند مصرف انرژی یک یخچال خانگی را کاهش دهد [۹]. کیو و همکاران (۲۰۱۸) پوشش بازتابنده خورشیدی همراه با مواد عایق حرارتی روی سقف/دیوار را روی یک سطح به منظور بررسی بهره‌وری انرژی ساختمان در شانگهای انجام دادند. مقاومت حرارتی معادل در یک روز معمولی تابستان و یک روز زمستانی شانگهای به صورت نظری محاسبه و آزمایش شد. نتایج نشان داد پوشش بازتابنده خورشیدی معادل صرفه‌جویی در انرژی است و می‌توان آن را با لایه عایق حرارتی ۷ تا ۲۳ میلی‌متری روی دیوار و ۱۴ تا ۱۰۷ میلی‌متری روی سقف جایگزین کرد [۱۰].

پاستوری و همکاران (۲۰۱۸) یک سیستم عایق بازتابنده چند لایه جدید به نام Mirrorpanel را آزمایش نمودند. رسانایی حرارتی ظاهری چندین ماده عایق در طیف وسیعی از دماها اندازه‌گیری شد. نمونه‌های Mirrorpanel با استفاده از لایه‌های فویل آلومینیومی و کاغذ روکش‌دار که با فاصله‌های هوایی تقریباً ۵ میلی‌متری از هم جدا شده بودند تهیه شدند. شار حرارتی حالت پایدار در آزمایشگاه برای نمونه‌های ۵۰۰ میلی‌متر × ۵۰۰ میلی‌متر شامل چندین پیکربندی Mirrorpanel و همچنین عایق‌های فوم پلی استایرن منبسط شده و پلی ایزوسیاناترات اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد برای همه مواد عایق، رسانایی حرارتی ظاهری با افزایش دما بالاتر از ۵ درجه سانتیگراد به صورت خطی افزایش یافت و شیب این افزایش برای نمونه‌های Mirrorpanel تندتر از عایق‌های فومی بود. رسانایی حرارتی ظاهری Mirrorpanel ساخته شده از فویل آلومینیومی بیشتر از پلی ایزوسیاناترات اما کمتر از پلی استایرن

منبسط شده بود [۱۱]. تیسن و همکاران (۲۰۱۸) رفتار ترمودینامیکی یک یخچال خانگی را با ۱۶ روش مختلف عایق‌بندی با پنل‌های عایق خلاء (VIP) به صورت تجربی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مصرف انرژی هم تحت تأثیر سطح پوشش و هم موقعیت پنل‌ها قرار دارد و نمونه‌های با سطح پوشش یکسان، مصرف انرژی متفاوتی داشتند. مشاهده گردید که عایق‌بندی درب و دیوار پشتی با VIP به ترتیب مصرف انرژی را ۷٪ و ۱۱٪ کاهش داده و سطح پوشش ۵۶٪ منجر به کاهش ۲۱٪ در مصرف انرژی می‌شود [۱۲]. پارک و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر نانو حباب‌های CO₂ با اندازه تقریبی ۱۵۰ نانومتر را بر خواص فیزیکی فوم پلی‌اورتان سفت و سخت (r-PUF) بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از نانو حباب CO₂ در پلی‌یول منجر به افزایش ۱۸/۸ درصدی افزایش رسانایی حرارتی، ۵۰٪ کاهش استحکام خمشی و ۱۶/۱٪ افزایش استحکام فشاری شده است [۱۳]. لیو و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تجربی و عددی رسانایی حرارتی میکروکره‌های شیشه‌ای توخالی کوچک (HGM) پرداختند. میچل و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه یک دیوار عایق چندلایه برای یک وسیله نقلیه یخچال‌دار پرداختند. دیوار عایق چند لایه حاوی یک لایه کامپوزیتی از فوم PU-PCM بود. دو کامپوزیت PU-PCM با دو نرخ جرم PCM ۴۳ درصد وزنی و ۳۵ درصد وزنی آزمایش شد. همچنین ناهمگنی موضعی توزیع ریزدانه‌های PCM در داخل ماده کامپوزیت نیز مورد توجه قرار گرفت. مشاهده شد که ماده کامپوزیت باید نزدیک به دیوار خارجی وسیله نقلیه قرار گیرد [۱۴].

اکبری‌پایدار و همکاران (۱۳۹۸) با شبیه‌سازی EnergyPlus در اقلیم تهران، تأثیر تعرفه‌های مختلف انرژی را بر ضخامت بهینه عایق EPS دیوارهای خارجی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در تعرفه‌های پایین، استفاده از عایق در برخی جهات فاقد توجیه اقتصادی است، اما در سناریوی بدون یارانه، ضخامت بهینه بین ۶ تا ۱۸ سانتی‌متر و دوره بازگشت سرمایه ۶ تا ۲۸ سال متغیر است که حاکی از تأثیر تعرفه‌های انرژی بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌هاست [۱۵].

رامین و همکاران (۱۳۹۵) با حل دقیق معادله انتقال حرارت گذرا در دیوار بتنی عایق‌شده با EPS، ضخامت بهینه عایق را با در نظر گرفتن هم‌زمان بار گرمایش و سرمایش، هزینه انرژی، انتشار آلاینده‌ها و پارامترهای تأخیر زمانی در طول عمر ۲۵ ساله تعیین کردند. نتایج نشان داد که عایق‌کاری بهینه، مصرف سوخت سالیانه و انتشار آلاینده‌ها را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد [۱۶]. ترابی‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) با روش تاگوشی، رفتار ضربه‌ای لوله‌های کامپوزیتی الیاف شیشه با رزین‌های اپوکسی، ونیل‌استر و پلی‌استر را در دمای ۱۵- تا ۱۰۰ درجه سلسیوس مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد لوله با رزین اپوکسی در ۱۰۰ درجه سلسیوس بهترین عملکرد را داشته و با افزایش دما، ظرفیت حمل بار کاهش و زمان برخورد ضربه‌زننده افزایش می‌یابد [۱۷].

بر اساس مرور سوابق پژوهشی، در تمامی ساندویچ‌پنل‌های مورد مطالعه پیشین، حداقل دو لایه ABS به کار رفته است و هیچ تحقیقی به بررسی ترکیب همزمان پلی‌اورتان، یونولیت، ABS و فوم حبابدار در یک ساختار ساندویچی نپرداخته است [۱-۱۴]. همچنین، مطالعات گذشته عمدتاً با رویکرد تک هدفه بهینه‌سازی ضریب هدایت حرارتی متمرکز بوده و بهینه‌سازی همزمان عملکرد حرارتی (افزایش زمان خاموش ماندن کمپرسور) با ملاحظات اقتصادی (کمینه‌سازی هزینه) در انتخاب تعداد و ضخامت لایه‌های ترکیبی مغفول مانده است. به‌عنوان مثال، در مطالعه ماکینه و اونی (۲۰۱۹) [۹]، تنها به مقایسه عایق‌های مختلف بدون بهینه‌سازی همزمان هزینه پرداخته شده است. همچنین در پژوهش تیسن و همکاران (۲۰۱۸) [۱۲]، اثر پنل‌های عایق خلأ بر مصرف انرژی یخچال بررسی شده، اما بهینه‌سازی همزمان اقتصادی مدنظر نبوده است. از سوی دیگر، پژوهش پارک و همکاران (۲۰۱۸) [۱۳] بر خواص فیزیکی فوم پلی‌اورتان با نانو حباب‌ها متمرکز بوده و به ترکیب با سایر عایق‌ها در ساختار ساندویچی نپرداخته است.

