

تحلیل عملکرد بادگیر دو طبقه خانه آقازاده با رویکرد مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

مهدی معتمدمنش^{*}، حنانه محمدی^{**}، محیا سرلک^{***}

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۳/۰۶

چکیده

خانه آقازاده در شهر ابرکوه از نمونه های برجسته معماری اقلیمی در ایران است که با بهره گیری از عناصر پایداری مانند حیاط مرکزی، حوض و بادگیر دو طبقه، به گونه ای هوشمندانه مصرف انرژی را کاهش داده و آسایش حرارتی را ارتقا می دهد. این پژوهش با هدف تحلیل عملکرد بادگیر منحصربه فرد و دوطبقه این خانه از منظر تهویه طبیعی، از رویکرد تحقیق ترکیبی استفاده کرده است. داده ها از طریق مطالعات کتابخانه ای و برداشت میدانی گردآوری و به روش توصیفی تحلیل، سپس با مدل سازی رایانه ای در نرم افزار دیزاین بیلدر ارزیابی شده اند. شبیه سازی جریان هوا بر اساس فایل اقلیمی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (سی.اف.دی) انجام شد. نتایج نشان داد طبقه دوم بادگیر این خانه نقش مهمی در بهبود تهویه، افزایش سرعت جریان و کاهش ذرات معلق و آلودگی ها دارد. این طراحی، حتی در شرایط بدون باد، تهویه موثری فراهم می کند و الگویی الهام بخش برای معماری معاصر در اقلیم گرم و خشک به شمار می رود.

واژه های کلیدی

بادگیر، بادگیر دو طبقه، تهویه مناسب، اقلیم گرم و خشک، طراحی اقلیمی.

* استادیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، (مسئول مکاتبات).

Email: m.motamed@modares.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Email: hannaneh.mohammadi@modares.ac.ir

*** دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

Email: m_sarlak@modares.ac.ir

مقدمه

معماران سنتی ایران با بهره‌گیری از دانش عمیق خود در زمینه‌های اقلیمی، سازه‌ای و زیبایی‌شناختی، هوشمندی بی‌نظیری در توسعه و کاربرد فناوری‌های ساختمانی به خرج داده‌اند. آن‌ها با درک کامل از شرایط محیطی و نیازهای انسانی، تکنیک‌هایی را ابداع کردند که نه تنها پاسخ‌گوی نیازهای عملکردی ساختمان‌ها بود، بلکه به شیوه‌ای پایدار و هم‌ساز با طبیعت عمل می‌کرد. به عنوان مثال، استفاده هوشمندانه از نیروی باد و آب، کاربرد قنات‌ها برای تامین آب، و استفاده از ایوان، گودال باغچه و حیاط مرکزی برای تهویه طبیعی ساختمان، نمونه‌هایی بارز از این هوشمندی هستند. این معماران با ترکیب هنر و علم، در گذر زمان فناوری‌هایی را توسعه دادند که بدون نیاز به انرژی‌های فسیلی، آسایش حرارتی و محیطی را برای ساکنان ابنیه فراهم می‌کردند. این رویکرد نه تنها در زمان خود پیشرفته بود، بلکه امروزه نیز به عنوان الگویی برای معماری پایدار و سازگار با محیط‌زیست مورد توجه قرار می‌گیرد. شناخت این دانش وظیفه معمار امروز این سرزمین است و کاربرد آنان می‌تواند گامی ارزشمند در احیای هویت معماری ایرانی باشد.

اقلیم و معماری دو عنصر جدایی‌ناپذیر هستند که در تعامل با یکدیگر، بستر مناسبی برای زندگی پایدار فراهم می‌کنند. طراحی ساختمان بدون توجه به شرایط اقلیمی، دستیابی به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و بهره‌گیری موثر از منابع انرژی تجدیدپذیر را ناممکن می‌سازد. معماری بومی ایران، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک همواره از تعامل با محیط و اقلیم بهره برده تا با استفاده از تکنیک‌های هوشمندانه، مصرف انرژی را به حداقل برساند و آسایش حرارتی مطلوبی برای ساکنان فراهم آورد. در این میان، بادگیر به عنوان یکی از عناصر کلیدی معماری اقلیمی، نقش بسزایی در تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی می‌تواند ایفا کند (کرباسفروش‌ها و همکاران، ۱۴۰۱).

با آنکه بسیاری از خانه‌های بازمانده از عصر قاجار بادگیر دارند، در حقیقت استفاده از این عنصر در معماری ایران از دوره‌های پیش از قاجار آغاز شده، به عنوان عنصری ضروری در معماری خانه‌ها و بناهای شاخص مناطق گرم و خشک، و گرم و مرطوب مورد استفاده قرار گرفته است. با اهمیت رویکرد اقلیمی در طراحی بناها، بادگیرها جایگاه ویژه‌ای در معماری سنتی سرزمینمان داشتند (ذاکر عاملی و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از ایران در مناطق خشک و کویری

قرار دارد، هنوز هم چالش‌هایی نظیر تهویه هوا و ایجاد آسایش حرارتی با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله مسائل مهم در طراحی معماری کشور است. از این رو شناسایی روش‌های سنتی پاسخ به این نیازها اهمیت می‌یابد. بادگیرها با بهره‌گیری از انرژی طبیعی باد مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و آسایش حرارتی لازم را در فضاهای مسکونی ایجاد می‌کنند. این گونه در مناطق کویری سرپناه‌هایی ایجاد می‌شوند که با طراحی هوشمندانه‌ای که جهت‌گیری بادهای غالب و نیازهای جغرافیایی بستر پیرامون را در نظر می‌گیرد، محیطی امن و مطبوع برای ساکنان فراهم می‌کند (اسدی و همکاران، ۱۳۹۱). از این رو بازنشاسی روش‌های به کار رفته توسط معماران سنتی می‌تواند راهگشایی برای توسعه معماری آینده این مناطق باشد.

خانه آقازاده در ابرکوه، تنها بنای ایرانی است که دارای بادگیری دو طبقه می‌باشد. این بادگیر تنظیمات هوای داخل محیط خانه را حتی در زمانی که هیچ بادی نمی‌وزد، انجام می‌دهد و از این رو شاهکاری مهندسی تلقی می‌گردد. با استفاده از روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی جریان هوا با استفاده از رایانه، این پژوهش به دنبال پاسخی برای چرایی دو طبقه ساخته شدن این بادگیر می‌پردازد. فرضیه اصلی این است که چیدمان خاص معماری بنا در کارایی بادگیر تاثیر داشته، با چندعملکردی بودن بخش‌های مختلف بادگیر، کیفیت آسایش محیطی ارتقا پیدا می‌کرد. در نگاه اول با توجه به جریان باد غالب، به نظر می‌رسد بادگیر طبقه اول به عنوان بادخان عمل می‌کند، در حالی که بادگیر طبقه دوم عملکرد اصلی تهویه را بر عهده دارد. با تحلیل مسیر جریان هوا در هر دو بادگیر، این فرضیه به‌طور علمی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

پیشینه پژوهش

تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی بادگیرها در داخل و خارج از ایران صورت گرفته است. این پژوهش‌ها عموماً گونه‌شناسی و تاریخچه بادگیر، تحلیل کارایی این سیستم، نیز معاصر سازی آن را مورد توجه قرار داده‌اند. با اینکه در این پژوهش‌ها زوایای مختلف بادگیر به عنوان عنصری کارآمد در مناطق گرم مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱)، تابحال هیچ پژوهشی به مطالعه تنها بادگیر دو طبقه جهان و فلسفه طراحی آن نپرداخته است. از این رو پژوهش حاضر دریچه‌ای جدید به شناخت ما از عملکرد بادگیرها و میزان هوشمندی بکار رفته در ساخت آنها باز خواهد کرد.

