

# تأثیر فرم و بازشوها در تهویه طبیعی خانه‌های حیاط مرکزی اقلیم گرم و مرطوب از منظر سرعت و عمر هوا به روش CFD

(مورد پژوهی: خانه دهدشتی، شهر بوشهر)

ندا قهرمان ایزدی<sup>1</sup>، ملیحه تقی پور<sup>2</sup>، حمید اسکندری<sup>3</sup> و خسرو موحد<sup>4</sup>

تاریخ دریافت: 1401/10/18

تاریخ پذیرش: 1402/03/16

(صفحات 165-181)

## چکیده:

**1-مقدمه:** شهر بوشهر در کرانه شمالی خلیج فارس با اقلیمی گرم و مرطوب، از بحرانی‌ترین اقلیم‌های ایران به شمار می‌رود. در طی سالیان متمادی، تهویه طبیعی یکی از روش‌های مرسوم تأمین آسایش حرارتی ساکنان بوده است. یکی از راه‌حل‌های طراحی که در ساخت خانه‌های سنتی بوشهر به فراوانی استفاده شده، استفاده از فرم ساختمان و محل قرارگیری بازشوها برای بهره‌مندی حداکثری از جریان بادهای غالب برای ایجاد کوران هوای طبیعی در فضای داخلی است. هدف پژوهش حاضر، بررسی بهترین عملکرد تهویه طبیعی در فضاهای داخلی از طریق انتخاب مناسب‌ترین گونه فرم هندسی در اتاق با توجه به موقعیت بازشوها آن است. این مقاله پس از گونه‌شناسی خانه‌های بوشهر، 9 گونه مختلف ترکیب اتاق و حیاط به شکل‌های مستطیل عمودی، مربع و مستطیل افقی را در 3 تراز ارتفاعی همکف، اول و دوم و در 4 ترکیب متفاوت بازشوها ورودی و خروجی، جمعاً به تعداد 108 حالت متمایز بررسی می‌کند.

**2-روش تحقیق:** در این پژوهش از یک روش ترکیبی، در راستای گونه‌شناسی فرم خانه‌ها و از روش کیفی با تکیه بر مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی بهره گرفته شده است. علاوه بر آن این پژوهش راهبردهای تحقیق تجربی و شبیه‌سازی را نیز درگیر می‌نماید. این مقاله روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) را جهت پیش‌بینی سرعت و عمر هوا در فضای داخلی اتاق در تراز ارتفاعی ناحیه استنشاقی به کار می‌گیرد. مقایسه بین اندازه‌گیری‌های تجربی و نیز شبیه‌سازی عددی، علاوه بر افزایش دقت محاسبات، خطاهای آزمایشگاهی را مشخص نموده و تأییدی بر روایی روش پژوهش نیز است.

**3-نتایج و بحث:** گونه‌ها برای انتخاب بهینه‌ترین فرم اتاق و بازشوها، بر اساس دو مؤلفه سرعت جریان هوا و عمر هوا تحلیل شدند.

**4-نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد، گونه‌های «اتاق مستطیل عمودی» با بازشوها غیر هم‌راستا برتری نسبی دارد و تهویه طبیعی مناسب‌تری را ایجاد می‌کند. به طور کلی، با افزایش ارتفاع سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد و عمر هوا بیشتر می‌شود.

**واژگان کلیدی:** فرم اتاق، تهویه طبیعی، بازشو، روش CFD.

این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان «بهبود بهره‌وری تهویه طبیعی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم گرم و مرطوب با اولویت‌بخشی به پارامترهای مؤثر فضاهای نیمه‌باز (مورد پژوهی: شهر بوشهر)» است که به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم و چهارم در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز انجام شده است.

<sup>1</sup>دانشجوی دکتری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

<sup>2</sup>دانشیار معماری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران، (نویسنده مسئول).  
Malihe.Taghipour@iau.ac.ir

<sup>3</sup>استادیار معماری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

<sup>4</sup>دانشیار معماری، گروه معماری و شهرسازی پایدار، دانشگاه کلمبیا، واشینگتن، آمریکا.

## 1- مقدمه

خانه‌های تاریخی نماد سازگاری انسان با محیط پیرامون و چگونگی بهره‌مندی بهینه از نیروهای طبیعی است (Zare et al., 1397). در معماری سنتی ایران اقلیم عامل مؤثری در جهت‌گیری، سازماندهی فضایی، شکل، نوع سازه، مصالح و عناصر و اجزای بنا بوده است (Zainlian & Akhot, 2016). در اقلیم‌های حاد، مانند اقلیم گرم و مرطوب، شرایط آب‌وهوایی به قدری وخیم و بحرانی است که، در صورت عدم توجه به مسائل اقلیمی استفاده از تأسیسات کنترل‌کننده، فضاهای داخلی ساختمان در اکثر مواقع سال ضرورت می‌یابد و در مواردی شرایط داخلی ساختمان‌های ناهماهنگ با اقلیم را نمی‌توان با استفاده از سیستم‌های مکانیکی با صرف هزینه معقول، در حد رضایت‌بخش به شرایط آسایش حرارتی رساند (Khodadadi et al., 2014). بوشهر دارای تعداد فراوانی از خانه‌های سنتی حیاط‌مرکزی است. ویژگی مهم این خانه‌ها درون‌گرایی آنهاست که تحت تأثیر اقلیم بوده و با آن سازگاری یافته‌است. جهت وزش باد خارج، شیوه گردش هوا در حیاط‌مرکزی و روش هوادهی مناسب به فضاهای داخلی خانه از عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری فرم، در این خانه‌ها است. در این پژوهش بررسی فرم خانه‌های بوشهر، مد نظر قرار گرفته است. با توجه به این‌که بیشتر خانه‌های شهر بوشهر مربوط به دوره زندیه و قاجار است، این خانه‌ها تحت تأثیر سبک‌های وارداتی بوده و همین امر تغییرات کالبدی متعددی را در الگوی شکلی و فرم بناها خانه‌های سنتی بوشهر ایجاد نموده است و در مواردی تناسب آن‌ها را نیز تغییر داده است. این تغییرات بر روی فرآیند تهویه طبیعی این خانه‌ها نیز تأثیراتی داشته که در این مقاله به بررسی این اثرات پرداخته می‌شود. بر این اساس بررسی مکانیزم تهویه هوای داخلی، در فرم‌های مختلف خانه‌ها از اهداف اصلی این پژوهش است. لذا در روند انجام تحقیق با مشخص نمودن متغیرهای مورد مطالعه تلاش می‌شود تا با ارائه فرم کالبدی خانه‌های تاریخی شهر بوشهر به بررسی عملکرد تهویه در داخل ساختمان‌های بوشهر پردازد و تلاش می‌کند تا از طریق شبیه‌سازی‌های عددی با روش دینامیک سیال محاسباتی میزان بهره‌مندی از وزش باد، جهت تهویه

طبیعی در فضاهای داخلی با تمرکز بر "فرم اتاق، فرم حیاط، محل بازشوها و طبقات"، را مورد بررسی قرار دهد. از این رو پرسش اصلی این پژوهش این است که الگوی گردش جریان هوای داخل متأثر از فرم کالبدی گونه‌ها و مکان بازشوهای اتاق چگونه بوده و تغییرات کالبدی این فضاها چگونه فرایند تهویه را تحت تأثیر قرار داده است. بنابراین، این پژوهش درصدد است که با شناخت فرم کلی خانه‌های تاریخی این بندر به ارزیابی عملکرد تهویه طبیعی در آن‌ها پردازد و به سوالات زیر پاسخ دهد:

- 1- خانه‌های تاریخی بندر بوشهر از نظر فرم کالبدی به چند گروه تقسیم می‌شوند؟
- 2- تأثیر فرم و موقعیت بازشوها در خانه‌های تاریخی بندر بوشهر بر عملکرد تهویه طبیعی آن‌ها چیست؟
- 3- نتایج این تحلیل‌ها در دستیابی به راهبردهای طراحی‌های اقلیمی و نیز مرمت آثار بسیار مؤثر است.

### 1-1- مروری بر پیشینه پژوهشی

پژوهش‌هایی که به مقوله تهویه طبیعی می‌پردازند در سال‌های اخیر افزایش یافته است. در زمینه‌ی موضوعات، مسایل و کاربردهای جریان‌ات باد و هوا پژوهش‌های متعددی انجام شده است. اما، پژوهش‌هایی که با استفاده از شبیه‌سازی CFD انجام شده‌اند، بیشتر به واسطه پیشرفت نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای رایانه‌ای طی دهه اخیر، توسعه یافته‌اند. جریان جابه‌جایی طبیعی و آشفته در محفظه اولین بار توسط الدر (Edler, 1965) و پس از آن توسط اسماید و گیل (Schmidth and Giel, 1986) بررسی شد. در این آزمایش‌ها از آب به جای هوا استفاده شد. اما در مورد جابه‌جایی طبیعی هوا در قالب تهویه طبیعی در معماری، الهینی و همکاران در بررسی معماری بومی عمان نشان می‌دهند که فرم‌های ساختمانی در مناطق مختلف به طور خاص به تأمین آسایش حرارتی، با توجه به توپوگرافی‌ها و اقلیم‌های منطقه‌ای مشخص مربوط می‌شود. در منطقه ساحلی، ساختمان‌های بومی برای دستیابی به آسایش حرارتی و استفاده از نسیم دریا و دارای بازشوهای بزرگ زیادی در دیوارهای رو به دریا هستند (Al-Hinai et al., 1993). اسکندری و رستمی با استفاده از روش‌های