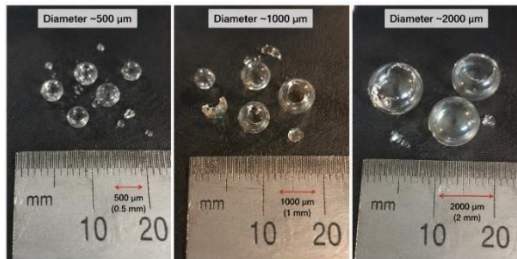
لذا نوآوری اصلی پژوهش حاضر در (۱) ترکیب همزمان چهار جنس متفاوت پلی‌اورتان، یونولیت، ABS و فوم کامپوزیت حبابدار (فتوحی و همکاران، ۲۰۲۶) در ساختار یک ساندویچ‌پنل دیواره یخچال، (۲) بهینه‌سازی دودفاه همزمان عملکرد حرارتی و اقتصادی، و (۳) استفاده از روش تاگوشی برای کاهش تعداد آزمایش‌ها از ۵۴ به ۹ مورد، خلاصه می‌شود. تعداد لایه‌ها و ضخامت هریک از جنس‌های مذکور می‌تواند در ضریب انتقال حرارت عایق ساندویچ پنل تأثیرگذار باشد افزون بر این، نوآوری دیگر در بهینه‌سازی دو هدفه همزمان شامل بهینه‌سازی زمان خاموش ماندن کمپرسور (به عنوان معیار عملکرد حرارتی) و کمینه‌سازی هزینه اقتصادی می‌باشد. همچنین، کاربرد روش تاگوشی برای طراحی آزمایشات ترکیبی چهار ماده با تعداد و ضخامت‌های متفاوت در یک ساندویچ‌پنل دیواره یخچال، می‌تواند منجر به دستیابی به ساختاری با بالاترین بازدهی حرارتی و حداقل هزینه گردد [۱۸].

لذا در پژوهش حاضر به بررسی تعداد و ضخامت لایه‌های پلی‌اورتان، یونولیت، ABS و فوم کامپوزیت حبابدار در ساندویچ پنل دیواره یخچال پرداخته شده است. از آنجائیکه چهار جنس متفاوت در تعداد و برخی در ضخامت‌های مختلف ارزیابی شده است، از روش تاگوشی در طراحی آزمایشات استفاده شد. توابع هدف بهینه نمودن زمان خاموش ماندن کمپرسور همزمان با کمینه نمودن هزینه ساخت عایق می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

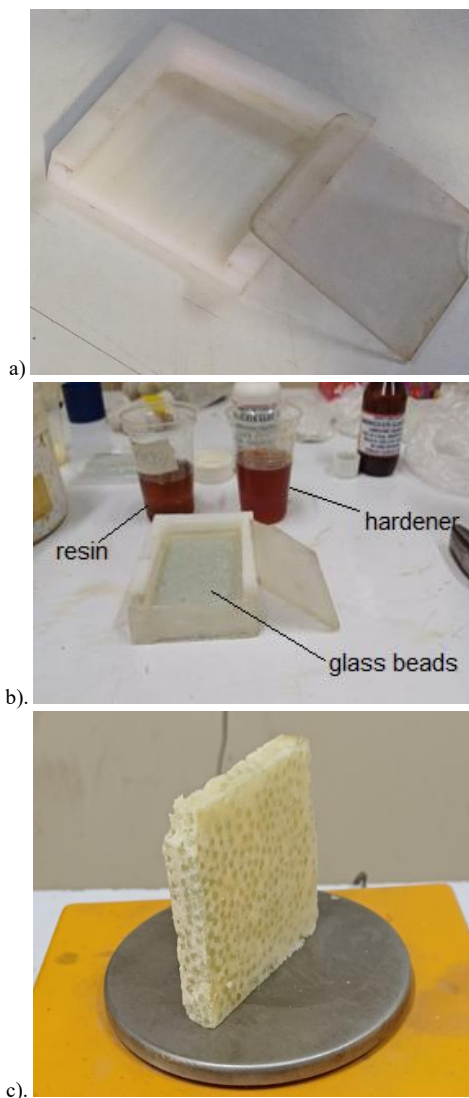
همانطور که در مقدمه آمده است هدف از این پژوهش قراردادن فوم حبابدار به همراه لایه‌های دیگر عایق در ساندویچ پنل است. لذا

بر اساس مطالعات فتوحی و همکاران (۲۰۲۶) فوم حبابدار با ۶۰ درصد حباب شیشه‌ای به قطر ۱۰۰۰ میکرون با کمترین ضریب انتقال حرارت ۰/۱۸ وات بر متر در کلون بدست آمد. لذا لایه فوم کامپوزیت با حباب‌های شیشه‌ای به قطر ۱۰۰۰ میکرون و با درصد حجمی ۶۰ درصد ساخته شد. برای ساخت هر لایه عایق فوم حبابدار،



شکل ۱ حباب‌های شیشه‌ای با ابعاد ۵۰۰ الی ۲۰۰۰ میکرومتر

Fig. 1 Hollow glass microspheres, 500–2000 μm.



شکل ۲ الف) قالب ساخت نمونه، ب) اجزاء تشکیل دهنده فوم حبابدار، ج) فوم حبابدار تولید شده

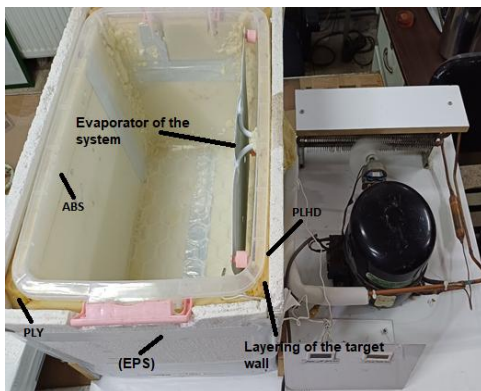
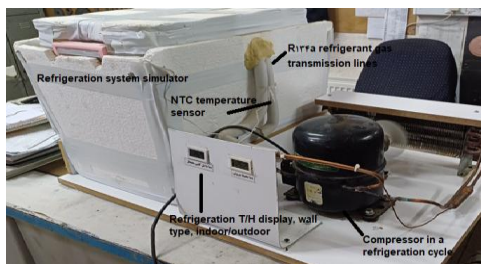
Fig. 2 (a) Sample mold, (b) Bubble foam components, (c) Produced bubble foam.