جدول ۱. مروری بر پیشینه پژوهش
Table 1. An overview of the research background

نویسندگان؛ سال انتشار	هدف	روش	نتیجه
محمودی و مفیدی شمیرانی؛ ۱۳۸۷	بازشناسی هویت بادگیر	توصیفی- تحلیلی	تاکید بر هویت بادگیر در معماری ایرانی
مفیدی شمیرانی و محمودی؛ ۱۳۸۷	بهینه سازی استفاده از بادگیر	مدلسازی	شناسایی ویژگی های کارکردی بادگیر
ذاکرعاملی، و همکاران؛ ۱۳۹۱	ریشه یابی پیدایش بادگیر در یزد	توصیفی- تحلیلی (موردی)	پیدایش بادگیر در دوره تیموری و ایلخانی
کرباسفروشها، و همکاران؛ ۱۴۰۰	مقایسه عملکرد بادگیرها با ابزارهای مهندسی	مدلسازی	کاهش دمای هوا با استفاده از آب در بادگیر
پیوسته گر، و همکاران؛ ۱۳۹۶	بررسی اصول استاد پیرنیا	توصیفی- تحلیلی (موردی)	اصول پنج گانه شامل ابعاد مادی و معنوی مطابق آموزه های اسلامی
هدایت، و همکاران؛ ۱۳۹۸	مکانیک بادگیر و کاربرد معاصر آن	توصیفی- تحلیلی (تحقیق میدانی)	اصول پنج گانه شامل ابعاد مادی و معنوی مطابق آموزه های اسلامی
آقایی و کاراحمدی؛ ۱۴۰۱	راه حل های اقلیمی معماری سنتی در معماری معاصر	توصیفی- تحلیلی (موردی)	افزایش کارایی بادگیر با استفاده از زمین سرمایه
صدیق و مرادی؛ ۱۳۹۲	طراحی پایدار و حذف سوخت های فسیلی	توصیفی- تحلیلی	کاهش ۵۰٪ مصرف انرژی در ساختمان های طراحی شده با رویکرد پایداری
حکیمی، و همکاران؛ ۱۳۹۴	الگو برای استفاده مدرن از بادگیر	توصیفی- تحلیلی (موردی)	ترکیب تهویه سنتی و مدرن برای کاهش مصرف سوخت
Sirror; 2024	ادغام بادگیر سنتی با فناوری مدرن	مدلسازی	ترکیب بادگیرها در کنار سیستم های مدرن راه حلی پایدار برای تامین آسایش محیطی هستند
Saadatian et al.; 2012	مرور جامع بر بادگیرها	مدلسازی	نقش بادگیر در آسایش محیطی در اقلیم گرم و مرطوب
Jomehzadeh, et al.; 2020	عوامل موثر در عملکرد بادگیر	توصیفی- تحلیلی	بهبود عملکرد با ترکیب بادگیر و دودکش خورشیدی
Li, Mak; 2007	ارزیابی عددی عملکرد بادگیر	مدلسازی	کاهش یکنواختی جریان هوا با افزایش سرعت باد
Liu, et al.; 2024	عملکرد بادگیر از منظر چندگانه	توصیفی- تحلیلی	معرفی پارامترهای لازم پیش از عرضه تجاری بادگیر

روش تحقیق

مستقیماً به توسعه محصولات، خدمات و روش های نوین منجر شده و تاثیر ملموسی بر زندگی آدمی خواهند داشت. از نظر ماهیت، پژوهش حاضر توصیفی-تحلیلی است و داده های مورد نیاز آن از طریق دو روش اصلی گردآوری شده است: مطالعات کتابخانه ای و اسنادی (مثلاً داده های سازمان میراث فرهنگی در استان یزد) مرحله اول از تحقیق را بخود اختصاص می داد. در این مرحله مبانی نظری مرتبط با بادگیرها، عملکرد آن ها در اقلیم گرم و خشک، و تکنیک های به کار رفته برای ساخت آنها در معماری سنتی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعد با بازدیدها و برداشت های میدانی، داده های لازم برای تحلیل های بعدی جمع آوری شده اند. برای تجزیه و تحلیل داده ها، از مدل سازی کامپیوتری با استفاده از

این پژوهش با به کارگیری روش ترکیبی^۱ انجام شده است. این روش به دلیل توانایی پاسخگویی به سوالات پیچیده ای که روش های کمی یا کیفی به تنهایی قادر به حل آن ها نیستند، انتخاب شده است. این رویکرد نه تنها در شفاف سازی تفاوت ها و شباهت های میان ابعاد مختلف یک پدیده موثر است، بلکه با افزایش سطح استنادپذیری نتایج، اهمیت و اعتبار پژوهش را ارتقا می بخشد (گروت و وانگ ۱۳۹۶). از منظر هدف، این پژوهش در زمره پژوهش های کاربردی قرار می گیرد. پژوهش های کاربردی با هدف حل مسائل عملی و بهبود فرایندها در حوزه های مختلف مانند صنعت، مهندسی و فناوری (اینجا در حوزه معماری پایدار) انجام می شوند. این تحقیقات

نرم افزار دیزاین بیلدر^۲ بهره گرفته شده است. این نرم افزار توانایی محاسبه دقیق بارهای گرمایشی و سرمایشی ساختمان و مصرف انرژی، همچنین شبیه سازی جریان هوا^۳ بر اساس شرایط اقلیمی و جغرافیایی محل پروژه را دارد. ابعاد و اندازه های بنا با استفاده از برداشت های محلی و پلان های موجود ساختمان مدل سازی شده اند. اطلاعات اقلیمی مورد نیاز، از جمله جهت باد غالب و فیل اقلیمی^۴ از پایگاه داده های معتبر^۵ برای منطقه آسیا، کشور ایران، استان یزد، شهر ابرکوه استخراج شده اند. پارامترهای مدل سازی شده توسط نرم افزار در **جدول ۲** دیده می شوند.

این رویکرد ترکیبی، امکان تحلیل جامع و دقیق عملکرد بادگیر مورد مطالعه را فراهم می کند و به درک بهتر تاثیر این عنصر معماری بر آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی در ساختمان کمک می نماید.

جدول ۲. پارامترهای مدلسازی شده در نرم افزار دیزاین بیلدر
Table 2. Parameters Modeled in DesignBuilder Software

دسته بندی	پارامتر	شرح
اقلیمی	فایل اقلیمی	شهر ابرکوه- داده های اقلیمی سایت onebuilding.org
	سرعت باد	میانگین سالانه حدود ۲.۲ متر بر ثانیه، حداکثر ۵.۵ متر بر ثانیه
	جهت باد غالب	جنوب غربی و شمال شرقی (به ویژه در خرداد تا مهر)
هندسی	پلان بادگیر	دو طبقه، چهار طرفه، مستطیلی با نسبت طول به عرض تقریبی ۲ به ۱
	ارتفاع بادگیر	طبقه اول و دوم به ترتیب حدود ۱۱.۵ و ۱۵.۵ متر از کف
	تعداد و محل دهانه ها	۱۹ دهانه قابل تنظیم در چهار جهت اصلی
فیزیکی	فشار هوا	تحلیل فشار در طبقات اول و دوم، با در نظر گرفتن قانون برنولی
	سرعت جریان هوا	تحلیل در کانال ها، تیغه ها و خروجی ها برای بررسی تهویه
	جهت جریان هوا	بررسی عملکرد بادگیر دوطبقه به صورت بادگیر و بادخان
تحلیلی	مدل سازی جریان هوا	بررسی جریان، فشار و سرعت هوا در دو سناریو: با و بدون طبقه دوم

بادگیرها: عناصر هوشمند معماری اقلیمی

بنا بر تعریف، بادگیر به عنوان "دریچه یا روزنی که برای هدایت باد در خانه ساخته می شود، سازه ای بلند و تنوره مانند است که بر بالای بنا قرار گرفته و با ایجاد جریان هوا، به تهویه و خنک سازی فضاهای داخلی کمک می کند" (لغت نامه دهخدا، ۱۳۱۹). این عناصر نه تنها عملکردی اقلیمی دارند، بلکه به عنوان بخشی از سیمای شهری، جلوه ای زیبا و نمادین به بناهای تاریخی و سنتی می بخشند (محمودی و مفیدی شمیرانی، ۱۳۸۷). بادگیرها از دوره های پیش از قاجار به عنوان بخشی جدایی ناپذیر از معماری خانه ها و بناهای شاخص ایران مورد استفاده قرار گرفته اند. با اهمیت داشتن رویکرد اقلیمی در معماری ایران زمین، بادگیرها به عنوان عنصری کلیدی در مناطق گرم و خشک شناخته شدند. با این حال، به دلیل تخریب بناها که معمولاً با از بین رفتن سقف و بادگیر آغاز می شود، نمونه های کهن بادگیر به ندرت یافت می شوند. درخصوص محل و زمان ابداع بادگیر میان محققین اتفاق آراء وجود ندارد. با اینکه یافتن شدن تصاویری در مصر باستان که بناهایی با سقفی شبیه بادگیر را نمایش می دهند احتمال آغاز بهره برداری از این سیستم را در این سرزمین تقویت می کند،

