

بهبود عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع در کلاس‌های درس مدارس دخترانه (نمونه موردی : شهر اهواز)

امید رهایی* راحله سیفی** مهرنام صباغ***

* استادیار، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران. O.rahaei@sru.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

Raheleseifi31@gmail.com

*** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران.

Mehrmamsa@gmail.com

- این مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم راحله سیفی با عنوان "طراحی دبیرستان دخترانه در اهواز با رویکرد بهبود عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع در کلاس‌های درس" می‌باشد.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ تاریخ شروع بررسی: ۱۴۰۴/۷/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۶

چکیده

از دیرباز تامین تهویه مناسب و کارآمد در مدارس و کلاس‌های درس از مهم‌ترین نیازها بوده و در مدارس دخترانه به علت نوع پوشش آن‌ها این موضوع از اهمیت دو چندان برخوردار است. بر اساس مشاهدات صورت گرفته سیستم‌های تهویه و نحوه استقرار آن‌ها در کلاس‌های درس نواحی مختلف ایران مشابه یکدیگر بوده و از الگوی مشخصی پیروی می‌کنند و در غالب آن‌ها سیستم‌های تهویه مکانیکی در انتهای کلاس تعبیه شده و پخش و گردش‌هوای یکسان و مناسبی در نقاط مختلف کلاس صورت نمی‌گیرد و این امر همواره در کیفیت یادگیری دانش‌آموزان تاثیر بسزایی داشته است. لذا این پژوهش با هدف یکسان‌سازی، گردش و تهویه هوا در کلاس‌های درس صورت گرفته است. روش تحقیق استفاده شده دارای رویکردی کمی است و راهبردهای ترکیبی شامل: برداشت‌های تجربی، شبیه‌سازی و پژوهش موردی را به‌صورت همزمان مورد استفاده قرار می‌دهد. مدارس شهر اهواز به‌عنوان جامعه آماری پژوهش حاضر انتخاب گشته و این تحقیق در نظر دارد تا با استفاده از مداخلات معماری در کلاس‌های درس، شرایط گردش هوا و تهویه را در آن‌ها بهبود بخشد، به همین جهت از نرم‌افزارهای انسیس فلوئنت و گامبیت برای انجام شبیه‌سازی و تحلیل به روش سی‌اف‌دی استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از استراتژی‌های مناسب طراحی، می‌توان عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع در کلاس‌های درس را بهبود بخشید و به تبع آن، شرایط مطلوب‌تری برای آموزش و یادگیری دانش‌آموزان، به ویژه در مدارس دخترانه فراهم آورد.

کلیدواژه‌ها: تهویه مطبوع، کلاس درس، مدرسه دخترانه، اهواز

Enhancing the Performance of HVAC Systems in Girls' School Classrooms (Case Study: Ahvaz City)

Omid Rahaei*

Rahele seifi**

Mehrnam Sabbagh***

*Assistant Professor, School of Architecture and Urban Design, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. O.rahaei@sru.ac.ir

**M.A. Student in Architecture, Jahad University of Khuzestan, Ahvaz, Iran. Raheleseifi31@gmail.com

***M.A. Student in Architecture, Jahad University of Khuzestan, Ahvaz, Iran. Mehrnamsa@gmail.com

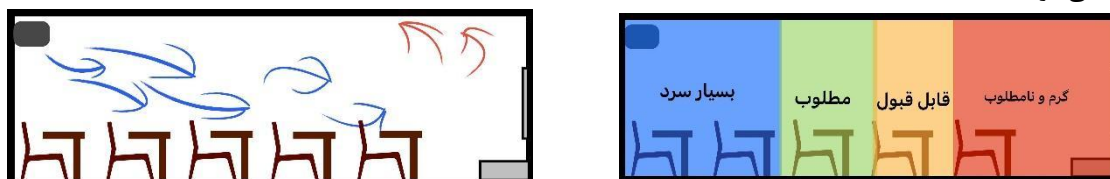
Abstract

Providing appropriate and efficient ventilation in classrooms and schools is among the most important needs, and in girls' schools, due to their type of clothing, this issue becomes even more significant. Based on conducted observations, ventilation systems and their placement in classrooms across different regions of Iran are similar and follow a specific pattern. In most cases, mechanical ventilation systems are installed at the end of the classroom, and uniform and proper air distribution and circulation in various parts of the classroom do not occur, which affects the quality of students' learning. Therefore, this research is conducted with the aim of standardizing, circulating, and ventilating air in classrooms. The research method in this study adopts a quantitative approach and simultaneously utilizes a combination of strategies, including empirical observations, simulation, and case study analysis. The schools of Ahvaz city have been selected as the statistical population of this research, and the study intends to improve airflow and ventilation conditions in classrooms through architectural interventions. For this purpose, ANSYS Fluent and Gambit software have been used to perform simulation and analysis using the CFD method. The results of this research indicate that by employing appropriate design strategies, the performance of HVAC systems in classrooms can be improved, and consequently, more favorable conditions for teaching and learning especially in girls' schools can be provided.

Keywords : Air conditioning , Classroom , Girls' high school , Ahvaz

۱. مقدمه

تامین سلامت و رفاه دانش‌آموزان در طراحی دبیرستان‌های امروزی به ویژه در ایران یک مسئله اساسی در آموزش و پرورش می‌باشد و هدف اصلی در طراحی ساختمان‌ها با کاربری آموزشی، فراهم کردن محیطی است تا در آن معلمان و دانش‌آموزان به تعلیم و تربیت تشویق شوند. با توجه به این نکته که دانش‌آموزان به طور میانگین در هر سال تحصیلی میزان ۱۴۰۰ ساعت از زندگی خود را در مدرسه می‌گذرانند (ماهوتی‌راد و موسوی، ۱۳۹۸) کیفیت هوای داخل ساختمان و آسایش حرارتی جز عناصر اولیه‌ای به شمار می‌آیند که بر سلامت، رفاه و عملکرد دانش‌آموزان تأثیر دارند (پری‌دخت و همکاران، ۱۴۰۴) لذا در یک ساختمان با معماری خوب، ضرورت دارد تا فرآیند تأمین هوای تازه و تهویه با مصرف کمترین انرژی به همراه گردش مؤثر جریان هوا در بیشترین نقاط فضای داخلی صورت پذیرد. (رهایی و همکاران، ۱۴۰۳). فراهم آوردن شرایط آسایش حرارتی برای دانش‌آموزان یک چالش مهم در مدارس به شمار آمده و عواملی نظیر آب و هوا، فصل، سیستم‌های گرمایشی، جنسیت و عایق لباس همگی بر میزان آسایش حرارتی دانش‌آموزان تأثیر می‌گذرانند (پری‌دخت و همکاران، ۱۴۰۴). مشاهدات صورت گرفته آشکار می‌کند که در استان خوزستان، تهویه غالب ساختمان‌های اداری به کمک دستگاه‌های مکانیکی صورت می‌گیرد (رهایی و همکاران، ۱۴۰۳). طراحی تمامی مدارس و فضاهای آموزشی کشور عموماً پیرو ضوابط و آیین‌نامه‌های ابلاغیه از سوی مراجع ذی صلاح می‌باشند و رعایت آیین‌نامه‌هایی مانند سند تحول بنیادین آموزش و پرورش (سند مشهد مقدس) (۱۳۹۰) و ضوابط طراحی ساختمان‌های آموزشی (برنامه‌ریزی معماری همسان مدارس ابتدایی و متوسطه) (ضابطه شماره ۶۹۷) الزامی می‌باشد لذا اکثریت مدارس ایران با پیروی از این آیین‌نامه‌ها، دارای طراحی مشابه با یکدیگر هستند و بر اساس مشاهدات تجربی در آن‌ها جهت تأمین سرمایش استفاده از کولرگازی پنجره‌ای و یا دوتکه بسیار مرسوم بوده و بسیاری از کلاس‌ها با این شیوه تهویه می‌شوند. مسئله بزرگ این کولرها، عدم توزیع یکسان هوای خنک و مطلوب در تمام نقاط کلاس به شیوه‌ای یکسان است. توزیع باد این کولرها به گونه‌ای است که به عنوان مثال دانش‌آموزی که در مقابل کولر نشسته، هوای بسیار خنک به او می‌وزد و از شدت سرما ناچار به اعتراض است، درحالی‌که در آنسوی کلاس که باد مستقیم کولر وجود ندارد، هوا بسیار نامطلوب و گرم است. به عبارتی برخی خواهان خاموش شدن کولر و برخی دیگر خواهان روشن بودن آن هستند. درواقع مشکل اصلی این کولرها عدم توزیع یکسان هوای مطبوع در تمام نقاط کلاس بوده و قسمتی از کلاس به شدت خنک و بخش دیگر آن گرم می‌باشد. وضعیت فوق در مدارس دخترانه نیز به علت نوع پوشش و لباس آن‌ها حادتر است. بنابراین ضرورت دارد تا راهکاری در جهت توزیع مناسب و ارتقای گردش هوا در کلاس‌های درس مدارس چاره‌اندیشی شود. مداخلات معماری راهکاری دائمی و مناسب در جهت تحقق مسئله بیان شده هستند و به وسیله بهره‌مندی از آن‌ها می‌توان در تمامی مدارس موجود و حتی مدرسی که در آینده ساخته می‌شوند گردش هوایی مناسب و توزیعی یکسان را در کلاس‌های درس فراهم آورد. لذا هدف اصلی این پژوهش، برطرف کردن مسئله فوق و یکسان‌سازی فرآیند تهویه مطبوع در تمام فضای کلاس است که این هدف به کمک مداخله در وضعیت معماری کلاس برآورده می‌شود.



تصویر ۱. شماتیک گردش هوا و ناحیه‌بندی آسایش حرارتی یک کلاس درس رایج

بدین اساس پرسش‌های پژوهش حاضر به شرح زیر خواهند بود :

۱. چگونه می‌توان جریان هوای مطلوبی را به صورت یکنواخت در فضای داخلی کلاس‌های درس، دبیرستان دخترانه به صورتی برقرار نمود تا ضمن تأمین شرایط آسایش دانش‌آموزان، مصرف انرژی نیز تحت کنترل باشد؟
۲. آیا مداخله در معماری و ایجاد تغییرات در ساختار عناصر معماری کلاس می‌تواند موجب شود تا فرآیند یکنواخت‌سازی جریان هوای داخل کلاس‌ها تسهیل شود؟

