

## بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان دانشکده فیزیک دانشگاه تهران

وحیدالله عنایت<sup>۱</sup>، محمدرضا محمدی‌زاده<sup>۲\*</sup>، و مسعود مهجور شفیعی<sup>۳</sup>

۱. دانشکده آموزش و پرورش، دانشگاه سمنگان، سمنگان، افغانستان

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران

پست الکترونیکی: zadeh@ut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۲)

### چکیده

هدف در این پژوهش، پایین آوردن دمای فضای زیرشیروانی ساختمان دانشکده فیزیک دانشگاه تهران در فصل تابستان است. برای این کار ۱۸ عدد هواکش خودکار روی سقف شیروانی نصب شدند. به دلیل عدم تأثیر این هواکش‌ها به تنهایی در کاهش اختلاف دمای فضای زیرشیروانی و فضای بیرون، از جریان هوای آرام و تند استفاده شد که در نتیجه اثرات جریان هوای آرام ۲-۱/۵ درجه و جریان تند هوای ۸-۳ درجه دما کاهش یافت. چون ابعاد اتاق شیروانی بزرگ است (۴۵۳۳ متر مکعب)، به این منظور یک مدل کوچک در حیاط دانشکده با ابعاد  $33 \times 47 \times 51 \text{ cm}^3$  طراحی و ساخته شد تا تأثیرات پوشش برگه آلومینیوم روی ایرانیت و رنگ کردن ایرانیت به عنوان بازتاب دهنده و نصب یک لایه یونولیت زیر ایرانیت به عنوان عایق در کاهش دما، مورد بررسی قرار گیرد. رنگ سفید براق روی ایرانیت ۵-۳ درجه، پوشش برگه آلومینیوم روی ایرانیت ۵/۳-۲ درجه و لایه یونولیت زیر ایرانیت ۲-۱ درجه در کاهش دما اثر گذاشتند. دلیل چنین تغییراتی با طیف انعکاس اسپکتروفوتومتری فرابنفش-مرئی-فروقرمز نزدیک توضیح داده شد. همچنین شبیه‌سازی با نرم افزار کامسول نشان می‌دهد که نصب شش عدد فن در دو انتهای فضای زیر شیروانی با تولید جریان بادی به سرعت  $4 \text{ m/s}$  منجر به کاهش  $10^\circ$  درجه‌ای دما خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: مصرف انرژی، بهینه‌سازی، برگه آلومینیوم، رنگ سفید، یونولیت، کامسول.

### ۱. مقدمه

بحران کمبود آب است؛ چرا که مصرف انرژی با مصرف آب تقریباً رابطه مستقیم دارد [۳]. می‌توان با بهینه کردن مصرف انرژی، شاهد کاهش مصرف آب نیز بود [۴]. بهینه‌سازی مصرف انرژی به سه طریق امکان پذیر است: تغییر عادات و شیوه‌ها، بهره‌وری انرژی و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر [۶ و ۵]. تفکر بهینه‌سازی مصرف انرژی در جهان از سال ۱۹۷۰ آغاز شده است [۷]. در حال حاضر مصرف انرژی جهان  $10 \text{ GT/y}$

موضوع ضرورت و اهمیت مصرف انرژی در جهان از چند نگاه قابل توجه است [۱]. مصرف سوخت‌های فسیلی مانند نفت، گاز و غیره نه تنها پایان پذیرند بلکه باعث آلاینده‌گی محیط زیست و گرم شدن زمین هم می‌شوند [۲]. ما شاهد آن هستیم که در طول ۷۰ سال گذشته زمین از هر زمان دیگری گرم‌تر شده است. یکی از عوامل ضروری بهینه‌سازی مصرف انرژی،

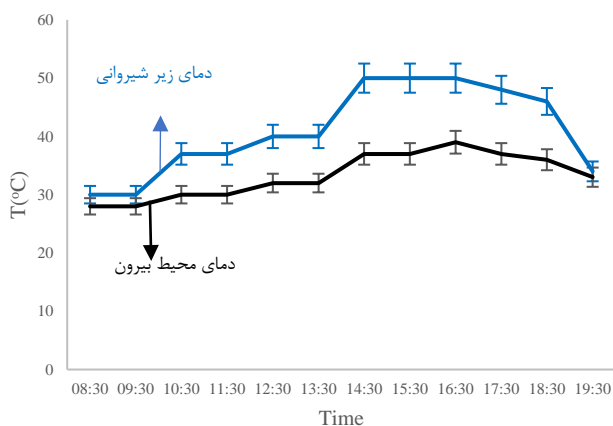
عنوان مثال روش‌شنایی LED<sup>۲</sup> حدود ۲۰٪ بازدهی دارد [۱۷]. استفاده از کنترل روشنایی باعث کاهش مصرف برق در حدود ۷۰ درصد در سال می‌شود [۱۸]. در مطالعه‌ای به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان اداری بلند مرتبه مجهز به سیستم مدیریت هوشمند به کمک نرم افزار شبیه‌سازی دیزاین بیلدر<sup>۳</sup> و نتایج دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۴</sup> نشان داده شده است که در بخش روشنایی ۳۹ درصد، آب گرم مصرفی ۲۵/۵ درصد، گرمایش ۲۱/۹ درصد، سرمایش ۷۳/۲ درصد، تجهیزات ۵۰/۵ درصد و در بخش‌های دیگر ۱۲ درصد امکان کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی ساختمان از این لحاظ وجود دارد. همچنین مجموع روش‌های به کار رفته، باعث کاهش ۳۸/۷ درصد کل انرژی مصرفی ساختمان می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در یک ساختمان اداری مجهز به سیستم مدیریت انرژی در اقلیم آب و هوای تهران، بیشترین صرفه‌جویی با افزایش تهویه طبیعی و تمهیدات سایه‌اندازی ساختمان در بخش سرمایش اتفاق می‌افتد [۱۹]. در زمستان، سطوح داخلی دیوارهای عایق‌بندی نشده نسبت به دیوارهای عایق‌بندی شده، ۸ تا ۱۴ درجه سردتر است [۲۰]. در تابستان، شرایط معکوس حکم‌فرماست و سطوح گرم، سرد نگه داشتن بدنه ساختمان را با اشکال مواجه می‌سازند [۲۱]. عایق‌بندی موجب افزایش دمای سطوح داخلی می‌شود و ساکنان آن احساس آسایش بیشتری می‌کنند [۲۲]. در صورتی که حرارت، بسیار سریع از طریق تشعشع بدنه به دیوار، کف و یا سقف سرد، از دست برود، اشخاص احساس عدم آسایش و سرما می‌کنند [۱۴]. عایق‌بندی اضافی علاوه بر کاهش مصرف انرژی، به حفظ امنیت صوتی بین ساختمان و بیرون آن هم کمک می‌کند [۲۲]. از آنجایی که انرژی نقش تعیین‌کننده‌ای در اقتصاد و سیاست جهانی ایفا می‌کند، با توجه به محدود بودن منابع انرژی‌های فسیلی (گاز، نفت و غیره) و از طرف دیگر تقاضای روز افزون انرژی خصوصاً در بخش صنعت و مصارف خانگی، باید به بهینه‌سازی مصرف انرژی توجه کرد،

(معادل با ۱۰ میلیارد تن نفت در سال) است [۸]. ۴۰ تا ۴۵ درصد از این انرژی در ساختمان‌ها به مصرف می‌رسد [۹]. سرانه مصرف انرژی کشورهای پیشرفته تقریباً ۲۰ برابر سرانه مصرف انرژی کشورهای در حال توسعه است [۱۰]. احتراق چنین حجم عظیمی از هیدروکربن‌ها، انتشار مقادیر قابل ملاحظه‌ای از انواع آلاینده‌ها نظیر اکسیدهای کربن، گوگرد، متان و غیره را در اتمسفر و محیط زیست بشری به دنبال داشته است [۱۱]. به عنوان مثال در حال حاضر سالانه ۶ گیگاتن کربن (۶ GT/yr) در اتمسفر منتشر می‌شود [۱۰].