در گرگان نیز شواهد باستانی از چهار هزار سال پیش از میلاد بر کاربرد این گونه از سازه ها در ایران تاکید دارد (Pirhayati et al., 2013, 438) در دوره قاجار، بادگیر به عنوان یکی از عناصر شاخص معماری مطرح و در اکثر خانه ها، مساجد، مقابر و عمارات ملوکانه مورد استفاده قرار گرفت (ذاکر عاملی و همکاران، ۱۳۹۱). در این دوره، بادگیرها همراه با ایوان ها نقش مهمی در ایجاد آسایش حرارتی ابنیه ایفا می کردند. ایوان ها با ایجاد سایه انداز در بخش تابستان نشین بنا، فضایی خنک و مطبوع فراهم می کردند و در پشت آن ها، اتاق هایی مجهز به بادگیر قرار داشتند که به تهویه طبیعی فضا کمک می کردند (ذاکر عاملی و همکاران، ۱۳۹۱).

بادگیرها از اجزای مختلفی تشکیل شده اند که هر یک نقش خاصی در عملکرد کلی این سازه ایفا می کنند. از بالا تا پایین، از نگاه معماران بادگیر شامل قسمت های زیر است: نوره: بخش بالایی بادگیر که وظیفه هدایت باد به داخل کانال ها را بر عهده دارد. ساقه: بخش میانی بادگیر که کانال های اصلی عبور هوا در آن قرار دارند. زه و زنجیر: بخش پایینی بادگیر که به عنوان رابط بین بادگیر و فضای داخلی ساختمان عمل می کند. قفسه ها: عناصری که فضای داخلی بادگیر را به کانال های کوچک تر تقسیم می کنند (معماریان، ۱۳۷۵).

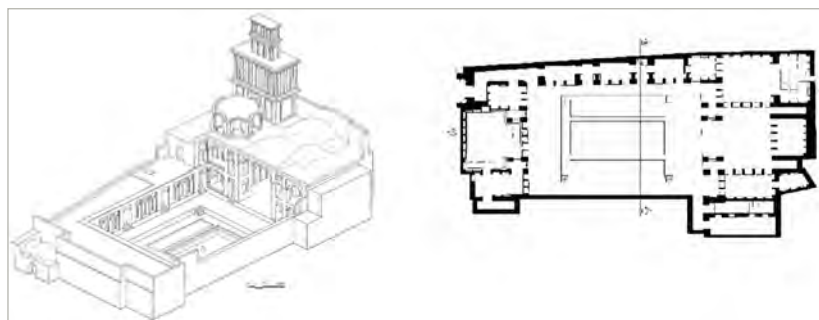
در ادبیات طراحی اقلیمی در معماری سنتی ایران با واژه‌های بنام بادخوان نیز روبرو می‌شویم. بادخوان سازه‌ای ساده و کوچک است که تنها برای هدایت جریان باد به داخل فضاها یا کوچک یا زیرزمینی استفاده می‌شود. برخلاف بادگیر، بادخوان ارتفاع کمتری دارد و معمولاً تنها یک دهانه جهت‌گیر دارد. این سازه بیشتر در مناطق گرم و مرطوب جنوب کشور کاربرد داشته و هدف اصلی آن ایجاد تهویه و جریان هواست.

خانه آقازاده: نمادی از معماری اقلیمی در ابرکوه

خانه آقازاده در شهرستان ابرکوه، واقع در استان یزد قرار دارد. این شهر به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در اقلیم گرم و خشک، دارای ویژگی‌های معماری منحصر به فردی است که در خانه آقازاده به‌طور چشم‌گیری نمایان شده است (شکل ۱). اقلیم گرم و خشک با ویژگی‌هایی همچون رطوبت مطلق بسیار کم، بارندگی اندک و اختلاف دمای قابل توجه بین شب و روز شناخته می‌شود. این اقلیم دارای تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد و خشک است. ابرکوه دارای بافت شهری متراکم است که با هدف ایجاد سایه‌اندازی در معابر و کاهش تابش مستقیم آفتاب طراحی شده است. به همین دلیل، کوچه‌ها باریک و پوشیده از طاق هستند. ساختمان‌ها در این منطقه به‌صورت درون‌گرا ساخته شده‌اند و معمولاً دارای حوض و حیاط مرکزی هستند تا از سرمایش تبخیری بهره‌برداری کنند. به خانه‌های این اقلیم همچون نمونه مورد پژوهش، خانه‌های چهار فصل گفته می‌شود، زیرا دارای بخش‌های مجزای تابستان‌نشین و زمستان‌نشین هستند. تابستان‌نشین، که معمولاً در قسمت جنوبی بنا و با ارتفاع بیشتر ساخته می‌شود، شامل یک سرداب نیز می‌شود و بادگیر بر فراز آن قرار می‌گیرد. بخش زمستان‌نشین در قسمت شمالی بنا واقع شده و به دلیل دریافت نور و گرمای بیشتر، فضایی مناسب برای فصل سرد سال است. نسبت ارتفاع ساختمان تابستان‌نشین به طول حیاط کمتر از یک است تا بخش تابستان‌نشین بر روی زمستان‌نشین سایه‌اندازی نداشته باشد. این طراحی هوشمندانه، امکان استفاده بهینه از انرژی خورشیدی در زمستان و ایجاد سایه در تابستان را فراهم می‌کند (جلالی‌زاده، ۱۴۰۱).

ستون یا ساقه بادگیرها دارای فرم‌های متنوع از جمله مکعب، مکعب مستطیل، منشور و در موارد نادر استوانه‌ای است. این تنوع فرمی باعث ایجاد پلان‌های متفاوتی همچون مستطیل، مربع، شش ضلعی و هشت ضلعی می‌شود. در شهر یزد، این تنوع بادگیرها به وضوح قابل مشاهده است. با توجه به ارتفاع بیشتر بادگیر نسبت به ساختمان و وجود حفره‌هایی در بدنه آن که مقاومت سازه را در برابر نیروهای جانبی کاهش می‌دهد، توجه معمار به پایداری سازه‌ای بادگیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود. به همین دلیل، از تیرهای چوبی در بدنه بادگیر استفاده می‌شود تا مقاومت آن در برابر نیروی دینامیکی باد افزایش یابد (زمرشیدی، ۱۳۷۷). مصالح به‌کاررفته در ساخت بادگیر خانه‌های سنتی ایران شامل آجر، گل، خشت خام، گچ و چوب شورونه است (هاشمی زرج‌آباد و مسعودی، ۱۳۹۱). این چوب به دلیل مقاومت در برابر موربانه‌ها، گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در بادگیرها است. خشت نیز با داشتن ظرفیت گرمایی مطلوب، به تنظیم دمای داخلی این عنصر کمک می‌کند. رنگ کاه‌گلی بادگیر نه تنها به بازتاب نور خورشید و کاهش جذب حرارت کمک می‌کند، بلکه بافت زبر آن نیز مانع جذب پرتوهای خورشیدی می‌شود.