۲. مبانی نظری

بازشوها تأثیر فراوانی بر الگوی جریان هوا در فضای داخل ساختمان دارند (شتابیواش^۱، ۲۰۱۵). لازم به یادآوری است که کلاس‌های درس در مناطق گرم و مرطوب ایران، نیازمند سیستم‌های موثر تهویه مطبوع هستند که به دلایل گوناگون عمده‌تاً هزینه‌زا می‌باشند. در کلاس‌های مذکور، شرایط آسایش بسیار ناپایدار است و محیط درس باید به گونه‌ای باشد که جریان هوای مطبوع در کل فضای داخلی کلاس برقرار گردد و ضمن برقراری دمای آسایش، سرعت حرکت آن نیز مناسب باشد (چیل^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). جهت ارزیابی مدارس، مقیاسی در آزمایشگاه طراحی و برنامه‌ریزی دانشگاه جورجیا تهیه شده است. این مقیاس، نگاهی به محیط مدرسه و جنبه‌های مختلف آن دارد و بیان می‌دارد که مدرسه و محیط آن در میزان یادگیری دانش‌آموزان بسیار موثر است (کامل‌نیا، ۱۳۸۸). تحقیقات نشان می‌دهند، مسائل مربوط به کیفیت هوای داخل و دمای داخلی ساختمان در سال‌های اخیر به دلایل طراحی فضاهای داخلی آن از لحاظ معماری، تشدید شده است (فرزام‌شاد، ۱۳۸۸). یکی از مهم‌ترین دلایل معمول و البته تأثیرگذار آن که مستقیماً با شیوه طرح فضا و عملکرد آن مرتبط است، تهویه نامناسب و انباشت آلاینده‌های هوا برد می‌باشد (شاو^۳، ۱۹۹۷). محققین دریافتند که تهویه اختلاطی به شکل چشمگیری تحت تأثیر طراحی دیواره‌های داخلی است. هرچند نسبت به طرح‌های سنتی، استفاده از جداکننده‌های داخلی امروزی که تا زیر سقف کاذب ارتفاع یافته‌اند، الگوی گردش جریان هوا را بهبود می‌بخشد (کائو و هی^۴، ۱۹۹۴). همچنین پارتیشن بندی‌های داخلی می‌تواند عملکرد سیستم تهویه را بطرز قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار دهد (یوان^۵ و همکاران، ۱۹۹۸) در پژوهشی که با هدف بررسی اثرات مختلف جداره‌های داخلی بر شکل جریان هوا و نوسانات دمایی آن صورت گرفت بررسی شاخص PMV نشان داد که ارتفاع جداره‌های داخلی بر نوسانات دمایی بسیار موثر است (بوئمن^۶ و همکاران، ۱۹۹۲). همچنین تحقیق دیگری نیز در ارتفاع بهینه پارتیشن‌ها و تأثیر آن بر الگوی جریان هوای داخل انجام شد (چو و توسی^۷، ۱۹۹۵). شاخص PMV به جهت بررسی کیفیت هوای داخل در فضای داخلی به منظور بررسی میزان آلاینده‌های هوا برد مجدداً مورد مطالعه قرار گرفت تا این میزان شناسایی گردد (لی و آوبی^۸، ۲۰۰۴). لین^۹ و همکارانش، مدل آشفستگی کا اسیلون RNG^{۱۰} را برای پیش بینی الگوی جریان هوای داخل در زمان تهویه لایه‌ای مورد استفاده قرار دادند. این آزمون‌ها نشان داد تغییرات در نوع طراحی می‌تواند مصرف انرژی را ضمن بهبود الگوی جریان هوای داخل بهبود بخشد. جریان هوای داخل به صورت لامینار توسط تیان در فضای بسته مورد آزمون قرار گرفت و فرآیند تهویه به روش محاسبات عددی بررسی شد. نتایج نشان دادند که به شرط انجام مداخلاتی در فرم معماری، ضمن بررسی شاخص‌های PMV ۷ و ۸PPD امکان بهبود وضعیت آسایش حرارتی ساکنین میسر خواهد بود (لین و همکاران، ۲۰۰۴). اندازه مطلق عدد ارشمیدوس در تحقیق دیگری افزایش داده شد و نتیجه بدست آمده حاکی از آن بود که کیفیت تهویه هوا متغیر خواهد بود (توماسو^{۱۱} و همکاران، ۱۹۹۹). تحقیقات دیگری در دمای ۲۶ درجه با رطوبت ۶۰ درصد، انجام گرفت و این نتیجه حاصل شد که با بهبود فرآیند تهویه میزان قابل توجهی انرژی صرفه جویی می‌گردد (سکار^{۱۲}، ۱۹۹۵). پژوهش دیگری در دمای ۲۰ درجه و رطوبت نسبی ۳۰ درصد صورت پذیرفت و این نتیجه حاصل شد که با بالا رفتن ۲ تا ۳ درجه دمای هوای داخل، تهویه بهتری بدست می‌آید و آسایش حرارتی ساکنان برقرار می‌شود (کامپارچیک^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۰). براساس تحقیقاتی که درخصوص کیفیت هوای داخل و خارج بنا و میزان ارتباط آن با یکدیگر انجام شد مشخص گردید که هوای داخل، ترکیبی از هوای خارج و آلاینده‌های آن است که تابعی از میزان نفوذپذیری ساختمان، نوع تهویه و شرایط اقلیمی محیط می‌باشد

1. Shetabivash

2. Chlela

3. Shaw

4. Cao & He

5. Yuan

6. Bauman

7. Chow & Tsui

8. Lee & Awbi

9. Lin

10. K-ε

11. Tommaso

12. Sekhar

13. Kaczmarczyk

و البته آلاینده‌های داخلی نیز به آن اضافه می‌شوند (وید¹⁴ و همکاران، ۱۹۷۵). همچنین بررسی دیگر نشان داد که چگالی هوای داخل با توجه به میزان ذرات هوابرد آن نسبت به هوای خارج ساختمان کمتر بوده، ضمن اینکه این مسئله به شیوه تهویه داخلی ساختمان بسیار وابسته می‌باشد (فریجر و بلوئمن¹⁵، ۲۰۰۰). مطالعات نشان داد که سطح خارجی مواد بکار رفته در تزئینات داخلی ساختمان تا چه حد می‌تواند میزان آلودگی هوای داخل را بالا ببرد. این مسئله نیز با کیفیت مواد مورد استفاده در فضای داخل ارتباط مستقیم دارد و همچنین به شرایط تهویه نیز بستگی خواهد داشت (سدوئیکیت و بلیودژیوس¹⁶، ۲۰۰۵). بهبود فرآیند تهویه و هم دمایی بخش‌های مختلف هوای داخل در فضای داخلی هر ساختمان به شکل بسیار قابل توجهی، می‌تواند موجب کاهش بیماری‌های روانی افراد در فضای داخل شود (وارگوکی¹⁷ و همکاران، ۲۰۰۰). در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی در زمینه تهویه مطبوع داخلی و ارتقای کیفیت آن در جهان صورت گرفته (کوی¹⁸ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژئو و اوکا¹⁹، ۲۰۲۱؛ سوامی²⁰، ۲۰۲۱؛ حسن²¹ و همکاران، ۲۰۲۱؛ لن²² و همکاران، ۲۰۲۱) که عمدتاً با روش دینامیک سیالات محاسباتی (سی‌اف‌دی)²³ (هیروس²⁴ و همکاران، ۲۰۲۱؛ لیو²⁵ و همکاران، ۲۰۲۰؛ کومپاتشر²⁶ و همکاران، ۲۰۱۷) و استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت²⁷ (چن²⁸ و همکاران، ۲۰۲۱؛ رهایی و عظمتی، ۱۳۹۹؛ رهایی و روسائی، ۱۳۹۶؛ رهایی، ۱۳۹۳) جهت شبیه‌سازی‌ها و محاسبات عددی بوده‌اند (نانسی²⁹ و همکاران، ۲۰۲۲؛ نگمان‌خان³⁰ و همکاران، ۲۰۰۸؛ لائو و چن³¹، ۲۰۰۶؛ جیانگ و چن³²، ۲۰۰۱؛ کلی³³ و همکاران، ۲۰۰۰). با توجه به توضیحات مذکور در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز جریان هوا نظیر انسیس فلوئنت اجتناب ناپذیر می‌باشد و شایان ذکر است برنامه نام برده به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین و بهترین ابزار در حوزه مکانیک سیالات بوده و مورد تایید اکثریت جوامع علمی می‌باشد. همچنین ضرورت دارد تا خروجی‌های این برنامه با تکنیک سی‌اف‌دی تحلیل گردد زیرا این روش در تحقیقات پیشین مورد استفاده قرار گرفته و مورد تایید آنها می‌باشد. پژوهش‌های مرتبط با تهویه و گردش هوا به دلیل بهینه‌سازی تهویه برای انسان‌ها عموماً از یک استاندارد آسایش حرارتی استفاده می‌کنند و در این زمینه استانداردهای گوناگونی وجود دارد، استانداردهایی مانند شاخص‌های ۷PMV و ۸PPD و یا استاندارد ۵۵ شرایط محیطی حرارتی برای سکونت انسان که توسط انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا³⁴ تدوین گشته که به اختصار اشری ۵۵ نام دارد که این استاندارد (اشری ۵۵)، جز یکی از پرکاربردترین آن‌ها می‌باشد. در پژوهش‌های مربوط با سیستم‌های تهویه مطبوع که در ارتباط با معماری هستند انجام مداخله در عناصر کالبدی معماری امری ضروری است و پژوهش حاضر نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. بنابراین بنا بر تحقیقات پیشین، تدابیر شرح داده شده باید در پژوهش فوق لحاظ گشته و به آن‌ها توجه نمود.

14.Wade III

15.Freijer & Bloemen

16.Šeduikyte & Bliūdžius

17.Wargocki

18.Cui

19.Zhou & Ooka

20.Swamy

21.Hassan

22.Lan

23.Computational Fluid Dynamics (CFD)

24.Hirose

25.Liu

26.Kompatscher

27.Ansys Fluent

28.Chen

29.Nancy

30.Naghman Khan

31.Lau & Chen

32.Jiang & Chen

33.Calay

34.American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)

جدول ۱. تحقیقات پیشین صورت گرفته

نوسندگان	سال	موارد مورد بررسی و یافته‌ها
صباغ	۱۴۰۳	ارتقای الگوی گردش هوا در تهویه طبیعی اقلیم گرم و نیمه مرطوب به وسیله تعبیه و جانمایی دریچه‌های بازشو.
رهایبی	۱۴۰۰	الگوی جریان هوای داخل حیاط‌های مرکزی خانه‌های اصفهان و ویژگی‌های کالبدی این فضا مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.
طاوسی و ولی‌زاده	۱۴۰۰	به وسیله استفاده از کنترل کننده‌های هوشمند و منطق بر سیستم فازی امکان صرفه‌جویی در انرژی به میزان فراتر از ۹۰ درصد مهیا می‌شود.
کارگر شریف‌آباد و همکاران	۱۴۰۰	بررسی موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی هوا در جهت ارتقای جریان تهویه و صرفه‌جویی در مصرف انرژی.
روسائی و رهایبی	۱۳۹۹	ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و محل استقرار دیوارهای جدا کننده در ارتقای تهویه داخلی و صرفه‌جویی در انرژی یک ساختمان اداری.
رهایبی و عظمتی	۱۳۹۹	ترکیب‌بندی صحیح بازوها و ایجاد نمای پلکانی در راستای باد موافق و نیز تعبیه مکنده‌های موثر در دیوارهای سمت باد می‌تواند الگوی ورود و خروج هوا را کنترل نماید و جریان تهویه طبیعی را در فضای داخل کلاس ارتقا بخشد.
کشاورز و همکاران	۱۳۹۶	با کاهش طول فضای راهرو به میزانی معین شرایط تاثیرگذاری بر سرعت و توزیع جریان هوا فراهم می‌گردد اما کاهش طول راهرو بیش از حد معین شده اثری معکوس داشته و سرعت جریان هوا و توزیع الگوی گردش هوا را کاهش می‌دهد.

با بررسی تحقیقات پیشین، مشاهده می‌شود در پژوهش‌های گذشته به موقعیت، ابعاد و تعداد دریچه‌های ورودی و خروجی، تغییر در ابعاد کلاس و مداخله در دیوارها تمرکز شده است و تاکنون تحقیقی در زمینه شکل سقف و تعبیه آویز و نصب مانع در سقف صورت نگرفته است لذا این پژوهش به صورت اختصاصی به این موارد می‌پردازد و به این دلیل تحقیق حاضر دارای نوآوری است.

۳. روش شناسی پژوهش

باتوجه به تحقیقات پیشین صورت گرفته (نیک‌پور و رهایبی، ۱۳۹۹؛ رهایبی و عظمتی، ۱۳۹۹؛ رهایبی، ۱۳۹۲) مشخص می‌شود که روش تحقیق مورد استفاده در این پژوهش از نوع کمی می‌باشد و در جهت پیشبرد اهداف خود از راهبردی ترکیبی را شامل: استفاده از ابزار شبیه‌سازی، بررسی نمونه موردی، انجام ثبت برداشت‌های میدانی و داده تجربی استفاده می‌کند. داده‌های اولیه به‌صورت تجربی در دوره آزمون از طریق مشاهدات میدانی و اندازه گیری‌های محیطی در نمونه مورد بررسی و مطالعه این پژوهش (یک کلاس موردی در یک مدرسه انتخابی به‌صورت تصادفی در شهر اهواز) که در بخش نمونه موردی به آن مفصل پرداخته شده، جمع آوری گشته است. از آنجا که هدف پژوهش حاضر، بهبود الگوی گردش جریان هوای داخل کلاس و نیز یکسان‌سازی این جریان به منظور کاهش اختلاف دمای هوا در نقاط مختلف فضای داخل به هنگام روشن بودن سیستم تهویه است، و تمرکز تحقیق بر مکانیزم تهویه و گردش هوای داخل در کلاس‌های جنوبی مدارس واقع در اقلیم گرم و نیمه مرطوب که دارای پنجره در سمت جنوب و سیستم سرمایشی آن کولرگازی بوده، می‌باشد. بنابراین پژوهش کنونی میان‌رشته‌ای بوده و رشته‌های مختلفی چون معماری، مهندسی تهویه و مکانیک سیالات را درگیر می‌نماید. تحقیق حاضر کاربردی است به علت طراحی یکسان کلاس‌های درس مدارس ایران نتایج این تحقیق می‌تواند در عرصه معماری مدارس به ویژه مدارس شهر اهواز، موثر و اجرایی باشد. همچنین با توجه به ماهیت سنجش عددی و قیاس عددی آن تحقیق کمی بوده و کمیت‌های مرتبط با پژوهش را سوال می‌نماید. شکل سقف، عوارض کلاس و نیز موقعیت مکنده و دمنده در زمان تهویه مطبوع، به‌عنوان متغیرهای مستقل این پژوهش فرض شدند. سایر عناصر کالبدی کلاس هم می‌توانند متغیر باشند اما به‌عنوان ثابت در نظر گرفته شد و این امر می‌تواند زمینه تحقیقات دیگری باشد. از آنجا که الگوی موثر گردش هوای داخلی کلاس‌ها بر مبنای وضعیت تهویه مطبوع (روشن بودن کولرهای گازی) مدنظر است و چون بنابه دلایلی که در آینده توضیح داده خواهد شد، از موضوع گرمایش صرف نظر می‌گردد، لذا فقط الگوی جریان هوای داخل تحت تاثیر جریان پخش شده از کولرگازی مورد بررسی است. زیرا اصلاح آن و

یکنواخت‌سازی آن به پخش موثر جریان هوای مطبوع در سراسر کلاس کمک می‌نماید. لذا متغیرهای مستقل در تحقیق به شرح زیرند:

- شکل سقف
- ارتفاع سقف
- نازل‌های دمنده و مکنده کولر
- عوارض نصب شده در کلاس

الگوی جریان هوا در داخل کلاس، (خصوصاً در تراز دانش‌آموزان) به هنگام روشن بودن سیستم‌های سرمایشی، به‌عنوان متغیر وابسته فرض گردیده است. این الگو در درجه اول تابع موقعیت سیستم تهویه است و با توجه به اینکه حداکثر بازدهی مدنظر است، لذا کلیه بازشوها بسته فرض می‌گردند و صرفاً بار گرمایشی اضافه ناشی از بازشوها می‌تواند شرایط را تغییر دهد. بر این اساس، فاکتورهای سرعت و الگوی گردشی جریان هوای داخل مورد سنجش واقع می‌شود. به همین دلیل مداخله در متغیرهای کالبدی معماری (متغیر مستقل که پیش از این ذکر شد) ناگزیر است و حالت‌های مختلف بررسی و آنالیز خواهند شد.



