

بررسی تأثیر نسبات پلان معماری بر سرعت و دمای جریان باد در تهویه طبیعی بادگیرها؛ مطالعه موردی: شهر کرمان

عاطفه رئیسی*

محسن کشاورز**

۱۴۰۲/۰۱/۲۸

۱۴۰۲/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

چکیده

تهویه طبیعی یکی از مهم‌ترین عوامل در ایجاد آسایش حرارتی است. بادگیرها که از عناصر مهم و تاریخی معماری ایران تلقی می‌شوند، به عنوان یک سیستم سرمایشی ایستا شناخته شده‌اند. این سیستم‌های خنک‌کننده غیرفعال ساختمانی تهویه مطبوع را به وسیله انرژی تجدید پذیر باد فراهم می‌کنند و برای تأمین آسایش افراد در مناطق گرم و خشک استفاده می‌شوند. امروزه با توجه به افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و اهمیت انرژی‌های تجدیدنایاب، نقش تهویه طبیعی در ساختمان به لحاظ سازگاری ساختمان با محیط‌زیست دارای اهمیت است؛ همچنین با توجه به اهمیت بادگیر در ایجاد تهویه طبیعی، پژوهش حاضر به بررسی این عنصر عملکردی در معماری پرداخته است. بادگیرهای شهر کرمان نمونه‌ای از صرفه‌جویی انرژی توسط ساختمان در اقلیم گرم و خشک به شمار می‌آیند. از این‌رو با بررسی و شناخت دقیق، کمی و عددی از نحوه عملکرد و الگوی رفتار بادگیرها می‌توان به عنوان گامی مؤثر در دستیابی به راهکارهای طراحی همساز با اقلیم کمک نمود. پژوهش حاضر با فرض بر اینکه در فضاهایی که تهویه طبیعی در آن‌ها به وسیله بادگیر صورت می‌گیرد، می‌توان رابطه معناداری بین نسبات و فرم فضا بر سرعت و عملکرد جریان باد یافت و به بررسی و مقایسه تطبیقی عملکرد بادگیرها در نمونه‌های انتخاب شده که از نظر فرم و ابعاد و نسبات متفاوت هستند پرداخته است تا بتوان از فرم بهینه در تهویه طبیعی، در معماری معاصر استفاده کرد. روش تحقیق در این پژوهش توصیفی - تحلیلی است که در ابتدا به وسیله منابع کتابخانه‌ای و عکس‌برداری و سپس برداشت از بناهای موردمطالعه و درنهایت به کمک تحلیل^۱ CFD توسط نرم‌افزار دیزاین بیلدر انجام گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان‌دهنده تفاوت در سرعت و عملکرد جریان باد در نمونه‌های موردمطالعه که از نظر فرم و نسبات متفاوت هستند، است و پس از انجام محاسبات فرم بهینه‌تر از نظر عملکرد و رفتار باد مشخص شده است.

کلمات کلیدی: اقلیم گرم و خشک، نسبات پلان، کرمان، تهویه طبیعی، بادگیر.

* دانشجوی کارشناسی، گروه هنر و معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. atteferaisi@gmail.com

** استادیار، گروه مرمت بنای‌های تاریخی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

هندسه به نظم بخشیدن به معماری و برقراری روابط آگاهانه میان اجزای بنا با یکدیگر کمک می‌کند تا در عین مرکب بودن، یکپارچگی فضا را به عنوان یک ترکیب خلاق و استفاده از علم و هنر ارزشمند معماران گذشته سرزمینمان در این دوره و با توجه به اینکه در علم هندسه و استفاده خلاقانه از آن باعث به وجود آمدن نوعی معماری است که به‌دوراز برداشت‌های سلیقه‌ای، به لحاظ نظم و تناسبات قابل درک است (نجفقلی پور کلانتری، اعتصام و حبیب، ۱۳۹۶). به نظر می‌رسد الهام گرفتن از گذشتگان به خصوص از معماری سنتی ایران و توجه به هندسه و تناسبات آن از مهم‌ترین راه حل‌ها در جهت پاسخ‌گویی به کیفیت معماری معاصر و امروزی باشد.

سابقه سکونت در ایران و پیشینه درخشان در زمینه معماری، لزوم توجه به فن‌های اقلیمی معماری بومی و استفاده از آن با شیوه مدرن را ضروری می‌داند. امروزه افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی بر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تأمین آسایش حرارتی، یکی از معضلات این حوزه به شمار می‌رود (معماریان و همکاران، ۱۳۹۶). این در حالی است که با مطالعه معماری گذشته می‌توان نتیجه گرفت که تأمین تهویه طبیعی در آن زمان با بهره‌گیری حداقلی از نیروهای طبیعی صورت می‌گرفته است.

تهویه طبیعی به معماران کمک می‌کند تا با روش‌های صحیح، هزینه انرژی موردنیاز برای ایجاد شرایط آسایش در ساختمان را به حداقل برسانند و یکی از مؤثرترین عوامل در ایجاد آسایش حرارتی شناخته شده است. این عامل بالاخص در اقلیم گرم و خشک همواره مورد توجه بوده است و معماران راه حل‌های متفاوتی را بسته به شرایط اقلیمی منطقه برای آن یافته‌اند (دهقانی محمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ صادقی، گرجی مهلبانی

و نظیف، ۱۴۰۰؛ پسران و همکاران، ۱۳۹۸؛ Ahmed, kumer & Motter, 2021).

در این پژوهش با توجه به اهمیت وجود بادگیر در تهويه طبیعی ساختمان‌های سنتی و همچنین به منظور به کارگیری و استفاده از علم و هنر ارزشمند معماران گذشته سرزمینمان در این دوره و با توجه به اینکه در معماری مدرن علاوه بر نیازهای اولیه و در نظر گرفتن زیبایی فضا توجه به طرح‌هایی برای جلوگیری از اتلاف انرژی عاملی مهم و تعیین کننده به شمار می‌رود، سعی شده است به پژوهش در رابطه با این عنصر معماری پرداخته شود و عملکرد بهینه آن بررسی شود تا بتوان از سازوکار این عنصر جهت کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های امروزی استفاده کرد. با توجه به اینکه استفاده از فرم‌ها و تناسبات هندسی در معماری بر کیفیت و چگونگی درک معنا و مفهوم بنا تأثیرگذار است، به نظر می‌رسد یافتن یک فرم هندسی مطلوب برای دستیابی به تهويه طبیعی بهتر ساختمان‌های امروزی ضروری باشد. هدف کلی این پژوهش، بررسی و مقایسه تطبیقی عملکرد جريان هوا در فرم هندسی فضاهای منتخبی که تهويه طبیعی به وسیله بادگیر را دارا هستند و تأثیر فرم هندسی و تناسبات فضا بر جريان و سرعت باد در این فضاهای در جهت یافتن فرم بهینه و کارا برای مکان‌های امروزی است.

سؤال کلی پژوهش این است که تناسبات پلان فضایی که تهويه طبیعی در آن به وسیله بادگیر صورت می‌گیرد، چه تأثیری بر سرعت و دمای جريان هوای آن فضا دارد؟

پیشینه تحقیق

تهويه در معماری به فرایند پردازش یا جایگزینی هوا در هر مکانی که خواهان فراهم نمودن کیفیت هوای بالا در داخل ساختمان باشد، گفته می‌شود. این می‌تواند

برخی نتایج این تحقیق قابل توجه هستند: اگر نوع خانه مربع باشد (اتاق مریع است و درجه تداخل خط جریان، نما، منظره و نما مسطح باشد)، دیوار جداگانه داخلی مانع سازماندهی جریان هوا می شود، بر توزیع جریان هوا تأثیر می گذارد و تغییر می کند یا اگر نوع خانه باریک و بلند (مستطیل) باشد، بیشتر احتمال دارد تهویه ایجاد کند و سرعت باد و حجم هوا در مسیر جریان هوا بزرگ تر است. با این حال، گرداب های محلی در برخی مکان ها تشکیل می شوند که گوشش های مرده جریان هوا را تشکیل می دهند که منجر به تجمع آلاند ها می شود. با توجه به مطالعات انجام گرفته، به نظر می رسد تناسبات معماری فضایی که تهویه طبیعی آن توسط بادگیر صورت می گیرد، باعث افزایش کارایی بادگیری ها خواهد شد؛ به گونه ای که هم کارایی بادگیرها را زنده کند و هم پاسخ گوی عملکرد مورد انتظار عصر خود باشد (جدول شماره ۱).