اجزای عملکردی بادگیر به قرار ذیل است: بخشی از بادگیر که محل عبور جریان هواست دهانه نام دارد. عناصر خشتی یا آجری که فضای داخلی بادگیر را به کانال‌های کوچک‌تر تقسیم می‌کنند تیغه نام دارند که به دو دسته اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند. نهایتاً بالاترین قسمت بادگیر که می‌تواند به صورت مسطح، شیب‌دار یا منحنی طراحی شود سقف بادگیر است (بهادری‌نژاد و دهقانی، ۱۳۹۲). به صورت ساده، عملکرد بادگیرها در دو حالت صورت می‌گیرد: در حالت اول دریاچه‌های بادگیر که در جهت بادهای مطلوب قرار گرفته‌اند، هوای خنک را به داخل ساختمان هدایت می‌کنند. در حالت دوم، در صورت عدم وزش باد، هوای گرم داخل ساختمان که چگالی کمتری دارد، به سمت بالا حرکت کرده و از طریق دریاچه‌ها به بیرون منتقل می‌شود. این عملکرد مکشی، تهویه طبیعی را در ساختمان‌ها تضمین می‌کند و بدون نیاز به انرژی‌های فسیلی، آسایش حرارتی را فراهم می‌نماید (اسدی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۱. کالبد معماری خانه آقازاده (منبع: وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی بی تا)
Figure 1. Architectural configuration of the Aghazadeh House (Source: Ministry of Cultural Heritage, Tourism, and Handicrafts)

فضایی دل‌پذیر و خنک خلق می‌شد که به بهبود آسایش حرارتی ساکنان کمک می‌کرد (معماریان، ۱۳۷۵). بادگیر خانه آقازاده ابرکوه زیباترین بادگیر ابرکوه محسوب می‌گردد (شکل ۲)؛ که دارای ۱۸ متر ارتفاع، ۱۸ مترمربع مساحت و ۱۹ دریچه تنظیم هوا در دهانه‌ی بادگیر است (وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی بی تا). این بادگیر تنظیمات هوا را حتی در زمانی که هیچ بادی نمی‌وزد، انجام می‌دهد و برخلاف سایر بادگیرهای ایران در دو طبقه ساخته شده است. بادگیر طبقه‌ی دوم کوچک تر از بادگیر طبقه اول است. طبقه اول از نظر سازه‌ای در نقش پایه‌ای برای بادگیر طبقه دوم عمل می‌کند. پلان هر دو بادگیر مستطیل شکل بوده و هر دو چهار طرفه هستند. در این بادگیر منحصر بفرد نسبت طول به عرض تقریباً ۲ به ۱ می‌باشد. در این بادگیر، هر دو نوع تیغه‌های جداکننده وجود دارد که کانال‌هایی با سطح مقطع کوچک‌تر ایجاد کرده‌اند (شکل ۳). در طراحی دریچه و تیغه‌های بادگیر تزئیناتی به کار رفته و دریچه‌ها و تیغه‌ها امکان باز و بسته شدن با توجه به شدت باد را دارد (وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی بی تا).



شکل ۲. بادگیر خانه آقازاده، ابرکوه

Figure 2. Windcatcher of the Aghazadeh House, Abarkuh

اصفهان به کرمان و دیگری از کوه‌های خراق (شمال) و شیرکوه (جنوب). این جهت‌گیری سبب شده که بادگیرهای یزد عمدتاً دارای پلان مستطیل شکل باشند، به‌طوری که عرض آن‌ها به سمت شرق و غرب و طولشان در امتداد بادهای شمالی و جنوبی قرار گیرد. از آنجا که باد شمال غربی به‌عنوان باد مطلوب یزد شناخته می‌شود، معماران سنتی تلاش می‌کردند تا یکی از اضلاع اصلی بادگیر را عمود بر این جهت طراحی کنند تا حداکثر استفاده از جریان هوای مطلوب را ممکن سازند (محمودی، ۱۳۹۳).

خانه آقازاده در بافت قدیم شهر ابرکوه، در محله دروازه میدان واقع شده است. این عمارت از ترکیب پنج خانه تاریخی شامل خانه‌های حسینی دوست، موسوی، گبری، سیدعلی آقا و آقازاده تشکیل شده است. از این پنج خانه، سه عمارت تاریخی شامل خانه‌های سیدعلی آقا، موسوی و حسینی دوست تا به امروز باقی مانده‌اند. خانه سیدعلی آقا در مجاورت خانه آقازاده قرار دارد و از طریق یک سباط به آن متصل می‌شود. قدمت خانه آقازاده به اواخر دوره قاجار بازمی‌گردد و توسط استاد رضا معمار ساخته شده است. این بنای تاریخی با شماره ثبت ۱۸۳۸ در زمستان ۱۳۷۵ در فهرست آثار ملی ایران به ثبت رسیده است (وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی بی تا). خانه آقازاده در دو طبقه و بر روی زمینی به مساحت تقریبی ۱۵۰۰ متر مربع با پلان مستطیل‌شکل و به شیوه سنتی ساخته شده است. این خانه، مانند سایر خانه‌های تاریخی یزد، دارای حیاطی مرکزی با رویکردی کاملاً درون‌گرا است. حیاط مرکزی به‌عنوان قلب خانه، فضایی ارتباطی-حرکتی ایجاد می‌کند که کاملاً متفاوت از فضای بیرونی است. در این حیاط، با کاشت درختان و ایجاد حوض،



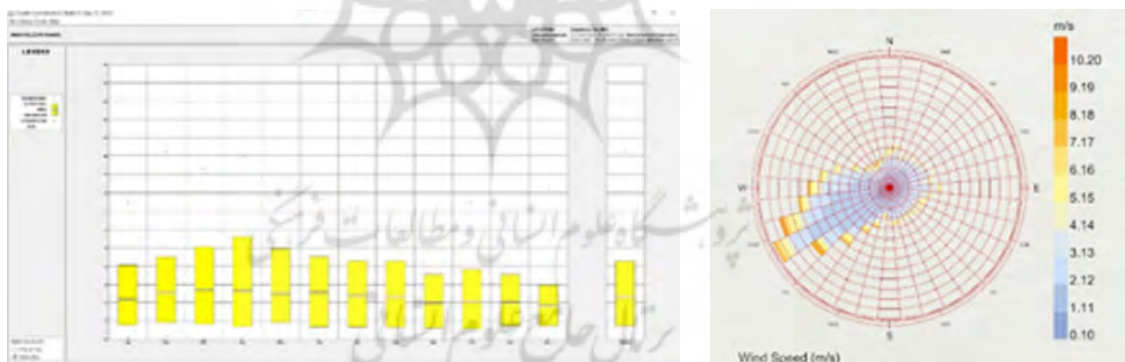
طراحی و ترکیب بادگیر با اتاق زیرین آن در خانه‌های مختلف، از تناسب و ابعاد یکسانی پیروی نمی‌کند و می‌تواند با توجه به شرایط ویژه معماری، موقعیت محلی، توپوگرافی زمین و حتی خواست صاحب خانه، متفاوت باشد (ذاکر عاملی و همکاران، ۱۳۹۱). مثلاً در مناطق گرم و خشک، به دلیل وزش بادهای همراه با گرد و غبار، بادگیرها مرتفع‌تر ساخته می‌شوند تا جریان هوای مطلوب را به داخل هدایت کرده و از ورود گرد و غبار جلوگیری کنند (جلالی‌زاده، ۱۴۰۱). در استان یزد، بادهای مطلوب از دو جهت اصلی می‌وزند: یکی از سمت



شکل ۳. تیغه های بادگیر خانه آقازاده
Figure 3. Blades of the Windcatcher in the Aghazadeh House

بر ثانیه بوده و حداکثر و حداقل سرعت باد به ترتیب $5/5$ و $0/7$ متر بر ثانیه می باشد. با توجه به اهمیت بادگیر در مواقع گرم سال، گلباد از ابتدای خرداد تا آخر مهرماه مورد بررسی قرار گرفته (شکل ۴)، نتیجه گیری می شود در این بازه دو باد غالب از سمت جنوب غربی و شرق تا شمال شرقی در ابرکوه می وزند. از آنجا که باد جنوب غربی فراوانی بیشتری دارد. در نتیجه در اینجا برای تحلیل جریان هوا در بادگیر خانه آقازاده از باد جنوب غربی با سرعت حدود $2/2$ متر بر ثانیه استفاده شده است.

