

## اندازه‌گیری عملکرد حرارتی دیوار خارجی دارای عایق آیروژلی هوشمند شبیه‌سازی شده در مقایسه با دیوار مشابه فاقد عایق\*

کاوه ایروانی<sup>۱\*</sup>، حیدر جهان بخش<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه پیام نور تهران شرق، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه پیام نور تهران شرق، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱/۱۹، تاریخ پذیرش نهایی: ۹۷/۲/۱۹)

### چکیده

در دهه‌های اخیر، اثرات مخرب مصرف بی‌رویه سوخت‌های تجدیدناپذیر و کم‌توجهی به مفهوم پایداری، صدمات قابل توجه‌ای را به محیط زیست وارد کرده است. براساس آمار مراکز معتبر پژوهشی، حدود چهل درصد از انرژی مصرفی بشر در بخش ساختمانی به مصرف می‌رسد، بنابراین توجه به بخش ساختمان از اهمیت بالایی برخوردار است. مصرف بهینه انرژی و کاهش تلفات حرارتی و بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، از اصول معماری پایدار هستند. دیوار خارجی دارای عایق آیروژلی هوشمند (هوشمندی عایق به صورت دستی اعمال شد)، برنامه اصلی این پژوهش تجربی و نوآورانه می‌باشد. آزمون‌ها به صورت تجربی بر روی دو اتاق آزمون و کنترل صورت گرفت و نتایج مورد مقایسه واقع شد. علت بکارگیری عایق آیروژلی، نخست به دلیل ممتاز بودن خاصیت عایق گرمایی این ماده بود و دیگر اینکه طبق نظر متخصصین دانشکده شیمی دانشگاه تهران، امکان ساخت آیروژل با خاصیت عایقی هوشمند، نسبت به محرک‌های محیطی امکان‌پذیر است. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که با فرض مشخصات اتاقک‌ها؛ اتاق آزمون دارای دیواری با دو لایه عایق آیروژلی هوشمند، نسبت به اتاق کنترل کاملاً مشابه اما فاقد عایق؛ در طول ۲۴ ساعت  $0/9 \pm 28/8$  کیلو ژول انرژی بیشتری را به داخل اتاقک آزمون انتقال می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی

دیوار خارجی، عایق آیروژل، هوشمندی، اتاقک آزمون، انرژی.

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد نگارنده اول با عنوان: «ارزیابی عملکرد عایق حرارتی کنترل پذیر آیروژلی جهت تامین آسایش حرارتی ساختمان در اقلیم شهر تهران» است که به راهنمایی نگارنده دوم در دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه پیام نور تهران شرق انجام شده است. \* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۳۷۰۵۹۵۳، شماره: ۰۲۱-۷۷۳۱۲۷۱۶، E-mail: ir.kaveh@gmail.com.

## مقدمه

جایگاه ویژه‌ای دارد (انصاری و دیگران، ۱۳۹۱، ۸). از نکات کلیدی در معماری پایدار، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر است و ایده بهره‌گیری از عایق حرارتی هوشمند با تعریف عملکرد خاصی از آن در ساختمان‌ها، راه را برای نیل به معماری پایدار هموارتر می‌کند. طبق آمار ارائه شده اتحادیه اروپا، سهم بخش ساختمان در حدود چهار درصد از کل انرژی مصرفی و تقریباً چهار درصد از انتشار گازهای گل‌خانه‌ای دی اکسید کربن است (Diakaki et al., 2008, 1747). در بیشتر ساختمان‌ها، جهت کاهش مصرف انرژی‌های فسیلی و بهره‌برداری از انرژی‌های برگشت‌پذیر مانند گرمای حاصل از تابش خورشید و دمای محیط، تلاش فراوانی صورت می‌گیرد. هدف این پژوهش، اندازه‌گیری عملکرد حرارتی اتاق آزمون؛ شامل نوع خاصی از دیوار خارجی دارای عایق آبروژلی هوشمند در مقایسه با اتاق کنترل دارای همان نوع دیوار اما فاقد عایق، به صورت هم‌زمان می‌باشد. در بررسی‌ها، نمونه‌ای مشابه این پژوهش از باب نوع دیوار هوشمند بکار رفته در این پژوهش مشاهده نشد. برای انجام این پژوهش، دو اتاق آزمایش و کنترل طراحی و ساخته شدند، که دیوار جنوبی‌شان جهت اعمال تغییرات متغیرهای مستقل بکارگرفته شدند (دیوار جنوبی در این پژوهش، دیوار اصلی نامگذاری می‌شود). هدف پژوهش بهره‌گیری از عایق‌های آبروژلی هوشمند در پوشش‌های خارجی ساختمان‌ها است و به جهت اینکه هنوز عایق آبروژلی با خصوصیت هوشمندی یا کنترل‌پذیری ساخته نشده است، انجام عملکرد هوشمندی به صورت دستی انجام شد؛ تا عملکرد عایق هوشمند شبیه‌سازی و نتایج آن مورد بررسی قرار بگیرد.

موضوع هوشمندی ماده، رکن مهمی از نوآوری پژوهش را به خود اختصاص داده است. ماده هوشمند در تعریفی چنین معرفی می‌شود: "موادی که در صورت اعمال محرکی خارجی مانند فشار، دما، رطوبت، PH<sup>۱</sup> و میدان‌های الکتریکی یا مغناطیسی، یک یا چند خصوصیت آن به طور ویژه می‌تواند تغییر یابد" (Schwartz, 2008, 5). در حوزه هوش مصنوعی، تعریف هوشمندی چنین است: "هر سیستمی که رفتاری سازگار برای رسیدن به محدوده‌ای از اهداف محیطی را ایجاد نماید، هوشمند نامیده می‌شود" (Fogel, 1995, xii). سازمان ملی هوافضای ایالات متحده آمریکا (NASA)<sup>۲</sup>، مواد هوشمند را چنین تعریف می‌کند: "موادی که پیکربندی‌شان را بخاطر می‌سپارند و زمانی که محرک خاصی اعمال شود، می‌توانند به آن پیکربندی تغییر شکل دهند". در این تعریف، به روشنی مشخص می‌شود که ناسا به چه شکلی می‌خواهد بر روی این مواد تحقیق کند و آنها را بکار ببندد. در تعریفی جامع‌تر از دانشنامه فناوری شیمی: مواد و ساختارهای هوشمند، آن دسته از مواردی هستند که اتفاقات محیط را حس، اطلاعات احساس شده را تحلیل و آنگاه با محیط رفتار می‌نمایند (Addington & Shodek, 2005, 8). فناوری‌های انرژی خورشیدی، منبع انرژی پاک، تجدیدپذیر و بومی را ارائه می‌دهند که اجزای ضروری توسعه پایدار هستند (Gunerhan & Hepbasli, 2007, 779). انرژی خورشیدی، از انواع انرژی‌های پاک است و در تمام نقاط جهان بدون اتلاف در فرایند انتقال به واحدهای مصرف‌کننده، در دسترس است، (Fraisie et al., 2009, 232). انرژی در دستیابی به شهری پایدار،

## ۱ - پیشینه پژوهش و مبانی نظری

با استفاده از جداره‌های چند لایه شیشه‌ای، سعی در تغییر خصوصیت رنگی لایه‌های مختلف و یا مواد بکار رفته در لایه‌ها داشته است، تا بدین سان، عملکرد حرارتی و انتقال نور خورشید به داخل ساختمان را تنظیم نمایند و البته قابل به ذکر است که آن عملکرد، به صورت مکانیکی اعمال شده است. در پژوهش حاضر، از ساختار دیوارهای مرسوم استفاده شده است در حالی که در پژوهش مورد اشاره، صرفاً از چند لایه شیشه و مواد تزریق شده در شیشه‌ها به عنوان دیوار استفاده می‌شود.

