فضا
دوفصل‌نامه علمی معماری و شهرسازی
۱۴۰۲ ۳ ۲

تحلیل رفتار فرم حیاط مرکزی در تهویه طبیعی خانه‌های سنتی اقلیم گرم و خشک ساحلی به‌روش CFD (مطالعه موردی: عمارت دهدشتی در شهر بوشهر)

ندا قهرمان‌ایزدی [۱]، ملیحه تقی‌پور [۲*]، حمید اسکندری [۳]، خسرو موحد [۴]

[۱] پژوهشگر دکتری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.
[۲] دانشیار معماری، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.
[۳] استادیار معماری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.
[۴] دانشیار معماری، گروه معماری و شهرسازی پایدار، دانشگاه کلمبیا، واشینگتن، آمریکا.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

چکیده

اقلیم بوشهر با رطوبت نسبی بالا نیاز مبرمی به تهویه دارد، حیاط‌مرکزی یکی از اجزای موثر در تهویه طبیعی است. هدف این پژوهش کشف عملکرد تهویه‌ی طبیعی حیاط‌مرکزی، از منظر شکل هندسی حیاط، تناسبات و توده بهینه در خانه‌های منطقه گرم و خشک ساحلی بوشهر است. در این مقاله به‌روش تحقیق ترکیبی و با استفاده از راهبردی تجربی، ابتدا متغیرهای مستقل تاثیرگذار بر کیفیت تهویه طبیعی شناسایی، متغیرهای وابسته توسط دستگاه‌های دقیق دیجیتال در یک نمونه موردی (عمارت دهدشتی) اندازه‌گیری و داده‌های آن برای اعتبارسنجی نرم‌افزار، استفاده شد. درادامه و پس از گونه‌شناسی حیاط، به روش CFD[۱] و با استفاده از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018، شبیه‌سازی برای ۹ گونه‌ی مختلف ترکیب اتاق و حیاط به شکل‌های مستطیل عمودی، مربع و مستطیل افقی، در ۳ تراز ارتفاعی طبقه همکف، اول و دوم اجرا و براساس دو مولفه «سرعت جریان هوا»، «عمرمتوسط هوا» انجام شد. فرم حیاط، فرم اتاق و نسبت توده به فضا، به‌عنوان متغیرهای مستقل و کیفیت جریان هوای داخل اتاق (سرعت و عمر هوا) به عنوان متغیر وابسته درنظر گرفته شده‌است. یافته‌ها نشان می‌دهد، در حیاط فرم‌های کشیده عمودی سرعت باد بیشتری را نشان می‌دهند. با افزایش نسبت عرض به طول مستطیل از ۱ به ۱/۱۵ و ۱ به ۳ در حالت مستطیل عمودی ابتدا سرعت جریان هوا در فضای اتاق افزایش و سپس کاهش می‌یابد، ولیکن در مستطیل افقی سرعت تقریبا از روند یکنواخت‌تری پیروی می‌کند. همچنین گونه‌های حیاط و اتاق مستطیل عمودی به ویژه گونه شماره ۲، به دلیل کشیدگی فرم، از نظر هر دو مولفه‌ی سرعت جریان هوا، عمر هوا نتایج بهتری را نشان داده‌اند. از بعد تناسبات حیاط، نسبت ۱ به ۱/۳ هم فراوانی مطلوبی در نمونه‌های واقعی و هم مقدار کشیدگی لازم برای برجسته‌کردن تفاوت مولفه‌های کیفیت هوا را دارد. همچنین تغییرات ضخامت توده بر سرعت و کیفیت هوا تاثیر قابل‌توجهی دارد.

* نویسنده مسئول: E-mail: Malihe.Taghipour@iau.ac.ir

[۱] این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان "بهبود بهره‌وری تهویه طبیعی در ساختمان‌های مسکونی اقلیم گرم و مرطوب با اولویت بخشی به پارامترهای موثر فضاهای نیمه باز (نمونه موردی: شهر بوشهر)" می‌باشد که به راهنمایی نویسنده دوم و مشاوره نویسنده سوم و چهارم در دانشکده هنر و معماری دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز انجام شده‌است.

واژگان کلیدی: تهویه طبیعی، فرم حیاط، تناسبات، توده، روش CFD.

مقدمه

طراحی ساختمان با توجه به خصوصیات اقلیمی، نه تنها می‌تواند شرایط آسایش در محیط مصنوع را ایجاد کند، بلکه در کاهش مصرف انرژی نیز کمک خواهد کرد. از این رو به‌کارگیری تمهیدات لازم به منظور بهره‌وری از سامانه‌های ایستای انرژی و کاهش بار سرمایشی ساختمان در اقلیم‌های گرم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تهویه طبیعی در بسیاری از مناطق از جمله در بوشهر کمک شایانی به افزایش کیفیت آسایش حرارتی ساکنان می‌کند و این در حالیست که در بسیاری از خانه‌های امروزی حتی در موارد غیر ضروری نیز از تهویه مطبوع استفاده می‌شود که عمده‌ترین دلیل آن بی‌اعتمادی به تهویه طبیعی است. معماری و خصوصیات کالبدی ساختمان از مهمترین مسائل مربوط به استفاده از سامانه‌های ایستا در ساختمان هستند که می‌توانند با ارتقا بهره‌گیری از جریان هوا، تهویه طبیعی و کاهش بار سرمایشی ساختمان، میزان انرژی مصرفی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر دهند. حیاط مرکزی الگوی بسیار کهنی است که در بسیاری از کشورهای آسیا، شمال آفریقا، جنوب آمریکا، اروپا و نیز در ایران مورد استفاده قرارگرفته و معلول شرایط محیط طبیعی و عوامل اقلیمی مناطق مختلف بوده‌است. در خانه‌های سنتی اقلیم گرم و خشک ساحلی جنوب ایران با نیاز اصلی تهویه طبیعی، جوهره‌ی سازماندهی فضایی را باید در الگوی حیاط مرکزی جست، که در طی سالیان پاسخ‌های مناسبی را برای زندگی مادی و معنوی ساکنان خود فراهم می‌آورد. این ساختار چه در زمینه شکلی (هندسه کلی طرح و هندسه جزئی عناصر) و چه در روش پدیداری مصالح فن‌آوری، به‌شدت از ویژگی‌های بستر و توانمندی‌های محلی اثر پذیرفته و بدین‌ترتیب با حداقل دخل و تصرف در محیط (تغییر شکل- آلایندگی) حداکثر بهره‌مندی را نصیب کاربران کرده است(احمدی، ۱۳۸۴، ۹۱). از دیدگاه محیطی نیز، حیاط مرکزی به عنوان عضوی از معماری بادآهنگ، وظیفه خود را در حفاظت ساکنین از شرایط نامساعد جوی و محیطی و بهره‌مندی از سیستم‌های غیرفعال تامین انرژی در مناطق مختلف به خوبی انجام داده‌است. این عنصر به واسطه بهره‌گیری از سامانه‌های سرمایش تبخیری، تهویه عبوری، سرمایش تابشی و سایه‌اندازی به خنک‌سازی و کاهش بار سرمایشی ساختمان کمک می‌کند(وکیلی نژاد و همکاران، ۱۳۹۲،۱۵۵). در این میان مولفه‌های کالبدی حیاط مرکزی اعم از شکل کلی حیاط، تناسبات حیاط و ساختار فرمی جداره‌های آن نقش موثری در سرمایش ایستا دارند و امری مهم و قابل پژوهش هستند. پژوهش حاضر در پی آن است تا نقش یکی از ویژگی‌های مهم حیاط مرکزی یعنی ابعاد و تناسبات را در یافتن پتانسیل تهویه طبیعی در فضای داخلی و حیاط مرکزی بررسی نماید. از این رو مطالعه فرم حیاط با این فرض صورت گرفته که با تغییر در تناسبات و شکل هندسی حیاط می‌توان سرعت جریان هوا، و عمر هوای فضای داخل اتاق را کنترل کرد و هدف اصلی، بررسی تهویه فضای داخلی با توجه به نقش حیاط بوده است. چنین پژوهش‌هایی پیش‌زمینه تدوین الگوهایی جهت ارائه تهویه بهینه در ساختمان‌ها خواهد بود. لذا شناخت مولفه‌های حیاط که موثر بر تهویه طبیعی هستند، از نتایج بدیع این تحقیق است.

پیشینه پژوهش

با توجه به این‌که حیاط مرکزی، عنصری دیرینه در معماری ایرانی و یکی از روش‌های بهره‌گیری از سامانه‌های ایستا بوده که با استراتژی‌های مختلف، همواره از بار سرمایشی ساختمان کاسته است، نیاز است تا برخی از تحقیقات انجام شده که به جهت ماهیت، روش و موضوع با تحقیق حاضر اشتراکاتی دارند مورد بازبینی قرارگیرند. مطالعات انجام شده، هریک از جنبه‌های متفاوتی حیاط مرکزی را بررسی کرده‌اند. یکی از بهترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه تاثیر تناسبات حیاط بر نحوه رفتار باد، تحقیقات لیترفر است که نشان می‌دهد نسبت ابعادی طول به عرض کمتر، بهترین حالت از نظر گردش هوا است (Littlefair et al, 2000). از پژوهش‌های انجام شده در حوزه‌ی تاثیر حیاط مرکزی بر کاهش بار سرمایشی و گرمایشی فضاهای داخلی می‌توان به پژوهش‌های پرتا و همکاران (Porta et al, 2002) اشاره کرده که خرد اقلیم ایجادشده به‌واسطه