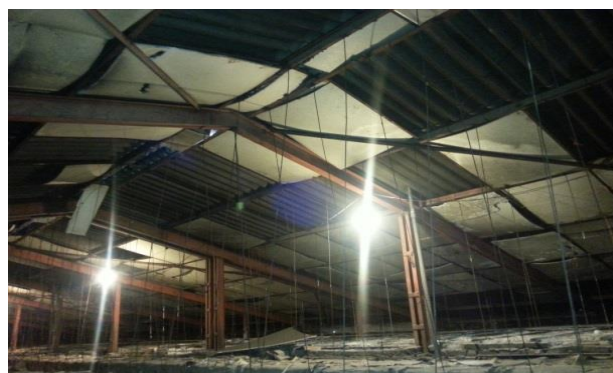
عایق‌بندی در بیرون ساختمان نیازمند راه‌حلی همراه با نوآوری است [۱۲]. به طور معمول، عایق در داخل دیوارها (بین سطح داخلی و خارجی آن) یا در سطح داخلی ساختمان قرار داده می‌شود [۱۱]. شایع‌ترین مشکل برای قرار دادن عایق در بیرون یک ساختمان بتونی یا سنگی، حفاظت این عایق از اثرات رطوبت، باران، آفتاب و تماس با مردم و حیوانات است [۱۳]. استفاده از پلی استرین یا اورتان امکان عایق‌بندی وسیع، پهن و محکم در بین دیوارهای بتونی یا سنگی و خاکی بیرونی را فراهم می‌کند [۱۲]. بسیاری از راهکارهای صرفه‌جویی انرژی، مستقیماً گیر انداختن حرارت در داخل ساختمان نیستند، هر چند که ثرات غیرمستقیمی در این ارتباط دارند [۱۴]. مثال‌هایی از این نوع در اینجا ارائه می‌شوند. مواردی از قبیل نوع و اندازه دستگانه‌های گرمایشی، هوادهی و تهویه مطبوع (وسایل HVAC<sup>۱</sup>)، روش‌های عملی کاهش مصرف انرژی و کنترل‌های لازم در این زمینه هستند [۱۲]. ایده‌مربوط به استفاده از روش‌شنایی طبیعی به عنوان جایگزین روش‌شنایی مصنوعی یعنی استفاده از منافذ و مجاری باز در ساختمان (مثل پنجره‌ها) است، که منجر به افزایش بالقوه اتلاف حرارت در زمستان و جذب حرارت در تابستان می‌شود [۱۵]. تخمین زده می‌شود که روش‌شنایی الکتریکی حدود ۲۰٪ از برق جهان را مصرف می‌کند [۱۶]. لامپ‌های رشته‌ای سنتی در حدود ۵٪ کارآمد است، در حالی که انواع جدید نورپردازی بسیار کارآمدتر وجود دارد. به

۳. Design builder  
۴. Computational Fluid Dynamics

۱. Heating, Ventilation and Air Conditioning  
۲. Light-Emitting Diode



شکل ۲. خط آبی، دمای فضای زیر شیروانی و خط سیاه، دمای بیرون برحسب ساعت روز. میانگین روزهای یادداشت شده از ۱۹ تیر تا ۱۹ شهریور ۱۳۹۸ است.



شکل ۱. داخل فضای شیروانی ساختمان دانشکده فیزیک دانشگاه تهران.

است. و همچنین برای اندازه گیری دما داخل شیروانی و بیرون حیاط دانشکده از دهای سیمایی استفاده شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. تجربی

شیروانی ساختمان دانشکده فیزیک دانشگاه تهران، شکل ۱، به ابعاد: عرض ۱۷/۶ متر، ارتفاع ۳/۲ متر و طول ۸۰/۵ متر است.

در تابستان ۱۳۹۸ به عنوان نمونه، زمانی که دمای بیرون ۴۰ درجه سانتی گراد بود دمای زیر سقف شیروانی تا ۵۰ درجه سانتی گراد نیز رسید. اختلاف دمای زیر شیروانی با بیرون برحسب ساعت در شکل ۲ نشان داده شده است.

اولین راهکار مدنظر برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، نصب ۱۸ عدد هواکش بالای سقف شیروانی است. هدف از نصب آن، خارج ساختن هوای گرم محبوس زیر شیروانی است که این کار بدون مصرف انرژی اضافی، به شکل خودکار انجام می‌شود (شکل ۳).

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تغییرات دمای زیر شیروانی پس از نصب هواکش‌ها محسوس نیست. دلیل این موضوع عدم وجود ورودی هوا جهت تغذیه هواکش‌های نصب

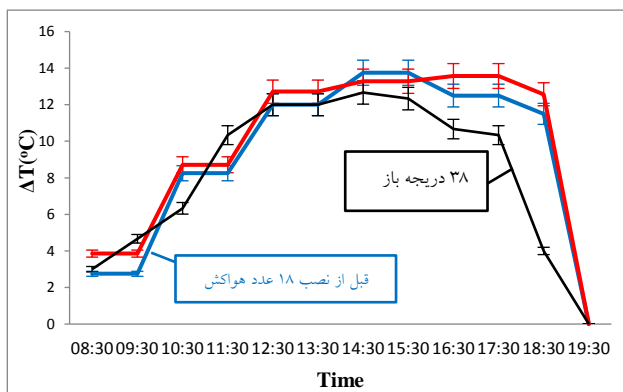
از این جهت اهمیت و ضرورت بهینه‌سازی آن جایگاه خاصی دارد [۲۱].

در این پژوهش تمرکز بر دستیابی به راهی به منظور کاهش دمای زیر شیروانی ساختمان دانشکده فیزیک دانشگاه تهران بوده است تا بدین وسیله مصرف انرژی و استهلاک سیستم سرمایش مرکزی کاهش یابد. برای رسیدن به این هدف علاوه بر انجام یک سری آزمایش، از نرم افزار کامسول<sup>۱</sup> نیز بهره برده‌ایم [۲۳].

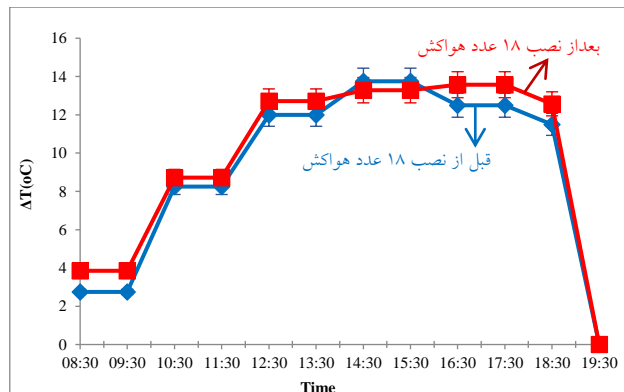
#### ۲. تجهیزات و روش‌ها

برای دستیابی به این هدف، از دو راه حل استفاده شده است. نخست، ایجاد جریان هوا، مانند نصب ۱۸ عدد هواکش در سقف شیروانی و شبیه‌سازی ۶ عدد دریچه و یا ۶ عدد فن در دو طرف شیروانی توسط نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس، و دوم استفاده از عایق حرارتی، مانند عایق داخلی (یونولیت) و عایق خارجی (رنگ سفید زدن، پوشش برگه آلومینیوم). برای بررسی طیف UV-Vis توسط دستگاه AVANTES AvaSpec Uls 2048 L و برای بررسی طیف فروقرمز توسط دستگاه LAMBDA 950 UV/Vis/NIR Spectroscopy انجام شده

۱. COMSOL



شکل ۴. میانگین تفاوت دمای زیر شیروانی با بیرون از دانشکده. خط آبی قبل از نصب ۱۸ عدد هواکش و خط قرمز، بعد از نصب ۱۸ عدد هواکش. خط سیاه، بعد از نصب ۱۸ عدد هواکش همراه با باز گذاشتن ۳۸ درجه طبقات برحسب ساعت روز. میانگین دمای روزها از ۷ الی ۱۰ مرداد ۱۳۹۸ است.



شکل ۳. میانگین تفاوت دمای فضای زیر شیروانی با دمای بیرون دانشکده برحسب ساعت روز، قبل و بعد از نصب ۱۸ عدد هواکش، نشان داده شده با خط آبی و قرمز. میانگین روزها از ۱۹ تیر الی ۵ مرداد ماه ۱۳۹۸ است.

که مکش هوا از دریچه‌ها بسیار آرام (Laminar) است. این نشان می‌دهد افزایش جریان هوا به زیر شیروانی می‌تواند به کاهش دمای زیر شیروانی کمک کند. به منظور هدایت جریان هوای بیشتر در زیر شیروانی از قراردادن یک پنکه در دریچه ورودی زیر سقف شیروانی استفاده شده است، (شکل ۵).

از شکل ۵ این طور معلوم می‌شود که جریان هوا در زیر شیروانی باعث شده است که دما در طول تمام روز به اندازه ۳ الی ۸ درجه کاهش یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت باید جریان هوا در زیر شیروانی برقرار شود تا این که بتوانیم دمای آن را به دمای محیط بیرون برسانیم.

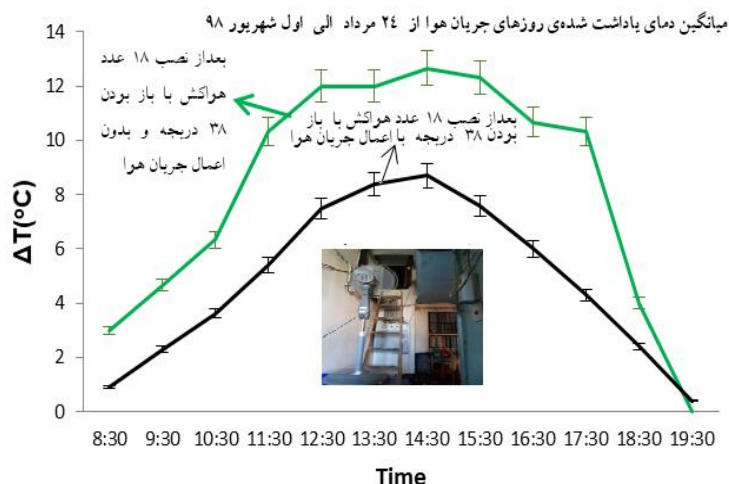
همان طور که قبلاً گفته شد، با شروع غروب خورشید، فضای زیر شیروانی سریعاً با بیرون هم‌دما می‌شود. این نشان دهنده اهمیت مانع شدن از جذب نور خورشید به وسیله سقف است. برای بررسی این موضوع دو نمونه اتاقک (تقریباً شبیه فضای زیر شیروانی) را در حیاط دانشکده فیزیک دانشگاه تهران طراحی و آماده کردیم (شکل ۶).