ابتدا مراحل ساخت فوم حبابدار به اختصار توضیح داده می‌شود و سپس به معرفی روش طراحی آزمایش تاگوشی برای چیدمان لایه‌های عایق پرداخته می‌شود.

۲-۱- ساخت فوم حبابدار

فوم پلی‌یورتان سخت دارای ساختار سلولی بسته و ضریب هدایت حرارتی پایینی نسبت به سایر فوم‌ها می‌باشد و به عنوان عایق در ساختارهای ساندویچی به کار می‌رود. ضخامت فوم پلی‌یورتان در تولید ساندویچ پنل وابسته به اختلاف دمای محیط داخل و خارج، میزان انتقال دما (Q) و ضریب هدایت حرارتی می‌باشد [۱۹]. مواد اولیه تولید فوم پلی‌یورتان به همراه دستورالعمل اختلاط آن از شرکت مکرر [۲۰] تهیه شد. این فوم با ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۲۵ وات بر متر در کلون از دو ماده رزین به نسبت ۴ واحد و هاردنر (ایزوسیانات) به نسبت ۱ واحد تشکیل می‌شود [۲۰]. برای ساخت فوم حبابدار، حباب‌های شیشه‌ای تو خالی با قطرهای مختلف از شرکت techglass EOE تهیه شد [۱۹] و به فوم اضافه شد. میکروکره‌های شیشه‌ای تو خالی که میکروبالون یا حباب‌های شیشه‌ای نیز از آنها یاد می‌شود، مواد غیرفلزی معدنی فوق‌العاده سبک وزن با ساختار تو خالی و یک ماده چند منظوره جدید با کارایی بالا در قرن بیست و یکم هستند که در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند [۱۹]. میکروکره‌های شیشه‌ای تو خالی با دانسیته کم (حجم بزرگ و وزن سبک)، اندازه قابل کنترل، ضریب هدایت حرارتی پایین (۰/۰۲۳ وات بر متر در کلون)، مقاومت ویژه نسبتاً بالا در برابر تنش فشاری و ... از جمله مواد منحصر به فرد و پایدار کروی شکل محسوب می‌شوند [۲۱]. در شکل ۱ حباب‌های شیشه‌ای از قطر ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر نشان داده شده است.

قالب مربع شکل در ابعاد ۱۰*۱۰ سانتی‌متر و به ارتفاع ۱ و ۱/۶ سانتی‌متر با استفاده از نرم افزار CATIA طراحی و با استفاده از جنس پلی‌آمید به کمک دستگاه فرز ساخته شد. عمق داخلی قالب برای تولید نمونه دو میلی‌متر کمتر از ارتفاع است (شکل ۲-الف) قبل از تزریق مخلوط رزین و هاردنر، کف قالب با روغن آغشته می‌شود تا از چسبیدن نمونه به کف قالب جلوگیری شود. سپس، دانه‌های کروی تو خالی با قطرهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ میکرومتر با درصدهای حجمی ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درصد درون قالب قرار می‌گیرند. در ادامه، رزین و هاردنر مطابق با فرمولاسیون شرکت مکرر در یک ظرف آزمایش (بشر) مخلوط شده و سپس به اندازه مناسب درون قالب تزریق می‌شود. سپس، درپچه قالب که از جنس PVC شفاف است، بسته شده و محصول پس از حدود ۵ دقیقه آماده می‌گردد. نمونه‌های تولید شده وزن شده و چگالی آن بدست می‌آید. با توجه به وجود ۸ اندازه مختلف حباب و هر کدام با درصد حجمی ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۶۰ درصد، ۳۲ نمونه از هر ضخامت تهیه شد.



شکل ۴ جزئیات سیستم تبرید ساخته شده
Fig. 4 Details of the fabricated refrigeration system.

عبور هوا یا حرارت از لایه‌های یونولیت، پلی‌اورتان، فوم حبابدار (PLHD و ABS بر اساس چیدمان پیشنهادی تاگوجی، دما توسط سنسور دوم اندازه‌گیری می‌شود. با تکرار لایه‌چینی بر اساس چیدمان تعیین شده توسط روش تاگوجی، آزمایش به تعداد مورد نیاز برای رسیدن به پاسخ بهینه تکرار می‌شود تا بتوان کمترین اتلاف حرارتی را تعیین نمود.

لازم بذکر است در پژوهش حاضر حالت پایدار برای محاسبات مقاومت حرارتی و یکنواختی دما در هر لایه عایق فرض شده است و اثرات لبه‌ای و پل‌های حرارتی در دیواره ساندویچ پنل نادیده گرفته شده است. همچنین این پژوهش با محدودیت‌های انجام آزمایش بر روی یک جعبه آزمایشگاهی با ابعاد ثابت (۳۰×۵۰×۴۰ سانتی‌متر)، عدم بررسی اثر سیکل‌های متفاوت عملکردی و رفتار دینامیکی سیستم تبرید، و عدم بررسی تأثیر تغییرات دمای محیطی متفاوت بر عملکرد عایق روبرو است. در جدول ۱ خواص ترموفیزیکی هر یک از لایه‌ها ارائه شده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی لایه‌های عایق استفاده شده

Table 1 Thermophysical properties of insulation layers used

Layer Material	Thermal Conductivity k (W/m·K)	Density ρ (kg/m ³)	Specific Heat Capacity Cp (J/kg·K)	Thickness (mm)	Reference
EPS (Expanded Polystyrene)	0.032	15-20	1250	5 or 10 (two layers)	[10]
Polyurethane (PU)	0.025	32-80	1400	5 or 8	[17]
ABS	0.17	1040-1080	1400	2	[1]
Bubble Foam (PLHD)	0.018	80	1100	5 or 8	[15]



شکل ۳ لایه عایق ساخته شده با فوم حبابدار با ابعاد ۳۲×۳۲ سانتی‌متر
Fig. 3 Bubble foam insulation layer, 32×32 cm.

یک مربع به ابعاد ۳۲ در ۳۲ سانتی‌متر با کنار هم قرار دادن ۴ نمونه در ۴ ردیف بدست می‌آید تا در دیواره یخچال مورد استفاده قرار گیرد. این فوم از این پس با نام PLHD نیز خوانده می‌شود. در شکل ۳ یک مربع ۳۲ در ۳۲ سانتی متری از فوم حبابدار نشان داده شده است.