حیاط مرکزی را علت آن دانستند. همچنین پژوهش، راجاپاکشا و همکاران (Rajapaksha et al, 2003)، نشان داد که قابلیت‌های حیاط مرکزی به عنوان بخشی از معماری بادآهنگ، تابعی از جریان هوای داخلی است و حیاط مرکزی به صورت یک القاکننده مکشی برای تهویه عمل می‌کند. تبلادا و همکاران(Tablada et al, 2005) به مقایسه بین هندسه‌های مختلف حیاط‌ها از نظر ویژگی‌های جریان باد و سرعت هوای داخلی بر اساس اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و تونل باد پرداخته و بیان می‌کنند اتاق‌هایی با تهویه متقاطع دارای مقادیر سرعت هوای داخلی بالاتر نسبت به تهویه یک طرفه دارند. ابعاد حیاط، موقعیت اتاق و جهت‌گیری جنبه‌های مهمی هستند که بر سرعت هوای داخل و راحتی حرارتی تأثیر می‌گذارند. پژوهش تابان و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری، به تعیین الگوی بهینه حیاط مرکزی بر اساس تناسبات در خانه‌های سنتی دزفول پرداختند. المحفدی و همکاران (Almhafdy et al, 2013) نسبت ابعاد یک حیاط و جهت‌گیری آن در قالب حیاط U شکل در یک بیمارستان در مالزی را ارزیابی و سه متغیر دمای هوا، رطوبت و الگوهای باد را ثبت کردند. نتیجه تأیید می‌کند که دستکاری پیکربندی حیاط و جهت‌گیری آن بر توانایی تغییر اقلیم آن تأثیر می‌گذارد. دو سال بعد در پژوهشی مشابه المحفدی و همکاران (Almhafdy et al, 2015) با روش CFD نسبت ابعاد حیاط و سقف کنسولی را بررسی مولفه سرعت باد، دمای هوا و آسایش حرارتی (PMV) را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که نسبت ابعاد و سقف کنسولی تأثیر قابل‌توجهی بر سرعت باد و در نتیجه آسایش حرارتی دارد. مانی‌اوغلو و کوچلار اورال در (Manioglu & Koçlar Oral, 2015) به بررسی تاثیر شکل حیاط‌مرکزی بر بار سرمایشی و گرمایشی در مناطق گرم و خشک پرداختند. براساس این پژوهش، شکل حیاط مرکزی (تناسبات حیاط) بر میزان سایه‌اندازی و انرژی تابشی دریافتی و به تبع آن بار سرمایشی وگرمایشی ساختمان تاثیر قابل توجهی دارد. میکالف و همکاران(Micallef, 2016) در پژوهش خود تأثیر ارتفاع حیاط بر تهویه متقاطع اتاق مورد توجه قرار داده و بیان می‌کنند که با افزایش ارتفاع ساختمان، دبی تهویه افزایش می‌یابد. نرخ جریان تهویه با افزایش ارتفاع حیاط افزایش می‌یابد. زارعی و میردهقان (۱۳۹۵) با نرم افزار اکوتک نقش تناسبات موجود میان حیاط مرکزی و جداره ها در میزان سرعت باد و سایه بررسی کردند. زینلیان و اخوت(۱۳۹۶) تحلیل فرمی، تناسبات حیاط (طول به عرض)، عمق حیاط، زاویهٔ دید انسانی، الگوی ارتفاعی، نسبت فضای بسته به باز، مساحت سبزینگی و آب، مصالح و رنگ جدارهٔ حیاط را در دو اقلیم متفاوت مورد بررسی تطبیقی و تحلیل قرار دادند. مارتینلی و ماتزاراکیس (Martinelli & Matzarakis, 2017) با گونه‌شناسی حیاط در ایتالیا به یک تحلیل عددی بلندمدت با تمرکز بر تأثیر نسبت‌های ارتفاع/عرض بر آسایش حرارتی در طول سال رسیدند و دمای هوا، فشار بخار، سرعت هوا را ارزیابی کردند. مرادی و همکاران(۱۳۹۷) با بررسی ۶۴ خانه حیاط دار از منظر تناسبات و جهت دریافتند که امتداد و کشیدگی حیاط ها عمدتا شمالی- جنوبی هستند و کوچک شدن و افزایش محصوریت حیاط‌ها منجر به افزایش سطوح تحت سایه شده و گرمایش غیر فعال فضاهای مجاور حیاط‌ها را در فصول سرد با دشواری مواجه می‌سازند. قدسی و همکاران(۱۳۹۷) با بررسی ۱۰ حجم مختلف، شاخص‌های هندسی موثر بر رفتار حرارتی ساختمان‌های اقلیم گرم‌وخشک را بررسی و دریافتند که حیاط‌های Hشکل کمترین و حیاط‌های Lشکل بیشترین نیاز سرمایشی را دارند. زو و همکاران(Xu et al, 2018,4) در پژوهشی کشور چین را بررسی و به این نتیجه رسیدند که ترکیب مناسب طرح کلی حیاط و تناسبات آن می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان و نحوه تهویه در فصل تابستان و جلوگیری از باد نامطلوب در زمستان داشته باشد. آریانی و همکاران(Aryani et al, 2019) با شبیه‌سازی ۳۶ گونه فرم حیاط به بررسی ابعاد و فرم با روش پرداخته و مولفه جریان باد را در این گونه‌ها بررسی کردند. طالب و همکاران (Taleb et al, 2020) طرح‌های مختلف حیاط در ساختمان‌های اداری به منظور بهینه‌سازی تهویه طبیعی با استفاده از تحلیل CFD را بررسی کرده و حیاط از نظر مصرف انرژی، رطوبت داخلی و محدوده آسایش پیشنهاد و تحلیل شد. مشخص شد که یک حیاط خارجی بهتر از یک حیاط داخلی بسته عمل می‌کند. سلیقه و سعادت جو(۱۳۹۹) با آنالیزهای CFD به بررسی نقش تناسبات حیاط‌مرکزی در میزان سایه‌اندازی، انرژی تابشی دریافتی، میزان بار سرمایشی و پتانسیل تهویه طبیعی در اقلیم گرم و مرطوب پرداختند. رهایی و عظمتی (۱۳۹۹) با

استفاده از تحلیل CFD جریان هوای داخل حیاط مرکزی درخانه‌های قاجار را بررسی کرده و نتایج نشان می‌دهد بزرگتر شدن ابعاد حیاط‌های قاجاری نسبت به صفوی، موجب افت کیفیت تهویه طبیعی آن‌ها شده است. مردانی و روسایی(۱۴۰۰) ارتباط بین تناسبات حیاط و الگوی جریان هوا در خانه‌های سنتی شوشتر را مورد با روش CFD و بر اساس مولفه سرعت باد ارزیابی قرار داده‌است. تغییرات صورت گرفته در تناسبات و الگوی هندسی حیاط‌ها بر شرایط کیفیت جریان هوا و شرایط آسایش حرارتی ساکنان تأثیرگذار بوده‌است. کابزا و همکاران(Cabeza et al, 2022) در مطالعه خود یک نمونه اولیه در مقیاس واقعی برای مسابقات Decathlon خورشیدی ۲۰۱۹ در مجارستان را به عنوان یک مطالعه موردی برای تجزیه و تحلیل اثرات اینرسی حرارتی و تهویه بر عملکرد حرارتی حیاط‌ها ساخته و دما و سرعت باد را بررسی کردند. ژو و همکاران (Zhu et al, 2023) با جستجوی ۷۹۸ مقاله به بررسی اثرات هندسه و جهت‌گیری بر سایه و تهویه، و همچنین ترکیب آن‌ها بر بهبود میکرواقلیم در مناطق مختلف آب و هوایی پرداختند. جدول شماره ۱ مولفه‌های تاثیرگذار و متغیرهای مورد بررسی توسط محققین و پژوهشگران در راستای بررسی تهویه طبیعی حیاط را نشان می‌دهد.

جدول ۱. شاخصه‌های تاثیرگذار و متغیرهای مورد بررسی توسط محققین و پژوهشگران جهت بررسی تهویه طبیعی(نگارندگان)

محققان و پژوهشگران	شاخصه‌های تاثیرگذار بر تهویه طبیعی (متغیر مستقل پژوهش-ها)	روش‌ها و پارامترهای مورد بررسی (متغیر وابسته پژوهش)
میگل آنخل پرتا گاندارا، ادواردو روبیو، خوزه لوئیس فرناندز، ویکتور گومز مونوز(۲۰۰۲). Miguel Ángel Porta Gándara, Eduardo Rubio, José Luis Fernández, Víctor Gómez Muñoz (2002)	حیاط- جزئیات طراحی ترکیب ساختمان	جریان هوا- کاهش بار سرمایشی
ایندریکا راجاپاکشا، ناگیا و اکومیایا(۲۰۰۳). Indrika Rajapaksha, Nagai H, Okumiya M (2003)		
عبدالباسط المحفدی، نورهتی ابراهیم، صابرینه ش احمد، یاسمین یحیی Abdulbasit Almhafdy*, Norhati Ibrahim, Sabarinah Sh Ahmad, Josmin Yahya (2013 & 2015).	تناسبات – جهت گیری- بازشو	دمای هوا، رطوبت، جریان باد
گلتن مانی اوغلو، گول کوچلار اورال(۲۰۱۵). Gülten Manioğlu, Gül Koçlar Oral (2015).	فرم ساختمان - شکل - تناسبات	انرژی تابشی - سایه
دانیل میکالف، وینسنت بوهاگیار، سیمون پی بورگ Daniel Micallef, Vincent Buhagiar, Simon P. Borg (Micallef, 2016)	تناسبات(ارتفاع بنا)	دبی -نرخ جریان هوا
نفیسه زینلیان و هانیه اخوت(۱۳۹۶).	فرم- تناسبات- مصالح- رنگ	دما و باد
لتیزیا مارتینلی، آندریاس ماتزاراکیس(۲۰۱۷) Letizia Martinelli, Andreas Matzarakis (2017).	تناسبات (ارتفاع/عرض)	دمای هوا، فشار بخار، سرعت هوا
سیادونگ زو، فنلان لو، وی وانگ، تیانژن هنگ(۲۰۱۸). Xiaodong Xu, Fenlan Luo, Wei Wang, Tianzhen Hong (2018).	تناسبات- جهت	سرعت - فشار
سیلفیا مونا آریانی، سوپونو ساسونگکو، ایف بامبانگ سولیستونو، نور هدایتی(۲۰۱۹). Silfia Mona Aryani, Soepono Sasongk, If. Bambang Sulistyono, Nur Hidayati (2019).	ابعاد و فرم	جریان باد
پل لیتلفر، مت سانتاموریس، سروواندو آلوارز، آلبرت دوپاین(۲۰۰۰). Paul Littlefair, Mat Santamouris, Servando Álvarez, Albert Dupagne (2000)	تناسبات- الگوی هندسی	دما- سرعت باد
محمد ابراهیم زارعی و سید فضل الله میردهقان (۱۳۹۵).		
آبل تبلادا، برت بلوکن، یان کارملیت، فرانک دی تروییر(۲۰۰۵). Abel Tablada, Bert Blocken, Jan Carmeliet, Frank De Troyer (2005).		
مهرنوش قدسی، خسرو دانشجو، خسرو، سیدمجید مفیدی‌شمیرانی (۱۳۹۷).		
محسن تابان، محمدرضاپورجعفر، محمودرضا بمانیان، شاهین. حیدری (۱۳۹۲).		
الهام سلیقه و پریا سعادت جو(۱۳۹۸).		

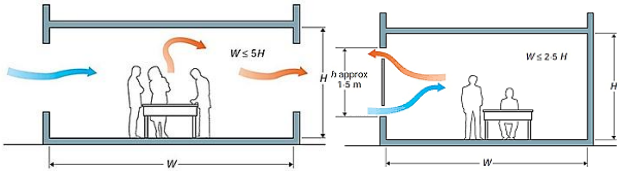
امید رهایی و حمیدرضا عظمتی(۱۳۹۹).		
ساسان مرادی، ، مهرداد متین راد، ریما فیاض مزین دهباشی شریف، (۱۳۹۷).		
حنان م طالب، تقوی وریکات، حنان شیخ (۲۰۲۰). Hanan M. Taleb, Taqwa Wriekat, Hanan Hashaykeh (2020).	فرم	رطوبت داخلی و محدوده آسایش -دما - سرعت
ویکتوریا پاتریشیا لوپز-کابزا، کارلوس ریورا-گومز، خورخه روآ-فرناندز، میگل هرناندز-والنسیا، رافائل هررا-لمونز(۲۰۲۲). Victoria Patricia López-Cabeza, Carlos Rivera-Gómez, Jorge Roa-Fernández, Miguel Hernandez-Valencia, Rafael Herrera-Limones (2022).	هندسه و جهت‌گیری	دما و سرعت
جیایین ژو، خوانجوان فنگ، جیفو لو، یو چن، ویلین لی، پایجی لیان، شی ژائو (۲۰۲۳). Jiayin Zhu, Juanjuan Feng, Jifu Lu, Yu Chen, Weilin Li, Peiji Lian, Xi Zhao (2023).		

در مجموع، با مطالعات انجام شده در پیشینه تحقیق، مبانی پژوهش و با توجه به جدید بودن مباحث مربوط به تهویه طبیعی و روش CFD هنوز پژوهشی با این عنوان که تاثیر فرم حیاط بر بهبود تهویه داخلی در اقلیم‌های گرم و خشک ساحلی را مورد بررسی قرار دهد، صورت نگرفته‌است. بنابراین تکراری نبودن موضوع و برخورداری از نگاهی نو به فرم فضا، به ویژه فرم حیاط و بهبود تهویه طبیعی ضرورت بررسی حاضر را موجه می‌سازد. همچنین، می‌توان گفت در بررسی تجارب مختلف در مورد وضعیت و یا عوامل داخلی و خارجی تأثیرگذار بر بهبود تهویه طبیعی، علاوه بر این که مطالعات چندانی صورت نگرفته، بیشتر به بحث محاسباتی و کاهش بار سرمایشی از بعد مصرف انرژی پرداخته شده است، این در حالیست که نوشتار حاضر با روش CFD به بحث کیفی تهویه پرداخته‌است. لذا نقش فرم و استفاده حداکثری از جریان باد طبیعی برای بهبود تهویه در اقلیم‌های بحرانی مثل اقلیم گرم و خشک ساحلی محققین را برآن‌داشت تا با نگاهی متفاوت به این موضوع پرداخته شود و دستاورد آن در قالب یک استراتژی جامع در بعد طراحی و از منظر توسعه پایدار استفاده گردد.