در طراحی آنها از دو کارتن هم‌ابعاد ( $51 \times 47 \times 33 \text{ cm}^3$ ) استفاده شده و در اطراف آن آجر چیده شده و در بالای آن دو، ایرانیت با اندازه‌های یکسان قرار داده شده است. برای به دست آوردن نتایج و داده‌های مورد نظر، آزمایش‌های متعدد و متنوعی

شده روی سقف است. از صبح تا حوالی ساعت ۱۸، تابش خورشید و جذب نور آن توسط ایرانیت‌های سقف شیروانی باعث افزایش دمای هوای محبوس زیر سقف شیروانی می‌شود. با پایین رفتن خورشید و نرسیدن تابش به سقف شیروانی، بین ساعت ۱۸:۳۰ تا ۱۹:۳۰، اختلاف دمای فضای زیر شیروانی با محیط بیرون به سرعت کاهش می‌یابد. برای بهبود کارایی هواکش‌های خودکار در قدم نخست ۳۸ دریچه هواکش بازدید لوله‌های آب و فاضلاب طبقات ساختمان دانشکده فیزیک را باز می‌گذاریم. تأثیر باز گذاشتن این ۳۸ دریچه در کاهش دمای زیر شیروانی در شکل ۴ نشان داده شده است. این دریچه‌ها به فضای زیر شیروانی متصل اند و جریان بسیار آرام هوا از پایین به سمت فضای زیر شیروانی برقرار می‌شود.

با مشاهده شکل ۴ و مقایسه دماها، دیده می‌شود که باز بودن ۳۸ دریچه طبقات ساختمان اثر مثبتی در کاهش دمای فضای زیر شیروانی گذاشته است. به این ترتیب دمای زیر شیروانی نسبت به قبل به اندازه ۱.۵ الی ۲ درجه تا ساعت ۱۵ و پس از آن ۴ الی ۱۰ درجه کاهش یافته است. باز بودن ۳۸ دریچه کمک می‌کند هوای زیر شیروانی تأمین شده و هوای گرم از طریق هواکش‌ها خارج شود.

اما این کاهش دما در طول روز آنقدر قابل توجه نیست؛ چرا



شکل ۵. میانگین دمای زیر شیروانی بعد از نصب ۱۸ عدد هواکش به همراه باز بودن ۳۸ درجه هواکش طبقات ساختمان بدون (با) اعمال جریان هوا توسط پنکه برحسب ساعت روز، خط سبز (سیاه).



شکل ۶. (الف) اتاقک با سقف ایرانیت ساده، (ب) ایرانیت با برگه آلومینیوم و (ج) ایرانیت با پوشش رنگ روغنی سفید براق.

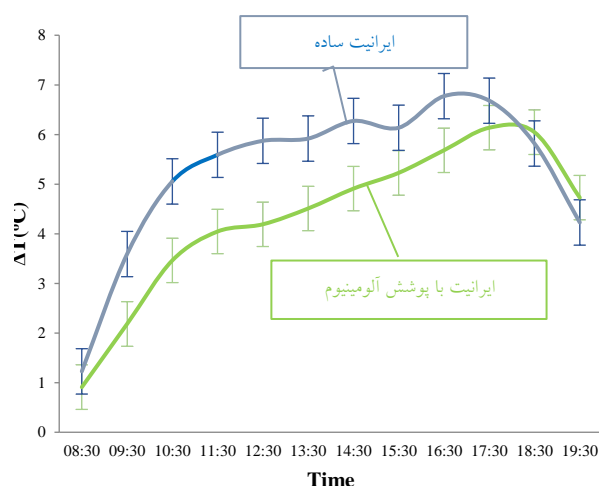
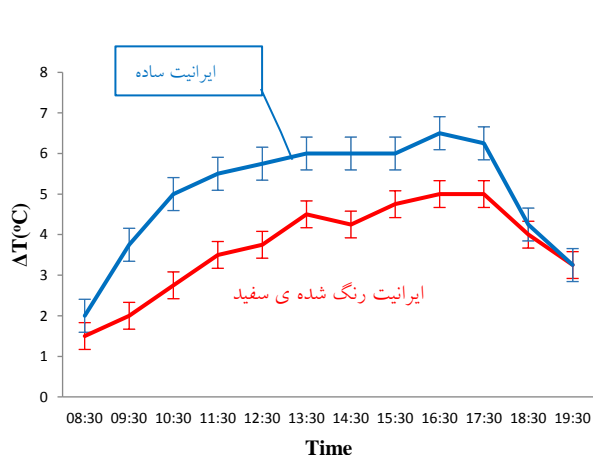
نداشته و به طور آهسته با بیرون هم‌دما می‌شود. در این حالت، برای اطمینان بیشتر و نتیجه مطلوب‌تر که بتوانیم دما را بیشتر کاهش دهیم به جای برگه آلومینیوم از رنگ روغنی براق سفید استفاده کرده‌ایم که داده‌های آن در شکل ۸ نشان داده شده است. در این شکل به وضوح معلوم می‌شود، رنگ روغنی سفید براق نسبت به ایرانیت ساده در کاهش دما بهتر عمل می‌کند. این کاهش دما به اندازه ۳ الی ۵ درجه سانتی‌گراد است.

همچنین، مقایسه کارایی ایرانیت رنگ سفید شده با ایرانیت با پوشش برگه آلومینیوم در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل ۹ مشاهده می‌شود، در ساعت ۸:۳۰ الی ۱۱:۳۰ صبح تغییرات دمای ایرانیت ساده و ایرانیت با پوشش برگه آلومینیوم تقریباً یکسان است. در این ساعت‌ها تابش خورشید به طور مستقیم و عمودی بالای ایرانیت ساده و

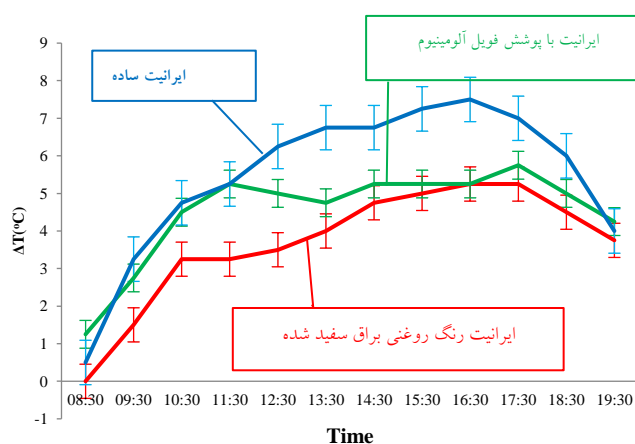
انجام داده‌ایم. در مرحله نخست، یک ایرانیت را با پوشش برگه آلومینیوم و یک ایرانیت را بدون پوشش برگه آلومینیوم آماده کردیم؛ که میانگین تفاوت دمای اندازه‌گیری شده آنها در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد آلومینیوم در کاهش دما به اندازه ۲ الی ۳/۵ درجه نقش دارد. قابل ذکر است که در شکل ۵ اختلاف دمای زیر شیروانی در ساعت ۱۹:۳۰ با محیط بیرون صفر می‌شود ولی اختلاف دمای اتاقک با بیرون در ساعت ۱۹:۳۰ صفر نمی‌شود. علت این است که ابعاد زیر شیروانی بزرگ است و همچنین وجود تعدادی درجه هواکش طبقات ساختمان و ۱۸ عدد هواکش بالای سقف باعث عدم حبس هوا شده است و دمای زیر شیروانی در ساعت ۱۹:۳۰ هم‌دما با محیط بیرون می‌شود. ولی اتاقک، مجرای تبادل انرژی حرارتی با بیرون



شکل ۸. میانگین تفاوت دمای اتاقک بادمای بیرون برحسب ساعت روز برای اتاقک با ایرانیت ساده (براق سفید) خط آبی (قرمز). میانگین دما از ۵ الی ۷ شهریور ۱۳۹۸ است.

