



بازخوانی الگوهای کالبدی مسکن بومی نطنز در توسعه سکونتگاه‌های همساز با اقلیم

زهره عباسی*

۱. گروه معماری، واحد قم، دانشگاه آزاد اسلامی، قم، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸	پایداری سکونتگاه‌های انسانی در مناطق گرم و خشک مستلزم بهره‌گیری از راهبردهای طراحی منطبق با شرایط اقلیمی و کاهش وابستگی به سامانه‌های مکانیکی تأمین انرژی است. معماری بومی ایران به‌عنوان حاصل قرن‌ها تجربه سازگاری انسان با محیط، ظرفیت‌های ارزشمندی برای تحقق این هدف در اختیار قرار می‌دهد. پژوهش حاضر با هدف تبیین نقش الگوهای کالبدی مسکن بومی نطنز در توسعه سکونتگاه‌های همساز با اقلیم انجام شده است. روش تحقیق از نوع توصیفی تحلیلی و مبتنی بر رویکرد ترکیبی (کیفی و کمی) است. داده‌ها از طریق مطالعات اسنادی، برداشت‌های میدانی و شبیه‌سازی رایانه‌ای گردآوری شد. چهار خانه تاریخی شامل میرترابیان، فخار، سورگاه و توسلیان به‌عنوان نمونه‌های موردی انتخاب و عملکرد آن‌ها از منظر تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و پایداری اقلیمی با استفاده از نرم‌افزار DesignBuilder و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که عناصر کالبدی نظیر حیاط مرکزی، بازشوهای متقابل، سازمان فضایی درونگرا، استفاده از مصالح بومی با جرم حرارتی بالا و جهت‌گیری مناسب بنا موجب بهبود جریان هوا، افزایش نرخ تعویض هوا، ارتقای آسایش حرارتی و کاهش نیاز انرژی شده‌اند. در میان نمونه‌های مورد مطالعه، خانه میرترابیان مطلوب‌ترین عملکرد اقلیمی را نشان داد. یافته‌ها بیانگر آن است که الگوهای کالبدی معماری بومی نطنز می‌توانند راهبردهایی مؤثر در طراحی سکونتگاه‌های پایدار و اقلیم‌گرا معاصر نطنز ارائه دهند.
واژگان کلیدی:	معماری بومی، پایداری اقلیمی، سکونتگاه همساز با اقلیم، آسایش حرارتی، تهویه طبیعی، نطنز.
استناد: عباسی، زهرا. (۱۴۰۴). بازخوانی الگوهای کالبدی مسکن بومی نطنز در توسعه سکونتگاه‌های همساز با اقلیم. مطالعات پایداری و توسعه سکونتگاه‌های همساز با اقلیم، ۴(۱)، ۱-۱۲. DOI: MPSH-2606-1091 zahraabbasi@iau.ac.ir * نویسنده مسئول: زهرا عباسی	

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تشدید تغییرات اقلیمی، افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان و رشد فزاینده شهرنشینی، چالش‌های نوینی را در برابر توسعه پایدار سکونتگاه‌های انسانی قرار داده است. بخش ساختمان به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری بحران‌های زیست‌محیطی معاصر دارد. از این‌رو، دستیابی به الگوهای طراحی سازگار با اقلیم و کاهش وابستگی ساختمان‌ها به سامانه‌های مکانیکی گرمایش و سرمایش، به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های پژوهشگران، معماران و برنامه‌ریزان شهری تبدیل شده است. در این میان، بازاندیشی در دانش بومی و بهره‌گیری از ظرفیت‌های نهفته در معماری سنتی می‌تواند مسیر مناسبی برای پاسخگویی به چالش‌های پیش‌روی محیط ساخته‌شده فراهم آورد.

معماری بومی حاصل قرن‌ها تجربه زیسته و تعامل مستمر انسان با محیط طبیعی است؛ دانشی که در فرآیند آزمون و خطا شکل گرفته و توانسته است میان نیازهای عملکردی، شرایط اقلیمی، امکانات محیطی و ویژگی‌های فرهنگی تعادل برقرار کند. در این نوع معماری، سازمان فضایی، نحوه استقرار بنا، فرم کالبدی، مصالح ساختمانی و عناصر اقلیمی نه به‌صورت منفرد، بلکه در قالب یک نظام یکپارچه و هماهنگ عمل می‌کنند. به همین دلیل، بسیاری از نمونه‌های معماری بومی با وجود فقدان فناوری‌های پیشرفته امروزی، توانسته‌اند شرایط مطلوب آسایش محیطی را با حداقل مصرف انرژی فراهم آورند. این ویژگی موجب شده است که معماری بومی در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از منابع ارزشمند دانش طراحی پایدار مورد توجه مجدد محافل علمی قرار گیرد. شهر نطنز به‌عنوان یکی از سکونتگاه‌های تاریخی فلات مرکزی ایران، نمونه‌ای شاخص از انطباق معماری با شرایط اقلیمی محسوب می‌شود. موقعیت جغرافیایی خاص این شهر در دامنه‌های رشته‌کوه کرکس، همراه با ویژگی‌های اقلیمی گرم و خشک، موجب شکل‌گیری الگوهای کالبدی ویژه‌ای در معماری مسکونی آن شده است. خانه‌های تاریخی نطنز با برخورداری از حیاط‌های مرکزی، سازمان فضایی درون‌گرا، تنوع فضایی فصلی و بهره‌گیری از مصالح بومی، نمونه‌های ارزشمندی از معماری اقلیم‌گرا به شمار می‌روند که مطالعه و بازخوانی آن‌ها می‌تواند در ارائه راهکارهای مؤثر برای طراحی سکونتگاه‌های معاصر نقش‌آفرین باشد. با وجود مطالعات انجام‌شده درباره ویژگی‌های تاریخی، کالبدی و فضایی خانه‌های سنتی نطنز، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها بر توصیف عناصر معماری یا تحلیل‌های مورفولوژیک متمرکز بوده‌اند و کمتر به ارزیابی همزمان عملکرد اقلیمی این عناصر در قالب یک نظام یکپارچه پرداخته‌اند. بر این اساس، پژوهش حاضر، با انتخاب نمونه‌هایی از خانه‌های تاریخی نطنز و بهره‌گیری از مطالعات میدانی، تحلیل کالبدی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای، عملکرد عناصر معماری در زمینه تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و انطباق اقلیمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت بهره‌گیری از ظرفیت‌های معماری بومی در پاسخگویی به چالش‌های زیست‌محیطی و انرژی، سؤالات زیر مطرح می‌باشد.