ارتقای کیفیت تهویه طبیعی در کلاس‌های مدارس استان مازندران را بر اساس وضعیت بازشوها با روش CFD بررسی کرده و نتایج نشان دادند که ترکیب بندی صحیح بازشوها در راستای باد موافق تهویه طبیعی را تحت کنترل قرار داده و جریان مطلوبی ایجاد می‌کند (Rahaei & Azemati, 2020). رهسپار و عظمتی تأثیر ابعاد و جانمایی بازشو بر تهویه طبیعی را در کلاس آمل با استفاده از نرم‌افزار Envi-met بررسی و میزان مصرف انرژی سرمایشی را ارزیابی کرده‌اند (Rahesparmanfard & Azemati, 2021). جدول شماره 1 پارامترهای بررسی شده در پژوهش‌های گذشته را نمایش می‌دهد. برابر مطالعات انجام شده در پیشینه تحقیق با توجه به جدید بودن مباحث مربوط به تهویه طبیعی و روش CFD هنوز پژوهشی با این عنوان که تأثیر فرم اتاق، بازشوهای آن و فرم حیاط بر بهبود تهویه داخلی در اقلیم‌های گرم و مرطوب را مورد بررسی قرار دهد، انجام نشده است؛ بنابراین تکراری نبودن موضوع و برخورداری از نگاهی نو به فرم فضا، به ویژه فرم اتاق و حیاط و بهبود تهویه طبیعی ضرورت بررسی حاضر را موجه می‌سازد. لذا نقش فرم و استفاده حداکثری از جریان باد طبیعی برای بهبود تهویه در اقلیم‌های بحرانی مثل اقلیم گرم و مرطوب، پژوهشگران را بر آن داشت تا با نگاهی متفاوت به این موضوع پرداخته شود و دستاورد آن در قالب یک استراتژی جامع در توسعه پایدار به عنوان راه‌کاری مناسب برای آینده استفاده شود.

## 2-1- شرایط محیطی بوشهر و الگوی شکلی خانه‌ها

شبه جزیره بوشهر در ساحل شمالی خلیج فارس با ابعاد تقریبی 20 در 8 کیلومتر استقرار یافته است. به لحاظ اقلیمی، شهری گرم و مرطوب است که با وجود خلیج فارس طراوت می‌یابد. دمای خشک بندر بوشهر، حداکثر دما، حداقل دما و متوسط دمای مربوط به هر ماه در شکل 1 مشخص شده است. میانگین بالاترین دما در بازه زمانی از 10 تیر تا 9 شهریور برابر 36 درجه سانتی‌گراد است و از 11 دی تا 9 اسفند، در روز و شب نیاز به گرمایش است. طبق شکل 1، از 10 آبان تا 10 دی و از 11 اسفند تا 11 فروردین در شب‌ها نیاز به گرمایش دارد و در

تحلیلی، به ارزیابی نقش بازشوها از دیدگاه جریان باد در آب‌وهوای گرم 7 و مرطوب پرداختند. این تجزیه و تحلیل‌ها باعث می‌شوند، دهانه‌ها به گونه‌ای طراحی شوند که از نظر ترتیب، شکل و تعداد با پذیرش جریان هوا (باد) مطابقت داشته باشند (Eskandari & Rostami, 2015). معصومی و همکاران در پژوهش خود با روش CFD به کاربرد تهویه طبیعی به عنوان سیستم سرمایش غیر فعال در فضای باز شهر متراکم پرداخته و مکان، جهت، نسبت، توزیع و هندسه فضاهای باز را در طراحی بخش‌های مختلف اشکال مورد توجه قرار داده‌اند (Masoumi et al., 2016). محمدی و همکاران با قرار دادن فضاهای نیمه باز و تولید سایه و ایجاد تهویه متقاطع از طریق اجرای دهانه‌های مناسب از نظر ابعاد و تعداد، آسایش حرارتی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder را مورد پژوهش قرار داده‌اند (Mohammadi, 2018). سی‌ثا و همکاران اثرات طراحی معماری را بر تهویه غیر فعال مانند جهت، عمق اتاق، دهلیز و دودکش خورشیدی را در ساختمان‌های مدارس ارزیابی می‌کند و بر عوامل بالقوه مؤثر بر آسایش در ساختمان مدرسه به عنوان رطوبت نسبی، دما، سرعت جریان هوا، نویز، بو، هوای تازه و CO<sub>2</sub> تأکید دارند (Cucea, 2019). کومار و همکاران با روش (CFD) و با آزمایش تونل باد به مطالعه اثر تهویه فضاهای خالی با اندازه‌های مختلف، بادگیر و اندازه پنجره پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد فضای خالی می‌تواند تهویه طبیعی را در واحدهای بادگیر ساختمان افزایش دهد. کوچکترین اندازه فضای خالی بیشترین سرعت باد را نشان داد. تهیه بادگیر و پنجره با اندازه بزرگتر باعث افزایش تهویه طبیعی در واحدهای بادگیر ساختمان شد (Kumar et al., 2020). نیک‌قدم با کمک نرم‌افزار دیزاین‌بیلدر طرح و شکل کلی ساختمان، تشکل اجزاء ساختمان، مشخصات جزئیات ساختمان‌های بوشهر را از منظر دما، رطوبت نسبی، جریان هوا بررسی کرده‌است (Nikghadam, 2014). سلیقه و سعادت‌جو به بررسی فرم و شکل کلی بدنه و میزان تخلخل حجمی ساختمان‌های مناطق گرم و مرطوب، به کمک نرم‌افزار Ecotec 2011 می‌پردازند (Saligheh & Saadatjou, 2020). رهایی و عظمتی



تاریخی و معماری سنتی و بومی غنی است. در آغاز کار باید تعدادی از ساختمان‌های مهم بومی این منطقه را به صورت هدفمند انتخاب نمود تا بتوان از میان آن‌ها گونه‌شناسی فرمی را برای تهویه در نظر گرفت و شرایط آن‌ها را با معیارهای از پیش تعیین شده که براساس هدف و سؤال اصلی پژوهش تدوین شده‌اند، سنجید. بررسی کتابخانه‌ای انجام شده نشان می‌دهد که براساس آمار اداره اسناد سازمان میراث فرهنگی استان بوشهر، تعداد 34 عمارت ثبت شده در بافت تاریخی بوشهر وجود داشته که 2 عمارت جعفری و رحیم‌پور تخریب شده و هم‌اکنون 32 عمارت ثبت شده و سالم که اغلب آن‌ها دارای کاربری هستند، وجود دارد که در جدول 1 آورده شده است. از میان این 32 عمارت، اجازه دسترسی از سوی مالک یا بهره‌بردار به 22 عمارت به دلیل نوع کاربری و شرایط استفاده در طول سال وجود ندارد.

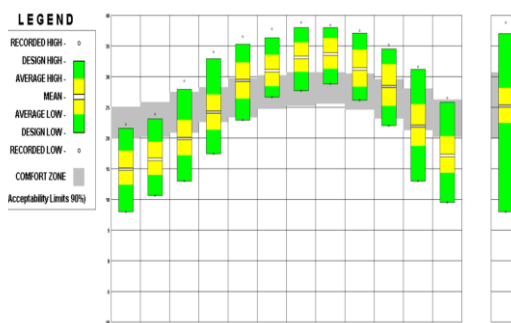
### 3-1- گونه‌شناسی فرمی

جدول 1 و آمار اداره اسناد سازمان میراث فرهنگی استان بوشهر، موید این امر است که فرم کلی هندسی مربع و مستطیل (در دو حالت افقی و عمودی) در اکثر اتاق‌ها و حیاط‌ها غالب است (جدول 2).

با این‌که خانه‌ها در کلیات شباهت‌های زیادی به هم دارند، اما در واقعیت نمی‌توان ابعاد دقیقی برای اتاق یا حیاط در نظر گرفت، برای حذف متغیرهای مداخله‌گر (ابعاد مختلف) در این نوشتار، مساحت اتاق و حیاط در تمامی گونه‌ها یکسان و مطابق با ابعاد عمارت دهدشتی در نظر گرفته شده است. جدول شماره 3 ویژگی‌های مدل‌های غالب مسکونی در بوشهر را نشان می‌دهد. این ویژگی‌های در تمامی فرم‌ها یکسان در نظر گرفته شد.

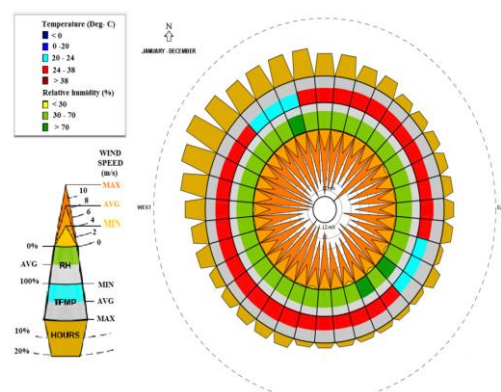
تمامی گونه‌ها به صورت تهویه دوطرفه، در 3 تراز ارتفاعی طبقه اول، دوم و سوم و در 4 حالت مختلف بازشوی‌های ورودی و خروجی، طبق جدول 4 شبیه‌سازی شدند.

روزهای این ماه‌ها شرایط آسایش برقرار است. در شب‌ها و روزها از 10 تیر تا 9 شهریور نیاز به سرمایش و در شب‌های دیگر ماه‌های سال آسایش برقرار و روزها هوا گرم است. میانگین رطوبت نسبی در بندر بوشهر به طور متوسط بین 60٪ تا 70٪ است.



