مکانیک / سال ۱۴۰۱ /دوره پاییز و زمستان /شماره ۱ /صفحه ۱۲۶-۱۳۷

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

DOI: 10.22034/STME.2023.168734

بررسی عددی و آزمایشگاهی سیستم نوین سرمایش ساختمان مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی

سعید وحیدی‌فر[۱]، سید حسن نبوی[۲]، مهدی ذاکری[۳]، محمدمهدی ناصریان[۴*]، امین حیدریان[۵]

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۳و۵- کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۴- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

امروزه از سیستم‌های سرمایش مختلفی، ازجمله کولر آبی، اسپیلت، هواساز و غیره جهت سرمایش ساختمان استفاده می‌شود که هرکدام از آن‌ها دارای چندین مزیت و عیب می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ایراداتی که می‌توان برای بسیاری از سیستم‌های سرمایشی نام برد، یک‌نواخت‌نبودن دما در فضاهای ساختمان می‌باشد. مهم‌ترین بخش اتلاف حرارت ساختمان با محیط اطراف، از طریق پنجره‌ها می‌باشد. بر این اساس، در این پژوهش، یک سیستم سرمایش جدید مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی پیشنهاد شده و به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی آزمایشگاهی این سیستم در محیط کارگاه تهویه‌ی مطبوع و ارزیابی عددی آن در نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام گرفته است. به‌علاوه، این سیستم با سیستم سرمایش اسپلیت مقایسه گردیده است. از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، می‌توان به توزیع یک‌نواخت دمای محیط و کاهش مصرف انرژی مقایسه با سیستم‌های معمول سرمایش اشاره نمود. در هنگام استفاده از سیستم کویل پنجره‌ای، تفاوت بیشینه و کمینه‌ی دما در بخش وسیعی از اتاق کمتر از ۱ درجه‌ی سلسیوس اندازه‌گیری شده است. حال آنکه در سیستم اسپلیت، با حرکت از سمت سقف اتاق به سمت کف، دما حدود ۲ درجه‌ی سلسیوس تغییر می‌کرد. همچنین این سیستم در مقایسه با سیستم سرمایش اسپلیت حدود ۶/۷ ٪ انرژی کمتری مصرف نمود.

کلمات کلیدی

سیستم سرمایش ساختمان، سیستم کویل پنجره‌ای، سیستم اسپلیت، بررسی آزمایشگاهی، بررسی عددی، توزیع یک‌نواخت دما.

Numerical and Experimental study of a new building cooling system based on compression refrigeration cycle

Saeed Vahidifar[1], Seyed Hasan Nabavi[2], Mahdi Zakeri[3], Mohammad Mahdi Naserian [*4], Amin Heydarian[5]

1-Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

3,5- B.Sc, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

4- PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Today, various cooling systems such as evaporative cooler, split, air conditioner etc., are used to cool the building, which have a number of advantages and disadvantages. One of the most important disadvantages that can be mentioned for many cooling systems is the non-uniform temperature distribution in the building zones. The most important part of the building's heat loss is through the windows. Accordingly, in this research, a new cooling system based on compression refrigeration cycle is proposed and examined numerically and experimentally. Experimental evaluation of this system was performed in the air conditioning workshop and its numerical evaluation was performed in Design Builder software. In addition this system was compared with split cooling system. Among the most important results obtained from this research, we can point out the uniform distribution of the indoor air temperature and the reduction of energy consumption compared to the convectional cooling systems. When using a window coil system, the difference between the maximum and minimum temperature in a large part of the room was less than 1 degree Celsius. In the split system, however, the temperature has changed by about 2 degrees Celsius by moving from the ceiling of the room to the floor. Moreover, energy consumption of the system was 6.7% lower than that of split cooling system.

Keywords

Building cooling system, Window coil system, Split system, Experimental evaluation, Numerical evaluation, Uniform temperature distribution.

* محمدمهدی ناصریان، m.m.naserian@pgs.usb.ac.ir

۱-مقدمه

جمعیت و اقتصاد جهان به‌سرعت در حال رشد است که این امر منجر به افزایش گسترده‌ی تقاضا و مصرف انرژی در جهان شده است. امروزه شرط لازم برای حضور قدرتمند در عرصه‌های جهانی، ضرورت وجود یک طرح بهینه‌سازی در مصرف منابع مختلف انرژی در کشور است و می‌تواند تحول اقتصادی عظیمی به دنبال داشته باشد. در این میان، صنعت ساختمان یکی از صنایع بزرگ و تأثیرگذار بر مصرف انرژی در کشور محسوب می‌شود و از طرفی این صنعت به عنوان یکی از اصلی‌ترین معیارهای صنعتی‌شدن هر کشور و نماد رشد و توسعه‌ی مطرح است و توجه خاص به این صنعت باعث بهبود و توسعه‌ی آن خواهد شد. با توجه به اینکه در کشور ما ۹۸/۶ درصد از انرژی اولیه مربوط به عرضه‌ی نفت خام، فرآورده‌های نفتی و گاز طبیعی می‌باشد، هرگونه استفاده‌ی غیرکارا از حامل‌های انرژی، علاوه‌بر آنکه می‌تواند عمر ذخایر پایان‌پذیر نفت و گاز را کاهش داده، محیط زیست را با خسارت‌های جدی مواجه نموده و صدمات جبران‌ناپذیری را به فرآیند توسعه‌ی پایدار، افزایش درآمدهای ارزی و گسترش زیرساخت‌های اقتصادی کشور وارد کند.