ادبیات موضوع

از نظر مفهومی؛ هندسه ۲ به معنای اندازه و شکل است و استفاده از هندسه در معماری را می توان در دو سطح موردنرسی قرارداد. سطح اول شامل اشکال هندسی هستند که عاملی بسیار مهم در وحدت بخشی اجزا هستند و در پلان و ناماها دیده می شوند و سطح دوم نیز مجموعه هایی از خطوط غیر آشکاری هستند که در ساختار شکلی طرح به راحتی قابل دیدن نیستند ولی تأثیر بسزایی در شکل گیری سایر فرم های بنا دارند (بلیان و حسن پورلمر، ۱۳۹۸؛ نجفقلی پورکلاتری و همکاران، ۱۳۹۶). داشتن نظم هندسی مشخص در پلان باعث انسجام اجزا در کل بنا می شود. با رعایت هندسه ای منطقی در پلان بنا، می توان حجم کلی بنا را بهتر درک کرد (سیلوایه و همکاران، ۱۳۹۱).

شامل تأمین هوای تازه، بیرون کردن دی اکسید کربن و گردخاک، رطوبت، دود، باکتری ها و گرما باشد. در گذشته تمام ساختمان های تاریخی به طور طبیعی تهویه می شدند، سیستم های تهویه طبیعی برای انتقال هوای تازه در ساختمان ها به اختلاف فشار متکی هستند (Walker, 2016). اختلاف فشار می تواند ناشی از باد یا اثر شناوری ایجاد شده توسط اختلاف دما یا تفاوت در رطوبت باشد. امروزه با افزایش آگاهی از هزینه و آثار زیست محیطی، استفاده از انرژی، تهویه طبیعی به روشنی جذاب برای کاهش مصرف انرژی و هزینه و ارائه کیفیت قابل قبول محیطی داخلی و حفظ آب و هوای داخلی سالم، راحت و مولد تبدیل شده است. تهویه طبیعی می تواند به عنوان جایگزینی برای تأسیسات تهویه مطبوع مورد استفاده قرار گیرد و ۱۰ تا ۳۰ درصد در کل مصرف انرژی صرفه جویی شود. طراحی اقلیمی و توجه به مباحث مربوط به معماری پایدار از مهم ترین جریان های معماری معاصر به حساب می آید که سابقه چند هزار ساله به خصوص در ایران دارد. برای فهم خلاً مطالعاتی پژوهش و نیز درک مفاهیم اولیه و مرتبط با آن، در زمینه موضوع پژوهش، به ویژه در بخش تهویه طبیعی، بادگیر و تنسابات پلان، پژوهش هایی در سراسر جهان انجام شده است که می توان به موارد زیر در هر بخش اشاره کرد. به طور طبیعی، ساختمان های دارای تهویه به طراحی فرم ساختمان و اجزای پوشش ساختمان برای کنترل شرایط محیطی داخلی بستگی دارند (Edwards, 2000). در مورد فرم و شکل فضاهای و تأثیر فرم، ابعاد و شکل بر تهویه نیز پژوهش هایی انجام شده است. از جمله یانگ و همکاران (۲۰۲۰) به تجزیه و تحلیل زیبایی شناسی فضاهای که تهویه ساختمانی در آن دیده شده پرداخته اند.

ج ۱. پژوهش‌های انجام‌گرفته

نتایج	محققین
معماری و فرم تیغه‌های بادگیرها در رفتار حرارتی آن نقش دارد. با توجه به اثر برینولی که سرعت سیال با گذر از مقاطع جریان‌های مختلف، تفاوت عمل می‌کند و هرچه سطح مقطع کوچک‌تر باشد، سرعت جریان بیشتر می‌شود، پس تفاوت در تیغه‌ها تفاوت در سرعت جریان را به دنبال خواهد داشت.	محمودی زرندی و مفیدی شمیرانی، ۱۳۹۰
سطح مقطع بادگیر بر عملکرد تهویه آن اثرگذار است. با مطالعه مقایسه‌ای که میان استفاده از بادگیر شش ضلعی و مربعی در رابطه با سرعت جریان هوا انجام شده است، نشان داده شده که بادگیرهای شش ضلعی به طور متوسط ۱۹ درصد جریان هوای بیشتری نسبت به بادگیرهای مربعی ارائه می‌دهند.	Farouk, 2020
بادگیر با ارتفاع بیشتر باعث افزایش دمای هوا و کاهش جریان جرمی وارد شده از بادگیر به ساختمان هستند، همچنین سرعت بیشتر باد باعث کاهش دمای هوا و افزایش جریان جرمی می‌شود. این در حالی است که بادگیرهای بلندتر در مقابل زلزله دچار آسیب بیشتری نسبت به بادگیرهای کوتاه‌تر می‌شوند.	حجازی و همکاران، ۱۳۹۶
با ارائه مدل هندلولی گون برای بادگیرها بیان شده که این مدل در حالی که کمترین سطح در برابر باد را دارد، استحکام و مقاومت آن از بادگیرهای پیشین بیشتر بوده و به عنوان مدلی کاربردی جهت برخک بادگیرهای نسل جدید پیشنهاد شده است.	جهانگیری و زارع، ۱۳۹۲
بهره‌گیری از بادگیر می‌تواند منجر به کاهش دما تا حدود ۹ درجه سانتی گراد در اقلیم گرم و خشک شود.	صادقی و همکاران، ۱۴۰۰
در عملکرد بهتر بادخورها و بادگیرها، فرم مناسب سقف آن‌ها مؤثر است. به صورتی که ابتدا سقف شبکه دار و بعد از آن فرم منحنی، کارایی بهتر از نظر سرعت و حجم تهویه نسبت به سقف‌های مستطیل دارند.	احمدی و علیرضایی و زنوفسادرانی ۱۳۹۳
پس از بررسی ساختمان چهار طبقه با بادگیر، نشان داده شده است که بادگیرهای چهار طرفه می‌توانند در طبقات ساختمان، سرعت و حجم جریان مناسب برای تهویه را فراهم کنند. این در حالی است که بادگیرهای یک‌طرفه و دو طرفه نمی‌توانند در هر طبقه به طور مؤثر عمل کنند.	Hojati, Saedvandi & De Angelis, 2021
در استفاده از دو گونه بادگیر دو طرفه و چهار طرفه، افزایش توان بروودتی و کارایی بهینه یکی از مهم‌ترین اصول است. بهنحوی که در بادگیر یزدی این اصل در طول چهار فصل سال حاکم است، درحالی که این نسبت در بادگیر کرمائی فقط در طول تابستان صادق است.	مهدوی نژاد و جوانزودی، ۱۳۹۰
تغییر در مقطع و موقعیت دهانه خارجی بادگیرها در عملکرد آن‌ها اثرگذار است. به این منظور یک بادگیر سنتی با ۲۲ تغییر در دهانه خارجی آن به وسیله تحلیل CFD موردنبررسی قرار گرفت.	Varela-Boydo et al., 2021

بادگیر به عنوان یک سیستم سرمایشی، تهویه مطبوع را با استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد فراهم می‌کند و همان‌گونه که از نام آن پیدا است با هدایت جریان باد و بهره‌گیری از انرژی پاک طبیعت، در تعديل دما و رساندن دمای فضای سکونتی به دمای در حد آسایش انسان نقش بسزایی داشته است (ابویی، مظفر و ذاکر عاملی، ۱۳۹۱؛ محمودی زرندی و مفیدی شمیرانی، ۱۳۸۷). به طورکلی عملکرد بادگیر در فرایند تهویه طبیعی متأثر از دو پدیده نیروی باد و اثر دودکشی است (تصویر شماره ۱). بادگیر می‌تواند علاوه بر تأمین باد، با خارج کردن حرارت از کالبد ساختمان، فضای داخلی را خنک کند. عملکرد بادگیر در این روش به صورت دودکش است، به این صورت که بادگیر هوا را به خارج ساختمان می‌فرستد و به سلامت هوای داخل کمک می‌کند (دهقانی محمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Calautit & Jimenez، ۱۳۹۳؛ ۷۸).