تصویر ۲. اهمیت آسایش حرارتی در ترازهای مختلف

از آنجا که تحلیل فرآیند تهویه نیازمند مداخله در معماری و محاسبات است، لذا انجام شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای ضروری می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش با روش سی‌افدی و با برنامه‌های گامبیت³⁵ و فلوئنت انجام شده‌اند: بدین ترتیب که ابتدا نقشه‌های مدل در فضای اتوکد، ترسیم و سپس به وسیله نرم‌افزار گامبیت شبکه‌بندی شد. در مرحله بعدی شرایط مرزی تعریف گردید و محاسبات عددی و شبیه‌سازی‌های نهایی در فلوئنت انجام شد تا الگوی تهویه جریان هوای پیرامونی بدست آید (رهايي، ۱۳۹۲). سپس مداخلات در محیط انجام شد و اقدام به نتیجه‌گیری گردید. روایی روش تحقیق و نرم‌افزارهای مربوطه بر اساس پژوهش‌های مطالعه شده که شرح آن‌ها در ادبیات موضوع آمده است اثبات گردید. در خصوص پایایی روش سی‌افدی نیز وضعیت مشابه مهرماه ۱۴۰۰ بر اساس داده‌های موجود و نیز بر اساس داده‌های تجربی شبیه‌سازی شد. مدل آشفتگی کا اسیلون و نیز معادلات مومنتوم ... استفاده شده است. شبکه‌بندی به شیوه هکس³⁶ با مش 0.5×0.5 متر انجام شد و بعد از ۳۸۵۰ تکرار، نتایج اصطلاحاً همگرا شدند. مطابق شبیه‌سازی‌ها، داده‌های شبیه‌سازی شده تفاوت چندانی با داده‌های ثبت شده مهرماه ۱۴۰۰ ندارند و از آنجا که اختلاف زیر ۱۰ درصد است، طبق قانون اشری قابل اعتماد بوده و پایایی تحقیق ثابت می‌شود و سایر شبیه‌سازی‌ها بر همین مبنا ادامه می‌یابند. بدین ترتیب روش انجام پژوهش حاضر، کمی بوده و ترکیبی از راهبردهای تجربی، شبیه‌سازی و پژوهش موردی است. تدابیر مورد استفاده نیز بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای، مشاهده، برداشت‌های میدانی، اندازه‌گیری‌های کارگاهی و شبیه‌سازی بوده است که این روش در تحقیقات گذشته (رهايي، ۱۳۹۲) استفاده گردیده و با استناد به آن تدابیر روش تحقیق پژوهش حاضر تایید می‌گردد.

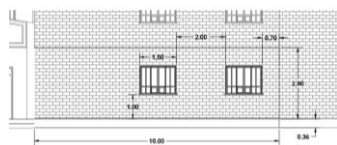
۳-۱. معرفی نمونه موردی

دبیرستان دخترانه شاهد بهار اسلام که واقع در منطقه زیتون کارمندی به صورت تصادفی انتخاب شد و یک کلاس آن مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت: این کلاس که رو به جنوب در قسمت نمای ساختمان می‌باشد مشابه همه کلاس‌های جنوبی مدارس اهواز است و به دلایلی همچون شرجی بودن، عدم جواب‌گویی کولرگازی در کلاس درس، گرمای زیاد، عدم سایه‌اندازی مناسب و ورود نور تابشی شدید خورشید به فضای داخل، این کلاس به‌عنوان نمونه موردی در جهت انجام آزمون‌ها انتخاب شد.

کلاس موردی به ابعاد ۹/۶ متر در ۷/۱ متر با کشیدگی شرقی غربی، با پنجره‌های جنوبی و با ارتفاع سقف ۲/۹ متر می‌باشد در تصاویر ۳ تا ۵ اسناد فنی و نقاط آزمون نمونه موردی را که در نرم‌افزار اتوکد³⁷ ۲۰۱۶، باز طراحی شده است، نشان می‌دهد.

جدول ۲. مختصات جغرافیایی نقاط آزمون

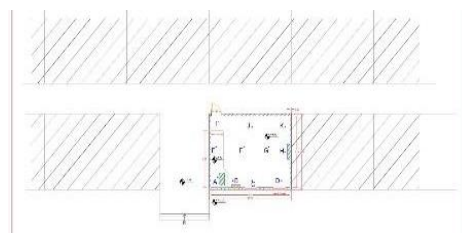
نام نقطه	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
X	۰/۸۵	۲/۷	۵	۸/۶	۰/۶	۴	۷	۹	۰/۹	۵	۹
Y	۱	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۴	۴	۴	۳/۵	۶/۵	۶	۶
Z	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸



تصویر ۵. بزرگنمایی بازشوها

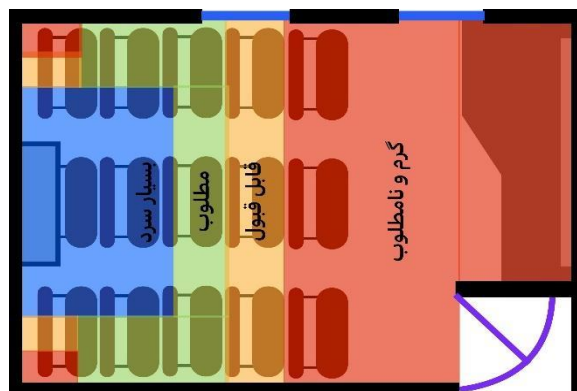


تصویر ۴. نمای مدرسه



تصویر ۳. پلان کلاس و موقعیت نقاط آزمون

یکی بزرگترین مشکلات کلاس‌های مذکور که در سمت جنوب نمای مدراس واقع شده و دارای بازشوهایی به سمت جنوب با کشیدگی در جهت شرقی - غربی بوده و در شهرهای با اقلیم گرم و نیمه مرطوب واقع شده‌اند عدم یکنواختی و توزیع مناسب جریان تهویه هوا در نقاط مختلف کلاس در زمان استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع می‌باشد که این پدیده سبب می‌شود بعضی نقاط بسیار سرد و بعضی دیگر بسیار گرم باشد که این اختلاف دما شرایط تامین آسایش حرارتی کاربران را با اختلال مواجه می‌کند که این وضعیت در کلاس‌های درس، مشابه با تصویر شماتیک شماره ۶ می‌شود لذا ضرورت دارد تا راهکاری در جهت یکنواخت‌سازی جریان هوا در نقاط مختلف و کم کردن اختلاف دمای آن چاره اندیشی شود.



تصویر ۶. پلان شماتیک ناحیه بندی آسایش حرارتی در کلاس‌های درس مرسوم

۲-۳. آزمون‌های تجربی و اثبات پایایی

آزمایشات میدانی در یک دوره یک ساله تحصیلی (۱۴۰۰-۱۴۰۱) که از ۱۲ ماه سال، ۸ ماه از کولرگازی استفاده می‌شود در سه مقطع زمانی صورت گرفته است. آزمون تجربی سنجش دما و بادسنجی در فضای داخل کلاس مدنظر در ۱۱ نقطه انتخابی و در تراز دانش‌آموزان با شرایط مختلف در دوره آزمون انجام شد (تصویر ۳).

ثبت داده‌ها توسط دستگاه دقیق دیجیتالی (یک دماسنج و رطوبت سنج صنعتی دیجیتالی) (تصویر ۷) که تا ۰/۱ درجه سانتیگراد و ۰/۱ رطوبت نسبی را نشان می‌دهد و همچنین با استفاده از یک دماسنج الکلی آلمانی و دستگاه آنومتر حرارتی (تصویر ۷) (دستگاه دیجیتالی^{۳۸}) مدل TES-۱۳۴۰ که گواهی کالیبراسیون آن دوباره در تاریخ ۱۳۹۷/۲۱/۰۱ تایید شده است، جهت ثبت درجه حرارت (درصد خطای ۰/۱)، رطوبت نسبی (درصد خطای ۰/۱) و سرعت جریان هوا (درصد خطای ۰/۱ متر بر ثانیه) برای مشخص کردن میزان دقیق سرعت جریان ورودی‌ها و خروجی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و در طول مدت آزمون به وسیله آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت انجام شده است. همچنین جهت باد غالب، سرعت آن و رفتار جریان هوا به وسیله آزمایش دود (دود اسپند و شمع) در محل بررسی شد، البته باد خارج بطور کلی جز موارد بررسی تحقیق حاضر نیست و در شبیه‌سازی‌ها دخالتی ندارد.

۳-۲-۱. برداشت‌های مهرماه ۱۴۰۰: که نیاز مبرم به کولر وجود دارد

روزهای شنبه و سه شنبه به شرح جدول زیر در تراز حدود ۸۰ تا ۱۰۰ سانتی متری سطح زمین یعنی محل استقرار دانش‌آموزان در ساعات مختلف روز (۳۰:۹ الی ۰۰:۱۰ و ۳۰:۱۱ الی ۰۰:۱۲) در زنگ‌های تفریح که مزاحمتی برای دانش‌آموزان نباشد مطابق جدول زیر صورت گرفت:

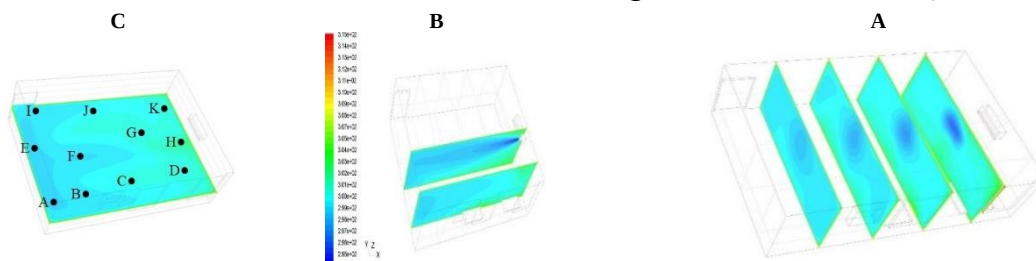
جدول ۳. میانگین دماهای اندازه‌گیری شده در نقاط آزمون در روزهای مختلف مهر ماه سال ۱۴۰۰ (درجه سانتیگراد)

نقاط / روز	مهر ۳	مهر ۷	مهر ۱۰	مهر ۱۴	مهر ۱۷	مهر ۲۱	مهر ۲۴	مهر ۲۸	میانگین
A	۲۵/۵۰	۲۵/۰۰	۲۵/۵۰	۲۵/۰۰	۲۶/۰۰	۲۵/۰۰	۲۵/۵۰	۲۵/۳۷	۲۵/۳۷
B	۲۶/۰۰	۲۶/۰۰	۲۶/۰۰	۲۵/۵۰	۲۵/۵۰	۲۶/۰۰	۲۵/۵۰	۲۵/۵۰	۲۵/۷۵
C	۲۸/۵۰	۲۹/۵۰	۲۸/۵۰	۲۹/۰۰	۲۸/۵۰	۲۹/۵۰	۲۹/۵۰	۲۸/۵۰	۲۸/۹۳
D	۳۱/۰۰	۳۱/۰۰	۳۱/۰۰	۳۲/۰۰	۳۳/۰۰	۳۱/۰۰	۳۲/۰۰	۳۱/۵۰	۳۱/۵۶
E	۲۴/۰۰	۲۴/۰۰	۲۴/۰۰	۲۴/۰۰	۲۳/۵۰	۲۴/۰۰	۲۴/۰۰	۲۴/۰۰	۲۳/۹۳
F	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰	۲۴/۰۵	۲۵/۰۰	۲۴/۹۳
G	۲۷/۰۰	۲۷/۵۰	۲۷/۰۰	۲۷/۰۰	۲۷/۰۰	۲۸/۰۰	۲۷/۰۰	۲۷/۵۰	۲۷/۲۵
H	۳۱/۵۰	۳۱/۵۰	۳۲/۵۰	۳۲/۰۰	۳۱/۵۰	۳۲/۰۰	۳۲/۰۰	۳۱/۵۰	۳۱/۸۱
I	۲۴/۵۰	۲۴/۵۰	۲۵/۰۰	۲۴/۵۰	۲۵/۰۰	۲۴/۵۰	۲۴/۵۰	۲۵/۰۰	۲۴/۶۷
J	۲۵/۰۰	۲۴/۵۰	۲۴/۵۰	۲۴/۵۰	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰	۲۵/۵۰	۲۵/۰۰	۲۴/۸۷
K	۲۶/۰۰	۲۶/۰۰	۲۶/۵۰	۲۶/۰۰	۲۵/۵۰	۲۵/۵۰	۲۵/۵۰	۲۶/۰۰	۲۵/۸۷