عملکرد بادگیر خانه آقازاده از منظر مهندسی مکانیک سیالات
برای برداشت باد غالب و استفاده از فایل اقلیمی برای تحلیل سی. اف. دی از فایل اقلیمی ابرکوه که از سایت onebuilding.org (آسیا، کشور ایران، استان یزد، ابرکوه) قابل برداشت می باشد، استفاده شده است. همانطور که در گلباد سالانه این شهر مشاهده می شود، جریان هوای غالب از سمت جنوب غربی است که در اکثر سال در بازه سرعت 1 تا $2/2$ متر بر ثانیه می باشد. در نمودار میانگین سرعت باد مشاهده می شود که میانگین سرعت در کل سال در حدود $2/2$ متر

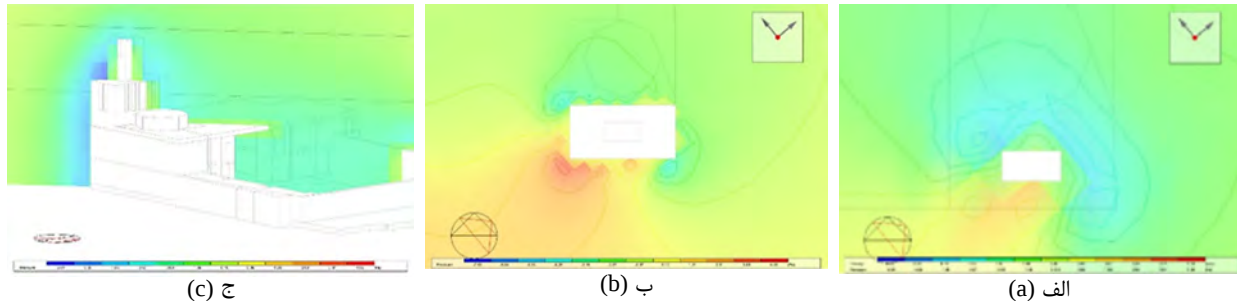


شکل ۴. نمودار گلباد و سرعت میانگین باد در محدوده تحقیق (منبع: onebuilding.org)
Figure 4. Wind Rose and Average Wind Speed in the Study Area (Source: onebuilding.org)

به داخل ساختمان جریان می یابد (شکل ۵). این فرآیند باعث تهویه طبیعی و خنک شدن فضای داخلی می شود. اختلاف فشار ایجاد شده بین هوای داخل و خارج ساختمان، به دلیل قانون برنولی، جریان هوا را تقویت می کند. این اختلاف فشار به طور طبیعی هوا را از مناطق پر فشار (خارج) به مناطق کم فشار (داخل) هدایت کرده و این فرآیند تداوم می یابد. این مکانیسم بدون نیاز به انرژی اضافی، یک سیستم خنک کننده پایدار و کارآمد ایجاد می کند. برای درک بهتر عملکرد بادگیر دو طبقه خانه آقازاده، در اینجا مدلسازی رایانه ای در دو فاز صورت می گیرد. در حالت نخست وضعیت فعلی

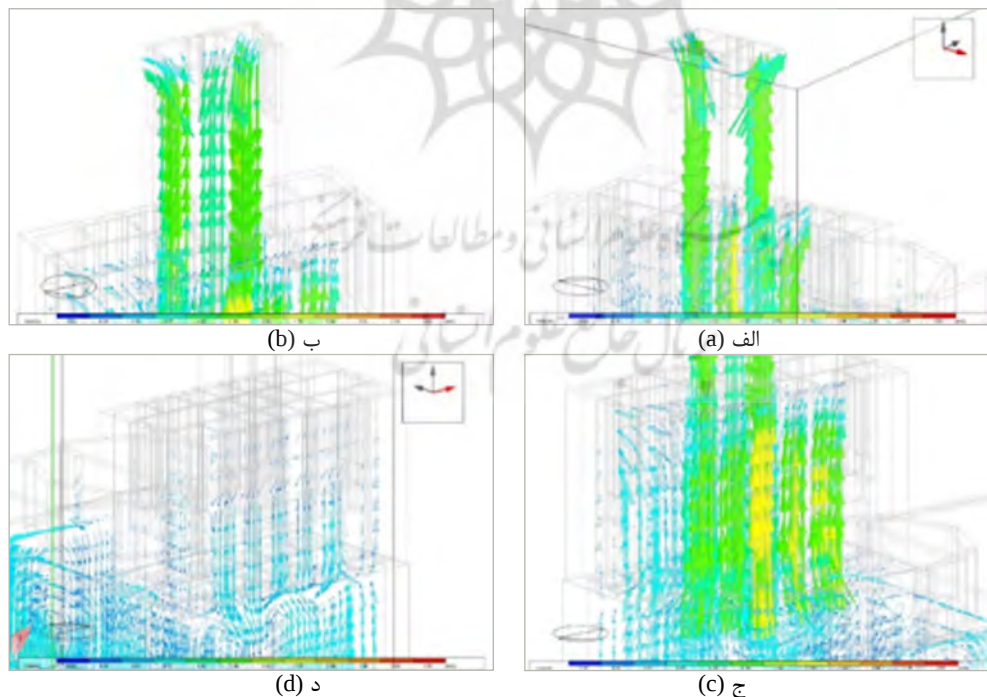
قانون برنولی در سیالات بیان می دارد که با افزایش سرعت یک سیال، فشار استاتیک آن کاهش می یابد و بالعکس. این قانون چگونگی عملکرد یک بادگیر را از دیدگاه علم مکانیک بیان می دارد. هنگامی که باد به دهانه بادگیر برخورد می کند، هوای خارج با سرعت بالاتری از بالای بادگیر عبور می کند. بر اساس قانون برنولی، افزایش سرعت هوا باعث کاهش فشار در آن ناحیه می شود. این کاهش فشار، هوای داخل ساختمان را به سمت بالا و خارج از بادگیر می کشد و یک جریان هوا ایجاد می کند. از دیگر سو، هوای خنک خارج از ساختمان (که فشار بالاتری دارد) از طریق دهانه های پایینی بادگیر

بادگیر مورد تحلیل قرار می‌گیرد تا سرعت، شدت و جهت جریان هوا در کانال‌های مختلف شناسایی شود. در حالت دوم با حذف بادگیر طبقه دوم، کاربرد بادگیر یک طبقه متداول در مناطق گرم و خشک کشور در ابرکوه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. اینگونه درک بهتری از مزیت‌ها و ناکارآمدی‌های احتمالی سیستم اجرا شده در خانه آقازاده حاصل می‌آید.



شکل ۵. الف) فشار هوا در میانه بادگیر طبقه دوم (ارتفاع ۱۵.۵ متر)؛ ب) پلان فشار هوا در میانه بادگیر طبقه اول (ارتفاع ۱۱.۵ متر)؛ ج) مقطع فشار هوا
Figure 5. a) Air pressure at the midpoint of the second-story windcatcher (height: 15.5 m); b) Air pressure plan at the midpoint of the first-story windcatcher (height: 11.5 m); c) Air pressure section

فشار هوا در ضلع شمالی بادگیر (پشت به باد) منفی و در ضلع جنوبی (رو به باد) مثبت می‌باشد. جریان هوا در داخل ایوان از سمت پنجره‌های غربی اتاق زیر گنبد مثبت و از سمت پنجره‌های شمالی منفی است. با توجه به جریان یافتن هوا از سمت مثبت به منفی، انتظار می‌رود این سازه در قسمت رو به باد به صورت بادگیر و در قسمت پشت به باد به صورت بادخان عمل کند. شکل ۶ نشان می‌دهد که با توجه به رو به باد بودن دریچه‌های غربی، کانال غربی به صورت بادگیر عمل کرده، جریان هوا را با سرعتی در حدود ۱/۵ متر بر ثانیه به داخل فضا می‌برد. دریچه شمالی و شرقی که پشت به باد هستند هوا را در داخل کانال‌ها مکش و با سرعت حدود ۱/۲ تا ۱/۵ متر بر ثانیه به بیرون هدایت می‌کنند. نکته آنکه سرعت باد در میانه بدنه بادگیر دوم تا حدود ۱/۸ متر می‌رسد و وقتی به تراز بالاتر راه می‌یابد، با برخورد با سقف دچار شکست شده، سرعت آن کاهش می‌یابد.