طراحی ساختمانی موفق، به جهت افزایش درخواست رضایت از نیازمندی‌های شرایط محیطی، اجتماعی و عملکرد اقتصادی، فعالیت، رو به پیچیده‌تر شدن است (Loonen et al., 2013, 483)، که بخشی از آن مربوط به هوشمندی است. اخیراً تحقیقات در زمینه مواد هوشمند، در بسیاری از حوزه‌ها پیشرفت کرده است، مانند صنایع، مهندسی پزشکی و در زمینه ساختمان‌سازی

در جستجوهای صورت گرفته، موردی مشابه پژوهش فوق یافت نشد، تنها دو مورد پژوهش تا حدودی نزدیک به مفهوم این پژوهش مشاهده شد. نخست موردی تحت عنوان: "تحلیل مفهومی و طراحی عایق هوشمند چند عملکردی طبقه‌ای" (Kimber et al., 2013)، عایقی لایه لایه از صفحات موازی را معرفی می‌نماید که با تزریق باد در میان لایه‌ها، خصوصیت عایقی از خود نشان می‌دهد و با خروج هوا از میان این لایه‌ها، ساختار فوق دارای خصوصیت رسانش گرمایی<sup>۳</sup> می‌شود. در پژوهش فوق، به روش محاسباتی مشخصات رسانشی، این ساختار مورد نقد و بررسی قرار گرفت و بررسی‌های مفهومی بدست آمده، چارچوب و چشم‌انداز مطالعات آتی جهت ساخت و طراحی آزمایشگاهی چنین موادی را در آینده ترسیم می‌نماید. پژوهشی دیگر تحت عنوان: "معرفی سیستم نوین لایه‌های ساختمانی تغییرپذیر (فناوری نو در طراحی معماری اقلیمی)" (عباسی و دیگران، ۱۳۹۴) بود. در آن پژوهش،

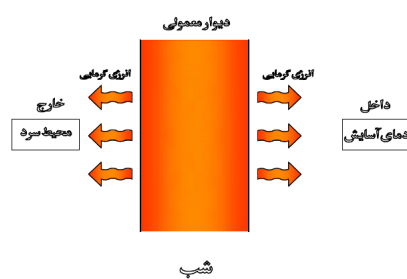
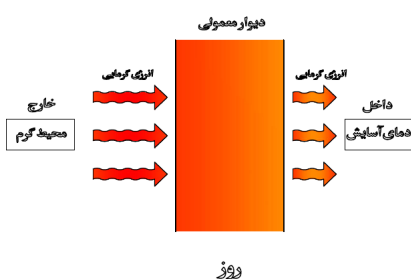
اندازه‌گیری عملکرد حرارتی دیوار خارجی دارای عایق آبروژلی هوشمند شبیه‌سازی شده در مقایسه با دیوار مشابه فاقد عایق

چپ، انرژی گرمایی روز حاصل از تابش خورشید و یا افزایش دمای محیط به دیوار منتقل می‌شود و این انرژی، به آرامی از دیوار عبور کرده و وارد محیط داخلی می‌شود و مقداری از این انرژی، در دیوار ذخیره می‌شود. در قسمت سمت راست تصویر، وضعیت این دیوار در طول شب نمایش داده می‌شود. در طول شب، انرژی گرمایی ذخیره شده در دیوار معمولی، تقریباً به صورت یکنواخت از دو سمت دیوار خارج می‌شود و متأسفانه مقدار قابل توجهی از انرژی ذخیره شده در دیوار و داخل سیستم، در طول شب به بیرون انتقال می‌یابد.

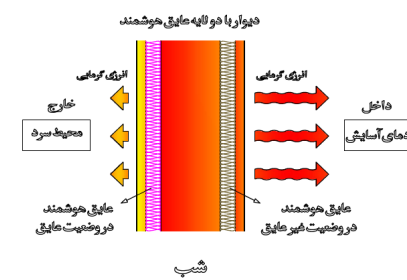
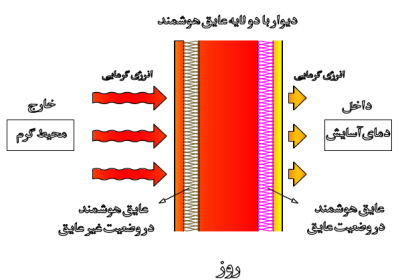
حال در تصویر ۲، سیستم پیشنهادی این پژوهش، دیوار با دولایه عایق هوشمند در همان شرایط بالا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در طول روز در فصل سرد، دیوار طوری عمل می‌کند که عایق خارجی فاقد خاصیت عایقی و عایق داخلی واجد این خاصیت باشد. بدین ترتیب انرژی محیط در قسمت میانی دیوار ذخیره می‌شود و مقدار ناچیزی از آن به محیط داخل منتقل می‌شود. در طول شب که دمای هوا کاهش می‌یابد و نیاز است تا انرژی گرمایی ذخیره شده در قسمت میانی دیوار، به داخل انتقال یابد، عایق داخلی فاقد خاصیت عایقی و عایق خارجی واجد این خاصیت می‌شوند تا مطابق تصویر سمت راست این تصویر، کمترین اتلاف حرارتی دیوار و انرژی داخل سیستم را به محیط سرد بیرون شاهد باشیم.

معاصر (8, 2017, Saidam et al.). فناوری‌های مواد هوشمند، کلید عرصه رقابت پیشرفته در قرن ۲۱ می‌باشد. مشاهده می‌شود که دیوار سنتی بین علم مواد و معماری در حال فروپاشی است، مطالعات نشان می‌دهد که هرچه ما بیشتر به سمت آینده پیش می‌رویم، ارتباط بین این دو حوزه بیشتر می‌شود (Abeer & Yousef, 2017, 139). نتایج بدست آمده نشان می‌دهد غالب مطالعات معماری در سه شاخه‌ی زیبایی‌شناسی، سازه و عملکرد گرمایی است (مهدوی‌نژاد، ۱۳۹۲، ۳۶). در اکثر کشورها، تقاضا برای مصرف انرژی در حال افزایش است در حالی که منابع انرژی مرسوم برای تامین آن وجود ندارد. بدین دلیل، ذخیره و حفظ انرژی در بخش ساختمانی تشویق می‌شود. یکی از این راه‌حل‌ها، بهبود بکارگیری انرژی ساختمان‌ها به موجب کاهش تلفات گرمایی در دیوارهای خارجی ساختمانی است (Vasco et al., 2016, 772). در زمینه ساخت دیوارهای خارجی ساختمان‌ها از لحاظ کاهش تلفات حرارتی و بهره‌گیری از شرایط اقلیمی، مطالعات و طراحی‌های ویژه‌ای صورت پذیرفته است. هدف این پژوهش، بررسی بکارگیری عایق آبروژلی هوشمند در دیوار خارجی طراحی شده به شکلی خاص است.

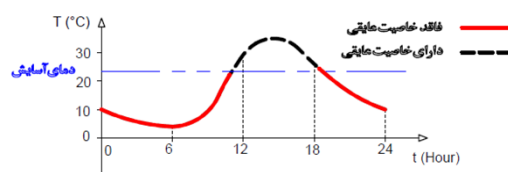
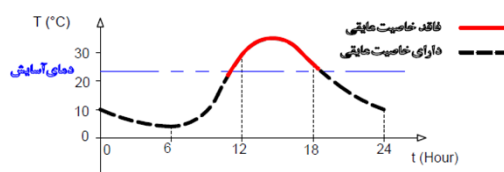
برای روشن شدن عملکرد ایده هوشمندی پژوهش، رفتار دیوار معمولی در مقایسه با دیوار هوشمند پیشنهادی این پژوهش در فصلی سرد مورد بررسی قرار گرفت. در تصویر ۱ سمت



تصویر ۱- انتقال گرما در دیوار معمولی در فصل سرد.



تصویر ۲- انتقال گرما در دیوار با دولایه عایق هوشمند در فصل سرد.



عملکرد عایق خارجی هوشمند

عملکرد عایق داخلی هوشمند

نمودار ۱- نمودار عملکرد هوشمند عایق های دیوار نسبت به تغییرات دمای محیط خارج.

متفاوت است و با توجه به این تفاوت، وضعیت متغیر وابسته در دو اتاق کاملاً مشابه، با هم مورد مقایسه قرار می‌گیرند تا فرضیه آزمون سنجیده شود (در دو اتاق، تنها متغیر مستقل متفاوت است و سایر مولفه‌ها کنترل خواهند شد تا تغییرات متغیر وابسته مربوط به دو اتاق بدست آیند). روش تحقیق مورد استفاده در این مقاله به شیوه "روش تحقیق تجربی (آزمایشی)" است. ایران فلاتی است مرتفع که در عرض جغرافیایی ۲۵-۴۰ درجه در نیمکره شمالی و در منطقه گرم واقع است (مرادی، ۱۳۸۹) و تهران پایتخت آن (واقع در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه شرقی) طبق طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، دارای اقلیم گرم و خشک قاره‌ای با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است (محمد، ۱۳۹۲، ۷۱). اقلیم شهر تهران را می‌توان اقلیمی نیمه‌گرم و خشک در نظر گرفت. محیط پژوهش فوق اقلیم شهر تهران و در اواخر آبان تا اوایل آذر ماه سال ۱۳۹۶ ه. ش (نوامبر ۲۰۱۷ میلادی) بود.