شکل 1- نمودار دما در ماه‌های سال در شهر بوشهر (نرم افزار climate consultant)

Fig. 1- Temperature chart in the months of the year in Bushehr city (climate consultant software)



شکل 2- متوسط سرعت و جهت بادهای محلی بوشهر در کل سال

Fig. 2- Wind rose of Bushehr (Source: Climate consultant software, version 6)

جهت بررسی جنبه‌های ریخت‌شناسی خانه‌های بوشهر، بررسی خانه‌ها در مناطقی انجام شده که دارای پیشینه

جدول 1- معرفی عمارت‌های ثبت‌شده واقع در بافت تاریخی بوشهر (اداره اسناد سازمان میراث فرهنگی استان بوشهر)  
 Tab. 1- Introduction of Registered mansions located in the historical context of Bushehr (Department of Cultural Heritage Organization of Bushehr Province)

نام خانه و پلان	آسیایی	تجار تخانه ایرانی	دهدشتی	علوی	حاج رئیس	طاهری
محلّه کوثی سالم مسکونی	محلّه بهیپانی سالم اداری	محلّه شتیدی سالم فرهنگی اداری	محلّه بهیپانی سالم مسکونی	محلّه شتیدی سالم فرهنگی اداری	محلّه بهیپانی سالم فرهنگی اداری	محلّه بهیپانی سالم اداری
نام خانه و پلان	رفیعی	جعفری	کمندى	گلشن	مرادی	امیریه
محلّه کوثی سالم مسکونی	محلّه بهیپانی تخریب شده	محلّه بهیپانی سالم بدون کاربری	محلّه بهیپانی سالم اداری	محلّه بهیپانی سالم اداری	محلّه بهیپانی سالم مسکونی	محلّه کوثی سالم اداری
نام خانه و پلان	رشیدی	جان نثار	طیب	هفته	آدین	نجفی
محلّه کوثی سالم اقامتى	محلّه کوثی سالم مسکونی	محلّه بهیپانی سالم اداری	محلّه کوثی سالم فرهنگی اداری	محلّه کوثی سالم مسکونی	محلّه کوثی سالم مسکونی	محلّه کوثی سالم بدون کاربری
نام خانه و پلان	نوذری	رستمی				
محلّه کوثی سالم اداری آموزشی	محلّه کوثی سالم مسکونی	محلّه کوثی سالم مسکونی				

جدول 2- الگوهای غالب مسکونی در خانه های بوشهر برای شبیه سازی  
 Tab. 2 - Dominant residential patterns in Bushehr houses for simulation

گونه	1	2	3	4	5	6	7	8	9
پلان									
اتاق	مستطیل عمودی	مستطیل عمودی	مستطیل عمودی	مربع	مربع	مربع	مستطیل افقی	مستطیل افقی	مستطیل افقی
حیاط	مربع	مستطیل عمودی	مستطیل افقی	مربع	مستطیل عمودی	مستطیل افقی	مربع	مستطیل عمودی	مستطیل افقی

جدول 3- ویژگی‌های مدل‌های غالب مسکونی در بوشهر  
 Tab. 3- Features of the dominant residential models in Bushehr

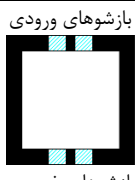
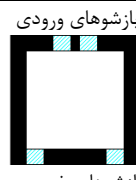
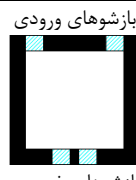
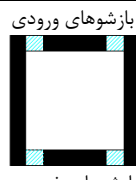
مساحت هر طبقه بدون حیاط	مساحت اتاق‌ها	ارتفاع اتاق‌ها	مساحت حیاط	ضخامت توده پیرامون حیاط	مساحت بازشوها	ابعاد پنجره	فاصله پنجره از کف
تقریباً 560 مترمربع	تقریباً 20 مترمربع	4 متر	تقریباً 150 متر	7 متر (از سه طرف)	40 درصد از سطح نما (4.5 مترمربع)	80 در سانتی‌متر	20 سانتی‌متر

در خانه‌های بررسی شده بین 25٪ تا 35٪ مساحت زمین به حیاط اختصاص دارد. در خانه‌های بررسی شده بین 15٪ تا 17٪ سطح زیربنا به حیاط اختصاص دارد.



جدول 4- حالات مختلف بازشوهای ورودی/خروجی در گونه اتاق مربع

Tab. 4- Different modes of input/output openings in the square room type

حالت	الف	ب	ج	د
نوع بازشو	بازشوهای ورودی هوا در وسط بازشوهای خروجی هوا در وسط	بازشوهای ورودی هوا در وسط بازشوهای خروجی هوا در طرفین	بازشوهای ورودی هوا در طرفین بازشوهای خروجی هوا در وسط	بازشوهای ورودی هوا در طرفین بازشوهای خروجی هوا در طرفین
پلان				
	بازشوهای ورودی بازشوهای خروجی	بازشوهای ورودی بازشوهای خروجی	بازشوهای ورودی بازشوهای خروجی	بازشوهای ورودی بازشوهای خروجی

#### 1-4- چارچوب نظری پژوهش

با توجه به آنچه در قسمت‌های قبل بحث شد از مؤلفه‌های کالبدی خانه‌های اقلیم گرم و مرطوب، فرم فضا در این پژوهش مد نظر است. با توجه به گونه‌شناسی انجام شده فرم مربع، مستطیل عمودی و مستطیل افقی برای این پژوهش مبنای ارزیابی قرار گرفته است. پس از بررسی‌ها و انجام مطالعات بر روی تهویه طبیعی آنچه واضح به نظر می‌رسد این است که، می‌توان معیارهای متعددی را مرتبط با کیفیت تهویه مطرح ساخت. ممکن است بر حسب شرایط محلی و تفاوت‌های موجود، به معیارهای دیگری نیز به توان اشاره کرد. اما سعی بر این بوده تا با بررسی‌ها و مطالعات انجام شده به اصلی‌ترین معیارها اشاره شود. با توجه به محدودیت‌های پژوهش و گسترده بودن معیارها، سرعت هوا و عمر هوا را می‌توان به عنوان مرتبط‌ترین معیار نام برد. شکل 3 چارچوب نظری پژوهش را نشان می‌دهد.

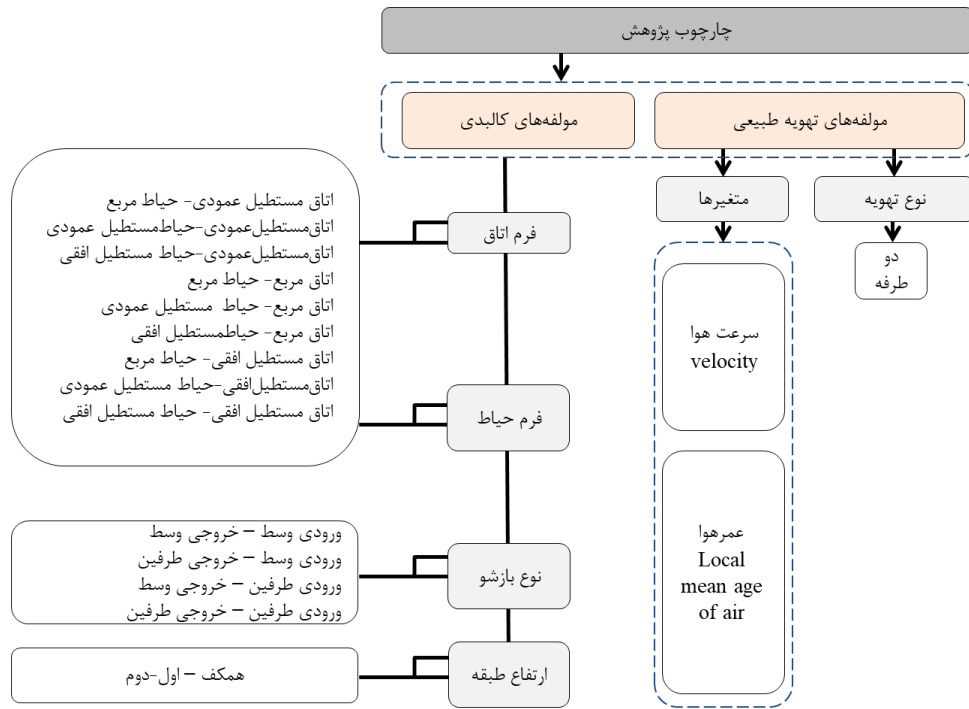
#### 2- روش تحقیق

روش تحقیق در این پژوهش با توجه به ماهیت بین رشته‌ای یک روش ترکیبی است. از آن جا که هدف، شناسایی الگوی جریان هوای داخل خانه‌هاست، فرم اتاق، فرم حیاط، موقعیت بازشوها و طبقات به عنوان متغیرهای مستقل و کیفیت جریان هوای داخل اتاق شامل دو مؤلفه سرعت هوا (Velocity)، عمر هوا (Local Mean Age of Air) به عنوان متغیر وابسته تحقیق

شمرده می‌شود. نخست به روش کیفی با گردآوری اطلاعات از منابع کتابخانه‌ای و نیز برداشت میدانی از خانه‌های بوشهر، گونه‌شناسی خانه‌ها در این اقلیم تکمیل و پارامترهای مؤثر بر کیفیت تهویه طبیعی هوای داخل اتاق شناسایی شد. سپس به منظور تحلیل داده‌ها و نیز مداخله در معماری شبیه‌سازی‌هایی با روش دینامیک سیال محاسباتی (CFD) و با کمک نرم‌افزار Autodesk CFD 2018 انجام شد. انجام آزمایش‌های تجربی نیز جهت اعتباربخشی به شبیه‌سازی‌های عددی و نیز فراهم کردن داده‌های اولیه حائز اهمیت است. شکل 4 فرآیند تحقیق را نشان می‌دهد.