تهویه طبیعی

تهویهٔ هوا به عمل جانشین کردن و یا جابجا کردن هوا در یک فضا گفته می‌شود که به منظور تأمین هوای تازه، خارج کردن هوای گرم و خنک کردن فضا و تأمین آسایش حرارتی انسان انجام می‌شود. در روش تهویه طبیعی عمل جابجایی هوا از طریق اثر دودکشی که مبتنی بر حرکت هوای گرم به بالا و ورود هوای سرد از پایین به جای آن است و یا از طریق کوران هوا که جابجایی هوا از طریق فشار مثبت و منفی باد انجام می‌شود (قبادیان، ۱۳۸۷،۱۳۵). نیروهایی که باعث تهویه طبیعی می‌شوند در دو عامل کلی خلاصه می‌شوند (CIBSE, 2005, 10): نیروهای باد و خاصیت شناوری. این نیروها مکانیزم‌های مربوط به تهویه طبیعی را مشخص می‌کند. سه حالت برای تهویه طبیعی می‌توان درنظر گرفت: تهویه یک‌طرفه، تهویه دوطرفه (تصویر ۱) و تهویه دودکشی(Andersen, 2007, 535) . تهویه طبیعی بر سه پدیده اقلیمی سرعت باد، جهت باد و اختلاف دمایی مبتنی است. موارد زیر مهم‌ترین پارامترهای موثر در عملکرد تهویه طبیعی است که در این پژوهش به آن‌ها پرداخته شده‌است.

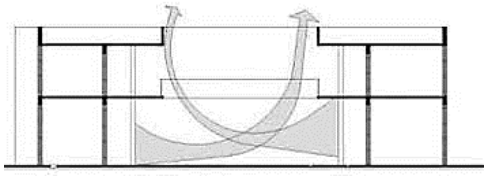
سرعت باد[۲]: مسافت طی شده توسط ملکول‌های هوای متحرک را در واحد زمان بر حسب متر در ثانیه، کیلومتر در ساعت و یا مقیاس قدیمی گره (معدل یک مایل دریایی یا ۱.۸۵ کیلومتر در ساعت) بیان می‌کند. عمرمتوسط موضعی هوا[۳]: به عنوان زمان عمرمتوسط هوا در موقعیت خاصی در داخل فضا نسبت به زمانی که هوا برای اولین بار وارد فضا شده است، تعریف می‌شود و در واقع عمرمتوسط موضعی هوا معیاری از تازگی هوا بدست می‌دهد. تصویر ۱ تهویه یک‌طرفه و دوطرفه را نشان می‌دهد.



تصویر ۱. مقایسه تهویه یک طرف و دوطرفه (لکنر، ۱۳۸۵)

حیاط و گونه شناسی آن در معماری بوشهر

جهت بررسی جنبه‌های مورفولوژیکی خانه‌های بوشهر، بررسی خانه‌ها در مناطقی انجام شده که دارای پیشینه تاریخی و معماری سنتی و بومی غنی می‌باشند. در شروع کار تعدادی از ساختمان‌های مهم بومی این منطقه به صورت هدفمند انتخاب شده تا بتوان از میان آن‌ها گونه‌شناسی فرمی را برای تهویه درنظر گرفت و شرایط آن‌ها را با معیارهای از پیش تعیین شده که براساس هدف و سوال اصلی پژوهش تدوین شده‌اند، سنجید. بررسی کتابخانه‌ای انجام شده نشان می‌دهد که براساس آمار اداره اسناد سازمان میراث فرهنگی استان بوشهر، تعداد ۳۴ عمارت عمارت ثبت‌شده در بافت تاریخی بوشهر وجود داشته که ۲ عمارت جعفری و رحیم‌پور تخریب شده و هم‌اکنون ۳۲ عمارت ثبت‌شده و سالم که اغلب آن‌ها دارای کاربری هستند، وجود دارد که در جدول ۱ آورده شده‌است. از میان این ۳۲ عمارت، اجازه دسترسی از طرف مالک یا بهره‌بردار به ۲۲ عمارت به‌دلیل نوع کاربری و شرایط استفاده در طول سال وجود ندارد. با توجه به تمرکز این پژوهش بر روی حیاط، می‌توان گفت حیاط مرکزی در بوشهر هسته مرکزی خانه، فضایی با نظم هندسی، درون‌گرا، مستقل، محوری و مرکزی، سرگشوده و رو به آسمان است که ابعاد آن تابع اندازه زمین و متناسب با تعداد و نوع اتاق است. به‌دلیل رطوبت بالای منطقه در حیاط خانه بوشهری، حوض آب وجود ندارد. (رنجبر و همکاران، ۱۳۸۹، ۲۹). در این خانه‌ها سه گروه فضای نیمه‌باز، توده و فضای تهی با یکدیگر ترکیب شده‌اند و هریک از این فضاها در امتداد دیگری معنا می‌یابند. به این معنی که فضاها به تدریج، درجه باز و بسته‌بودن خود را از دست می‌دهند و یکی به دیگری تبدیل می‌شود. (اخوت، ۱۳۹۲، ۲۱۱) این پژوهش، درصدد است نقش اقلیمی و محیطی، حیاط را برحسب شکل هندسی و تاثیر آن بر تهویه فضای داخلی بررسی کند. در تمام موارد، حیاط در وسط خانه قرار دارد و برای آشکار شدن تاثیر فرم حیاط، از لحاظ کردن فضاهای نیمه باز صرف‌نظر شده است. تصویر ۲ دیاگرام حیاط را به عنوان ریه تنفسی یک بنا نشان می‌دهد.



تصویر ۲. حیاط به عنوان ریه تنفسی ساختمان (نگارندگان)

برای بررسی حیاط نیاز به شناخت گونه‌های مختلف آن احساس می‌شود. گونه‌شناسی به نوعی دسته‌بندی اشاره دارد که در آن تعدادی اشیا مختلف بر اساس یک یا مجموعه‌ای از ویژگی‌های مشترک سازمان‌دهی می شوند. پژوهشگران مختلف به بحث گونه‌شناسی بنا و عناصر معماری بوشهر پرداخته‌اند. رئیسی (۱۳۸۵، ۱۲-۷) در پژوهش خود با عنوان "ریخت‌شناسی حیاط مرکزی در خانه‌های بوشهر" جهت بررسی جنبه‌های مورفولوژیکی حیاط در خانه‌های بوشهر بیان می‌کند که این گونه‌شناسی از منظرهای زیر قابل بررسی می‌باشد:

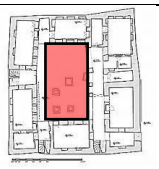
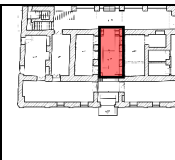
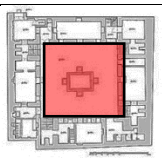
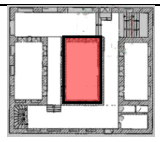
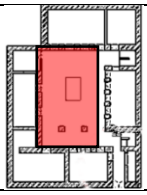
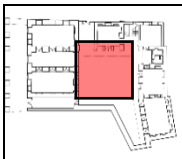
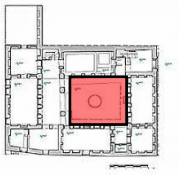
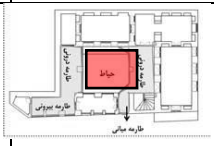
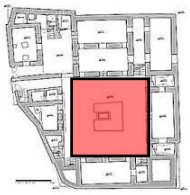
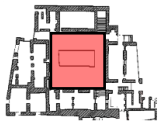
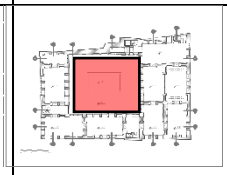
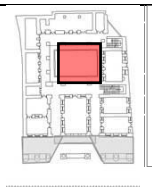
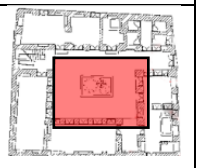
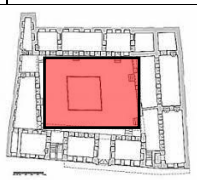
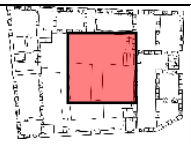
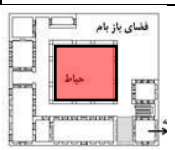
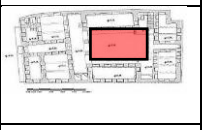
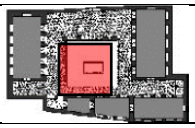
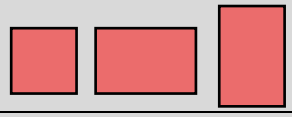
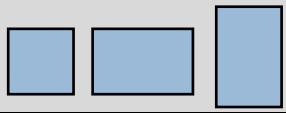
- موقعیت حیاط در خانه و همجواری
- جهت قرارگیری و کشیدگی
- نسبت ابعاد

- فرم حیاط
- بدنه‌های طبیعی و مصنوعی حیاط

رئیسی بیان می‌کند شکل حیاط عمدتاً چهار ضلعی منظم است. از آن‌جایی که هدف این پژوهش بررسی تاثیر تناسبات و ضخامت توده بنا بر تهویه است از میان موارد فوق در این نوشتار تمرکز بر تناسبات و فرم حیاط است.

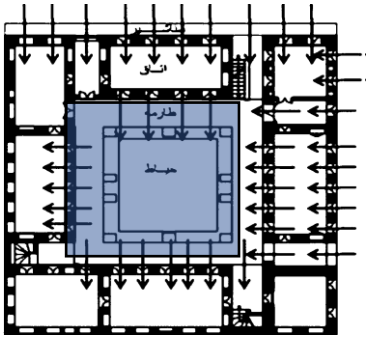
جدول شماره ۲ تعدادی از خانه‌های ارزشمند شهر بوشهر که دارای حیاط مرکزی هستند را نشان می‌دهد. در مجموع، بررسی گونه‌های مختلف نشان داد، فرم‌های مربع، مستطیل افقی و مستطیل عمودی متداول‌ترین شکل هندسی برای فرم حیاط بودند.

جدول۲. معرفی عمارت‌های ثبت‌شده واقع در بافت‌تاریخی بوشهر بر اساس اسناد سازمان میراث فرهنگی استان بوشهر-تمرکز بر روی فرم حیاط (نگارندگان برگرفته از آرشیو اداره کل میراث فرهنگی،صنایع دستی و گردشگری استان بوشهر)

					
طیب محله‌بهبهانی سالم-اداری	**تجارتخانه‌ایرانی** محله بهبهانی سالم- اداری	**گلشن** محله بهبهانی سالم-اداری	**علوی** محله‌بهبهانی سالم-مسکونی	**مرادی** محله بهبهانی سالم-مسکونی	**طاهری** محله بهبهانی سالم-اداری
					
رفیعی محله کوتی سالم مسکونی	**جعفری** محله بهبهانی تخریب‌شده	**کمندی** محله بهبهانی سالم بدون کاربری	**حاج رئیس** محله شنبدی سالم فرهنگی-اداری	**دهدشتی** محله شنبدی سالم فرهنگی اداری	**امیریه** محله کوتی سالم اداری
					
رشیدی محله کوتی سالم اقامتی	**جان نثار** محله‌کوتی سالم مسکونی	**آسیایی** محله‌کوتی سالم-مسکونی	**هفته** محله کوتی سالم فرهنگی اداری	**آذین** محله کوتی سالم مسکونی	**نجفی** محله کوتی سالم بدون کاربری
		**فرم غالب حیاط در خانه‌ها** 			
نوذری محله کوتی سالم- اداری آموزشی	**رستمی** محله کوتی سالم- مسکونی	**فرم غالب اتاق در خانه‌ها** 			

اتاق در معماری بوشهر

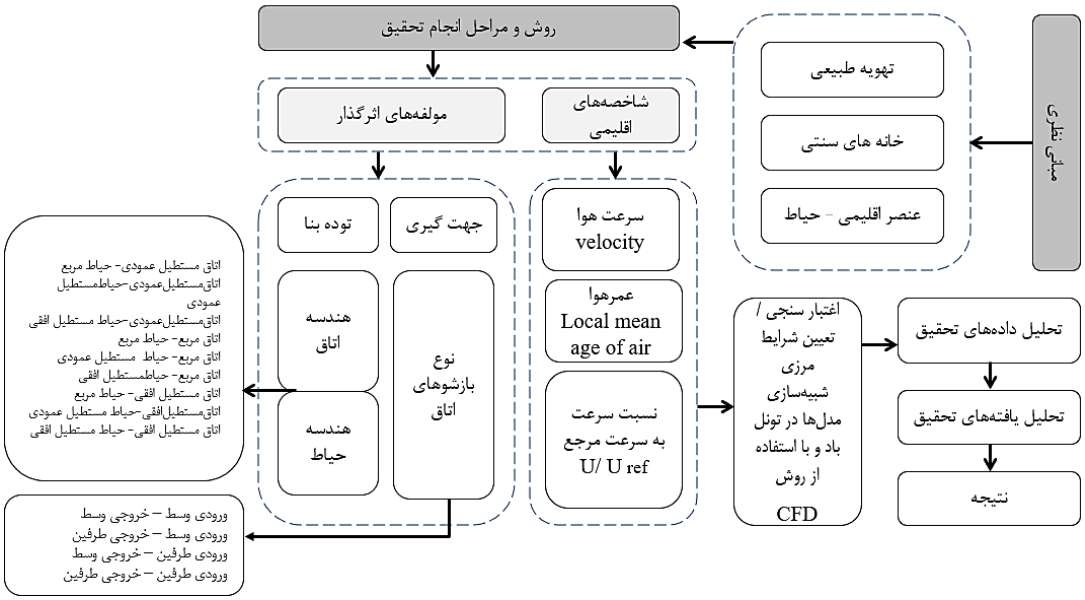
اتاق در خانه‌های سنتی بوشهر، فضایی محصور و مسقف، با نظم هندسی و متکی به حیاط است. بیشتر اتاق‌ها از یک سو از طریق بازشو با هم ارتباط دارند و می‌توان با باز گذاشتن بازشو بین اتاق‌ها باعث گستردگی فضا شد و از سوی دیگر از طریق بازشوهای متعدد با فضای بیرون و حیاط ارتباط داشت در فصول گرم با باز گذاشتن بازشوهای دو طرف، اتاق را به فضایی نیمه‌باز با امکان تهویه دوطرفه و بهره‌گیری از کوران بیشتر هوا تبدیل کرد. در این نوشتار تلاش شده تا فرم اتاقی که می‌تواند تعامل بهتری در جهت تهویه با فضای حیاط ایجاد کند نیز بررسی شود. تصویر ۳ تلاش دارد تا رابطه اتاق و حیاط را از منظر تهویه نشان دهد.