ابزار اندازه‌گیری پژوهش، سه عدد دماسنج بود و از ساعتی زنگ‌دار برای تعیین زمان‌های انجام آزمایشات استفاده شد. مطابق تصویر ۳، دماسنج دست راست "تمپریچر"<sup>۵</sup> برای اندازه‌گیری دمای محیط و دو عدد از دماسنج دست چپ "دیجیتال ترمومتر"<sup>۶</sup> برای اندازه‌گیری دمای داخل اتاقک‌ها بکار گرفته شدند و دقت اندازه‌گیری دمای<sup>۷</sup> همه دماسنج‌ها  $\pm 1$  درجه سلسیوس و وضوح دمای<sup>۸</sup> دماسنج‌ها  $0.1$  درجه سلسیوس بود. آزمایشات پژوهش در دو اتاقک آزمون بدقت طراحی و ساخته شده مجزا در محیط باز (در تماس با تابش خورشید و سایر شرایط اقلیمی) انجام گرفت و قبل از شروع آزمایشات اصلی تلاش در کالیبره کردن ابزار اندازه‌گیری و دو اتاقک نسبت به هم صورت پذیرفت. برای گردآوری اطلاعات از شیوه "مشاهده" و به طور دقیق‌تر از شیوه "مشاهده کنترل شده آزمایشگاهی" بهره‌گیری شد. از نرم‌افزار اکسل<sup>۹</sup> و متلب<sup>۱۰</sup> و از قوانین فیزیکی؛ قانون فوریه<sup>۱۱</sup> و قانون ذخیره انرژی در ماده برای محاسبات استفاده شد که در بخش‌های بعدی به آنها پرداخته شده است.

یکی از اتاقک‌های آزمون به نام "اتاق آزمایش" و دیگری "اتاق کنترل" نام‌گذاری شدند. تغییرات مورد نظر پژوهش در اتاق آزمون اعمال شد و نتایج حاصل از آن نسبت به پاسخ اتاق کنترل مورد

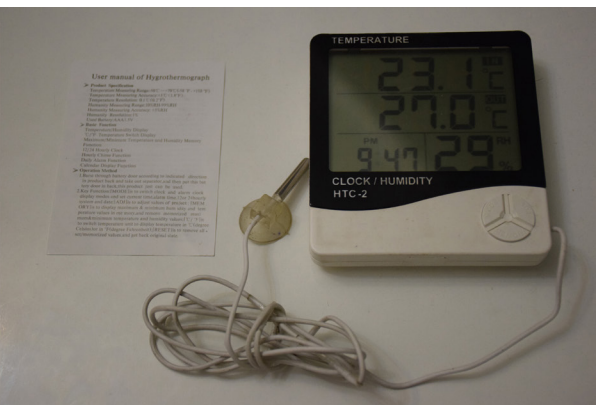
در نمودار ۱، طراحی عملکرد دو لایه عایق هوشمند و یا کنترل پذیر نسبت به دمای آسایش در طول شبانه‌روز به طور تقریبی معرفی می‌شود. به طوری که از نمودارها مشاهده می‌شود، عایق داخلی هوشمند از ساعت کمی قبل از ۱۲ تا اندکی بعد از ساعت ۱۸ دارای خاصیت عایقی است (نمودار ۱ راست)، در این ساعات، دمای محیط بالاتر از دمای آسایش است و در سایر ساعات شبانه روز، این عایق فاقد خاصیت عایقی خواهد بود. در مورد عایق خارجی هوشمند رفتاری عکس عایق هوشمند داخلی در نظر گرفته می‌شود (نمودار ۱ چپ). کمی عدم انطباق نقطه تغییر فاز نمودارها با نقطه تماس خط دمای آسایش، به علت اینرسی حرارتی قسمت اندود خارجی و داخلی دیوار در نظر گرفته شده است.

## ۲- انجام آزمایشات و محاسبات

آزمایشات و اندازه‌گیری‌های تجربی، داده‌های لازم جهت انجام محاسبات ریاضی و نرم‌افزاری را مشخص کرد.

### ۱-۲- مقدمات و مباحث آغازین آزمایشات

برای انجام این پژوهش، تلاش شد تا با کمک نرم‌افزار، محاسبات انجام شود اما به جهت عدم وجود نرم‌افزاری که تغییرات ساعتی عایق داخل دیوار را اعمال نماید، این پژوهش بصورت تجربی انجام شد. "طرح آزمایش" در پژوهش تجربی، یکی از مهم‌ترین قسمت‌های آزمایش است و برای انجام ساده‌ترین طرح آزمایش، حداقل به یک گروه تجربی و یک گروه کنترل نیاز است (خاکی، ۱۳۸۷، ۲۲۲). با اعمال تغییرات دلخواه، طراح آزمایش بر روی متغیر مستقل در گروه تجربی (آزمایش) و عدم اعمال این تغییرات در گروه کنترل (شاهد)، می‌توان نتایج تغییر در متغیر وابسته را در دو گروه با هم مقایسه کرد و به نوع و مقدار تاثیر عامل تغییر بر متغیر وابسته، پی برد. برای آنکه بتوان گروه کنترل را با گروه آزمایش مقایسه کرد، باید هر دو گروه متناظر باشند (بیکر، ۱۳۷۷، ۲۴۴). این تحقیق با دو اتاقک آزمون<sup>۱۲</sup> انجام شد. یکی از اتاق‌ها بنام "اتاق آزمایش" و دیگری "اتاق کنترل" نام‌گذاری شدند که اتاق کنترل، بدون تغییر متغیر مستقل، جهت ارزیابی تغییرات اتاق آزمایش طراحی شد. یعنی وضعیت متغیر مستقل در دو اتاق



تصویر ۳- دماسنج‌های مورد استفاده در آزمایشات.

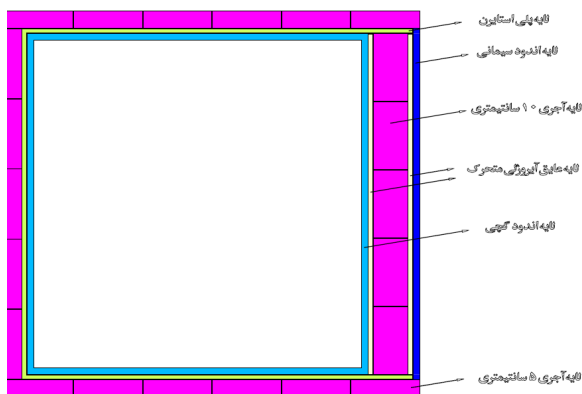
اندازه‌گیری عملکرد حرارتی دیوار خارجی دارای عایق آبروژلی هوشمند  
شبه‌سازی شده در مقایسه با دیوار مشابه فاقد عایق

استارین با دانسیته ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب است، که ضخامت آنها ۲ سانتیمتر است. تمام این عایق‌ها هم پوشانی دارند و هیچ پل حرارتی در مدل وجود ندارد. البته سقف دارای قسمت کوچکی نیز هست، که هدف این قسمت، پوشش دیوار حامل عایق جابجاشونده (دیوار اصلی) است، تا بدون جابجایی سقف اصلی اتاقک‌ها و ایجاد تلفات حرارتی، قادر به جابجایی عایق‌ها در ساعات مقرر شد (شبه‌سازی هوشمندی عایق‌ها).

در قسمت "پیش‌آزمون" ۱۲، ابزار اندازه‌گیری و عملکرد اتاقک‌های آزمون نسبت به یکدیگر کالیبره و تنظیم شدند. برای این پژوهش در دو مرحله آزمون، مقادیر رسانش گرمایی دیوارهای اصلی دو اتاقک محاسبه شد (بخش‌های ۲-۲ و ۳-۲) و سپس با استفاده از آن مقادیر و انجام آزمایش مرحله سوم (بخش ۲-۴) که آزمایش هدف پژوهش بود، مقدار کمی خواسته پژوهش بدست آمد.

## ۲-۲- تعیین رسانش گرمایی دیوار اصلی فاقد عایق نسبت به اتاقک از تمام جهات عایق شده

در این آزمون، اتاقک ۱ (اتاق آزمون) کاملاً با عایق پوشش داده شد و اتاقک ۲ (اتاق کنترل)، عملکرد دیوار اصلی (دیوار جنوبی) آن بدون عایق آبروژلی مورد آزمون واقع شد (در فضاهای عایق هوا وجود داشت). با انجام این آزمون، سعی شد تارسانش گرمایی دیوار اصلی اتاقک ۲ محاسبه شود. در تاریخ ۹۶/۹/۱۰، اتاقک‌ها مشابه وضعیت بالا تنظیم و آزمایش انجام شد. برای کاهش



تصویر ۵- لایه‌های اتاقک آزمون.