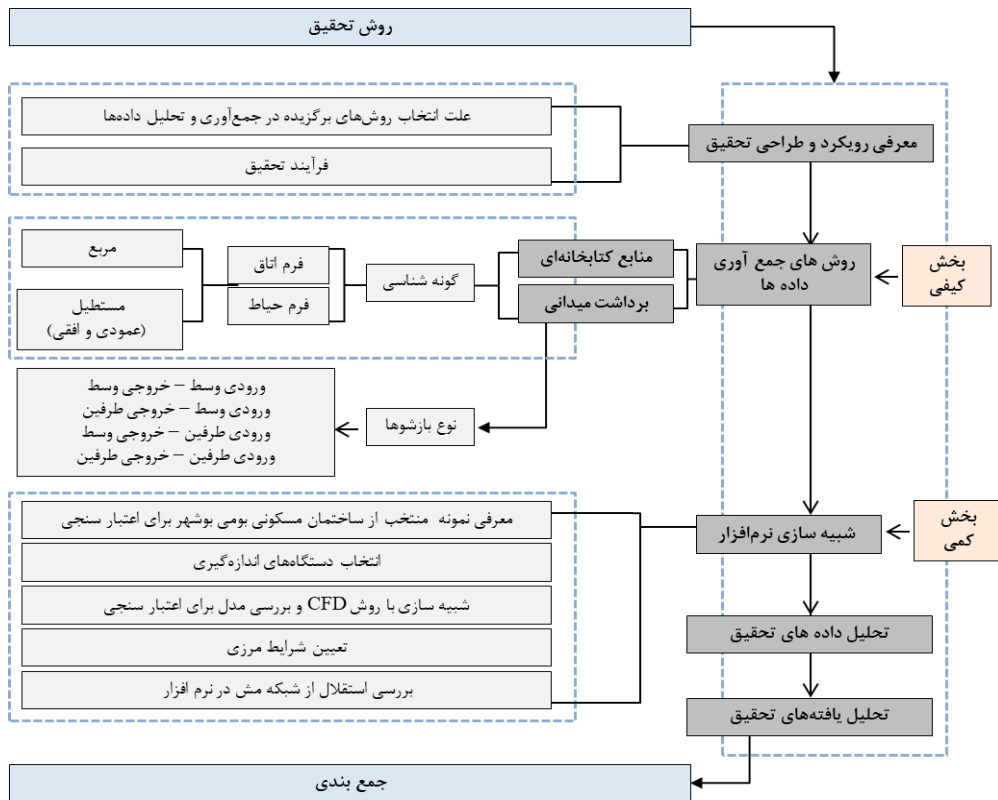
روایی برنامه با انجام پروژه‌های مشابه و نیز تطبیق با نتایج تجربی اثبات شد. جامعه آماری خانه‌های بافت تاریخی بوشهر است و با توجه به گونه‌شناسی انجام شده، فرم غالب خانه‌ها در بوشهر 9 گونه در 3 تراز ارتفاعی (اول، دوم و سوم) انتخاب شد که از نظر بازشوهای ورودی و خروجی و نوع تهویه دارای 4 حالت مختلفند. این 108 گونه با کمک دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD و با استفاده از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018 شبیه‌سازی شدند. ابتدا حجم سه‌بعدی تمامی گونه‌ها در محیط اتوکد ساخته شد، پس از بررسی استقلال از شبکه و تعیین شرایط مرزی با نظر گرفتن شبکه مش اتوماتیک در تونل باد (با ابعاد استاندارد) قرار گرفته و پس از اجرای نرم‌افزار، کانتورها استخراج، دسته‌بندی و به صورت جدول جهت مقایسه و انتخاب گونه بهینه گزارش شد.





شکل 3-چارچوب نظری پژوهش

Fig. 3- The theoretical framework of the research



شکل 4- مراحل تحقیق

Fig. 4- research process


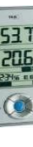

استخراج و نمایش داده‌ها در قالب تصاویر گرافیکی به صورت برش افقی (پلان) از ارتفاع 150 سانتیمتری از کف اتاق که ناحیه استنشاقی ساکنان را پوشش می‌دهد، انجام شده است.

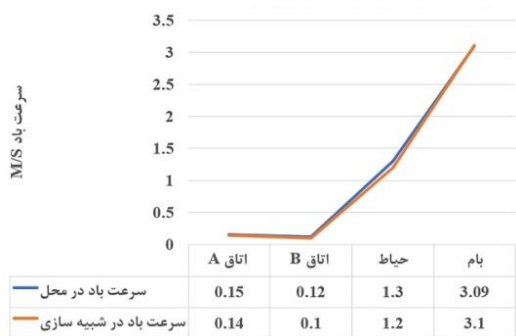
### 1-2- اعتبار سنجی<sup>1</sup>

برای برداشت میدانی داده‌ها و اعتبارسنجی نرم‌افزار عمارت دهدشتی در نظر گرفته شد که پس از تطبیق داده‌های تجربی برداشت شده توسط دستگاه دقیق دیجیتال (جدول 5) با شبیه‌سازی صحت نرم‌افزار تأیید شد. به منظور برداشت اطلاعات دقیق جریان هوا از دستگاه بادسنج دیجیتال هات‌وایر استفاده شده است که، دارای پاسخ فرکانس بسیار بالاست و تقریباً برای مطالعه

دقیق جریان‌های متلاطم یا هر جریانی که نوسانات سرعت سریع در آن استفاده شود به کار می‌روند و سنسورهای آن سرعت و دما را اندازه می‌گیرند. اطلاعات اقلیمی در روز 30 شهریورماه 1400 و در ارتفاع 1.5 متر (برای فرد ایستاده در ناحیه استنشاقی) در 4 فضا (دو اتاق واقع در طبقه دوم، حیاط و بام) اندازه‌گیری شدند. جدول 5 به معرفی دستگاه‌های مورد استفاده می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد، که بین داده‌های مدل برداشت شده (عمارت دهدشتی- شکل 5) و مدل شبیه‌سازی شده، عدم انطباق اندکی (حدود 0.5 درصد) دیده شد که طبق استاندارد اشری کمتر از 10 درصد و قابل قبول است (شکل 6).

جدول 5- اطلاعات دستگاه‌های اندازه‌گیری برای گردآوری داده‌های اقلیمی  
Tab. 5- Information of measuring devices for collecting climate data

رزلوشن	دقت اندازه‌گیری	محدوده اندازه‌گیری	فاکتور	شکل دستگاه	نوع دستگاه
0.1 °F / 0.1 °C	±0.9 °F / ±0.5 °C	-4° to 140 °F / -20 to +60 °C	دما		Hotwire anemometer. testo 405i
1.97 fpm / 0.01 m/s	± (19.7 fpm + 5 % of mv) (0 to 394 fpm) / ± (0.1 m/s + 5 % of mv) (0 to 2 m/s) ± (59.1 fpm + 5 % of mv) (394 to 2953 fpm) / ± (0.3 m/s + 5 % of mv) (2 to 15 m/s)	0 to 5906 fpm / 0 to 30 m/s	باد		Klima logger
		0% 100 %	رطوبت نسبی		



شکل 6- مقایسه سرعت هوا در شبیه‌سازی و آزمون تجربی برای اعتبار سنجی

Fig. 6- Comparison of air speed in simulation and experimental test for validation

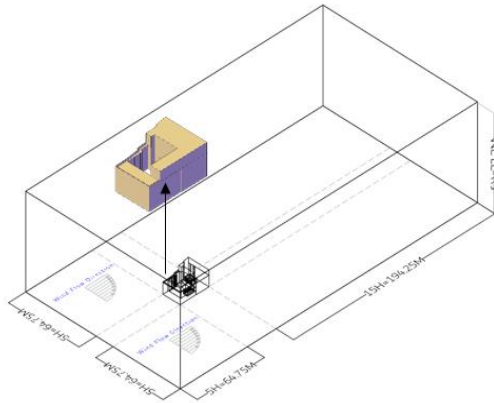


شکل 5- فضای داخلی عمارت دهدشتی

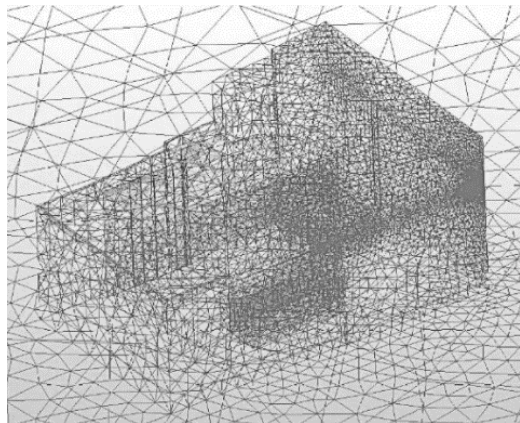
Fig. 5- Interior space of DEHDASHTI home



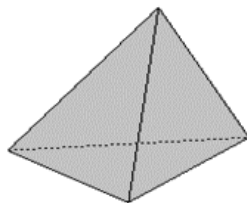
(Tetrahedral) و جهت گسسته‌سازی سطوح هندسه از المان‌های مثلثی (Triangular) استفاده شده و در نواحی دارای گرادیان شدید، تراکم بالاتری از شبکه ایجاد شده است.



