

بهبود کیفیت تهویه طبیعی بر اساس وضعیت بازشوها و تیغه‌های سایه‌انداز خارجی

(مورد پژوهی: کلاس‌های درس مدارس شهر مسجد سلیمان)

امید رهایی^{1*}، صدیقه صادات صالحی² و امیرحسین شیردل³

تاریخ دریافت: 1403/02/22

تاریخ پذیرش: 1403/06/06

(صفحات 129-150)

چکیده:

هدف: هدف اصلی این پژوهش، بهبود فرایند تهویه طبیعی در کلاس‌های درس بود به نحوی که جریان هوای یک‌نواخت و مطلوبی (طبق استاندارد اشری) چنان در کلاس برقرار شود که علاوه بر تأمین آسایش ساکنین، مزاحمت ایجاد ننماید.

روش تحقیق: پژوهش حاضر، تحقیقی کاربردی و میان‌رشته‌ای است و روشی ترکیبی و ابداعی یافته است: ابتدا با راهبردهای تجربی و از انجام آزمون‌های دوره‌ای، پس از شنا سایی متغیرهای مستقل (باز شوها و تیغه‌های سایه‌انداز خارجی)، متغیر وابسته (سرعت و جهت جریان هوای داخل) توسط دستگاه سرعت‌سنج و انجام آزمایش دود اندازه‌گیری، ثبت سپس داده‌ها به روش شبیه‌سازی، تحلیل شدند.

نتایج و بحث: در این پژوهش، کلیه شبیه‌سازی‌ها به روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD)¹ و با استفاده از نرم‌افزارهای Gambit و Fluent انجام شد. روایی و پایایی تحقیق از طریق تطابق آزمون‌های تجربی با شبیه‌سازی وضع موجود به اثبات رسید و سپس، تجزیه و تحلیل داده‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده صحیح از تیغه‌های سایه‌انداز خارجی و نیز کنترل بازشوها می‌تواند تهویه طبیعی مناسبی را در اختیار کاربر قرار دهد.

نتیجه‌گیری: ترکیبی از تیغه‌های سایه‌انداز T شکل و ستون‌های گرد در نما و پنجره‌های خارجی مناسب (مطابق نتایج این مقاله)، ضمن یک‌نواخت‌سازی جریان باد خارج، تهویه طبیعی مؤثری را در اکثر ساعات روز در کلاس مهیا می‌نماید.

واژگان کلیدی: جریان هوای داخل، تیغه‌های سایه‌انداز خارجی، تهویه طبیعی، بازشوها، روش CFD.

¹استادیار، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران (نویسنده مسئول) o.rahaei@sru.ac.ir

²دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر، شوشتر، ایران.

³دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

1- مقدمه

هرچند استفاده از روش‌های تهویه مکانیکی (مطبوع) در ساختمان‌های امروزی بسیار رایج است (Energy Information Administration, 1995)، با این حال پرهزینه و پرمصرفند (Koch-Nielsen, Holger, 2006). لذا روش‌های تهویه طبیعی بسیار توصیه می‌شود (Busch, J.F. 1992)، (Rahaei, o. and Azemati, h. 2020)، (Finnegan, J.J., Pickering, C.A.C.,)، (Burge, P.S., 1994)، (Zhao, R., Xia, Y., 1998)، (Energy Consumption Guid, 1993). از سویی بازشوها مهمترین عناصر ارتباطی ساختمان با هوای خارجند (SheTab.ivash, H. 2015). در اقلیم گرم خوزستان، در اکثر مدارس، استفاده از روش‌های تهویه مطبوع (به‌ویژه کولرهای گازی)، گریزناپذیر است و تنها تقریباً در کمتر از 3 ماه از سال (اواسط آذرماه تا اوایل اسفند) نیاز به این کولرها احساس نمی‌شود. هرچند در شهرهایی مانند مسجد سلیمان شرایط اقلیمی کمی بهتر است، با این حال تفاوت چندانی نمی‌نماید و به دلیل عدم گردش مؤثر جریان هوای داخل کلاس‌ها و همچنین عدم تعویض به موقع آن، شرایط مطلوبی به دست نمی‌آید. کولرهای آبی به دلیل تولید رطوبت در این اقلیم، مورد استفاده نیستند و پنکه‌های سقفی و دیواری نیز علاوه بر اینکه صدای زیادی دارند، جریان آشفته‌ای در کلاس برقرار می‌کنند که سبب برهم زدن آسایش دانش‌آموزان می‌شود. شواهد نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی مسجد سلیمان به‌گونه‌ای است که در مقایسه با سایر شهرهای خوزستان، می‌توان از فرایند تهویه طبیعی استفاده بهتری نمود، با این حال با باز بودن بازشوها، تهویه مؤثری برقرار نمی‌شود و جریان هوای داخل کلاس به شدت آشفته و غیر قابل تنظیم است (آزمون‌های تجربی این پژوهش، مسأله را اثبات می‌نماید).

باتوجه به اینکه کلاس‌های درس در خوزستان، شدیداً نیازمند سیستم‌های تهویه مؤثرند، به جهت کاهش هزینه‌ها و همچنین تأمین شرایط آسایش بهتر، باید تمهیداتی جهت تسهیل فرایند تهویه مؤثر طبیعی اندیشید، به‌ویژه که ساختار کلی مدارس به نحوی است که عمدتاً تیغه‌های عمودی سایه‌انداز در نمای خارجی آنها مورد استفاده است. حضور این تیغه‌ها در نمای خارجی مانع ورود جریان مؤثر هوای خارج به داخل کلاس شده و بر اساس مشاهدات، با وجود باز بودن کامل بازشوها (در و پنجره) جریان بسیار ضعیف، آشفته و کنترل نشده‌ای در کلاس برقرار می‌شود، به‌گونه‌ای که در بیشتر نقاط کلاس، هوا راکد و در بخش کوچکی از کلاس، باد غیر قابل کنترلی در جریان است، به نحوی که ترجیح داده می‌شود تا بازشوها همواره بسته و از سیستم‌های تهویه مکانیکی استفاده شود. هدف از این پژوهش پیشنهاد یک الگوی کلی برای تیغه‌های عمودی سایه‌انداز خارجی بر اساس وضعیت بازشوهای کلاس‌های درس است، به‌گونه‌ای که نخست گردش مؤثر هوای مطلوب در نقاط مختلف کلاس برقرار شود و ثانیاً سرعت آن چنان نباشد تا آسایش ساکنین را برهم بزند و ایجاد مزاحمت نماید. این سرعت مطابق استاندارد اشری حداکثر 1 متر بر ثانیه است (Chlela, F. et al., 2009). بنابراین هدف اصلی این پژوهش، تسهیل فرایند تهویه طبیعی در فضای داخل کلاسهای درس مدارس مسجد سلیمان بر اساس موقعیت تیغه‌های سایه‌انداز خارجی و بازشوهای کلاسها است به نحویکه ضمن بهبود وضعیت تهویه طبیعی در کلاسها، جریان کنترل نشده باد، ایجاد مزاحمت ننماید. بنابراین سوال اصلی این پژوهش عبارتست از: الگوی فرمی و موقعیت تیغه‌های عمودی خارجی سایه‌انداز در نمای جنوبی مدارس مسجد سلیمان و اقلیم مشابه، بر اساس موقعیت بازشوها، چگونه باشد تا در کلاسهای درس، تهویه طبیعی مؤثری چنان ایجاد شود تا جریان یکنواختی با کمترین مزاحمت برای ساکنین در تراز دانش‌آموزان در سراسر کلاس برقرار گردد؟

لذا نوآوری این پژوهش در پیشنهاد الگوی شکلی و ترکیب کلی قرارگیری تیغه‌های عمودی سایه‌انداز خارجی بر اساس موقعیت پنجره‌های خارجی (وضع موجود و مورد تأیید نوسازی مدارس) است با هدف برقراری جریان پیوسته و یکنواخت در سراسر نقاط کلاس به هنگام باز بودن پنجره‌ها (تهویه طبیعی). به‌عبارتی دیگر متغیر مستقل این پژوهش، فرم و ترکیب تیغه‌های عمودی سایه‌انداز خارجی و بررسی اثر شکلی آنها بر جریان هوای داخل است. مطابق پژوهشهای بررسی شده، تحقیق مشابهی در اقلیم مسجد سلیمان یا مشابه آن یافت نشد.

1-1- ادبیات موضوع

از اواخر دهه 1930 علاقه فراوانی در زمینه مهندسی تهویه به وجود آمد (Burgess, 1995) و (ACGIH, 2011). آگاهی از جریانات هوای داخل در محیط‌های بسته به سه دلیل قابل توجه است: آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل و مصرف انرژی

ساختمان (Amidpour, M. 2008). گرایش به تهویه طبیعی باید در دستور کار طراحان قرار گیرد (Hassana, M.A. et al., 2007) دو روش در تحلیل رفتار جریان هوا وجود دارد: آزمون‌های تجربی و روش شبیه‌سازی عددی. (Loomans & Mook, 1995). شبیه‌سازی‌های عددی بسیار ارزان‌تر، سریع‌تر و دقیق‌ترند، اما نمی‌توان تمامی شرایط محیط و محدودیت‌ها را در شبیه‌سازی در نظر گرفت. بنابراین باید شبیه‌سازی‌های عددی اعتباربخشی شوند (Amidpour, M. 2008).

در سال‌های اخیر مطالعات تجربی فراوانی در زمینه جریانات جابه‌جایی طبیعی صورت گرفته است؛ نخستین بار توسط الدر (Elder, J.W., 1965) و سپس توسط گیل و اسماید (Giel, P. W., and Schmidt, F. W., 1986). در آزمون‌های متعددی میانگین سرعت جریان و نوسانات آشفنگی در یک محفظه به شیوه تجربی با عدد رایلی مشخص بررسی شد (Cheesewright, R., 1968)، (Dafa Alla, A. A, and Bets, P. V., 1996)، (Olsen, D. A., Glicksman, L.R., and Ferm, H. M., 1990). از نتایج آزمون اولسن برای اعتبار بخشی به مدل‌های تحقیقات مشابه بعدی استفاده می‌شود (Amidpour, M. 2008). ناگانو و تاگاوا آزمایش اولسن را با استفاده از مدل صفر معادله ای و مدل $k - \epsilon$ شبیه سازی و برای اعتبار بخشی به محاسبات از نتایج آزمایش اولسن استفاده نمودند (Nagano, Y., and Tagawa, 1990). تاکنون هنکز و همکارانش (Giel, P. W, and Schmidt, F. W., 1986)، لنخار ست (Cheesewright, R., 1968)، چن (Chen, Q., 1996) و هانجالیگ (Markatos, N.C., 1984 and Pericleous, K.A., 1984) جریان جابه‌جایی طبیعی در داخل یک محفظه حاوی هوا را به صورت عددی شبیه‌سازی کرده‌اند (Vassella, C.C., et al., 2022)، (Blake, G., Schlichting, E., Zimmermann, U., 2022)، (Jomehzadeh, F. et al., 2020)، (Chen, Q., 1996). چن از مدل‌های مختلف تنش رینولدزی (RSM)² برای محاسبه جابه‌جایی طبیعی اجباری و توأم اتاق استفاده نمود (Chen, Q., 1996). با روش CFD مشخص شد که اندازه و موقعیت پنجره‌ها تأثیر عمده‌ای بر کیفیت هوای داخل دارد (Chen et al., 2016). همچنین در سال‌های اخیر، شیوه‌های تهویه طبیعی با روش CFD تحلیل می‌شود (Martínez-Molina et al., 2016).