ارزیابی قرار گرفت. جهت "دیوار اصلی" رو به سمت جنوب است. تصویر ۴، اتاقک‌های ساخته شده آزمون را نشان می‌دهند. اتاق کنترل بدون تغییر متغیر مستقل، جهت ارزیابی تغییرات اتاق آزمایش طراحی شده است. وضعیت متغیر مستقل در دو اتاق متفاوت است و با توجه به این تفاوت وضعیت متغیر وابسته در دو اتاق کاملاً مشابه، با هم مورد مقایسه قرار می‌گیرند، تا فرضیه آزمون سنجیده شود.

دو نوع دیوار در تصویر ۵ مشاهده می‌شود. دیوار دست راست، "دیوار اصلی" است و دیوارهای مشابه بالایی، پایینی و چپی دیوارهایی معمولی هستند. ترتیب قرارگیری لایه‌های آجر، عایق و گچ، ترتیب مرسوم قرارگیری لایه‌ها از خارج به داخل ساختمان است که برای دیوارهای معمولی بکار گرفته شد، اما در دیوار اصلی، از دو لایه عایق با قابلیت جابه‌جاپذیری استفاده شده است و بین این دو لایه عایق، یک لایه آجر با ضخامت ۱۰ سانتیمتر بکار گرفته می‌شود تا لایه آجر میانی حکم ذخیره‌کننده انرژی را ایفا نماید.

ضخامت لایه اندود گچی حدود ۱/۵ سانتیمتر است. لایه بیرونی دیوار اتاقک از سه جهت آجر با ضخامت ۵ سانتیمتر و در جهت دیوار اصلی از پوشش ملات سیمان و ماسه (لایه اندود سیمانی) به ضخامت ۲ سانتیمتر ساخته شد. غیر از عایق‌های دیوار اصلی که از عایق آبروژل با ضخامت ۱/۲ سانتیمتر استفاده می‌شود (فضای قرارگیری عایق ۲/۵ سانتیمتر می‌باشد)، سایر عایق‌های بکار رفته در کف، دیوارها و سقف از جنس پلی



تصویر ۴- اتاقک‌های آزمون.

جدول ۱- تغییرات دمای دو اتاقک در تاریخ ۹۶/۹/۱۰.

ساعات	۹۶/۹/۱۰		T <sub>out</sub> «°C»
	اتاقک ۱	اتاقک ۲	
	T <sub>1in</sub> «°C»	T <sub>2in</sub> «°C»	
بعد از ظهر ۳:۰۰	۱۶.۴	۱۸.۴	۱۴.۰
بعد از ظهر ۶:۰۰	۱۵.۸	۱۷.۲	۱۰.۸
بعد از ظهر ۹:۰۰	۱۳.۲	۱۴.۳	۷.۴
بعد از ظهر ۱۲:۰۰	۱۰.۳	۱۱.۲	۵.۲
قبل از ظهر ۳:۰۰	۸.۲	۸.۷	۴.۶

سانتیمتری آجری در وسط است، ضخامت مجموعه حدود ۱۵ سانتیمتر است (۱۵ = ۱۰ + ۲/۵ + ۲/۵)، رسانش گرمایی سمبولیک این دیوار به نام  $K_{11}$  است، مقادیر اتاقک‌ها چنین است:

$$L_{11} = 0.15 \text{ «m»}; L_{12} = L_{13} = \dots = L_{16} = 0.02 \text{ «m»}$$

$$K_{11} = K_{12} = \dots = 0.033 \text{ «W/m}^2\text{K»}; A_{11} = 0.56 * 0.6 \text{ «m}^2\text{»}; A_{15} = 0.56 * 0.56 \text{ «m}^2\text{»}$$

معادله مجموع انرژی با اعمال مقادیر چنین است.

$$Q_{IT} = \int_{t_1}^{t_2} [4(0.033)(0.56*0.6)/0.02 + 2(0.033)(0.56*0.56)/0.02] (T_{out t} - T_{in t}) dt \quad (9)$$

$$Q_{IT} = \int_{t_1}^{t_2} (3.25) (T_{out t} - T_{in t}) dt \quad (10)$$

در رابطه فوق، تفاوت دمای داخل و خارج اتاقک ۱ در بازه زمانی بین  $t_1$  تا  $t_2$  مدنظر است که برای محاسبه آن از نرم متلب استفاده شد.

در نمودار ۲، از روش ترسیمی مقدار انتگرال  $\int_6^{12} (T_{out t} - T_{in t}) dt$  معادل ۳۳/۵۵ درجه سلسیوس در ساعت یا درجه کلونین در ساعت بدست آمد و در واحد SI ساعت به ثانیه تبدیل و حاصل انتگرال شد.

$$\int_6^{12} (T_{out t} - T_{in t}) dt = 33.5 * 3600 = 120600 \text{ «}^\circ\text{K s»} \quad (11)$$

پس در نتیجه مقدار  $Q_{IT}$  چنین بدست آمد:

$$Q_{IT} = \int_6^{12} (3.25) (T_{out t} - T_{in t}) dt = (3.25) 120600 \quad (12)$$

$$Q_{IT} = 391950 \text{ «J»} \quad (13)$$

حال همین مراحل برای اتاق کنترل (اتاقک ۲) انجام شد.

$$Q_{2T} = Q_{21} + Q_{22} + \dots + Q_{26} \quad (14)$$

$$Q_{2T} = \int_{t_1}^{t_2} (2.24 K_{21} + 2.70) (T_{out t} - T_{in t}) dt \quad (15)$$

با کمک جدول ۱، منحنی تغییرات دمای مربوط به اتاق ۲ بدست آمد تا از این طریق  $Q_{2T}$  بر حسب  $K_{21}$  بدست بیاید.

در نمودار ۳، از روش ترسیمی مقدار انتگرال  $\int_6^{12} (T_{out t} - T_{in t}) dt$  معادل ۴۰/۲۹ درجه سلسیوس در ساعت یا درجه کلونین در ساعت بدست آمد و در واحد SI ساعت به ثانیه تبدیل و حاصل انتگرال شد.

$$= 40.29 * 3600 = \int_6^{12} (T_{out t} - T_{in t}) dt \quad 145044 \text{ «}^\circ\text{K s»} \quad (16)$$

پس در نتیجه مقدار  $Q_{2T}$  شد:

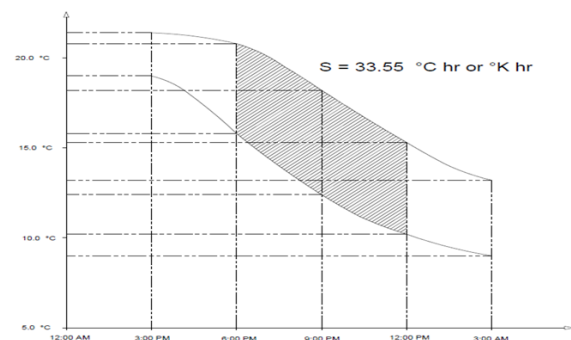
$$Q_{2T} = \int_6^{12} (2.24 K_{21} + 2.70) (T_{out t} - T_{in t}) dt = (2.24 K_{21} + 2.70) 145044 \quad (17)$$

$$Q_{2T} = 324898.56 K_{21} + 391618.8 \text{ «J»} \quad (18)$$

نسبت انرژی جابجا شده در دو اتاقک.

$$Q_{IT} / Q_{2T} = (391950) / (324898.56 K_{21} + 391618.8) \text{ «a»} \quad (19)$$

حال در رابطه ذخیره انرژی گرمایی در اجسام مقدار انرژی دو اتاقک چنین است:



نمودار ۲- محاسبه سطح محصور انتگرال اتاقک ۱، ۹۶/۹/۱۰.