بر اساس داده‌های منتشرشده توسط یورواستات، کشورهای عضو اتحادیه‌ی اروپا افزایش قابل‌توجهی در تقاضای انرژی نهایی خود داشته‌اند که تقریباً به معادل ۱۰۸۴ میلیون تن نفت در سال ۲۰۱۵ رسیده است که ۴۲۲ میلیون تن مربوط به بخش‌های مربوط به ساختمان است که ۳۹٪ کل تقاضا می‌باشد[۱]. بخش ساختمان به عنوان بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده‌ی انرژی، بیش از ۳۳,۳۳٪ از مصرف نهایی انرژی را به‌صورت جهانی تشکیل می‌دهد و به عنوان منبع مهم انتشار CO۲ درنظر گرفته می‌شود [۲]. علاوه‌بر این، مشخص شد که نیمی از انرژی مصرفی در ساختمان توسط سیستم‌های تهویه‌ی مطبوع [۱] مصرف می‌شود [۳]. آکیبر و همکاران [۴] مقدار آن را ۶۰٪ گزارش کرده‌اند. در آسیا، آمریکای لاتین، هند و چین انتظار می‌رود روند تقاضای سرمایش با افزایش چشمگیری از ۰/۸ اگزاژول در سال ۲۰۱۰ به ۵/۸ اگزاژول در سال ۲۰۵۰ برسد. این در حالی است که برای چین انتظار می‌رود افزایش تقاضای سرمایش این کشور به مقداری برابر با آمریکای لاتین و آسیا تا سال ۲۰۴۰ برسد [۵].

توسعه‌ی یک فناوری جدید برای ارتقای بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در ساختمان‌ها یک مسئله‌ی مهم در میان دولت‌ها و جوامعی بوده است که هدف آن‌ها کاهش مصرف انرژی بدون تأثیر بر آسایش حرارتی در شرایط مختلف آب و هوایی است [۶]. تلفیق فناوری‌های ذخیره‌ی انرژی گرمایی[۲] در ساختمان‌ها کمک به کاهش بارهای اوج، امکان ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر و مدیریت کارآمد انرژی گرمایی را فراهم نموده و بنابراین منجر به بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها می‌شود [۷-۹]. حرارت نهفته با استفاده از مواد تغییرفازدهنده[۳]، به‌دلیل توانایی بالای ذخیره‌ی انرژی و توانایی ذخیره‌ی انرژی گرمایی، مورد توجه گسترده‌ای در برنامه‌های ساختمانی قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. یک تکنیک توسعه‌داده‌شده‌ی ذخیره‌ی انرژی گرمایی مربوط به بهبود سرمایش با کاهش تقاضای انرژی در بخش‌های ساختمان با استفاده از مواد تغییرفازدهنده‌ی می‌باشد که طی چهار دهه‌ی

۱- Heating, ventilation, and cooling (HVAC)

۲- Thermal Energy Storage

۳- Phase Changing Material

گذشته بسیار مورد توجه بسیاری از معماران و مهندسان قرار گرفته است [۱۳-۱۶]. در کشور ما هم درصورتی‌که روند مصرف کنونی انرژی ادامه یابد، ایران به‌زودی از گروه کشورهای صادرکننده‌ی انرژی خارج شده و مصرف داخلی انرژی از میزان تولید آن بالاتر می‌رود. کارشناسان سازمان بهینه‌سازی مصرف انرژی پیش‌بینی کرده‌اند که این امر در سال ۱۴۰۴ خورشیدی به وقوع بپیوندد [۱۷].

اشرف‌زاده و نیک‌پور [۱۸] در پژوهش خود به بررسی تأثیر سایبان در میزان بار سرمایشی و گرمایشی در جبهه‌های مختلف ساختمان جهت کاهش مصرف انرژی در شهر کرمان پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های اقلیمی شهر کرمان به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی، چند نوع سایبان را مورد بررسی قرار دادند و مناسب‌ترین نوع سایبان را با درنظرگرفتن ملاحظات مربوط به انرژی مصرفی ساختمان ارائه نمودند.

یزدانی و همکاران [۱۹]، انرژی بار سرمایشی ساختمان را با استفاده از سایبان و عایق حرارتی در سه اقلیم گرم، معتدل و سرد ایران تحلیل نمودند. آن‌ها یک مدل واقعی انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر، میزان انرژی مصرفی جهت سرمایش را در سه شهر اهواز، تهران و تبریز بر اساس دو راهبرد مختلف شبیه‌سازی نمودند و میزان تأثیرات آن‌ها بر مصرف انرژی الکتریکی در روز دهم تیرماه را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند.