شکل ۶. الف) جریان هوا در بادگیر طبقه دوم در کانال‌های شرقی و غربی؛ ب) جریان هوا در بادگیر طبقه دوم در کانال‌های شرقی، غربی و میانی از سمت شمال؛ ج) جریان هوا در بادگیر طبقه اول در ضلع شمالی و شرقی؛ د) جریان هوا در ضلع جنوبی و غربی

Figure 6. a) Airflow in the second-story windcatcher through the eastern and western channel; b) Airflow in the second-story windcatcher through the eastern, western, and central channels from the north; c) Airflow in the first-story windcatcher on the northern and eastern sides; d) Airflow on the southern and western sides

دریچه‌های شمالی و شرقی خارج می‌شود. جریان هوای ورودی بادگیر از دریچه‌ها و کانال‌های جنوبی و غربی نیز از پنجره‌های شمالی اتاق خارج می‌شود. شدت جریان هوا (سرعت و میزان) در اطراف پنجره‌های اتاق زیر گنبد و در بادگیر طبقه دوم بیشتر می‌باشد (شکل ۷).

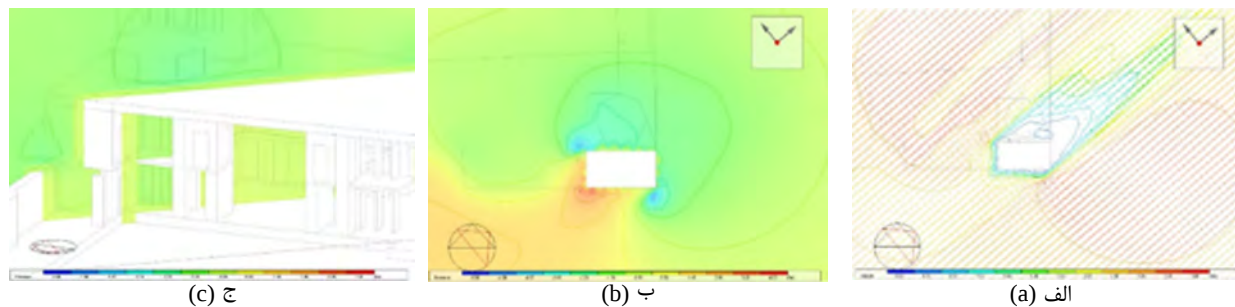
با توجه به فشار خارج بادگیر و بررسی جریان‌های داخلی می‌توان نتیجه گرفت که بادگیر دو طبقه خانه آقازاده همزمان می‌تواند هم به صورت بادگیر و هم به صورت بادخان عمل کند. جریان هوا از پنجره‌های غربی وارد شده و مدلسازی رایانه‌ای نشان می‌دهد که از کانال‌ها و



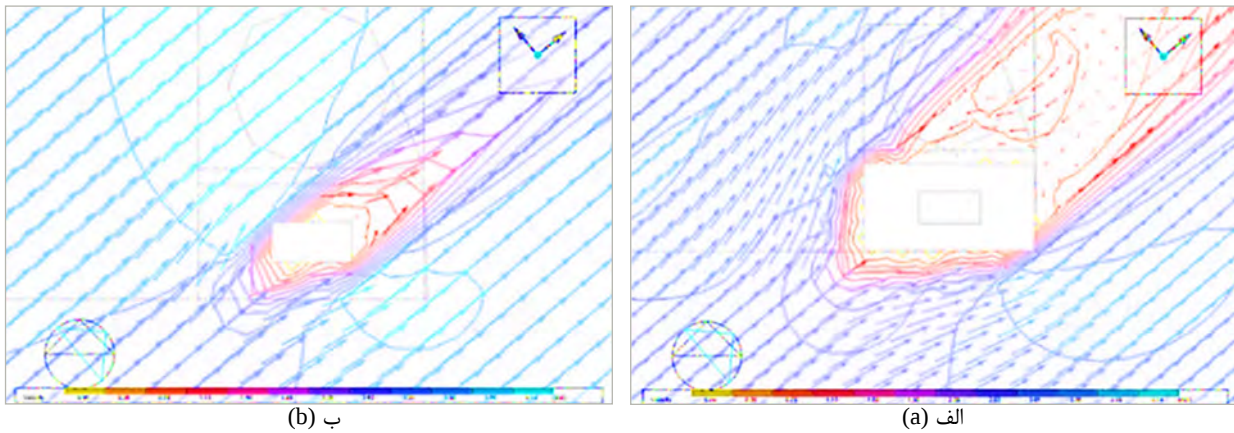
شکل ۷. خطوط کانتور جریان هوا در بادگیر خانه آقازاده
Figure 7. Contour Lines of Airflow in the Windcatcher of the Aghazadeh House

دوم سبب کاهش شکست باد به علت کمتر بودن سطح مقطع جبهه مقابل باد شده، سبب می‌گردد تا سرعت باد در اطراف بادگیر طبقه دوم بیشتر شود (شکل ۹). در بادگیر طبقه دوم سرعت جریان هوا در نزدیکی بادگیر و در جبهه رو به باد از ۱ تا حدود ۳/۵ متر بر ثانیه صورت می‌پذیرد. اما در بادگیر طبقه اول بنا بر دلایل ذکر شده، سرعت جریان هوا کمتر و بین ۰/۵ تا ۲/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. نکته دیگر کاهش جریانات اطراف جبهه‌های پشت به باد در بادگیر طبقه اول می‌باشد. در جبهه شمال شرقی بادگیر طبقه دوم هوا با سرعتی بین ۰/۵ تا ۲/۲ متر بر ثانیه جریان دارد اما در جبهه شمال شرقی بادگیر طبقه اول جریان هوا به ندرت به سرعتی بالای ۰/۵ متر بر ثانیه می‌رسد. این امر سبب کاهش فشار در این جبهه شده و این کاهش فشار باعث کمتر شدن اختلاف فشار بین خروجی بادگیر و پنجره‌های ورودی می‌شود و این امر نهایتاً سبب کاهش تهویه طبیعی ساختمان می‌گردد.

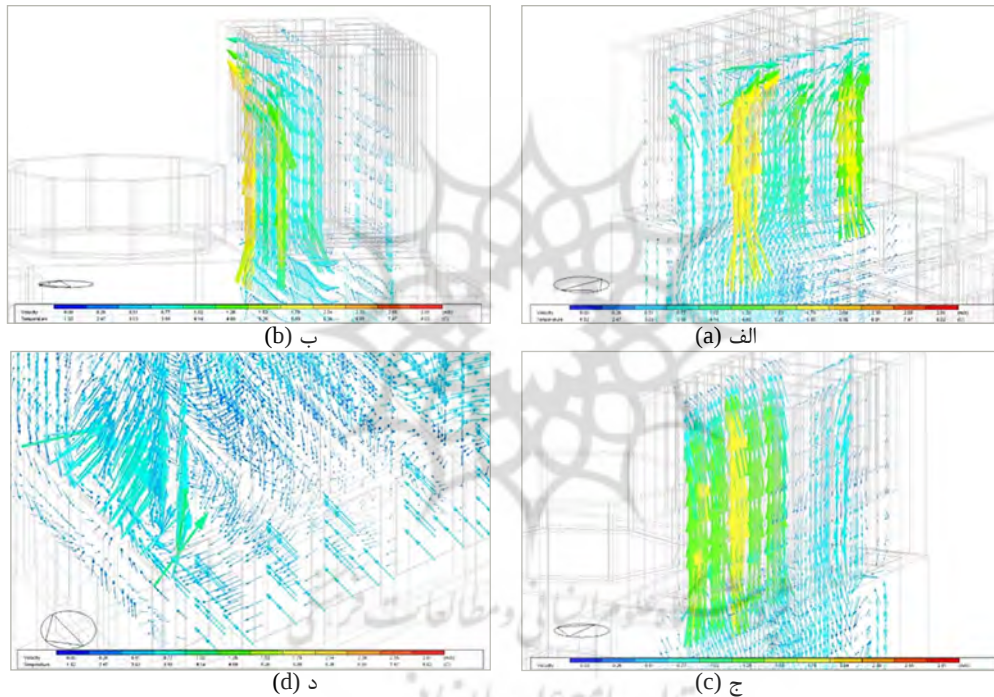
با حذف بادگیر دوم در مدلسازی رایانه‌ای، عملکرد بادگیر مشابه حالت قبل باقی می‌ماند و جبهه‌های رو به باد (جنوبی و غربی) با داشتن فشار مثبت به صورت بادگیر و جبهه‌های پشت به باد (شمالی و شرقی) به صورت بادخان عمل می‌کنند (شکل ۸ و ۱۰). در این حالت با حذف بادگیر طبقه دوم و کاهش سطح مقطع باربر مورد نیاز، منطقی با امکان بزرگتر شدن کانال‌های مرکزی حجم جریان هوای عبوری در جبهه شمالی افزایش خواهد یافت، اما همانطور که مدلسازی نشان می‌دهد سرعت باد در کانال‌های جنوبی و غربی تفاوتی چشم‌گیری نخواهد داشت. مدلسازی بادگیر در حالت فعلی نشان از آن دارد که سرعت و شدت جریان باد در اطراف بادگیر طبقه اول در مقایسه با بادگیر طبقه دوم به میزان قابل ملاحظه‌ای کمتر می‌باشد. این موضوع به علت کمتر بودن ارتفاع است. چرا که با توجه موانع اطراف در ارتفاع پایین‌تر سرعت باد کاهش می‌یابد. همچنین مساحت کوچکتر بادگیر طبقه