خطای آزمایش، از داده‌های ساعات غروب خورشید استفاده شد تا حداقل تفاوت حرارتی در سطوح مختلف اتاقک‌ها وجود داشته باشد (به جهت عدم وجود تابش خورشید تفاوت دمایی بین سطوح مختلف اتاقک‌ها به حداقل می‌رسد). جدول ۱، نشان‌دهنده تغییرات دمای دو اتاقک در شرایط فوق است. برای تعیین رسانش گرمایی دیوار اصلی اتاق‌ها نسبت به یکدیگر، از قانون فوریه و قانون ذخیره انرژی در ماده استفاده می‌نماییم.

$$q/A \approx \partial T / \partial x \quad (1)$$

$$q = -K A \partial T / \partial x \text{ قانون فوریه} \quad (2)$$

$\partial T / \partial x$  = گرادیان گرما « $^\circ\text{K/m}$ »، «درجه کلونین بر متر»؛  $A$  = مساحت صفحه انتقال حرارت « $\text{m}^2$ »، «مترمربع»؛  $q$  = آهنگ انتقال گرما « $\text{W}$ »، «وات»؛  $K$  = رسانش گرمایی « $\text{W/m}^2\text{K}$ »، «وات بر متر کلونین»

برای آهنگ انتقال گرما داریم:  $q = \partial Q / \partial t$  بنابراین:

$$\partial Q / \partial t = -K A \partial T / \partial x \quad (3)$$

$$\partial Q = -K A (\partial T / \partial x) \partial t \quad (4)$$

$$\int_{q_1}^{q_2} dQ = \int_{t_1}^{t_2} -K A \left( \frac{dT}{dx} \right) dt \quad (5)$$

$$Q_2 - Q_1 = Q = \int_{t_1}^{t_2} -K A (T_{out t} - T_{in t}) / L dt \quad (6)$$

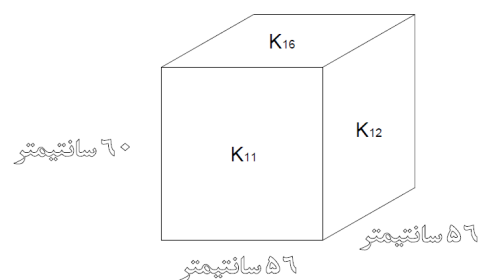
$L$ ، ضخامت صفحه عایق بر حسب متر و  $Q$ ، انرژی انتقال یافته توسط صفحه بر حسب وات در فاصله زمانی بین  $t_1$  تا  $t_2$  ثانیه است و  $T_{out t}$ ، دمای بیرونی صفحه و  $T_{in t}$ ، دمای داخلی صفحه بر حسب کلونین یا سلسیوس در زمان  $t$  بر حسب ثانیه است. اتاقک‌های آزمون ما دارای شش وجه است، وجه جنوبی آنها صفحه‌ای است که تغییرات فرضیه پژوهش بر روی آنها صورت پذیرفت، رسانش گرمایی این وجه در اتاق آزمایش  $K_{11}$  و برای اتاق کنترل  $K_{21}$  نامیده می‌شود. برای سایر وجوه با همین سیستم اندیس‌گذاری شد. در تصویر ۶، وضعیت اتاقک‌ها برای استفاده از معادلات فوریه نمایش داده شد.

$Q_{IT}$ ، مجموع انرژی انتقال یافته به داخل اتاقک ۱ در بازه زمانی بین  $t_1$  تا  $t_2$  و برابر است با مجموع انرژی‌های انتقال یافته از تمام وجوه اتاقک ۱؛ بنابراین:

$$Q_{IT} = Q_{11} + Q_{12} + \dots + Q_{16} \quad (7)$$

$$Q_{IT} = \int_{t_1}^{t_2} K_{12} A_{12} (T_{out t} - T_{in t}) dt / L_{11} + \int_{t_1}^{t_2} K_{12} A_{12} (T_{out t} - T_{in t}) dt / L_{12} + \dots \quad (8)$$

ضخامت عایق‌های پلی استایرن، ۲ سانتیمتر است. البته برای دیوار خارجی اصلی که ترکیبی از دو عایق با یک دیوار ده



تصویر ۶- وضعیت اجزای اتاقک‌ها جهت محاسبات عددی.

اندازه‌گیری عملکرد حرارتی دیوار خارجی دارای عایق آبروژلی هوشمند شبیه‌سازی شده در مقایسه با دیوار مشابه فاقد عایق

توضیحات نحوه جابجایی عایق‌های هوشمند در سه روز متوالی اندازه‌گیری شد و میانگین این سه روز، مطابق جدول ۲ برای انجام محاسبات در روابط بکار گرفته شد.

بعد از انجام محاسبات، ضریب رسانش اتاقک با دیوار آبروژلی هوشمند چنین بدست آمد.

$$K_{11} = 0.777, K_{21} = 0.269 \quad (26)$$

در محاسبات پیشین، مقدار  $K_{21}$  برابر  $0.11$  «وات بر متر کلین» محاسبه شد و با جایگذاری آن در رابطه بالا، مقدار  $K_{11}$  چنین بدست آمد:

$$K_{11} = 0.777 K_{21} - 0.269 = -0.183 \text{ «W/m}^2\text{K} \text{»} \quad (27)$$

## ۲-۴- مقایسه دیوار خارجی اصلی دارای عایق آبروژلی هوشمند با دیوار خارجی اصلی فاقد عایق

در این بخش، رفتار اتاقک‌ها مشابه بخش ۲-۳ تنظیم شد. این آزمایش در سه روز متوالی تکرار شد و در جدول ۳، میانگین تغییرات دو اتاقک در ساعات مختلف ۲۴ ساعت شبانه‌روز ثبت شد. اعداد جدول به خوبی نشان داد که هوشمندسازی عملکرد عایق آبروژلی دیوار اصلی اتاقک آزمون منجر به افزایش دمای اتاقک در ساعات سرد شبانه‌روز شد. البته در ساعات گرم روز به جای انتقال این گرما به داخل اقدام به ذخیره‌سازی آن می‌شود که به همین جهت، تنها در ساعات گرم روز دمای اتاق کنترل از دمای اتاق آزمایش بیشتر شد (با توجه به نوع برنامه‌ریزی جابه‌جایی عایق‌ها این موضوع نیز قابل تغییر است).

اگر بخواهیم عملکرد بهتر اتاق آزمون نسبت به اتاق کنترل را به صورت کمی نشان بدهیم، می‌توان از جدول ۳ استفاده کرد و مطابق نمودار ۴، در نرم‌افزار متلب، مقدار برابری اختلاف "درجه کلین در ساعت" دو اتاقک محاسبه می‌شود.

مثبت بودن مقدار « $K \text{ hr}^\circ\text{C}$ » نشان داد که اتاق آزمایش با دیوار اصلی رو به جنوب و دارای عایق آبروژلی هوشمند بصورت متوسط در طول یک شبانه‌روز، انرژی بیشتری را به درون اتاق آزمایش، نسبت به اتاق کنترل با دیوار جنوبی فاقد عایق جامد هوشمند انتقال می‌دهد. حال برای محاسبه مقدار اختلاف انرژی انتقال یافته به اتاقک ۱ نسبت به اتاقک ۲ از روابط بدست آمده



تصویر ۷- نمایش عایق‌های جانبی جابه‌جا شونده دیوار اصلی.

$$Q_{IT} = dQ_{IT} = m_1 c_1 \Delta T_1; Q_{2T} = m_2 c_2 \Delta T_2 \quad (20 \text{ و } 21)$$

در روابط بالا، تقریباً جرم داخلی دو اتاقک یکسان و ظرفیت گرمایی ویژه دو اتاقک هم با توجه به انتخاب جنس مواد مشابه تقریباً یکی است، یعنی:  $c_1 = c_2; m_1 = m_2$ ; بازه زمانی این مرحله نیز مانند محاسبات مرحله قبل بین ساعت ۶ تا ۱۲ شب و دمای اتاقک‌ها در روز ۹۶/۹/۱۰ در ابتدا و انتهای این دو زمان در نظر گرفته شد.

$$Q_{1T} / Q_{2T} = m_1 c_1 \Delta T_1 / m_2 c_2 \Delta T_2 = \Delta T_1 / \Delta T_2 \quad (22)$$

$$Q_{1T} / Q_{2T} = 0.917 \text{ «b»} \quad (23)$$

حال با استفاده از تساوی روابط «a» و «b»:

$$(391950) / (324898.56 K_{21} + 391618.8) = 0.917 \quad (24)$$

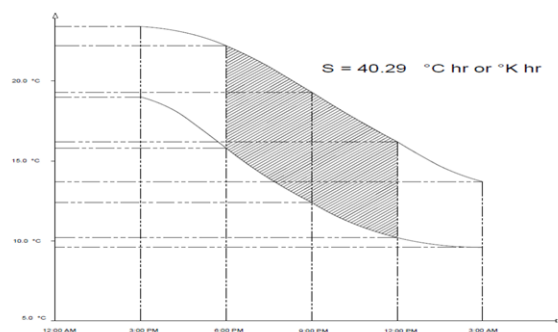
$$K_{21} = 0.11 \text{ «w/m}^2\text{K} \text{»} \quad (25)$$

مقدار بدست آمده برای  $K_{21}$ ، نشان دهنده رسانش گرمایی دیوار خارجی اصلی اتاقک ۲ است، در شرایطی که فاقد عایق باشد. عدد فوق برای محاسبه مقدار عددی رسانش گرمایی دیوار اصلی دارای عایق آبروژلی هوشمند لازم است (بخش بعد).