شکل 8- تونل باد  
Fig. 8- Wind Tunnel



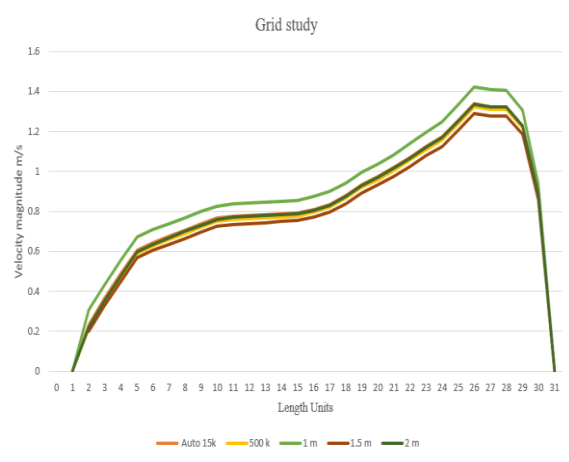
شکل 9- شبکه مش  
Fig. 9- Grid



شکل 10- المان چهار وجهی  
Fig. 10- tetrahedral element

## 2-2- بررسی استقلال از شبکه<sup>2</sup>

برای بررسی عدم وابستگی حل به مش، پس از ساختن مدل‌ها شبکه‌بندی آن‌ها به طور خودکار انجام شد. در گام اول تعداد شبکه به طور خودکار پانصد هزار سلول محاسباتی است، در گام بعدی هفتصد و پنجاه هزار سلول محاسباتی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته و در هر گام شبکه ریزتر می‌شود. طبق شکل 7 نتایج نشان می‌دهد که متغیر سرعت هوا در 2 میلیون گره به بالا تغییرات محسوسی ندارد، از این رو تعداد 2 میلیون گره برای شبکه‌بندی در نظر گرفته شده است. با توجه به این که هدف انتخاب بهینه‌ترین اندازه برای شبکه‌بندی است، باید تعداد شبکه یکی مانده به آخر را برای ارائه نتایج شبیه‌سازی انتخاب نمود تا هزینه محاسباتی افزایش پیدا نکند.



شکل 7- استقلال از شبکه  
Fig.7- Grid Study

## 2-3- شرایط مرزی معادلات حاکمه

جهت انجام آزمون‌ها، کلیه مدل‌ها با شرایط مرزی یکسان و برابر شرایط مرزی با شرایطی که برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شده و بر اساس استاندارد تونل باد (شکل 8) در مقایسه با یکدیگر ایجاد شده‌اند.

در این روش ابتدا دامنه محاسباتی تعیین و پس از آن جهت حل عددی معادلات حاکمه عملیات گسسته‌سازی آغاز می‌شود. در این مطالعه، دامنه محاسباتی یک ساختمان سه طبقه محصور در حیاط خانه است که در معرض جریان هوای پایا قرار گرفته است. جهت گسسته‌سازی حجم دامنه از المان‌های شبکه چهاروجهی



$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 S \varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (4)$$

$$P_k = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (6)$$

ویسکوزیته سینماتیکی آشفته نیز از روابط (7) و (8) به دست می‌آید.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU}{\varepsilon}} \quad (8)$$

سایر پارامترها نیز توسط روابط (9) تا (14) به دست می‌آیند.

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \bar{\Omega}_{ij} \bar{\Omega}_{ij}} \quad (9)$$

در معادله زیر  $\bar{\Omega}_{ij}$  تانسور نرخ متوسط چرخش است که به سرعت زاویه ای  $(\omega_k)$  وابسته است. نمادهای  $A_0$  و  $A_s$  ثابت‌های معادله است.

$$\bar{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (10)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (11)$$

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos(\phi) \quad (12)$$

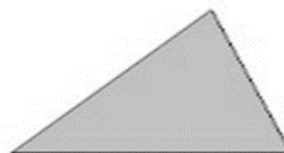
$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S^3}, \quad (13)$$

$$\bar{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

ثابت‌های این مدل که ضرایب تجربی مدل دو معادله‌ای k-ε هستند، مطابق رابطه (15) به دست می‌آیند.

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (15)$$

جهت حل این معادلات نیاز است تا شرایط مرزی تعیین شود. شرایط مرزی دریاچه‌ها بدون محدودیت و آزاد در نظر گرفته شده تا در شرایط پرفشار یا کم‌فشار حاکم



شکل 11- المان مثلثی  
Fig. 11- Triangular element

پس از گسسته‌سازی دامنه، معادلات حاکم بر جریان هوای تراکم‌ناپذیر، پایا و آشفته به صورت عددی و به روش تکرار حل شد. این معادلات عبارتند از معادله پیوستگی، مومنتوم و معادلات مدل آشفته‌گی k-ε که در زیر آورده شده است (wilcox, 2006).

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم برای جریان آشفته به همراه ویسکوزیته آشفته  $(v_t)$  در معادله زیر آمده است.

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + v_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

در معادلات فوق  $u_i$  سرعت سیال،  $\rho$  دانسیته سیال و  $p$  فشار است.

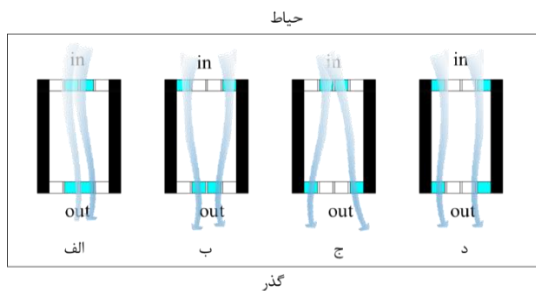
با توجه به عدد رینولدز بالای 4.5 میلیون در این شبیه‌سازی، جریان آشفته بوده و مدل آشفته‌گی به کار رفته، مدل دو معادله‌ای k-ε است. معادلات این مدل در روابط (4) تا (6) آورده شده است. انرژی جنبشی آشفته با نماد k تابعی از زمان است که از معادله زیر به دست می‌آید. نماد k یکی از پارامترهای مهم این معادله  $P_k$  است که تولید انرژی جنبشی آشفته به علت گرادیان‌های سرعت متوسط را ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که در این معادله نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته با نماد ε نیز وجود دارد. بنابراین با توجه به اضافه شدن یک متغیر جدید، نیاز به حل یک معادله دیگر اجتناب‌ناپذیر است.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{P_k}{\rho} - \varepsilon \quad (3)$$

این معادله جدید به صورت زیر به مجموعه معادلات اضافه شده و معادله اِپسیلون نامیده می‌شود.

تا 170 سانتیمتر از کف در حرکت است و در ارتفاعهای بالاتر، به طور محسوسی جریان هوا کاهش می‌یابد. در تراز ارتفاعی یک سوم پایینی اتاق در سمت بازشوها سریع‌ترین و در فضای چسبیده به زیرسقف، با اختلاف قابل ملاحظه‌ای کندترین جریان هوا را نشان می‌دهد. افزون بر آن، سرعت نقطه‌ای جریان هوا در محل بازشوهای ورودی و خروجی در بالاترین حد هر گونه قرار دارد و نیز در بیشتر حالت‌ها سرعت نقطه‌ای در بازشوهای خروجی کمی بیشتر از ورودی است.

موقعیت بازشوی اتاق نسبت به جهت وزش باد، تأثیر زیادی در وضعیت تهویه طبیعی در داخل آن اتاق دارد. مهم‌ترین اصل ایجاد شرایط تهویه مؤثر و کارآمد ابتدا این است که بازشوها در دو سمت رو به باد و پشت به باد جانمایی شوند. اگر پنجره‌های اتاقی در دیوارهای روبروی هم تعبیه شده باشند وضعیت تهویه زمانی مطلوب است که هوا در داخل اتاق جریان یابد، نه اینکه به طور مستقیم پس از ورود از پنجره رو به باد، از پنجره پشت به باد خارج شود. از همین روی، هر چند بازشوها در حالت‌های هم‌راستای «الف» و «د»، سرعت جریان هوای نسبتاً بیشتری را در مسیر حرکت باد نشان دادند، اما بازشوها در حالت‌های غیرهم‌راستای «ب» و «ج» به دلیل درگیر کردن فضای بیشتری از اتاق بهینه‌تر هستند.



شکل 12- نحوه گردش باد در بازشوی مختلف اتاق نسبت به جهت باد

Fig. 12- Wind circulation in different openings of the

در تمامی گونه‌ها سرعت جریان باد در مسیر ورود باد بیشترین مقدار و نزدیک به 3m/s و در پیرامون آن با افت شدیدی همراه می‌شود. در حالت‌های هم‌راستای «الف» سرعت جریان باد در یک‌سوم میانی اتاق بیشترین و در

بر آنها عملکرد صحیح دریچه‌ها مشخص شود. سیال مورد استفاده هواست. در مطالعه حاضر جریان هوا به صورت پایاست. به دلیل ورود هوا از محیط به داخل ساختمان، پس از گذشت زمان، دمای اتاق برابر با دمای محیط اطراف خواهد شد و به دلیل عدم حضور منبع حرارتی در ساختمان و مشخص بودن نتیجه توزیع دما، از حل معادله انرژی صرف نظر شده است. علاوه بر این، تمرکز مطالعه حاضر روی تهویه هوای ساختمان و میزان تازگی جریان هوای ورودی است. سیال جریان باتوجه به سرعت ورودی 7.6 متر بر ثانیه (سرعت باد در محل) غیر قابل تراکم<sup>3</sup> فشار 101325 پاسکال<sup>4</sup> است. در انتخاب مدل لزجت<sup>5</sup> باتوجه به شرایط جریان؛ از مدل آشفتگی k-epsilon استفاده شد. معادلات پیوستگی<sup>6</sup>، ممنوم<sup>7</sup> و k-epsilon، حاکم بر جریان بودند و محدوده خطا برای حل این معادلات 1e-04 و تعداد تکرار معادلات 5000 در نظر گرفته و پس از 1000 تا 1500 تکرار همگرا شد. در آنالیز مدل‌ها از بردارهای سرعت، فشارهای دینامیکی و اختلاف فشار ایجاد شده در اطراف و داخل مدل استفاده شد. زاویه برخورد باد به ساختمان زاویه عمود و به صورت 90 درجه است. مصالح بنا آجر و دمای محیطی 33.2 سانتی‌گراد (دمای برداشت‌شده در محل) در نظر گرفته شد.