منظور از تهویه طبیعی، استفاده از فرایند جابه‌جایی هوای داخل ساختمان با هوای تازه خارج ساختمان است. بدون بهره گرفتن از دستگاه‌های تأسیساتی و صرف انرژی فسیلی وجود جریان هوا در داخل ساختمان شرط لازم نیل به آسایش است ولی کافی نیست. از این‌رو باید: (الف) جریان هوا در محل موردنیاز برقرار شود. (ب) این جریان سرعتی مناسب برای ایجاد آسایش داشته باشد. اصولاً تهویه ساختمان‌ها به سه منظور تأمین هوای تازه، تأمین آسایش حرارتی و خنکسازی توده صالح ساختمان انجام می‌شود (شاطریان، ۱۳۹۰؛ ۵۶۴؛ قیاکلو، ۱۳۹۳؛ ۶۴؛ رازجویان، ۱۳۸۶؛ ۱۶۰). در معماری سنتی ایران، بارزترین روش مدیریت جریان و دمای هوا در ساختمان‌ها، بادگیرها هستند که بر اساس قوانین تهویه طبیعی، با استفاده از نیروی باد و پدیده دودکشی کار می‌کنند (یحیائیو همکاران، ۱۴۰۰).

تقسیم‌بندی نمود:

۱. قرارگیری بادگیر در پشت تالار مستطیل شکل و در محور تقارن آن- در این گونه، محور تقارن بادگیر و تالار و حیاط در امتداد یکدیگر قرار گرفته‌اند. در برخی بنایها که ارتفاع تالار به ۵ متر هم می‌رسد، بادگیر به شاهنشین، که نیم‌طبقه‌ای واقع در بالای تالار است نیز باد خنک می‌رساند.
۲. قرارگیری بادگیر در گوشه حیاط- در این گونه بادگیر ارتباط مستقیمی با تالار ندارد و فقط به واسطه فضای حوض خانه به آن متصل می‌شود.
۳. قرارگیری بادگیر دریکی از گوشه‌های شمالی تالار- در این نوع سازمان دهنده، تالار با شکل صلبی در امتداد محور حیاط قرار گرفته و بادگیر در محور تقارن تالار واقع نشده است (محمودی زرنده و مفیدی شمیرانی، ۱۳۹۰؛ بهادری نژاد، ۱۳۸۷).

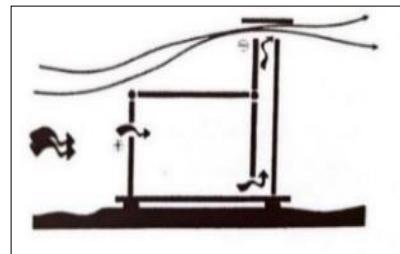
معوفی بستر تحقیق

اقلیم گرم و خشک با توجه به نیاز بالا به مصرف انرژی برای تهویه به عنوان بستر اقلیمی و شهر کرمان به دلیل ویژگی‌های خاص اقلیمی و بهره‌گیری از چند بادگیر شاخص انتخاب شده است. کرمان با طول جغرافیایی ۵۹ درجه ۳ دقیقه ۳۶ ثانیه شرقی و در عرض جغرافیایی ۲۶ درجه ۳۲ دقیقه ۸ ثانیه شمالی در قسمت جنوب شرقی کشور واقع شده است و دارای اقلیمی گرم و خشک است. با توجه به آمار ارائه شده از اداره کل هواشناسی استان کرمان، دمای هوا و بارش شباهت زیادی به سایر شهرهای اقلیم گرم و خشک دارد (هاشمی رفسنجانی و حیدری، ۱۳۹۷). در تصویر شماره ۲ با استفاده از اطلاعات اولیه و نرم افزار کلایم‌کانتسالتنت، نمودار سرعت باد، گلبداد، محدوده دمای هوا شهر کرمان نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای به دست آمده، نمایان است

(Bekleyen & Likoğlu, 2020؛ Bescos, 2023)

گونه‌شناسی اشکال بادگیر بر مبنای عوامل و بخش‌های مختلف کاربردی در بادگیرها صورت می‌گیرد و نتایج حاصل از آن می‌تواند به شناخت دقیق‌تری از مقوله بادگیرها کمک کند. به‌طورکلی، بادگیر در ایران با پلان‌های مربع، مستطیل، شش و هشت‌ضلعی و دایره‌ای دیده شده است. بادگیرها نه تنها در فرم کلی پلان، بلکه از لحاظ فرم تیغه‌های داخلی نیز متفاوت‌اند. تیغه‌ها که به دو دسته تیغه‌های اصلی و فرعی تقسیم می‌شود از عناصری خشت و آجر تشکیل شده‌اند که ستون بادگیر را به چند ستون کوچک‌تر تقسیم می‌کنند، با توجه به فرم هندسی پلان و نحوه قرارگیری تیغه‌ها می‌توان بادگیرها را به سه دسته (جدول شماره ۲)، تقسیم کرد (بهادری نژاد، ۱۳۸۷؛ Kheirkhah et al., 2020؛ ۲۵۸

(Sangdeh & Nasrollahi, 2022)



ت ۱. چگونگی خروج و ورود هوا و عملکرد

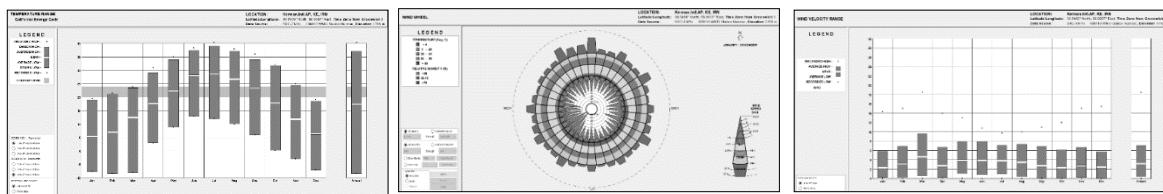
بادگیر (مأخذ: بتل مک کارتی، ۱۳۸۹)

تفاوت نحوه استقرار بادگیرها در پلان با به طراحی پلان مربوط می‌شده است. اما احتمالاً تأثیراتی نیز بر عملکرد سرمایشی بادگیر دارد. از اجزای اصلی بنای ایرانی که مرتبط با بادگیر است می‌توان حیاط مرکزی و تالار را نام برد، تالار معمولاً به‌طور مستقیم با بادگیر در ارتباط است. البته گاهی این ارتباط با واسطه فضایی دیگری انجام می‌شود. از نظر موقعیت قرارگیری بادگیرها می‌توان آن‌ها را به سه گونه

که شدت گرمای هوا در تابستان این شهر، گاه به بیش از ۴۰ درجه سانتی گراد می‌رسد و شدت سرماهی داده شده است.