کامپچرو همکاران استراتژی‌های کنترل HVAC را تغییر داده و با روش CFD برتری شیوه‌های تهویه طبیعی را نشان داده است (Kompatscher et al., 2017). رهایی، شیوه‌های تهویه مطبوع را در ساختمانی صنعتی با روش تجربی و شبیه‌سازی عددی آزمایش نموده است (rahaei, o. 2014). همچنین به مطالعه وضعیت تهویه طبیعی در مدارس آمل (Rahaiei, o. and Azemati, h. 2020) و نیز خانه‌های سنتی اصفهان (Rahaiei, o., 2021) پرداخته است. فضای تالارهای آموزشی مشابهی، با هدف بهبود فرایند تهویه طبیعی با روش CFD بررسی و مداخلاتی بر مبنای نتایج در معماری، پیشنهاد شد (Teodosiu, C., 2014 and R. Teodosiu, 2014)، (V. Ilie, and R. Teodosiu, 2014)، (Ascione, F., L. Bellia, and A. Capozzoli, 2013)، (Aguilar, A.J. et al., 2022)، (Izadyar, N. et al 2020). در زمینه تأثیر عناصر بومی معماری بر روش‌های تهویه طبیعی در بازار دزفول تحقیق جامعی به عمل آمد و از مدل $k - \epsilon$ استاندارد برای شبیه‌سازی جریان هوا در فضای بازار استفاده شد (Rahaiei, o., 2013).

در پژوهشی معیارهای پایداری اقلیمی در خانه‌های سنتی اهواز بررسی شد (Attarian K, SafarAli Najar B. 2018) کشتکار و همکاران (2017) در خصوص بهینه‌سازی دیواره‌های ساختمان مدارس شیراز در جهت بهبود مصرف انرژی مطالعاتی به روش شبیه‌سازی انجام داده است. اثرات تیپولوژی ساختمان در کاهش مصرف انرژی در ساختمان مدارس اصفهان را از طریق مدل‌سازی دینامیک انرژی، بررسی شده است (Ghermezi M, Nasrollahi F. 2019). به منظور بررسی میزان تطابق معماری مدارس نوساز اصفهان با شاخص‌های اقلیمی به شیوه مطالعات تطبیقی، تحقیقاتی صورت گرفت. نتایج دوپوسته شدن نماها در ساختمان‌های مناطق گرم‌وخشک ایران با هدف بهره بردن از تهویه طبیعی در فصل تابستان به روش شبیه‌سازی‌های عددی مورد تحلیل واقع و مشخص شد که دو پوسته شدن نمای ساختمان‌ها به افزایش بهره‌گیری از تهویه طبیعی و بهبود کیفیت هوای داخل کمک می‌نماید (Afshinmehr, v., et al., 2015). پژوهش دیگری نیز با هدف بازشناسی معیارهای آسایش محیطی و ارائه راه کارهایی برای ارتقای کیفی کالبد مدارس مبتنی بر بهبود یادگیری دانش‌آموزان، با روش‌های پیمایشی انجام شده است (Taher Tolou Del, m.s., Aminifar, z. 2016).

در تمام پژوهش‌های یاد شده روش CFD و نرم افزار fluent جهت بررسی وضعیت جریان هوا مورد استفاده بود و در تمام موارد روش‌های تهویه طبیعی توصیه شده است. در بسیاری از پژوهش‌های مشابه، الگوی جریان هوای داخل تابع معماری فضا تشخیص داده شده است. همچنین بررسی‌ها نشان داد پژوهش جامعی در حوزه پژوهشی این مقاله یافت نشد.

2- روش تحقیق

پژوهش حاضر ماهیتی بین رشته‌ای دارد و روش تحقیق آن، ترکیبی است. جامعه آماری منتخب در این پژوهش کلیه کلاس‌های درس رو به جنوب (دارای پنجره‌های جنوبی) مدارس و هنرستان‌های مسجد سلیمان و اقلیم مشابه با قابلیت ارتباط با فضای خارج است. یک هنرستان موردی (هنرستان آمنه) نیز به طور تصادفی جهت آزمون‌های تجربی انتخاب شد. در مرحله نخست با روش‌های تجربی و با ثبت مشاهدات، متغیرهای تأثیرگذار، شناسایی و مدل‌های تحقیق، بررسی شد. از آنجایی که موضوع این تحقیق درباره تهویه طبیعی کلاس‌های درس مدارس مسجد سلیمان است، الگوی گردش جریان هوای داخل کلاس به‌عنوان متغیر وابسته مورد مطالعه قرار گرفت. طبق مشاهدات، از آنجا که در مدارس این شهر، استفاده از سایبان‌های عمودی، معمول بوده و نیز مهمترین عناصر برقراری ارتباط میان هوای داخل و خارج، بازشوهاست (بر اساس ادبیات موضوع)، لذا متغیر مستقل این پژوهش موقعیت باز شوها و تیغه‌های سایه‌انداز خارجی (سایبان عمودی) کلاس فرض شد. سرعت جریان هوا (متغیر وابسته) توسط دستگاه سرعت سنج هوا (دستگاه Kimo VT 200، دارای حسگر سیم حرارتی با قابلیت اتصال به رایانه که نوسانات دما و سرعت باد را ثبت می‌کند) در طول مدت آزمون (بهار و پاییز 1400) اندازه‌گیری شد. برای یافتن جهت باد غالب و نیز جهت گردش هوا در درون کلاس، از آزمایش دود (شمع و عود) استفاده شد. به جهت سهولت در انجام آزمون‌ها و همچنین پیش‌گیری از آشفته‌گی جریان هوای داخل، کلیه مشاهدات در زمان 20 دقیقه‌ای زنگ تفریح و بدون حضور دانش‌آموزان در کلاس ثبت شدند.

در مرحله دوم به منظور تحلیل داده‌ها و نیز مداخله در معماری، از روش شبیه‌سازی استفاده شد (مطابق ادبیات موضوع و پس از اثبات اعتبار سنجی آن). شبیه‌سازی‌ها با روش دینامیک سیال محاسباتی انجام شده‌اند. ابتدا صحت شبیه‌سازی عددی به وسیله آزمون‌های تجربی اثبات و سپس به تحلیل داده‌ها با روشی تفسیری و مقایسه‌ای پرداخته شد. پس از مدل‌سازی در نرم افزار اتوکد، از پیش پردازشگر گمبیت به جهت شبکه‌بندی (مش‌بندی) و سپس از نرم‌افزار فلونت به منظور شبیه‌سازی و تحلیل مدل‌ها استفاده شد. در این پژوهش از مدل k-epsilon استاندارد در شبیه‌سازی‌ها (مطابق ادبیات موضوع و به دلیل فراوانی استفاده در نمونه‌های مشابه) استفاده شد. در حالت کلی معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادله بقا جرم (معادله پیوستگی) و معادلات بقا مومنتوم (معادلات ناویرا-ستوکس) هستند. معادله پیوستگی، اصل بقا جرم را توصیف می‌کند. برای حجم ثابت سیال، بقا جرم بیان می‌دارد که شار جرمی خالص کل در حجم باید با تغییرات چگالی متعادل شود. معادله بقا جرم (Blake, G., Schlichting, E., Zimmermann, U. 2022) معادله (1):

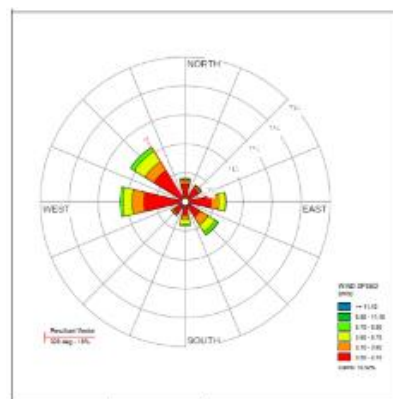
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \hat{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \hat{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \hat{w})}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق \hat{u} ، \hat{v} و \hat{w} به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای x ، y و z هستند. مسجد سلیمان دارای آب‌وهوای گرم‌ونسبتاً خشک است و تابستانی گرم و زمستانی مدیترانه‌ای دارد. میانگین بارش سالانه، بیش از 400 میلی‌متر و بازه دما از 4- درجه سانتی‌گراد در زمستان تا بیش از 50 درجه سانتی‌گراد در تابستان متغیر است. جهت باد غالب، غربی است و پس از آن باد شمال غربی اهمیت دارد و به طور کلی بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی خوزستان (2016) سرعت وزش باد در میانگین سالانه از 15 متر بر ثانیه فراتر نمی‌رود. بر اساس داده‌های ارائه شده در شکل 1، در پاییز و زمستان و نیز بهار، امکان استفاده از جریان طبیعی باد جهت تهویه کلاس‌ها، وجود دارد.

a ↑

b →

c ↓



شکل 1- مشخصات اقلیمی شهرستان مسجد سلیمان (میانگین 10 ساله): a. آب و هوای مسجد سلیمان، b. نمودار بادهای محلی و غالب، c. جدول تغییرات دمایی (اداره کل هواشناسی استان خوزستان، 1395)

Fig. 1- The climate characteristics of Masjed Soleiman (average of 10 years): a. weather, b. local and prevailing wind chart, c. Table of climate changes (weather forecast department of khouzeistan, 2016)

جدول 2- مشخصات اقلیمی شهرستان مسجد سلیمان (میانگین 10 ساله): a. آب و هوای مسجد سلیمان، b. نمودار بادهای محلی و غالب، c. جدول تغییرات دمایی (اداره کل هواشناسی استان خوزستان، 1395)

Tab. 2- The climate characteristics of Masjed Soleiman (average of 10 years): a. weather, b. local and prevailing wind chart, c. Table of climate changes (weather forecast department of khouzeistan, 2016)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Hottest °c	23	30	32	37	47	48	48	48	45	40	33	26	48
Hottest (ave) °c	14	18	22	28	36	41	43	42	40	32	24	17	30
Coldest (ave) °c	7	8	12	17	23	27	28	28	24	18	11	9	18
coldest °c	-3	-2	-2	6	12	17	20	16	12	5	0	-2	-3
Rain (mm)	6	2	1	1	-	-	-	1	3	5	6	7	32

Mount	Temperature °c				
	Max (ave)	Min (ave)	Daily	Max	Min
Jan	16.4	7.6	11.8	25.6	-0.6
Feb	18.5	8.5	13.5	29	-4.4
Mar	22.3	11.7	17.3	32.6	1.8
Apr	30.2	17.7	24.6	39.6	7
May	37.7	24.1	31.9	47.6	14.4
Jun	42.9	28.1	36.7	50	22
Jul	45.0	31.2	39.1	51.6	24
Aug	44.7	30.5	38.4	51.5	22
Sep	40.8	26.1	34.2	46.6	20
Oct	34.3	20.9	27.9	42.2	13
Nov	25.4	14.0	19.5	34	3.4
Dec	18.8	9.7	3.9	30	0.5
Yearly	31.4	19.2	25.7	51.6	-4.4

معرفی نمونه موردی

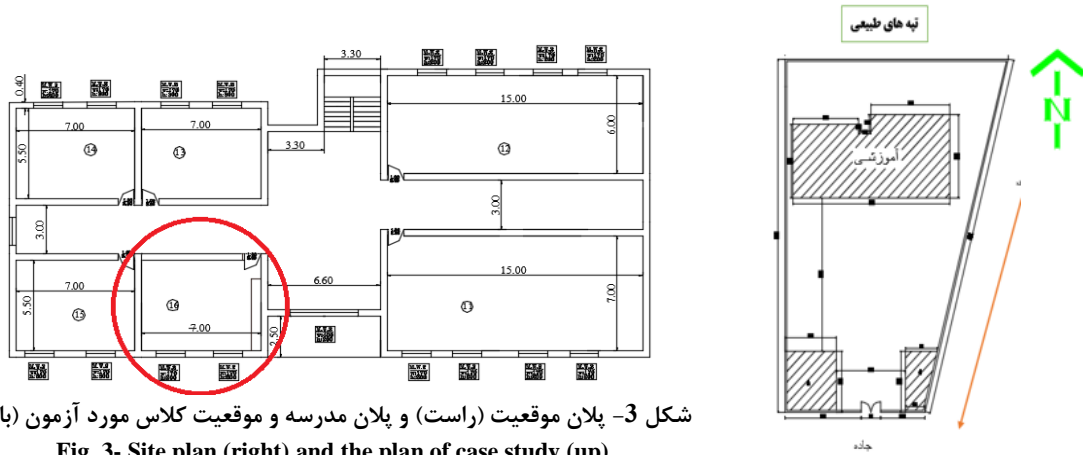
مدارس مسجد سلیمان به جهت شکل ساخت بسیار مشابه یکدیگرند و بنظر می رسد که سازمان نو سازی مدارس، الگوی مشخصی برای این شهر دارد. این مدارس همگی کشیدگی شرقی غربی دارند و از تیغه های سایه انداز عمودی در میان پنجره های آن استفاده شده است. غالب آنها دو طبقه اند و الگوی شکلی یکسانی دارند. در یک مطالعه میدانی حدود 30 مدرسه نوساز در این شهر برداشت شد و تعدادی از آنها به همراه کروکی پلان شان در جدول 1 نمایش داده شده است.