درصورت به‌کارگیری مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان [۲۰] و عایق‌کاری ساختمان، سهم زیادی از تبادل حرارت بین محیط ساختمان و فضای بیرون از طریق پنجره‌ها خواهد بود. به‌علاوه، فضاهای نزدیک به پنجره‌ها اختلاف دمای کمتری نسبت‌به فضاهای دیگر ساختمان نسبت‌به فضای بیرون داشته باشد که این امر موجب غیریک‌نواخت‌شدن توزیع دمای ساختمان می‌شود؛ بنابراین درصورت کنترل و بهینه‌سازی تبادل حرارت از پنجره‌ها، کاستی‌های سیستم‌های معمول تهویه‌ی مطبوع برطرف خواهد شد. پژوهشگران با توسعه‌ی فناوری تولید شیشه و پنجره‌های هوشمند، تأثیرات شگرفی بر کیفیت فضای داخلی ساختمان‌ها داشته است. فناوری پنجره‌های هوشمند می‌تواند در روزهای گرم تابستان که نور آفتاب به داخل ساختمان‌ها وارد می‌شود و نیاز به استفاده از دستگاه‌های خنک‌کننده‌ی هوا را افزایش می‌دهد، به‌صورت هوشمند تاریک شود و از انعکاس نور جلوگیری کند و درعوض در فصول سرد سال، دوباره به حالت اول باز گردد و شفاف شود. این فناوری تأثیر خیره‌کننده‌ای بر مدیریت مصرف انرژی در جهت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در ساختمان دارد[۲۱-۲۷].

در پژوهش‌های مختلف، به بررسی اثر توزیع یک‌نواخت دما بر روی شرایط آسایش پرداخته شده است[۲۷۸-۲۹]. نینگ و همکاران [۲۹] سیستم سرمایش سقفی تشعشعی نوینی را به‌منظور یک‌نواخت‌نمودن دمای اتاق در مناطق گرم و شرجی چین، معرفی نمودند. جزی‌زاده و همکاران [۳۰] اثر به‌کارگیری سیستم کنترلی را که بر روی سیستم تهویه‌ی مطبوع نصب شده و مطابق با الگوی آسایش ساکنین ساختمان به کنترل شرایط آسایش می‌پردازد، مورد بررسی قرار دادند. ارزیابی آن‌ها نشان داد این سیستم با یک‌نواخت‌نمودن توزیع دما، موجب افزایش آسایش ساکنین ساختمان می‌گردد. زانگ و همکاران[۳۱] در پژوهش خود روش بهینه‌سازی جدیدی را به‌منظور یک‌نواخت‌نمودن توزیع دما همراه با کاهش مصرف انرژی پیشنهاد نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که این روش موجب کاهش مصرف انرژی و همزمان افزایش آسایش حرارتی ساکنین می‌گردد.

در این مقاله، تأثیر به‌کارگیری کویل سرمایشی شفاف با سیال عامل آب، درون پنجره‌ها، بر روی سرمایش ساختمان به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. علت استفاده از کویل در پنجره درابتدا به‌منظور یک‌نواخت‌نمودن توزیع دما و درنتیجه شرایط آسایش می‌باشد. به‌علاوه، آب موجود در کویل از طریق انعکاس و جذب قسمتی از طیف مادون سرخ نور خورشید (که با ورود به فضای اتاق موجب گرمایش آن می‌شود)، موجب کاهش مصرف انرژی مورد نیاز برای سرمایش می‌گردد. بدین منظور، ابتدا به طراحی و سپس به بررسی و آنالیز انتقال حرارت دو اتاقک با شرایط مرزی و ابعادی یکسان با سیستم‌های سرمایش متفاوت که در یکی از سیستم کنونی و در دیگری از سیستم اسپلیت استفاده شده است، می‌پردازیم.

این دو سیستم به‌طور مجزا به‌صورت زیر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است:

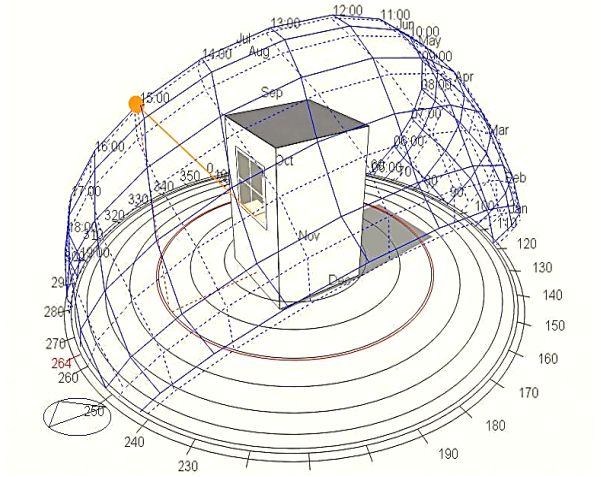
۱ - انجام آزمایش و مقایسه به‌صورت عملی و در محیط کارگاه با شرایط مرزی و ابعادی واقعی بر اساس استانداردهای موجود.

۲- شبیه‌سازی و مقایسه با استفاده از محیط نرم‌افزار دیزاین بیلدر با مشخصات و داده‌های آزمایش عملی و با کمک از روش حل و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی.

که در این مقاله به شرح هریک از روش‌ها و مقایسه‌ی نتایج با یکدیگر خواهیم پرداخت.