Solution mode: steady state	Boundary conditions:
Compressibility: incompressible	Velocity magnitude: 7.6 (base on energy plus's data)
Viscose Model: turbulent. k-epsilon	Temperature: 33.2 c
Space: 3D	Pressure 0 p
Operating Pressure: 101325	Iteration to run: 5000
P	Mesh: approximate element count: 2m
	Material: brick

### 3- نتایج و بحث

این مقاله 9 گونه مختلف ترکیب بازشو، اتاق و حیاط، جمعا به تعداد 108 حالت متمایز را شبیه‌سازی کرده است. تحلیل داده‌ها پیرامون محل قرارگیری بازشوها نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن ابعاد بازشوها (80\*160 سانتیمتر) و نیز ارتفاع 20 سانتیمتری آن از کف، الگوی متوسط کیفیت جریان هوا در فضای اتاق در فاصله بین بازشو ورودی به سمت بازشو خروجی در ارتفاعی بین 20

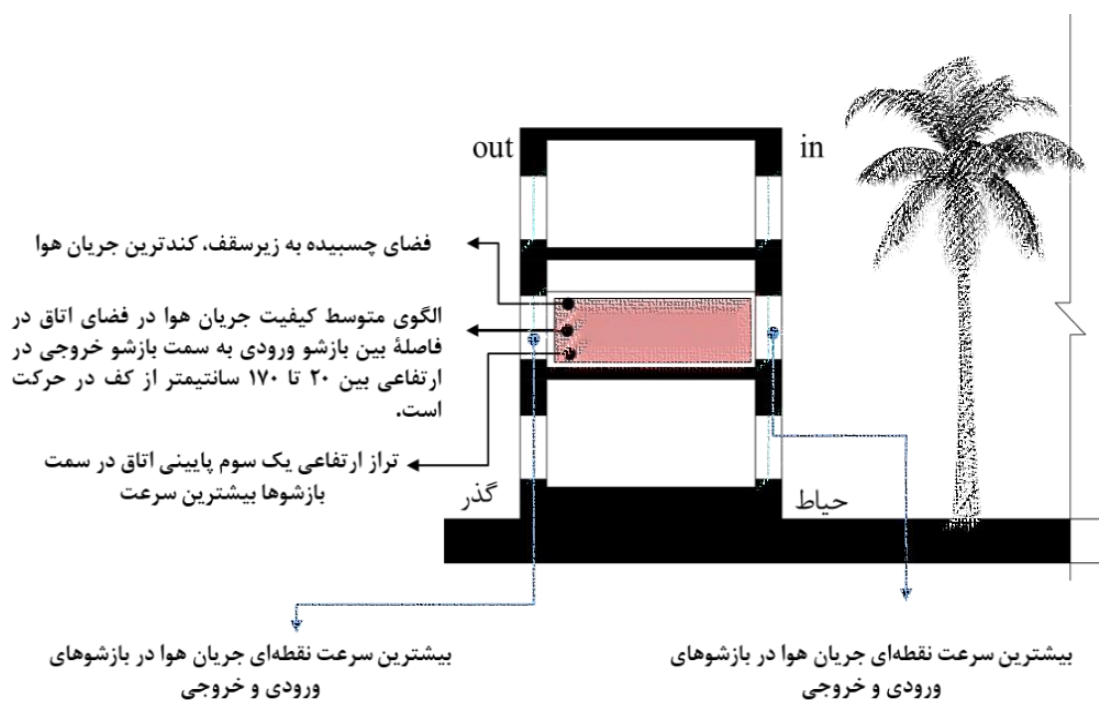
گردش هوا خارج می‌شود و کیفیت هوای پایین‌تری پیدا می‌کند. این موضوع در حالت‌های غیر هم‌راستا تا حدودی جبران می‌شود. این مشخصه‌ها در گونه‌های اتاق مربع در حالت بینابینی قرار دارد.

#### سرعت جریان هوا:

- طبق جدول 6 بهینه‌ترین الگوی سرعت جریان هوا مربوط به گونه‌های اتاق مستطیل عمودی و با کمی اختلاف پس از آن گونه‌های اتاق مربع و با اختلاف نسبتاً بیشتر، گونه‌های اتاق مستطیل افقی است. کشیدگی و طول با سرعت جریان هوا مرتبط و هرچه فرم کشیده‌تر و طول آن از نقطه ورود تا خروج هوا بیشتر باشد، سرعت جریان هوای خروجی از بازشوها نیز بیشتر است. در همین راستا، جریان هوا با عرض گونه رابطه معکوس دارد. با افزایش عرض گونه و تبدیل فرم از حالت مستطیل عمودی به مربع و در نهایت مستطیل افقی، سرعت جریان هوا به صورت کلی کاهش می‌یابد.

کناره‌ها کمترین مقدار است و در حالت «د»، در مسیر جریان باد در ضلع کناری اتاق بیشترین و در فضای یک‌سوم میانی اتاق در کمترین مقدار خود است. در حالت‌های غیر هم‌راستای «ب»، مرکز فضای مثلثی شکل بین بازشوهای ورودی و خروجی کمترین سرعت را دارد ولیکن پیرامون آن سرعت افزایش می‌یابد. برعکس آن در حالت «ج» فضای پیرامون کمترین سرعت و در این فضای مثلثی بیشترین سرعت ثبت شده است.

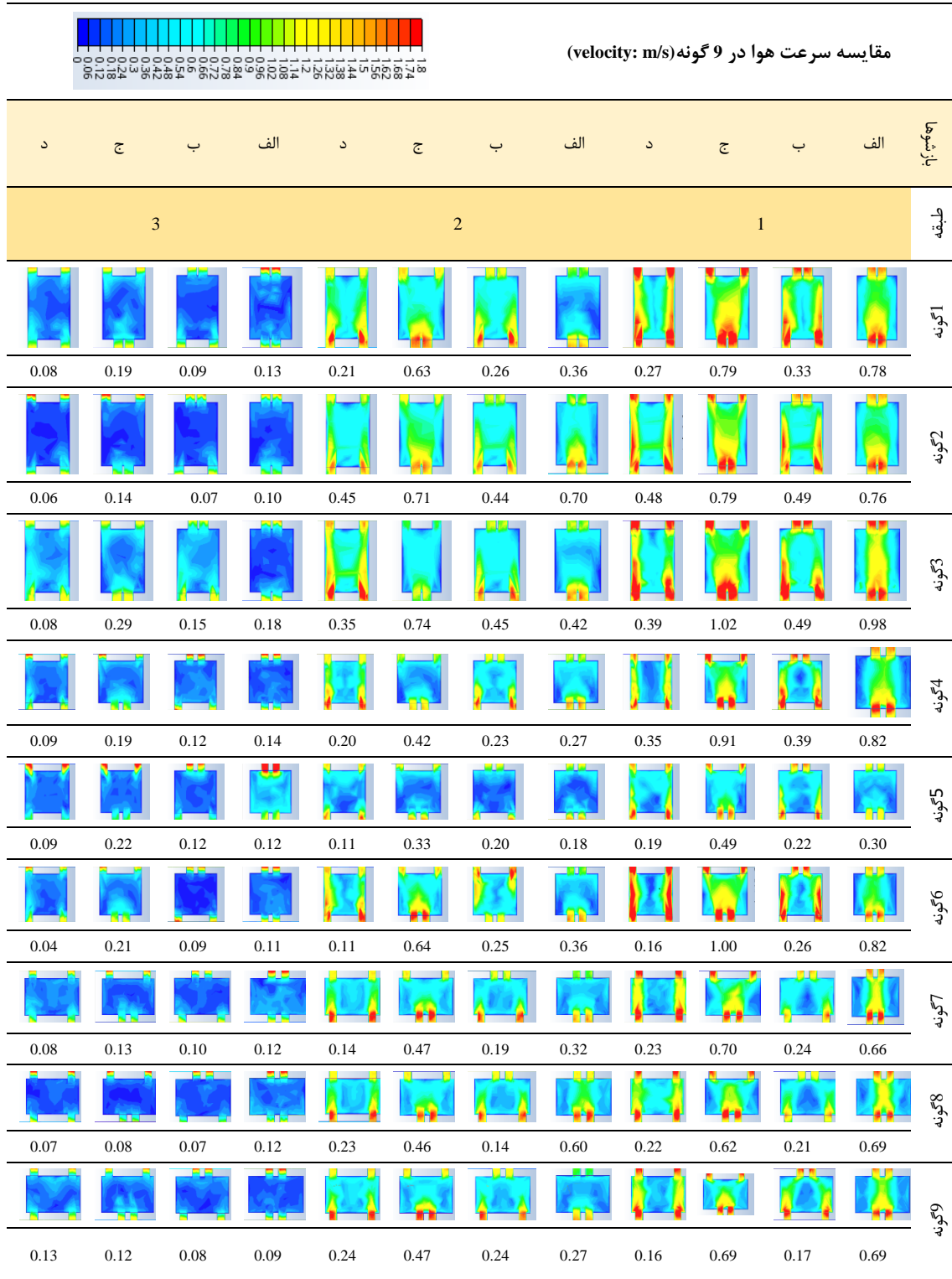
در گونه‌های اتاق مستطیل عمودی در تمامی حالت بازشوهای هم‌راستا و غیرهم‌راستا به دلیل کوتاه‌تر بودن اضلاعی که بازشوها در آن قرار دارند نسبت به اضلاع در مسیر جریان باد، تقریباً کل فضا در چرخه گردش باد در قرار می‌گیرد و کیفیت تهویه بهتری را تأمین می‌کند. در مقابل آن در گونه اتاق‌های مستطیل افقی به دلیل قرارگیری بازشوها در ضلع بلندتر عمود بر مسیر باد و کوتاه‌تر بودن اضلاع هم‌راستا با مسیر حرکت باد، در حالت بازشوهای هم‌راستا، تقریباً نیمی از فضا از چرخه