چه ارتباطی میان ویژگی‌های کالبدی خانه‌های تاریخی نطنز و میزان پایداری اقلیمی آن‌ها وجود دارد؟

چگونه می‌توان از الگوهای کالبدی معماری بومی نطنز در طراحی سکونتگاه‌های معاصر همساز با اقلیم بهره گرفت؟

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر بازخوانی و تحلیل الگوهای کالبدی مسکن بومی نطنز و تبیین نقش آن‌ها در ارتقای عملکرد اقلیمی سکونتگاه‌ها است. با ارزیابی عملکرد نمونه‌های منتخب از خانه‌های تاریخی نطنز، ظرفیت‌های کاربردی این الگوها را در طراحی معماری معاصر و توسعه سکونتگاه‌های پایدار و همساز با اقلیم تبیین خواهد شد.

پیشینه پژوهش

در دهه‌های اخیر، هم‌زمان با افزایش نگرانی‌های ناشی از مصرف انرژی و پیامدهای تغییرات اقلیمی، پژوهش‌های متعددی در زمینه معماری بومی، طراحی اقلیم‌گرا و سکونتگاه‌های پایدار انجام شده است. بخش قابل توجهی از این مطالعات بر نقش راهبردهای غیرفعال در بهبود آسایش حرارتی، کاهش مصرف انرژی و ارتقای کیفیت محیط‌های سکونت تأکید دارند. در سطح بین‌المللی، معماری بومی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین الگوهای پاسخ‌گویی به شرایط اقلیمی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. Nguyen و همکاران (۲۰۱۹) با مرور نمونه‌های معماری بومی در مناطق مختلف جهان نشان دادند که انطباق کالبدی ساختمان با شرایط محیطی از مهم‌ترین عوامل دستیابی به آسایش حرارتی و کاهش وابستگی به سامانه‌های مکانیکی است. همچنین Henna و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی تاب‌آوری خانه‌های بومی و معاصر در سه اقلیم مختلف به این نتیجه

رسیدند که ساختمان‌های بومی عملکرد مناسب‌تری نسبت به ساختمان‌های جدید دارند. مطالعات جدیدتر توجه ویژه‌ای به عملکرد حرارتی سکونتگاه‌های بومی داشته‌اند Yang و همکاران (۲۰۲۲) در یک مرور نظام‌مند، نشان دادند که ویژگی‌هایی نظیر حیاط مرکزی، جرم حرارتی بالا، استفاده از مصالح بومی و بهره‌گیری از تهویه طبیعی مهم‌ترین عوامل ایجاد آسایش حرارتی در این بناها هستند. Costa-Carrapiço و همکاران (۲۰۲۲) نیز با بررسی پژوهش‌های مرتبط با آسایش حرارتی در سکونتگاه‌های تاریخی، بر نقش تعامل میان ویژگی‌های کالبدی و رفتار ساکنان در ایجاد شرایط آسایش تأکید کردند.

در حوزه طراحی غیرفعال، Anand و همکاران (۲۰۲۳) با مرور پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه ساختمان‌های کم‌مصرف، بیان کردند که راهبردهایی همچون تهویه طبیعی، کنترل تابش، استفاده از جرم حرارتی و طراحی اقلیم‌گرا می‌توانند سهم قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی داشته باشند. Hu و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که استفاده هم‌زمان از راهبردهای غیرفعال قادر است دمای داخلی ساختمان را به طور محسوسی کاهش و ساعات آسایش حرارتی را افزایش دهد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران به نقش مصالح بومی در افزایش پایداری اقلیمی نیز توجه کرده‌اند. Leardini و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی عملکرد حرارتی ساختمان‌های خاکی در اقلیم‌های مختلف دریافتند که جرم حرارتی بالا موجب افزایش ساعات آسایش و کاهش نیاز به انرژی می‌شود. همچنین Vakharia و Joshi (2025) با مطالعه معماری سنتی وادا در هند، ظرفیت الگوهای بومی در ارتقای تاب‌آوری اقلیمی سکونتگاه‌ها را مورد تأیید قرار دادند.

در ایران نیز مطالعات متعددی در زمینه معماری بومی و طراحی اقلیمی انجام شده است. قبادیان (۱۳۹۱) با بررسی اصول معماری اقلیمی ایران نشان داد که سازمان فضایی خانه‌های سنتی متناسب با شرایط آب‌وهوایی هر منطقه شکل گرفته است. کسمایی (۱۳۹۲) نیز در مطالعات اقلیم و معماری ایران بر اهمیت هماهنگی فرم، مصالح و جهت‌گیری ساختمان با شرایط اقلیمی تأکید کرده است. در حوزه تهویه طبیعی، وکیلی‌نژاد، مفیدی شامیرانی و مهدی‌زاده سراج (۱۳۹۲) با ارائه روشی برای پهنه‌بندی اقلیمی ایران بر اساس پتانسیل تهویه طبیعی نشان دادند که بسیاری از شهرهای ایران از ظرفیت بالایی برای بهره‌گیری از تهویه طبیعی برخوردار هستند. هدایت و همکاران (۱۳۹۸) نیز با مطالعه رفتار باد در بادگیرهای سنتی یزد، نقش این عناصر را در بهبود جریان هوا و کاهش بار سرمایشی ساختمان‌ها تبیین کردند Sargazi و Tahbaz (2022) در مطالعه‌ای مروری بر نقش راهبردهای اقلیم‌گرا و رفتار تطبیقی کاربران در معماری بومی تأکید کردند و نشان دادند که تهویه طبیعی یکی از مؤثرترین عوامل ارتقای آسایش محیطی در ساختمان‌های سنتی است. در زمینه تحلیل ارزیابی عملکرد اقلیمی خانه‌های تاریخی، رهایی (۱۴۰۰) با بررسی تأثیر تغییرات کالبدی حیاط مرکزی بر الگوی جریان هوا در خانه لباف اصفهان نشان داد که هندسه حیاط و نسبت ارتفاع به عرض آن تأثیر مستقیمی بر الگوی تهویه طبیعی دارد. همچنین رهسپار منفرد و عظمتی (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای بر روی بناهای مسکونی آمل به این نتیجه رسیدند که ابعاد و جانمایی بازشوها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی هستند.

در ارتباط با شهر نطنز، پژوهش‌های انجام‌شده عمدتاً بر ویژگی‌های تاریخی، کالبدی و گونه‌شناسی خانه‌های سنتی تمرکز داشته‌اند. جاوری، کریمیان و محمدی (۱۴۰۰) ساختار فضایی و الگوی کالبدی خانه‌های دوره قاجار نطنز را بررسی کردند و بر نقش حیاط مرکزی و سازمان فضایی در شکل‌گیری معماری این شهر تأکید نمودند. با این حال، پژوهش‌های موجود کمتر به ارزیابی هم‌زمان عملکرد تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و شاخص‌های پایداری اقلیمی در خانه‌های تاریخی نطنز پرداخته‌اند. از این رو، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از تحلیل کالبدی، شبیه‌سازی انرژی و ارزیابی تهویه طبیعی، درصدد تبیین نقش خانه‌های تاریخی نطنز در تحقق پایداری اقلیمی و توسعه سکونتگاه‌های همساز با اقلیم است.