تصویر ۳. ایجاد حداکثر کوران هوا در اتاق عمارت طبیب (نگارندگان برگرفته از آرشیو اداره کل میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری استان بوشهر)

چارچوب نظری پژوهش

باتوجه به گونه‌شناسی انجام شده فرم مربع، مستطیل عمودی و مستطیل افقی برای این تحقیق مبنای ارزیابی قرار گرفته‌است. 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 بررسی‌های صورت گرفته و مطالعات انجام شده به اصلی‌ترین معیارها اشاره گردد. با توجه به محدودیت‌های پژوهش و گسترده بودن معیارها، سرعت هوا و عمر هوا را می‌توان به عنوان مرتبط‌ترین معیار نام برد. نمودار ۱ ساختار و چارچوب نظری پژوهش را نشان می‌دهد.



نمودار ۱. ساختار و چارچوب نظری پژوهش(نگارندگان)

روش تحقیق

مطابق ادبیات مطروحه، تحقیق حاضر ماهیت بین‌رشته‌ای دارد و روش تحقیق آن ترکیبی است. روش تحقیق به‌کار رفته در این مقاله شامل دو بخش کیفی و کمی است. در مرحله شناخت حیاط خانه‌های بوشهر از روش تحقیق کیفی استفاده شده‌است. بدین صورت که ابتدا با گردآوری اطلاعات از منابع کتابخانه‌ای و نیز برداشت‌های میدانی از خانه‌های بوشهر به تکمیل دانش پایه در مورد حیاط و مسکن در این اقلیم پرداخته شده‌است. در مرحله تحلیل داده‌ها، از روش تحقیق کمی استفاده شده‌است. بدین صورت که ابتدا پارامترهای موثر بر کیفیت تهویه طبیعی هوای داخل اتاق مشخص شد. در این مرحله با استفاده از یک راهبرد تجربی، آزمون‌هایی صورت پذیرفت و متغیرهای مستقل تاثیرگذار شناسایی شدند. فرم حیاط، فرم اتاق و نسبت توده به فضا، به‌عنوان متغیرهای مستقل و کیفیت جریان هوای داخل اتاق (سرعت و عمر هوا) به عنوان متغیر وابسته درنظر گرفته شده است. در این پژوهش از مدل‌سازی CFD به کمک نرم‌افزار Autodesk cfd 2018 استفاده شده‌است. باتوجه به فرم غالب خانه‌ها در بوشهر، ۹ گونه در ۳ طبقه انتخاب گردید(جدول ۴) که از نظر نسبت توده به فضا، دارای حالت‌های مختلف با تاثیرات متفاوت هستند. همچنین بازشوهای ورودی و خروجی اتاق‌ها برای تمامی مدل‌ها یکسان و به‌صورت بازشوی ورودی در طرفین و بازشوهای خروجی در وسط تعیین شد. این ۲۷ گونه به وسیله مهندسی محاسبات باد و با استفاده از روش تحقیق شبیه‌سازی و به کمک نرم‌افزار جهت ساخت مدل بهینه‌ای از ترکیب توده، حیاط و اتاق و ایجاد شبکه مش در اطراف و داخل مدل تحلیل شدند. برای برداشت میدانی داده‌ها و اعتبارسنجی نرم‌افزار عمارت دهدشتی (فضاهای طبقه دوم، حیاط و بام) آن درنظر گرفته شدکه پس از تطبیق داده‌های تجربی با شبیه‌سازی، صحت نرم‌افزار مورد تایید قرار گرفت. روش تحقیق در این پژوهش از منظر هدف در گروه پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است، به جهت خلاصه‌سازی انبوه داده‌های خام اولیه، برش افقی شبیه‌سازی تونل باد (در هر دو فاکتور سرعت جریان هوا، عمر هوا) صرفا در تراز ارتفاعی ۱۵۰ سانتیمتری از کف و برش عمودی از مرکز اتاق به عنوان ناحیه استنشاقی[۴] ساکنان درنظر گرفته شده‌است. ارتفاع ۱۵۰ سانتیمتری معیار مناسبی برای سنجش آسایش حرارتی یک فرد نشسته (۱۳۰ سانتیمتر) روی صندلی و نیز یک فرد ایستاده (با قد متوسط ۱۷۰ سانتیمتر) می‌باشد.

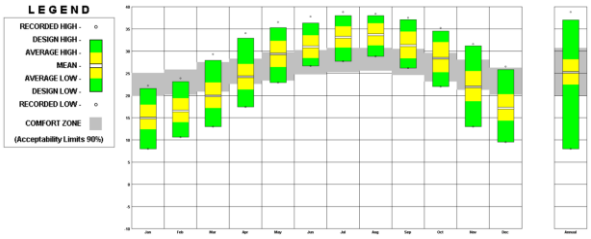
شرایط محیطی بوشهر و الگوی شکلی خانه‌ها

شبه جزیره بوشهر در ساحل شمالی خلیج فارس با ابعاد تقریبی ۲۰ در ۸ کیلومتر استقرار یافته‌است. با توجه به روش دومارتن[۵] که روشی برای تعیین اقلیم یک منطقه براساس درجه حرارت و بارندگی سالانه است و بر مبنای شاخص خشکی[۶]شده‌است، بوشهر شهری گرم و خشک تلقی می‌شود [۷] که به واسطه خلیج فارس طراوت می‌یابد. جدول شماره ۳ جایگاه اقلیمی بوشهر را بر اساس روش دومارتن نشان می‌دهد.

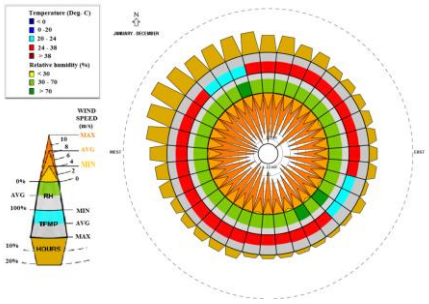
جدول ۳. محاسبه ضریب خشکی و ناحیه بندی ایستگاه های هواشناسی با استفاده از روش جغرافیائی دومارتن(خام‌چین مقدم و پژند، ۹۸،۱۳۸۸)

اقلیم	شاخص خشکی	دما(C)	بارش (MM)	ایستگاه
خشک	۸.۱	۲۴.۶	۲۷۹.۱	بوشهر
خشک	۸.۵	۲۵.۱	۲۹۷.۹	بوشهر ساحلی

دمای خشک بندر بوشهر، حداکثر دما، حداقل دما و متوسط دمای مربوط به هر ماه در تصویر ۴ و سرعت و جهت باد در تصویر ۵ مشخص شده‌است. میانگین بالاترین دما در بازه زمانی از ۱۰ تیر تا ۹ شهریور برابر ۳۶ درجه سانتیگراد است و از ۱۱ دی تا ۹ اسفند، در روز و شب نیاز به گرمایش می‌باشد. طبق تصویر ۴، از ۱۰ آبان تا ۱۰ دی و از ۱۱ اسفند تا ۱۱ فروردین در شب‌ها نیاز به گرمایش بوده و در روزهای این ماه‌ها شرایط آسایش برقرار است. در شب ها و روزها از ۱۰ تیر تا ۹ شهریور نیاز به سرمایش و در شب های بقیه ماه‌های سال آسایش برقرار و روزها هوا گرم می‌باشد. میانگین رطوبت نسبی در بندر بوشهر به طور متوسط بین ۶۰٪ تا ۷۰ ٪ است.



تصویر۴. نمودار دما درماه های سال در شهر بوشهر (برگرفته از نرم افزار climate consultant) (محمدی، ۱۳۹۷)

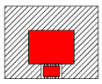


تصویر۵. متوسط سرعت و جهت بادهای محلی بوشهر در کل سال (برگرفته از نرم افزار climate consultant) (محمدی، ۱۳۹۷)

پیرامون ویژگی‌های گونه‌های غالب مسکونی در بوشهر باید توجه داشت که، گونه‌شناسی‌ها انجام شده، گونه خانه‌های سنتی حیاط‌مرکزی را دربرمی‌گیرد. کشیدگی این خانه‌ها، شرقی-غربی است تا در فصل تابستان کمترین میزان تابش و در فصل زمستان بیشترین میزان تابش را دریافت نمایند. پنجره‌ها به صورت کشیده عمودی هستند و فاصله پنجره‌ها تا کف تمام شده در فضاهای داخلی مدل‌های مذکور ۲۰ سانتیمتر است. جدول شماره ۴ جمع‌بندی حاصل از این گونه‌شناسی را بیان می‌کند.

جدول ۴. دسته‌بندی گونه‌ها(نگارندگان)

گونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

پلان									
اتاق	مستطیل عمودی	مستطیل عمودی	مستطیل عمودی	مربع	مربع	مربع	مستطیل افقی	مستطیل افقی	مستطیل افقی
حیاط	مربع	مستطیل عمودی	مستطیل افقی	مستطیل افقی	مستطیل عمودی	مربع	مربع	مستطیل عمودی	مستطیل افقی

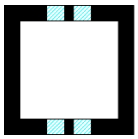
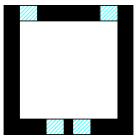
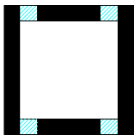
درنتیجه این یافته‌ها، جدول ۵ کلیات حجمی برای مدل پایه جهت اجرای شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.

جدول ۵. ویژگی‌های گونه‌های غالب مسکونی در بوشهر(نگارندگان)

مساحت هر طبقه بدون حیاط	مساحت اتاق‌ها	ارتفاع اتاق‌ها	مساحت حیاط	مساحت بازشوها
تقریبا ۵۶۰ مترمربع	تقریبا ۲۰ مترمربع	۴ متر	تقریبا ۱۵۰	۴۰ درصد از سطح نما (۴.۵ مترمربع)
اتاق‌ها: اغلب مستطیل شکل (متوسط ابعاد ۳.۵*۶ متر با ارتفاع ۴ متر)، حیاط‌ها: مربع یا مستطیل شکل. در خانه‌های بررسی شده بین ۲۵ ٪ تا ۳۵ ٪ مساحت زمین به حیاط اختصاص دارد. در خانه‌های بررسی شده بین ۱۵ ٪ تا ۱۷ ٪ سطح زیربنا به حیاط اختصاص دارد.				

۴ حالت بازشو، مطابق جدول ۶ در طبقات مختلف با شرایط مرزی یکسان در مقایسه با یکدیگر ایجاد شده‌اند. که این شرایط مرزی با شرایطی که برای اعتبار سنجی در نظر گرفته شده است یکسان است.