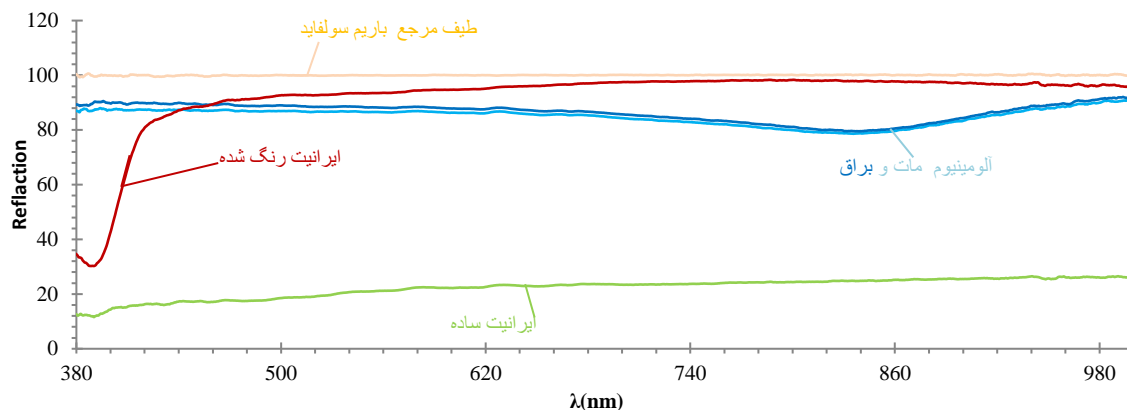
شکل ۷. میانگین تفاوت دمای اتاقک با دمای بیرون برحسب ساعت روز برای ایرانیت ساده (با پوشش برگه آلومینیوم) و خط آبی (سبز). میانگین دماها از ۱۶ مرداد الی اول شهریور ۱۳۹۸ است.



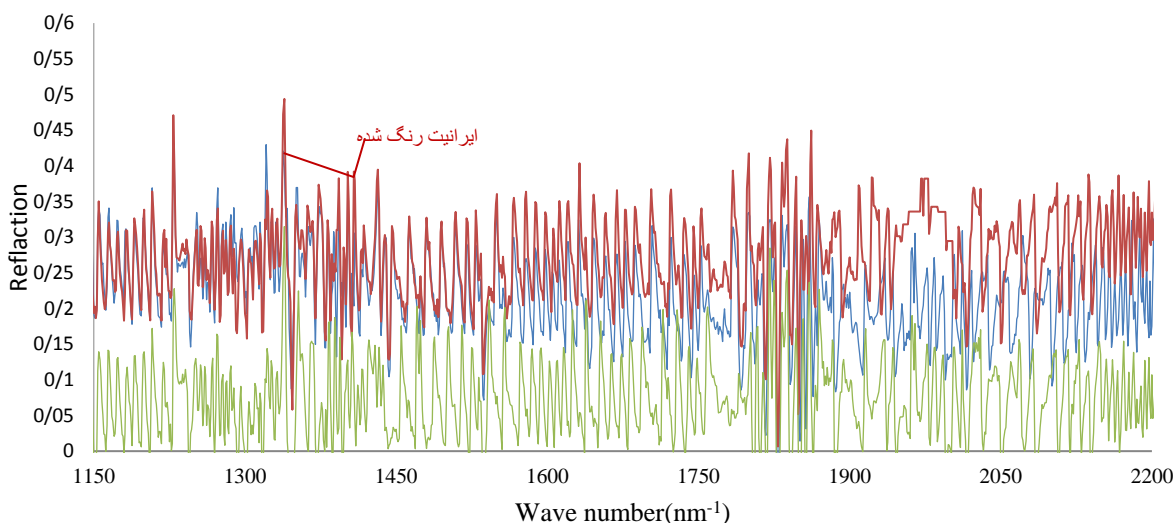
شکل ۹. میانگین تفاوت دمای اتاقک با بیرون برای اتاقک ساده، خط آبی، با ایرانیت با پوشش برگه آلومینیوم، خط سبز، و با ایرانیت رنگ شده سفید براق، خط قرمز، برحسب ساعت روز. میانگین دمای ۷ الی ۹ شهریور ۱۳۹۸ است.

رنگ روغنی سفید براق نسبت به ایرانیت با پوشش برگه آلومینیوم ۱ الی ۳ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۹). نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ به کمک دستگاه طیف سنجی AVANTES AvaSpec-UIs 2048 L انجام شده است. همان طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، ایرانیت رنگ روغنی شده سفید بیشترین بازتاب را نسبت به ایرانیت ساده و برگه آلومینیوم دارد. در اینجا مرجع که طیف بازتاب از روی آن سنجش شده است باریم سولفاید است. باریم سولفاید ماده جامد و به طور

ایرانیت با پوشش آلومینیوم نیست ولی بعد از ساعت ۱۱:۳۰ تابش نور خورشید عمودی و مستقیماً بالای هر دو قرار دارد. چون برگه آلومینیوم ۹۵٪ (شکل ۱۰) تابش نور خورشید را بازتاب می‌دهد، در نتیجه دمای اتاقک با برگه آلومینیوم تغییرات کمتری دارد. اما ایرانیت ساده بیشترین جذب تابش نور خورشید (با ۲۵٪ بازتاب) را دارد و تغییرات دما بیشتر صورت پذیرفته است. رنگ روغنی سفید براق ۹۷٪ تابش نور خورشید را بازتاب می‌دهد (شکل ۱۰). به این علت تفاوت دمای ایرانیت



شکل ۱۰. درصد طیف بازتاب ایرانیت ساده، ایرانیت رنگ شده سفید، آلومینیوم (براق و مات) و طیف باریم سولفاید به عنوان مرجع برحسب طول موج.

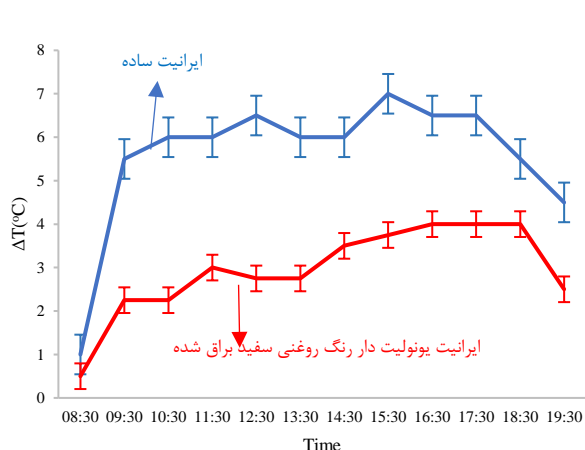


شکل ۱۱. درصد طیف بازتاب ناحیه IR ایرانیت ساده (مشکی)، ایرانیت رنگ روغنی سفید براق (قرمز) و برگه آلومینیوم (آبی) برحسب طول موج.

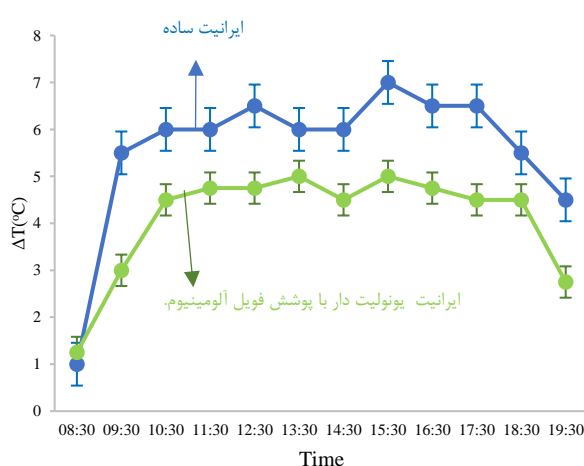
استاندارد، سفیدترین ماده جامد است. اگر فرض شود بازتاب توسط باریم سولفاید ۱۰۰ درصد باشد، مطابق شکل ۱۰ بازتاب ایرانیت رنگ روغنی شده سفید ۹۸ درصد است. بنابراین علت کاهش دما در ایرانیت رنگ روغنی شده سفید، همین بازتاب ۹۸ درصدی پرتو خورشید است. همان طور که از شکل ۱۱ معلوم می‌شود باز هم ایرانیت رنگ شده روغنی براق سفید نسبت به برگه آلومینیوم و ایرانیت ساده بیشترین بازتاب را در این بازه طول موجی IR نشان می‌دهد. این طیف توسط دستگاه LAMBDA 950

استاندارد، سفیدترین ماده جامد است. اگر فرض شود بازتاب توسط باریم سولفاید ۱۰۰ درصد باشد، مطابق شکل ۱۰ بازتاب ایرانیت رنگ روغنی شده سفید ۹۸ درصد است. بنابراین علت کاهش دما در ایرانیت رنگ روغنی شده سفید، همین بازتاب ۹۸ درصدی پرتو خورشید است.

همان طور که از شکل ۱۱ معلوم می‌شود باز هم ایرانیت رنگ شده روغنی براق سفید نسبت به برگه آلومینیوم و ایرانیت ساده بیشترین بازتاب را در این بازه طول موجی IR نشان می‌دهد. این طیف توسط دستگاه LAMBDA 950



شکل ۱۳. میانگین تفاوت دمای اتاق با بیرون برحسب ساعت روز برای اتاق با ایرانیت رنگ شده سفید و یونولیت، خط قرمز و با ایرانیت ساده، خط آبی. داده‌ها میانگین دمای روزهای ۱۵ و ۱۶ شهریور سال ۱۳۹۸ است.