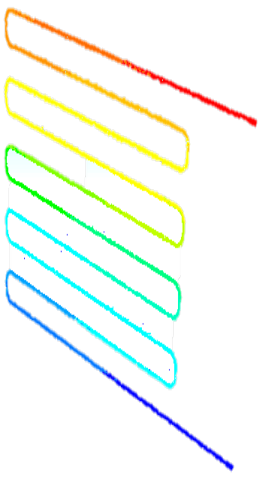
۲-مدل‌سازی عددی

اتاق مورد بررسی در این مقاله اتاقی به ابعاد ۲/۱۵ * ۱/۴ * ۱/۴ متر می‌باشد. دیوارهای اتاق از لایه‌های سیمان، آجر ۲ سانتی‌متری، پشم‌شیشه و گچ به‌ترتیب از خارج به داخل ساخته شده است که تمامی اندازه‌ها و مشخصاتی، چون ضرایب هدایت حرارتی همگی بر اساس استانداردهای موجود می‌باشد. شماتیک اتاق در شکل (۱) به نمایش درآمده است.



شکل ۱: شماتیک اتاق در فصل تابستان

همان‌طور که در قسمت مقدمه بیان شد، سیستم سرمایشی جدید مبتنی بر کویل سرمایشی بوده و بر روی پنجره تعبیه گردیده است. در این کویل شیشه‌ای شفاف، آب با دمای کمتر از قسمت پایین وارد کویل شده و پس از تبادل حرارت با دمای بیشتر از قسمت بالای کویل خارج می‌گردد. شماتیک کویل در شکل زیر به نمایش درآمده است.



شکل۲: شماتیک کویل شیشه‌ای به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش

برای تحلیل عددی مسأله‌ی یادشده، نخست باید معادله‌ی دیفرانسیلی حرکت هوا بر روی پنجره را مورد بررسی قرار داد. بدین منظور محورهای z و y را در راستای صفحه‌ی پنجره و محور x را در راستای عمود بر صفحه درنظر گرفته می‌شود. جریان سه‌بعدی با خواص فیزیکی دمای دیواره‌ی ثابت و بیشتر از دمای جریان آزاد ورودی درنظر گرفته شده است. تغییر چگالی در اثر تغییرات دما در نیروی شناوری به وسیله‌ی تقریب بوزینسک اعمال می‌گردد. جریان سیال در برخورد با هندسه به‌صورت سه‌بعدی، تراکم‌ناپذیر و پایدار درنظر گرفته شده است. جهت جلوگیری از افت فشار آب داخل کویل و همچنین درنظرگرفتن کار پمپ برای به‌گردش‌درآوردن سیال مورد نظر، در ورودی سیال، فشاری معادل ۵۰ پاسکال درنظر گرفته شده است. شرایط مرزی کامل پژوهش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: شرایط مرزی

شرط مرزی	مقدار
دمای ورودی آب به کویل	۱۶ $^{\circ}C$
دمای خروجی آب از کویل	۱۷ $^{\circ}C$
دمای هوای طرح خارج	۴۵ $^{\circ}C$
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی خارجی	۱۰ W/m۲

مدل توربولانسی استفاده‌شده در تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی، $k-\varepsilon$ و طرح مجزاسازی[۱] معادلات، بالادست[۲] انتخاب شده است. تنظیمات انجام‌شده جهت مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر در جدول ۲ مشخص شده است.

جدول ۲: تنظیمات انجام‌شده در نرم‌افزار دیزاین بیلدر

پارامتر	مقدار
طول جغرافیایی	۳۶/۳۱°
عرض جغرافیایی	۵۹/۵۳°
ارتفاع	۱۰۳۷ متر
کاربری ساختمان	مسکونی
دمای تنظیمی (دمای آسایش)	۲۱ $^{\circ}C$
تعویض هوای طبیعی	۰
ضریب عملکرد	۳
پنجره	دو جداره‌ی شفاف (ضخامت هر لایه ۳ میلی‌متر، با فاصله‌ی هوایی ۶ میلی‌متر)

۳-بررسی آزمایشگاهی

به‌منظور مطالعه‌ی آزمایشگاهی سیستم طراحی‌شده، نمونه‌ی اولیه‌ی این سیستم در کارگاه تهویه‌ی مطبوع دانشکده‌ی فنی منتظری مشهد ساخته و نصب گردید. این سیستم از یک کویل شیشه‌ای که بر داخل پنجره‌ی اتاق جایگذاری شده (شکل (۳)) و همچنین سیکل تبرید تراکمی که در خارج از اتاق تعبیه شده، تشکیل شده است. سیال عامل سیکل تبرید تراکمی R۳۱۴ و سیال آب کویل پنجره‌ای آب می‌باشد. استفاده از آب به‌علت شفاف‌بودن (عبور نور خورشید بدون مزاحمت از پنجره، ظرفیت گرمایی ویژه‌ی بالا و غیرسمی‌بودن (درصورت نشت) می‌باشد.