مبانی نظری پژوهش

در دهه‌های اخیر، تشدید تغییرات اقلیمی، افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان، ضرورت بازنگری در الگوهای طراحی محیط ساخته‌شده مطرح کرده است. مفهوم سکونتگاه همساز با اقلیم به‌عنوان رویکردی مبتنی بر تعامل متوازن میان محیط طبیعی و محیط مصنوع می‌باشد. این رویکرد بر بهره‌گیری از ظرفیت‌های اقلیمی، کاهش مصرف انرژی، ارتقای کیفیت محیطی، افزایش آسایش ساکنان و تقویت تاب‌آوری سکونتگاه‌ها در برابر تغییرات اقلیمی تأکید دارد. در چنین نگرشی، ساختمان نه به‌عنوان عنصری منفک از بستر طبیعی، بلکه به‌عنوان بخشی از یک سامانه زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود که باید در هماهنگی با شرایط اقلیمی و ویژگی‌های محیطی عمل کند. (Sharifi, 2021)

یکی از مهم‌ترین مبانی نظری تحقق سکونتگاه‌های همساز با اقلیم، بهره‌گیری از اصول معماری بومی است. معماری بومی حاصل قرن‌ها تجربه زیسته انسان در مواجهه با محدودیت‌ها و فرصت‌های محیطی بوده و مجموعه‌ای از دانش‌های انباشته‌شده در زمینه سازگاری با اقلیم را در خود جای داده است. در این نوع معماری، فرم بنا، سازمان فضایی، نحوه استقرار ساختمان، الگوی بازشوها و انتخاب مصالح ساختمانی در راستای دستیابی به تعادل حرارتی و استفاده بهینه از منابع طبیعی شکل گرفته‌اند. از این منظر، معماری بومی را می‌توان تجلی کالبدی دانش اقلیمی دانست که بدون اتکا به فناوری‌های پیچیده، توانسته است شرایط مطلوب زیست‌محیطی را برای ساکنان فراهم آورد (Rapoport, 1969; Fathy, 1986). مطالعات معاصر نشان می‌دهد بسیاری از اصول به‌کاررفته در معماری بومی با مبانی طراحی پایدار، ساختمان‌های کم‌انرژی همخوانی دارند و می‌توانند به‌عنوان الگوهایی مؤثر در معماری امروز مورد استفاده قرار گیرند (Yang et al., 2022). در چارچوب نظری معماری اقلیم‌گرا، آسایش حرارتی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت محیطی و عملکرد پایدار ساختمان محسوب می‌شود. مطابق نظریه آسایش تطبیقی، ادراک آسایش حرارتی تنها تابع متغیرهای فیزیکی محیط نیست، بلکه به میزان سازگاری کاربران با شرایط اقلیمی و قابلیت پاسخ‌گویی محیط ساخته‌شده به تغییرات آب‌وهوایی وابسته است (Nicol & Humphreys, 2002). بر این اساس، ساختمان‌هایی که بتوانند از طریق ویژگی‌های کالبدی خود شرایط حرارتی مطلوب را فراهم کنند، از پایداری بیشتری برخوردار خواهند بود.

در این میان، تهویه طبیعی به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهبردهای طراحی غیرفعال، نقشی کلیدی در تأمین آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی ایفا می‌کند. کیفیت تهویه طبیعی متأثر از عواملی نظیر سازمان فضایی، ابعاد و موقعیت بازشوها، هندسه فضاها، اختلاف ارتفاع و نحوه استقرار بنا در بستر محیطی است. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که بهره‌گیری صحیح از جریان‌های طبیعی هوا می‌تواند ضمن بهبود کیفیت هوای داخلی، وابستگی ساختمان به سامانه‌های مکانیکی سرمایش را به میزان قابل توجهی کاهش دهد (Givoni, 1998; Sargazi & Tahbaz, 2022). از این‌رو، تهویه طبیعی و آسایش حرارتی را می‌توان دو مؤلفه بنیادین در ارزیابی عملکرد اقلیمی سکونتگاه‌ها دانست.

شهر نطنز به دلیل قرارگیری در اقلیم گرم و خشک کوهپایه‌ای، برخورداری از اختلاف محسوس دمای شب و روز، وجود باغات گسترده و تأثیر جریان‌های هوایی محلی، بستری مناسب برای شکل‌گیری الگوهای معماری منطبق با اقلیم فراهم آورده است. خانه‌های تاریخی این شهر با بهره‌گیری از حیاط مرکزی، سازمان فضایی درون‌گرا، فضاهای نیمه‌باز، بازشوهای متقابل و مصالح بومی، نمونه‌ای شاخص از تعامل میان کالبد معماری و شرایط محیطی به شمار می‌روند. این ویژگی‌ها موجب شده است که معماری مسکونی نطنز نه تنها از منظر تاریخی و فرهنگی، بلکه از دیدگاه عملکرد اقلیمی نیز واجد ارزش پژوهشی باشد. بر مبنای چارچوب نظری پژوهش حاضر، الگوهای کالبدی معماری بومی به‌عنوان متغیر مستقل، از طریق تأثیرگذاری بر کیفیت تهویه طبیعی و آسایش حرارتی، زمینه تحقق پایداری اقلیمی را فراهم می‌کنند. در نتیجه، بازخوانی و تحلیل این الگوها می‌تواند به استخراج مؤلفه‌های مؤثر طراحی اقلیم‌گرا و ارائه راهبردهایی برای توسعه سکونتگاه‌های پایدار و همساز با اقلیم در مناطق گرم و خشک ایران منجر شود.

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است و با رویکرد ترکیبی (کیفی-کمی) انجام شده است. هدف اصلی پژوهش، تبیین نقش الگوهای کالبدی مسکن بومی نطنز در ارتقای پایداری اقلیمی و توسعه سکونتگاه‌های همساز با اقلیم است. در این راستا، رابطه میان ویژگی‌های کالبدی خانه‌های تاریخی و شاخص‌های عملکرد اقلیمی شامل تهویه طبیعی و آسایش حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

محدوده مورد مطالعه، بافت تاریخی شهر نطنز در شمال استان اصفهان است. نمونه‌های پژوهش شامل چهار خانه تاریخی شاخص، یعنی خانه‌های میرترابیان، فخار، سورگاه و توسلیان است که به روش نمونه‌گیری هدفمند انتخاب شدند. معیارهای انتخاب این بناها شامل ارزش تاریخی و معماری، تنوع در ویژگی‌های کالبدی، برخورداری از عناصر شاخص معماری بومی، دسترسی به اطلاعات مستند و امکان مدل‌سازی و شبیه‌سازی رایانه‌ای بوده است. این نمونه‌ها به دلیل تفاوت در سازمان فضایی، فرم کالبدی، نحوه استقرار در بستر و ویژگی‌های معماری، زمینه مناسبی برای تحلیل تطبیقی عملکرد اقلیمی فراهم می‌کنند. گردآوری داده‌ها در سه مرحله انجام شد. در مرحله نخست، مطالعات اسنادی با هدف تدوین چارچوب نظری