شکل ۱۲. میانگین تفاوت دمای اتاق با بیرون برحسب ساعت روز برای اتاق با ایرانیت با پوشش برگه آلومینیوم و یونولیت، خط سبز و با ایرانیت ساده، خط آبی. داده‌ها میانگین روزهای ۱۳ و ۱۴ شهریور ۱۳۹۸ است.

شده‌اند.

حالا در این بخش اثرات نصب همه یونولیت‌ها را روی دمای اتاق شیروانی در طول زمستان مورد بررسی قرار می‌دهیم (شکل ۱۶).

از شکل ۱۶ این نتیجه حاصل شده است که یونولیت‌های نصب شده زیر ایرانیت شیروانی تقریباً ۳ تا ۴ درجه از نفوذ سرمای بیرون به داخل جلوگیری کرده‌اند. تفاوت منحنی با فصل تابستان آن است که در زمستان سیستم گرمایش به جای سرمایش کار می‌کند. بنابراین هدف از نصب یونولیت افزایش اختلاف دمای زیرشیروانی با محیط بیرون (برخلاف تابستان) است.

فعالیت دیگری که در جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان قدیمی دانشکده فیزیک انجام شد نصب دریچه کشویی بر روی دریچه‌های ورودی هوای اتاق‌های طبقات بود (شکل ۱۷).

از آنجا که سیستم سرمایش و گرمایش دانشکده، چیلر و مرکزی است، بنابراین کنترل ورودی هوا در اتاق‌هایی که مدتی استفاده نمی‌شوند (روزهایی که آزمایشگاه‌ها فعال نیستند)، در توزیع یکنواخت دما در طبقات بسیار مؤثر بوده است.

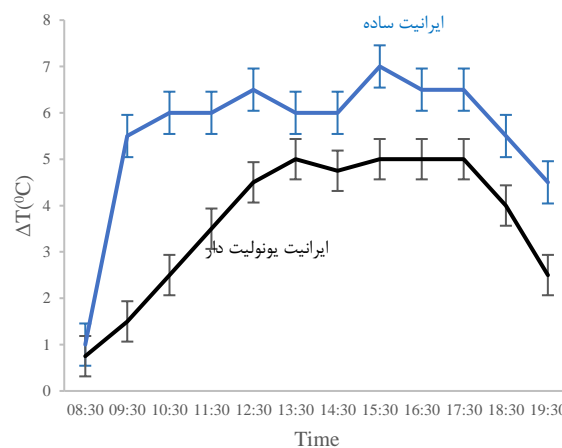
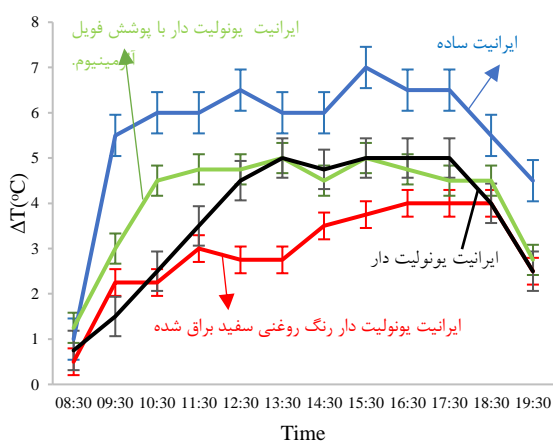
در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود لایه یونولیت زیر ایرانیت با پوشش برگه آلومینیوم نسبت به ایرانیت ساده به اندازه ۳ درجه در کاهش دما اثر دارد. همین طور در شکل بعدی، شکل ۱۳، اثرات یک لایه یونولیت زیر ایرانیت رنگ شده را مشاهده می‌کنیم.

از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود این کاهش دما به اندازه ۵ درجه است. شکل ۱۴ نتایج مربوط به ایرانیت ساده و ایرانیت ساده به همراه لایه‌ای از یونولیت زیر آن را نشان می‌دهد.

این شکل نشان می‌دهد یونولیت به اندازه ۱ الی ۲ درجه در کاهش دما اثر دارد. به طور خلاصه مقایسه حالت‌های مختلف این آزمایش در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

از شکل‌های ۱۲ الی ۱۵ مشاهده می‌شود، ایرانیت رنگ روغنی سفید براق شده با لایه یونولیت نسبت به همه حالت‌ها بیشترین کاهش دما (۳ تا ۵ درجه) را دارد. یک نکته که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود این است که در ساعت ۱۸:۳۰ الی ۱۹:۳۰ دمای همه حالت‌ها یکسان می‌شود. علت این یکسان بودن دما این است که خورشید در این ساعت اصلاً به اتاق نمی‌تابد.



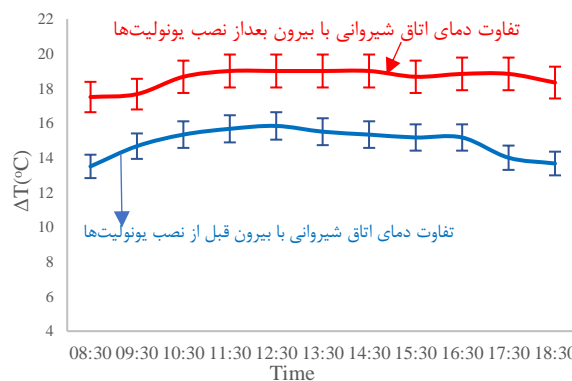


شکل ۱۵. مقایسه میانگین دماهای مربوط به ایرانیت ساده، خط آبی، ایرانیت یونولیت‌دار با پوشش برگه آلومینیوم، خط سبز، ایرانیت یونولیت‌دار، خط سیاه، و ایرانیت یونولیت‌دار رنگ شده روغنی سفید براق، خط قرمز، برحسب ساعت روز.

شکل ۱۴. میانگین تفاوت دمای اتاق با بیرون برحسب ساعت روز برای اتاق با ایرانیت یونولیت‌دار، خط سیاه و با ایرانیت ساده، خط آبی. داده‌ها میانگین دماهای روزهای ۱۷ و ۱۸ شهریور سال ۱۳۹۸ است.



شکل ۱۷. دریچه کشویی نصب شده روی دریچه ورودی هوای اتاق.



شکل ۱۶. میانگین تفاوت دمای زیر شیروانی با بیرون دانشکده برحسب ساعت روز، بعد (قبل) از نصب یونولیت‌ها، خط قرمز (آبی). اندازه‌گیری زمستان ۹۸. داده‌ها میانگین دماهای یادداشت شده از ۲ آذر تا ۱۸ دی ۱۳۹۸ است.

(flow) و انتقال گرما در سیال (Heat Transfer Fluid) استفاده

می‌کنیم. در مدل و شبیه‌سازی از فرض سیال غیرتراکم پذیر<sup>۱</sup> استفاده شده است. در حل جریان آرام از معادلات ناویر-استوکس، قانون بقای جرم و معادله پیوستگی استفاده می‌شود. این معادلات در نرم افزار کامسول به قرار ذیل‌اند:

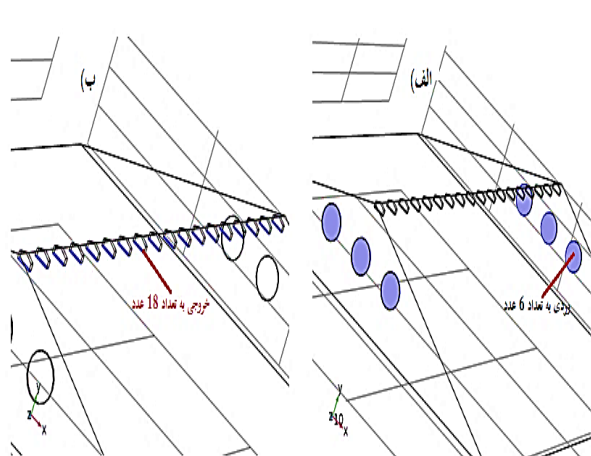
$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

معادله (۱) معادله پیوستگی و قانون بقای جرم را نشان می‌دهد.

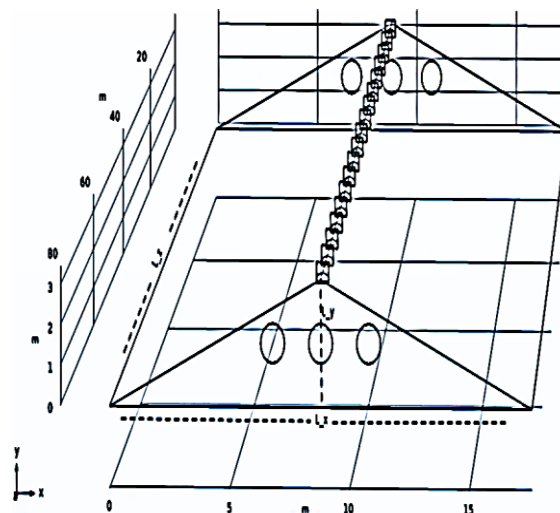
### ۳.۲. شبیه‌سازی فضای زیر شیروانی

راه حل نهایی برای تأمین هوای زیر سقف شیروانی، نصب چند عدد فن الکتریکی در دو طرف ساختمان در فضای زیر سقف شیروانی است تا با دمش هوا به زیر شیروانی، هوای زیر شیروانی با بیرون هم‌دما شود. این کار پر هزینه است بنابراین شبیه‌سازی عددی کمک زیادی در پیش‌بینی نتایج خواهد کرد. در اینجا، به منظور حل مدنظر از بخش جریان آرام (Laminar

۱. Incompressible fluids.



شکل ۱۹. (الف) ورودی جریان هوا به تعداد ۶ دریچه از کنار سقف شیروانی و (ب) خروجی جریان هوا به تعداد ۱۸ دریچه از روی سقف شیروانی.