تصویر ۷. دیتالاگر دستگاه آنومتر

سرعت گردش باد جریان هوای داخل تنها در برابر کولر حدود ۵ متر بر ثانیه بود که بادی با دمای ۱۶ درجه را در فضای اتاق پخش می کرد. پرتاب باد کولر به داخل کلاس به صورت مستقیم ثابت شد و از گردش آن جلوگیری به عمل آمد. شمع آثار گردش هوای داخل را در مقابل کولر رو به جلو و در کنار دیوارهای جانبی رو به عقب نشان می داد درحالی که سرعت باد برای دستگاه های سرعت سنج قابل شناسایی نبود زیرا کمتر از دقت مجاز دستگاه موجود بود. لذا این بخش به شبیه سازی ها واگذار شد. مطابق جدول ۳ اختلاف دمای نقاط مختلف فضای کلاس بین ۸ تا ۱۰ درجه نیز می رسید که بسیار فاجعه بار است. اختلاف فاحش اعداد برداشت شده نشان از عدم کارایی مناسب سیستم های تهویه مطبوع در موارد لازم بود. زیرا اختلاف دمای ۸ تا ۱۰ درجه ای در فضای کلاس معنا ندارد. این اشکال در بسیاری از مدارس وجود دارد. نتایج این داده های تجربی جهت اثبات پایایی روش تحقیق و نیز اثبات مسئله و ضرورت تحقیق بکار می آید. وضعیت مشابه مهرماه ۱۴۰۰ بر اساس داده های موجود و نیز بر اساس داده های تجربی شبیه سازی شد. کلیه بازشوها بسته و دمای دیوارهای جانبی ۲۷ درجه فرض شده است، پنجره های آفتاب خور جنوبی اجازه ورود کامل آفتاب را مطابق شرایط محیط داشتند، توان گرمایشی و انرژی تابشی خورشید به ترتیب ۱۰۰۰ وات بر متر مکعب و ۵۰۰ وات بر متر مربع فرض شدند (بر اساس داده های برداشت شده و مقالات مشابه) و کولر با سرعت ۵ متر بر ثانیه هوای ۱۷ درجه را به صورت افقی به محیط کلاس پرتاب می نماید. مدل آشفستگی کا اِپسیلون و نیز معادلات مومنوم و... در پژوهش حاضر مورد استفاده هستند و شبکه بندی به شیوه هکس با مش 0.5×0.5 متر انجام شد و بعد از ۳۸۵۰ تکرار، نتایج اصطلاحاً همگرا شدند.



تصویر ۸. شبیه سازی وضع موجود بر اساس داده های تجربی و نمایش کانتورهای دمای هوای کلاس بر حسب درجه کلوین (راهنما در بخش B : A - برش های عرضی، B - برش طولی کلاس، C - تراز ۱ متری از زمین)

مطابق شبیه سازی های تصویر فوق، داده های شبیه سازی شده در تراز ۱ متری از زمین در شرایط سرمایش (مهر) نشان از تطابق اعداد و تطابق شبیه سازی ها با داده های ثبت شده مهرماه ۱۴۰۰ دارد که شرح آن در جدول شماره ۴ و نمودار شماره ۱ ارائه شده است و با توجه به اینکه اختلاف مقادیر حاصل زیر ۱۰ درصد است، طبق استاندارد اشری قابل اعتماد بوده و پایایی تحقیق ثابت می شود و براین اساس تحقیق قابل اعتبار است لذا سایر شبیه سازی ها بر همین مبنا ادامه می یابند.

جدول ۴. مقایسه مقدار عددی دما در برداشت های میدانی و خروجی های حاصل از شبیه سازی (درجه سانتیگراد)

نام نقطه	میانگین دمای ثبت شده در برداشت میدانی	مقدار دمای ثبت شده در شبیه سازی به روش سی اف دی	مقدار عددی اختلاف داده های تجربی و خروجی شبیه سازی
A	۲۵/۳۷	۲۴/۳۹	۰/۹۸
B	۲۵/۷۵	۲۶/۲۳	- ۰/۴۸
C	۲۸/۹۳	۲۷/۶۲	۱/۳۱
D	۳۱/۵۶	۳۰/۶۶	۰/۹۰
E	۲۳/۹۳	۲۴/۶۱	- ۰/۶۸
F	۲۴/۹۳	۲۵/۱۲	- ۰/۱۹
G	۲۷/۲۵	۲۷/۸۰	- ۰/۵۵
H	۳۱/۸۱	۳۱/۲۹	۰/۵۲
I	۲۴/۶۸	۲۵/۱۱	- ۰/۴۳
J	۲۴/۸۷	۲۵/۷۴	- ۰/۸۷
K	۲۵/۸۷	۲۵/۳۵	۰/۴۳



نمودار ۱. مقایسه مقدار عددی دما در برداشت‌های میدانی و خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی (درجه سانتیگراد)

باید توجه داشت کلاس‌های درس واقع در شهر اهواز در فصول گرم و زمان استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع محیطی کاملاً ایزوله هستند و تمامی بازشوها (درب‌ها و پنجره‌ها) در وضعیت بسته می‌باشند و هیچگونه تبادل حرارتی میان محیط داخل کلاس و فضای بیرونی صورت نمی‌گیرد و صرفاً فرآیند تهویه از طریق دستگاه تهویه مطبوع (کولرهای گازی) صورت می‌گیرد لذا ضمن در نظر گرفتن اصول یکسان در طراحی کلاس‌های درس و پیروی از قوانین یکسان در طراحی تیپ کلاس‌های درس، فضای مورد بررسی می‌تواند نماینده تمامی کلاس‌های درس موجود در جبهه جنوبی باشد و نتایج در تمامی آن‌ها یکسان می‌باشد.

۴. یافته‌های پژوهش

بررسی‌ها و برداشت‌های میدانی به روش تجربی صورت پذیرفت و در دوره آزمون این پژوهش، مشاهدات میدانی و ثبت نتایج انجام شدند. از آنجا که تحلیل فرآیند تهویه نیازمند مداخله در معماری و محاسبات است، لذا انجام شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای لازم و ضروری می‌باشد. شبیه‌سازی‌ها با روش سی‌اف‌دی و با برنامه‌های گامبیت و فلوئنت انجام شده‌اند (رهابی، ۱۳۹۲) در پژوهش کنونی به دلیل متغیر بودن شرایط کاربران در زمان انجام آزمایشات تجربی از تردد کاربران مختلف صرف نظر شده و پیشنهادات داده شده در زمینه کالبدی و معماری مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط و معادلات حاکم بر شبیه‌سازی در بخش بعدی بیان شده است.

۴-۱. شبیه‌سازی عددی وضع موجود به روش سی‌اف‌دی

به منظور سهولت در محاسبات حجم ساده شده بنا، به صورت دو بعدی و سه بعدی، در شرایط مختلف در محیط اتوکد صورت گرفت (مطابق ادبیات موضوع و نمونه‌های مشابه کار شده)، شبکه‌بندی طرحواره‌ها در نرم‌افزار گامبیت به صورت دو بعدی انجام شد و مش بدست آمده به نرم‌افزار فلوئنت به منظور تحلیل الگوی جریان هوای پیرامونی وارد شده است. گرانش ۹/۸ در جهت جاذبه زمین انتخاب و کلیه داده‌ها بر اساس برداشت‌های تجربی دوره آزمون به نرم‌افزار داده شد و اصطلاحاً شرایط مرزی تعیین گردید. معادلات استفاده شده در شبیه‌سازی به شرح زیر می‌باشد:

$$p_{total} = \frac{1}{\gamma} \rho v^2 + p_{static} \quad (1)$$

این مدل آشفتگی مبتنی بر تئوری گروه تجدید ساختار است (ویلکاکس³⁹، ۱۹۹۸) این نتایج در ثابت‌های مختلف از نمونه‌های موجود در مدل کا اپسیلون استاندارد است. علاوه بر این، در معادلات انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی و میزان اتلاف آن، شرایط و کارکردهای دیگری وجود دارد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_k + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\epsilon 2} G_b) - c_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (3)$$

ویسکوزیته آشفته در این حالت با استفاده از یک معادله دیفرانسیل محاسبه می‌شود:

$$d \left(\frac{\rho^\gamma k}{\sqrt{\epsilon \mu}} \right) = \gamma \gamma / 0 + \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^\gamma - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (4)$$

در اینجا

$$\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad (5)$$

این معادله به مدل اجازه می‌دهد که پیش بینی عدد پایین رینولدز⁴⁰ و جریان‌های نزدیک دیوارها را بهبود بخشد، به این دلیل که بسته به ویژگی‌های جریان ویسکوزیته آشفته به طور موثر با مقیاس جریان دایره‌ای متفاوت است. مدل کا افسیلون RNG به طور گسترده‌ای برای جریان هوای داخلی برای پیکربندی‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به طور کلی با داده‌های آزمایشی موافق هستند، اما گزارش‌های متعددی نیز در مورد عملکرد ضعیف وجود دارد (شالین و نیلسن⁴¹، ۲۰۰۴). بر این اساس، هندسه مدل‌های پیشنهادی با روش هکس شبکه‌بندی گردید و بر اساس باد کولر مستقیم، تحلیل‌ها انجام شدند. بدین ترتیب، مدل‌های مختلف کلاس‌های درس و جریان هوای داخل آن بر اساس مفروض‌های این پژوهش شبیه‌سازی گردید. همان‌گونه که در کانتورهای تصویر شماره ۸ مشخص است، الگوی جریان هوا بر اساس طرح‌های مختلف متفاوت و تاثیرات بسیاری در مدل تهویه دارد.

۴-۱-۱. بررسی شرایط موجود به صورت سه بعدی

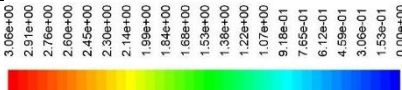
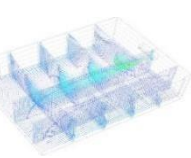
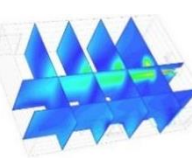
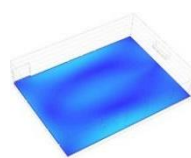
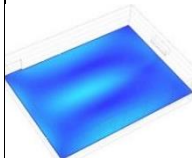
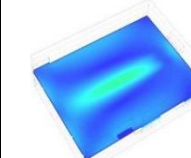
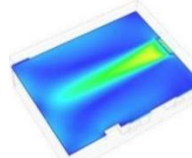
مدل‌های سه بعدی وضع موجود بر مبنای پیش فرض‌های در نظر گرفته شده که پیش تر شرح داده شد بازسازی شدند. یکی به وقت سرمایه‌های کولرگازی و دیگری علاوه بر کولرگازی دارای یک زائده سقفی در مقابل کولر می‌باشد.

۴-۱-۲. حالت ۱. مدل سرمایه‌های کولرگازی دوتکه در شرایط کاملاً ایزوله و بدون تبادل حرارتی:

شرایط کلی و تنظیمات مانند حالت قبل (بخش ۳-۲-۱) فرض گردید و صرفاً تبادل حرارتی با دیوارها و پنجره‌ها در نظر گرفته نشد و فضای کلاس کاملاً ایزوله فرض شد. نتایج در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۵. کانتورهای دمای هوای داخل کلاس موردی در صورت استفاده از کولرگازی دوتکه در شرایط ایزوله راهنمای رنگی شکل‌ها در

بالای جدول آمده است: (راهنمای سرعت بر حسب متر بر ثانیه)

					
					
A. بردارهای سرعت هوا، برش‌های طولی و عرضی	B. کانتورهای سرعت هوا، برش‌های طولی و عرضی	C. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۰/۵ متر	D. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۱ متر	E. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۱/۵ متر	F. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۲ متر

40.Reynolds

41.Schälin & Nielsen

باوجود ایزوله بودن و حذف کلیه بارهای گرمایشی اضافه، صرفاً از طریق گرمایش تابشی پنجره، مجدداً تراز متعادلی در کلاس ایجاد نشده و اختلاف دمای نسبتاً زیادی بوجود می‌آید. به نظر میرسد کولر باید گرایش بیشتری به پنجره‌ها داشته باشد.