پژوهش و شناسایی شاخص‌های مؤثر بر پایداری اقلیمی صورت گرفت. در این مرحله، منابع کتابخانه‌ای، مقالات علمی و پژوهش‌های مرتبط با معماری بومی، طراحی اقلیم‌گرا، آسایش حرارتی و تهویه طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله دوم، مطالعات میدانی شامل برداشت معماری، مستندسازی ویژگی‌های کالبدی، تحلیل سازمان فضایی، بررسی نحوه استقرار بازشوها، ارزیابی ارتباط فضاهای باز و نیمه‌باز و شناسایی ویژگی‌های مصالح ساختمانی انجام شد. در مرحله سوم، به‌منظور ارزیابی عملکرد اقلیمی نمونه‌های مورد مطالعه، مدل سه‌بعدی هر یک از خانه‌های منتخب بر اساس اطلاعات برداشت‌شده در محیط نرم‌افزار Design Builder بازسازی شد. سپس عملکرد حرارتی و میزان مصرف انرژی بناها با استفاده از داده‌های اقلیمی شهر نطنز شبیه‌سازی و تحلیل گردید. برای سنجش وضعیت آسایش حرارتی از شاخص PMV بر مبنای استاندارد ASHRAE استفاده شد. همچنین به منظور تحلیل الگوی جریان هوا، نرخ تعویض هوا (ACH) و کیفیت تهویه طبیعی، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام گرفت. در نهایت، داده‌های حاصل از مطالعات میدانی و نتایج شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای به صورت تطبیقی مورد تحلیل قرار گرفت. در این مرحله، تأثیر مؤلفه‌های کالبدی شامل حیاط مرکزی، جهت‌گیری ساختمان، ابعاد و موقعیت بازشوها، سازمان فضایی، نوع مصالح و نحوه ارتباط فضاهای باز و بسته بر عملکرد تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و پایداری اقلیمی ارزیابی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، الگوهای مؤثر معماری بومی نطنز استخراج و قابلیت به‌کارگیری آن‌ها در طراحی سکونتگاه‌های معاصر همساز با اقلیم تبیین گردید.

تحلیل داده‌ها

تحلیل ویژگی‌های کالبدی نمونه‌های مورد مطالعه

چهار خانه منتخب نطنز متعلق به دوره‌های مختلف تاریخی هستند، اما در اغلب ویژگی‌های اقلیمی دارای اشتراکات قابل توجهی هستند. مهم‌ترین این ویژگی‌ها شامل استقرار پیرامون حیاط مرکزی، استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا، وجود فضاهای نیمه‌باز و بهره‌گیری از بازشوهای کنترل‌شده است.

جدول ۱. مقایسه ویژگی‌های کالبدی مؤثر بر عملکرد اقلیمی

خانه	فرم کالبدی	جهت‌گیری پلان	حیاط مرکزی	مصالح غالب	تعداد طبقات	زیرزمین	تناسبات پنجره
میرترابیان			دارد	خشت، آجر، کاهگل	3	دارد	۱.۸۱ به ۱
فخار			دارد	آجر، خشت	3	دارد	1 به 1.176
سورگاه			دارد	خشت و سنگ	2	ندارد	1.21 به 1
توسلیان			دارد	خشت و آجر	2	دارد	۱ به ۱

ماخذ: نگارنده، ۱۴۰۵

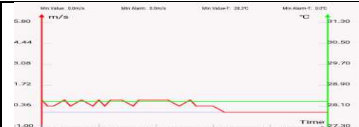
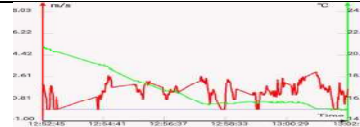
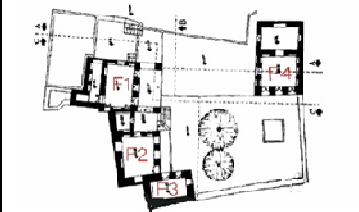
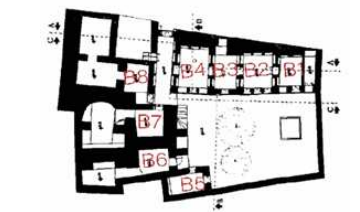
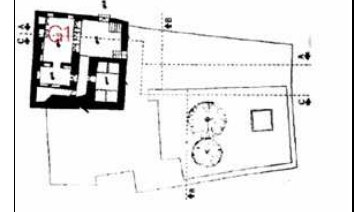
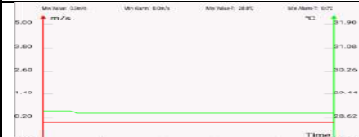
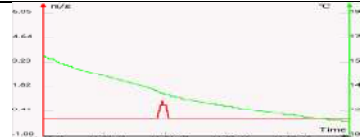
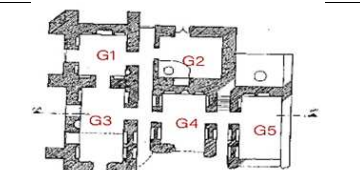
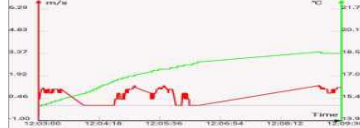
نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که حیاط مرکزی در تمامی نمونه‌های مورد مطالعه به عنوان عنصر سازمان‌دهنده اصلی فضا حضور دارد. این موضوع بیانگر اهمیت حیاط در ایجاد شرایط خرداقلیمی مناسب، کنترل تابش خورشید و تقویت تهویه طبیعی در خانه‌های سنتی نطنز است. همچنین استفاده گسترده از مصالح بومی نظیر خشت، آجر و سنگ که دارای ظرفیت حرارتی بالا هستند، موجب ذخیره انرژی حرارتی در طول روز و تعدیل نوسانات دمایی در ساعات مختلف شبانه‌روز شده است. بررسی جهت‌گیری بناها و تناسبات بازشوها نیز نشان می‌دهد که الگوی کالبدی خانه‌ها در راستای بهره‌گیری حداکثری از شرایط اقلیمی و کاهش وابستگی به سامانه‌های مکانیکی شکل گرفته است.

تحلیل تهویه و سرعت باد در نمونه های مورد مطالعه
برداشت های اقلیمی توسط دستگاه کوچک هواشناسی سیار به نام UT ۳۶۳ BT انجام شده است. این دستگاه دمای هوا و سرعت باد را کمتر از یک دقیقه مشخص و ذخیره میکند و به عنوان نقطه مرجع مطالعه نماینگر شرایط اقلیم محلی است. دستگاه در فضای بازبام و حیاط نمونه گیری انجام داده است. (تصویر شماره ۱ و ۲) در ادامه تحلیل تهویه طبیعی و نرخ تعویض هوا و سرعت باد در جدول ۲ ارائه شده است.