شکل 13- دیاگرام توزیع هوا

Fig. 13- Air distribution diagram

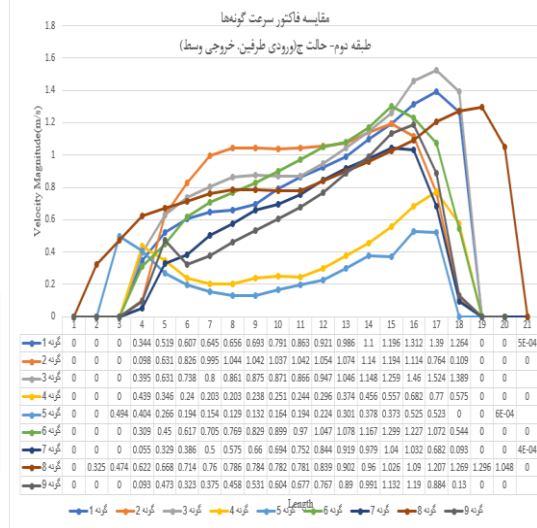
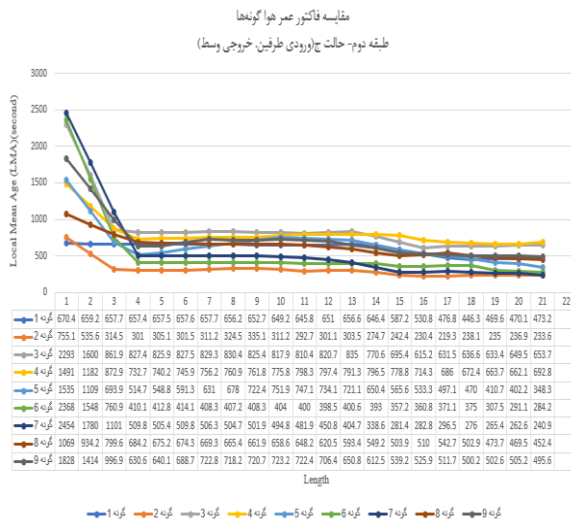
جدول 6- مقایسه سرعت هوا در 9 گونه  
Tab. 6- Comparison of velocity in 9 types





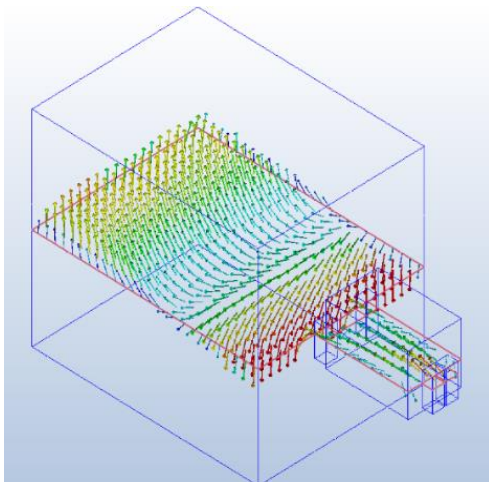
مختلف بازشوهای ورودی و خروجی صدق می کند. گونه های 3 و 2 در حالت بازشوهای ج به ترتیب دارای سرعت هوای بیشتر و عمر هوای کمتری است. با رجوع به مقایسه روند تهویه با توجه به شکل 14 مشخص می شود که گرچه گونه شماره 3 از میانگین سرعت بیشتری برخوردار است اما روند تهویه در گونه شماره 2 یکنواخت تر است.

- هر چند بازشوها در حالت های همراستا سرعت جریان هوای نسبتا بیشتری را نشان دادند، ولیکن بازشوها در حالت های غیر همراستا به دلیل درگیر کردن فضای بیشتری از اتاق بهینه تر هستند.  
- بهینه ترین تراز ارتفاعی طبقه اول است. به صورت کلی، با افزایش ارتفاع در تمامی گونه ها سرعت جریان هوا کاهش می یابد. این الگو در اکثریت گونه ها با حالت های



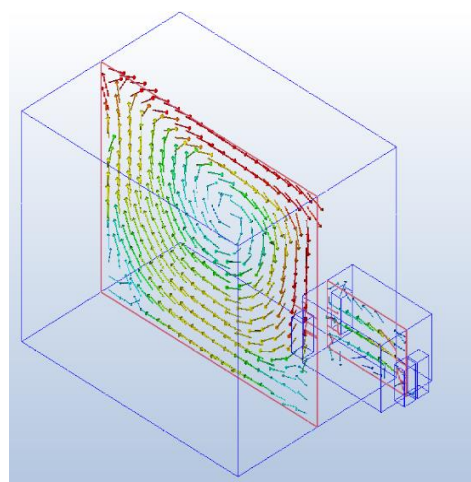
شکل 14- مقایسه سرعت و عمر هوا در تهویه دو طرفه برای 9 گونه

Fig. 14- comparison of speed and life of air in two-way ventilation for 9 types



شکل 16- بردارهای جریان هوا در مقطع افقی (ارتفاع 1.5 متری از کف اتاق). گونه 2. طبقه دوم. حالت ج

Fig. 16- Air flow vectors in a horizontal section (height 1.5 meters from the floor of the room). type 2. second floor. mode c



شکل 15- بردارهای جریان هوا در مقطع عمودی (مرکز اتاق گونه 2. طبقه دوم. حالت ج)

Fig. 15- Air flow vectors in vertical section (center of room type 2. Second floor. Mode C

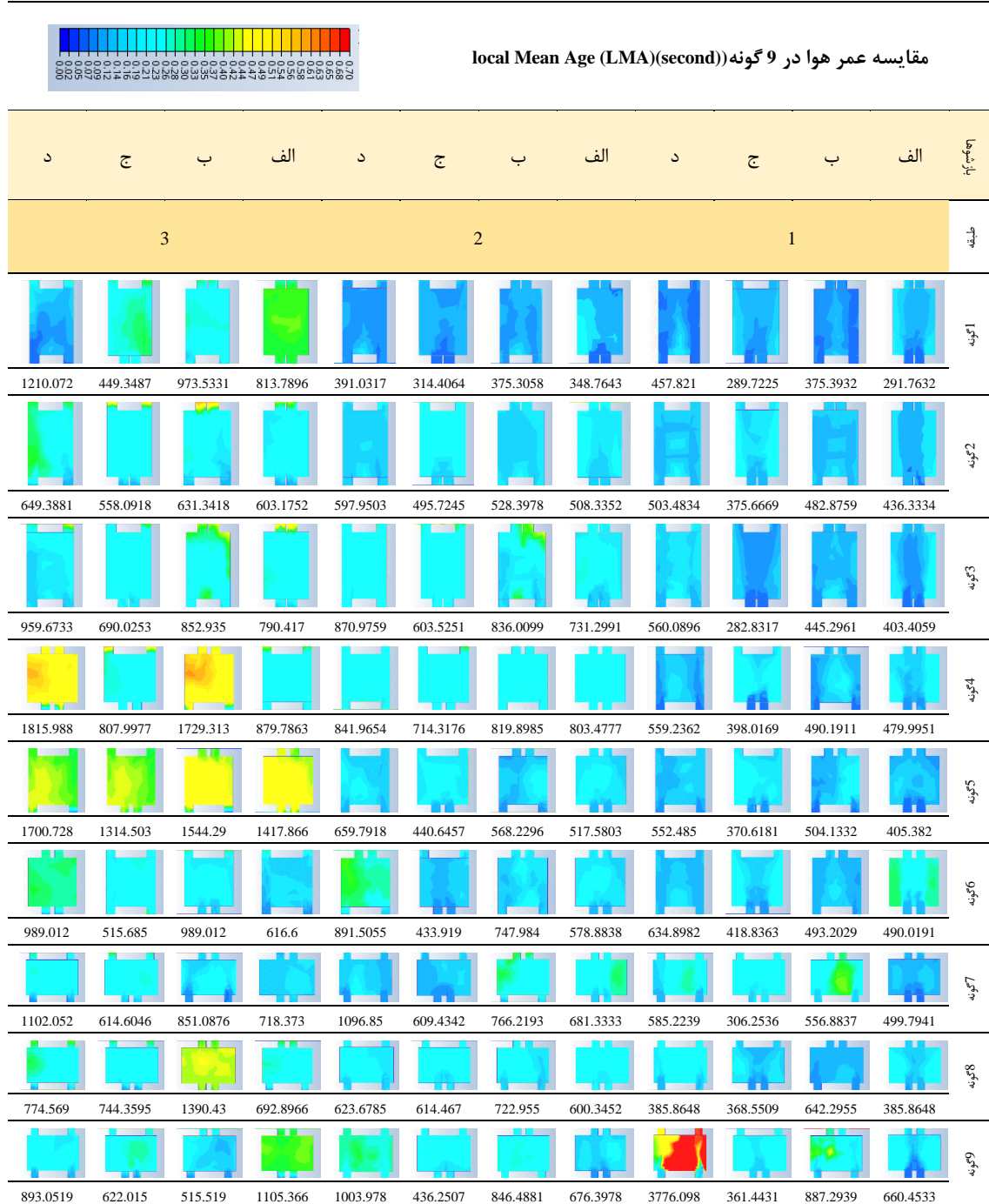




شکل 15 و 16 بردارهای جریان هوا در مقطع را در گونه شماره 2 نشان می‌دهد. به گونه‌های اتاق‌های مستطیل عمودی و مربع هستند که اختلاف قابل ملاحظه‌ای نسبت به گونه‌های اتاق مستطیل افقی دارند.