جدول 1- الگوی شکلی مدارس مسجد سلیمان در نمونه های بررسی شده

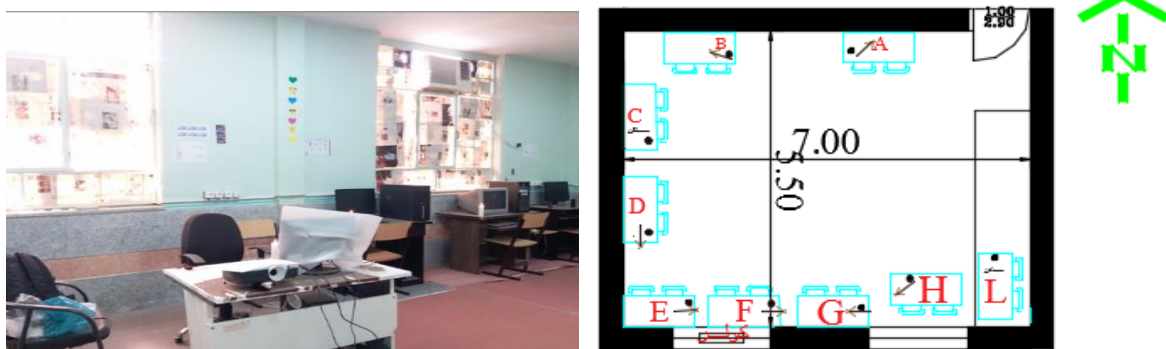
Tab. 1- composition of Masjed Soleiman' reviewed cases

نام مدرسه	آدرس	پلان کلی	تصویر مدرسه
1 دبیرستان دخترانه هاجر	بلوار شهید حاتمی، ایستگاه برق چهاربیشه		
2 مدرسه راهنمایی شهدای صالح پور	مسجد سلیمان، اسکاچ، خیابان نصر		
3 هنرستان دارالفنون	جنب بیمارستان 22 بهمن		
4 هنرستان بهمن مطلق	باشگاه مرکزی روبروی دبیرستان سینا		
5 دبستان پسرانه دارالقرآنی پاسدار	باشگاه مرکزی پایین تر از بانک ملی		
6 دبستان امامت	سه راهی هشت بنگله		
7 مدرسه راهنمایی خدیجه کبری (س)	فلکه نفتون		
8 مدرسه راهنمایی امام خمینی (ره)	فلکه باشگاه مرکزی		
9 دبیرستان باقر العلوم	چهاربیشه		

همه آزمون‌ها در یکی از هنرستان‌های (انتخاب تصادفی) شهر مسجد سلیمان (هنرستان آمنه) به نمایندگی از همه مدارس انجام شد. این مدرسه مشابه بسیاری از مدارس مسجد سلیمان است و نتایج این تحقیق قابل تعمیم به همه مدارس مشابه خواهد بود. در این میان یکی از کلاس‌ها به عنوان جعبه آزمون انتخاب و مداخلات در آن انجام شد. این کلاس، رو به جنوب و دارای پنجره‌های جنوبی قابل باز شدن است. طول هر پنجره 170 سانتیمتر و ارتفاع آن 2 متر و فاصله دو پنجره از یکدیگر 1 متر است. ابعاد کلاس 5.5*7 متر و ارتفاع آن حدود 3.2 متر است (اشکال 2 و 3 و 4).



شکل 3- پلان موقعیت (راست) و پلان مدرسه و موقعیت کلاس مورد آزمون (بالا)
Fig. 3- Site plan (right) and the plan of case study (up)



شکل 4- کلاس تحت آزمون: پلان کلاس و نقاط آزمون (راست) و شکل کلاس (چپ)
Fig. 4- The studied classroom: plan and the tested points (right) and inner view (left)



شکل 5- نمونه نماهای تیغه‌دار جنوبی در مدارس مسجد سلیمان
Fig. 5- Some samples for the bladed southern facades of Masjedsoleiman's schools

آزمون‌های تجربی

آزمون‌های تجربی در 9 نقطه مختلف از فضای داخل یکی از کلاس‌های طبقه اول (شکل 3)، در تراز حدود 1 متری کف کلاس (حالت نشسته دانش‌آموز در پشت میز) در مدرسه انتخابی (هنرستان آمنه) انجام شد. ضمناً به جهت پیش‌گیری از آشفته‌گی‌های پیش‌بینی نشده و همچنین عدم امکان انجام آزمون‌ها در زمان تدریس معلم در کلاس، از حضور دانش‌آموزان صرف‌نظر و آزمون‌ها در زنگ‌های تفریح انجام شد. دوره آزمون (سال 1400) شامل 20 روز در بهار (از 1 اردیبهشت تا 31 خرداد، هفته‌ای دو بار) و 20 روز در پاییز (از 15 مهر تا 30 آذر، هفته‌ای دو بار) بود، چراکه در این زمان استفاده از تهویه طبیعی به جهت مناسب بودن دمای هوای خارج، معقول است. آزمون‌های تجربی دماسنجی و سنجش سرعت باد در چند نوبت (زنگ‌های تفریح) از ساعت 8 صبح الی 14 بعد از ظهر (ساعت کاری مدارس) در روزهای آزمون، در 3 حالت زیر انجام شد:

1. بازشوها باز، 2. بازشوها بسته و کولر خاموش، 3. بازشوها بسته و کولر روشن. هر اندازه‌گیری شامل حداقل، حداکثر و میانگین سرعت وزش باد در هریک از نقاط کلاس، در بازه زمانی 4 دقیقه‌ای است. به منظور پیدا کردن جهت باد نیز از آزمایش دود (شمع و عود و اسفند) استفاده شد. ضمن اینکه سرعت باد خارج نیز به کمک دستگاه کیمو از طریق پنجره کلاس در فاصله 3 متری از دیوار کلاس در تراز 4.5 متری از سطح حیاط در تمام طول مدت آزمون اندازه‌گیری شد. میانگین سرعت باد غالب در

طول سال، حدود 5 متر در ثانیه و جهت آن از غرب به شرق در تمام روزهای آزمون بود. میانگین سرعت و دما و جهت جریان هوای داخل در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 3- سرعت، جهت و دمای متوسط هوا در نقاط آزمون در حالات مختلف دوره آزمون؛ سرعت متوسط باد خارج 5 متر بر ثانیه است. در مواردی سرعت متوسط صفر بود ولی جهت باد مشخص شده است؛ به این دلیل است که سرعت جریان هوا کمتر از 0.2 متر بر ثانیه بود که کمتر از دقت دستگاه سرعت سنج کیمو است و صفر ثبت می‌شود. جهت جریان هوا در نقاط، با آزمون دود نشان داده شده است

Tab. 3- velocity, direction and the average temperature of the tested points in different conditions of test time; average velocity of outdoor wind= 5m/s. in some cases, the velocity was 0, but the direction was specified, because of the accuracy of the anemometer. The direction of the wind current was tested with smoke tests

وضعیت 1، تمام بازشوها باز و کولر خاموش: سمت راست از 15 مهر تا 15 آذر (متوسط دمای هوای خارج: 29)، سمت چپ از 15 فروردین تا 15 خرداد (متوسط دمای هوای خارج: 27)							
نقطه	دما (درجه سلسیوس)	جهت جریان هوا	سرعت (متر بر ثانیه)	نقطه	دما (درجه سلسیوس)	جهت جریان هوا	سرعت (متر بر ثانیه)
نقطه A	27	←	0.10	نقطه A	28.5	←	0.15
نقطه B	27	ساکن	0.00	نقطه B	28.5	ساکن	0.00
نقطه C	27	↓	0.00	نقطه C	28	↓	0.00
نقطه D	26	ساکن	0.00	نقطه D	28	ساکن	0.00
نقطه E	27	ساکن	0.00	نقطه E	28	ساکن	0.00
نقطه F	28	↗	0.22	نقطه F	28.5	↗	0.25
نقطه G	28	↗	0.35	نقطه G	28.5	↗	0.30
نقطه H	27	↗	0.20	نقطه H	28	↗	0.20
نقطه L	27	↗	0.25	نقطه L	28	↗	0.20

وضعیت 2، تمام بازشوها بسته و کولر خاموش: سمت راست از 15 مهر تا 15 آذر (متوسط دمای هوای خارج: 29)، سمت چپ از 15 فروردین تا 15 خرداد (متوسط دمای هوای خارج: 27)							
نقطه	دما (درجه سلسیوس)	جهت جریان هوا	سرعت (متر بر ثانیه)	نقطه	دما (درجه سلسیوس)	جهت جریان هوا	سرعت (متر بر ثانیه)
نقطه A	34	←	0.00	نقطه A	36	ساکن	0.00
نقطه B	35.5	ساکن	0.00	نقطه B	36	ساکن	0.00
نقطه C	35	ساکن	0.00	نقطه C	37	ساکن	0.00
نقطه D	34	ساکن	0.00	نقطه D	36	ساکن	0.00
نقطه E	35	ساکن	0.00	نقطه E	35	ساکن	0.00
نقطه F	35	ساکن	0.00	نقطه F	36	ساکن	0.00
نقطه G	36	ساکن	0.00	نقطه G	37	ساکن	0.00
نقطه H	36	↗	0.00	نقطه H	37	↗	0.00
نقطه L	36	ساکن	0.00	نقطه L	37	ساکن	0.00

وضعیت 3، تمام بازشوها بسته و کولر روشن: سمت راست از 15 مهر تا 15 آذر (متوسط دمای هوای خارج: 29)، سمت چپ از 15 فروردین تا 15 خرداد (متوسط دمای هوای خارج: 27)							
نقطه	دما (درجه سلسیوس)	جهت جریان هوا	سرعت (متر بر ثانیه)	نقطه	دما (درجه سلسیوس)	جهت جریان هوا	سرعت (متر بر ثانیه)
نقطه A	25	←	0.14	نقطه A	25.5	←	0.15
نقطه B	25	ساکن	0.00	نقطه B	25	ساکن	0.00
نقطه C	23	ساکن	0.00	نقطه C	23	ساکن	0.00
نقطه D	24	ساکن	0.00	نقطه D	23.5	ساکن	0.00
نقطه E	25	↗	0.00	نقطه E	24.5	↗	0.00
نقطه F	26	↗	0.10	نقطه F	26.5	↗	0.10
نقطه G	26.5	↗	0.15	نقطه G	27	↗	0.15
نقطه H	28.5	↗	0.15	نقطه H	29	↗	0.17

مطابق جدول 2، در وضعیت 2 که باز شوها بسته‌اند، طبیعی است که هیچ جریانی در کلاس برقرار نیست و سرعت سنج عدد صفر را در نقاط آزمون ثبت نموده است. این در حالی است که در وضعیت 1، همه باز شوها باز هستند و همچنان سرعت جریان هوا در اکثر نقاط کلاس ساکن است و عدد صفر برای آنها ثبت شده است، تنها در نقاط اندکی از کلاس جریان باد برقرار است که اختلاف نسبتاً زیادی باهم دارند و همین امر نشان از آشفته بودن جریان هوا در این نقاط دارد. در وضعیت 3 نیز که کولرها روشن و باز شوها بسته‌اند، طبیعی است که جریان هوای بسیار آرام و نزدیک به صفری برقرار باشد. براین اساس اثبات می‌شود که باز بودن باز شوها، تهویه طبیعی مؤثری برقرار نمی‌کنند و بسته بودن باز شوها نیز بشدت بار حرارتی هوای داخل را افزایش می‌دهند و حتی روشن بودن کولر نیز کمک چندانی به بهبود وضعیت جریان هوای داخل نمی‌کند (مطابق وضعیت 3 در جدول 2) و اختلاف دمای حدود 5 تا 6 درجه در نقاط مختلف کلاس به چشم می‌خورد. در این پژوهش موضوع تهویه مکانیکی مد نظر نیست و می‌تواند موضوع تحقیقات آتی باشد اما، به منظور بهبود گردش جریان هوای داخل در زمان تهویه طبیعی، مداخله در موقعیت باز شوها و تیغه‌های سایه‌انداز خارجی در دستور کار قرار گرفت.