۴-۱-۳. حالت ۲. مدل سرمایش کولرگازی دوتکه با یک زائده سقفی در مقابل کولر:

کلیه شرایط مانند حالت قبل بوده و فقط در سقف یک گوه نوک تیز که سر آن به طرف کولر باشد و نیم متر از سقف فاصله داشته باشد، قرار گرفته است. این گوه ابعاد ۲ در ۱ متر داشته و سر آن از دیوار کولر، ۱ متر فاصله دارد (تصویر ۹) نتایج شبیه‌سازی‌ها در جدول ۶ آمده است.



تصویر ۹. مشخصات گوه سقفی به ارتفاع نیم متر از سقف

جدول ۶. کانتورهای دمای هوای داخل کلاس موردی در صورت استفاده از کولرگازی دوتکه در شرایطی که مانند تصاویر یک قطعه گوه مانند در سقف مقابل کولر قرار گیرد

A. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۰/۵ متر	B. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۱ متر	C. کانتورهای سرعت هوا، برش‌های طولی	D. کانتورهای سرعت هوا، برش‌های طولی و عرضی
E. بردارهای سرعت هوا، برش‌های طولی و عرضی	F. بردارهای سرعت هوا، تراز ۱ متری	G. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۱/۵ متر	H. کانتورهای سرعت هوا، تراز ۲ متر
راهنمای رنگی: راهنمای دما بر حسب درجه کلوین 3.06e+00 2.91e+00 2.76e+00 2.60e+00 2.45e+00 2.30e+00 2.14e+00 1.99e+00 1.84e+00 1.68e+00 1.53e+00 1.38e+00 1.22e+00 1.07e+00 9.18e-01 7.65e-01 6.12e-01 4.59e-01 3.06e-01 1.53e-01 0.00e+00			

مطابق داده‌های جدول ۶، همچنان پخش دمایی هوای خنک در نقاط مختلف کلاس بسیار نامنظم بوده و همانگونه که مشخص است، نقاط انتهایی کلاس با وجود اینکه در زیر کولر هستند، اما گرم‌ترند. همچنین صندلی‌های زیر پنجره‌ها بدلیل شار اضافه گرمایی ناشی از خورشید گرمای بیشتری دارند. باد پرتابی از کولر تا جلوی کلاس ادامه یافته و سپس از حاشیه دیوارها به سمت عقب کلاس برمی‌گردد و بار گرمایشی محیط را باز می‌گرداند. این حالت تنها کمی از حالت قبل بهتر است و تمام اشکالات آنرا دارد. صرفاً تفکیک باد کولر در تراز سقف و هدایت آن به دوطرف کلاس، هدف این گوه بوده که چندان موفق نیست و شبیه‌سازی‌ها با حالت قبل تفاوت چندانی ندارند.

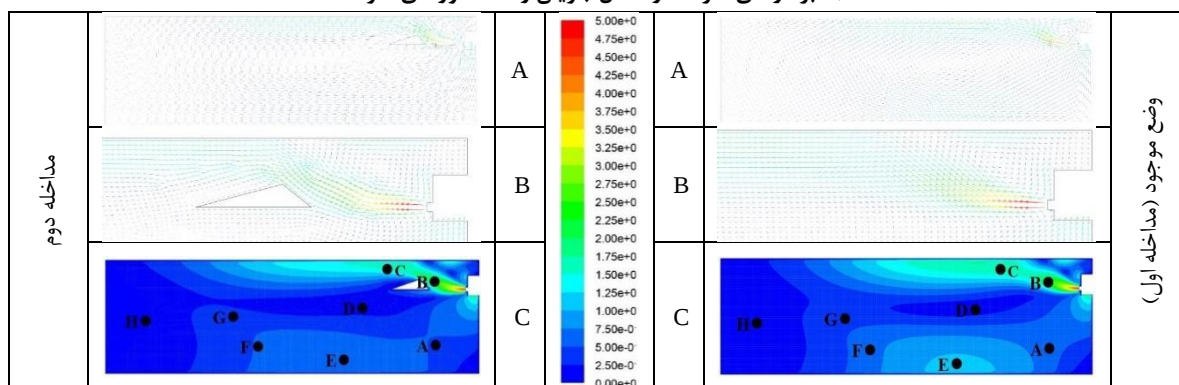
۴-۲. بررسی مداخلات چندگانه به صورت دو بعدی

مدل های دو بعدی به منظور مداخلات آتی و نیز به جهت سهولت محاسبات در نظر گرفته شد. همان شیوه اعتبار بخشی شده قبلی در اینجا نیز مورد استفاده است. در اینجا مداخلات مختلف بررسی می شوند:

۴-۲-۱. مداخله اول:

الگوی جریان هوا در صفحه و برشی که از وسط کلاس واقع شده و از کولر نیز می گذرد بازسازی می شود. بر اساس تصاویر جدول ۷ مشخص گردید که عمده جریان هوای کولر در زیر سقف جریان دارد، جریان موثری به آنسوی کلاس نمی رسد و جریان گرم برگشتی از پایین (نیمه کلاس) به سمت کولر برقرار است. این مدل جریان در وضعیت موجود است که اصلاً مورد تایید نیست.

جدول ۷. شبیه سازی وضع موجود (مداخله اول) و مداخله دوم به صورت دوبعدی (راهنمای نقشه در وسط جدول آمده).
A, B بردارهای سرعت و شکل جریان و C کانتورهای سرعت.



۴-۲-۲. مداخله دوم:

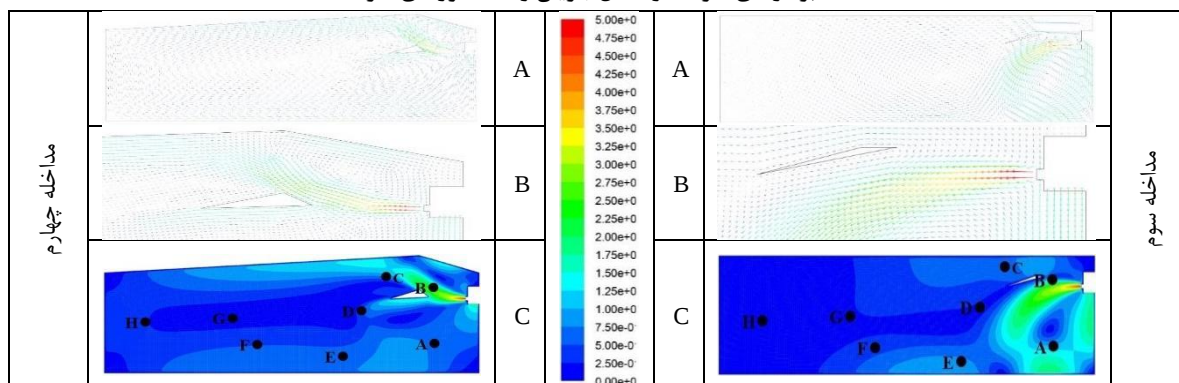
در مسیر باد کولر در مداخله اول، زائده گوه مانندی شبیه تصویر ۹ قرار داده شد. قاعده این زائده مثلث شکل کاملاً افقی و راس سمت راست آن در امتداد گوشه بالایی نازل کولر قرار دارد و فرم آن مطابق تصویر B از جدول ۷ است. این زائده کمی جریان بالاسری را به سمت بالا فرستاد اما تغییر خاصی در شکل جریان درون کلاس بوجود نیامد.

۴-۲-۳. مداخله سوم:

زائده آویخته از سقف مداخله دوم، به شکل B در جدول ۸ به نمایش درآمد. این تغییر موجب شد تا فضای نزدیک کولر تهویه موثر داشته باشد اما سایر نقاط کلاس به شدت بحرانی خواهند بود.

جدول ۸. شبیه سازی مداخله سوم و مداخله چهارم به صورت دوبعدی (راهنمای نقشه در وسط جدول آمده).

A, B بردارهای سرعت و شکل جریان و C کانتورهای سرعت.



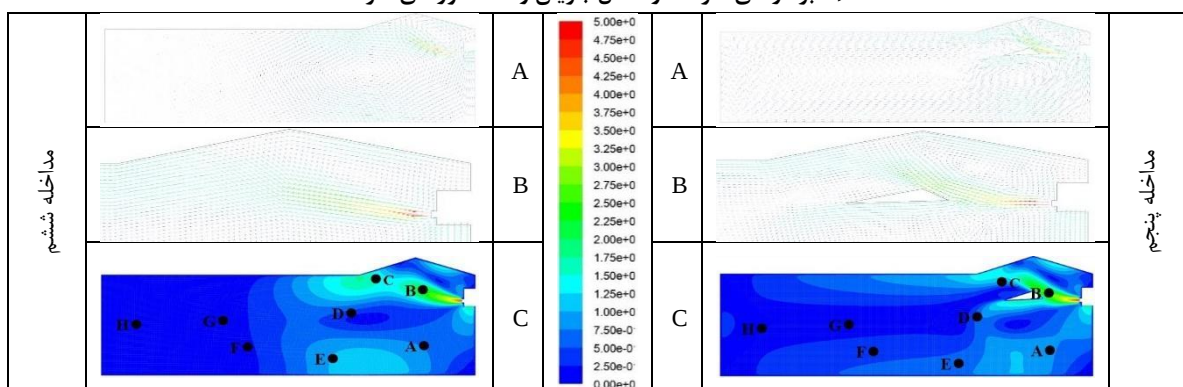
۴-۲-۴. مداخله چهارم:

در زائده مداخله دوم کمی تغییر ایجاد شد و اندکی راس بالایی گوه ب سمت پایین متمایل گشت (جدول ۸). همچنین فرم سقف در این مداخله تغییر نمود و شیبدار شد. به نحوی که راس زائده مثلی آویخته از سقف دقیقا زیر تیزه سقف باشد. شبیه‌سازی‌ها انجام شدند و ناگهان مشاهده گردید که فرم جریان هوای داخل به شدت توسعه یافت و در اکثر نقاط کلاس، جریان موثر برقرار شد. شکل C جدول ۸ گویای این مطلب است.

۴-۲-۵. مداخله پنجم:

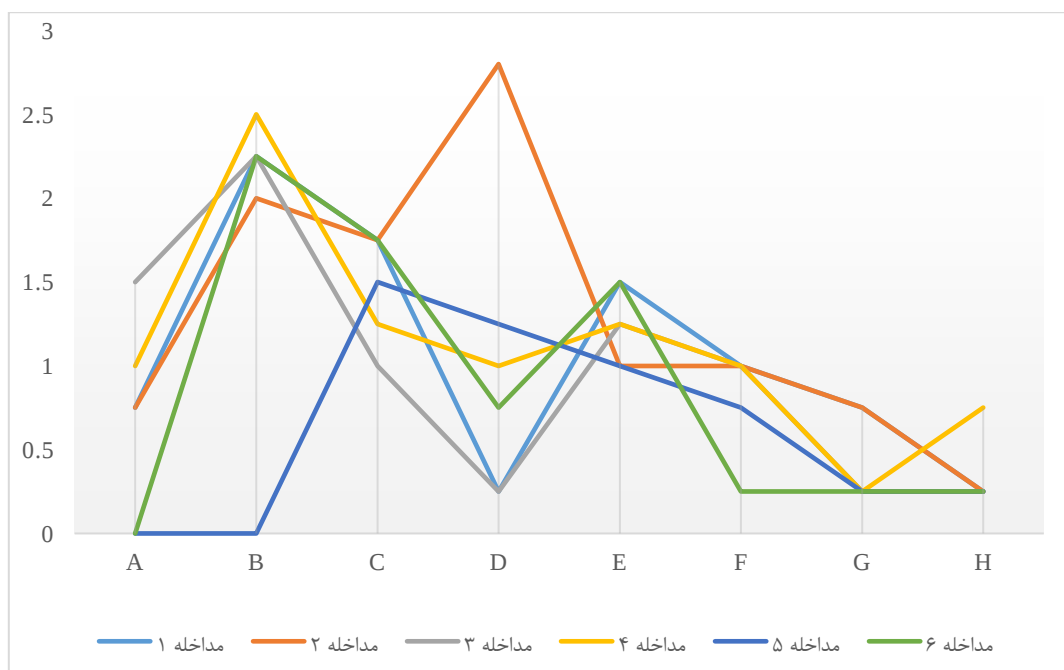
شکل زائده آویخته و نیز سقف مداخله پیشین به شکل جدول ۹ تغییر نمود و شبیه‌سازی‌ها مجدداً تکرار شدند. نسبت به مداخله ۴ تغییر چندانی نشان داده نشد بجز اینکه جریان هوا در موقعیت معلم، کمی افت نمود.

جدول ۹. شبیه‌سازی مداخله پنجم و مداخله ششم به صورت دوبعدی (راهنمای نقشه در وسط جدول آمده).
A, B بردارهای سرعت و شکل جریان و C کانتورهای سرعت.