جدول ۶. حالت‌های مختلف بازشوهای ورودی/خروجی در گونه اتاق مربع(نگارندگان)

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

در این پژوهش با دسته‌بندی گونه‌ها، شبیه‌سازی تونل باد برای کلیه ۹ مدل در سه طبقه و با ۴ نوع بازشو انجام گرفت(جمعا ۱۰۸ حالت)، که برای رهایی از پرداختن به انبوه داده‌ها، ناچار به مطرح کردن نتیجه نهایی اکتفا شده‌است. (با توجه به این‌که در شبیه‌سازی‌های اولیه گونه شماره ۲ با ورودی و خروجی‌های غیر همراستا، موفقیت بیشتری کسب کرد، شبیه‌سازی‌های بعدی، بر روی این گونه صورت گرفته‌است.)

اعتبار سنجی

برای برداشت میدانی داده‌ها و اعتبارسنجی نرم‌افزار عمارت دهدشتی(تصویر۶) درنظر گرفته‌شد. عمارت دهدشتی بلندترین بنای بوشهر در زمان قاجار بوده که در چهار طبقه و از دیگر بناهای بوشهر بلندتر ساخته شده تا در فصل گرما با ورود باد از طریق پنجره های طبقات بالاتر چرخش هوای بیشتری اتفاق بیفتد و خانه به راحتی خنک شود. این عمارت به خاطر سیستم

ارتفاع بلند و ساخت در جهت وزش باد از خنک‌ترین خانه‌های شهر بوشهر در زمان قاجار محسوب می‌شده‌است، لذا در این پژوهش این عمارت برای اعتبارسنجی انتخاب شده‌است.

تصویر ۶. موقعیت عمارت دهدشتی(نگارندگان برگرفته از آرشیو اداره کل میراث فرهنگی،صنایع دستی و گردشگری استان بوشهر)

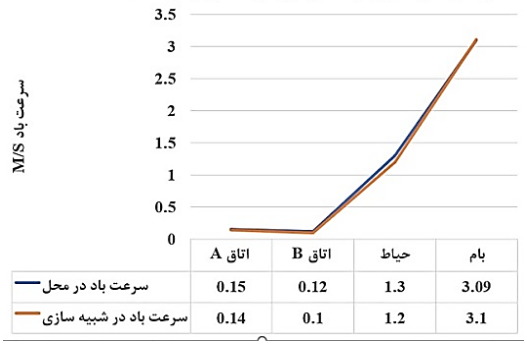
در راستای اعتبار سنجی، پس از تطبیق داده‌های تجربی برداشت شده در محل توسط دستگاه دقیق دیجیتال (جدول ۵) با شبیه‌سازی صحت نرم‌افزار مورد تایید قرار گرفت. به منظوربرداشت اطلاعات دقیق جریان هوا از دستگاه بادسنج دیجیتال هات‌وایراستفاده شده‌است. که، دارای پاسخ فرکانس بسیار بالا می‌باشد و تقریباً برای مطالعه 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 ۳۰ شهریورماه ۱۴۰۰ و در ارتفاع ۱.۵ متر (برای فرد ایستاده در ناحیه استنشاقی) در ۴ فضا (دو اتاق واقع در طبقه دوم، حیاط و بام) اندازه‌گیری شدند. جدول ۷ به معرفی دستگاه‌های مورد استفاده می‌پردازد.

جدول ۷. اطلاعات دستگاه‌های اندازه‌گیری برای جمع‌آوری داده‌های اقلیمی(نگارندگان)

نوع دستگاه	تصویر دستگاه	فاکتور	محدوده اندازه‌گیری	دقت اندازه‌گیری	رزولوشن
Hotwire anemometer. testo 405i		دما	-4°تا 140 °F -20 تا 60+ °C	±0.9 °F / ±0.5 °C	0.1 °F / 0.1 °C
		باد	0تا 5906 fpm / 0 تا 30 m/s	0 تا± (19.7 fpm + 5 % of mv) 394 fpm) / ± (0.1 m/s + 5 % of mv) (0 تا 2 m/s) 394 تا± (59.1 fpm + 5 % of mv) (2953 fpm) / ± (0.3 m/s + 5 % of mv) (2 تا15 m/s)	1.97 fpm / 0.01 m/s
Klima logger		رطوبت نسبی	0% 100 %		

نتایج نشان می‌دهد(نمودار ۲)، که بین داده‌های مدل برداشت شده (عمارت دهدشتی- تصویر ۷) و مدل شبیه‌سازی شده، عدم انطباق اندکی(حدود ۰.۵ درصد) دیده شد که طبق استاندارد اشری[۸] کمتر از ۱۰ درصد و قابل قبول است.

تصویر ۷. فضای داخلی عمارت دهدشتی(نگارندگان)

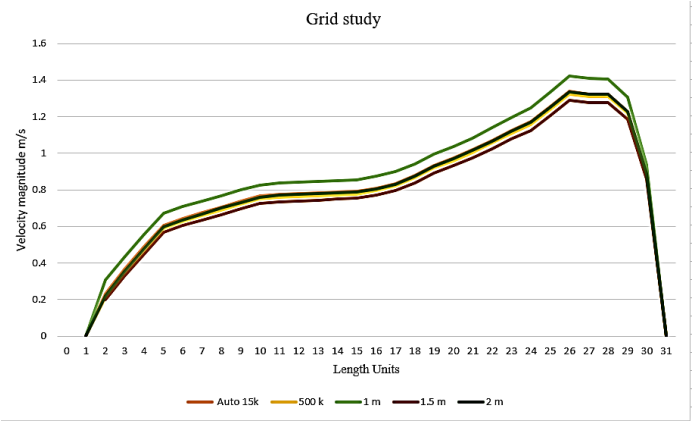


	اتاق A	اتاق B	حیاط	بام
سرعت باد در محل	0.15	0.12	1.3	3.09
سرعت باد در شبیه سازی	0.14	0.1	1.2	3.1

نمودار ۲. مقایسه سرعت هوا در شبیه‌سازی و آزمون تجربی برای اعتبار سنجی(نگارندگان)

بررسی استقلال از شبکه[۹]

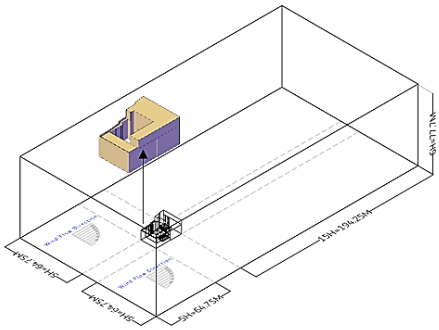
برای بررسی عدم وابستگی حل به مش، پس از ساختن مدل‌ها شبکه‌بندی آن‌ها به صورت خوکار(اتوماتیک)انجام شد. در گام اول تعداد شبکه به صورت اتوماتیک پانصد هزار سلول محاسباتی می‌باشد، در قدم بعدی هفتصد پنجاه هزار سلول محاسباتی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته‌شده و در هر گام شبکه ریزتر می‌شود. طبق نمودار ۳ نتایج نشان می‌دهد که متغییر سرعت هوا در ۲ میلیون گره به بالا تغییرات محسوسی ندارد، از این رو تعداد ۲ میلیون گره برای شبکه‌بندی در نظر گرفته‌است(تصویر ۹). با توجه به این‌که قصد 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.



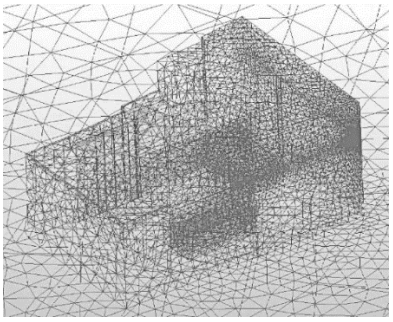
نمودار۳. استقلال از شبکه(نگارندگان)

شرایط مرزی معادلات حاکمه

جهت انجام آزمون‌ها، کلیه مدل‌ها با شرایط مرزی یکسان و برابر شرایط مرزی با شرایطی که برای اعتبارسنجی درنظرگرفته‌شده و بر اساس استاندارد تونل باد (تصویر ۸) در مقایسه با یکدیگر ایجاد شده‌اند.

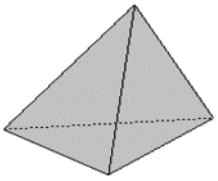


تصویر ۸. تونل باد(نگارندگان)

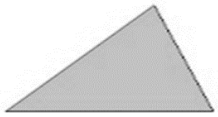


تصویر ۹. شبکه مش(نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار (Autodesk CFD 2018

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 می‌باشد که در معرض جریان هوای پایا قرار گرفته‌است. جهت گسسته‌سازی حجم دامنه از المان‌های شبکه چهاروجهی (Tetrahedral) مطابق تصویر ۱۰ و جهت گسسته‌سازی سطوح هندسه از المان‌های مثلثی (Triangular) طبق تصویر ۱۱ استفاده شده‌است و در نواحی دارای گرادیان شدید، تراکم بالاتری از شبکه ایجاد شده‌است.



تصویر۱۰. المان چهار وجهی(نگارندگان)



تصویر۱۱. المان مثلثی(نگارندگان)

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

(wilcox, 2006) .(۱)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

معادله مومنتوم برای جریان آشفته به همراه ویسکوزیته آشفته (v_t) در معادله زیر آمده‌است.

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v + v_t)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right]$$ (wilcox, 2006) .(۲)

در معادلات فوق u_i سرعت سیال، ρ دانسیته سیال و p فشار می‌باشد.

با توجه به عدد رینولدز بالای 4.5 میلیون در این شبیه‌سازی، جریان آشفته بوده و مدل آشفتگی به‌کار رفته، مدل دو معادله‌ای k-ε می‌باشد. معادلات این مدل در روابط (۴) تا (۶) آورده شده است. انرژی جنبشی آشفته با نماد k به صورت تابعی از زمان بوده که از معادله زیر به دست می‌آید و یکی از پارامترهای مهم این معادله P_k می‌باشد که تولید انرژی جنبشی آشفته به علت گرادیان‌های سرعت متوسط می‌باشد. لازم به ذکر از 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 اجتناب ناپذیر می‌باشد.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \frac{P_k}{\rho} - \varepsilon$$ (wilcox, 2006) .(۳)

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

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_1 S\varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}}$$ (wilcox, 2006) .(۴)

$$P_k = -\rho \overline{u_i' \, u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$ (wilcox, 2006) .(۵)

$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right], \qquad \eta = S\frac{k}{\varepsilon}, \qquad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$ (wilcox, 2006) .(۶)

ویسکوزیته سینماتیکی آشفته نیز از روابط (۷) و (۸) به‌دست می‌آید.

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$ (wilcox, 2006) .(۷)

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$ (wilcox, 2006) .(۸)

سایر پارامترها نیز توسط روابط (۹) تا (۱۴) به‌دست می‌آیند.

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$ (wilcox, 2006) .(۹)

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

$$\widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$ (wilcox, 2006) .(۱۰)

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$ (wilcox, 2006) . (۱۱)

$$A_0 = 4.04 \ , \qquad A_s = \sqrt{6}cos(\phi)$$ (wilcox, 2006) . (۱۲)

$$\phi = \frac{1}{3}cos^{-1}(\sqrt{6}W) \ , \qquad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \ ,$$ (wilcox, 2006) . (۱۳)

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \ , \qquad S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j})$$ (wilcox, 2006) . (۱۴)

ثابت‌های این مدل که ضرایب تجربی مدل دو معادله‌ای k-ε هستند، مطابق رابطه (۱۵) به‌دست می‌آیند.

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \ , \qquad C_2 = 1.9 \ , \qquad \sigma_k = 1.0 \ , \qquad \sigma_\varepsilon = 1.2$$ (wilcox, 2006) . (۱۵)

جهت حل این معادلات نیاز است تا شرایط مرزی تعیین گردد. شرایط مرزی دریچه‌ها بدون محدودیت و آزاد درنظر گرفته شده تا در شرایط پرفشار یا کم‌فشار حاکم بر آن‌ها عملکرد صحیح دریچه‌ها مشخص گردد. سیال مورد استفاده هوا می‌باشد. در مطالعه حاضر جریان هوا به صورت پایا می‌باشد. 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 شده‌است. علاوه بر این، تمرکز مطالعه حاضر روی تهویه هوای ساختمان و میزان تازگی جریان هوای ورودی می‌باشد.