۱- Discretization

۲- upwind

تبادل حرارت بین سیکل آب و سیکل تبرید از طریق یک مبدل حرارتی کویلی با کویل مسی انجام می‌پذیرد. اجزای مختلف دستگاه در شکل‌های (۳ الی۶) نشان داده شده‌اند. این سیکل برای تأمین بار سرمایی مورد نیاز در فصل تابستان طراحی و ساخته شده است. به‌منظور شبیه‌سازی فضای گرم در اطراف اتاق آزمایش، پیرامون اتاق پوشانده شد (شکل (۵) و برای گرمایش از ۴ المنت الکتریکی با توان ۱۰۰۰ وات مطابق با شکل (۶) استفاده شده است. به‌منظور بررسی عملکرد این سیستم در حالت حدی، دمای محیط اطراف برابر با ۴۵ درجه‌ی سلسیوس، تنظیم شده است. پنجره‌ها درصورت رعایت اصول عایق‌بندی دیواره‌ها مطابق با مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، مهم‌ترین محل اتلاف حرارت ساختمان می‌باشند؛ بنابراین کنترل تبادل حرارت از پنجره‌ها منجر به یک‌نواخت‌شدن دما و آسایش حرارتی در نواحی مختلف اتاق می‌گردد؛ بنابراین یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این سیستم کمینه‌نمودن تغییرات دما در اتاق می‌باشد. به‌منظور بررسی یک‌نواختی دمایی، تعداد ۸ سنسور دما در اتاق تعبیه شده است. ۵ عدد از این سنسورها به فاصله‌ی ۳۰ سانتی‌متری از همدیگر بر روی دیوار نصب شد و ۳ سنسور دیگر هم هرکدام به فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متری از یکدیگر بر روی سقف به همین ترتیب نصب گردیدند.

جدول ۳: مشخصات بستر آزمون

نوع تجهیز	نام محصول	سازنده	مدل
پمپ خطی	Tobler	سوئیس	w ۷۸-i۸۰/۳۵-IS۲۵
کمپرسور نیمه‌بسته	Panasonic	ژاپن	٤hp/۱- QB-C۱٦GPX۵
کندانسور	Subcool	ایران	KW ۲-SUBCOOL
شیر انبساط	Alco	ایتالیا-آمریکا	۱۰۰HW-TCLE

هندسه‌ی کویل و پنجره‌ی بررسی‌شده در این پژوهش در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴: هندسه‌ی کویل و پنجره

تجهیز	ابعاد (مقدار)
پنجره	۰/۸۳*۰/۸۸
طول کویل	۷/۵ متر
قطر کویل	۰/۰۱ متر
تعداد ردیف کویل	۹

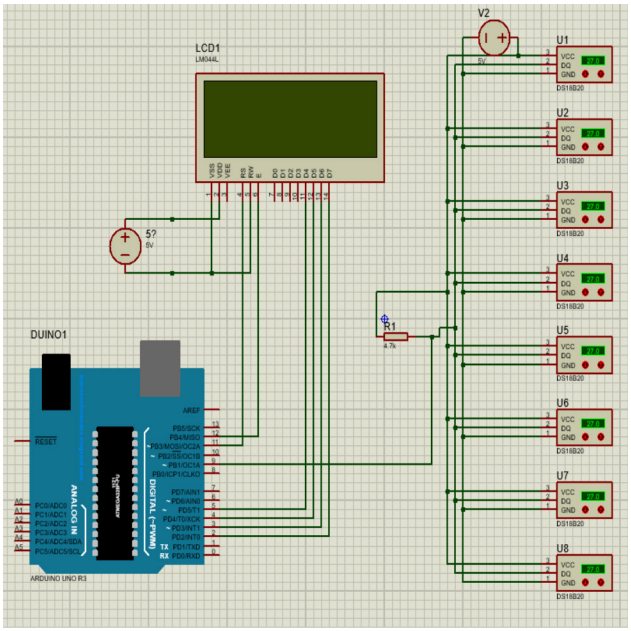
شکل ۳: پنجره با کویل شیشه‌ای استفاده‌شده در این پژوهش

شکل ۴: نمایی از اتاق و سیستم سرمایش استفاده‌شده

شکل ۵: پوشش فضای اطراف اتاق به‌منظور تثبیت دمای هوای محیط بیرون

شکل۶: استفاده از المنت‌های الکتریکی به‌منظور شبیه‌سازی شرایط بیرون در تابستان

هدف اصلی اندازه‌گیری دمای اتاق با هشت سنسور این بود که توزیع دمای نقاط مختلف اتاق بررسی شود. به‌منظور مطالعه‌ی دقیق توزیع دما، سنسور ds۱۸b۲۰ انتخاب گردید. دقت نمایش دما یک‌صدم درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. نمایشگر و آردوینو سیستم اندازه‌گیری دما بر روی یک قاب دیواری نصب شده و از بیرون بر روی دیوار اتاق نصب گردید.



شکل۷ : شماتیک مدار طراحی‌شده اندازه‌گیری دما با استفاده از نرم‌افزار پروتئوس

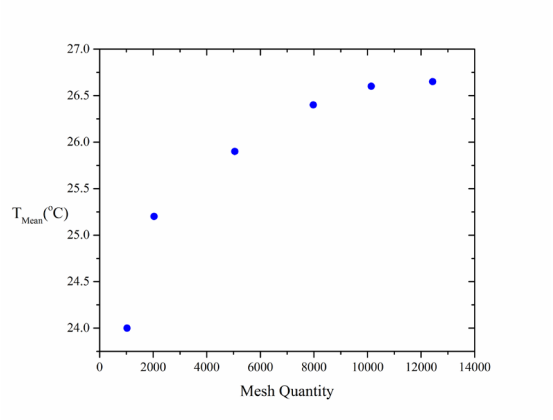
۴-بررسی نتایج:

پس از انجام شبیه‌سازی برای شهر مشهد، نتایج ذیل به‌دست می‌آیند:

۴-۱ نتایج عددی:

۴-۱-۱ بررسی استقلال از شبکه:

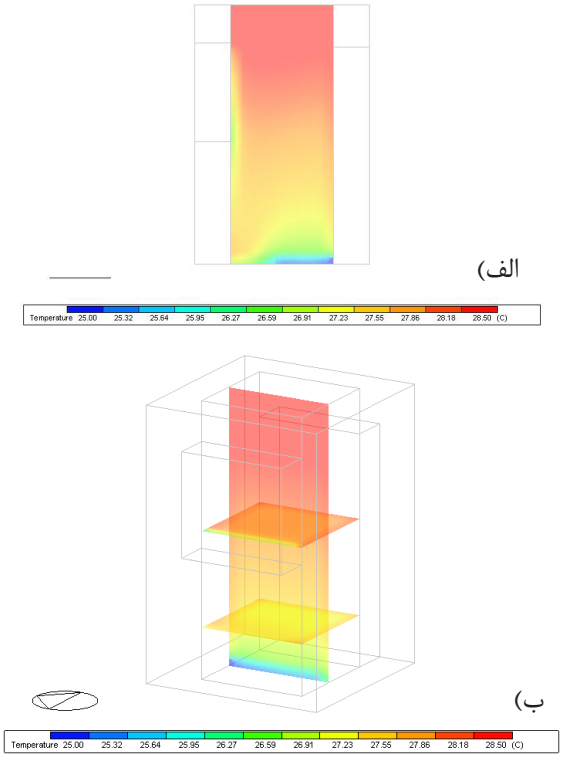
به‌منظور بررسی استقلال از شبکه‌ی نتایج حل عددی، میانگین دمای اتاق در تعداد مختلف شبکه مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به شکل، مستقل‌بودن نتایج از شبکه در تعداد ۱۰۱۲۵ شبکه محرز گردید، بدین ترتیب تعداد شبکه‌ی ۱۰۱۲۵ انتخاب گردید.



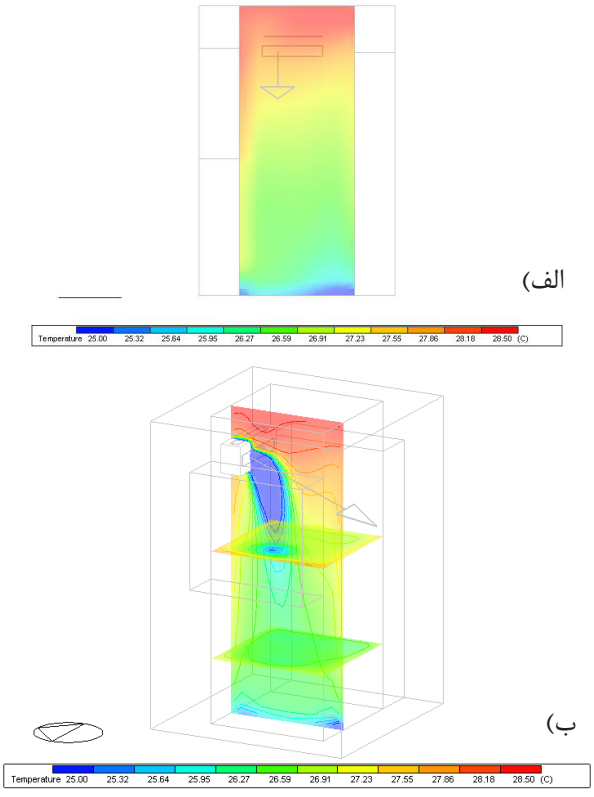
شکل ۸: بررسی استقلال از شبکه

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) ملاحظه می‌شود، استفاده از این سیستم، در مقایسه با اسپلیت موجب یک‌نواختی بیشتر دما در اتاق شده است، به‌طوری‌که تفاوت بیشینه و کمینه در بخش وسیعی از اتاق، کمتر از ۱ درجه‌ی سلسیوس می‌باشد. حال آنکه در سیستم اسپلیت، با حرکت از سمت سقف اتاق به سمت کف آن حدود ۲ درجه‌ی سلسیوس دما تغییر می‌کند. عدم توزیع یک‌نواخت دمای اتاق در حالت استفاده از اسپلیت، ناشی از ورود گرما از پنجره به‌علت اختلاف زیاد دمای هوای داخل و خارج (تقریباً ۲۰ درجه‌ی سلسیوس) می‌باشد. به‌علاوه، هوا در اطراف تبخیرگر[۱] اسپلیت، با مبرد با دمای ۵ درجه‌ی سلسیوس تبادل حرارت دارد، حال آنکه در سیستم پنجره‌ای، آب با دمای ۱۶ درجه‌ی سلسیوس وارد کویل می‌شود؛ بنابراین اختلاف دمای ۲۰ درجه‌ای مبرد در اواپراتور با دمای تنظیمی اتاق (۲۵ درجه‌ی سلسیوس)، در مقایسه با اختلاف دمای ۹ درجه‌ای آب ورودی به کویل و دمای تنظیمی اتاق، منجر به ایجاد هسته‌ی خنک‌تر در اطراف اسپلیت شده که خود این امر منجر به غیریک‌نواختی دمای اتاق می‌گردد.