۴-۲-۶. مداخله ششم:

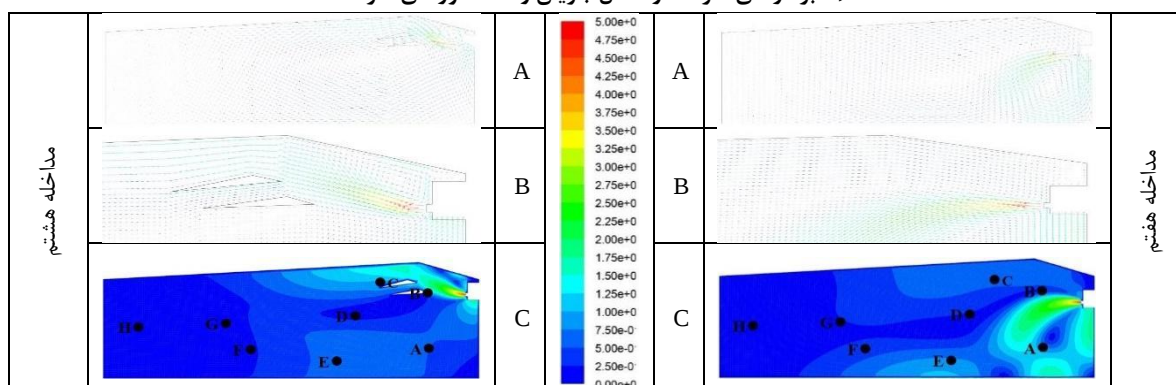
حذف زائده آویخته مداخله پنجم، کیفیت جریان هوا را در نیمه انتهایی کلاس (سمت کولر، راست تصاویر) بهتر می‌کند اما به طور کلی جریان هوا در نیمه سمت چپ کلاس و موقعیت معلم و دانش‌آموزان جلوی کلاس راکد می‌شود و عملاً هوادهی مناسب نخواهد داشت. تصویر C از جدول ۹ کاملاً گویای این مشکل می‌باشد.



نمودار ۲. مقایسه سرعت باد در نقاط مشخص شده در مداخلات ۱ الی ۶ (سرعت متر بر ثانیه)

جدول ۱۰. شبیه‌سازی مداخله هفتم و مداخله هشتم به صورت دوبعدی (راهنمای نقشه در وسط جدول آمده).

A, B بردارهای سرعت و شکل جریان و C کانتورهای سرعت.



۷-۲-۴. مداخله هفتم

در این مداخله اقدام به حذف زائده آویخته مداخله چهارم گردید، کیفیت جریان هوا را در نیمه انتهایی کلاس (سمت کولر، راست تصاویر) بهتر شد اما مانند مداخله قبلی، به طور کلی جریان هوا در نیمه سمت چپ کلاس و موقعیت معلم و دانش‌آموزان جلوی کلاس راکد می‌شود و عملاً هوا دهی مناسب نخواهد داشت. تصویر C از جدول ۱۰ کاملاً گویای این مشکل می‌باشد. در مقایسه با مداخله ششم شاید وضعیت مداخله هفتم، نسبتاً بهتر باشد.

۸-۲-۴. مداخله هشتم:

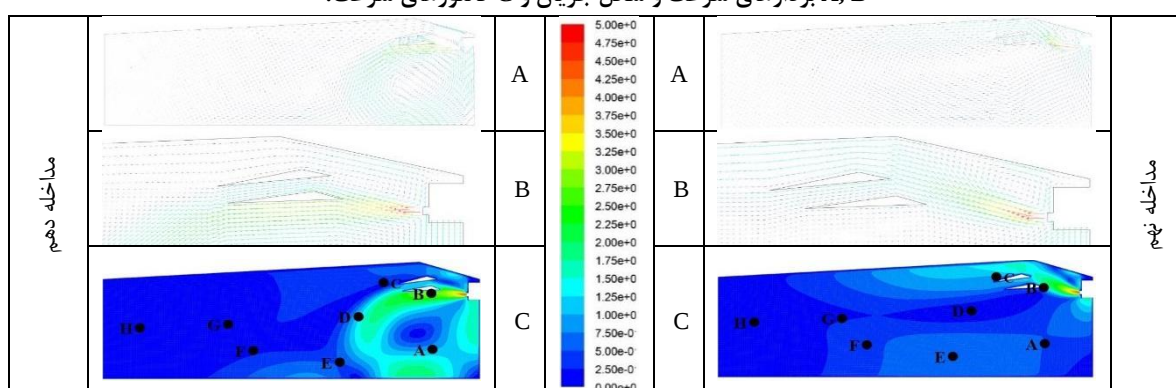
در این مداخله به اضافه کردن دو زائده جهت دهنده جلو باد کولر در مداخله چهارم اقدام گردید (جدول ۱۰) مشاهدات نشان دادند تفاوت چندانی بین مداخلات ۶ و ۷ با این مداخله وجود ندارد و الزاماً اضافه کردن پره جهت دهنده به باد کولر در یک مداخله موفق، کمکی نکرده و بلکه شکل جریان را نیز خراب می‌نماید.

۹-۲-۴. مداخله نهم:

موقعیت دو باله سقفی نسبت به مداخله قبلی کمی پایین‌تر آمد و البته شکل جریان هوای داخل بهبود یافت، با این حال هنوز در موقعیت معلم، جریان بادی وجود ندارد.

جدول ۱۱. شبیه‌سازی مداخله نهم و مداخله دهم به صورت دوبعدی (راهنمای نقشه در وسط جدول آمده).

A, B بردارهای سرعت و شکل جریان و C کانتورهای سرعت.



۱۰-۲-۴. مداخله دهم:

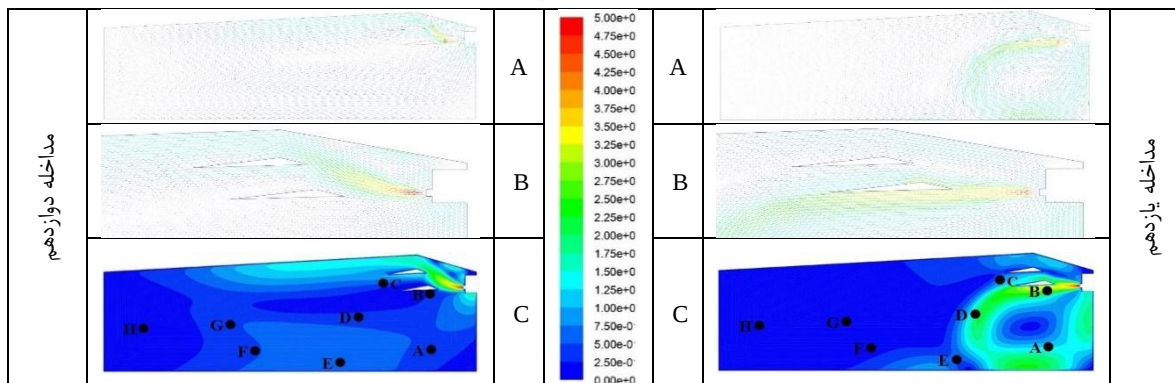
در این حالت نیز با موقعیت دو باله سقفی نسبت به مداخله قبلی تغییر نمود و اندکی چرخید (جدول ۱۱) و اما شکل جریان هوای داخل نسبت به مداخله قبلی افت نمود، اما نسبت به مداخلات ۷ و ۸ بهتر است. با این وجود توصیه نمی‌شود.

۱۱-۲-۴. مداخله یازدهم:

تغییرات این مداخله نیز باز در فرم باله‌ها بود که هیچ بهبودی در شکل جریان بوجود نیامد و وضع بدتر شد.

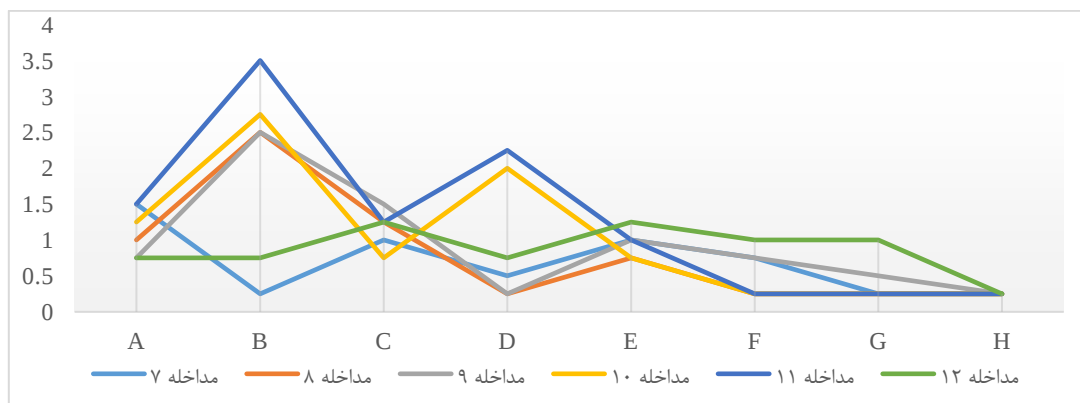
جدول ۱۲. شبیه‌سازی مداخله یازدهم و مداخله دوازدهم به صورت دوبعدی (راهنمای نقشه در وسط جدول آمده).

A, B بردارهای سرعت و شکل جریان و C کانتورهای سرعت.



۱۲-۲-۴. مداخله دوازدهم:

تغییرات این مداخله نیز دوباره در فرم باله‌ها و فاصله آن‌ها بود. (جدول ۱۲) هیچ بهبودی در شکل جریان بوجود نیامد و اگرچه نیمه جلویی کلاس دارای تهویه بهتری است، اما به طور کلی کیفیت تهویه در تراز کاربران به شدت ضعیف است.



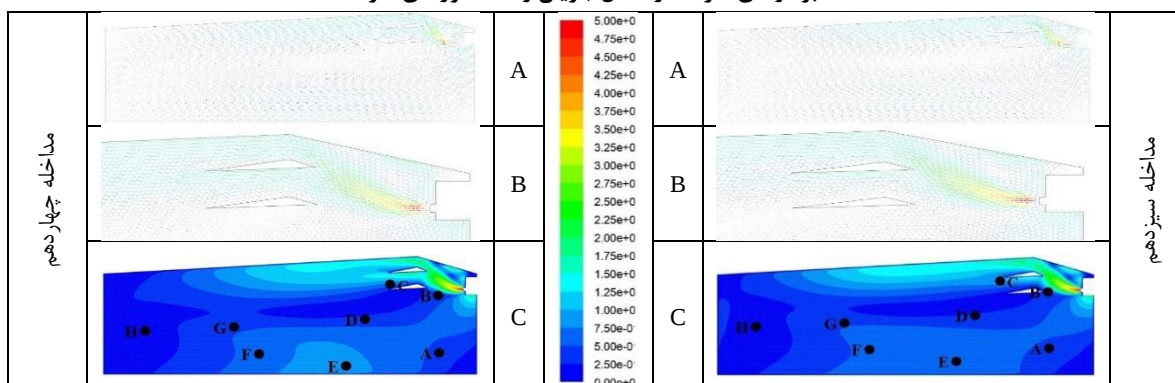
نمودار ۳. مقایسه سرعت باد در نقاط مشخص شده در مداخلات ۷ الی ۱۲ (سرعت متر بر ثانیه)

۱۳-۲-۴. مداخله سیزدهم:

تغییرات این مداخله نیز مجدداً در فرم باله‌ها و فاصله آن‌ها بود. (جدول ۱۳) جریان تهویه در این حالت بهبود یافته اما اگرچه نیمه جلویی کلاس دارای تهویه بهتری است اما به طور کلی کیفیت تهویه در تراز ساکنین همچنان ضعیف بود.

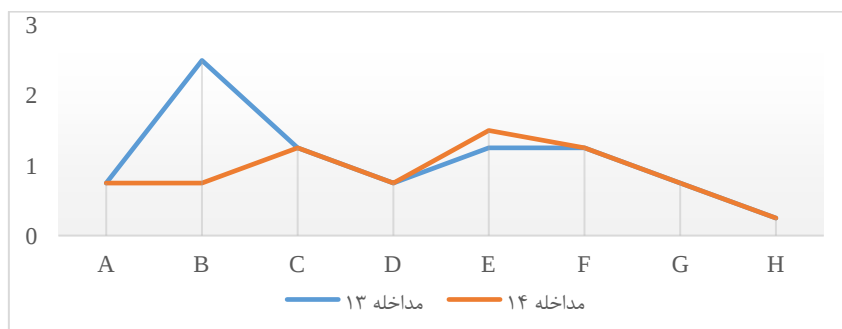
جدول ۱۳. شبیه‌سازی مداخله سیزدهم و مداخله چهاردهم به صورت دوبعدی (راهنمای نقشه در وسط جدول آمده).

A, B بردارهای سرعت و شکل جریان و C کانتورهای سرعت.