ج ۲. دسته‌بندی انواع بادگیرها بر مبنای فرم هندسی پلان و نحوه قرارگیری تیغه‌ها (مأخذ: بهادری نژاد، ۱۳۸۷)

نوع	دسته‌بندی	شکل
بادگیر با پلان مریع	-	
بادگیر با پلان شش و یا هشت‌ضلعی	-	
بادگیر با پلان مستطیل	تیغه‌های ضربدری تیغه‌های عمود بر هم به شکل صلیب	
H	تیغه‌های عمود بر هم به شکل H	



ج. نمودار محدوده دمای هوا

ب. نمودار گلباد

الف. نمودار سرعت باد

ت ۲. نمودار سرعت باد، گلباد، دمای هوای شهر کرمان (منبع: نرم‌افزار کلایم کانسالتنت)

هر دو نمونه موردمطالعه محور تقارن بادگیر و تالار و حیاط در امتداد یکدیگر قرار گرفته‌اند. درنهایت قرارگیری هر دو نمونه در یک بافت شهری، با توجه به اینکه Sadeghi et al., 2020؛ Jomehzadeh et al., 2020، نمی‌توان تأثیر سازه‌های اطراف و بافت شهری را در راندمان تهویه بادگیر نادیده گرفت و در محیط‌های شهری، ساختمان‌ها اغلب نزدیک به هم قرار می‌گیرند، دستگاه‌های تهویه طبیعی به شدت تحت تأثیر سازه‌های اطراف هستند. همچنین هندسه و پیکربندی بافت شهری و موانع بیرونی بر ویژگی‌های جریان باد و رسیدن آن به ساختمان اثرگذار است. به منظور شفاف‌تر شدن این موضوع محل قرارگیری دو

از آنجایی که مطالعه نمونه‌های موردی به عنوان ابزاری برای دستیابی به اهداف و همچنین روش کار می‌تواند به محقق کمک کند؛ بنابراین، از مهم‌ترین عواملی که می‌تواند موفقیت هر پژوهه تحقیقاتی را تحت تأثیر قرار دهد انتخاب نمونه موردمطالعه است. در این تحقیق برای انتخاب نمونه‌های موردمطالعه، معیارهایی در نظر گرفته شده است. از جمله دسترسی به نمونه‌ها جهت برداشت یکسان بودن بادگیرهای نمونه‌های موردی از نظر ارتفاع و پلان و آرایش تیغه‌ها که در هر دو نمونه موردمطالعه بادگیر با پلان مستطیل از نوع تیغه‌های عمود بر هم به شکل صلیب هستند، همچنین یکسان بودن وضعیت بادگیرها از نظر استقرار آن‌ها در پلان بنا،

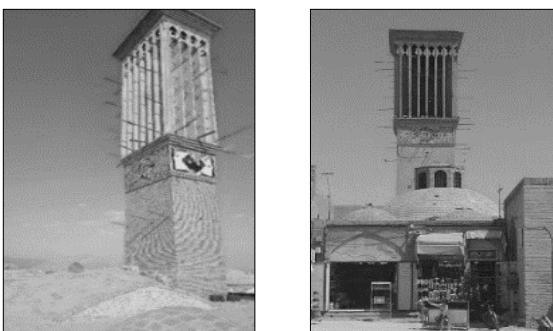
عناصر اصلی طرح عبارت‌اند از: صحنه وسیع، دلانی کوتاه در شمال که صحن را به کوچه سردار مرتبط می‌کند، دلانی به موازات ضلع شرقی صحن در شرق آن، حیاط کوچک در شمال شرقی بنا. حجم بنا در مقایسه با صحن یکپارچه و وسیع تقسیمات خرد و کثیر دارد. این خردی تقسیمات با عقب‌نشینی طبقه بالا دو چندان شده است. در میانه‌های جبهه‌های شمالی و جنوبی ایوان با دهانه وسیع‌تر و ارتفاع معادل دو طبقه قرار گرفته و هر یک از هشتی‌های واقع در ایوان شمالی و جنوبی طاق مدور دارد که حجم بیرونی آن در صحن پیدا است. به علاوه بادگیری در ایوان شمالی بر بام دیده می‌شود که از شاخص‌ترین حجم‌های بنا است و ایوان شمالی را مشخص‌تر می‌سازد (اقدامی، طحانی و رضایی رحیمی، ۱۳۹۳).



ب

الف

ت ۴. اتاق بادگیر مدرسه ابراهیم خان (الف) و اتاق متصل به بادگیر مدرسه ابراهیم خان (ب)



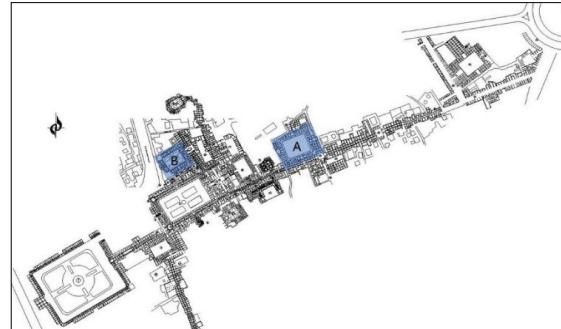
ت ۶. بادگیر

کاروان‌سرای وکیل

ت ۵. دورنمای بادگیر
مدرسه ابراهیم خان

درنهایت این دو نمونه موردي برداشت و اطلاعات آن برای تحلیل و بررسی ثبت شد (جدول شماره ۳).

نمونه موردي نسبت به هم در یک بافت برای مدل‌سازی، قرارگیری ساختمان‌ها در اقلیم کرمان، شهری در (تصویر شماره ۳) نشان داده شده است.



ت ۳. پلان بازار کرمان و موقعیت قرارگیری نمونه‌های موردي نسبت به هم A کاروان‌سرای وکیل و B مدرسه ابراهیم خان (مأخذ: مرکز استناد میراث فرهنگی استان کرمان) مدرسه ابراهیم خان

قديمي ترین كتيبة مدرسه ابراهيم خان مربوط به سال ۱۲۳۲ قمری است. ساختمان مدرسه دارای اتاق شاهنشين، محراب و غرفه‌های اطراف آن است (تصویر شماره ۴). اين ساختمان دارای دو اشكوب و بادگير چهار سویه با سقف تخت است (تصویر شماره ۵) که نشان‌دهنده تلاش معماران برای رسيدن به پوشش‌های هرچه تخت‌تر است (پيرنيا، ۱۳۹۸: ۳۵۶).

کاروان‌سرای وکیل

کاروان‌سرای وکیل در جناح شمالی بازار وکیل به عهد ناصرالدین شاه قاجار تعلق دارد (تصویر شماره ۶).

ج. ۳. برداشت از نمونه‌های مورد مطالعه

نام بنا	پلان اتاق زیر بادگیر	برش بادگیر	موقعیت قرارگیری بادگیر در بنا
مدرسه ابراهیم خان			
کاروانسرا و کیل			

میزان عوامل مداخله‌گر تأثیرگذار بر تهویه طبیعی و بررسی جزئیات و تناسبات بادگیر و اجزای آن و نیز تناسبات اتاق که بهوسیله بادگیر تهویه طبیعی در آن صورت می‌گیرد پرداخته شد و درنهایت اطلاعات آب و هوایی شهر کرمان بهصورت فایلی با فرمت EPW حاوی سوابق آب و هوایی شهر کرمان بهعنوان بانک اطلاعات آب و هوایی در قالب موتور انرژی پلاس بر روی نرمافزار Design Builder Version 7.0.1.004 برای شبیه‌سازی مورداستفاده قرار گرفت.