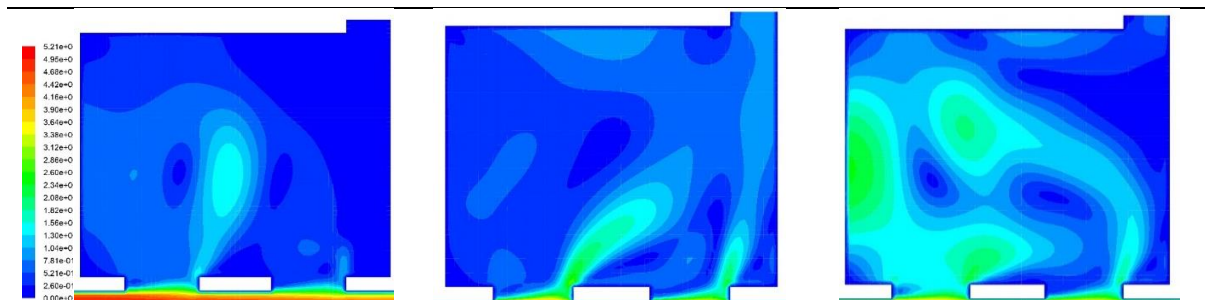
3- نتایج و بحث

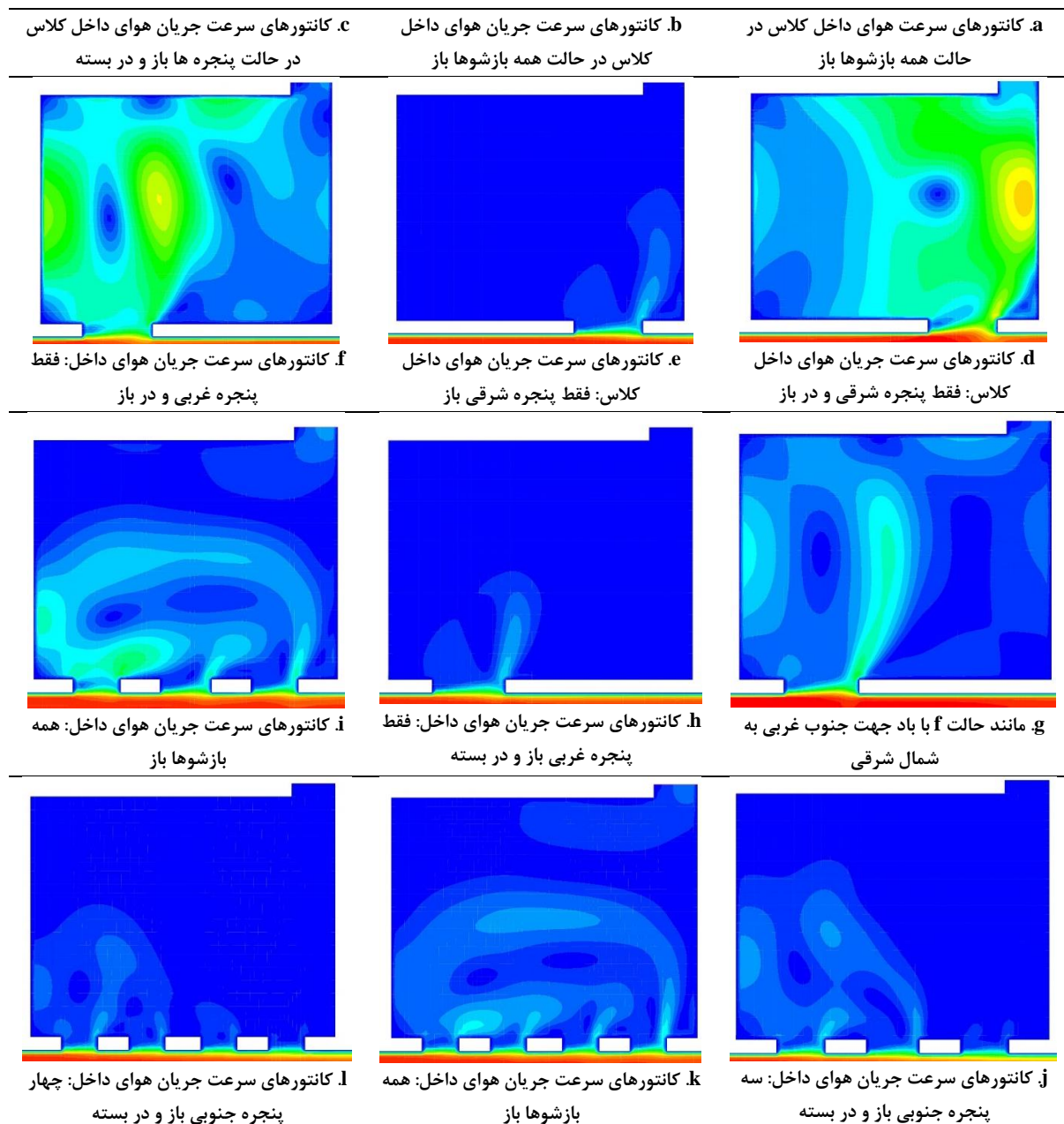
برقراری جریان هوای مطلوب و یکنواخت، در سراسر فضای داخلی کلاس، در زمان تهویه طبیعی (باز بودن باز شوها) به وسیله باد خارج، هدف اصلی این پژوهش بود و کلیه مداخلات در موقعیت باز شوها و تیغه‌های سایه‌انداز عمودی خارجی (متغیر مستقل) به روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) و از طریق شبیه سازی (مطابق ادبیات موضوع) انجام می‌شود. پیش‌پردازش شگر Gambit به منظور ایجاد شبکه (مش‌بندی) به روش TET و مدل سازی، مورد استفاده واقع شد و تحلیل کلیه مدل‌ها و مداخلات، در نرم‌افزار Fluent انجام شد. به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها (اثبات پایایی)، وضع موجود مطابق داده‌های تجربی (وضعیت 1 از جدول 2) شبیه‌سازی شد و نتایج شبیه‌سازی‌ها با داده‌های تجربی مقایسه شد:

در محاسبات با توجه به اینکه فقط الگوی جریان هوا مورد مطالعه بود از فعال سازی معادلات انرژی صرف نظر شد؛ ابتدا شبیه سازی با استفاده از تعداد مش‌های متفاوت انجام شد. با افزایش تعداد مش‌ها از عدد 130 هزار مش به بعد، نتایج همگرا شد (استقلال از شبکه) و اختلاف اندکی وجود داشت که به خاطر عامل خطای انسانی در برداشت‌های تجربی و خطاهای محاسباتی است. بدین ترتیب کلاس موردی بر اساس فرضیات این پژوهش (نتایج آزمون‌های تجربی) شبیه‌سازی شد و نتایج با داده‌های تجربی (جدول 2، وضعیت 1) مقایسه شد. این داده‌ها اختلاف چندانی نداشته و از آنجا که طبق استاندارد ASHRI خطای نتایج زیر 10 درصد است، پس شبیه‌سازی‌ها قابل اعتماد است. جدول 3 وضعیت موجود را در حالات مختلف باز شوها نشان می‌دهد. بخش a جدول 3 وضع موجود است و بخش‌های I, j, k, l مداخلات در تعداد پنجره‌های خارجی با سطح شیشه مساوی با وضع موجود است. سایر بخش‌های این جدول به باز و بسته بودن باز شوها پرداخته است.

جدول 4- نمایش کانتورهای سرعت هوای داخل در حالات مختلف باز شوها. جهت باد خارج، فقط در حالات b, g از جنوب غربی به شمال شرقی فرض شده و در سایر حالات از غرب به شرق است. جهت شمال در کلیه پلان‌ها به سمت بالاست. راهنمای همه اشکال در بخش c آمده است

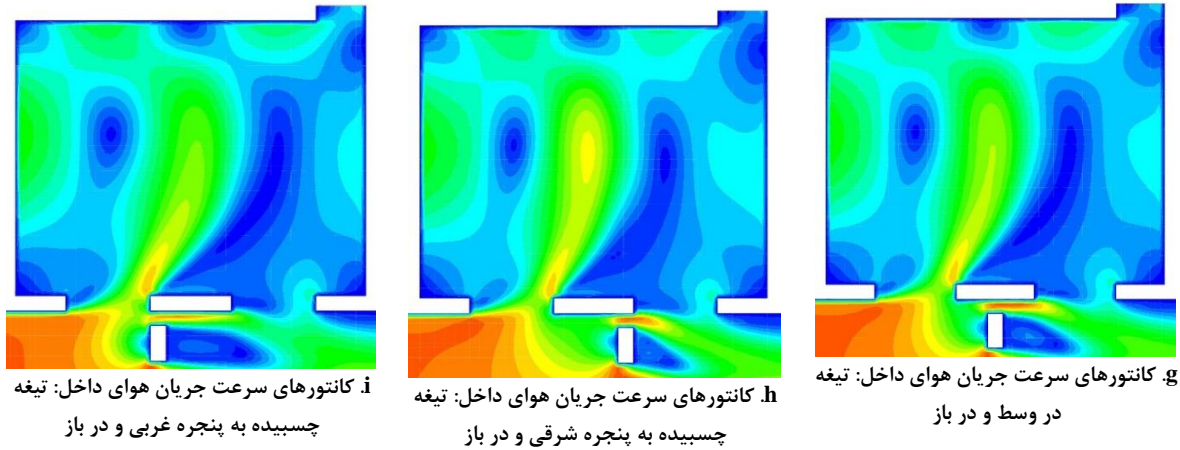
Tab. 4- Display of indoor air speed contours in different opening modes. The direction of the outside wind is assumed to be from southwest to northeast only in b and g modes and from west to east in other modes. The north direction is upwards in all plans. Instructions for all shapes are given in section c





مطابق جدول 3، در شرایطی که در کلاس باز است، به ویژه در زمان وزش باد غرب به شرق (a) جریان آشفته‌ای در کلاس برقرار است و تقریباً از هر دو پنجره باد وارد و از در کلاس خارج می‌شود. با وجود آشفتگی جریان داخلی و رکود هوا در جایگاه مدرس (جلوی در) با این حال تهویه طبیعی برقرار است اما یک‌نواخت و قابل کنترل نیست و بخش‌های زیادی از کلاس تهویه نمی‌شود. اگر جهت باد خارج 45 تغییر کند (جدول 3-b) اوضاع بدتر می‌شود. در زمان بسته بودن درها جریان هوای داخل به شدت افت پیدا میکند (همه وضعیت‌های جدول 3) و تقریباً تهویه طبیعی برقرار نمی‌شود. باز بودن همه بازشوها نیز منجر به آشفتگی جریان هوای داخل و ایجاد جریانات گردابه‌ای زیاد در فضای کلاس می‌شود که آزار دهنده بوده و فقط باعث چرخش هوای داخل حول کانون خود شده و سن هوای داخلی در یک حالت گردشی بالا می‌رود و عمل تعویض هوای داخل با هوای خارج به خوبی صورت نمی‌گیرد.