سیال جریان باتوجه به سرعت‌ورودی ۷.۶ متر بر ثانیه (سرعت باد در محل) غیرقابل‌تراکم[۱۰] فشار ۱۰۱۳۲۵ پاسکال[۱۱] است. در انتخاب مدل لزجت[۱۲] باتوجه به شرایط جریان؛ از مدل آشفتگی k- epsilon استفاده گردید. معادلات پیوستگی[۱۳]، ممنتوم[۱۴] و k- epsilon، حاکم بر جریان بودند و محدوده خطا برای حل این معادلات le-۰۴ و تعداد تکرار معادلات ۵۰۰۰ درنظر گرفته‌شد و پس از ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ تکرار همگرا گردیدند. در آنالیز مدل‌ها از بردارهای سرعت، فشارهای دینامیکی و اختلاف فشار ایجاد شده در اطراف و داخل مدل استفاده‌شد. زاویه برخورد باد به ساختمان زاویه عمود و به صورت ۹۰ درجه است. مصالح بنا آجر و دمای محیطی ۳۳.۲ سانتی‌گراد (دمای برداشت‌شده در محل) درنظر گرفته‌شد.

حالت حل: حالت ثابت
تراکم پذیری: تراکم ناپذیر
مدل آشفتگی: آشفته. k-epsilon
فضا: سه بعدی
فشار عملیاتی: ۱۰۱۳۲۵ پاسکال

شرایط مرزی:
سرعت: ۷.۶ (بر اساس داده‌های انرژی پلاس)
دما: ۳۳.۲ سانتیگراد
فشار: ۰ پاسکال
تکرار برای اجرا: ۵۰۰۰
تعداد مش: ۲ میلیون
جنس مصالح : آجر

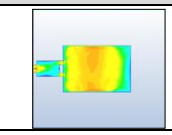
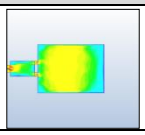
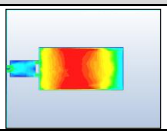
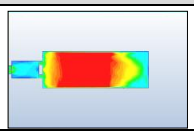
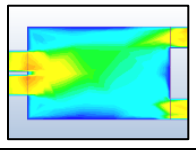
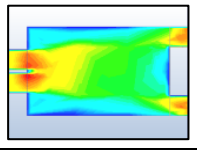
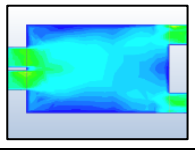
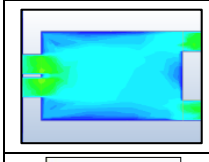
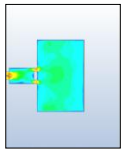
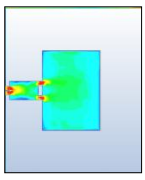
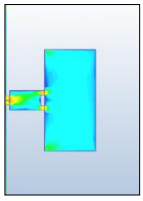
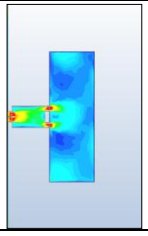
تحلیل یافته‌ها

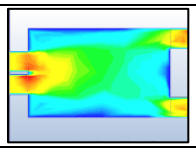
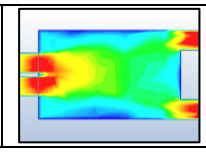
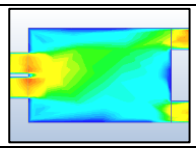
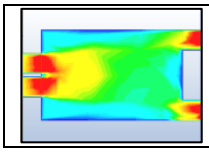
فرم و ویژگی‌های کالبدی یک ساختمان تاثیر بسزایی بر نحوه رفتار باد دارد. پژوهش حاضر به خاطر نیاز مبرم بوشهر به تهویه طبیعی، بر مبنای طراحی بادمحور است. تغییر تناسبات کالبدی حیاط مرکزی اعم از شکل کلی حیاط، تناسبات حیاط و نیز ساختار فرمی جداره‌های آن(میزان توده) بر روی فرایند تهویه طبیعی نقش دارد. بررسی جریان هوای داخل حیاط مرکزی تحت تاثیر باد خارج و مکانیزم تلطیف هوای داخلی در دست‌یابی به راهبردهای طراحی‌های اقلیمی و بادمحور بسیار مؤثر است.

تاثیر تناسبات بر تهویه

همان‌طور که اشاره شد، شکل‌های هندسی مربع و مستطیل (در دو حالت افقی و عمودی) متداول‌ترین شکل‌های هندسی برای حیاط می‌باشد. درنتیجه، با احتساب حیاط مربع (با نسبت اضلاع ۱به۱)، در این مرحله نیاز است تا دیگر نسبت‌های حیاط مستطیل‌شکل نیز مقایسه و گونه بهینه به‌دست آید. به همین منظور، ابتدا ۴ نسبت دیگر اضلاع حیاط با احتساب ضخامت ۷متر توده مطابق جدول ۸ درنظر و شبیه‌سازی برای مولفه سرعت جریان هوا انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد، با افزایش نسبت طول به عرض مستطیل از ۱/۱.۱۵ به ۱/۳، در حالت مستطیل عمودی ابتدا سرعت جریان هوا در فضای اتاق افزایش و سپس کاهش می‌یابد، ولیکن در مستطیل افقی سرعت تقریبا از روند یکنواخت‌تری پیروی می‌کند. از آنجایی که شکل‌های کشیده‌تر ۱/۲ و ۱/۳ برای حیاط‌مرکزی هم کمتر متداول بوده و هم شرایط فشرده‌تر تهویه‌ای ایجاد می‌کند، درنتیجه، تناسبات ۱/۱.۳ هم فراوانی مطلوبی در نمونه‌های واقعی و هم مقدار کشیدگی لازم برای برجسته‌کردن تفاوت مولفه‌های کیفیت هوا را دارد.

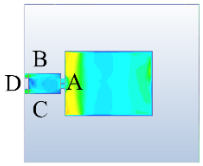
جدول ۸. شبیه‌سازی سرعت جریان هوا برای تناسبات مختلف حیاط(نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018)

راهنما سرعت (متر/ثانیه)	گونه	نسبت عرض به طول حیاط			
		۱ به ۱/۱۵	۱ به ۱/۳	۱ به ۲	۱ به ۳
3.00 2.90 2.80 2.70 2.60 2.50 2.40 2.30 2.20 2.10 2.00 1.90 1.80 1.70 1.60 1.50 1.40 1.30 1.20 1.10 1.00 0.90 0.80 0.70 0.60 0.50 0.40 0.30 0.20 0.10 0.00	حیاط مستطیل عمودی و اتاق مستطیل عمودی				
					
	حیاط مستطیل افقی و اتاق مستطیل				

	عمودی				

تاثیر ضخامت توده بنا بر تهویه

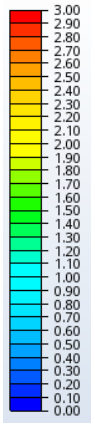
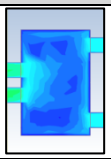
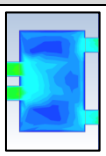
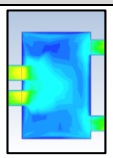
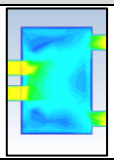
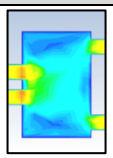
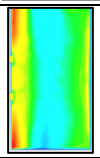
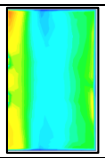
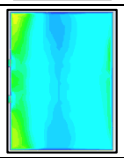
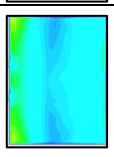
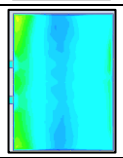
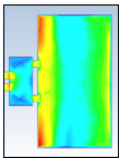
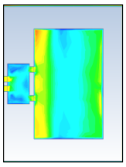
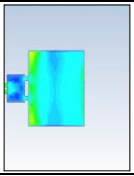
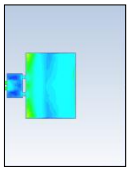
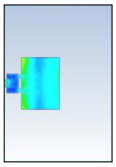
پیرامون نحوه تاثیر «ضخامت توده» بر کیفیت تهویه طبیعی، یافته‌ها نشان می‌دهد، تغییرات ضخامت توده بر سرعت و کیفیت تهویه حیاط و اتاق تاثیر قابل‌توجهی دارد. به همین منظور، در سه قسمت، تاثیر تغییرات ضخامت توده بررسی شد. نام‌گذاری اضلاع در تمام مراحل شبیه‌سازی از روش زیر(تصویر ۱۲) پیروی می‌کند: ضلع A در جبهه‌ی رو به باد، ضلع D در جبهه‌ی پشت به باد و اضلاع B و C در جبهه‌های عمود بر راستای باد قرار دارند.



تصویر ۱۲. نامگذاری اضلاع(نگارندگان)

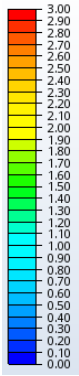
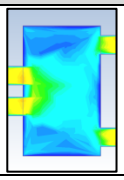
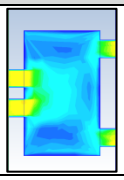
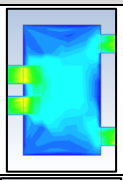
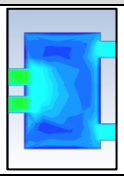
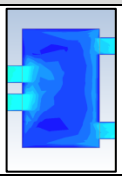
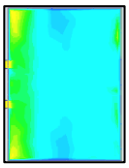
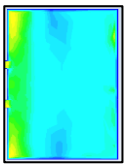
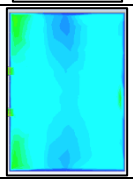
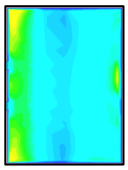
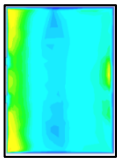
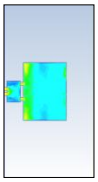
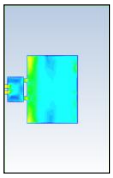
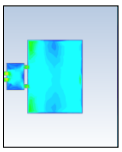
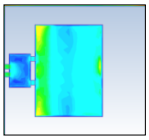
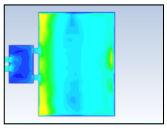
در تمامی حالت‌ها، ضخامت ضلع D (که در آن اتاق قرار دارد) ثابت ماند. در قسمت اول هر سه ضلع A، B و C به صورت یکسان تا طول ۱۵متر افزایش پیدا کرد. در قسمت دوم ضلع A به طول ۷ متر ثابت و اضلاع B و C تغییر کردند و درنهایت در قسمت سوم با ثابت ماندن ضلع‌های B و C (۷متر)، تغییرات ضلع A بررسی شد. یافته‌ها نشان می‌دهد، با افزایش هم‌زمان ضخامت توده هر سه ضلع حیاط از ۱ متر به ۱۵ متر مطابق جدول ۹، میزان سرعت باد در حیاط و اتاق کاهش می‌یابد.

جدول ۹. ضخامت توده یکسان برای ضلع‌های A، B و C (نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018)

راهنما سرعت (متر/ثانیه)	ضخامت (متر)	۱۵	۱۱	۷	۳	۱
	اتاق					
	حیاط					
	توده					

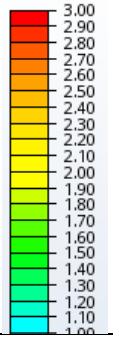
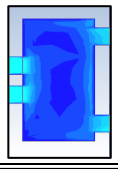
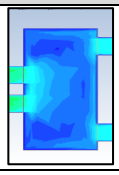
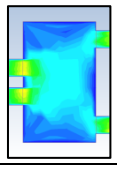
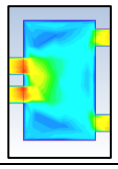
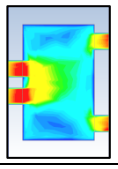
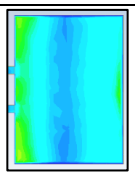
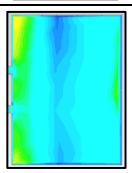
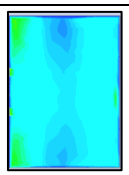
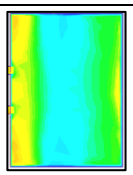
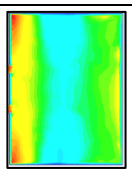
همچنین یافته‌های جدول ۱۰ نشان می‌دهد، با ثابت ماندن ضخامت توده ضلع A به میزان ۷ متر و افزایش ضخامت توده ضلع‌های B و C از ۱ تا ۱۵متر، افزایش ضخامت موجب افزایش قابل‌توجه سرعت باد در اتاق می‌شود، ولیکن بر روی سرعت جریان هوا در حیاط اثر محسوسی ندارد.