۱- Evaporator



شکل۹: کانتور دمای محیط اتاق در سرمایش با کویل پنجره‌ای در نرم‌افزار دیزاین بیلدر: الف) نمای جانبی، ب) نمای ایزومتریک.



شکل ۱۰: کانتور دمای محیط اتاق در سرمایش با اسپلیت در نرم‌افزار دیزاین بیلدر: الف) نمای جانبی، ب) نمای ایزومتریک.

به‌منظور بررسی دو سیستم از لحاظ مصرف انرژی، میزان مصرف سیستم‌های مذکور در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی انرژی این دو سیستم در نرم‌افزار دیزاین بیلدر نشان می‌دهد مصرف انرژی سیستم اسپلیت ۲۰۹ کیلووات ساعت و مصرف انرژی سیستم کویل پنجره‌ای در بازه‌ی زمانی یکسان ۱۹۵ کیلووات ساعت می‌باشد. با توجه به نتایج، مصرف انرژی سیستم پنجره‌ای حدود ۶/۷ ٪ کمتر از سیستم اسپلیت می‌باشد.

۴-۲ نتایج آزمایشگاهی و اعتبارسنجی حل عددی:

پس از پایدارشدن انتقال حرارت و ثابت‌شدن دماها، نسبت‌به ثبت داده‌ها اقدام گردید و دماها همان‌طور که در جدول (۵) ملاحظه می‌گردد، به‌دست آمدند. با توجه به این جدول، درحالی‌که دمای هوای بیرون ۴۵ درجه‌ی سلسیوس می‌باشد، ۸ سنسور حداکثر نوسان دمایی حدود ۱ درجه‌ی سلسیوس را نشان می‌دهد که کاملاً با مدل‌سازی عددی هم‌خوانی دارد.

جدول۵ : خروجی دمای سنسورهای مطالعه‌ی آزمایشگاهی (برحسب درجه‌ی سلسیوس)

شماره‌ی سنسور	مقدار دما (درجه‌ی سلسیوس)
۱	۲۷/۱۹
۲	۲۷/۰۶
۳	۲۶/۸۷
۴	۲۶/۵۶
۵	۲۶/۴۲
۶	۲۶/۳۸
۷	۲۶/۲۳
۸	۲۶/۱۲

۵-نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، یک سیستم سرمایش جدید مبتنی بر سیکل تبرید تراکمی پیشنهاد گردید و به‌صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی آزمایشگاهی این سیستم در محیط کارگاه تهویه‌ی مطبوع دانشگاه فنیوحرفه‌ای خراسان رضوی و ارزیابی عددی آن در نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام گرفت. در این سیستم، سرمایش از طریق کویل‌های پنجره‌ای با سیال عامل آب اتفاق می‌افتد. از آنجایی که در ساختمان‌ها درصورت رعایت مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، مهم‌ترین بخش تبادل حرارت با محیط ساختمان پنجره‌ها می‌باشد، استفاده از سیستم پنجره‌ای، ضمن کاهش انتقال حرارت به بیرون، منجر به یک‌نواختی دمایی در ساختمان و درنتیجه آسایش حرارت یک‌نواخت در کل نواحی ساختمان خواهد شد. عملکرد سیستم مذکور با سیستم سرمایش اسپلیت مقایسه شد. از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، می‌توان به توزیع دمای یک‌نواخت (اختلاف دمای حدود ۱ درجه‌ی سلسیوس در اتاق) و کاهش مصرف انرژی حدود ۶/۷ ٪ ناشی از عملکرد این سیستم در مقایسه با سیستم سرمایش اسپلیت اشاره نمود.

تأییدیه‌ی اخلاقی : این مقاله از پروژه‌ی مشترک بین گروه‌های مکانیک و برق دانشکده‌ی فنی منتظری مشهد استخراج شده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی بین عوامل مشارکت‌کننده وجود ندارد.

۶-مراجع:

[1] Olivieri L, Tenorio JA, Revuelta D, Navarro L, Cabeza LF. Developing a PCM-enhanced mortar for thermally active precast walls. Construction and Building Materials. 2018 Aug 30;181:638-49.

[2] Devaux P, Farid M. Benefits of PCM Underfloor Heating with PCM Wallboards for Space Heating in Winter. InThermal Energy Storage with Phase Change Materials 2021 Jul 25 (pp. 310-327). CRC Press.

[3] Young BA, Falzone G, Wei Z, Sant G, Pilon L. Reduced-scale experiments to evaluate performance of composite building envelopes containing phase change materials. Construction and Building Materials. 2018 Feb 20;162:584-95.

[4] Akeiber H, Nejat P, Majid MZ, Wahid MA, Jomehzadeh F, Famileh IZ, Calautit JK, Hughes BR, Zaki SA. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016 Jul 1;60:1470-97.

[5] Saffari M, de Gracia A, Ushak S, Cabeza LF. Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017 Dec 1;80:1239-55.

[6] Liu C, Zhou Y, Li D, Meng F, Zheng Y, Liu X. Numerical analysis on thermal performance of a PCM-filled double glazing roof. Energy and buildings. 2016 Aug 1;125:267-75.

[7] Du K, Calautit J, Wang Z, Wu Y, Liu H. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. Applied energy. 2018 Jun 15;220:242-73.