## ۲-۳- تعیین رسانش گرمایی دیوار اصلی دارای عایق آبروژلی هوشمند نسبت به دیوار اصلی فاقد عایق

شکل دیوارهای اصلی (دیوار جنوبی) به صورت یک لایه آجری ده سانتیمتری واقع بین دو شیار است. دیوار اصلی "اتاق آزمایش" در شیارهای عایق‌های آبروژل به صورت برنامه‌ریزی شده جابه‌جا می‌شوند اما دیوار اصلی "اتاق کنترل" فاقد عایق آبروژلی است. در این آزمایشات، هدف محاسبه مقدار کارایی سیستم دیوار خارجی اصلی دارای عایق آبروژلی هوشمند نسبت به سیستم دیوار خارجی اصلی فاقد عایق است، برای تعیین زمان تعویض عایق‌های اتاقک آزمایش ساعات ۹ صبح و ۳ بعد از ظهر انتخاب شد، در اتاق آزمایش مطابق با تصویر ۷، در ساعات ۹ صبح عایق ۱-۱ برداشته و عایق ۱-۲ قرار داده شد و در ساعت ۳ بعد از ظهر، عایق ۱-۱ به سر جایش برگردانده و عایق ۱-۲ از محل استقرارش خارج شد. با این عمل، در ساعات ۹ صبح تا ۳ بعد از ظهر گرمای محیط و تابش خورشید در دیواره آجری میانی ذخیره شد و در ساعات کاهش دمای محیط حداکثر آن به داخل اتاقک انتقال داده شد.

در تعیین رسانش گرمایی، "دیوار خارجی اصلی اتاق آزمایش" نسبت به رسانش گرمایی "دیوار خارجی اصلی اتاق کنترل" مشابه بخش ۲-۲ از قانون فوریه استفاده شد که به شرح کامل تر آن در بخش قبل اشاره شد. مطابق جدول ۲، با توجه به



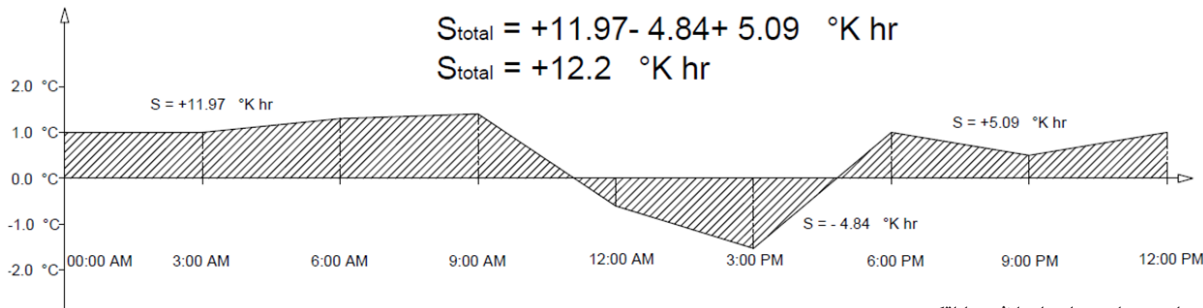
نمودار ۳- محاسبه سطح محصور انتگرال اتاقک ۹۶/۹/۱۰، ۲.

جدول ۲- تغییرات دمای دو اتاقک ۱ و ۲ در تاریخ های ۹۶/۸/۲۶، ۹۶/۸/۲۷ و ۹۶/۸/۲۸

ساعات	۹۶/۸/۲۶			۹۶/۸/۲۷			۹۶/۸/۲۸			$\Delta T_{m1in} = \frac{\sum \Delta T_{1n}}{n}$ «°C»	$\Delta T_{m2in} = \frac{\sum \Delta T_{2n}}{n}$ «°C»	$\Delta T_{out} = \frac{\sum \Delta T_{on}}{n}$ «°C»
	T <sub>1in</sub> «°C»	T <sub>2in</sub> «°C»	T <sub>out</sub> «°C»	T <sub>1in</sub> «°C»	T <sub>2in</sub> «°C»	T <sub>out</sub> «°C»	T <sub>1in</sub> «°C»	T <sub>2in</sub> «°C»	T <sub>out</sub> «°C»			
بعد از ظهر ۳:۰۰	۲۱.۱	۲۲.۸	۱۷.۳	۲۰.۹	۲۲.۳	۱۷	۲۰.۰	۲۱.۱	۱۶.۵	۲۰.۷	۲۲.۱	۱۶.۹
بعد از ظهر ۶:۰۰	۲۱.۰	۲۱.۰	۱۳.۹	۲۰.۷	۲۰.۵	۱۳.۵	۱۹.۴	۱۹.۲	۱۴.۰	۲۰.۴	۲۰.۲	۱۳.۸
بعد از ظهر ۹:۰۰	۱۸.۰	۱۷.۵	۱۰.۲	۱۷.۵	۱۷.۰	۱۱.۲	۱۷.۱	۱۶.۶	۱۲.۲	۱۷.۵	۱۷.۰	۱۱.۲
بعد از ظهر ۱۲:۰۰	۱۵.۳	۱۴.۳	۹.۴	۱۵.۰	۱۴.۰	۹.۸	۱۵.۰	۱۴.۰	۱۰.۲	۱۵.۱	۱۴.۱	۹.۸
قبل از ظهر ۳:۰۰	۱۳.۰	۱۱.۹	۸.۸	۱۲.۹	۱۱.۷	۸.۷	۱۳.۲	۱۲.۱	۹.۴	۱۳.۱	۱۱.۹	۹.۰

جدول ۳- میانگین تغییرات دو اتاقک در ساعات مختلف ۹۶/۸/۲۶، ۹۶/۸/۲۷ و ۹۶/۸/۲۸

ساعات	۹۶/۸/۲۶		۹۶/۸/۲۷		۹۶/۸/۲۸		$\Delta T_1 = T_{11} - T_{12}$ «°C»	$\Delta T_2 = T_{21} - T_{22}$ «°C»	$\Delta T_3 = T_{31} - T_{32}$ «°C»	$\Delta T_m = \frac{\sum \Delta T_m}{n}$ «°C»
	T <sub>11</sub> «°C»	T <sub>12</sub> «°C»	T <sub>21</sub> «°C»	T <sub>22</sub> «°C»	T <sub>31</sub> «°C»	T <sub>32</sub> «°C»				
قبل از ظهر ۰۰:۰۰	۱۵.۵	۱۴.۶	۱۵.۳	۱۴.۳	۱۵.۰	۱۴.۰	+۰.۹	+۱.۰	+۱.۰	+۰.۹۷ ≈ +۱.۰
قبل از ظهر ۳:۰۰	۱۳.۵	۱۲.۷	۱۳.۱	۱۱.۹	۱۲.۹	۱۱.۷	+۰.۸	+۱.۲	+۱.۲	+۱.۰۷ ≈ +۱.۰
قبل از ظهر ۶:۰۰	۱۱.۶	۱۰.۴	۱۱.۴	۱۰.۰	۱۱.۱	۹.۸	+۱.۲	+۱.۴	+۱.۳	+۱.۳
قبل از ظهر ۹:۰۰	۱۱.۹	۱۰.۶	۱۱.۵	۱۰.۱	۱۱.۲	۹.۷	+۱.۳	+۱.۴	+۱.۵	+۱.۴
قبل از ظهر ۱۲:۰۰	۱۷.۰	۱۷.۷	۱۶.۷	۱۷.۱	۱۶.۶	۱۷.۲	-۰.۷	-۰.۴	-۰.۶	-۰.۵۷ ≈ -۰.۶
بعد از ظهر ۳:۰۰	۲۱.۱	۲۲.۸	۲۰.۹	۲۲.۳	۲۰.۰	۲۱.۱	-۱.۷	-۱.۴	-۱.۱	-۱.۴
بعد از ظهر ۶:۰۰	۲۱.۰	۲۱.۰	۲۰.۷	۲۰.۵	۱۹.۴	۱۹.۲	۰.۰	+۰.۲	+۰.۲	+۰.۱۳ ≈ +۰.۱
بعد از ظهر ۹:۰۰	۱۸.۰	۱۷.۵	۱۷.۵	۱۷.۰	۱۷.۱	۱۶.۶	+۰.۵	+۰.۵	+۰.۵	+۰.۵
بعد از ظهر ۱۲:۰۰	۱۵.۳	۱۴.۳	۱۵.۰	۱۴.۰	15	۱۵.۰	+۱.۰	+۱.۰	+۱.۰	+۱.۰



نمودار ۴- محاسبه برابری اختلاف دو اتاقک.