شکل ۱۸. ابعاد مدل شبیه سازی برحسب متر.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (q + q_r) - \alpha_p T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + \tau : \nabla u + Q \quad (5)$$

در معادلات (۴) و (۵)،  $u_{trans}$  بردار سرعت (واحد آن در SI: m/s)،  $q$  شار گرما توسط هدایت (conduction) (واحد آن در SI:  $W/m^2$ )،  $q_r$  شار گرما به روش تشعشع (واحد آن در SI:  $W/m^2$ )،  $\alpha$  ضریب نمایی گرما (واحد آن در SI:  $1/K$ )،  $Q$  منبع حرارتی (واحد آن در SI:  $W/m^3$ ) و  $S$  تانسور تنش-پیولا-کیرشوف<sup>۱</sup> (واحد آن در SI: Pa) است. مدل شبیه سازی فضای زیرشیروانی با فن ها در شکل های ۱۸ و ۱۹ ارائه شده اند. پارامترهای عددی که در مدل (هندسه) شبیه سازی از آن استفاده شده است، در جدول ۱ درج شده اند.

باتوجه به معادلات (۱) و (۳) و تعیین شرایط مرزی، نتایجی که به دست آورده ایم، تغییرات سرعت و دما است. نخست تغییرات سرعت را در شکل ۲۰ مشاهده می کنید.

در این شکل تغییرات سرعت به طور ورقه (Slice) به تعداد ۵ عدد نشان داده شده است. چون سرعت ورودی جریان آرام  $4 \text{ m/sec}$  است، از شکل ۲۰ معلوم می شود که تغییرات سرعت از  $0$  تا  $3/5 \text{ m/s}$  است. منحنی تغییرات سرعت در طول فضای زیرشیروانی در شکل ۲۱ نشان داده شده است.

سرعت در قسمت وسط ساختمان به اندازه  $0/5 \text{ m/s}$  است.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot [-pI + \tau] + F \quad (2)$$

معادله (۲) معادله برداری است که نشان دهنده بقای تکانه است.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (u \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot q) + \tau : S - T / \rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} - p \left( \frac{\partial p}{\partial t} + (u \cdot \nabla) p \right) + Q \quad (3)$$

معادله (۳) معادله بقای انرژی را توضیح می دهد که در آن دما وجود دارد. در معادلات فوق  $\rho$  چگالی سیال (واحد آن در SI:  $kg/m^3$ )،  $u$  بردار سرعت (واحد آن در SI:  $m/s$ )،  $p$  فشار (واحد آن در SI: Pa)،  $\tau$  تانسور تنش چسبندگی (واحد آن در SI: Pa)،  $F$  بردار نیرو در واحد حجم (واحد آن در SI:  $N/m^3$ )،  $C_p$  ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (واحد آن در SI:  $J/(kg \cdot K)$ )،  $T$  دمای مطلق (واحد آن در SI: K)،  $q$  بردار شار (واحد آن در SI:  $W/m^2$ )،  $Q$  منبع حرارتی (واحد آن در SI:  $W/m^3$ ) و  $S$  نرخ تانسور تنش (واحد آن در SI: Pa) است. در نرم افزار کامسول برای انتقال گرما دو امکان فراهم است، یکی انتقال گرما در جامد و دیگری انتقال گرما در سیال. که در اینجا نظر به ضرورت موضوع، تنها بخش انتقال گرما در سیال بیشتر مورد بحث قرار گرفته است. حل معادلات مربوط به انتقال گرما در جامد به صورت ذیل است؛

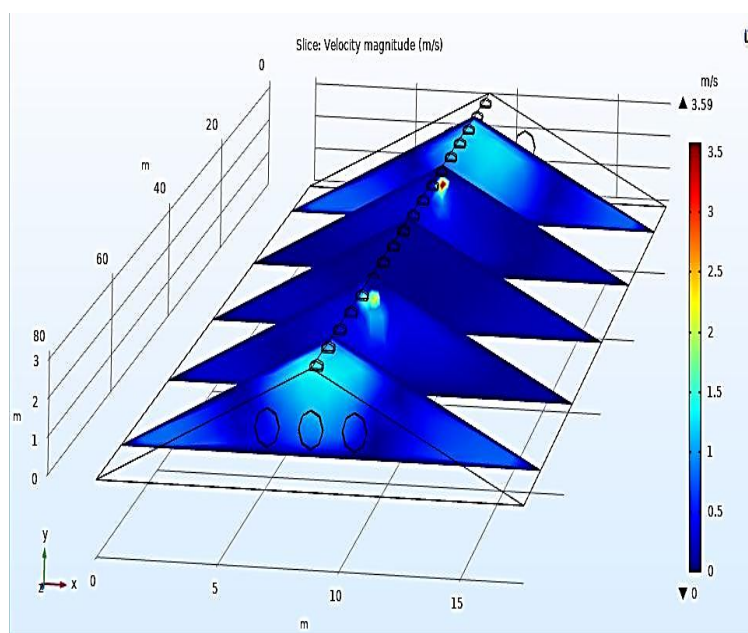
$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (q + q_r) - \alpha T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right) + \tau : \nabla u + Q \quad (4)$$

معادلات حل مربوط به انتقال گرما در سیال به شرح ذیل است:

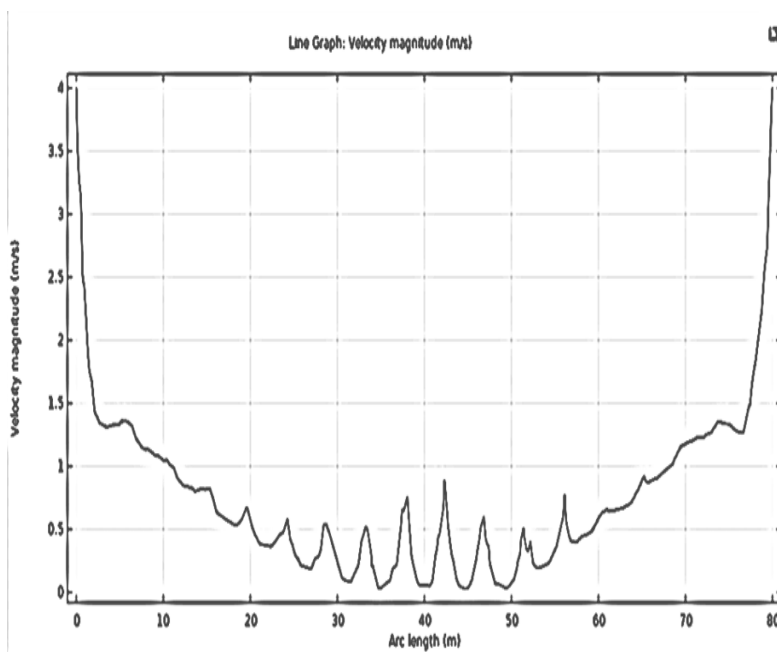
۱. Piola-Kirchhoff

جدول ۱. مقادیر عددی پارامترهای مدل (هندسه) شبیه‌سازی.