روش تحقیق در این پژوهش از منظر هدف در گروه پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد که در گروه تحقیقات توصیفی است و همچنین روش گردآوری داده‌ها بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی و روش تجزیه و تحلیل بهصورت علی و بر اساس نتایج مدل‌سازی است.

تحلیل جریان هوای اتاق متصل به بادگیر نمونه‌های موردي

شبیه‌سازی این پژوهش به کمک CFD (مکانیک سیالات محاسباتی) انجام شده است. هدف از این شبیه‌سازی تحلیل سرعت‌سنجدی جریان هوای اتاق‌هایی

روش تحقیق

در این تحقیق جهت بررسی رفتار و سرعت باد در تناسبات اتاقی که توسط بادگیر تهویه طبیعی در آن صورت می‌گیرد از مدل‌سازی CFD به کمک نرم‌افزار Design Builder Version 7.0.1.004 استفاده شده است. مدل‌سازی شبکه جریان هوای نرم‌افزار انرژی پلاس با استفاده از مقایسه نتایج مدل‌سازی با سری زیادی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با کیفیت بالا توسط لابراتواری ملی اوک ریگ اعتبارسنجی شده است و همچنین اعتبارسنجی مدل‌سازی شبکه جریان هوای نرم‌افزار انرژی پلاس با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط لابراتواری علوم ساختمانی در مرکز انرژی خورشیدی فلوریدا انجام شده است (Lixing, 2007).

نخستین گام در روند این تحقیق، مطالعه کتابخانه‌ای در رابطه با کلیات موضوع در کتب، استناد، مقالات، تصاویر و سپس انتخاب دو نمونه از کاربری‌های شاخص که تهویه طبیعی در آن‌ها بهوسیله بادگیر انجام می‌شود از بافت قدیم شهر کرمان بر اساس معیارهای مکان، زمان، نوع بادگیر، ارزش‌های معماری و کمترین

کوچکترین آن‌ها اتاق متصل به بادگیر مدرسه ابراهیم‌خان با مساحت ۸/۹۰ و اتاق بادگیر به مساحت ۱۱/۲۳ و دارای ۶ تیغه با فرم مستطیلی و بزرگ‌ترین آن‌ها اتاق متصل به بادگیر کاروان‌سرای وکیل با مساحت ۷/۷ و دارای ۶ تیغه با فرم مستطیلی و ارتفاع یکسان در نظر گرفته شد. پس از بررسی‌های میدانی و برداشت از مکان‌های مورد تحلیل، اطلاعات آب و هوایی شهر کرمان به فرمت EPW تهیه شد و در نرم‌افزار دیزاین بیلدر وارد شد و به منظور یکسان بودن شرایط زمانی روز انقلاب تابستانی برای تحلیل هر دو نمونه موردی در نظر گرفته شد (جدول شماره ۴).

که به وسیله بادگیر تهويه طبیعی در آن‌ها صورت می‌گیرد، است. در این بررسی شرایطی به عنوان پیش‌فرض مدنظر قرار گرفته شده است که در ذیل آمده است. دو اتاق متصل به بادگیر جهت مدل‌سازی از لحاظ تناسبت با در نظر گرفتن بادگیرهایی با تناسبات و ارتفاع یکسان (۱۸ متر) انتخاب شده است، همچنین هر دو بادگیر متصل به اتاق موردمطالعه از نظر گونه‌شناسی بادگیرها بر مبنای استقرار در پلان از نوع بادگیر با پلان مستطیلی با تیغه‌های عمود برهم به شکل صلیب هستند و نیز محل استقرار بادگیرها در پلان نیز یکسان بوده و در هر دو نمونه محور تقارن حیاط، اتاق متصل به بادگیر و بادگیر در امتداد یکدیگر قرار گرفته‌اند،

ج. ۴. نمونه‌های انتخابی

نمونه موردی	اطلاعات موردنظری	مدل‌سازی در نرم‌افزار
مدرسه ابراهیم‌خان - کرمان	ابعاد اتاق متصل به بادگیر ۲/۳۰ در ۳/۸۷ و ارتفاع ۲/۷۴ متر دارای ۳ در ورودی از حیاط است که به وسیله دو در به اتاق بادگیر متصل شده است.	
کاروان‌سرای وکیل - کرمان	ابعاد اتاق متصل به بادگیر ۶/۳۰ در ۶/۹۰ و ارتفاع ۴/۳۵ متر دارای ۳ در ورودی از حیاط است که به وسیله یک بازشو به اتاق بادگیر متصل شده است.	

هوای خروجی از دریچه‌های بادگیر ۲۰ درجه برای هر دو اتاق متصل به بادگیر به منظور ایجاد شرایط دمایی یکسان در نظر گرفته شد.
مقایسه سرعت و رفتار جريان هوا در نمونه‌های موردنی

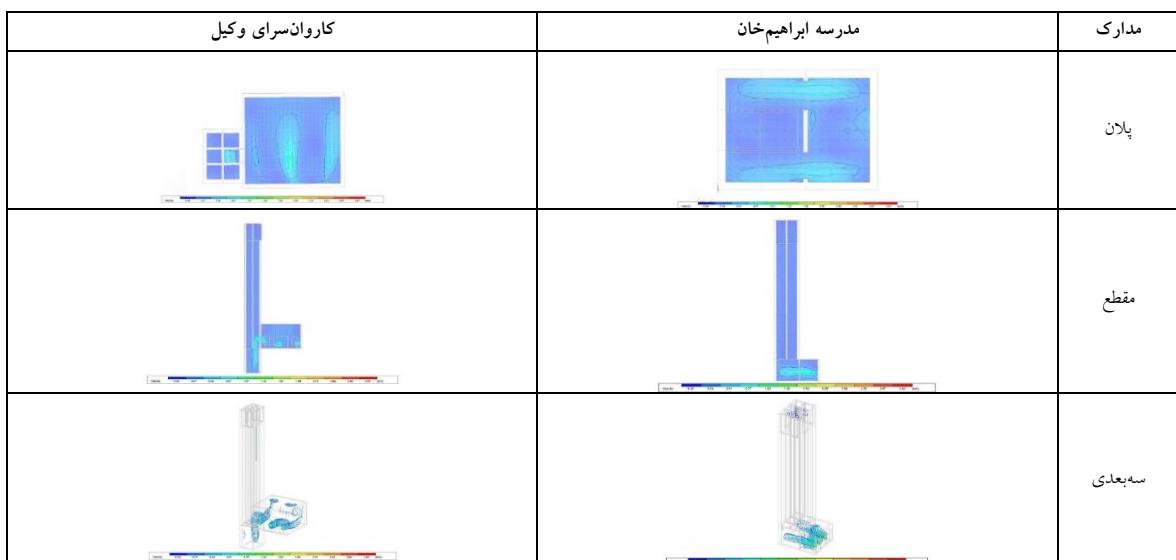
جهت دستیابی به سرعت و رفتار جريان هوای عبوری در اتاق‌ها پس از اینکه هندسه بادگیر و ساختمان به وسیله برداشت‌های انجام شده از بنا در نرم‌افزار دیزاین بیلدر مدل‌سازی شد و اطلاعات اقلیمی و همچنین میزان هوا و دمای آن برای هر دو نمونه موردی یکسان در نظر گرفته شد، تحلیل‌های CFD از نرم‌افزار تهیه شد.