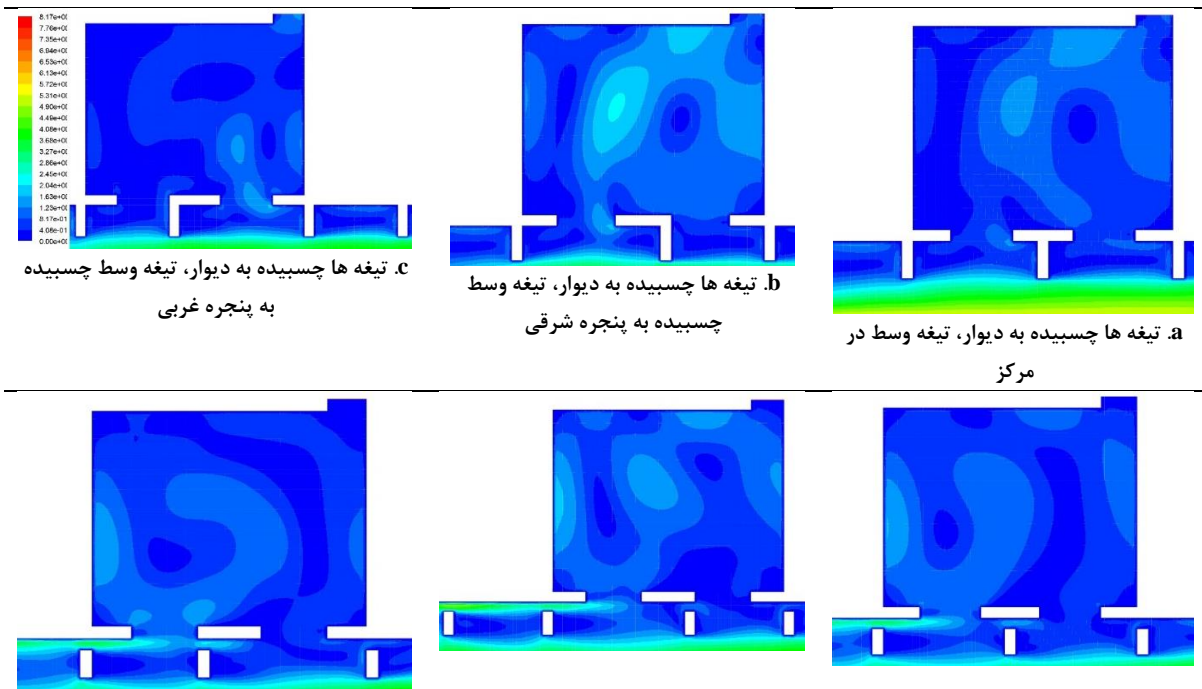
در تعداد پنجره‌های کلاس با توجه به سطح شیشه‌خور مساوی در حالات مختلف مداخله به عمل آمد (جدول 3-k, l, j, i). از سویی باز و بسته بودن پنجره‌ها و بازشوها نیز مورد آزمون واقع شد. نتایج نشان دادند که اگر یکی از بازشوها بسته باشد تهویه داخلی به شدت افت می‌کند و همچنین هرچه تعداد پنجره‌های خارجی (با سطح شیشه‌خور برابر در نما) بیشتر باشد، سرعت

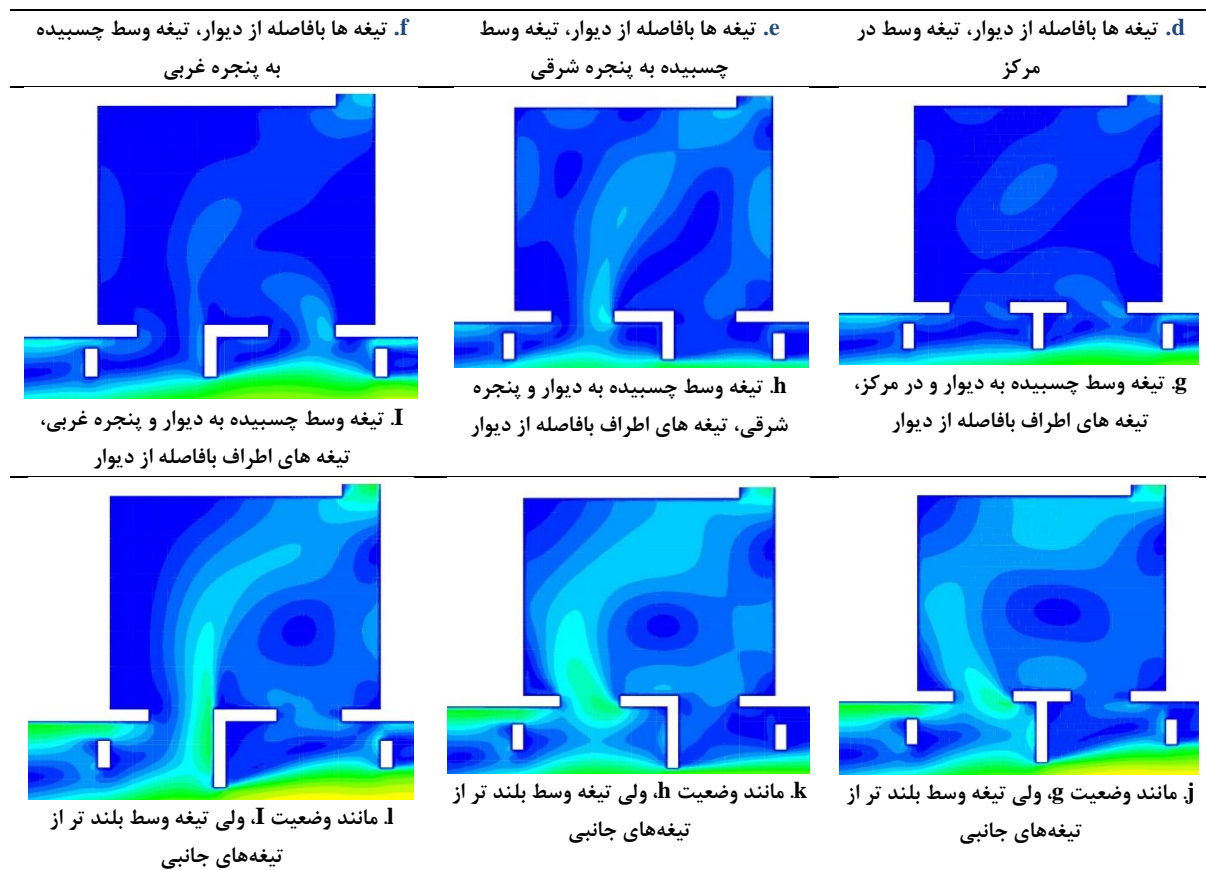


در مداخله دیگری، تیغه خارجی جدول 4 در امتداد نمای ساختمان تکرار شد به نحوی که تیغه میان دو پنجره مانند جدول 4 و سایر تیغه‌ها در امتداد دیوار کلاس با شند و در طول مدر سه همین الگو تکرار شود (جدول 5). در همه حالات این وضعیت، جریان تهویه هوای کلاس به شدت افت کرده است و در حالت در بسته کلاس، هیچ تهویه‌ای وجود ندارد. فقط به نظر می‌رسد اگر تیغه وسط به سمت پنجره شرقی حرکت کند، جریان هوای داخلی مؤثرتری برقرار شود (جدول 5-a,b,c). در حالیکه اگر همین تیغه‌ها از دیوار نما فاصله اندکی بگیرند (30 سانتیمتر) وضعیت تهویه داخلی بهبود یافته و جریان مؤثرتری در فضای کلاس برقرار میشود، هرچند جریان هوای داخل همچنان آشفته است (جدول 5-d,e,f). اگر تیغه میانی به دیوار چسبیده باشد و سایر تیغه‌ها از دیوار فاصله داشته باشند، در این صورت آشفتگی هوای داخل کمتر می‌شود، اما تهویه طبیعی افت می‌نماید (جدول 5-g,h,i). آزمون‌ها نشان داد که اگر در این وضعیت، تیغه میانی بلندتر از تیغه‌های جانبی باشد، باز از آشفتگی هوای داخل کاسته شده و در عوض تهویه مؤثرتری در فضای داخل برقرار خواهد شد (جدول 5-j,k,l). در کلیه این وضعیت‌ها، اگر تیغه میانی به پنجره شرقی چسبیده باشد، جریان هوای داخل مؤثرتر خواهد بود (جدول 5).

جدول 6- نمایش کانتورهای سرعت و جهت گردش هوای داخل در حالات مختلف تکرار تیغه‌ها در نمای خارجی، همه بازشوها باز فرض شده‌اند. جهت باد در تمام حالات از غرب به شرق و جهت شمال به سمت بالای صفحه است. راهنمای همه شکلها در بخش C آمده است.

Tab. 6- Showing the contours of the speed and direction of indoor air flow in different modes of repetition of the blades in the external view, all openings are assumed to be open. The wind direction in all cases is from west to east and north direction is upward. Instructions for all shapes are given in section c





2-3- مداخلات نهایی ترکیبی:

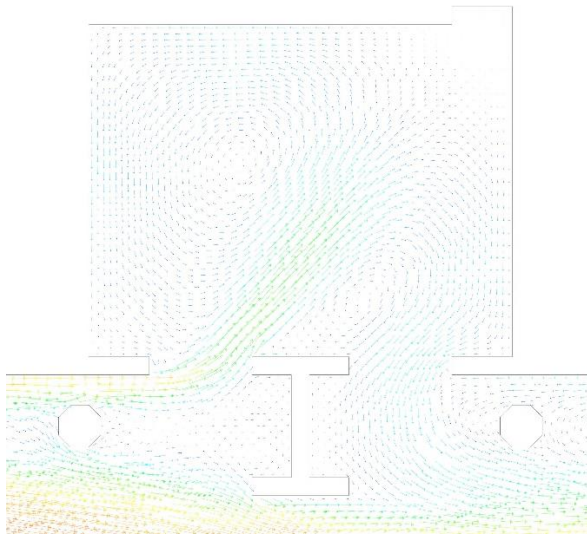
در این حالت، تیغه میان دو پنجره (مطابق پلان های جدول 6، a تا f) به شکل T یا L در آمده و به دیوار خارجی چنان چسبیده است که پای آن به دیوار چسبیده و سرکش آن به سمت خارج است. به عبارت دیگر یک دیوار به طول 160 سانتی موزی دیوار خارجی به آنسوی تیغه میان دو پنجره چسبیده است و ترکیب تیغه با آن میتواند شبیه L یا T شود. سایر تیغه ها به شکل یک هشت ضلعی منتظم به قطر 70 سانتیمتر (حالت ستون) فرض شده اند. علت آن این بود تا کمی حالت آیرودینامیکی پیدا کنند و جریان هوا راحت تر از میان آنها عبور نماید. فاصله این ستون های 8 ضلعی تا دیوار 50 سانتی متر فرض شده و عمق تیغه های میان پنجره نیز 170 سانتی متر و طول سرکش تیغه میان دو پنجره نیز معادل فاصله دو پنجره (160 سانتیمتر) فرض شده است (جدول 6)

مطابق جدول 6 اشکال a تا l، جریان هوای داخل به صورت حیرت انگیزی ارتقا یافته است. موقعیت تیغه وسط در میان دو دیوار موازی چندان تفاوتی در شکل جریان هوای داخل ایجاد نمی کند و همان گونه که کانتورهای اشکال c, g, k نشان می دهند، به لحاظ کلی تفاوت چندان باهم ندارند. نکته بسیار مهمی که از این شبیه سازی حاصل شد این است که جریان هوای داخل نیز چندان وابستگی به باز یا بسته بودن در کلاس ندارد و همان گونه که در کانتورهای اشکال d, h, l مشاهده می شود، جریان هوای داخل در صورت بسته بودن در کلاس همچنان برقرار است. هرچند در مقایسه با شرایط باز بودن در کلاس (c, g, k)، اندکی افت کرده است. با این حال بسیار نتیجه بخش بوده است (جدول 6).