هوشمند با در نظر داشتن تمام شرایط آزمون نسبت به اتاقک آزمون مشابه اما فاقد عایق در طول ۲۴ ساعت تقریباً ۲۸/۸ کیلو ژول انرژی بیشتری را به داخل اتاقک آزمون انتقال داد.

### ۵-۲- محاسبه خطای رسانش گرمایی دیوار اصلی دارای عایق آبروژلی هوشمند

در محاسبه خطای انرژی جابجاشده از قانون فوریه Ln<sup>۳</sup> گرفته شد تا مقدار خطا بدست آید.

$$dQ/dt = -K A dT/dx \quad \text{قانون فوریه} \quad (۳۲)$$

$$Q = -K \cdot A \cdot t \cdot \Delta T / L \quad (۳۳)$$

$$\ln Q = -\ln K - \ln A - \ln t - \ln (T_2 - T_1) + \ln L \quad (۳۴)$$

$$dQ/Q = dt/t + dT_{out}/(T_{out} - T_{in}) - dT_{in}/(T_{out} - T_{in}) \quad (۳۵)$$

اتاقک شماره ۱ و ساعت ۹ در نظر گرفته شد و مقادیر مربوط به آن، از جدول ۲ استخراج و در محاسبه خطا استفاده شد.

در بخش های پیشین استفاده شد. مقدار انرژی انتقال یافته به اتاقک ۱ در بازه زمانی ۲۴ ساعت از متوسط سه روز چنین است:

$$Q_{1T} = \int_0^{24} (2.24 K_{11} + 2.70) (T_{1out} - T_{1in} t) dt \quad (۲۸)$$

به همین ترتیب برای اتاقک ۲ خواهیم داشت:

$$Q_{2T} = \int_0^{24} (2.24 K_{21} + 2.70) (T_{2out} - T_{2in} t) dt \quad (۲۹)$$

در نتیجه با توجه به  $T_{2out} = T_{1out}$ ؛ تفاضل اختلاف انرژی

انتقال گرمایی دو اتاقک (Q) چنین است.

$$Q = Q_{1T} - Q_{2T} = -2.24 (K_{11} - K_{21}) \int_0^{24} (T_{1in} - T_{2in} t) dt \quad (۳۰)$$

مقدار  $\int_0^{24} (T_{out} - T_{in} t) dt$  توسط نرم افزار متلب، مساوی با مقدار ۱۲/۲ «کلوین در ساعت» معادل ۴۳۹۲۰ «کلوین در ثانیه» بدست آمد و با توجه به مقادیر «K<sub>11</sub> = -0.183 (W/mK) و K<sub>21</sub> = 0.110 (W/mK) مقدار نهایی چنین است:

$$Q = Q_{1T} - Q_{2T} = 28825.574 \quad \text{«J»} \quad (۳۱)$$

بنابراین اتاقک آزمون دارای دیوار جنوبی با عایق آبروژلی



اندازه‌گیری عملکرد حرارتی دیوار خارجی دارای عایق آبروژلی هوشمند شبیه‌سازی شده در مقایسه با دیوار مشابه فاقد عایق

به میزان ۲/۷ برابر عملکرد بهتری دارد. نسبت عددی ۲/۷، در حقیقت یک عدد نسبی است و مزیت سیستم هوشمند را نسبت به سیستم فاقد عایق هوشمند نشان می‌دهد. به این نکته باید اشاره کرد که قسمت بیرونی دیوار طراحی شده پژوهش، در زمان فقدان عایق حرارتی شباهت نزدیکی به دیوار ترومب بومی<sup>۴</sup> دارد (در دیوار ترومب بومی به جای قسمت دیوار شیشه‌ای، از دیوارهای غیرشفاف استفاده می‌شود).

نوع عایق، تاثیر فاحشی در این نسبت ایجاد نخواهد کرد. اهمیت استفاده از عایق آبروژل در حقیقت به امکان هوشمندسازی این عایق و ممتاز بودن خاصیت آن برمی‌گردد. عواملی که می‌توانند در تغییر این نسبت دخیل باشند، مواردی مانند: اقلیم مورد نظر، فصل انجام آزمون، زاویه اتاقک در جهات جغرافیایی، فرم اتاقک، تغییر ساعات جابه‌جایی عایق‌ها، جنس دیوار ذخیره‌کننده انرژی، تعداد دیوارهای هوشمند اتاقک و شاید مواردی دیگری را بتوان نام برد.

در قسمت محاسبه خطا، میزان خطا Q معادل ۹۰۰ «ژول» بدست آمد، در نهایت برای Q یعنی انرژی جابه‌جا شده می‌شود نوشت.

$$(۴۲) \quad \langle J \rangle = Q \pm \Delta Q = \text{تفاضل اختلاف انرژی انتقال گرمایی دو اتاقک}$$

$$(۴۳) \quad \langle J \rangle = (2.88 \pm 0.09) * 10^4 = \text{تفاضل اختلاف انرژی انتقال گرمایی دو اتاقک}$$

$$(۴۴) \quad \langle KJ \rangle = 28.8 \pm 0.9 = \text{تفاضل اختلاف انرژی انتقال گرمایی دو اتاقک}$$

در سیستم هوشمند طراحی شده فوق، با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان به برآوردهای فوق اشاره کرد. در ساعات گرم روز، انرژی گرمایی روز و انرژی تابشی خورشید در دیواره‌ها ذخیره می‌شود و در طول شب با کمترین تلفات حرارتی به داخل انتقال می‌یابد و یا در تابستان می‌توان سرمای شب را در دیوارها حبس کرد و در طول روز اجازه نداد که گرمای بیرون به داخل دیواره‌ها نفوذ کند، تا آسایش حرارتی تنها با استفاده از انرژی‌های پاک و شرایط اقلیمی تامین شود. این پژوهش، مربوط به اقلیم‌های مشابه تهران است. در سایر اقلیم‌ها نیز با کمی تفاوت همین تاثیرات وجود خواهد داشت مگر اقلیم‌هایی که اصلاً تغییرات دمایی شبانه‌روزی نداشته باشند که در آن اقلیم‌ها، این سیستم فاقد تاثیر است.

## نتیجه

پژوهش، دیوار دارای عایق آبروژلی هوشمند، در مقایسه با دیوار ترومب بومی دارای عملکرد حرارتی بهتری است. "و به جهت ارجحیت دیوار ترومب بومی نسبت به دیوار معمولی، نتیجه‌گیری شد که دیوار دارای عایق آبروژلی هوشمند نسبت به دیوار معمولی، بیش از ۲/۷ برابر در کاهش تلفات حرارتی تاثیرگذار است. هدف ویژه دیوار طراحی شده پژوهش این بود که بیشترین استفاده را از شرایط محیطی برای ایجاد آسایش حرارتی داخل اتاقک ایجاد نماید و در ضمن کمترین تلفات حرارتی در آن دیوار وجود داشته باشد، که طراحی پیشنهاد شده در این پژوهش این اهداف را تامین کرد. ایده نوآورانه این پژوهش با نگرش معماری پایدار و بهره‌گیری از هوشمندی می‌تواند راهی به سوی آینده پوشش‌های خارجی ساختمان‌ها باشد.

$$t = 9 * 3600 = 32400 \text{ «s»}; dt = 0.5 \text{ «s»};$$

$$T_{in} = 17.5 \text{ «}^\circ\text{K»}; T_{out} = 11.2 \text{ «}^\circ\text{K»}; dT = 0.1 \text{ «}^\circ\text{K»}$$

$$dQ/Q = (0.5) / 32400 + 0.1 / (11.2 - 17.5) - 0.1 / (11.2 - 17.5) \quad (۳۶)$$

$$dQ/Q = 0.0318 \approx 0.03 \quad (۳۷)$$

$$dQ = 28825.574 * 0.0318 = 916.65 \approx 9 * 10^2 \text{ «J»} \quad (۳۸)$$

## ۳ - یافته‌های تحقیق

رسانش گرمایی دیوار اصلی اتاق آزمایش با عایق آبروژلی هوشمند نشان داد که رسانش گرمایی دیوار اصلی با عایق هوشمند عملکرد بهتری از دیوار اصلی فاقد عایق جامد خواهد داشت (مقدار ۰/۱۸۳ - «وات بر متر کلون»). علامت منفی به این معناست که جهت انتقال انرژی در دیوار اصلی با عایق هوشمند آبروژلی به سمت داخل اتاقک است. محاسبه اختلاف رسانش گرمایی این دو نوع دیوار چنین است:

$$\Delta K = K_{11} - K_{21} = -0.183 - 0.11 = -0.293 \text{ «W/mK»} \quad (۳۹)$$

این بدان معناست که رسانش گرمایی دیوار اصلی هوشمند اتاق آزمایش نسبت به دیوار اصلی فاقد عایق اتاق کنترل به میزان ۰/۲۹۳ - «وات بر متر کلون» مقاومت حرارتی بیشتری ایجاد می‌کند.