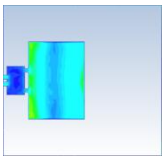
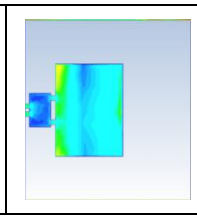
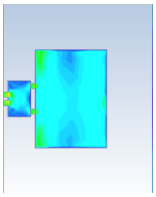
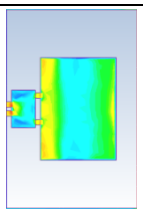
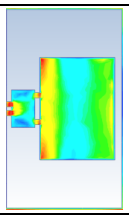
جدول ۱۰. ضخامت توده ضلع A ثابت (۷ متر)، ضخامت توده ضلع B و C متغیر(نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018)

راهنما سرعت (متر/ثانیه)	ضخامت (متر)	۱۵	۱۱	۷	۳	۱
	اتاق					
	حیاط					
	توده					

جدول ۱۱ نشان می‌دهد، با ثابت ماندن ضخامت توده ضلع‌های B و C به میزان ۷ متر و افزایش ضخامت توده ضلع A از ۱ متر به ۱۵ متر، کاهش سرعت چشمگیری در سرعت جریان هوای حیاط و اتاق نمایان است. همچنین در ادامه و در جدول ۱۰ کانتورهای حاصل از شبیه‌سازی گونه شماره ۲ به عنوان یک گونه نمونه برای مقایسه هر سه مولفه کیفیت هوا، در چهار حالت مختلف بازشو و برای سه تراز ارتفاعی (طبقه همکف، اول و دوم) ارایه می‌گردد.

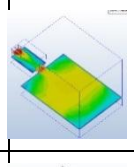
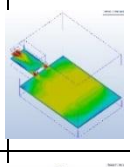
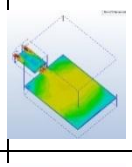
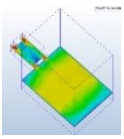
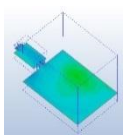
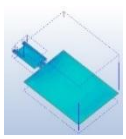
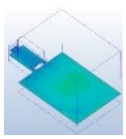
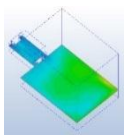
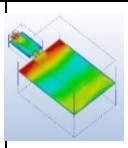
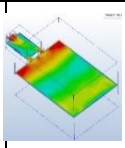
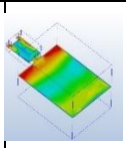
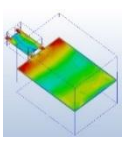
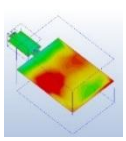
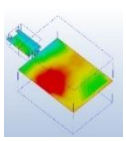
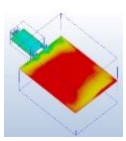
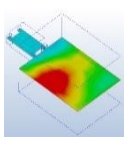
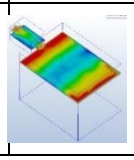
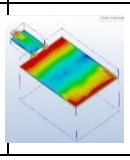
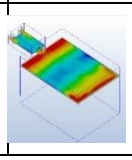
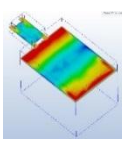
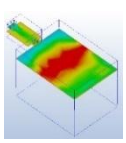
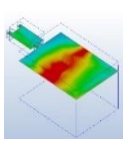
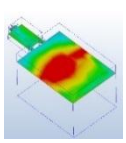
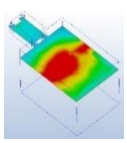
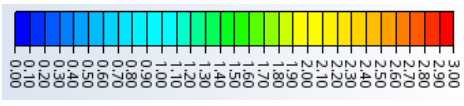
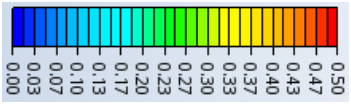
جدول ۱۱. ضخامت توده ضلع‌های B و C ثابت (۷متر)، ضخامت توده ضلع A متغیر(نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018)

راهنما سرعت (متر/ثانیه)	ضخامت (متر)	۱۵	۱۱	۷	۳	۱
	اتاق					
	حیاط					

	توده					

جدول شماره ۱۲ اطلاعات مربوط به گونه شماره ۲ را نشان می‌دهد.

جدول۱۲. کانتورهای حاصل از شبیه‌سازی گونه شماره ۲ (نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018)

طبقه	سرعت جریان هوا				عمر هوا			
	ورودی وسط خروجی وسط	ورودی وسط خروجی‌طرفین	ورودی‌طرفین خروجی وسط	ورودی طرفین خروجی طرفین	ورودی وسط خروجی وسط	ورودی وسط خروجی طرفین	ورودی طرفین خروجی وسط	ورودی طرفین خروجی طرفین
همکف								
اول								
دوم								
راهنما								
	سرعت M/S				عمر هوا H/S			

همانطور که پیش‌تر بیان شد، این مقاله ۹ گونه مختلف ترکیب حیاط و اتاق به شکل‌های مستطیل عمومی، مربع و مستطیل افقی را در ۳ تراز ارتفاعی همکف، اول و دوم، با درنظرگرفتن دو مولفه سرعت جریان هوا، عمرهوا شبیه‌سازی کرده است. در ادامه، یافته‌های این پژوهش بر اساس مولفه‌های سرعت جریان هوا، عمر هوا بحث می‌شوند.

الف: سرعت جریان هوا:

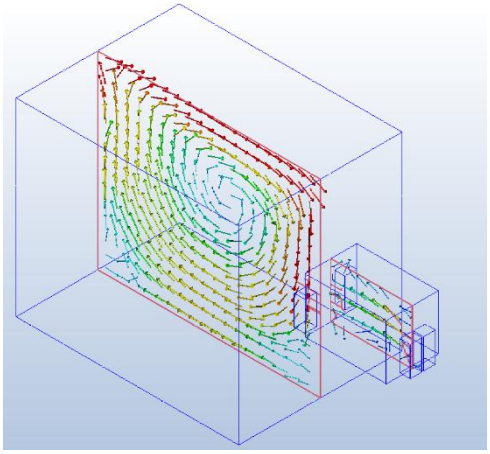
- تصاویر گرافیکی نشان می‌دهد، گونه‌های حیاط مستطیل عمودی بهینه‌ترین فرم حیاط از نظر سرعت جریان هوا است که بر گونه حیاط‌های مربع، برتری نسبی داشته و با اختلاف زیاد عملکرد بهتری در مقایسه با گونه‌های حیاط مستطیل افقی دارد. دلیل این امر را می‌توان اینگونه بیان کرد که حیاط مستطیل عمودی به دلیل همراستا بودن ضلع بلندتر آن با مسیر جریان باد و نیز قرارگیری ضلع کوتاهتر عمود بر جریان باد، کوران باد قوی‌تری ایجاد می‌کند(پدیده کانالیزاسیون) و در مقابل آن حیاط مستطیل افقی به دلیل قرارگرفتن ضلع بلندتر عمود بر مسیر جریان، باعث ضعیف‌تر شدن شدت جریان باد و در نتیجه کوران باد بسیار ضعیف‌تری را ایجاد می‌کند. در همین راستا داده‌ها نشان می‌دهد، در تمامی گونه‌های مختلف

حیاط به‌صورت محسوسی، حیاط‌های دارای اتاق‌های مستطیل عمودی نیز از این قاعده پیروی می‌کنند و به دلیل فرم کشیده خود، سرعت جریان بهتری را نشان می‌دهد. از همین روست که در میان گونه‌های حیاط مستطیل عمودی، گونه شماره ۲ با اتاق مستطیل عمودی از گونه‌های ۵ و ۸ با اتاق‌های مربع و مستطیل افقی سرعت جریان هوای بیشتری را نشان می‌دهد.

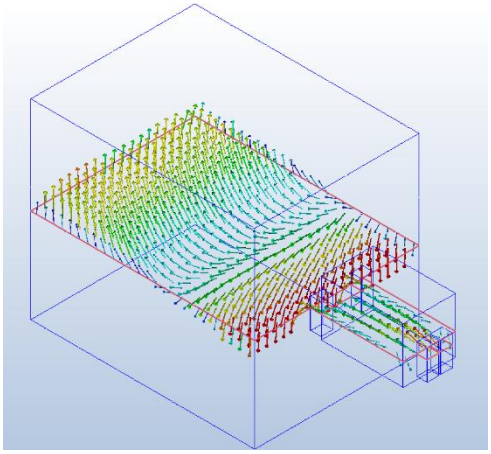
- الگوی جریان هوا در تمامی فرم‌های مختلف حیاط از قاعده‌ی یکسانی پیروی می‌کند. عموما سرعت جریان هوا از محور مرکزی حیاط به صورت خطی به سمت ضلع D که در آن اتاق قرار دارد و نیز ضلع روبه‌رویی آن A، با اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به مکانیسم شبیه‌سازی تونل باد و مسیر یک‌طرفه وزش باد نسبت داد. همچنین ضلع D نسبت به A سرعت بیشتری را در فضای محدود نزدیک به خود جداره‌ها نشان داده است.
- از بعد تاثیر افزایش ارتفاع بر سرعت جریان هوا می‌توان گفت، به صورت کلی در تمامی گونه‌ها با افزایش ارتفاع سرعت جریان هوای حیاط نیز به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد.

ب: عمر هوا:

- داده‌ها نشان می‌دهد، گونه حیاط‌های مستطیل عمودی با اختلاف کمی نسبت به مربع و با اختلاف زیاد نسبت به مستطیل افقی عمرهوای کمتر و کیفیت هوای تازه‌تری دارند.
- قاعده کلی الگوی عمرهوا در تمامی فرم‌های مختلف حیاط به این صورت است که، در مرکز حیاط بیشترین مقدار و در گونه‌ی حیاط‌های مربع به صورت کروی از مرکز به سمت ضلعی که در آن بازشوهای اتاق قرار دارد و نیز ضلع روبه‌رویی آن و نیز گوشه‌های اضلاع، کاهش می‌یابد. همین رویه، در گونه‌های حیاط مستطیل‌عمودی و افقی به‌صورت خطی اتفاق می‌افتد.
- یک قاعده‌ی کلی نمایان در تمامی گونه‌ها این است که، طبقه همکف عمر هوای کمتر و تهویه مطبوع‌تری را نشان می‌دهد، ولیکن با افزایش تراز ارتفاعی از طبقه همکف به اول و دوم، عمر هوا افزایش و کیفیت هوای تازه کاهش می‌یابد. تصویر ۱۳ و ۱۴ بردارهای جریان هوا را نمایش می‌دهند.