شکل ۸. الف) جریان هوا در اطراف بادگیر؛ ب) فشار هوا در اطراف بادگیر؛ ج) فشار هوا اطراف پنجره‌های اتاق زیر گنبد
Figure 8. a) Airflow around the windcatcher; b) Air pressure around the windcatcher; c) Air pressure around the windows of the domed room



شکل ۹. الف) جریان هوا اطراف بادگیر طبقه اول؛ ب) جریان هوا اطراف بادگیر طبقه دوم
Figure 9. a) Airflow around the first-story windcatcher; b) Airflow around the second-story windcatcher



شکل ۱۰. الف) جریان هوا در جبهه شمالی و شرقی؛ ب) جریان هوا در جبهه غربی و جنوبی؛ ج) جریان هوا در جبهه جنوبی و غربی؛ د) جریان هوا در پنجره های شمالی و غربی ایوان مشابه حالت قبل می باشد و تفاوتی نکرده است

Figure 10. a) Airflow on the northern and eastern façades; b) Airflow on the western and southern façades; c) Airflow on the southern and western façades; d) Airflow around the northern and western windows of the veranda remains unchanged compared to the previous condition

۰/۷ متر بر ثانیه می رسد اما در طبقه دوم این سرعت تا ۱/۵ متر بر ثانیه نیز می رسد. فارغ از مباحث مربوط به سرعت، فشار و چگونگی جریان هوا در بادگیر، نکته حائز اهمیت دیگر در بادگیر طبقه دوم کیفیت هوای ورودی است که با نرم افزار قابل اندازه گیری نمی باشد. اما با توجه به افزایش ارتفاع، خنک تر بودن جریان هوای ورودی از بادگیر طبقه دوم و تمیزتر بودن آن امری محتمل به نظر می رسد. چرا که گرد و غبار به علت وزن و سنگینی خود در ارتفاع های پایین تر از باد جدا شده و بادی که در ارتفاعات بالاتر می وزد از کیفیت بالاتری برخوردار است.

با حذف بادگیر طبقه دوم حداکثر شدت جریان هوا در جبهه شمالی در حدود ۰/۵ متر بر ثانیه افزایش می یابد. اما جریان هوا در سایر جبهه ها تفاوت چشمگیری نمی کند. به نظر می رسد بادگیر طبقه اول نقش بادخان و بادگیر طبقه دوم نقش بادگیر را ایفا می کند. چرا که با توجه به سرعت بیشتر باد در ارتفاع بالاتر، هم به سبب افزایش ارتفاع هم به سبب کاهش موانع اطراف جریان هوای ورودی از طریق کانال های بادگیر طبقه دوم فراوانی بیشتری داشته و از سرعت بالاتری نیز برخوردارند. در طبقه اول سرعت جریان هوای ورودی از بادگیر نهایی تا

نتیجه‌گیری

تحلیل عملکرد بادگیر دو طبقه خانه آقازاده نشان می‌دهد که این ساختار، علاوه بر تهویه طبیعی، در بهبود کیفیت جریان هوا و کاهش دمای داخلی تاثیر بسزایی دارد. استفاده از دو طبقه در این بادگیر نه تنها باعث افزایش حجم جریان ورودی و خروجی می‌شود، بلکه با بهره‌گیری از اختلاف فشار و مکانیسم‌های طبیعی، عملکردی بهینه‌تر نسبت به بادگیرهای یک طبقه ارائه می‌دهد. اصول مکانیک سیالات و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نشان می‌دهد که بادگیر طبقه دوم، با جذب بادهای قوی‌تر در ارتفاع بالاتر، کیفیت هوای ورودی را ارتقا می‌دهد و به خنک‌سازی محیط داخلی کمک شایانی می‌کند. در مقایسه با بادگیرهای متداول، این طراحی موجب افزایش سرعت جریان هوا و بهبود عملکرد تهویه می‌شود. یکی از نکات مهم دیگر، کاهش ورود گرد و غبار به دلیل قرارگیری دهانه‌های ورودی در ارتفاع بالاتر است که سبب ورود هوای پاک‌تر و خنک‌تر به داخل بنا می‌شود. این ویژگی می‌تواند الگویی برای طراحی سیستم‌های تهویه طبیعی در معماری معاصر باشد، خصوصاً در مناطق گرم و خشک که کاهش مصرف انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که احیای دانش معماری سنتی و تلفیق آن با فناوری‌های مدرن می‌تواند به توسعه پایدار و کاهش وابستگی به سیستم‌های تهویه مکانیکی کمک کند.

نقش نویسندگان

بررسی ادبیات، تجزیه و تحلیل و تفسیر داده‌ها، تهیه متن دست‌نوشته توسط نویسندگان دوم و سوم انجام گرفته‌است. نویسنده اول مدیریت پژوهش را برعهده داشته و با بازنویسی متن دست‌نوشته، نیز تحلیل و صحت‌سنجی داده‌ها خروجی قابل انتشار را تهیه کرده است.

تعارض منافع نویسندگان

نویسندگان به‌طور کامل از اخلاق نشر تبعیت کرده و از هرگونه سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافی تجاری در این راستا وجود ندارد و نویسندگان در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده‌اند.

پی‌نوشت

1. Mixed Methods
2. DesignBuilder
3. CFD
4. EPW
5. onebuilding.org, 2024

فهرست مراجع

۱. اسدی، لادن؛ سعیدی، آیدین؛ و بیک محمدی، امیرحسام. (۱۳۹۱). مفهوم باد در فرهنگ ایرانی و چگونگی عملکرد آن در معماری سنتی کویر. همایش ملی باد و خورشید.
۲. آقای، یاشگین؛ و کاراحمدی، مهران. (۱۴۰۱). نقش بادگیرهای اقلیم گرم و خشک در پایداری زیست محیطی (نمونه موردی: باغ دولت‌آباد یزد). کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست.
۳. بهادری‌نژاد، مهدی؛ و دهقانی، علیرضا. (۱۳۹۲). بادگیر شاهکار مهندسی ایران. تهران: نشر یزدا.
۴. پیوسته‌گر، یعقوب؛ حیدری، علی‌اکبر؛ و اسلامی، مطهره. (۱۳۹۶). بازشناسی اصول پنجگانه استاد پیرنیا در معماری خانه‌های سنتی ایران و تحلیل آن با استناد به منابع اعتقاد اسلامی (مطالعه موردی: خانه‌های شهر یزد). مطالعات شهر ایرانی-اسلامی، دوره ۷ (۲۷)، ۵۱-۶۶.
۵. جلالی‌زاده، محمد. (۱۴۰۱). تنظیم شرایط محیطی. تهران: آکادمی تخصصی معماری.
۶. حکیمی، شیده؛ هاشمی‌زاده، الهه سادات؛ و طرفی، نیوشا. (۱۳۹۴). بررسی چگونگی تطابق بادگیرهای سنتی با معماری امروز (بادگیرهای مدرن). همایش بین‌المللی ایده‌های نو در معماری و شهرسازی.
۷. دهخدا، علی‌اکبر. (۱۳۱۹). لغت‌نامه دهخدا. تهران: چاپخانه بانک ملی.
۸. ذاکر عاملی، لایلا؛ مظفر، فرهنگ؛ و ابوبی، رضا. (۱۳۹۱). پیدایش بادگیر در خانه‌های دشت یزد-اردکان. مرمت و معماری ایران، سال دوم (۳)، ۱۵-۲۸.
۹. زمرشیدی، حسین (۱۳۷۷). معماری ایران اجرای ساختمان با مصالح سنتی. تهران: انتشارات آزاد.
۱۰. صدیق، فریبا؛ مرادی، معین؛ و ولی‌اللهی، حمیده. (۱۳۹۲). راهکارهایی در جهت بهره‌گیری از انرژی باد در ساختمان‌های مسکونی. کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری.
۱۱. کرباسفروشها، محمدعلی؛ حبیب، فرشته؛ و ذبیحی، حسین. (۱۴۰۱). تحلیل رفتار هیدرودینامیکی بادگیرها در میانگین دمای داخلی سکونتگاه‌های اقلیم نیمه گرم و خشک کاشان با هدف کارایی بیشتر. هویت شهر، ۴۹، ۴۹-۵۸.
۱۲. گروت، لیندا و وانگ، دیوید (۱۳۹۶). روش‌های تحقیق در معماری، ترجمه علیرضا عینی‌فر، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