جدول 7- نمایش بردارها و کانتورهای سرعت و جهت جریان هوای داخل در حالات مختلف تیغه های آجری با اعماق و اشکال متفاوت عمود بر دیوار: تیغه بین دو پنجره به شکل T به عمق 170 سانتیمتر چسبیده از پایه به دیوار و سایر تیغه ها به شکل 8 ضلعی (قطر 70 سانتی متری) با فاصله 50 سانتیمتر نسبت به دیوار. جهت باد در تمام حالات از غرب به شرق است. جهت شمال در تمام پلان ها به سمت بالای صفحه است. راهنمای همه اشکال در بخش کانتورها آمده است

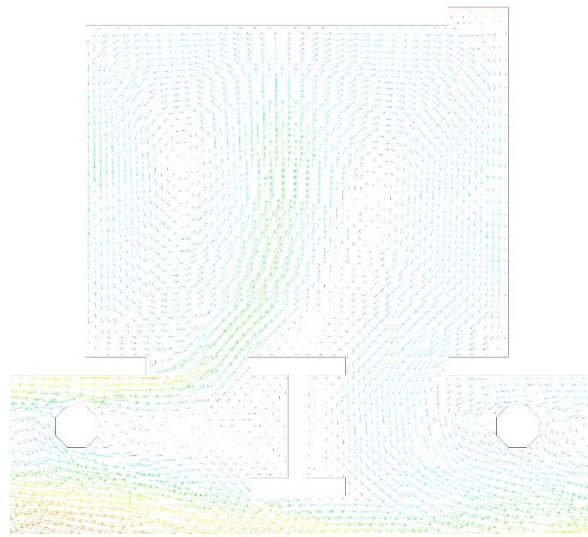
Tab. 7- Showing the vectors and contours of the speed and direction of the indoor air flow in different states of the brick blades with different depths and shapes; perpendicular to the wall: the blade between two T-shaped windows with a depth of 170 CM. attached to the wall from the base and the other blades in an octagonal shape (70 CM.

diameter) with a distance of 50 CM. from the wall. The wind direction is from west to east in all cases. The north direction is upward in all plans. The guide for all the shapes is in the contours section



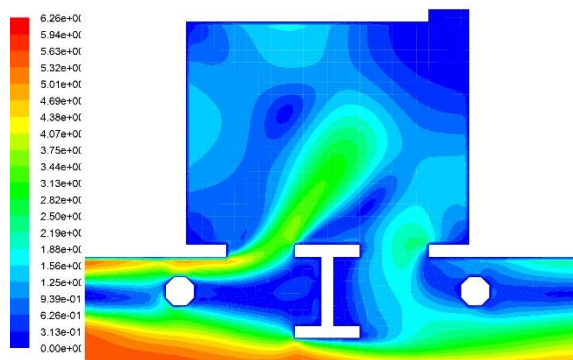
a. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز و در

بسته

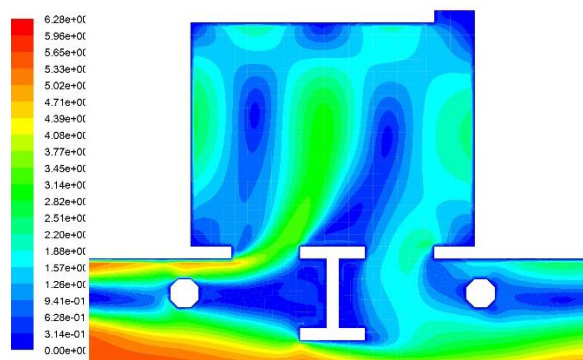


b. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز و در

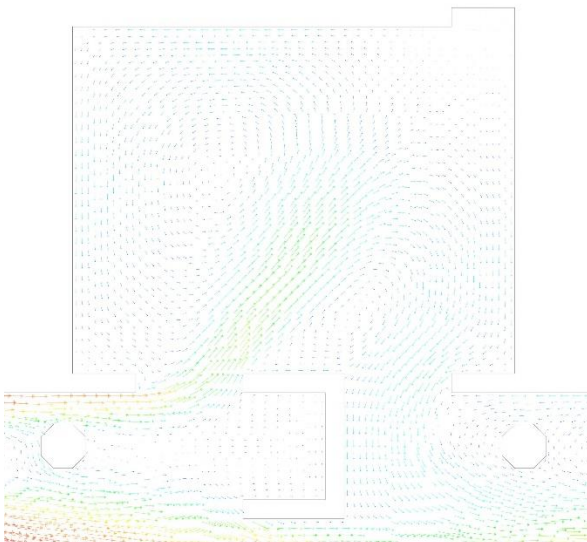
باز



c. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز و در بسته

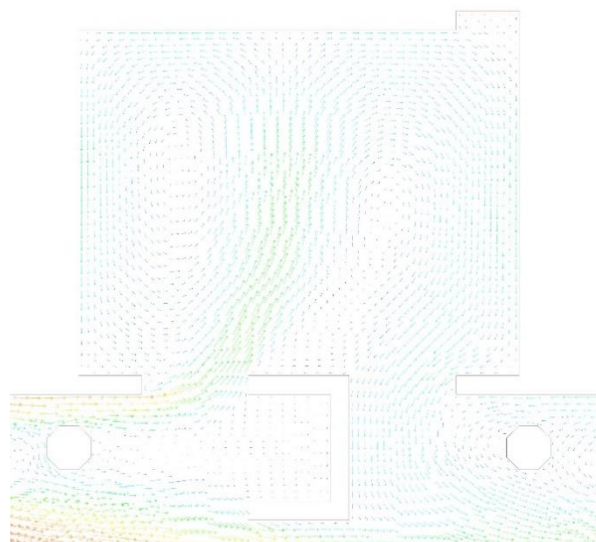


d. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز و در باز



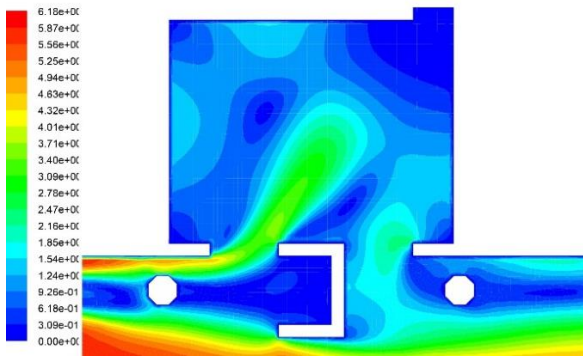
e. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به

پنجره شرقی و در بسته

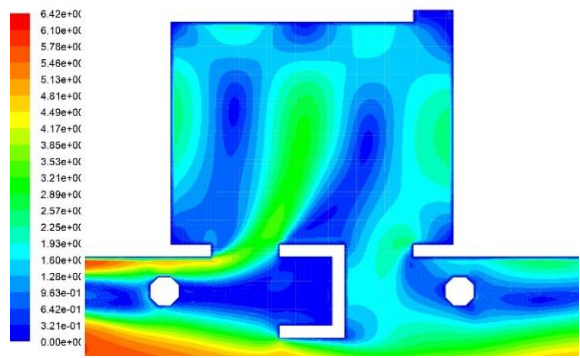


f. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به

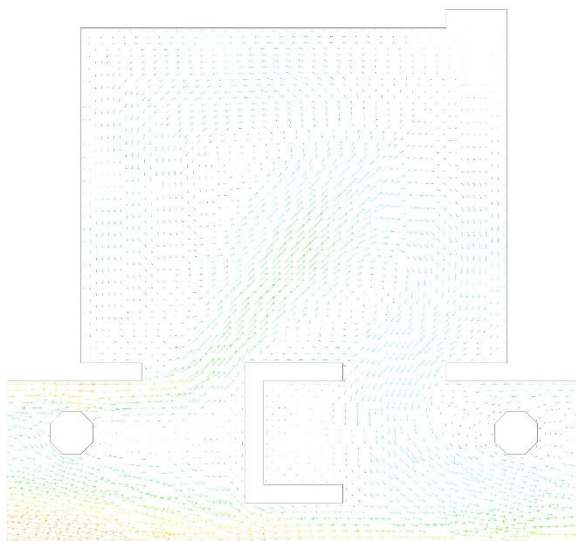
پنجره شرقی و در باز



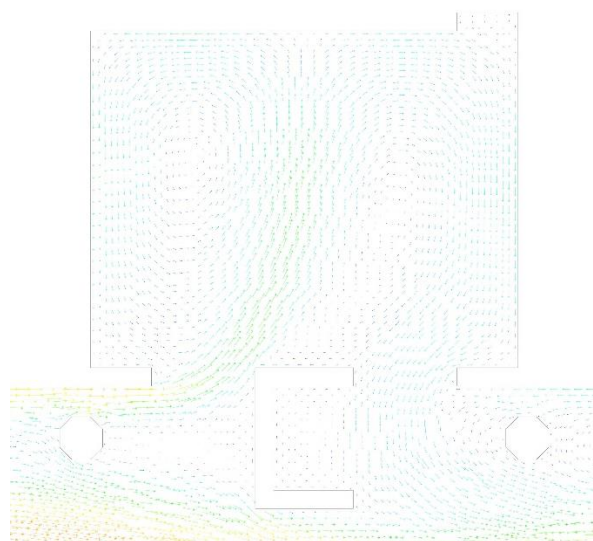
h. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به پنجره شرقی و در بسته



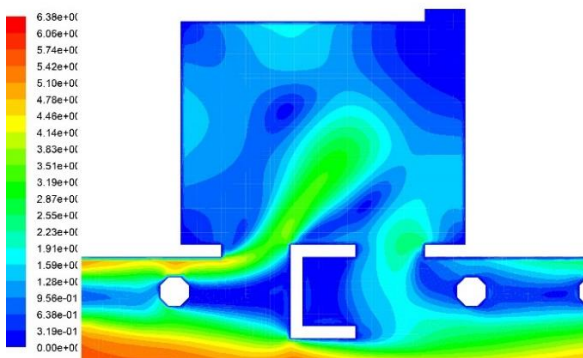
g. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به پنجره شرقی و در باز



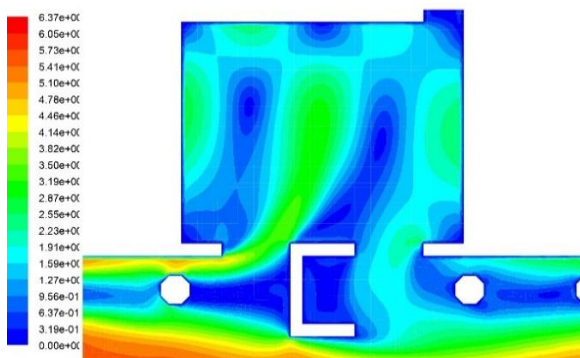
z. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به پنجره غربی و در بسته