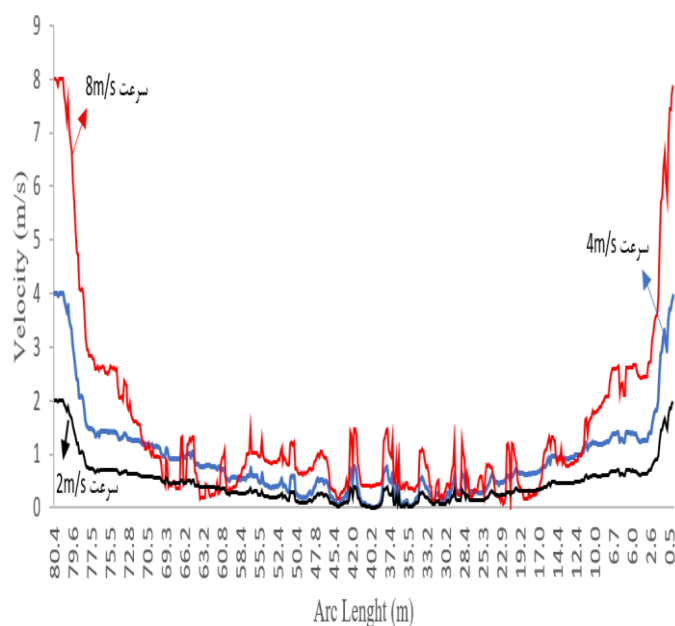
نام	عبارت	مقدار	توضیحات
عرض x	۱۷/۶[m]	۱۷/۶ m	عرض مدل به جهت x
ارتفاع y	۳/۲[m]	۳/۲ m	ارتفاع مدل در جهت y
طول Z	۸۰/۵[m]	۸۰/۵ m	طول مدل به جهت Z
شعاع دریچه	۰/۵[m]	۰/۵ m	شعاع دریچه ورودی هوا
ارتفاع دریچه	۰/۱[m]	۰/۱ m	ارتفاع دریچه ورودی هوا
عرض هواکش	۰/۵[m]	۰/۵ m	عرض هواکش
عمق هواکش	۰/۵[m]	۰/۵ m	عمق هواکش
ارتفاع هواکش	۰/۵[m]	۰/۵ m	ارتفاع هواکش
موقعیت دریچه در جهت x	۸/۸[m]	۸/۸ m	موقعیت دریچه ورودی هوا در جهت x
موقعیت دریچه در جهت y	۱/۶[m]	۱/۶ m	موقعیت دریچه ورودی هوا در جهت y
موقعیت دریچه در جهت Z	۰[m]	۰ m	موقعیت دریچه ورودی هوا در جهت Z
فاصله دو دریچه	۲[m]	۲ m	فاصله بین هر دریچه ورودی هوا
هواکش در موقعیت x	۸/۸[m]	۸/۸ m	موقعیت هواکش در جهت x
هواکش در موقعیت y	۳/۲[m]	۳/۲ m	موقعیت هواکش در جهت y
هواکش در موقعیت Z	۲[m]	۲ m	موقعیت هواکش در جهت Z
فاصله بین هر هواکش	۴/۵[m]	۴/۵ m	فاصله بین هر ۱۸ هواکش
جریان ورودی	۲۸۸[K]	۲۸۸ K	جریان دمای ورودی
سطح گرم	۳۱۵[K]	۳۱۵ K	سطح بیرون که گرم است
سرعت ورودی	۴ [m/s]	۲ m/s	سرعت ورودی سیال



شکل ۲۰. تغییرات سرعت هوا به طور ورقه (Slice) به تعداد ۵ ورقه.



شکل ۲۱. منحنی تغییرات سرعت در طول شیروانی.

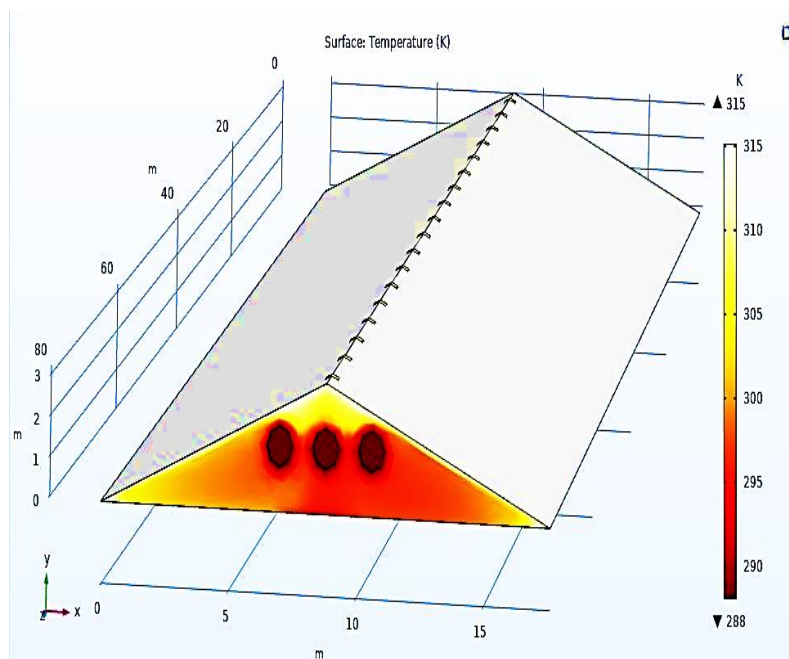


شکل ۲۲. مقایسه منحنی تغییرات سرعت ورودی هوا برحسب طول شیروانی به ازای سرعت‌های ۲ m/s، خط سیاه، ۴ m/s، خط آبی و ۸ m/s، خط قرمز.

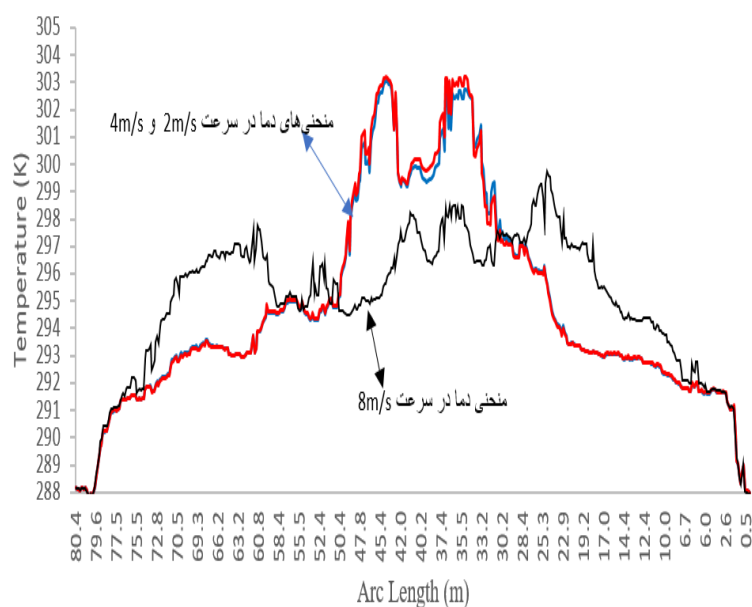
هندسه) شبیه‌سازی از ۴ m/s به ۲ m/s و ۸ m/s در طول شیروانی، تغییر می‌دهیم. نتیجه این تغییرات سرعت را در شکل ۲۲ بررسی می‌کنیم.

در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود منحنی قرمز (۸ m/s) تغییرات بیشتری

چون هوا از دو طرف وارد محوطه مدل شبیه‌سازی می‌شود و مقدار سرعت ورود هوا ۴ m/s است، بنابراین سرعت رفته رفته کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که تغییرات سرعت بر حسب طول است و قله‌های سرعت، محل وجود هواکش‌ها هستند. حالا سرعت را در مدل



شکل ۲۳. تغییرات دما به طور سطحی.



شکل ۲۴. مقایسه منحنی کاهش دما برای سرعت‌های ۲ m/s، ۴ m/s، ۸ m/s، خط سیاه، برحسب طول مدل شبیه‌سازی.

در شکل ۲۳ دمای ورودی ۲۸۸ کلوین (تقریباً  $15^{\circ}\text{C}$ ) بوده و دمای بیرون سطح ۳۱۵ کلوین ( $42^{\circ}\text{C}$ ) است. دما در قسمت میانه مدل (هندسه) شبیه‌سازی به اندازه  $10^{\circ}$  درجه کاهش یافته است که دلیل آن وجود جریان هوا است. این کاهش بیشتر دما، در شکل ۲۴ نشان داده شده است.

نسبت به منحنی مربوط به ۲ m/s در وسط مدل شبیه‌سازی دارد. اما این تغییرات در منحنی‌های ۲ m/s (سیاه) و ۴ m/s (آبی) کمتر است (یعنی تقریباً یکسان). در شکل‌های بعدی اثرات این تغییرات سرعت هوا را در دمای مدل شبیه‌سازی مشاهده می‌کنیم (شکل ۲۳).