عمر هوا: - طبق جدول 7 بهینه‌ترین عملکرد برای عمر هوا مربوط

جدول 7- مقایسه عمر هوا در 9 گونه  
Tab. 7- Comparison of age of air in 9 types





- تراز ارتفاعی مناسب برای بهینه‌ترین عمر هوا، طبقه اول است. با افزایش ارتفاع در تمامی گونه‌ها عمر هوا افزایش و کیفیت هوا کاهش می‌یابد. این الگو در کلیه گونه‌ها با حالت‌های مختلف بازشوها قابل مشاهده است.

- محل قرارگیری بازشوها در الگوی رفتاری عمر هوا در فضای اتاق تأثیر قابل توجهی دارد. عمر هوا در راستای حرکت هوا کمترین میزان و پیرامون این مسیر، بیشتر می‌شود. این الگو در حالت‌های غیرهمراستا بیشتر خود را نمایش می‌دهد. عمر هوا در تراز ارتفاعی بازشوها (بین 20 تا 170 سانتی‌متر) کمترین و با اختلافی قابل مشاهده به سمت فضای زیرسقف بیشترین است.

#### 4- نتیجه گیری

کیفیت و الگوی جریان هوا در فضاهای داخلی علاوه بر شرایط اقلیمی منطقه تحت تأثیر پارامترهای متعددی قرار دارد که هندسه بنا یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر آن است. پژوهش حاضر تأثیر الگوی هندسی فضا و موقعیت بازشوها بر کیفیت جریان هوا در خانه‌های سنتی بوشهر را مورد مطالعه قرار داده و جهت دستیابی به نتایج دقیق‌تر از روش CFD به تجزیه و تحلیل گونه‌ها پرداخته است. تحلیل کانتورهای حاصل از شبیه‌سازی تونل باد، نشان می‌دهد، به صورت کلی حرکت باد در تمامی گونه‌ها فارغ از فرم‌شان، تقریباً از الگوهای ثابتی پیروی می‌کند. در تناسبات یکسان توده و فضای خالی، شکل هندسی حیاط تفاوت چشم‌گیری در سرعت ورودی و خروجی هوای اتاق ایجاد نکرده است و میانگین سرعت در محل بازشوها تمامی گونه از الگوی ثابتی پیروی می‌کند، ولیکن شکل هندسی پلان اتاق و محل قرارگیری بازشوها تأثیر قابل توجهی در تهویه طبیعی فضای اتاق دارد. با در نظر گرفتن ارتفاع 1.5m (متوسط یک فرد ایستاده) بیشترین میزان سرعت برای گونه شماره 2 در حالتی که موقعیت پنجره‌ها در حالت ج است گزارش شده است. به طور نسبی سرعت هوا 2 برابر حالت ب و د است. با لحاظ کردن عمر هوا، گونه‌های اتاق مستطیل عمودی با بازشوها غیر هم‌راستا برتری نسبی داشته و بهینه‌ترین تهویه طبیعی را تأمین کرده است.

گونه شما 2 در حالت ج عمر هوای کمتری را نسبت به حالت‌های الف، ب و د نشان می‌دهد، که حاکی از عملکرد تهویه بهتر است. همچنین، گونه‌های اتاق مستطیل عمودی بیشترین سرعت جریان هوا و گونه‌های اتاق مستطیل عمودی و مربع، عمر هوای بهینه‌تری دارند. افزون بر آن، در تمامی گونه‌ها با افزایش تراز ارتفاعی، از سرعت جریان هوا کاسته، عمر هوا افزوده و کیفیت هوای تازه کمتر می‌شود. هرچند حالات بازشوها هم‌راستا (الف و د) سرعت بیشتری را نشان می‌دهد، ولیکن حالات غیر هم‌راستا (ب و ج) کیفیت تهویه بهتری را در مجموع دو مؤلفه فراهم می‌آورند. حائز اهمیت است که این نتایج، می‌تواند در پژوهش‌های آتی با در نظر گرفتن پارامترهای دیگری چون رطوبت، دما، ابعاد بازشو، مکان و نسبت دقیق پنجره و ... می‌تواند مورد واکاوی قرار گیرد.

#### پی‌نوشت

- <sup>1</sup> Validation
- <sup>2</sup> ASHRAE
- <sup>3</sup> Grid study
- <sup>4</sup> incompressible
- <sup>5</sup> Pascal
- <sup>6</sup> Viscose Model
- <sup>7</sup> Continuity
- <sup>8</sup> Momentum

#### مراجع

Al-Hinai, H, Batty, W. J & Probert, S. D. (1993). Vernacular architecture of Oman: Features that enhance thermal comfort achieved within buildings. *Applied Energy*, 44(3), 233–258.

ASHRAE Handbook. (1985). American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Alanta.

ASHRAE STD 129. (1985). Measuring Air-Change Effectiveness.

Cucea, Erdem, Sherc, Farooq, Sadiqc, Hamad, Cuceb, Pinar Mert, Guclu, Tamer, Besira, Ahmet (2019). Sustainable ventilation strategies in buildings: CFD research, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 36.

Eskandari, Parniaz., Rostami, Ali Askar. (2015). Evaluation of Openings Role from the Perspective of Wind Flow in Hot and Humid Climates (Case Study of Bushehr Seaport, Iran). *international*



Position of the Openings Using CFD Method. *Iranian Architecture and Urban Design*, 11(19), 57-71. [in Persian].

Rahesparmanfard, Reza., & Azemati, Saeed. (2021). Analysis of wind behavior in natural ventilation and reduction of energy consumption in a residential building based on native architecture, case study: the effect of opening dimensions and placement on natural ventilation in Amol city. *Utopia Architecture and Urbanism*, 14(35), 103-114. [in Persian].

Saadatjo, Priya. (2016). Porous architecture and efficiency in energy consumption (the role of hollow spaces in summer ventilation and cooling of mid-rise buildings in Qeshm city). Doctoral thesis, supervisor: Mohammad Javad Mahdavinejad, consultant: Afsana Zarkash, Architecture, Tarbiat Modares University. [in Persian].

Saligheh, E., & Saadatjou, P. (2020). Impact of Building Porosity on Self-Shading and Absorbed Solar Heat Reduction in Hot and Humid Regions. *NAQSHEJAHAN*, 9(4), 257-271. [in Persian].

Wilcox, David C. (2006). Turbulence modeling for CFD. DCW Industries.

Zainlian, Nafiseh., & Akhot, Haniyeh. (2016). The structure of the yard in hot and dry and hot and humid Qajar houses with a focus on the "central yard" type (case study: Yazd and Dezful houses). *Iranian Islamic City Studies*, 8(30), 15-29. [in Persian].

Zarei, Mohammad Ibrahim., Hatami Majid, Faeze., Mohammadian Mansour, Saheb. (2017). Old houses in Hamadan, Tehran, Talai. [in Persian].

*Journal of Science, Technology and Society*, 3, 58-63.

Giel, p. w. & Schmidt, F. W. (1986). experiment study of high Rayleigh number natural convection. 8th international heat transfer conference, 4, 1459-1464.

Khodadadi, Mohammad Reza., Aminian, Saeed., Janipour, Behrouz. (2014). Climate and its effects on the formation of the body of rural architecture in Bushehr province. *Road and building*, 110. [in Persian].

Kumar, N., Kubota, T., Bardhan, R., & Tominaga, Y. (2020). CFD analysis of airflow in voids for better cross ventilation in midrise buildings in hot and humid climates. *Building Simulation Conference Proceedings*, 6, 3879-3885.

Masoumi, Hamid Reza., Nejati, Nasim., alah Ahadi, Amin. (2016). Learning from the Heritage Architecture: Developing Natural Ventilation in Compact Urban Form in Hot-Humid Climate: Case Study of Bushehr, Iran. *International Journal of Architectural Heritage*.

Mohammadi, Amin., Saghafib, Mahmoud Reza., Tahbaz, Mansoureh., Nasrollahid, Farshad, (2018), Potentials of Vernacular Climatic Solutions (VCS) in Energy Efficiency of Domestic Buildings in Hot and Humid Climate: The Case Study of Bushehr, Iran. *Space Ontology International Journal*, 6(3), 59 – 76.

Nikghadam, Niloufar. (2013). Patterns of Semi-Open Spaces in Vernacular Houses of Dezful, Bushehr and Bandar-E-Lenge Considering Climate Attributes. *Memari-Va-Shahrsazi (Honar-Ha-Ye-Ziba)*, 18(3), 69-80. [in Persian].

Rahaei, Omid., & Azemati, Hamid Reza. (2020). Improving the Quality of Natural Ventilation in Classrooms of Mazandaran Province Based on the