۲-۲- ساخت نمونه یخچال

برای بررسی اثر لایه بندی‌ها و جنس‌های مختلف، در آزمایشگاه حرارت مرکزی دانشگاه ملی مهارت شهید بابایی قزوین، نمونه شبیه‌سازی شده یک یخچال طراحی و ساخته شد. برای این کار یک جعبه از جنس abs با ابعاد ۳۰ × ۵۰ و عمق ۴۰ سانتی‌متر استفاده شد. کف و سقف جعبه با ورق فوم یونولیت به ضخامت ۵ سانتی‌متر و سه دیواره جانبی آن با ورق فوم یونولیت به ضخامت ۲ سانتی‌متر و به فوم پلی‌اورتان به ضخامت ۲ سانتی‌متر پوشانده شد. دیواره جانبی چهارم (دیواره ساندویچ پنل) که در جهت قرارگیری اواپراتور سیستم تبرید است با لایه بندی‌های مختلف که در ادامه شرح داده می‌شود نصب شد. سنسورهای حرارتی NTC (Negative Temperature Coefficient) (با دقت اندازه‌گیری $\pm 0.5^\circ\text{C}$) نیز در این دیواره نصب شد. دمای محیط آزمایشگاه در طول تمام آزمایش‌ها 1 ± 25 درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی $45 \pm 5\%$ ثابت شده است.

در شکل ۴ تمامی تجهیزات سیستم تبرید نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است اواپراتور یخچال و یک سنسور دما در داخل جعبه و یک سنسور دما و یک سنسور رطوبت (با دقت ۵٪) در بیرون یخچال مماس به دیواره ساندویچ پنل قرار داده شده است. دستگاه طوری تنظیم شده که با رسیدن دمای محفظه داخلی یخچال به -10 درجه سانتی‌گراد موتور دستگاه خاموش شده و با رسیدن دمای محفظه داخلی یخچال به 0 درجه سانتی‌گراد موتور مجدداً روشن می‌شود. زمان بین خاموش و روشن شدن موتور یخچال به عنوان تابع هدف در هر آزمایش ثبت می‌شود. دقت کورنومتر در اندازه‌گیری زمان $0.1 \pm s$ است. بعد از روشن شدن دستگاه (موتور یخچال) آزمایش شروع خواهد شد. سرمایش آغاز شده و دمای داخل کابین توسط سنسور دیواره ABS خوانده می‌شود و مقدار آن در مانیتور نمایش داده می‌شود. پس از

۳-۲- طراحی آزمایشات با روش تاگوچی

اگر در بررسی پدیده ای m متغیر و هریک در L سطح ($L > 2$) مطرح باشد، تعداد کل ترکیبات ممکن (N) یعنی فاکتوریل آنها عبارتست از $N = L^m$ روش تاگوچی به جای استفاده از ترکیبات فاکتوریلی کامل، از ترکیبات فاکتوریلی جزئی بهره می‌برد که در آن برای طراحی ترکیبات سطوح متغیرها، از آرایه‌های متعامد استفاده می‌کند. آرایه متعامد یک ماتریس فاکتوریل جزئی است که مقایسه موزون تمام متغیرها یا اثرات متقابل آن‌ها را تضمین می‌کند [۲۲]. هدف از طراحی آزمایشات به روش تاگوچی آنست که ترکیب بهینه‌ای از فاکتورهای مؤثر با کمترین تعداد آزمایشات تعیین شود. این روش متعادل است یعنی وزن هیچ فاکتوری بیشتر یا کمتر از سایر فاکتورها نیست و هریک از فاکتورها مستقل از سایرین بررسی می‌شود. روش تاگوچی در نرم‌افزار Minitab در دسترس است.

برای بررسی اثر فوم حبابدار بر عایق ساندویچ پنل، ساندویچ پنبلی با استفاده از جنس‌های مختلف عایق موجود در بازار و نیز عایق حبابدار جدید مود بررسی قرار گرفت. هدف از در نظر گرفتن جنس‌های مختلف، بررسی تاثیر وجود یا عدم وجود آن جنس همزمان با عایق کامپوزیت حبابدار و مقایسه با سایر ساندویچ پنل‌های موجود است. معمولا در ساندویچ پنل‌ها یک یا دو لایه ABS وجود دارد. لذا دو سطح تغییر برای ABS در نظر گرفته شد، یعنی یک لایه استفاده شود یا دو لایه. در برخی ساندویچ پنل‌ها فوم پلی اورتان با ضخامت‌های مختلف به کار می‌رود، لذا در پژوهش حاضر نیز عدم وجود یا وجود پلی اورتان با دو ضخامت مختلف مورد بررسی قرار گرفت، بنابراین در سه سطح تغییر در نظر گرفته شد. یعنی یا اصلاً پلی اورتان استفاده نشود، یا یک لایه به ضخامت ۵ میلی‌متر و یا یک لایه به ضخامت ۸ میلی‌متر به کار رود. یونولیت نیز در سه سطح تغییر عدم وجود یونولیت در ساندویچ پنل، یک لایه و یا دو لایه استفاده شد. در نهایت فوم حبابدار نیز در سه سطح تغییر عدم وجود، و وجود با دو ضخامت ۵ و ۸ میلی‌متر به کار رفت تا اثر آن در ترکیب همزمان با سایر عایق‌ها مورد بررسی قرار گیرد. لذا به طور کلی جنس‌ها و ضخامت‌های مختلف مطابق جدول ۲ هستند.

در جدول ۲ علاوه بر جنس و سطح تغییر لایه‌ها، هزینه یک لایه ۳۲ در ۳۲ سانتی‌متری از هر جنس نیز نشان داده شده است. به جدول ۳ چیدمان لایه‌های ۹ آزمایش پیشنهاد شده در روش تاگوچی

عنوان نمونه، هزینه یک لایه پلی اورتان با ضخامت ۵ میلی‌متر، ۱۸۰۰۰ و هزینه یک لایه پلی اورتان با ضخامت ۸ میلی‌متر ۲۰۰۰۰ واحد است.

با توجه به جدول ۲ سه پارامتر سه سطحی و یک پارامتر ۲ سطحی برای چیدمان لایه‌ها مدنظر قرار گرفته است. اگر قرار باشد کلیه پارامترها با سطوح تغییر آن‌ها بررسی شود، لازم است $2 \times 3 \times 3 \times 3 = 54$ حالت مختلف از چیدمان این لایه‌ها آزمایش شود.

جدول ۲ جنس، سطح تغییرات لایه‌ها و هزینه تمام شده هر لایه
Table 2 Material, layer variation levels, and total cost per layer.