جدول ۲- تحلیل نوع تهویه طبیعی و سرعت باد در خانه های نظنز

خانه میر ترابیان						
اول		زیرزمین		همکف		پلان
یکطرفه		فاقد تهویه		دوطرفه		تهویه
F2/F5		B3/ B2		B1		G9/ G۸/G۷/G۵۶/G۴/G۳/G۲/G۱
سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل گرم سال		سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل سرد سال		نرخ تعویض هوا (Air Change Rate)		
				1.40		
خانه فخار						
اول		زیرزمین		همکف		پلان
فاقد تهویه		یکطرفه		دوطرفه		تهویه
B2/B6		B1/B3/B4/B5		F1		G1/G4
سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل گرم سال		سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل سرد سال		نرخ تعویض هوا (Air Change Rate)		
				G3/G2		

						1.73	
خانه توسلیان							
اول		همکف		زیرزمین		پلان	
							
دوطرفه		فاقد تهویه		دوطرفه	یکطرفه	یکطرفه	
F1/F2/F3/F4		B6/B7/B8		B5	B1/B2/B3/B4	G1	
سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل گرم سال		سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل سرد سال				نرخ تعویض هوا ((Air Change Rate))	
						1.56	
خانه سورگاه							
همکف						پلان	
							
یکطرفه			دوطرفه				
G5			G1/G2/G3/G4				
سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل گرم سال			سرعت باد (m/s) و دما برحسب (C) در فصل سرد سال			نرخ تعویض هوا ((Air Change Rate))	
						1.57	

بررسی داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که در تمامی خانه‌های مورد مطالعه، ترکیبی از تهویه یکطرفه و دوطرفه مشاهده می‌شود. بیشترین نرخ تعویض هوا مربوط به خانه فخار (1.73 ACH) و کمترین آن مربوط به خانه میرترابیان (1.40 ACH) است. این تفاوت را می‌توان ناشی از نحوه استقرار بازشوها، سازمان فضایی داخلی و میزان ارتباط فضاها با حیاط مرکزی دانست. همچنین مشاهده الگوی تهویه متقاطع در بخش قابل توجهی از فضاها بیانگر نقش مؤثر بازشوهای روبه‌رو در افزایش سرعت جریان هوا و بهبود کیفیت تهویه طبیعی است. نتایج نشان می‌دهد که سازمان فضایی خانه‌های سنتی نطنز به گونه‌ای طراحی شده که امکان گردش مؤثر هوا در فصول گرم سال فراهم شود.

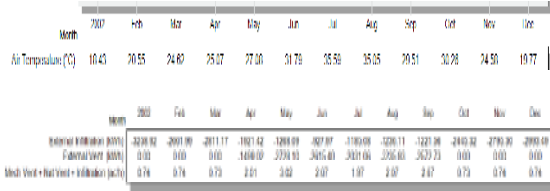
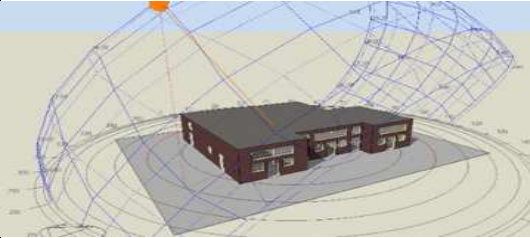
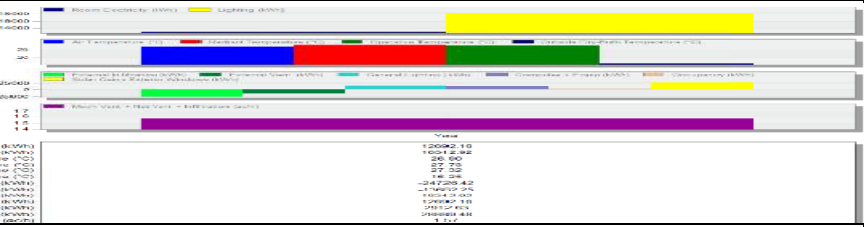
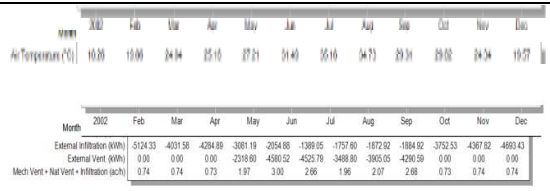
تحلیل آسایش حرارتی در نمونه‌های مورد مطالعه

به‌منظور ارزیابی عملکرد حرارتی و میزان مصرف انرژی در خانه‌های سنتی نطنز، مدل‌های منتخب بر اساس ویژگی‌های کالبدی و اقلیمی در نرم‌افزار DesignBuilder شبیه‌سازی شدند. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از موتور محاسباتی EnergyPlus مکان بررسی تأثیر عوامل مختلف معماری بر مصرف انرژی و شرایط آسایش حرارتی را فراهم می‌کند. در این

پژوهش، شاخص PMV به‌عنوان یکی از معتبرترین معیارهای سنجش آسایش حرارتی مورد استفاده قرار گرفت و هم‌زمان میزان انرژی مورد نیاز برای تأمین شرایط آسایش در بناهای مختلف بررسی شد.