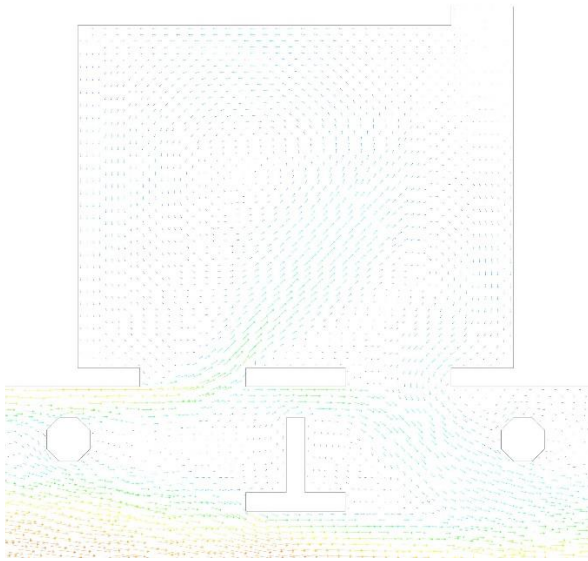
I. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به پنجره غربی و در باز



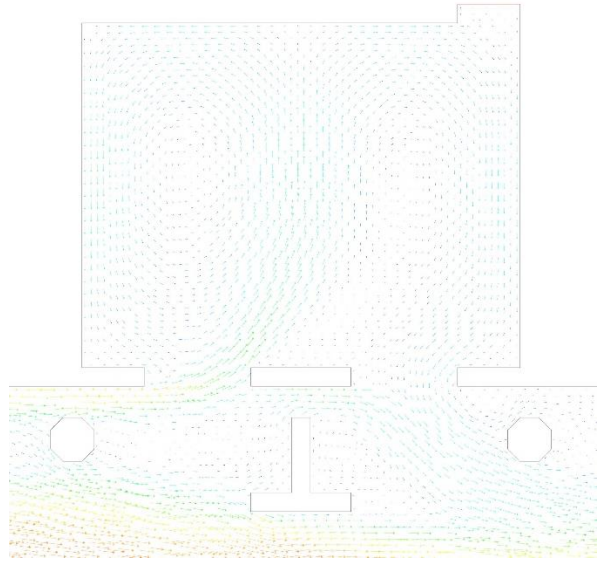
I. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به پنجره غربی و در بسته



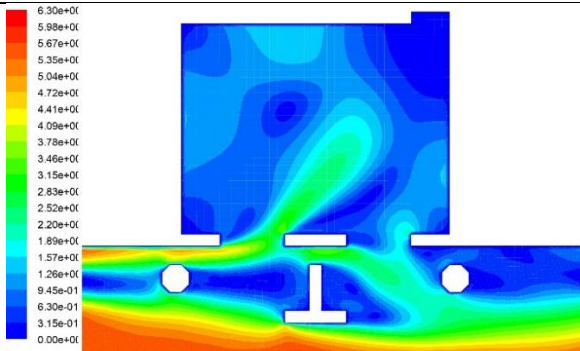
k. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط چسبیده به پنجره غربی و در باز



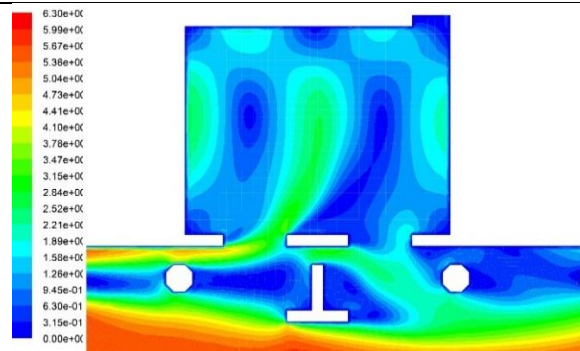
n. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز (50) سانتیمتر با دیوار خارجی فاصله دارد) و در بسته



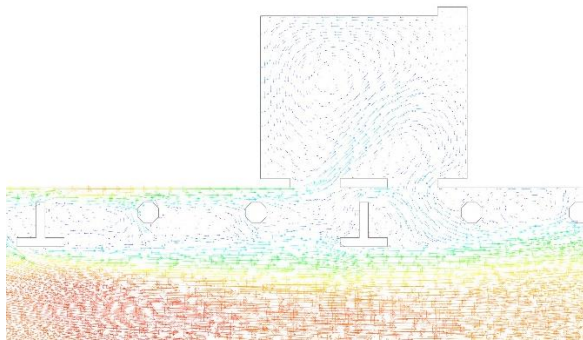
m. بردارهای سرعت و جهت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز (50) سانتیمتر با دیوار خارجی فاصله دارد) و در باز



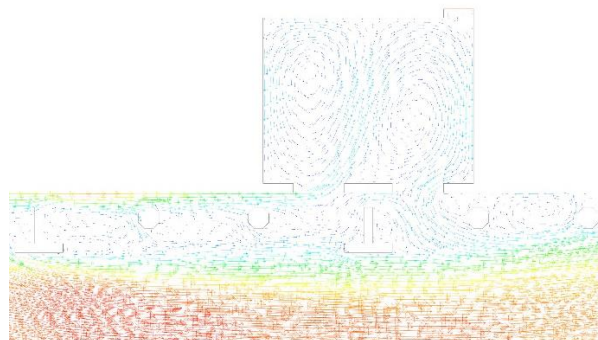
p. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز (50) سانتیمتر با دیوار خارجی فاصله دارد) و در بسته



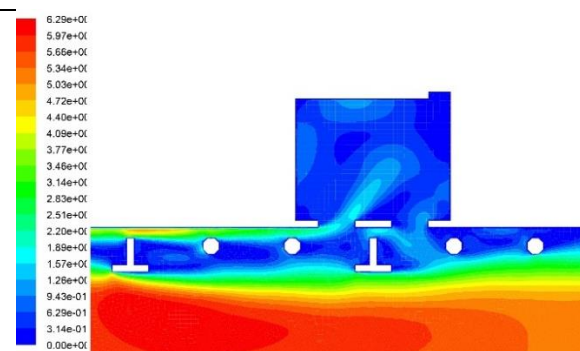
o. کانتورهای سرعت جریان هوای داخل: تیغه وسط در مرکز (50) سانتیمتر با دیوار خارجی فاصله دارد) و در باز



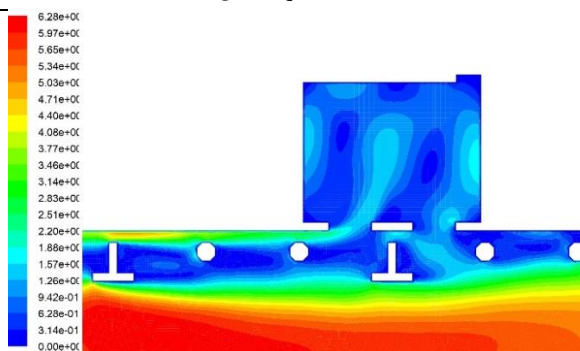
r. حالت گسترده شکل n



q. حالت گسترده شکل m



t. حالت گسترده شکل p



s. حالت گسترده شکل o

در مداخله دیگری تیغه وسط پنجره‌ها در حالتی فرض شد که اولاً 50 سانتیمتر با دیوار پشتی فاصله یابد و ثانیاً دقیقاً در میان پنجره‌ها باشد. دو حالت دیگر (تیغه چسبیده به پنجره‌ها به دلیل شبیه سازی‌های قبلی که تفاوت چندانی نداشتند و همچنین طراحی متقارن نما، در نظر گرفته نشدند. ضمن اینکه تغییر در جهت وزش باد به هر دلیل نباید سبب بر هم زدن شرایط تهویه گردد) شبیه سازی نشد.

در این حالت آشفتگی جریان هوای داخل تا حد زیادی کاسته شد و ضمن اینکه شرایط بسته بودن در کلاس نیز بهبود یافت (جدول 5-5, m,n,o,p). این گزینه بهترین مداخله در فرم تیغه‌ها بود که به شدت در طراحی توصیه می‌شود. در حالت گسترده نیز وضعیت جریان هوای اطراف دیوار خارجی نیز شبیه سازی شد و نتایج در اشکال q,r,s,t نمایش داده شده‌اند که حالت بهینه این پژوهش را تأیید می‌نمایند. لذا فرم اخیر موجود در جدول 5 اشکال m تا t، مورد تأیید است.

4- نتیجه گیری

پس از بررسی الگوهای گردش هوای داخل در مداخلات صورت گرفته، این نتیجه به دست آمد که وضعیت تیغه‌های خارجی سایه‌انداز در نما می‌تواند به شدت و وضعیت تهویه طبیعی هوای کلاس را متغیر کند. اجرای غیر اصولی این تیغه سبب از کار افتادن کامل فرایند تهویه طبیعی می‌شود و برعکس، اجرای هوشمندانه این تیغه‌ها می‌تواند تهویه مؤثر و یک‌نواختی را در فضای کلاس چنان برقرار کند که حتی با وجود بسته بودن در کلاس، جریان مؤثری در فضای داخل برقرار شود و هوای کلاس به‌طور منظم تعویض شده و گردش هوای داخل تحت کنترل باشد. همچنین مداخلاتی در موقعیت باز شوها نیز صورت گرفت که نتایج جالبی همراه داشت. خلاصه این نتایج به شرح زیر است:

1. در صورتی که تعداد پنجره‌های خارجی کلاس‌های درس، با سطح شیشه خور ثابت، بیشتر شود، سرعت گردش هوای داخل افت می‌کند، اما تهویه یک‌نواخت‌تری ارائه می‌شود و از آشفتگی جریان هوای داخل کاسته می‌شود. لذا تعدد پنجره‌های خارجی در این حالت سودی ندارد و استفاده از دو پنجره بزرگ در نمای جنوبی، در دو طرف کلاس، بهتر از چند پنجره کوچک با همان سطح شیشه خور است. ضمن اینکه شبیه‌سازی‌ها نشان داد که استفاده از یک پنجره خارجی به تنهایی، نمی‌تواند تهویه مؤثری برقرار نماید.

2. بسته بودن در کلاس سبب کاهش شدید جریان عبوری از کلاس می‌شود و در بسیاری از مداخلات باعث رکود شدید هوای داخل می‌شود. لذا می‌تواند به عنوان یک کنترل کننده گردش هوای داخلی، مد نظر استفاده کنندگان باشد که در صورت شدت باد خارج، با بسته شدن در کلاس، یا نیم‌بند شدن آن، جریان هوای داخل تحت کنترل باشد.

3. استفاده از یک تیغه عمودی میان پنجره‌ها، می‌تواند سبب بهبود یا افت جریان هوای داخل شود. جدول 3 نشان داد که اگر این تیغه با فاصله از دیوار نصب شود و به پنجره شرقی نیز چسبیده باشد، جریان هوای داخلی مؤثرتری برقرار می‌نماید. اما بسته بودن در کلاس به شدت باعث افت جریان می‌شود.

4. جدول 4 نشان داد که تکرار یکسان تیغه‌ها در نمای خارجی باعث افت شدید جریان هوای داخل کلاس می‌شود. مداخلات این جدول نشان داد که اگر تیغه‌ها به طور یک در میان به دیوار چسبیده باشند (تیغه میان پنجره‌ها چسبیده به دیوار و تیغه‌های اطراف با فاصله از دیوار) جریان هوای خارج در اطراف تیغه‌ها یک‌نواخت شده و باعث بهبود تهویه هوای داخل کلاس می‌شود. در این وضعیت، بزرگتر بودن تیغه میانی نسبت به تیغه‌های جانبی سبب بهبود گردش هوای داخل کلاس می‌شود. همچنین اگر تیغه میانی به پنجره شرقی نزدیک‌تر شود، بسیار مؤثرتر خواهد بود.

5. مداخلات ترکیبی برای تیغه میانی نشان داد که فرم‌های T و U مطابق جدول 5 تأثیر به‌سزایی در شکل تهویه هوای داخل خواهد داشت اما به دلیل آشفتگی جریان هوای خارج حول تیغه‌ها، جریان هوای داخل نیز آشفته خواهد بود. بنابراین چاره‌ای جز یک‌نواخت‌سازی جریان هوای گذری حول تیغه‌های خارجی وجود ندارد.