باتوجه به اینکه بادگیر این قابلیت را دارد باد خنک را از هر جهت گرفته و به داخل اتاق هدایت کند و نیز می‌تواند به صورت دودکش عمل کند که در این حالت هوای گرم در اثر اختلاف فشار بین بالا و پایین دودکش، از وجه پشت به باد بادگیر کشیده می‌شود؛ در مواقعی که سرعت باد کم است، تهويه ساختمان به وسیله باد خان‌های بادگیر تنها به وسیله اثر دودکشی ادامه می‌یابد (بتل مک کارتی، ۱۳۸۹). در این پژوهش به منظور تحلیل سرعت سنجی جريان هوا، اثر دودکشی بادگیر در نظر گرفته شد و دمای هوای ورودی از حیاط مجموعه به اتاق متصل به بادگیر ۱۰ درجه و دمای

بازشوهای اتاق، به اتفاک بادگیر سرعت جریان هوا ورودی از اتاق به بادگیر در مدرسه ابراهیم خان ۰/۷۷ متر بر ثانیه و سرعت جریان هوا ورودی از اتاق به بادگیر در قسمت بازشو در کاروان سرای وکیل ۰/۵۴ متر بر ثانیه است.

سرعت جریان هوا از درهای ورودی به داخل اتاق در مدرسه ابراهیم خان ۰/۵۱ متر بر ثانیه و سرعت جریان هوا از درهای ورودی به داخل اتاق در کاروان سرای وکیل ۰/۸۱ است (جدول شماره ۵)، و با توجه به ابعاد و تناسبات اتاق متصل به بادگیر و نیز موقعیت قرار گیری

ج ۵. مقایسه سرعت و رفتار جریان هوای عبوری در اتاق متصل به بادگیر نمونه های موردنی



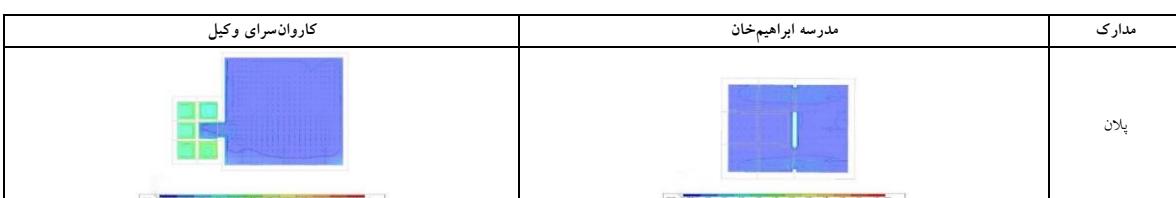
است که در اتاق متصل به بادگیر کاروان سرای وکیل سرعت جریان هوا ۰/۲۷ متر بر ثانیه و همچنین دمای هوا ۱۶/۰/۸ سانتی گراد است و درنهایت این دما در بادگیر به ۲۰/۶۲ درجه سانتی گراد می‌رسد (جدول شماره ۶ و ۷).

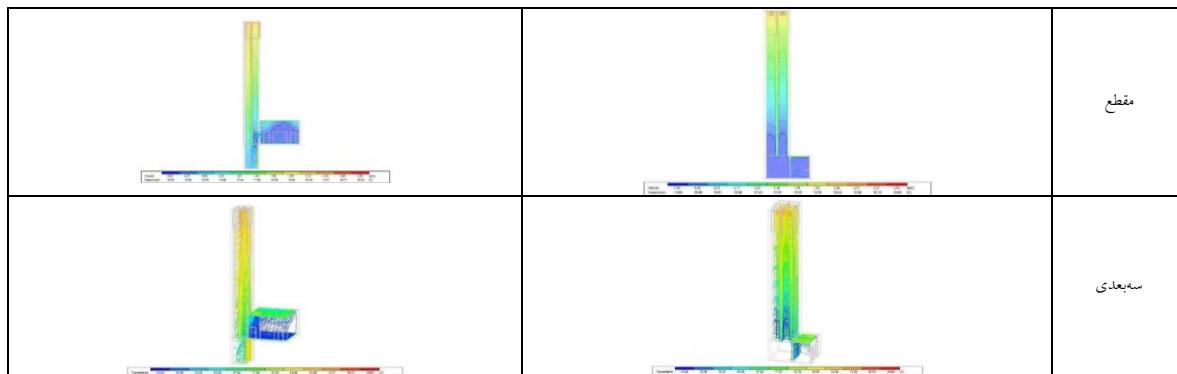
مقایسه توزیع دمای جریان هوا در نمونه های موردنی جریان هوا با سرعت ۰/۲۶ متر بر ثانیه و همچنین دمای ۱۶/۰/۶ سانتی گراد در فضای اتاق متصل به بادگیر مدرسه ابراهیم خان جریان دارد و درنهایت این دما در بادگیر به ۲۰/۶۰ درجه سانتی گراد می‌رسد. این در حالی

ج ۶. دمای هوای ماهانه هر اتاق بر حسب سانتی گراد (الف) کاروان سرای وکیل و (ب) مدرسه ابراهیم خان

آذر	آبان	مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	زمان
۱۸/۶۶	۲۰/۷۷	۲۲/۸۶	۲۴/۸۲	۲۵/۸۷	۲۶/۲۲	۲۵/۹۶	۲۴/۲۶	۲۲/۶۰	۲۰/۶۴	۱۸/۹۰	۱۷/۸۴	دمای هوا (الف)
۱۹/۷۹	۲۱/۵۳	۲۳/۱۳	۲۴/۶۳	۲۵/۳۰	۲۵/۶۵	۲۵/۳۵	۲۴/۰۳	۲۲/۸۲	۲۱/۲۲	۱۹/۹۷	۱۸/۸۸	دمای هوا (ب)

ج ۷. مقایسه توزیع دمای جریان هوا در اتاق متصل به بادگیر نمونه های موردنی





حیاط به فضای اتاق با سرعت (0.51 متر بر ثانیه) صورت گرفته که این سرعت هنگام عبور جريان هوا از ورودی های بین فضای اتاق و بادگیر به صورت چشمگیری افزایش یافته است؛ و با بررسی های صورت گرفته از نتایج بدست آمده از کاروان سرای وکیل با ابعاد و تنشیات بزرگ تر و حجم مکعب (نسبت طول به عرض $1/0.9$) نشان داده شده که جريان هوا در کاروان سرای وکیل با پلان مربعی در فضای اتاق به طور بهینه گردش داشته است و با توجه به ابعاد و تنشیات بزرگ تر این فضای سرعت جريان هوای ورودی از حیاط به اتاق بیشتر بوده (0.81 متر بر ثانیه) این در حالی است که این سرعت در هنگام ورود جريان هوا به اتاق که بادگیر کاهش می یابد و به طور کلی سرعت جريان هوای ورودی از حیاط به اتاق ها در هر دو نمونه موردی در ابتدای ورود افزایش یافته است.

با توجه به در نظر گرفتن حالت اثر دودکشی در عملکرد بادگیرها و به این منظور در نظر گفتن دمای هوای ورودی کمتر نسبت به دمای هوای خروجی برای تحلیل CFD در بادگیرها، دمای اتاق های موردنبررسی در هر دو نمونه موردی پایین تر از دمای هوای درون تیغه های بادگیر است و همچنین این دما در همه بخش های اتاق در هر دو نمونه موردی یکسان است. به منظور اعتبارسنجی تحلیل وضعیت سرعت و دمای جريان هوا، دو پارامتر دما و سرعت باد در یک روز

یافته ها

جهت شناخت و تحلیل وضعیت تهویه طبیعی بادگیرها و تأثیر تنشیات بر عملکرد مطلوب آنها در تهویه طبیعی، ابتدا بادگیرها از جنبه های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته شدند و جنبه های مختلف کالبدی آنها بررسی شد. سپس برای بررسی تأثیر تنشیات و فرم فضای اتاق هایی که تهویه طبیعی در آنها توسط بادگیر صورت می گیرد، دو نمونه موردی از بافت قدیم شهر کرمان با تنشیات متفاوت اتاق ها و همچنین دو حجم متفاوت انتخاب شد. در دو مدل منتخب اثر دودکشی بادگیرها مورد تحلیل قرار گرفته شد و علی رغم یکسان بودن ارتفاع و نوع بادگیرها از منظر آرایش تیغه ها و همچنین در نظر گرفتن شرایط زمانی و مکانی یکسان و در نظر گرفتن دمای هوای ورودی و خروجی هماندازه در دو نمونه موردی برای تحلیل CFD در نرم افزار، اطلاعات متفاوتی از نمونه ها به دست آمده است.