Cost per unit (32×32 cm layer)	Surface change	Layer or thickness	Material
25,000	0, 1, 2	0 layer, 1 layer, 2 layers	UL (Styrofoam)
180,000 and 200,000	0, PLY1, PLY2	0 layer, one layer with 5 mm thickness, one layer with 8 mm thickness	PLY (Polyurethane)
90,000	1, 2	one layer or two layers	ABS
150,000 and 180,000	0, PLHD1, PLHD2	0 layer, one layer with 5 mm thickness, one layer with 8 mm thickness	PLHD (Bubble foam)

به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و از طرفی حصول نتایج قابل اتکا، از روش تاگوچی موجود در نرم‌افزار Minitab 16 برای طراحی آزمایشات استفاده شد. بهتر است سطوح پارامتر ABS را نیز به سه سطح رساند و سطح سوم را برابر یکی از دو سطح دیگر در نظر گرفت تا کمترین تعداد آزمایشات طراحی شده در تاگوچی را داشت. تاگوچی برای چهار پارامتر سه سطحی آرایه L_9 یعنی ۹ آزمایش را پیشنهاد می‌دهد، یعنی به جای ۵۴ آزمایش مختلف، کافی است ۹ آزمایش انجام شود. چیدمان لایه‌ها نیز در هریک از ۹ آزمایش پیشنهاد شده در جدول ۳ ارائه شده است. به عنوان نمونه در آزمایش شماره ۱ کافی است سطح تغییر اول همه جنس‌ها در چیدمان به کار رود، این چیدمان به نام ۱-۱-۱-۱ در جدول ۳ مشخص شده است، یعنی فقط یک لایه ABS در چیدمان استفاده شود و یا در آزمایش شماره ۸، با چیدمان ۳-۲-۱-۳ دو لایه یونولیت، یک لایه پلی اورتان با ضخامت ۵ میلی‌متر و یک لایه ABS به همراه فوم حبابدار با ضخامت ۸ میلی‌متر به کار می‌رود.

Table 3 Layer arrangements for the 9 Taguchi experiments.

Equivalent thermal resistance (K/W)	Description	PLHD ABS PLY UL Arrangement	Test number
0.066	Only one layer of ABS	0 1 0 0 1-1-1-1	1
0.362	Three layers from three materials without Styrofoam	PLHD1 1 PLY1 0 1-2-1-2	2
0.620	Two layers of ABS, one layer of polyurethane, one layer of bubble foam, without Styrofoam	PLHD2 2 PLY2 0 1-3-3-3	3
0.538	Three layers with three materials, without polyurethane	PLHD2 1 0 1 2-1-1-3	4
0.332	Two layers of ABS, one layer of polyurethane, one layer of Styrofoam, without bubble foam	0 2 PLY1 1 2-2-3-1	5
0.593	Four layers from four materials	PLHD1 1 PLY2 1 2-3-1-2	6
0.469	Two layers of ABS, one layer of Styrofoam, one layer of bubble foam, without polyurethane	PLHD1 2 0 2 3-1-3-2	7
0.710	Four layers from four materials	PLHD2 1 PLY1 2 3-2-1-3	8
0.562	Three layers without bubble foam	0 1 PLY2 2 3-3-1-1	9

۳- نتایج و بحث

بر اساس چیدمان پیشنهاد شده در جدول ۴ برای هر ۹ آزمایش، از سنسورهای بیرونی و داخلی دیواره، دما و زمان روشن و خاموش شدن موتور یخچال ثبت شد. بیشینه عدم قطعیت داده‌های دما و زمان به ترتیب 0.7°C و 0.9 Sec و $-$ در سطح اطمینان 0.95 است. در جدول ۴ زمان خاموش ماندن کمپرسور بر حسب ثانیه به عنوان تابع هدف در نه آزمایش مذکور نشان داده شده است.

در آزمایش شماره ۱، چیدمان تنها شامل یک لایه عایق ABS (بدون یونولیت، پلی‌اورتان و فوم حبابدار) بوده است. با حذف لایه‌های عایق، ضریب انتقال حرارت کلی به شدت افزایش یافته و نرخ نفوذ حرارت از محیط خارج به داخل جعبه به‌طور قابل‌توجهی بیشتر می‌شود. در نتیجه، دمای داخلی جعبه (که از -10 به 0 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد) در مدت زمان بسیار کوتاه‌تری (55 ثانیه) به حد آستانه رسیده و کمپرسور زودتر روشن می‌شود. این در حالی است که در سایر آزمایش‌ها با وجود لایه‌های عایق متعدد، مقاومت حرارتی کل دیواره افزایش یافته و زمان خاموش ماندن کمپرسور به‌طور قابل‌توجهی بیشتر شده است (به‌عنوان مثال آزمایش ۸ با 750 ثانیه).

نتایج برای تحلیل در نرم افزار Minitab16 وارد شد. اثر هریک از عوامل بر تابع هدف را تحلیل واریانس مشخص می‌کند. برای محاسبه اثر هر سطح از هر لایه، متوسط مقدار تابع هدف آزمایشاتی که آن سطح در آنها وجود دارد حساب می‌شود. به عنوان نمونه برای سطح ۲ لایه پلی‌اورتان (PLY1) در آزمایشات شماره ۲، ۵ و ۸ با مقادیر TIME جدول ۴ برابر به ترتیب 520 ، 550 و 750 ، اثر آن بر تابع هدف برابر $590 = (520 + 550 + 750) / 3$ است که در جدول ۵ نشان داده شده است.

به همین ترتیب برای هر سه سطح کلیه جنس‌ها اثر بر تابع هدف حساب شد و بر اساس بیشترین دامنه تغییرات بر تابع هدف، لایه‌های مختلف رتبه‌بندی می‌شوند. در جدول ۵ نتیجه تحلیل واریانس عوامل مؤثر (لایه‌ها) بر تابع هدف نشان داده شده است. مطابق جدول ۵، جنس PLHD بیشترین تأثیر را بر تغییرات تابع هدف داشته است و رتبه آن ۱ است. جنس یونولیت در رتبه دوم تأثیر بر تابع هدف قرار دارد. پس از آن پلی‌اورتان در رتبه سوم و در نهایت ABS در رتبه آخر تأثیر بر تابع هدف است.

جدول ۴ نتایج زمان خاموش بودن کمپرسور

Table 4 Compressor off-time results.

Test No	Arrangement	TIME (Sec)
1	1-1-1-1	55
2	1-2-1-2	520
3	1-3-3-3	650
4	2-1-1-3	625
5	2-2-3-1	500
6	2-3-1-2	690
7	3-1-3-2	663
8	3-2-1-3	750
9	3-3-1-1	570

جدول ۵ نتیجه تحلیل واریانس اثر سطوح تغییر جنس‌های مختلف بر

تابع هدف

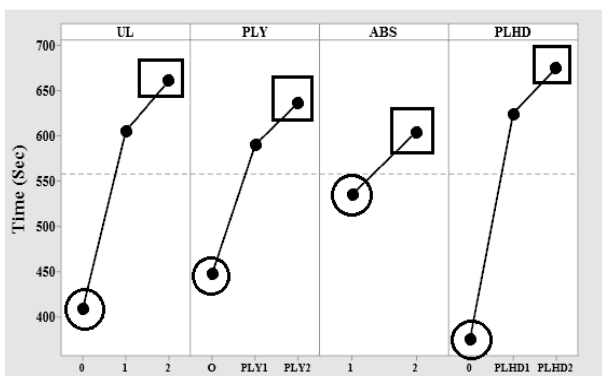
Table 5 ANOVA results for the effect of material level changes on the objective function.