6. یک راه حل ابداعی، پیشنهاد ستون‌های گرد یا چند ضلعی در نمای خارجی و استفاده از تیغه T شکل در میان دو پنجره کلاس مطابق جدول 5, o,p است که سبب یک‌نواخت سازی جریان خارجی پیش از ورود به کلاس شده و با برخورد به تیغه T شکل، وارد کلاس شده و حتی با وجود بسته بودن در کلاس، گردش مؤثر هوای داخل را به همراه خواهد داشت. بر این اساس حالات q,r,s,t در جدول 5 به صورت گسترده در نما مورد آزمون واقع شد و نتایج بسیار جالبی به دست آمد: باز بودن در کلاس

سبب برقراری تهویه مؤثر در فضای داخل و تعویض مناسب آن در زمان باد ملایم خارجی می شود. در صورت وزش باد شدید، بسته بودن در کلاس به هیچ وجه مانعی در تهویه طبیعی هوای داخل ایجاد نکرده و صرفاً با کاهش سرعت هوای داخل، سبب برقراری تهویه طبیعی مؤثر داخلی می شود. در هر دو حالت تعویض مؤثر هوای داخل کلاس انجام می شود و بسته به سرعت باد خارج، کنترل تهویه طبیعی فضای کلاس به کمک در کلاس انجام می شود.

پیشنهاد می شود با مطالعه دقیق شبیه سازی های این پژوهش، بسته به شرایط اقلیمی و کیفیت باد خارج، در حالات مختلف، یکی از شبیه سازی های تجربه شده این پژوهش مورد آزمون و استفاده واقع شود.

¹Computational fluid dynamic

² Reynolds stress model

مراجع

- ACGIH (2011) The Industrial Ventilation Manual. USA: The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Ltd.
- Afshinmehr, v., et al (2015) Numerical analysis of two-layer facades for the summer season. *Naghsh-e-jahan*, no 5 (2). Doi: <http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-10843-fa.html>
- Aguilar, A.J., de la Hoz-Torres, M., Costa, N., Arezes, P., D. Martínez-Aires, M., Ruiz, D.P., (2022). Assessment of ventilation rates inside educational buildings in Southwestern Europe: Analysis of implemented strategic measures. *Journal of Building Engineering*. 51, 104204. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104204>
- Amidpour, M. (2008) Investigating the effects of using chimneyless heaters on indoor air quality, research project, Khawaja Nasiruddin Toosi University, Faculty of Mechanics. Client: Iran Fuel Consumption Optimization Company [in Persian]
- Ascione, F., L. Bellia, and A. Capozzoli, (2013) A coupled numerical approach on museum air conditioning: Energy and fluid-dynamic analysis. *Applied energy*. 103: p. 416-427. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.007>
- Attarian K, SafarAli Najar B. (2018) Defining Sustainability Characteristics for Residential Buildings in Hot and Humid Climate (Case Study: Traditional Houses of Ahwaz). *Naqshejahan*, 8 (3) :161-170[in Persian]. URL: <http://bsnt.modares.ac.ir/article-2-30718-fa.html>
- Blake, G., Schlichting, E., Zimmermann, U. (2022) Water recharge in a soil with shrinkage cracks, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 37, No. 5, pp.669-672.
- Bina, m. (2008) climatic analyses of Shavadan in dezful's houses, *honarhay ziba*, no.33. Doi: 10.22044/tuse.2013.123
- Burgess, W. A. (1995) Recognition of Health Hazards in Industry. New York: Wiley Ltd.
- Busch, J.F. (1992). A tale of two populations: thermal comfort in air-conditioned and naturally ventilated offices in Thailand, *Energy and Buildings* 18 (3/4) 235–249.
- Chlela, F., et al. (2009). A new methodology for the design of low energy buildings, *Energy Build*. 41 982–990.
- Cheesewright, R. (1968) “turbulent natural convection from a vertical plane surface”, *journal of heat transfer*, Transaction of ASME: 1-9
- Chen, Q. (1995) Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations, *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, Vol. 28, No. 3, pp.353-369.
- Chen, Q. (1996) “Prediction of room air motion by Reynolds-Stress models”, *Building and Environment*, no. 31: 233-244
- Corgnati, S.P. and M. Perino, (2013) CFD application to optimize the ventilation strategy of Senate Room at Palazzo Madama in Turin (Italy). *Journal of Cultural Heritage*. 14(1): p. 62-6. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.02.007>
- Dafa Alla, A.A. and Bets, P.V. (1996) “Turbulent natural convection in a tall cavity”, *Experimental heat transfer*, no. 9: 165-194
- Elder, J.W. (1965) Turbulence free convection in a vertical slot, *J. Fluid Mech*, report 23: 99-111
- Energy Consumption Guide 19 (1993). Energy Efficiency in Offices, Energy Efficiency Office/HMSO, London
- Energy Information Administration (1995). State Energy Data Report, 3–7 Tables.
- Finnegan, J.J., Pickering, C.A.C., Burge, P.S. (1994). The sick building syndrome: prevalence studies, *British Medical Journal* 289. 1573–1575. Doi: 10.1136/bmj.289.6458.1573
- Giel, p. w. and Schmidt, F. W. (1986) “all experiment study of high Rayleigh number natural convection”. In: an enclosure proceeding of the 8th International heat transfer conference, Vol. 4:1459-1464
- Ghermezi M, Nasrollahi F. (2019) The Effect of Building Typology on the Reduction of Energy Consumption in Esfahan Schools. *IJE*, no 22 (2) [in Persian]. URL: <http://necjournals.ir/article-1-1250-fa.html>

-
- Hassana, M.A., et al. (2007). Investigation of effects of window combinations on ventilation characteristics for thermal comfort in buildings. 209: 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.04.035>
- Izadyar, N., Miller, W., Rismanchi, B., Garcia-Hansen, V. (2020). A numerical investigation of balcony geometry impact on single-sided natural ventilation and thermal comfort, *Building and Environment Journal*. V. 177, 106847. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106847
- Jomehzadeh, F., Hussen, H.M., Calautit, J.K., Nejat, P., Ferwati, M.S. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): a review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy and Buildings*. 226, 110396. DOI:10.1016/j.enbuild.2020.110396
- Keshtkaran, p. et al (2017) Retrofitting school building envelope in order to enhance sustainable school architecture: Case study of Shiraz, Noavari-haye-Amoozeshi, no 16 (2) [in Persian]. Add: https://noavaryedu.oerp.ir/article_79116.html
- Koch-Nielsen, Holger, (2006) natural ventilation, translated by Ahmadinejad, m. first pub. Esfahan: nashr-e-khak [in Persian]
- Kompatscher, K., et al. (2017) Coupled heat, moisture and CFD modeling in the built environment. in 2017 COMSOL Conference, 18-20 October 2017, Rotterdam, The Netherlands.
- Loomans, M. and Mook, F. van (1995) Survey on measuring indoor airflows FAGO, report 95.25.W., Eindhoven University of Technology Sweden.
- Markatos, N.C. and Pericleous, K.A. (1984) "Laminar and turbulent natural convection in enclosed cavity", *Int. J. Heat mass transfer*, Vol. 27, no. 5: 755-772
- Martínez-Molina, Antonio, Isabel Tort-Ausina, Soolyeon Cho, and José-Luis Vivancos (2016). 'Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61: 70-85. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.018
- Nagano, Y., and Tagawa (1990) "An improved k-ε model for Boundary layer flows", *J. Fluid Engng Asme Trans*, 112: 33-39. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(96\)00061-0](https://doi.org/10.1016/0017-9310(96)00061-0)
- Olsen, D. A., Glicksman, L.R., and Ferm, H. M. (1990) "Steady state natural convection in an empty and partitioned enclosure at high Rayleigh numbers", *J. Heat Transfer, Trans. ASME* 112: 640-647
- Rahaei, o. (2013) Cultural Identity and Its Effects on Indigenous Methods of Natural Ventilation Passage of Metal Smiths in Dezful's Old Bazaar, *Bagh-e-nazar*, no 24:46-39. https://www.bagh-sj.com/article_2692.html
- Rahaei, o. (2014) Effects of Architectural Somatic Variables on Mixed Air Conditioning Systems' Efficiency in Industrial Buildings, *Armanshahr Architecture & Urban Development Journal* 12, 69-81. https://www.armanshahrjournal.com/article_33519.html
- Rahaei, o. (2021) Investigation of air flow pattern in the central courtyard in Qajar houses of Isfahan by CFD method, *Sustainable Architecture and city*, no. 9 (2). Doi: 10.22061/jsaud.2021.6012.1597
- Rahaei, o. and Azemati, h. (2020) Improving the Quality of Natural Ventilation in Classrooms of Mazandaran Province Based on the Position of the Openings Using CFD Method, *Journal of Iranian Architecture and Urbanism*, Vol. 11, no. 19. [in Persian]. Doi: <https://doi.org/10.30475/isau.2020.161257.1140>
- Rahsepar monfared, r. and azemati, s. (2021) Analysis of Wind Behavior in Natural Ventilation and Reduction of Energy Consumption in Residential Building Based on Vernacular Architecture: A Case Study of Effects of Dimensions and Layout of Opening on Natural Ventilation in Amol City, Iran, *armanshahr*, Vol. 14, no 35. Doi: 10.22034/aaud.2020.210648.2058
- Rudy, w. (1984) *The universities of Europe*, Fairleigh Dickinson University Press, London, Cranbury, pp.1100-1914, 1984.
- Schlichting, h., Truckenbrodt, e. (1979) *Aerodynamics of the Airplane*, McGraw-Hill Companies.
- Sribanurekha, V, SN Wijerathne, LHS Wijepala, and C Jayasinghe. 2016. 'Effect of Different Ventilation Conditions on Indoor CO2 Levels'.
- Shetabivash, H. (2015). Investigation of opening position and shape on the natural crossventilation. *Energy and Buildings* 93. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.053>
- Soflaei, F., Shokouhian, M., Zhu, W. (2017). Socio-environmental sustainability in traditional courtyard houses of Iran and China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V.69, 1147-1169.
- Sulaiman, R.B., et al. (2011), The environmental performance of air conditioning systems in heritage buildings in tropical climates. *Journal of Surveying, Construction and Property*, 2(1).
- Taher Tolou Del, m.s., Aminifar, z. (2016) Environmental variables, with emphasis on improving the quality of learning in educational spaces, *fannavari amoozesh*, Vol. 11, no 1[in Persian]. Doi: <https://doi.org/10.22061/tej.2016.549>
- Tavoosi, t et al. (2008) climate and architecture in new schools of Esfahan, *Geography and development*, Vol. 6, no. 11[in Persian]. Doi: 10.22111/gdj.2008.1618
- Teodosiu, C., V. Ilie, and R. Teodosiu, (2014) Appropriate CFD turbulence model for improving indoor air quality of ventilated spaces. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 10(4): p. 28-42. DOI: 10.2478/mmce-2014-0020

-
- Vassella, C.C., Koch, J., Henzi, A., Jordan, A., Waeber, R., Iannaccone, R., Charrière, R. (2021). From spontaneous to strategic natural window ventilation: improving indoor air quality in Swiss schools. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 234, 113746. DOI: 10.1016/j.ijheh.2021.113746
- Versteeg, H., Malalasekera, w. (1995) *An introduction to computational fluid dynamics, Finite Volume Method*, Essex, Longman Scientific & Technical, 1995.
- Wilcox, D. C. (1998) *Turbulence modeling for CFD*, DCW industries La Canada, CA.
- Zhao, R., Xia, Y. (1998). Effective non-isothermal and intermittent air movement on human thermal responses, *Roomvent* 2. 351–357.