[8] Peker M, Kocaman AS, Kara BY. Benefits of transmission switching and energy storage in power

systems with high renewable energy penetration. Applied Energy. 2018 Oct 15;228:1182-97.

[9] Kasaeian A, Pourfayaz F, Khodabandeh E, Yan WM. Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review. Energy and Buildings. 2017 Nov 1;154:96-112.

[10] Zhou D, Zhao CY, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied energy. 2012 Apr 1;92:593-605.

[12] Maccarini A, Hultmark G, Bergsøe NC, Afshari A. Free cooling potential of a PCM-based heat exchanger coupled with a novel HVAC system for simultaneous heating and cooling of buildings. Sustainable Cities and Society. 2018 Oct 1;42:384-95.

[13] Tyagi VV, Chopra K, Kalidasan B, Chauhan A, Stritih U, Anand S, Pandey AK, Sarı A, Kothari R. Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021 Oct 1;47:101318.

[14] Boussaba L, Foufa A, Makhlouf S, Lefebvre G, Royon L. Elaboration and properties of a composite bio-based PCM for an application in building envelopes. Construction and Building Materials. 2018 Oct 10;185:156-65.

[15] Reyez-Araiza JL, Pineda-Piñón J, López-Romero JM, Gasca-Tirado JR, Arroyo Contreras M, Jáuregui Correa JC, Apátiga-Castro LM, Rivera-Muñoz EM, Velazquez-Castillo RR, Pérez Bueno JD, Manzano-Ramirez A. Thermal Energy Storage by the Encapsulation of Phase Change Materials in Building Elements—A Review. Materials. 2021 Jan;14(6):1420.

[16] Uno T, Hokoi S, Ekasiwi SN. Passive Cooling Strategies to Reduce the Energy Consumption of Cooling in Hot and Humid Climates in Indonesia. InSustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia 2018 (pp. 407-418). Springer, Singapore.

[17] Shahcheraghian A, Ahmadi R, Malekpour A. Utilising latent thermal energy storage in building envelopes to minimise thermal loads and enhance comfort. Journal of Energy Storage. 2021 Jan 1;33:102119.

[۱۸] اشرف‌زاده، زینب و نیک‌پور، منصور، ۱۳۹۷، بررسی تأثیر سایبان در میزان بار سرمایشی و گرمایشی در جبهه‌های مختلف ساختمان جهت کاهش مصرف انرژی (شهر کرمان)، دومین کنفرانس ملی معماری و شهرسازی.

[19] Yazdani, H., Pulaei, Z., Asghari, M. Energy analysis of building cooling load using canopies and thermal insulation in three warm, temperate and cold climates of Iran. Journal of Mechanical Engineering. 2018 123: 14-22.

[۲۰] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۹۹، مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان.

[21] Feng M, Bu X, Yang J, Li D, Zhang Z, Dai Y, Zhang X. smart windows based on photonic crystals. Journal of Materials Science. 2020 Jul;55(20):8444-63.

[22] Teixeira H, Gomes MG, Rodrigues AM, Pereira J. Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films. Building and Environment. 2020 Jan 15;168:106474.

[23] Martın-Palma, R.J. (2009) “Spectrally selective coatings on glass: solar-control and low-emissivity coatings.” Journal of Nanophotonics, Vol. 3, 030305.

[24] Ragulis P, Ängskog P, Simniškis R, Vallhagen B, Bäckström M, Kancleris Ž. Shielding effectiveness of modern energy-saving glasses and windows. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017 Jun 21;65(8):4250-8.

[25] Kiani GI, Olsson LG, Karlsson A, Esselle KP. Transmission of infrared and visible wavelengths through energy-saving glass due to etching of frequency-selective surfaces. IEEE microwaves, antennas & propagation. 2010 Jul 1;4(7):955-61.

[26] Sun K, Tang X, Yang C, Jin D. Preparation and performance of low-emissivity Al-doped ZnO films for energy-saving glass. Ceramics International. 2018 Nov 1;44(16):19597-602.

[۲۷] شاعری جلیل، یعقوبی محمود، وکیلی‌نژاد رزا. تأثیر شیشهٔ هوشمند الکتروکرومیک بر بار سرمایش ساختمان‌های اداری در اقلیم گرم و مرطوب، گرم و خشک و سرد ایران. مهندسی و مدیریت انرژی ۱۳۹۹; ۱۰ (۳) :۹۹-۹۰

[28] Catalina T, Virgone J, Kuznik F. Evaluation of thermal comfort using combined CFD and experimentation study in a test room equipped with a cooling ceiling. Building and environment. 2009 Aug 1;44(8):1740-50.

[29] Ning B, Chen Y, Liu H, Zhang S. Cooling capacity improvement for a radiant ceiling panel with uniform surface temperature distribution. Building and Environment. 2016 Jun 1;102:64-72.

[30] Jazizadeh F, Ghahramani A, Becerik-Gerber B, Kichkaylo T, Orosz M. User-led decentralized thermal comfort driven HVAC operations for improved efficiency in office buildings. Energy and Buildings. 2014 Feb 1;70:398-410.

[31] Zhang, S., Cheng, Y., Fang, Z., Huan, C. and Lin, Z., (2017). “Optimization of room air temperature in stratum-ventilated rooms for both thermal comfort and energy saving”. Applied Energy, 204, pp.420-431.