Level (surface change level of each material)	UL	PLY	ABS	PLHD
1	408.3	447.7	535.0	375.0
2	605.0	590.0	604.3	624.3
3	661.0	636.7		675.0
Delta (range of objective function changes with level change of each material)	252.7	189.0	69.3	300.0
(Effectiveness rank of each material on the objective function) Rank	2	3	4	1

شکل ۵ به صورت نمودار، تأثیر سطوح جنس‌های مختلف بر روی تابع هدف را در ۹ آزمایش صورت گرفته بر اساس تابع هدف "بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور" نشان می‌دهد. محور افقی این نمودارها مقدار کمی پارامتر یا سطح تغییر هر جنس و محور قائم زمان خاموش ماندن کمپرسور بر حسب ثانیه است. در نمودار شکل ۵ نیز جنس لایه PLHD دارای بیشترین دامنه تغییرات بر تابع هدف است.

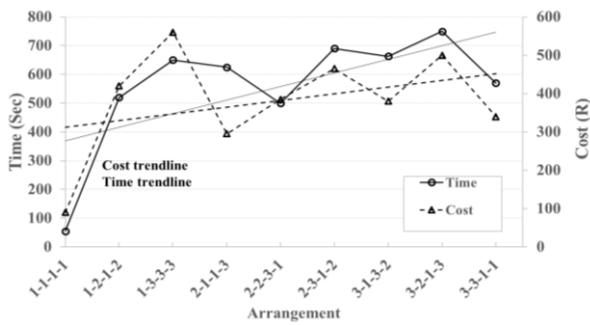
مطابق شکل ۵:

- لایه PLHD دارای بیشترین دامنه تغییرات است، یا با تغییر آن، تابع هدف بیشترین اثرپذیری را دارد.
- لایه ABS دارای کمترین دامنه تغییرات و لذا کمترین اثر بر تابع هدف است.
- به ازای سطح یک کلیه پارامترها یعنی اگر فقط یک لایه عایق از جنس ABS استفاده شود، زمان خاموش ماندن کمپرسور کمترین مقدار یعنی 55 ثانیه است (علامت $\circ$ در شکل ۵).
- بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور مربوط به چیدمان با سطح ۳ کلیه پارامترهاست. یعنی اگر دو لایه یونولیت؛ یک لایه پلی‌اورتان با ضخامت 8 میلی‌متر، دو لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار با ضخامت 8 میلی‌متر استفاده شود، بهترین ترکیب با بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور بدست می‌آید. (علامت $\square$ در شکل ۵).



شکل ۵ تأثیر پارامترها بر زمان خاموش ماندن کمپرسور

Fig. 5 Parameter effects on compressor off-time.



شکل ۶ تغییرات هزینه و زمان خاموش ماندن کمپرسور در ۹ آزمایش
Fig. 6 Cost and compressor off-time variations in the 9 experiments.

چیدمان‌هایی که هزینه آن‌ها زیر خط برازش است عبارتند از ۱-۱-۱، ۱-۱-۲، ۳-۱-۱، ۳-۱-۲، ۲-۳-۱، ۳-۳-۱ و ۳-۳-۲. از چیدمان‌های مذکور فقط در چیدمان ۲-۱-۱-۳ زمان خاموش ماندن کمپرسور بالای خط برازش است. یعنی در پژوهش حاضر و با در نظر گرفتن کلیه فرضیات، عایقی با یک لایه یونولیت، یک لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار و بدون هیچ گونه پلی اورتانی به عنوان عایق بهینه معرفی شده است.

مصرف انرژی با زمان خاموش ماندن کمپرسور نسبت عکس دارد و هرچه زمان خاموش ماندن کمپرسور بیشتر باشد، مصرف انرژی کمتر است. در عایق بهینه (یعنی آزمایش ۴) نسبت به عایق‌هایی که در آنها فوم حبابدار استفاده نشده است، مثل آزمایش‌های شماره ۱، ۵ و ۹، به ترتیب ۱۰۰۰، ۲۵ و ۹/۶ درصد افزایش زمان خاموش ماندن کمپرسور یا همان کاهش مصرف انرژی رخ داده است. آزمایش ۱ که فقط شامل یک لایه ABS است، اما دو آزمایش دیگر حاوی سه جنس ABS، یونولیت و پلی اورتان هستند. از نظر تعداد لایه‌ها پژوهش حاضر با ۳ لایه ABS+یونولیت + فوم حبابدار در محدوده بهینه تحقیقات پیشین (Makinde & Oni, 2019; Pásztor et al., 2018; Qiu et al., 2018) [۹ و ۱۰ و ۱۱] یعنی ۲ تا ۵ لایه قرار دارد. از نظر کاهش مصرف انرژی نیز تحقیق حاضر با ۲۵٪ کاهش مصرف انرژی نسبت به Michel et al. (2017) [۱۴] که دیوار عایق چند لایه حاوی یک لایه کامپوزیتی از فوم PU-PCM را بررسی نمود و ۱۸ درصد کاهش مصرف انرژی داشت، عملکرد بهتری داشته است.

لازم به ذکر است که آزمایش‌های این پژوهش بر روی یک جعبه آزمایشگاهی با ابعاد ۴۰×۵۰×۳۰ سانتی‌متر و با سیستم تبرید VCR (سیستم تبرید تراکمی بخار) طراحی و ساخته شده است. اگرچه ابعاد و توان کمپرسور و چیدمان لایه‌های عایق، مشابه یخچال‌های واقعی خانگی در نظر گرفته شده است، اما تعمیم مستقیم نتایج به یخچال‌های با ابعاد، توان و سیکل‌های عملکردی متفاوت نیازمند مطالعات تکمیلی می‌باشد. با این حال، روندهای مشاهده‌شده (نظیر تأثیر غالب فوم حبابدار بر افزایش زمان خاموش ماندن و کاهش مصرف انرژی) به عنوان یک روند کلی قابل تعمیم است.

چیدمان ۳-۳-۳ در بین ۹ چیدمان پیشنهاد شده اولیه تاگوچی (جدول ۴) وجود ندارد. برای محاسبه زمان خاموش ماندن کمپرسور در این چیدمان، از پیش‌بینی تاگوچی استفاده می‌شود. نتیجه پیش‌بینی تاگوچی در جدول ۶ ارائه شده است. یعنی با جایگزینی سطح سه کلیه پارامترها، تابع هدف "زمان خاموش ماندن کمپرسور" به ۹۰۲ ثانیه رسیده است، لذا نسبت به هر یک از چیدمان‌های پیشنهاد شده اولیه زمان خاموش ماندن کمپرسور بیشتر شده است. هزینه ساخت چیدمان پیشنهادی تاگوچی بر اساس قیمت ارائه شده در جدول ۲ برابر ۵۳۰۰۰۰ = (۲۵۰۰۰×۲)+۱۸۰۰۰+۹۰۰۰+۲۰۰۰۰ واحد است.