دریچه جهت ورود هوا به داخل اتاق شیروانی شبیه‌سازی کردیم. اثرات شش دریچه ورود هوا در کاهش دمای مدل محوطه شیروانی شبیه‌سازی بسیار زیاد است. دمای بیرون در اتاق شبیه‌سازی K ۳۱۵ (معادل با  $42^{\circ}\text{C}$ ) است که با ورود هوا توسط شش دریچه، دمای داخل به K ۳۰۳ (معادل با  $30^{\circ}\text{C}$ ) کاهش یافته است (یعنی دمای داخل به اندازه ۱۵ درجه نسبت به سطح بیرون پایین آمده است). سرعت ورود هوا از شش دریچه ( $4\text{ m/s}$ ) باعث کاهش دما تقریباً ۸ تا ۱۰ درجه شده است. تأثیر سرعت  $2\text{ m/s}$  در کاهش دمای اتاق شبیه‌سازی تقریباً معادل تأثیر سرعت  $4\text{ m/s}$  است. اما با بیشتر کردن سرعت از  $4\text{ m/s}$  به  $8\text{ m/s}$  دمای اتاق شبیه‌سازی بیشتر (به اندازه ۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به سرعت  $4\text{ m/s}$ ) تغییر کرده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که با زیاد کردن سرعت در دریچه ورودی اتاق شبیه‌سازی، دمای آن بیشتر تغییر می‌کند. همچنین می‌توان از تابش مستقیم خورشید که بالای ایرانیت می‌تابد و باعث گرم شدن هوای اتاق شیروانی می‌شود، جلوگیری کرد. یک راهکار برای ممانعت از ورود تابش مستقیم خورشید، پوشش برگه آلومینیوم روی ایرانیت و یا رنگ سفید زدن به آن است. دلیل استفاده از آن این است که تابش مستقیم خورشید را بازتاب داده و از جذب آن جلوگیری می‌کند. چون مساحت شیروانی بسیار بزرگ است و پوشاندن ایرانیت با برگه آلومینیوم و یا رنگ سفید کردن آن هزینه‌بر است، برای این که اثرات رنگ سفید و برگه آلومینیوم را در کاهش دما بررسی کنیم، دو اتاقک کوچک در حیاط دانشکده ساختیم. معلوم شد که ایرانیت رنگ سفید براق شده یونولیت‌دار در کاهش دما نسبت به ایرانیت یونولیت‌دار با پوشش برگه آلومینیوم و یا ایرانیت یونولیت‌دار مؤثرتر است. در واقع ایرانیت رنگ سفید براق شده یونولیت‌دار به اندازه ۳ تا ۵ درجه سانتی‌گراد بیشتر دما را کاهش می‌دهد. دلیل این که رنگ سفید بیشتر در کاهش دما اثر دارد از نتایج طیف سنجی UV-Vis و طیف سنجی IR توضیح داده شد. مشاهده می‌شود بیشترین بازتاب تابش خورشید را رنگ سفید دارد. این بازتاب تقریباً ۹۵٪ (در قیاس با مرجع  $100\%$ ) است. باز هم رنگ سفید نسبت به برگه آلومینیوم

شکل ۲۴ مقایسه منحنی کاهش دما را در سرعت‌های هوای ورودی  $2\text{ m/s}$ ،  $4\text{ m/s}$  و  $8\text{ m/s}$  برحسب طول مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد. از شکل ۲۴ این طور معلوم می‌شود که سرعت  $8\text{ m/s}$  در کاهش دما بیشتر اثر داشته است. این کاهش دما به اندازه ۷ درجه نسبت به سرعت‌های  $2\text{ m/s}$  و  $4\text{ m/s}$  است. بنابراین در مورد انتخاب فن و سرعت دمش هوا باید این نکته را در نظر داشت.

#### ۴. نتیجه‌گیری

هدف اساسی، بررسی راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک ساختمان است. بدین ترتیب با استفاده از راهکارهای متفاوت، دمای زیر شیروانی به اندازه ۳-۸ درجه کاهش داده شد. نخستین راهکار، نصب ۱۸ عدد هواکش بالای سقف شیروانی ساختمان دانشکده فیزیک است. هدف از نصب آن است که هوای اتاق شیروانی را که در طول تابستان با تابش خورشید بسیار گرم می‌شود خارج کند. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود اثرات ۱۸ عدد هواکش در کاهش دمای هوای اتاق شیروانی ناچیز است. در قدم دوم با باز گذاشتن ۳۸ دریچه بازدید لوله‌های آب طبقات ساختمان، جریان هوای آرام به داخل اتاق شیروانی انتقال می‌یابد. باز بودن ۳۸ دریچه بازدید به همراه نصب ۱۸ عدد هواکش منجر به کاهش دمای تقریباً  $1/5$  تا ۲ درجه شده است. سپس به جای جریان هوای آرام از یک پنکه در دریچه ورودی اتاق شیروانی استفاده کردیم تا نتیجه مطلوب به دست آید. هدایت جریان هوای زیرشیروانی توسط پنکه، سبب شده است تا دما به اندازه ۳ تا ۸ درجه نسبت به قبل کاهش یابد. این اتفاق را می‌توان چنین توضیح داد که چون اطراف اتاق شیروانی بسته است، زمانی که نور خورشید به ایرانیت بتابد ایرانیت گرم شده و گرما به داخل اتاق شیروانی انتقال می‌یابد. در واقع اینجا پدیده انتقال گرما در سیال صورت می‌گیرد. زمانی که جریان هوا به داخل اتاق شیروانی توسط پنکه هدایت شود، یک سیال با دمایی سرد وارد شده و سبب می‌شود تا دمای اتاق شیروانی به اندازه ۳ الی ۸ درجه کاهش یابد. سپس با استفاده از نرم افزار کامسول اتاق شیروانی را با نصب شش

شد؛ چون برگه آلومینیوم و رنگ سفید طیف طول موج UV-Vis و IR را بازتاب می‌کنند. اثر رنگ روغنی سفید مؤثرتر است.

۱۸ عدد هواکش نصب شده است. سراسر زیر سقف، یونولیت نصب شد. برای تکمیل فرآیند عایق‌سازی حرارتی ساختمان می‌توان در هر طرف ساختمان در زیر شیروانی ۶ عدد فن نصب کرد. همچنین سراسر سقف را رنگ روغنی سفید براق زد.

### تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران که بخشی از هزینه‌های این پژوهش را تأمین کرده است تشکر می‌کنیم.

و ایرانیت ساده بیشترین بازتاب را در بازه طول موج فرورمز دارد. به این دلیل رنگ سفید باعث شده است تا تابش خورشید بیشتر بازتاب پیدا کند و دمای هوای داخل اتاقک کوچک گرم نشود.

### ۵. جمع‌بندی

برای کاهش دمای زیر شیروانی از جریان هوا استفاده شد که اثر مثبت داشت. می‌توان گفت: این روش، یکی از راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی است؛ چون اکثر ساختمان‌ها برای سرمایش، انرژی بیشتری مصرف می‌کنند تا گرمایش. راهکار دیگر جلوگیری از تابش مستقیم خورشید بالای سطح است. این کار با برگه آلومینیوم و رنگ سفید انجام داده

### مراجع

1. Z Zheng, et al., *Energy Procedia Journal* **142** (2017) 2317.
2. M Saqafi, "Renewable Energies", Tehran, University of Tehran press, (2009) (in Persian)
3. C King George, "Physics of Energy Sources" Manchester, UK, John Wiley (2018).
4. E D O Orga, , *Int. Energy Agency*, (2017) 1.
5. A Mohajer Milani and S Heidari, *IJE* **4** (2017) 19 (in Persian).
6. E Rajablo and H Saadullah, "optimization of energy consumption in buildings; Complete guide to Audit optimization software: process and report of energy consumption optimization calculations in a school, Tehran", Yazda Publications, (2011) (in Persian).
7. Y Eren, B I Küçükdemiral, and I Üstoğlu, "Introduction to optimization optimization in renewable energy systems", Istanbul, Turkey, Elsevier Ltd (2017).
8. G A Kamali and I Mordadi, "Sun radiation; principles and applications in agriculture and new energies", Tehran, 21st Century Research and Meteorological Research Institute Publications (2005) (in Persian).
9. B Clive, "Energy: management, supply and consumption optimization Tehran", Nezhath Sharqi Sabz (2005) (in Persian).
10. R Ehrlich and H A Geller, "Renewable Energy, Second Edition A First Course" CRC Press (2018).
11. M Sultani and A Taqi Nazari, "Optimization of fuel consumption in central heating systems", Tehran: Fadak Isatis, (2007) (in Persian).
12. S Sattari, et al., "Solutions for managing and optimizing energy consumption in the country", Tehran, Hazare Swom Andishe (2009) (in Persian).
13. M Tahbaz and S Djalilian, "Outdoor Microclimate and Pavement Material - Case Study in University Site. Honar-Ha-Ye-Ziba: Memary Va ShahrSazi", University of Tehran **20** (2016) 21 (in Persian).
14. S Aghanajafi and A Dehghani, "Solar radiant heat transfer and its application in buildings" Tehran, K N Toosi University of Technology (2007) (in Persian).
15. C Rubio Bellido, A Pérez Fargallo, and J Pulido Arcas, "Energy Optimization and Prediction in Office Buildings A Case Study of Office Building Design in Chile", Springer Briefs in Energy (2018).
16. A Shahin, "Energy Management", Isfahan, Jihad Daneshgahi Isfahan (2004) (in Persian).
17. H Sadeghi, "Development approaches of energy consumption optimization groups", Fuel consumption optimization company (2006) (in Persian).

- 18.X Wang, *et al.*, *Applied Energy Journal* **104** (2013) 337.
- 19.J Khodakarami and P Ghobadi, *JEM* **6** (2016) 12 (in Persian).
- 20.A K Dahiya and P Vasudevan, *Energy Journal* **11** (1986) 685.
21. S Houda, R Belarbi, and N Zemmouri, *Energy Procedia Press* **139** (2017) 373.
- 22.A Campo and J Sieres, *The International Journal of Thermal and Environmental Engineering* **12** (2016) 39.
- 23.A Pisello, M Bobker, and F Cotana, *Occupancy Energies* **5** (2017) 5257.