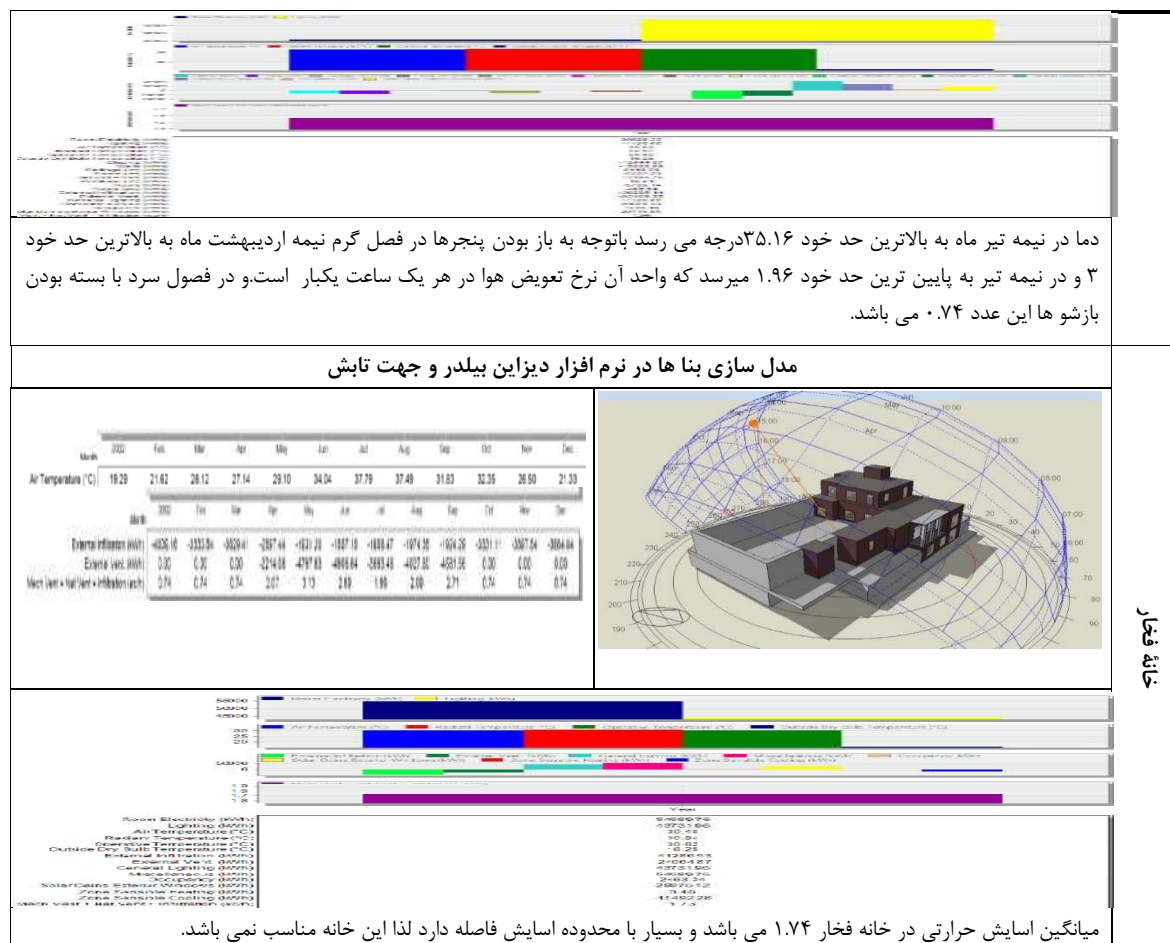
نمونه‌های مورد مطالعه شامل چهار الگوی رایج از خانه‌های سنتی نطنز با سه نوع سازمان‌دهی حیاط مرکزی هستند که از نظر ویژگی‌های فرمی، ضخامت جداره‌ها، ابعاد و نحوه استقرار بازشوها و جهت‌گیری ساختمان نسبت به تابش خورشید با یکدیگر تفاوت دارند. از آنجا که فرم معماری یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تبادل حرارتی ساختمان با محیط پیرامون است، تأثیر این تفاوت‌ها بر عملکرد انرژی بناها مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۳- تحلیل خانه های نطنز با استفاده از نرم افزار دیزاین بیلدر

میانگین دما و نفوذ هوا از بیرون به ساختمان به صورت سالیانه	
	
دما نیمه تیر ماه به بالاترین حد خود ۳۴.۳۳ درجه می‌رسد. تهویه باتوجه به باز بودن پنجرها در فصل گرم نیمه اردیبهشت ماه به بالاترین حد خود ۲.۵۹ و در نیمه تیر به پایین ترین حد خود ۱.۶۰ میرسد که واحد آن نرخ تعویض هوا در هر یک ساعت یکبار است. و در فصول سرد با بسته بودن باز شو ها این عدد ۰.۷۳ می‌باشد.	
مدل سازی بنا ها در نرم افزار دیزاین بیلدر و جهت تابش	
	
میانگین دما و نفوذ هوا از بیرون به ساختمان به صورت سالیانه	
	
دمادر نیمه تیر ماه به بالاترین حد خود ۳۵.۵۹ درجه میرسد باتوجه به باز بودن پنجرها در فصل گرم نیمه اردیبهشت ماه تهویه به بالاترین حد خود ۳.۰۲ و در نیمه تیر به پایین ترین حد خود ۱.۹۰ می‌رسد که واحد آن نرخ تعویض هوا در هر یک ساعت یکبار است. و در فصول سرد با بسته بودن باز شو ها این عدد ۰.۷۴ می‌باشد	
مدل سازی بنا ها در نرم افزار دیزاین بیلدر و جهت تابش	
	

خانه سورگاه

خانه توسلیان



یافته‌ها

تحلیل تطبیقی داده‌های حاصل از مطالعات میدانی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نشان می‌دهد که میان ویژگی‌های کالبدی خانه‌های تاریخی نطنز و شاخص‌های عملکرد اقلیمی آن‌ها ارتباط مستقیمی وجود دارد. مقایسه نتایج جداول ۱ تا ۴ بیانگر آن است که تمامی نمونه‌های مورد مطالعه از اصول مشترک معماری بومی شامل حیاط مرکزی، سازمان فضایی درون‌گرا، استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا و بازشوهای کنترل‌شده بهره می‌برند، اما میزان موفقیت آن‌ها در تأمین آسایش حرارتی و انطباق اقلیمی متفاوت است.

جدول ۵ تحلیل شاخص‌ها در خانه‌های مورد مطالعه

خانه	نرخ تعویض هوا (ACH)	شاخص PMV	وضعیت آسایش حرارتی	ارزیابی پایداری اقلیمی
میرترابیان	1.40	0.22	بسیار مطلوب	بسیار مطلوب
فخر	1.73	1.74	نامطلوب	متوسط
سورگاه	1.57	0.77	نسبتاً مطلوب	مطلوب
توسلیان	1.56	0.64	مطلوب	مطلوب
میانگین نمونه‌ها	1.57	0.84	قابل قبول	مطلوب

ماخذ: نگارنده، ۱۴۰۵

نتایج شبیه‌سازی شاخص PMV نشان می‌دهد که میان نمونه‌های مورد مطالعه تفاوت معناداری از نظر آسایش حرارتی وجود دارد. بر اساس استاندارد ASHRAE 55، محدوده آسایش حرارتی در بازه ۰.۵- تا ۰.۵+ تعریف می‌شود. مطابق نتایج جدول ۵، تنها خانه میرترابیان با مقدار PMV برابر ۰.۲۲ در محدوده آسایش حرارتی قرار دارد و بهترین عملکرد را در میان نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. خانه‌های توسلیان و سورگاه به ترتیب با مقادیر ۰.۶۴ و ۰.۷۷ در نزدیکی محدوده

آسایش قرار دارند، اما بیانگر احساس گرمای خفیف در بخشی از دوره بهره‌برداری هستند. در مقابل، خانه فخار با مقدار PMV برابر ۱.۷۴ فاصله قابل توجهی از محدوده آسایش داشته و شرایط گرمایی نامطلوب‌تری را تجربه می‌کند. مقایسه نتایج با ویژگی‌های کالبدی بناها نشان می‌دهد که عملکرد برتر خانه میرترابیان حاصل ترکیب مؤثر چندین عامل اقلیمی و معماری است. این بنا به دلیل قرارگیری در میان باغات و مجاورت با قنات در بخش غربی، از شرایط خرداقلیمی مطلوب‌تری برخوردار بوده و توانسته است از اثرات تعدیل‌کننده پوشش گیاهی و رطوبت محیط بهره‌مند شود. علاوه بر این، جهت‌گیری مناسب ساختمان و بهره‌گیری مطلوب از تابش جبهه جنوبی، در کنار سازمان فضایی مبتنی بر حیاط مرکزی، موجب ایجاد شرایط حرارتی متعادل در فضاهای داخلی شده است.