با بررسی ابعاد و تنشیات نمونه های موردی و توجه به رفتار و چرخش جريان هوا در فضای همچنین با توجه به حجم های نمونه های موردی (جدول شماره ۲) نشان داده شده که جريان هوا در مدرسه ابراهیم خان با حجم مکعب مستطیل (نسبت طول به عرض $1/68$) و فرم کشیده و ابعاد و تنشیات کوچک تر به طور مستقیم صورت گرفته و در ابتداء سرعت ورود جريان هوا از

مشخص برای هر دو نمونه اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری تجربی نمونه‌ها، دمای هوای بیرونی را ۲۷ درجه سانتی‌گراد و دمای هوای اتاق بادگیر در مدرسه ابراهیم‌خان و کاروان‌سرای وکیل با اختلاف ناچیز به ترتیب، ۲۱ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. همچنین سرعت جریان باد از دره‌ای ورودی به اتاق متصل به بادگیر برای مدرسه ابراهیم‌خان و کاروان‌سرای وکیل به ترتیب $0/6$ و $0/7$ متر بر ثانیه است. همچنین اطلاعات به دست آمده با استفاده از مطالعات انجام‌شده توسط بهادری نژاد (۱۳۸۷) اعتبارسنجی شده است. نتایج به دست آمده در مورد یک بادگیر در شرایطی که هوای بیرون دارای حداکثر و حداقل دمای $35/7$ و $17/7$ درجه سانتی‌گراد است، نشان می‌دهد دمای هوای ورودی به ساختمان از یک بادگیر سنتی برای سرعت‌های باد ۵ و ۱۰ متر بر ثانیه، تقریباً برابر با دمای هوای بیرون است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند با افزایش سرعت باد، جریان جرمی هوای ورودی به ساختمان افزایش می‌یابد و با دو برابر شدن این سرعت، جریان جرمی نیز تقریباً دو برابر می‌شود.

نتیجه

باتوجه به اینکه در دو نمونه موردي بررسی شده تنها تنسابات و فرم فضای اتاق‌های متصل به بادگیر متفاوت هستند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت فرم فضا و ابعاد و تنسابات اتاق‌هایی که تهویه طبیعی در آن‌ها به وسیله بادگیر صورت می‌گیرد در سرعت جریان باد و رفتار حرارتی آن نقش دارد. نتایج حاصل از تحلیل CFD کاروان‌سرای وکیل با ابعاد و تنسابات بزرگ‌تر و همچنین حجم مکعب و مدرسه ابراهیم‌خان با ابعاد و تنسابات کوچک‌تر با فرم کشیده‌تر و حجم مکعب‌مستطیلی نشان می‌دهد سرعت جریان هوای ورودی به فضایی دارای ابعاد و تنسابات بزرگ‌تر بیشتر

است و این در حالی است که سرعت برای ورود هوای اتاق به ساختار بادگیر در فضای با ابعاد و تنسابات کوچک‌تر، بیشتر نشان داده شده است و نیز توزیع جریان هوای درجه حرارت آن در فضای با ابعاد و تنسابات بزرگ‌تر به اندازه ناچیز بیشتر است. با توجه به متفاوت بودن فرم و حجم نمونه‌های موردي و نتایجی که از نحوه حرکت و مسیر چرخش باد در اتاق‌های متصل به بادگیر به وسیله نرم‌افزار به دست آمده، نتایج نشان می‌دهند که فرم و حجم فضا بر مسیر چرخش باد تأثیرگذار است و عملکرد رفتار باد در فضایی با فرم و حجم مکعب و پلان مربع (کاروان‌سرای وکیل) بهتر است و گرددش باد در تمام فضای اتاق متصل به بادگیر به خوبی دیده شده است. این در حالی است که در فضایی با تنسابات کشیده و حجم مکعب‌مستطیل جریان باد مستقیم از ورودی به اتاق بادگیر است.

باتوجه به تحلیل نمونه‌های موردي و نتایجی که از تأثیر تنسابات و حجم آن‌ها بر عملکرد بادگیر به دست آمده، چنین دریافت شد که می‌توان از تنساباتی که در اتاق‌هایی که تهویه طبیعی در آن‌ها به وسیله بادگیر صورت می‌گیرد و باعث عملکرد بهتر تهویه طبیعی شد، در طراحی بنایی معماری معاصر و سیستم‌های تهویه طبیعی امروزی نیز استفاده کرد، به این منظور:

۱. استفاده از حجم مکعب و نسبت طول به عرض مساوی در پلان فضاهایی که گرددش هوای در آن‌ها دارای اهمیت است و تهویه هوای به صورت طبیعی در آن‌ها صورت می‌گیرد، باعث عملکرد بهتر در تهویه خواهد شد.

۲. برای طراحی فضاهایی که سرعت جریان باد دارای اهمیت است، فضاهای با ابعاد و تنسابات بزرگ‌تر عملکرد مطلوب‌تری دارند.

با بررسی‌های دقیق‌تر و نتایجی که از مدل‌سازی و

- سیلوایه، سوئیا؛ دانشجو، خسرو؛ فرمین فراهانی، سعید. (۱۳۹۱). هندسه در معماری ایرانی پیش از اسلام و تجلی آن در معماری معاصر ایران. *نقش جهان*. (۱۳۸۹). بادخان ملاحظات کالبدی باد در ساختمان. ترجمه: احمدی نژاد، محمد. اصفهان: خاک.
- رازجویان، محمود. (۱۳۸۶). آسایش در پناه باد. تهران: مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- جهانگیری، میلاد؛ زارع، عبدالرضا. (۱۳۹۲). مطالعه سازه‌های بادگیر و بهینه‌سازی مقطع بادگیر تحت اثر انرژی تجدید پذیر باد به عنوان یک سیستم تهویه مطبوع در معماری قدیمی ایران. *نشریه مباحث برگزیده در انرژی*. (۱۳۹۱). ۳۱-۳۹.
- حجازی، مهرداد؛ حجازی، بینا؛ حجازی، صبا. (۱۳۹۶). معماری، عملکرد سرمایشی و رفتار لرزه‌ای بادگیر. مسکن و محیط روستا، - (۱۵۸). ۲۱-۳۴.
- دهقانی محمدآبادی، حسین؛ یزدان فر، سید عباس؛ دهقان، علی اکبر؛ دهقانی محمدآبادی، ابوالفضل. (۱۳۹۵). تحلیل عددی عملکرد بادگیر چهارجهتی متصل به تالار و حیاط مرکزی در زوایای مختلف برخورد باد. *مهندسی مکانیک مدرس*. (۱۲)، ۱۶-۱۲۵-۱۳۴.
- شاطریان، رضا. (۱۳۹۰). *اقلیم و معماری*. تهران: انتشارات سیمای دانش.
- صادقی، نگار؛ گرجی مهلهانی، یوسف؛ نظیف، حمیدرضا. (۱۴۰۰). بررسی عددی عملکرد حرارتی بادگیر در ایجاد تهویه طبیعی در اقلیم گرم و خشک. *انرژی‌های تجدید پذیر و نو*. (۱)، ۴۰-۳۳.
- قیابکلو، زهرا. (۱۳۹۳). *مبانی فیزیکی ساختمان ۴ (سرمایش غیرفعال)*. تهران: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- محمودی زرنده، مهناز. (۱۳۹۳). بادگیر، نماد معماری ایران. تهران: نشر یزدا.
- محمودی زرنده، مهناز؛ مفیدی شمیرانی، سید مجید. (۱۳۸۷). تحلیلی بر گونه شناسی معماری بادگیرهای یزد و یافتن گونه بهینه کارکردی. *هنرهای زیبا*. (۳۶)، ۳۶-۲۷.
- محمودی زرنده، مهناز، مفیدی شمیرانی، سید مجید. (۱۳۹۰). بررسی چگونگی تأثیرگذاری پلان معماری بادگیرها در کاهش دمای محیط. *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*. (۱۳)، ۱۳-۱۱۹.