تصویر۱۳. بردارهای جریان هوا در مقطع عمودی(مرکز اتاق گونه۲. طبقه دوم. حالت ج (نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018)



تصویر۱۴. بردارهای جریان هوا در مقطع افقی (ارتفاع ۱.۵ متری از کف اتاق). گونه۲. طبقه دوم. حالت ج(نگارندگان برگرفته از نرم‌افزار Autodesk CFD 2018)

نتیجه‌گیری

بر اساس این پژوهش میزان توده، فرم و تناسبات حیاط، فاکتورهای اصلی در میزان بهره مندی از تهویه طبیعی هستند. تحلیل یافته‌های این مقاله در مدل‌سازی گونه‌های مختلف شکل هندسی حیاط و اتاق برای تعیین تاثیر شکل هندسی حیاط

بر کیفیت تهویه طبیعی در فضای اتاق در خانه‌های حیاط‌مرکزی اقلیم گرم و خشک ساحلی بوشهر نشان می‌دهد، مجموعه‌ای از قواعد کلی بر نتایج این مقاله حاکم است که مبتنی بر استفاده بهینه از تهویه طبیعی است. نتایج شبیه‌سازی تناسبات حیاط و ضخامت توده از آن جهت برای طراحان و برنامه‌ریزان معماری و شهری مهم است، که می‌توانند با راهکارهایی همچون کاهش نسبت توده و فضای خالی در جبهه‌هایی که امکان استفاده از باد غالب را دارد، یا افزایش این نسبت برای پرهیز از باد و تابش مزاحم، این عوامل اقلیمی مطلوب یا مزاحم را به بهینه‌ترین روش مدیریت کنند. در نگاه کلی خانه‌های حیاط مرکزی دارای تناسبات طول به عرض ۱.۳ به ۱ از نظر توزیع جریان هوا عملکرد بهتری داشته و همین امر موجب شده گرادیان دما در فضای داخل حیاط کاهش یابد. که این شرایط ارتباط مستقیم با تناسبات هندسی و جداره‌های حیاط‌ها دارد. با توجه به شبیه‌سازی‌ها نحوه توزیع جریان و سرعت باد را در یک ارتفاع معین نزدیک به زمین نشان می‌دهد؛ که با توجه به بسته بودن حیاط مرکزی، جریان باد بعد از برخورد با مانع به علت عدم وجود روزن‌هایی برای حرکت هوا دچار حرکت چرخشی می‌شود. سرعت باد در محوطه حیاط مرکزی نسبت به باد آزاد منطقه، کاهش می‌یابد. با لحاظ کردن عمر هوا، گونه‌های «حیاط مستطیل عمودی» بهینه‌ترین گردش هوای حیاط و گونه‌های «حیاط مستطیل عمودی» و «حیاط مربع» بهینه‌ترین کیفیت هوای تازه در فضای اتاق را تامین می‌کند. در این میان، گونه شماره ۲ بهینه‌ترین کیفیت تهویه طبیعی را فراهم می‌کند. از بعد الگوی حرکت باد در حیاط می‌توان گفت، در اغلب گونه‌ها رفتار باد به صورت خطی از مرکز به سمت طرفین بوده است. طبقه همکف، کیفیت هوای بهتری را در فضای اتاق نشان می‌دهد، ولیکن با افزایش تراز ارتفاعی، هر دو مولفه افزایش می‌یابد. این‌ها مواردی است که این پژوهش به آن پاسخ داده است. مطمئناً بسیاری از شکاف را در این راستا وجود دارد که هنوز بر طرف نشده است. پیشنهاد می شود محققان آتی جنبه های دیگر این پژوهش را مورد بررسی قرار دهند از جمله:

- قرار گرفتن اتاق در سمت رو به باد در مقایسه با وضعیت سمت پشت به باد چه تأثیری دارد؟
- تأثیر جهت باد متفاوت بر عملکرد تهویه متقاطع اتاق های در ارتباط با حیاط چیست؟
- تأثیر عرض حیاط بر عملکرد تهویه متقابل اتاق مجاور چیست؟
- حیاط مسقف در مقایسه با حیاط روباز چگونه رفتار می‌کند؟

با این حال، اکیداً توصیه می‌شود که قبل از تلاش برای مطالعه اثرات ترکیبی پدیده‌های مختلف و متغیرها، ابتدا فیزیک اساسی حاکم بر عملکرد ساختمان حیاط را درک گردد. این مقاله گامی در این جهت ارائه می‌دهد.

پی‌نوشت

[1] Computational Fluid Dynamic
[2] velocity
[3] Local mean age of air
[4] Living zone
[5] De Martonne
[6] Aridity index

[۷] فرمول محاسبه(A=P/(T+10 - (ضریب خشکی دومارتن =A / میزان بارندگی سالانه به میلیمتر(mm) = P / درجه حرارات سالانه(c) = T)

خشک: A<10 (خام‌چین مقدم و پژند، ۱۳۸۸:۹۸)

[8] ASHRAE
[9] Grid study
[10] incompressible
[11] Pascal

[12] Viscose Model
[13] Continuity
[14] Momentum

فهرست منابع

- احمدی، فرهاد.(۱۳۸۴). ***شهر خانه حیاط مرکزی(شهر-خانه پایدار، شهر خانه آیینی)***. صفه، ۴۱، ۹۰-۱۱۳.
- اخوت، هانیه. (۱۳۹۲). ***بازشناسی هویت دینی در مسکن سنتی (نمونه موردی: شهر یزد)***. استاد راهنما محمدرضا بمانیان، مجتبی انصاری، رساله دکتری رشته معماری. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده هنر و معماری، تهران، ایران.
- آرشیو اداره کل میراث فرهنگی،صنایع دستی و گردشگری استان بوشهر.
- تابان، محسن، پورجعفر، محمدرضا، بمانیان، محمودرضا، حیدری، شاهین. (۱۳۹۲). ***تعیین الگوی بهینه حیاط مرکزی در مسکن سنتی دزفول با تکیه بر تحلیل سایه دریافتی سطوح مختلف حیاط***. باغ نظر، ۲۷(۱۰)، ۳۹-۴۸.
- خام‌چین مقدم، فرهاد، رضائی پژند، حجت. (۱۳۸۸). ***نقد روش اقلیم‌بندی دومارتن برای بارش حداکثر روزانه در ایران به کمک روش گشتاورهای خطی***. مجلهٔ فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، ۲(۲)، ۹۳-۱۰۳.
- رنجبر، حسان و پورجعفر، محمدرضا و خلیجی، کیوان. (۱۳۸۹). ***خلاقیت‌های طراحی اقلیمی متناسب با جریان باد در بافت قدیم بوشهر***. *باغ نظر*، ۱۳(۷)، ۳۴-۱۷.
- رهایی، امید، و عظمتی، حمیدرضا. (۱۳۹۹). ***ارتقای کیفیت تهویه طبیعی در کلاس های مدارس استان مازندران بر اساس وضعیت بازشوها با روش CFD***. معماری و شهرسازی ایران، ۱۱(۱۹)، ۵۷-۷۱.
- رئیسی، ایمان.(۱۳۸۵). ***ریخت شناسی حیاط مرکزی درخانه های بوشهر***. شارستان ، ۱۳-۱۴، ۷-۱۲.
- زارعی محمدابراهیم، و میردهقان سیدفضل الله. (۱۳۹۵). ***نقش الگوی حیاط مرکزی در تعدیل شرایط سخت اقلیم گرم و خشک منطقه یزد***. مطالعات شهر ایرانی اسلامی، ۶(۲۳)، ۵-۱۸.
- زینلیان، نفیسه، و اخوت، هانیه. (۱۳۹۶). ***ساختارشناسی حیاط در خانه های قجری اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب با تمرکز بر گونه «حیاط مرکزی» (مطالعه موردی: خانه های یزد و دزفول)***. مطالعات شهر ایرانی اسلامی، ۸(۳۰)، ۱۵-۲۹.
- سلیقه، الهام، و سعادت جو، پریا. (۱۳۹۸). ***بررسی نقش تخلخل در خودسایه اندازی و کاهش انرژی دریافتی جداره‌ها در ساختمان های اقلیم گرم و مرطوب***. نقش جهان، ۹(۴)، ۲۷۱-۲۵۷.
- قبادیان، وحید. (۱۳۸۲). ***بررسی اقلیمی ابنیه سنتی ایران***. تهران، دانشگاه تهران.
- قدسی، مهرنوش، دانشجو، خسرو، مفیدی‌شمیرانی، سیدمجید. (۱۳۹۷). ***تبیین شاخص های هندسی موثر بر رفتار حرارتی ساختمان‌های مسکونی در اقلیم گرم و خشک (نمونه موردی: یزد)***. نقش جهان - مطالعات نظری و فناوری‌های نوین معماری و شهرسازی، ۸(۳)، ۱۴۳-۱۴۸.
- لکنر پ، ن.(۱۳۸۵). ***گرمایش، سرمایش و روشنایی***. دانشگاه هنر اسلامی تبریز.
- مرادی، ساسان، متین راد، مهرداد، فیاض، ریما، دهباشی شریف، مزین(۱۳۹۷). ***گونه شناسی خانه‌های سنتی حیاط‌دار تبریز بر اساس معیارهای کالبدی مؤثر بر عملکرد اقلیمی حیاط مرکزی***. مدیریت شهری، ۵۱، ۸۷.۱۰۵.
- محمدی امین. *(۱۳۹۷). **تاثیر راه‌کارهای غیرفعال بر مصرف انرژی در مناطق گرم و مرطوب: بررسی موردی روش‌های سرمایشی بومی در ساختمان‌های مسکونی متداول شهر بوشهر**. استاد راهنما: محمودرضا ثقفی، منصوره طاهباز، استاد مشاور: فرشاد نصرالهی،پایان‌نامه دکتری، دانشگاه هنر اصفهان.*
- مردانی، علی، روسایی، امین. (۱۴۰۰). ***تأثیر الگوی هندسی حیاط مرکزی بر جریان هوا در خانه‌های سنتی شوشتر***. مطالعات شهر ایرانی-اسلامی، ۱۱(۴۳)، ۷۱-۸۰.
- وکیلی‌نژاد رزا، مهدی‌زاده سراج فاطمه، مفیدی شمیرانی سیدمجید. (۱۳۹۲). ***اصول سامانه‌های سرمایش ایستا در عناصر معماری سنتی ایران***. *معماری و شهرسازی ایران، ۵، ۱۴۷-۱۵۹.*

- Almhafdy, A, Ibrahim, n, Ahmad, s sh, Yahya, j. (2013). ***Analysis of the Courtyard Functions and its Design Variants in the Malaysian Hospitals***. Social and Behavioral Sciences, 105, 171–182.
- Almhafdy, A, Ibrahim, n, Ahmad, s sh, Yahya, j. (2015). ***Thermal performance analysis of courtyards in a hot humid climate using Computational Fluid Dynamics CFD method***. Social and Behavioral Sciences, 170, 474-483.
- Andersen K. T. (2007). ***Airflow rates by combined natural ventilation with opposing wind unambiguous solutions for practical use***. Building and Environment, 42(2), 534-542.
- Aryani, S M, Sasongko, s, Sulistyono, I b, Hidayati, N. (2019). ***Courtyard Placement for Maintaining Air Movement of Natural Ventilation inside a Transformed House***. Advances in Economics, Business and Management Research, 41, 355-359.
- Cabeza, Patricia López Victoria, Gómez, Carlos Rivera, Fernández, Jorge Roa, Valencia, Miguel Hernandez, Limones, Rafael Herrera (2022). ***Effect of thermal inertia and natural ventilation on user comfort in courtyards under warm summer conditions.*** Building and Environment**,** 228, 109812
- CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers). (2005). ***Natural ventilation in nondomestic buildings***. London: CIBSE.
- Littlefair PJ, Santamouris M, Alvarez S, Dupagne A. (2000). ***Environmental Site Layout Planning: Solar Access, Microclimate and Passive Cooling in Urban Areas,*** CRC, ISBN: 1860813399.
- Manioglu, G, Koçlar Oral, G. (2015). ***Effect of Courtyard Shape Factor on Heating and Cooling Energy Loads in Hot-Dry Climatic Zone***. 6th International Building Physics Conference, IBPC, Energy Procedia 78, 2100 – 2105.
- Martinelli, L, Matzarakis, A. (2017). ***Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones***. Sustainable Cities and Society, 29,97-106.
- Micallef, D, Buhagiar, V, Borg, sp. (2016). ***Cross-ventilation of a room in a courtyard building***. Energy and Buildings, 133,658-669.
- Porta- Gándara MA, Rubio E, Fernandez JL, Muñoz VG. (2002). ***Effect of passive techniques on interior temperature in small houses in the dry, hot climate of Northwestern Mexico***. Renew Energy, 26(1), 121- 35.
- Rajapaksha I, Nagai H, Okumiya M. (2003). ***A ventilated courtyard as a passive cooling strategy in the warm humid tropics***. Renew Energy, 28(11), 1755- 78.
- Tablada A, Blocken B, Carmeliet J, Troyer F, Verschure H. (2005). ***The influence of courtyard geometry on air flow and thermal comfort: CFD and thermal comfort simulations***. 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Beirut, Lebanon 13- 16.
- Taleb H., Wriekat T., Hashaykeh H. (2020). ***Optimising natural ventilation using courtyard strategies: CFD simulation of a G+1 office building in Madinah***. Sustainable Energy, 39, 659-684.
- Wilcox, David C. (2006). ***Turbulence modeling for CFD***. DCW Industries.
- Xu X, Luo F, Wang W, Hong T, Fu X. (2018). ***Performance- based evaluation of courtyard design in China's cold winter hotsummer climate regions***. Sustainability, 10, 1- 19.
- Zhu, Jiayin, Feng, Juanjuan, Lu, Jifu, Chen, Yu, Li, Weilin, Lian, Peiji, Zhao, Xi (2023), ***A review of the influence of courtyard geometry and orientation on microclimate***. Building and Environment, 236.