تفکیک فضایی بنا به بخش‌های تابستان‌نشین و زمستان‌نشین، استقرار مناسب اتاق‌های شاه‌نشین در جبهه‌های شرقی و غربی و جانمایی هوشمندانه فضاهای خدماتی نظیر مطبخ، امکان سازگاری بیشتر بنا با تغییرات فصلی را فراهم کرده است. این ویژگی‌ها در کنار جرم حرارتی بالای جداره‌ها و تهویه طبیعی مناسب، سبب کاهش نوسانات دمایی و بهبود شاخص آسایش حرارتی شده‌اند.

از سوی دیگر، نتایج نرخ تعویض هوا نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها از عملکرد قابل قبولی در زمینه تهویه طبیعی برخوردار هستند. با این حال، مقایسه مقادیر PMV و نرخ تعویض هوا نشان می‌دهد که تهویه طبیعی به‌تنهایی تضمین‌کننده آسایش حرارتی نیست. به‌عنوان نمونه، خانه فخار علی‌رغم برخورداری از تهویه مناسب، به دلیل ویژگی‌های فرمی، جهت‌گیری نامناسب‌تر یا دریافت بیشتر تابش خورشیدی، شرایط حرارتی مطلوبی را فراهم نکرده است. این موضوع بیانگر آن است که آسایش حرارتی حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل شامل تهویه، جرم حرارتی، جهت‌گیری ساختمان، فرم حیاط مرکزی و سازمان فضایی است.

در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که معماری بومی نطنز نه به‌عنوان مجموعه‌ای از عناصر منفرد، بلکه به‌صورت یک سامانه یکپارچه اقلیمی عمل می‌کند. در این سامانه، حیاط مرکزی، جهت‌گیری مناسب، بازشوهای کنترل‌شده، مصالح بومی و سازمان فضایی درون‌گرا به‌صورت هم‌افزا در ایجاد شرایط آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی نقش دارند. بر این اساس، خانه میرترابیان را می‌توان موفق‌ترین نمونه در انطباق با شرایط اقلیمی نطنز دانست؛ نمونه‌ای که اصول طراحی آن می‌تواند به‌عنوان الگویی ارزشمند برای معماری پایدار معاصر در اقلیم گرم و خشک مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بازخوانی الگوهای کالبدی مسکن بومی نطنز و تبیین نقش آن‌ها در توسعه سکونتگاه‌های همساز با اقلیم انجام شد. نتایج حاصل از مطالعات میدانی، تحلیل کالبدی و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای نشان داد که معماری بومی نطنز با بهره‌گیری از راهبردهای غیرفعال اقلیمی توانسته است شرایط مطلوبی از نظر تهویه طبیعی، آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی فراهم آورد. عناصر کالبدی نظیر حیاط مرکزی، سازمان فضایی درون‌گرا، بازشوهای متقابل، مصالح بومی با جرم حرارتی بالا و جهت‌گیری مناسب ساختمان، مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر در عملکرد اقلیمی این خانه‌ها به شمار می‌روند.

یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که میان ویژگی‌های کالبدی بنا و میزان پایداری اقلیمی آن رابطه مستقیمی وجود دارد. مقایسه نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد که خانه میرترابیان با وجود نرخ تعویض هوای کمتر نسبت به برخی نمونه‌ها، به دلیل برخورداری از سازمان فضایی مناسب، ارتباط مؤثر با عناصر طبیعی پیرامون، جهت‌گیری مطلوب و استفاده از مصالح بومی، بهترین عملکرد را از نظر آسایش حرارتی و انطباق اقلیمی ارائه کرده است. در مقابل، خانه فخار با وجود برخورداری از تهویه طبیعی مناسب، به دلیل ضعف در برخی ویژگی‌های کالبدی، نتوانسته شرایط آسایش حرارتی مطلوبی را فراهم کند. این موضوع نشان می‌دهد که دستیابی به پایداری اقلیمی تنها وابسته به یک عامل منفرد نیست، بلکه حاصل تعامل هماهنگ مجموعه‌ای از مؤلفه‌های کالبدی و محیطی است.

نتایج همچنین نشان داد که حیاط مرکزی به عنوان هسته سازمان‌دهنده فضا، نقش مهمی در ایجاد خرداقلیم مناسب، تعدیل دما و تقویت جریان هوا ایفا می‌کند. علاوه بر آن، استفاده از مصالح سنتی نظیر خشت، آجر و کاهگل با ظرفیت حرارتی بالا موجب کاهش نوسانات دمایی و افزایش ساعات آسایش حرارتی در فضاهای داخلی شده است. بازشوهای متقابل و

نحوه استقرار فضاها نیز با تقویت تهویه طبیعی، وابستگی ساختمان به سامانه‌های مکانیکی سرمایش و گرمایش را کاهش داده‌اند.

بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که معماری بومی نطنز واجد ظرفیت‌های ارزشمندی برای پاسخگویی به چالش‌های معاصر حوزه انرژی و تغییرات اقلیمی است. الگوهای کالبدی استخراج‌شده از این پژوهش می‌توانند به عنوان راهبردهایی کاربردی در طراحی مسکن و سکونتگاه‌های پایدار در اقلیم گرم و خشک ایران مورد استفاده قرار گیرند. بهره‌گیری از این اصول در کنار فناوری‌های نوین ساختمانی، زمینه کاهش مصرف انرژی، ارتقای کیفیت محیطی، افزایش آسایش ساکنان و تقویت تاب‌آوری سکونتگاه‌ها را فراهم خواهد ساخت.