تحلیل در نرم‌افزارهای تحلیل CFD به دست آمده، واضح است که سیستم‌های تهویه طبیعی همچون بادگیرها نکات قابل توجه بسیاری دارند که پژوهش‌های بیشتری در این زمینه را طلب می‌کند تا بدین وسیله بتوان از علم و هنر ارزشمند معماران گذشته سرزینمان در خلق آثار معماری امروز استفاده کرد.

پی‌نوشت

1. Computational Fluid Dynamics
2. Geometry

فهرست منابع

- ابوبی، رضا؛ مظفر، فرهنگ؛ ذاکر عاملی، لیلا. (۱۳۹۱). پیدایش بادگیر در خانه‌های دشت یزد - اردکان. *مرمت و معماری ایران (مرمت آثار و بافت‌های تاریخی فرهنگی)*. (۳)، ۲-۱۵.
- احدی، امین‌اله؛ علیرضایی ورنوفادرانی، بابک. (۱۳۹۳). بررسی فرم مناسب سقف و سودمندی استفاده از بادخور و بادگیر در تهویه طبیعی مسکن چابهار. *مسکن و محیط روستا*. (۳۳)، ۱۴۸-۱۵۲.
- بلیلان، لیدا؛ حسن پورلمر، سعید. (۱۳۹۸). *الگوهای هندسی و تنسیبات طلایی*. زبان مشترک معماری و هنر در روستای تاریخی ایانه. *معماری اقلیم گرم و خشک*. (۹)، ۶۸-۴۵.
- بهادری نژاد، مهدی. (۱۳۸۷). *بادگیر، شاهکار مهندسی ایران*. تهران: نشر یزدا.
- اقدامی، حامد؛ طحانی، اسدالله؛ رضایی رحیمی، محمد. (۱۳۹۳). *تبیین کاروان‌سراهای دوران اسلامی (مطالعه موردي کاروان‌سراي گنجعلی خان و وکیل کرمان)*. اولین همایش ملی عمران، معماری و توسعه پایدار. <https://civilica.com/doc/332020/>
- پسران، آرش؛ کریمی نیا، شهاب؛ ناظمی، الهام؛ طغیانی، شیرین. (۱۳۹۸). ارزیابی وجود مکانیسم طراحی منطبق بر تهویه طبیعی در معماری سنتی شهرهای اقلیم گرم و خشک بدون بادگیر (نمونه موردي: فضای بیرونی بناهای چهار طرفه قاجاری شیراز). *معماری اقلیم گرم و خشک*. (۹)، ۱۱۹-۱۰۱.
- پیرنیا، محمد کریم. (۱۳۹۸). *سبک‌شناسی معماری ایرانی*. تهران: گل جام. چاپ بیست و یکم.

- [https://doi.org/10.1155/2022/5382999.](https://doi.org/10.1155/2022/5382999)
- Hojati, A., Saedvandi, M., & De Angelis, E. (2021). Analysis of Performance of Three Wind-catchers for Ventilation of Contemporary Houses in Isfahan- Hot and Arid Climate - hot and dry climate of Isfahan. Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning, 11(3), 16-32.
 - Jomehzadeh, F., Hussen, H., Calautit, J., Nejat, P. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. Energy & Buildings 226.
 - Kheirkhah Sangdeh, P., Nasrollahi.N.(2022). Windcatchers and their applications in contemporary architecture. Energy and Built Environment .3. 56-72.
 - Lixing, G. (2007). Airflow Network Modeling in EnergyPlus, Conference Proceedings 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition on September 3-6, in Beijing, China.
 - Sadeghi, M., Wood, G., Samali, B., de Dear, R. (2020). Effects of urban context on the indoor thermal comfort performance of windcatchers in a residential setting. Energy & Buildings .219.
 - Varela-Boydo, C.A., moya, S.L, Watkins, R. (2021). Analysis of traditional windcatchers and the effects produced by changing the size, shape, and position of the outlet opening. Journal of Building Engineering .33.
 - Walker, A. (2016). Natural Ventilation. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.wbdg.org/resources/natural-ventilation>

DOI: 10.22034/42.183.33

- (مسلسل ۴۸)، ۹۱-۸۳
- معماریان، غلامحسین؛ محمدمرادی، اصغر؛ حسینعلی پور، سید مصطفی؛ حیدری، ابوالفضل؛ دودی، سعیده. (۱۳۹۶). تحلیل رفتار باد در تهویه طبیعی مسکن بومی روستای قلعه‌نوی سیستان به کمک CFD. مسکن و محیط روستا, ۳۶, ۳۶-۲۱.
 - مهدوی نژاد، جواد؛ جوانزودی، کاوان. (۱۳۹۰). مقایسه تطبیقی اثر جریان هوا بر دو گونه‌ی بادگیر یزدی و کرمانی. نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی. ۳(۴)، ۷۹-۶۹.
 - نجفقلی پورکلانتری، نسیم؛ اعتصام، ایرج؛ حبیب، فرج. (۱۳۹۶). بررسی هندسه و تناسبات طلائی در معماری ایران (نمونه مطالعاتی: خانه‌های سنتی شهر تبریز). مدیریت شهری, ۴۶(۴۶)، ۴۹۱-۴۷۷.
 - هاشمی رفسنجانی، لیلی السادات؛ حیدری، شاهین. (۱۳۹۷).
 - ارزیابی آسایش حرارتی تطبیقی در خانه‌های مسکونی اقلیم گرم و خشک مطالعه موردي: استان کرمان. معماری اقلیم گرم و خشک, ۷(۶)، ۶۵-۴۳.
 - یحیائی، مهدی؛ مفیدی شمیرانی، مجید؛ احمدی، وحید. (۱۴۰۰). مکان‌یابی پهنه‌های بالقوه جهت استقرار بادگیر در مناطق گرم و خشک کشور به منظور تهویه طبیعی ساختمان. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی, ۳۶(۲)، ۱۰۰-۱۱۳.

- Ahmed, T., kumer, P., Motter, L. (2021). Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 138.
- Bekleyen, A., Likoğlu, Y. (2020). An INVESTIGATION on the thermal effects of windcatchers. Journal of Building Engineering.
- Calautit, J., Li, J., Jimenez-Bescos, C. (2023). Experiment and numerical investigation of a novel flap fin louver windcatcher for multi-directional natural ventilation and passive technology integration, Building and Environment.
- Edwards, C. (2000). Design Rules of Thumb for Naturally Ventilated Office Buildings in Canada. Master of Advance Studies in Architecture Thesis, University of British Columbi, Vancouver.
- Farouk, M. (2020). Comparative study of hexagon & square windcatchers using CFD simulations. Journal of Building Engineering.31.
- Yang, Xu., Chang-Bing, Ch., Zheng-Qun, C. (2022). "Analysis on Indoor Ventilation Environment of House Type Based on Architectural Aesthetics", Complexity, Article ID 5382999, 14.