۴-۲-۱۴. مداخله چهاردهم:

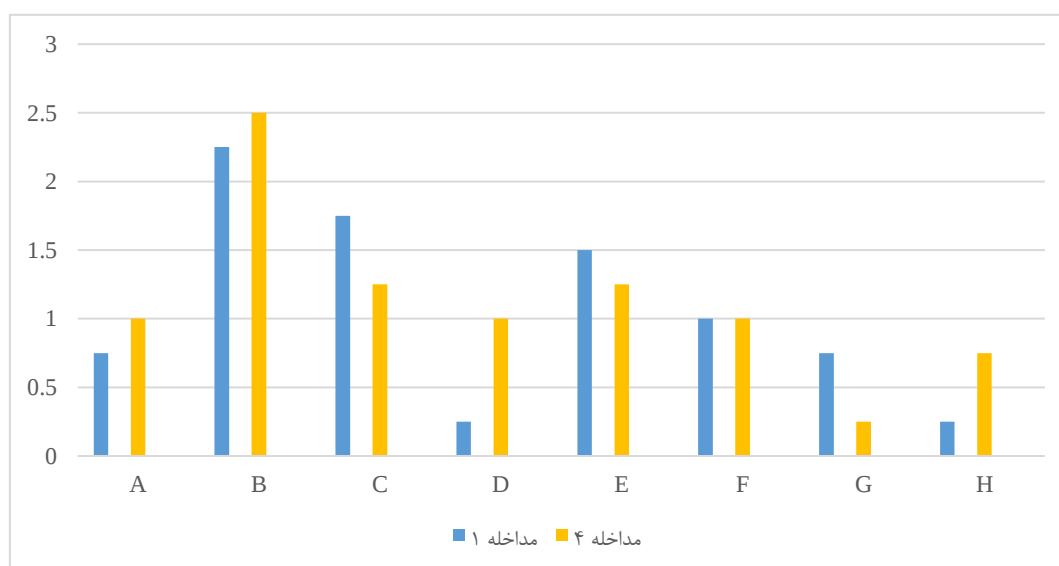
زاویه باله‌ها کمی تغییر یافت اما جریان هوا تفاوت ملموسی نسبت به مداخله قبلی نداشته است.



نمودار ۴. مقایسه سرعت باد در نقاط مشخص شده در مداخلات ۱۴ و ۱۵ (سرعت متر بر ثانیه)

نتیجه‌گیری

بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود که تهویه رایج در کلاس‌های درس دارای گردش هوای مناسبی در نقاط مختلف کلاس نمی‌باشد و در بسیاری از نقاط، گردش هوای مناسب وجود ندارد. با این حال نتایج به روشنی نشان می‌دهد به وسیله انجام مداخلات معماری مانند نصب یک گوه آویخته شده از سقف و ایجاد مداخله در شکل ظاهری سقف می‌توان گردش هوا را بهبود بخشید. در جهت ایجاد یک گردش هوای مناسب به وسیله موارد ذکر شده لازم است به تعداد، زاویه اضلاع و فاصله مانع آویخته شده از سقف توجه نمود مواردی مانند افزایش تعداد آن باعث کاهش شدت جریان هوا می‌گردد و زاویه و محل نصب مناسب آن سبب افزایش عملکرد این جسم در افزایش گردش هوای کلاس ایفا می‌کند. دستکاری در شکل سقف و دادن زاویه به سقف باعث افزایش عملکرد گردش هوا در سیستم‌های تهویه مطبوع می‌شود و ترکیب آن با مانع ذکر شده باعث افزایش گردش هوا در نقاط مختلف کلاس حتی دور ترین نقاط آن گشته و همانگونه که مشاهده می‌شود مداخله شماره ۴ تاثیر مداخلات گفته شده را به روشنی نشان می‌دهد که در میان مداخلات به ویژه وضعیت موجود بیشترین گردش هوا در کلاس وجود دارد در مداخله یاد شده جسم آویخته شده از سقف که راس زائده آن دقیقاً زیر تیزه سقف قرار گرفته و اضلاع آن مقداری به سمت محور پایین متمایل شده بود با حفظ شدت جریان، باد کولر را در نواحی مختلف و به ویژه در سمت سقف شیبدار کلاس منحرف می‌کند و ترکیب این دو سبب توزیع یکنواخت‌تر و بهتر جریان هوا در کلاس می‌شود و مقایسه مقادیر آن در نقاط مختلف نسبت به وضع موجود در نمودار زیر آمده است.



نمودار ۵. مقایسه سرعت باد میان وضعیت موجود و مداخله شماره ۴ در نقاط مشخص شده (سرعت متر بر ثانیه)

همانگونه که در این نمودار مشاهده می‌شود در وضعیت گفته شده سرعت گردش هوا در نقاط مختلف تا حد امکان نزدیک یکدیگر و تنها نقاط B و G با دیگر نقاط فرق قابل ملاحظه‌ای دارند و در سایر نقاط سرعت گردش هوا یکنواخت تر شده است. با توجه به یکسان بودن اصول طراحی کلاس‌های مدارس و سیستم‌های تهویه مطبوع آن‌ها بر اساس پیروی از ضوابط و آیین‌نامه‌های یکسان، نتایج حاصله می‌تواند به‌عنوان راهکاری در جهت ارتقای گردش هوا در تمامی کلاس‌های درس مدارس به ویژه کلاس‌های جنوبی نواحی گرم و نیمه مرطوب باشد. به صورت کلی و مختصر نتایج این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

۱. سیستم سرمایش کولری مطابق آنچه در کلاس درس استفاده شده کارایی موثری ندارد و سیستم‌های تهویه جایگزینی و ترکیبی به‌صورت اختلاطی پیشنهاد می‌شود (رهایی، ۲۰۱۴)

۲. در صورتیکه این کولر با این وضعیت مورد استفاده باشد، باید اولاً عایق بندی پنجره‌ها و سایر اجزای معماری درست بوده ثانیاً بر اساس مداخلات این پژوهش تصمیم‌گیری شود.

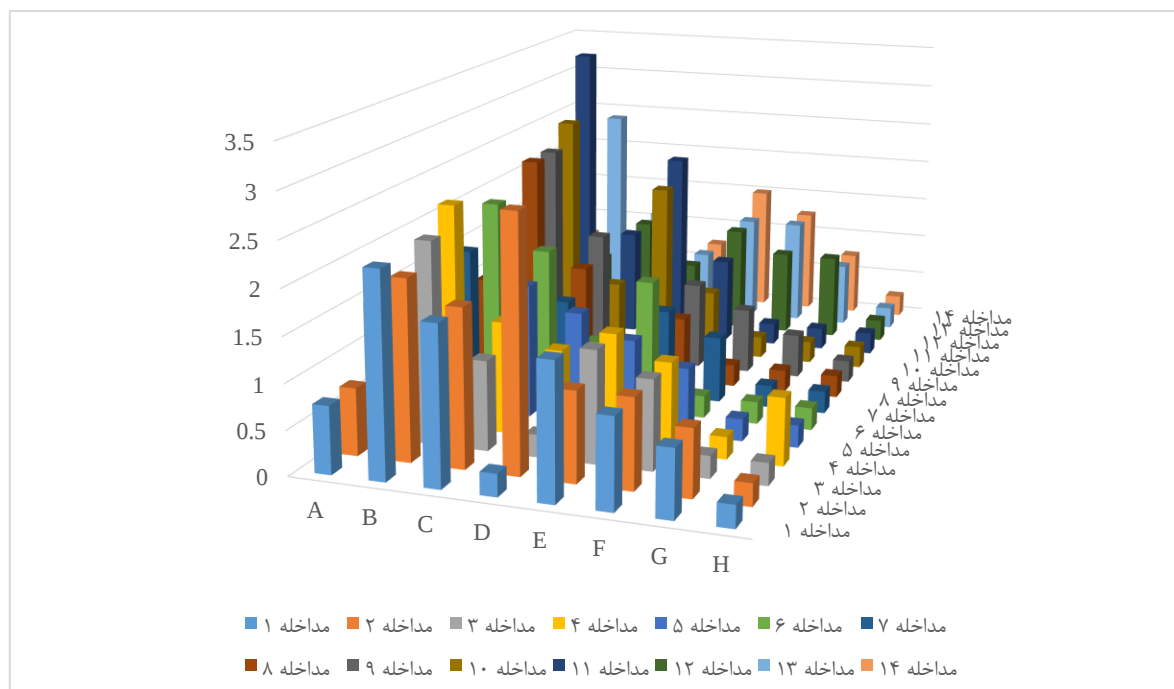
۳. در صورت استفاده از کولر دو تیکه در انتهای کلاس، اگر سقف مانند مداخله ۴ دارای تیزه و شیب دوطرفه از داخل داشته باشد، به‌شدت می‌تواند جریان هوای داخل را تحت تاثیر قرار دهد.

۴. استفاده از یک گوه آویخته از سقف مشابه باله مداخله ۴ می‌تواند بسیار موثر باشد. اما تعداد باله‌های بیشتر توصیه نمی‌شود زیرا شدت باد کولر را کاهش می‌دهد.

۵. اگر محل نصب کولر کمی به سمت پنجره‌های آفتابگیر انحراف یابد جریان‌های موثر تری برقرار می‌شود.

۶. در مجموع هریک از مداخلات ذکر شده می‌تواند حتی در طرح‌هایی که دارای محدودیت هستند نیز قابل اجرا و موثر باشند.

با توجه به این نکته که بهسازی مدارس موجود از اهمیت بالایی برخوردار است می‌توان به وسیله سقف‌های کاذب (مانند کناف و پی‌وی‌سی)، سقف کلاس‌های درس را شبیدار نموده و از آویزهای موجود در سقف که قبلاً برای نصب پنکه تعبیه شده بودند جهت آویختن جسم گوه‌ای استفاده نمود و جسم مذکور را می‌توان به آسانی به وسیله ورق‌های گچ برگ و پی‌وی‌سی ساخت به این صورت هم مدارس موجود و هم مدرسی که در آینده ساخته می‌شوند توانایی بهره‌مندی از روش ارائه شده را دارا می‌باشند. باتوجه به نتایج حاصل از این تحقیق در پژوهش‌های آینده می‌توان بهبود سیستم‌های گرمایشی و یا بهره‌مندی از تهویه ترکیبی (ادغام تهویه طبیعی و مکانیکی) در کلاس‌های درس را مورد بررسی قرار داد.



نمودار ۶. مقایسه سرعت باد در نقاط مشخص شده در تمامی مداخلات (سرعت متر بر ثانیه)

معرفی نمادها و کمیت‌های به کاررفته در معادلات

p_static	فشار استاتیک	p_total	فشار کل
V	سرعت	ρ	چگالی
ε	نرخ اتلاف انرژی آشفته‌گی	k	انرژی جنبشی آشفته‌گی
μ_{eff}	ویسکوزیته مؤثر	u_i	مولفه سرعت
a_k	ضریب پخش آشفته‌گی برای انرژی جنبشی آشفته‌گی	μ	ویسکوزیته مولکولی
G_k	ترم تولید آشفته‌گی	a_ε	ضریب پخش آشفته‌گی برای نرخ اتلاف انرژی آشفته‌گی
Y_k	ترم اتلاف نوسانات	G_b	ترم تولید ناشی از شناوری
S_ε	ترم منبع برای نرخ اتلاف انرژی آشفته‌گی	S_k	ترم منبع برای انرژی جنبشی آشفته‌گی
ν_{C_ε}	ثابت مدل	ν_{C_ε}	ثابت مدل
R_ε	ترم اصلاح اتلاف	ν_{C_ε}	ثابت شناوری
E	انرژی	P	فشار
θ	زاویه / پارامتر دما	H	نتالپی
C_μ	ثابت مدل آشفته‌گی	β	نسبت ویسکوزیته