محاسبه درصد بازدهی دیوار اصلی هوشمند نسبت به دیوار اصلی فاقد عایق با فرض رسانش گرمایی ۰/۱۱ «وات بر متر کلون» برای دیوار اصلی فاقد عایق شد:

$$(۴۰) \quad \left| K_{11} - K_{21} \right| / K_{21} * 100\% = \text{راندمان رسانش گرمایی}$$

دیوار اصلی هوشمند نسبت به دیوار اصلی فاقد عایق

$$(۴۱) \quad = 266\% = \text{راندمان رسانش گرمایی دیوار اصلی هوشمند}$$

نسبت به دیوار اصلی فاقد عایق

درصد بالا نشان می‌دهد که مقدار رسانش گرمایی "دیوار اصلی دارای عایق آبروژلی هوشمند" نسبت به "دیوار اصلی فاقد عایق" حدوداً ۲/۷ برابر بهتر است و چون انرژی انتقال داده شده، رابطه مستقیم با رسانش گرمایی دارد، بنابراین دیوار اصلی دارای عایق آبروژلی هوشمند نسبت به دیوار اصلی فاقد عایق،

اتاقک‌های آزمون طراحی شده به روشی مقایسه‌ای بین سیستم هوشمند و سیستم فاقد عایق، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند و با حذف بسیاری از متغیرهای مستقل، تنها اثر دمای محیط را به عنوان متغیر مستقل مورد بررسی قرار دادند. "اتاقک آزمون دارای دیوار جنوبی با عایق آبروژلی هوشمند" با در نظر داشتن تمام شرایط آزمون نسبت به "اتاقک آزمون مشابه اما فاقد عایق" (شبیه به دیوار ترومب بومی) در طول ۲۴ ساعت ۰/۹ ± ۲۸/۸ کیلوژول انرژی بیشتری را به داخل اتاقک آزمون انتقال می‌دهد. عدد فوق برای اثبات فرضیه پژوهش، یعنی موثر بودن عملکرد عایق هوشمند در افزایش راندمان حرارتی دیوار کفایت می‌نماید. با فرض مشابهت "دیوار اصلی فاقد عایق" با دیوار ترومب بومی می‌توان چنین بیان کرد: "با فرض شرایط این

## پی‌نوشت‌ها

محمد، شقایق (۱۳۹۲)، مطالعه رفتار حرارتی مصالح رایج در ساخت دیوار (ساختما نه‌ای مسکونی شهر تهران)، نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی، دوره ۱۸، شماره ۱، صص ۶۹-۷۸.

مرادی، ساسان (۱۳۸۹)، تنظیم شرایط محیطی، انتشارات شهیدی، تهران.

مهدوی نژاد، محمد جواد (۱۳۹۲)، الگوی انرژی دوستی در ساختمان براساس رفتار حرارتی بام، نقش جهان، سال سوم، شماره ۲، صص ۳۵-۴۲.

Abeer, S & Yousef, M (2017), Smart Material Innovative Technologies in architecture, Toward Innovative design Paradigm, Department of Architecture and Engineering, Tanta UN, Egypt, *Energy Procedia*, Vol.115, pp. 139-154.

Addington, M & Shodek, D (2005), *Smart Materials and New Technologies For the architecture and design professions*, Harvard University, U.S.A.

Diakaki, C; Grigoroudis, E & Kolokotsa, D (2008), Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings, *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 1747-1754.

Fogel, D. B (1995), *Evolutionary Computation toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, IEEE Press, USA.

Fraisse, G; Bai Y; Pierrès, N & Letz, T (2009), Comparative study of various optimization criteria for SDHWS and a suggestion for a new global evaluation, *Solar Energy*, N.83, pp. 232-245.

Gunerhan, H & Hepbasli, A (2007), Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications, *Building and Environment*, No.42, pp. 779-783.

Kimber, M; Clark, W & Schaefer, L (2013), Conceptual analysis and design of partitioned multifunctional smart insulation, *Applied Energy*, 114, pp. 310-319.

Loonen, R; Treka, M; Costola, D & Hensen, J (2013), Climate adaptive building shells: State of the art and future challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, pp. 483-493.

Saidam, M. V; Obaidi, K. M; Hussein, H & Ismail, M. A (2017), The Application of smart materials in building facades, *Eco. Env. & Cons.*, 23, pp. 8-11.

Schwartz, M (2008), *Ed. Smart Materials*, CRC Press Boca Raton, USA.

Vasco, D. A; Mejias, M.M & Aguilera, R. O (2016), Thermal simulation of a social dwelling in Chile: Effect of the thermal zone and the temperature-dependent thermophysical properties of light envelope materials, *Applied Thermal Engineering*, volume 112, pp. 771-783.

1 Potential of Hydrogen.

2 The National Aeronautics and Space Administration.

۳ رسانش گرمایی، مقدار گرمایی است که در یک ثانیه از یک متر مربع عنصری همگن به ضخامت یک متر در حالت پایدار عبور می‌کند و اختلافی برابر یک درجه کلوین بین دو سطح طرفین عنصر ایجاد نماید. مستخرج از سایت: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_conductivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity)

4 Test Chamber.

5 Temperature مدل HTC-2.

6 Digital Thermometer مدل TPM-10.

7 Temperature Measuring Accuracy.

8 Temperature Resolution.

9 Excel.

10 Matlab.

11 Fourier Law.

۱۲ پیش‌آزمون، یکی از مراحل فرایند تحقیق علمی است که معمولاً پس از طراحی ابزار سنجش انجام می‌پذیرد. وقتی محقق ابزار سنجش را طراحی نمود، لازم است آن را به صورت آزمایشی به مورد اجرا گذارد (خاکی، ۱۳۸۴، ۳۰۰).

13 Natural Logarithm.

14 Unglazed Trombe Wall

عدم وجود شیشه در این دیوارها بدان معنی نیست که نقش شیشه در آنها حذف شده است. بلکه در نوع بومی دیوار ترومب، مصالح دیگری، جایگزین شیشه شده است. این دیوار متشکل است از دو دیوار آجری که نسبت به هم با فاصله معینی قرار گرفته‌اند و بین آنها یک فضای خالی وجود دارد دیوار آجری خارجی با ضخامت کمتری نسبت به دیوار داخلی می‌باشد. در حقیقت دیوار خارجی نقشی مشابه با شیشه را در دیوارهای ترومب نوین بازی می‌کند. منبع سایت: [https://fa.wikipedia.org/wiki/Un glazed\\_Trombe\\_Wall](https://fa.wikipedia.org/wiki/Un glazed_Trombe_Wall)

## فهرست منابع

انصاری، مجتبی؛ بمانیان، محمدرضا؛ مهدوی نژاد، محمد جواد و حسینی کیا، سید محمد مهدی (۱۳۹۱)، مکانیابی محوطه‌های گردشگری طبیعی براساس اصول معماری منظر، کاربرد ترکیبی FGD و فرایند سلسله مراتبی AHP، مدیریت شهری، شماره ۲۹، صص ۷-۲۲.

بیکر، تزل ال (۱۳۷۷)، نحوه انجام تحقیقات اجتماعی، ترجمه هوشنگ ناییبی، انتشارات روشن، تهران.

خاکی، غلامرضا (۱۳۷۸)، روش تحقیق با رویکرد پایان‌نامه نویسی، مرکز تحقیقات علمی کشور با همکاری کانون فرهنگی انتشاراتی درایت، تهران.

عباسی، محمد رضا؛ طاهباز، منصوره و وفایی، راحیل (۱۳۹۴)، معرفی سیستم نوین ساختمانی تغییرپذیر (فناوری نو در طراحی معماری اقلیمی)، نقش جهان، جلد ۵، شماره ۲، صص ۴۳-۵۴.