اگر بحث هزینه در نظر گرفته نشود، چیدمان ۳-۲-۱ یعنی ساندویچ پنبلی با یک لایه یونولیت، یک لایه پلی اورتان با ضخامت ۸ میلی‌متر، یک لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار ۸ میلی‌متری دارای بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور است. اما، با افزایش تعداد لایه‌ها و ضخامت آن‌ها افزایش زمان خاموش ماندن کمپرسور دور از انتظار نیست، درحالی‌که این افزایش تعداد لایه‌ها منجر به افزایش هزینه ساخت فوم می‌شود. بنابراین در طرح بهینه لازم است علاوه بر زمان خاموش ماندن کمپرسور، جنبه اقتصادی طرح نیز مورد بررسی قرار گیرد. به منظور تعیین چیدمان بهینه، لازم است چیدمانی انتخاب شود که کمترین هزینه را در بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور داشته باشد. بدین منظور هزینه ساخت هر یک از چیدمان‌ها نیز بر اساس قیمت واحد ارائه شده در جدول ۲ محاسبه شده است. در نمودار شکل ۶ هزینه و زمان خاموش ماندن کمپرسور در هر یک از ۹ آزمایش مذکور نشان شده است. برای بهینه‌سازی دوهدفه (بیشینه‌سازی زمان خاموش ماندن کمپرسور و کمینه‌سازی هزینه ساخت)، با برازش خطوط روند بر داده‌های زمان و هزینه، نقاطی که هم‌زمان دارای زمان بالاتر از خط روند زمان و هزینه پایین‌تر از خط روند هزینه هستند، به عنوان نقاط بهینه در نظر گرفته می‌شوند. این روش در ادبیات بهینه‌سازی تجربی با تعداد داده‌های محدود کاربرد دارد و مبنای علمی آن بر اساس تحلیل گرافیکی و انتخاب نقاط غالب است. در پژوهش حاضر به دلیل محدودیت تعداد آزمایش‌ها (۹ آزمایش) و رویکرد تجربی، از این روش تحلیلی-گرافیکی استفاده شده است. لذا، بر هر یک از منحنی‌های زمان و هزینه آزمایش‌ها، خطی برازش داده شده است. خط برازش داده شده بر تغییرات زمان خاموش ماندن کمپرسور (Time) به صورت توپر و خط برازش داده شده بر تغییرات هزینه (Cost) به صورت خط چین نشان داده شده است. ترکیبی بهینه است که بالای خط Time و زیر خط Cost باشد و همچنین بیشترین فاصله بین Time و Cost را داشته باشد.

جدول ۶ نتیجه پیش‌بینی تاگوچی

Settings				Prediction
UL	PLY	ABS	PLHD	Mean
3	3	3	3	902.667 (Sec)

انرژی نسبت به مطالعات پیشین که کاهش ۱۸ درصدی را گزارش کرده اند، عملکرد بهتری داشته است.

بیانیه هوش مصنوعی: در جریان آماده سازی این اثر، نویسندگان از [DeepSeek] به منظور یافتن عنوان مقالات مرتبط با موضوع پژوهش استفاده کرده اند. پس از استفاده از این سرویس، نویسندگان با جستجو در منابع علمی، متن مقالات معرفی شده را دانلود و مطالعه نموده و به صورت خلاصه در متن مقاله ارائه نموده اند و مسئولیت کامل محتوای مقاله را برعهده می گیرند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

نقش نویسندگان: این پژوهش حاصل بخشی از پایان نامه دکتری نویسنده اول است، نویسندگان دوم و سوم اساتید مشاور و راهنما هستند که از ابتدای تعریف موضوع پژوهش، روند انجام آزمایشات، تحلیل نتایج و سپس تدوین و ویرایش مقاله در کنار دانشجو بوده اند.

تعارض منافع: در این مقاله از برخی نتایج حاصل از رساله دکتری نویسنده اول استفاده شده است. هیچ تعارض منافع دیگری برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- [1] Z. Li, S. Chen, C. Zhang, and D. Tang, "Experimental study on the thermal insulation and load-bearing performances of hybrid sandwich structures at elevated temperatures," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 255, p. 127831, 2026/02/0, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.127831.
- [2] Y. U. Kim, S. Yang, S. Wi, and S. Kim, "Evaluation of heterogeneous core sandwich panels for energy efficiency and fire safety in warehouse buildings," *Applied Thermal Engineering*, vol. 249, p. 123455, 2024/07/15/ 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123455.
- [3] Z. Gemici, M. K. Sevindir, and H. Demir, "A second-law analysis-based analytical method for insulation thickness optimization in a space with constant insulation volume," *Applied Thermal Engineering*, vol. 282, p. 128880, 2026/01/01/ 2026, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128880.
- [4] W. Hu, J. Li, G. Wu, and L. Liao, "Thermal performance evaluation and optimization of insulation systems for cold storage buildings," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 3159, no. 1, p. 012002, 2025/12/01 2025, doi: http://doi.org/10.1088/1742-6596/3159/1/012002.

تفسیر فیزیکی نتایج نشان می دهد که فوم حبابدار با بیشترین دامنه تغییرات (۳۰۰ ثانیه) در جدول ۴، به دلیل کاهش قابل توجه ضریب هدایت حرارتی مؤثر (از $0.25/W \cdot m \cdot K$ به $0.18/W \cdot m \cdot K$) و افزایش مقاومت حرارتی لایه عایق، بیشترین تأثیر را بر افزایش زمان خاموش ماندن کمپرسور دارد. یونولیت با دامنه تغییرات ۲۵۲ ثانیه در رتبه دوم قرار دارد که ناشی از ساختار سلول بسته و ضریب هدایت حرارتی پایین آن است. پلی اورتان با دامنه ۱۸۹ ثانیه در رتبه سوم و ABS با دامنه ۶۹ ثانیه در رتبه چهارم تأثیرگذاری قرار دارد. همچنین افزایش ضخامت لایه ها از ۵ به ۸ میلی متر، با افزایش مقاومت رسانشی زمان خاموش ماندن را افزایش می دهد. در چیدمان بهینه (آزمایش ۴: یک لایه یونولیت، یک لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار بدون پلی اورتان)، مقاومت حرارتی معادل k/W 0.538 محاسبه شده است که در مقایسه با چیدمان های بدون فوم حبابدار (آزمایش های ۱ و ۵)، افزایش قابل توجهی داشته و منجر به کاهش ۲۵ درصدی مصرف انرژی شده است.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر چهار لایه عایق پلی اورتان، یونولیت (EPS)، ABS و فوم حبابدار با ضخامت های مختلف در ساختار ساندویچ پنل برای دیواره یخچال به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به ۴ جنس با تعداد و ضخامت های مختلف برای لایه های عایق ها، از روش تاکوچی برای طراحی آزمایشات استفاده شد و به جای ۵۴ آزمایش، با ۹ آزمایش اثرات جنس های مذکور بر عملکرد حرارتی یخچال ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. برای بهینه سازی، دو هدفه بیشینه زمان خاموش ماندن کمپرسور و کمینه هزینه ساخت مدنظر قرار گرفت. یک جعبه یخچال ساخته شد و لایه های عایق بر اساس چیدمان های پیشنهادی تاکوچی در یکی از دیواره های یخچال نصب شد. زمان خاموش ماندن کمپرسور یخچال و دمای داخل و بیرون یخچال ثبت شد. نتایج نشان داد چنانچه بحث هزینه در نظر گرفته نشود، ساندویچ پنلی با یک لایه یونولیت، یک لایه پلی اورتان با ضخامت ۸ میلی متر، یک لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار ۸ میلی متری دارای بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور است. اما، با در نظر گرفتن هزینه ساخت فوم، ساندویچ پنلی با یک لایه یونولیت، یک لایه ABS و یک لایه فوم حبابدار و بدون لایه پلی اورتانی به عنوان عایق بهینه معرفی شد. این چیدمان هر دو تابع هدف بیشترین زمان خاموش ماندن کمپرسور و کمترین هزینه را پوشش داده است. همچنین در این چیدمان بهینه نسبت به عایق هایی که حاوی سه جنس یونولیت، پلی اورتان و ABS هستند و در آنها فوم حبابدار استفاده نشده است، ۲۵ درصد کاهش مصرف انرژی رخ داده است. از نظر تعداد لایه ها پژوهش حاضر با ۳ لایه ABS+یونولیت + فوم حبابدار در محدوده بهینه تحقیقات پیشین یعنی ۲ تا ۵ لایه قرار دارد. از نظر کاهش مصرف انرژی نیز تحقیق حاضر با ۲۵٪ کاهش مصرف