- پری دخت، فاطمه، تبریزی، اکرم، خورشیدی بهزادی، یاسر، و فرهنگ دهقان، سمیه. (۱۴۰۴). بررسی آسایش حرارتی و تهویه در مدارس: یک مطالعه مروری نظام مند. فصل نامه بهداشت و ایمنی کار، ۱۵ (۳)، ۶۸۷-۷۲۳.
<https://doi.org/18502/10/jhsw.v15i21421/3>
- رؤسائی، امین، و رهایی، امید. (۱۳۹۹). ارتقاء کیفیت جریان هوای داخل تحت تأثیر دیوارهای جداکننده داخلی در فضاهای اداری مجهز به سیستم های تهویه مطبوع با روش CFD. معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۱۳ (۳۰)، ۹۱-۶۹.
<https://doi.org/22034/10/aaud.101584/2020.1325>
- رهايي، اميد. (۱۳۹۲). هویت فرهنگی و اثرات آن بر روش های بومی تهویه طبیعی بازار قدیم دزفول، راسته صنعتگران. نشریه علمی باغ نظر، ۱۰ (۲۴)، ۴۶-۳۹.
https://bagh-sj.com/article_2692.html
- رهايي، اميد. (۱۴۰۰). بررسی تغییرات کالبدی حیاط های مرکزی بر الگوی جریان هوای داخلی آن ها در خانه های دوران قاجار اصفهان با روش CFD (مورد پژوهی: خانه لباف). نشریه معماری و شهرسازی پایدار، ۹ (۲)، ۴۶-۳۵.
<https://doi.org/22061/10/jsaud.6012/2021.1597>
- رهايي، اميد، آبی، شکوفه، شمس طالقانی، سید آرش، و زندی، توران. (۱۴۰۳). بهبود وضعیت تهویه طبیعی در فضاهای راهرویی یک ساختمان اداری موردی در اهواز از طریق مداخله در معماری به روش CFD. نشریه انرژی های تجدیدپذیر و نو، ۱۱ (۲)، ۵۶-۴۷.
<https://doi.org/22034/10/jrenew.193468/2024>
- رهايي، اميد، و رؤسائی، امین. (۱۳۹۶). بررسی وضعیت دیوارهای جداکننده در کیفیت تهویه مطبوع و شرایط جریان هوای داخل فضاهای اداری با روش CFD. نامه معماری و شهرسازی، ۱۰ (۱۹)، ۷۶-۶۱.
<https://doi.org/30480/10/aup.538/2017>
- رهايي، اميد، و عظمتی، حمیدرضا. (۱۳۹۹). ارتقای کیفیت تهویه طبیعی در کلاس های مدارس استان مازندران بر اساس وضعیت بازوها با روش CFD. نشریه علمی معماری و شهرسازی ایران، ۱۱ (۱)، ۷۱-۵۷.
<https://doi.org/30475/10/isau.161257/2020.1140>
- امور نظام فنی و اجرایی سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. (۱۳۹۵). ضوابط طراحی ساختمان های آموزشی (برنامه ریزی معماری همسان مدارس ابتدایی و متوسطه) (ضابطه شماره ۶۹۷).
<https://www.qdres.ir/wp-content/uploads/2019/06/magazin-697.pdf>
- صباغ، مهرنام. (۱۴۰۳). طراحی دانشکده ی معماری در اهواز با رویکرد بهبود جریان هوای داخل کریدورهای پیرامونی آتریوم به روش CFD [پایان نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان]. ایرانداک.
<https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/11c7f4aa85050d0742bcd3338088aabc>
- طاوسی، جعفر، و ولی زاده، مجید. (۱۴۰۰). طراحی سیستم کنترل هوشمند جدید جهت تهویه هوای ساختمان به منظور کاهش اتلاف انرژی. نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۳ (۶)، ۲۴۷-۲۵۹.
<https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/838472>
- فرزامشاد، مصطفی. (۱۳۸۸). مبانی برنامه ریزی و طراحی مراکز اداری (چاپ اول). جهان جام جم.
<https://library.aui.ac.ir/dL/search/default.aspx?Term=16536&Field=0&DTC=100>

کارگر شریف‌آباد، هادی، ارمغانی، طاهر، باقریه بهبهانی، مقداد، و حیدری، میلاد. (۱۴۰۰). تحلیل عددی تأثیر موقعیت درپچه‌های ورودی و خروجی هوای یک اتاق برای کارایی بهتر تهویه با رویکرد انرژی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، ۱۱(۱)، ۷۶-۸۷. https://energy.kashanu.ac.ir/article_113535.html

کامل‌نیا، حامد. (۱۳۸۸). دستور زبان طراحی محیط‌های یادگیری. سبحان نور. <https://lib.isfahan.ir/dl/search/default.aspx?Term=66962&Field=0&DTC=101>

کشاوری، زهرا، تابان، محسن، و مهرکی‌زاده، محمد. (۱۳۹۶). بهینه‌سازی تهویه طبیعی در نمای دوپوسته راهرویی نمونه موردی ساختمان اداری در شیراز. معماری و شهرسازی پایدار، ۵(۱)، ۱۵-۲۸. https://jsaud.sru.ac.ir/article_852.html

ماهوئی‌راد، پرستو، و موسوی، محمدحامد. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر تهویه هوای داخلی کلاس‌ها بر دانش‌آموزان در محیط‌های آموزشی. شباک، ۵(۱۱)، ۲۳-۳۰. <https://sid.ir/paper/520206/fa>

نیک‌پور، مریم، و رهایی، امید. (۱۳۹۹). بررسی آکوستیکی مدل‌های مختلف صفحات جاذب صدا در کاهش نوفه در ترمینال مسافری فرودگاه بین‌المللی اهواز. فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط، ۶(۴)، ۳۱۲-۳۲۳. <https://doi.org/22038/10/jreh.55805/2021.1402>

شورای عالی آموزش و پرورش. (۱۳۹۰). سند تحول بنیادین آموزش و پرورش (سند مشهد مقدس). وزارت آموزش و پرورش. https://sce.ir/media/note_file/pdf/سند_تحول_بنیادین.pdf

Bauman, F. S., Faulkner, D., Arens, E. A., Fisk, W. J., Johnston, L. P., McNeel, P. J., Pih, D., & Zhang, H. (1992). Air movement, comfort and ventilation in partitioned workstations. *ASHRAE Transactions*, 98(1), 756-780. https://www.researchgate.net/publication/285664144_Air_movement_ventilation_and_comfort_in_a_partitioned_office_space

Calay, R. K., Borresen, B. A., & Holdø, A. E. (2000). Selective ventilation in large enclosures. *Energy and Buildings*, 32(3), 281-289. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00054-2)

Cao, Q., & He, X. G. (1994). Cross-ventilation and room partitions: Wind tunnel experiments on indoor airflow distribution. *ASHRAE Transactions*, 100(2), 208-219. <https://www.osti.gov/biblio/33247>

Chen, Q., Wang, H., Dai, Y., & Hu, Y. (2021). Prompt location of indoor instantaneous air contaminant source through multi-zone model-based probability method by utilizing airflow data from coarse-grid CFD model. *Indoor and Built Environment*, 31(4), 944-954. <https://doi.org/10.1177/10.1420326X211046039>

Chlela, F., Husaunndee, A., Inard, C., & Riederer, P. (2009). A new methodology for the design of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 41(9), 982-990. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.05/2009.001>

Chow, W. K., & Tsui, K. F. (1995). Airflow studies in a forced ventilated chamber with low partitions. *ASHRAE Transactions*, 101(2), 125-135. <https://store.accuristech.com/standards/3890-air-flow-studies-in-a-forced-ventilated->

chamber-with-low-partitions?product_id=1716195&srsId=AfmBOocZfylOc4dQuhjbANtJYhlO571WGP T4_0VY1E-L96NfyklDeA1

- Cui, P. Y., Zhang, Y., Chen, W. Q., Zhang, J. H., Luo, Y., & Huang, Y. D. (2021). Wind-tunnel studies on the characteristics of indoor/outdoor airflow and pollutant exchange in a building cluster. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 214, Article 104645. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.104645/2021>
- Tommaso, R. M. D., Nino, E., & Fracastoro, G. V. (1999). Influence of the boundary thermal conditions on the air change efficiency indexes. *Indoor Air*, 9(1), 63–69. <https://doi.org/1111/10/j.1600-1999/0668.00010.x>
- Freijer, J., & Bloemen, H. Th. (2000). Modeling relationships between indoor and outdoor air quality. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(2), 292–300. <https://doi.org/1080/10/2000/10473289.10464007>
- Hassan, A., Zeeshan, M., & Bhatti, M. F. (2021). Indoor and outdoor microbiological air quality in naturally and mechanically ventilated university libraries. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), Article 101136. <https://doi.org/10.1016/j.apr.101136/2021>
- Hirose, C., Ikegaya, N., Hagishima, A., & Tanimoto, J. (2021). Indoor airflow and thermal comfort in a cross-ventilated building within an urban-like block array using large-eddy simulations. *Building and Environment*, 196, Article 107811. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.107811/2021>
- Jiang, Y., & Chen, Q. (2001). Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(11-12), 1155–1178. <https://engineering.purdue.edu/~yanchen/paper/2001-9.pdf>
- Kaczmarczyk, J., Melikov, A., & Sliva, D. (2010). Effect of warm air supplied facially on occupants' comfort. *Building and Environment*, 45(4), 848–855. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.09/2009.005>
- Kompatscher, K., Kochen, S., van Schijndel, A. W. M., & Schellen, H. L. (2017, October 18–20). *Coupled heat, moisture and CFD modeling in the built environment* [Conference paper]. COMSOL Conference 2017, Rotterdam, The Netherlands. <https://www.comsol.com/paper/coupled-heat-moisture-and-cfd-modeling-in-the-built-environment-50001>
- Lan, X., Cao, J., Lv, G., & Zhou, L. (2021). Simulation method for indoor airflow based on the Industry Foundation Classes model. *Journal of Building Engineering*, 39, Article 102251. <https://doi.org/10.1016/j.job.102251/2021>
- Lau, J., & Chen, Q. (2006). Energy analysis for workshops with floor-supply displacement ventilation under the U.S. climates. *Energy and Buildings*, 38(10), 1212–1219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.02/2006.006>

- Lee, H., & Awbi, H. B. (2004). Effect of internal partitioning on indoor air quality of rooms with mixing ventilation: Basic study. *Building and Environment*, 39(2), 127–141. <https://doi.org/10.16/10/j.buildenv.08/2003.007>
- Lin, Z., Chow, T. T., Fong, K. F., Tsang, C. F., & Wang, Q. (2004). Comparison of performances of displacement and mixing ventilations, Part II: Indoor air quality. *International Journal of Refrigeration*, 28(2), 288–305. <https://doi.org/10.16/10/j.ijrefrig.04/2004.006>
- Liu, W., Van Hooff, T., An, Y., Hu, S., & Chen, C. (2020). Modeling transient particle transport in transient indoor airflow by fast fluid dynamics with the Markov chain method. *Building and Environment*, 186, Article 107323. <https://doi.org/10.16/10/j.buildenv.107323/2020>
- Naghman Khan, N., Su, Y., & Riffat, S. B. (2008). A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, 40(8), 1586–1604. <https://doi.org/10.16/10/j.enbuild.02/2008.015>
- Nancy, Y. N., Sugeng, T., & Surjamanto, W. (2022). Effect of high-rise buildings on the surrounding thermal environment. *Building and Environment*, 207, Article 108393. <https://doi.org/10.16/10/j.buildenv.108393/2021>
- Rahaei, O. (2014). Effects of architectural somatic variables on mixed air conditioning systems efficiency in industrial buildings. *Armanshahr Architecture & Urban Development Journal*, 12(2), 69–81. https://www.armanshahrjournal.com/article_33519.html?lang=fa
- Schälin, A., & Nielsen, P. V. (2004). Impact of turbulence anisotropy near walls in room airflow. *Indoor Air*, 14(3), 159–168. doi: 1111/10/j.1600-2004/0668.00201e.x.
- Šeduikyte, L., & Bliūdžius, R. (2005). Pollutants emission from building materials and their influence on indoor air quality and people performance in offices. *Journal of Civil Engineering and Management*, 11(2), 137–144. <https://doi.org/1080/10/2005/13923730.9636343>
- Sekhar, S. C. (1995). Higher space temperatures and better thermal comfort — A tropical analysis. *Energy and Buildings*, 23(1), 63–70. [https://doi.org/10.16/10/0378-7788\(95\)00932-N](https://doi.org/10.16/10/0378-7788(95)00932-N)
- Shaw, C. Y. (1997). Maintaining acceptable air quality in office buildings through ventilation. *National Research Council of Canada*, 3(1), 1206–1220. https://publications.gc.ca/collections/collection_2008/nrc-cnrc/NR25-2-3E.pdf
- Shetabivash, H. (2015). Investigation of opening position and shape on the natural cross-ventilation. *Energy and Buildings*, 93, 1–15. <https://doi.org/10.16/10/j.enbuild.12/2014.053>
- Swamy, G. S. N. V. K. S. N. (2021). Development of an indoor air purification system to improve ventilation and air quality. *Heliyon*, 7(8), Article e08153. <https://doi.org/10.16/10/j.heliyon.2021.e08153>

- Wade III, W. A., Cote, W. A., & Yocom, J. E. (1975). A study of indoor air quality. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25(9), 933–939.
https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Airbase/airbase_00356.pdf
- Wargocki, P., Wyon, D. P., Sundell, J., Clausen, G., & Fanger, P. O. (2000). The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome symptoms and productivity. *Indoor Air*, 10(4), 222–236. <https://doi.org/10.3402/indoorair.v10i4.1600-20000668.010004222.x>
- Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD* (2nd ed.). DCW Industries.
https://cfd.spb.ru/agarbaruk/doc/2006_Wilcox_Turbulence_modeling_for_CFD.pdf
- Yuan, X., Chen, Q., & Glicksman, L. R. (1998). A critical review on displacement ventilation. *ASHRAE Transactions*, 104(1A), 78–90.
<https://research.polyu.edu.hk/en/publications/critical-review-of-displacement-ventilation/>
- Zhou, Q., & Ooka, R. (2021). Performance of neural network for indoor airflow prediction: Sensitivity towards weight initialization. *Energy and Buildings*, 246, Article 111106.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.111106/2021>