20. Liu, M., Nejat, P., Cao, P., Jimenez-Bescos, C., & Calautit, J. K. (2024). A Critical Review of Windcatcher Ventilation: Micro-environment, Techno-economics, and Commercialisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114048. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114048>
21. Li, L., & Mak, C. M. (2007). The Assessment of the Performance of a Windcatcher System Using Computational Fluid Dynamics. *Building and environment*, 42(3), 1135-1141. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.015>
22. Pirhayati, M. Ainechi, Sh. Torkjaziand, M and Ashrafi, E. (2013). Ancient Iran, the Origin Land of wind Catcher in the World. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 5.8: 433-439.
23. Saadatian, O., Haw, L. C., Sopian, K., & Sulaiman, M. Y. (2012). Review of Windcatcher Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1477-1495. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.037>
24. Sirror, Hala. (2024) Innovative Approaches to Windcatcher Design: A Review on Balancing Tradition Sustainability and Modern Technologies for Enhanced Performance. *Energies* 17.22, 5770.
25. www.onebuilding.org , 2024
۱۳. مفیدی شمیرانی، سید مجید؛ و محمودی، مهناز. (۱۳۸۷). تحلیلی بر گونه‌شناسی معماری بادگیرهای یزد و یافتن گونه بهینه کارکردی. نشریه هنرهای زیبا، شماره ۳۶، ۲۷-۳۶.
۱۴. معماریان، غلامحسین. (۱۳۷۵). آشنایی با معماری مسکونی ایران گونه‌شناسی درونگرا. تهران: انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
۱۵. محمودی، مهناز؛ و مفیدی شمیرانی، سید مجید. (۱۳۸۷). هویت ایرانی بادگیر و پیشینه یابی آن در معماری ایران. هویت شهر، شماره ۲ (۲)، ۲۵-۳۳.
۱۶. وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی. بدون تاریخ. خانه آقازاده. پرونده ثبتی.
۱۷. هاشمی زرج‌آباد، حسن؛ و مسعودی، ذبیح الله (۱۳۹۱). بادگیر؛ شاهکار مهندسی معماری سنتی ایران در حاشیه کویر تحلیلی بر گونه‌شناسی معماری بادگیر در خراسان جنوبی. مطالعات اجتماعی و فرهنگی خراسان، دوره ۶، شماره ۴، ۱۶۶-۱۹۸
۱۸. هدایت، ژاله؛ عمادیان رضوی، سیده زینب؛ و آیت اللهی، سید محمد حسین. (۱۳۹۸). دستیابی به الگوهای رفتاری باد در بادگیرهای سنتی یزد براساس اندازه‌گیری بلند مدت عوامل اقلیمی (نمونه موردی: بادگیر خانه مرتاض). معماری اقلیم گرم و خشک، شماره ۱۰، ۵۳-۶۹.
19. Jomehzadeh, F., Hussen, H. M., Calautit, J. K., Nejat, P., & Ferwati, M. S. (2020). Natural Ventilation by Windcatcher (Badgir): A Review on the Impacts of Geometry, Microclimate and Macroclimate. *Energy and Buildings*, 226, 110396. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110396>



© 2025 by author(s); Published by Science and Research Branch Islamic Azad University, This work for open access publication is under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Performance Analysis of the Two-Story Windcatcher of Aghazadeh House Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling

Mahdi Motamedmanesh*, Assistant Professor of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Hananeh Mohammadi, Master Student of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Mahya Sarlak, Master Student of Architecture, Faculty of Arts and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Traditional Iranian architecture demonstrates an extraordinary ability to harmonize with the natural environment, employing indigenous knowledge to develop sustainable strategies for thermal comfort and energy efficiency. Among its most fascinating innovations stands the Aghazadeh House in Abarkuh, Iran, renowned for its exceptional two-story windcatcher (Badgir), a feature seldom observed in vernacular Iranian architecture. This research explores the unique functional attributes and aerodynamic advantages of the Aghazadeh House's two-tier windcatcher, analyzing its behavior through computational fluid dynamics (CFD) simulations supported by principles of fluid mechanics. Windcatchers have historically played a vital role in passive cooling strategies across hot and arid regions of the Iranian Plateau, significantly minimizing reliance on mechanical ventilation systems. While single-story windcatchers are widely found across Iran's historic buildings, the dual-level design of the Aghazadeh windcatcher raises important questions regarding its performance superiority over conventional forms. Specifically, this study investigates whether the added upper tier—by virtue of its height, specific geometry, and placement—enhances airflow dynamics, cooling efficiency, and indoor air quality.

Employing a mixed-methods research approach, the study integrates qualitative historical analysis with rigorous quantitative CFD modeling. Field surveys, architectural documentation, and digital modeling using DesignBuilder software form the methodological foundation. Local climatic data—especially wind speed and direction from the EPW climate dataset for Abarkuh—provide the environmental context for simulations. Two primary configurations were analyzed: the existing two-tier windcatcher and a modified single-tier version derived by computationally removing the upper level. CFD analysis assessed airflow velocity, pressure gradients, direction, and thermal performance within and around the unique structure. Findings show that the second tier significantly improves airflow management inside the building. Situated at a higher elevation, it captures stronger and cleaner air while reducing intake of hot, dust-laden air from lower altitudes. Air velocities up to 3.5 m/s were recorded at the upper openings, compared to 0.5–2.5 m/s in the lower tier—demonstrating a stronger induction effect. Pressure differential analysis confirms that the two-tier system supports bi-directional airflow—both intake and exhaust—even under low wind conditions. This vertical separation of airflow layers contributes to a more continuous and stable natural ventilation cycle.

Compared to conventional single-tier designs, the Aghazadeh windcatcher provides higher air exchange rates, improved thermal regulation, and superior indoor air quality. The upper tier functions not only as a secondary wind intake but also as an auxiliary outlet, facilitating smoother airflow and mitigating temperature fluctuations in interior spaces. Its dual-functionality results in a more balanced and effective passive ventilation system.

This study highlights the engineering ingenuity of traditional Iranian architecture and emphasizes its relevance for contemporary sustainable design. As modern architecture faces the pressing challenges of increased energy use and climate responsiveness, reviving ancient passive cooling methods—such as multi-tiered windcatchers—offers promising, low-energy alternatives to mechanical HVAC systems. Integrating these proven, context-responsive technologies into modern architectural practice could advance energy efficiency, reduce carbon emissions, and promote environmentally responsible design, particularly in hot and arid regions all over the world.

Keywords: Windcatcher, Two-Story Windcatcher, Passive Ventilation, CFD Modeling, Sustainable Architecture

*Corresponding Author Email: m.motamed@modares.ac.ir