- [15] M. Akbari Paydar, B. Mohammad Kari, M. Maerefat, and M. Abravesh, "Optimum Insulation Thickness Based on Energy Carriers Different Tariffs in Climatic Condition of Tehran," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 1447-1456, 2019. [Online]. Available: https://mme.modares.ac.ir/article_10685_798d1c2813cbdf8bcd8b388db0e32d496.pdf. (In Persian)
- [16] H. Ramin, P. Hanafizadeh, and M. A. Akhavan Behabadi, "Thermal, Economical and Environmental Optimization of Insulation Thickness in Residential Building's Wall," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 13, pp. 252-255, 2017. [Online]. Available: https://mme.modares.ac.ir/article_9540_d1d6a7eae40b025e869ac0853049efc2.pdf. (In Persian)
- [17] Torabizadeh, M. O. Maleki, S. " Application of Taguchi Method to Optimization Design of Effective Parameters of Composite Pipes under Low Velocity Impact in Different Temperature Conditions Mechanical Engineering, University of Tabriz, vol. 52, no. 4, pp. 263-272, 2023, doi: 10.22034/jmeut.2022.53548.3171.
- [18] E. Fotuhi, Nikian, M., Rostamabadi, M. , "Experimental investigation of the effect of glass bubbles in the structure of polyurethane foam composite on apparent thermal conductivity.," *Journal of heat and mass transfer research*, vol. (under review), 2026, doi: (under review).
- [19] "www.olanbeads.com."
<https://www.bing.com/search?q=www.olanbeads.com&qsn&form=QBRE&sp=-1&lq=0&pq=www.olanbeads.com&sc=0-17&sk=&cvid=C0C5VA6E527647B09FF0A339A4E57F90&ntref=1> (accessed).
- [20] "www.mokarrar.pu.comA reputable company producing thermal insulation foams in Iran."
<https://mokarrargroup.com/ProductDetails/74/> (accessed).
- [21] "hollomicrospheres.com."
<https://www.hollow-microspheres.com> (accessed).
- [22] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*. Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- [5] M. Jabeur, R. Ben Amor, S. Souissi, O. Hamdaoui, and A. Elloumi, "Optimizing thermal conductivity in 3D-printed composites via Taguchi parameter analysis," *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, vol. 10, no. 5, pp. 4403-4414, 2025/10/01 2025, doi: 10.1007/s41207-025-00871-6.
- [6] C. Zheng, S. Zhang, G. Feng, M. Fan, and K. Hu, "Seasonal adaptability analysis and thermal performance optimization of breathable and heterogeneous phase change material (B&H-PCM) walls," *Renewable Energy*, vol. 254, p. 123688, 2025/12/01/ 2025, doi: 10.1016/j.renene.2025.123688.
- [7] A. aheramsyah, E. M. Wardhana, and A. T. R. Kisserah, "Utilization of Mixture of Teak Wood Sawdust and Bagasse Fiber using Treatment of Fiber Variations and Alkali NaOH Immersion as A Refrigerator Insulation Material," *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, vol. 4, no. 2, pp. 78-86, 07/10 2025, doi: 10.12962/j25481479.v4i2.
- [8] Y. Tao, Z. Mao, Z. Yang, and J. Zhang, "Preparation and characterization of polymer matrix passive cooling materials with thermal insulation and solar reflection properties based on porous structure," *Energy and Buildings*, vol. 225, p. 110361, 2020/10/15/ 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110361.
- [9] M. T. Makinde and T. O. Oni, "Improvement on Energy Consumption of Household Refrigerator," *Current Journal of Applied Science and Technology*, vol. 36, no. 2, pp. 1-15, 07/01 2019, doi: 10.9734/cjast/2019/v36i230225.
- [10] T. Qiu, G. Wang, Q. Xu, and G. Ni, "Study on the thermal performance and design method of solar reflective-thermal insulation hybrid system for wall and roof in Shanghai," *Solar Energy*, vol. 171, pp. 851-862, 2018/09/01/ 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.036.
- [11] Z. Pásztor, T. Horváth, S. V. Glass, and S. Zelinka, "Experimental investigation of the influence of temperature on thermal conductivity of multilayer reflective thermal insulation," *Energy and Buildings*, vol. 174, pp. 26-30, 2018/09/01/ 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.06.012.
- [12] C. M. Susan Thiessen FTK, "The effectiveness of using panel vacuum insulation in home refrigerators," *International Journal of Refrigeration*, vol. 18, no. IJIR4099, p. 18, 2018.
- [13] Y.-G. Park, J.-H. Lee, A. R. Joo, and S.-H. Lee, "Effect of Nano-bubble Application on the Properties of Water Blown Rigid Polyurethane Foam," *Polymer Korea*, vol. 42, pp. 215-222, 03/31 2018, doi: 10.7317/pk.2018.42.2.215.
- [14] B. Michel, P. Glouannec, A. Fuentes, and P. Chauvelon, "Experimental and numerical study of insulation walls containing a composite layer of PU-PCM and dedicated to refrigerated vehicle," *Applied Thermal Engineering*, vol. 116, pp. 382-391, 2017/04/01/ 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.117.