منابع

- اخترکاو، مهدی. (۱۳۹۱). تنظیم شرایط همساز با بوم و اقلیم ایران. تهران: انتشارات کلهر.
- جاوری، محسن، کریمیان، حسن، و محمدی، سیده‌سارا. (۱۴۰۰). تأملی بر ساختار فضایی و الگوی کالبدی خانه‌های دوره قاجار شهر نطنز. مطالعات معماری ایران، ۱۹، ۱۱۵-۱۳۶.
- حزبئی، مرتضی، ادیب، زهرا، و نصراللهی، فرشاد. (۱۳۹۳). تهویه طبیعی در شوادان‌های شهر دزفول با بهره‌گیری از مدل‌سازی CFD. باغ نظر، ۱۱(۳۰).
- رهایی، امید. (۱۴۰۰). بررسی تغییرات کالبدی حیاط‌های مرکزی بر الگوی جریان هوای داخل آنها در خانه‌های دوران قاجار اصفهان با روش CFD (مورد پژوهی: خانه لباف). معماری و شهرسازی پایدار، ۲۹(۲)، ۴۶-۲۵.
- رهسپار منفرد، رضا، و عظمتی، سعید. (۱۴۰۰). تحلیل رفتار باد در تهویه طبیعی و کاهش مصرف انرژی در بنای مسکونی مبتنی بر معماری بومی؛ مورد مطالعاتی: تأثیر ابعاد و جانمایی بازشو بر تهویه طبیعی در شهر آمل. آرمان‌شهر، ۳۵.
- زهری، سارا، طاهباز، منصوره، و اعتصام، ایرج. (۱۳۹۶). ارائه الگوی بهینه استقرار ساختمان‌ها در مجتمع‌های مسکونی ویلایی شهر رشت با رویکرد بهره‌گیری بهینه از انرژی خورشید و باد. مدیریت شهری، ۴۷.
- ضیابخش، شادی، و محمودی، مهناز. (۱۴۰۰). تحلیلی بر نقش فضاهای نیمه‌باز در معماری بومی مسکونی شهر رشت جهت بهره‌گیری از تهویه طبیعی. مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، ۱۶(۳).
- قیابکلو، زهرا. (۱۳۹۵). مبانی فیزیک ساختمان ۴: سرمایش غیرفعال. تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- قبادیان، وحید. (۱۳۹۱). اقلیم و معماری. تهران: دانشگاه تهران.
- کسمایی، مرتضی. (۱۳۹۲). اقلیم و معماری. تهران: نشر خاک.
- مهدوی‌نژاد، محمدجواد، بمانیان، محمدرضا، و مشایخی، محمد. (۱۳۹۰). آس‌بادها؛ قدیمی‌ترین آسیاهای بادی جهان. نقش جهان، ۵۴.
- وکیلی‌نژاد، رزا، مفیدی‌شامیرانی، سیدمجید، و مهدی‌زاده سراج، فاطمه. (۱۳۹۲). پیشنهاد روشی برای پهنه‌بندی اقلیمی ایران بر مبنای پتانسیل تهویه طبیعی (مطالعه موردی: شهر یزد). پژوهش‌های اقلیم‌شناسی.
- واتسون، داند، و لیز، کنت. (۱۳۹۶). طراحی اقلیمی: اصول نظری و اجرایی کاربرد انرژی در ساختمان (ترجمه وحید قبادیان و محمد فیض مهدوی). تهران: دانشگاه تهران.
- هدایت، ژاله، عمادیان رضوی، سیده زینب، و آیت‌اللهی، سیدمحمدحسین. (۱۳۹۸). دستیابی به الگوی رفتاری باد در بادگیرهای سنتی یزد بر اساس اندازه‌گیری بلندمدت عوامل اقلیمی (نمونه موردی: بادگیر خانه مرتاض). معماری اقلیم گرم و خشک، ۷(۱۰).
- Akooshchian, S., & Khalatbari, R. (2018). The selection of materials for residential building facade in the hot and dry climate of Iran using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) method. *Maramat-e Asar & Baft-haye Tarikhi-Farhangi*, 8(15), 13-28.
- Anand, V., Kadiri, V. L., & Putcha, C. (2023). Passive buildings: A state-of-the-art review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 4(1), 3.
- Anastaselos, D., Oxizidis, S., & Papadopoulos, A. M. (2011). Energy, environmental and economic optimization of thermal insulation solutions by means of an integrated decision support system. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 686-694.
- Asfour, S., & Gadi, B. (2008). Using CFD to investigate ventilation characteristics of vaults as wind-inducing devices in buildings. *Applied Energy*, 85, 1126-1140.
- Ben-Alon, L., Rempel, A. R., et al. (2023). Thermal comfort and passive survivability in earthen buildings. *Building and Environment*, 238, 110339.
- Chandel, S. S., Sharma, V., & Marwah, B. M. (2016). Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 459-477.

- Clements-Croome, D. (Ed.). (2002). *Naturally ventilated buildings: Building for the senses, the economy and society*. Routledge.
- Costa-Carrapiço, I., Neila González, J., Raslan, R., & Sánchez-Guevara, C. (2022). Understanding the challenges of determining thermal comfort in vernacular dwellings: A meta-analysis. *Journal of Cultural Heritage*, 58, 57–73.
- Da Graca, G. C., Martins, N. R., & Horta, C. S. (2012). Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall. *Energy and Buildings*, 50, 177–188.
- Fathy, H. (1986). *Natural energy and vernacular architecture*. University of Chicago Press.
- Friess, W. A., & Rakhshan, K. (2017). A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 485–496.
- Gao, C. F., & Lee, W. L. (2011). Evaluating the influence of openings configuration on natural ventilation performance. *Building and Environment*, 46(4), 961–969.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Wiley.
- Gong, X., Akashi, Y., & Sumiyoshi, D. (2012). Optimization of passive design measures for residential buildings. *Building and Environment*, 58, 46–57.
- Goudarzi, H., & Mostafaeipour, A. (2017). Energy saving evaluation of passive systems for residential buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 432–446.
- Humphreys, M. A., & Nicol, J. F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes. *Energy and Buildings*, 34(6), 667–684.
- Nguyen, A. T., Tran, Q. B., Tran, D. Q., & Reiter, S. (2019). A review on climatic responsiveness of vernacular housing. *Frontiers of Architectural Research*, 8(4), 535–548.
- Olgyay, V. (2015). *Design with climate*. Princeton University Press.
- Peker, E. (2022). Exploring locally-produced design solutions for thermal comfort. *Open House International*, 47(3), 549–570.
- Prakash, D., & Ravikumar, P. (2015). Analysis of thermal comfort and airflow characteristics. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 4(1), 42–57.
- Rapoport, A. (1969). *House form and culture*. Prentice-Hall.
- Sargazi, M. A., & Tahbaz, M. (2022). Effects of climate responsive strategies. *Nakhara Journal of Environmental Design and Planning*, 21(2).
- Sharifi, A. (2021). Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures. *Science of the Total Environment*, 750, 141642.
- Steemers, K., & Manchanda, S. (2010). Energy efficient design and occupant well-being. *Building Research & Information*, 38(4), 408–420.
- Teppner, R., et al. (2014). Air change rates driven by flow around buildings. *Energy and Buildings*, 80, 570–583.
- Vakharia, M. N., & Joshi, M. (2025). Climate-responsive wada architecture. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 24(5), 3426–3439.
- Yang, W., Xu, J., Lu, Z., Yan, J., & Li, F. (2022). A systematic review of indoor thermal environment of vernacular dwelling climate responsiveness. *Journal of Building Engineering*, 53, 104514.