



Climatic Typology of Historical Houses in Hamadan with a Focus on Spatial Composition

(Design and Validation of the CEP Index Based on Statistical Analysis and Energy Simulation)

Hojat Ghiasvand^{*1} and Javad Ghiasvand²

Received 03/Nov/2025

Revised: 21/Jan/2026

Accepted: 25/Feb/2026

(PP.: 223-248)

Abstract

Interodaction: The cold climate of Hamadan plays a significant role in shaping residential architectural patterns, and investigating the relationship between the physical form of buildings and their thermal performance can contribute to reducing energy consumption and improving living quality. This issue becomes even more important in historical urban fabrics. Therefore, the present study was conducted with the aim of developing a climatic typology of Hamadan's historical houses based on their physical compositional characteristics and analyzing the relationship between architectural form and the climatic responsiveness of buildings.

Methodology: The research was carried out using a mixed-method approach. First, 33 historical houses in Hamadan were analyzed through statistical methods and classified into eight physical subtypes (A1 to C3). Subsequently, a Composite Environmental Performance (CEP) index was developed based on factors such as thermal mass, wall thickness, window-to-wall ratio (WWR), and floor area-to-site area ratio (density). To validate the index, energy simulations of selected case studies were conducted using DesignBuilder software.

Results and Discussion: The findings indicated that subtypes with higher CEP values demonstrated better thermal performance and lower energy consumption; notably, A2 and B2 performed more efficiently than the other subtypes. In contrast, subtypes such as C3, characterized by lower CEP values, exhibited higher energy consumption and weaker climatic adaptability. Furthermore, significant negative correlations were observed between CEP and cooling load ($r = -0.65$) as well as annual energy consumption ($r = -0.51$).

Conclusion: The results demonstrate that physical compositional characteristics in Hamadan's historical houses have a substantial impact on climatic performance and energy consumption. The CEP index, as an analytical and cost-effective tool, is capable of assessing the climatic responsiveness of buildings and predicting their energy performance in historical contexts. It can therefore serve as a basis for decision-making in climate-responsive conservation and restoration design.

Keywords: Climatic Typology, Historical Houses of Hamadan, Compositional Approach, CEP Index, Statistical Analysis AND Energy Simulation.

¹ **Assistant Prof.** Architecture Department, Azad Islamic Uni., Malayer Branch, Iran, (Corresponding Author)
ho.ghiasvand@iau.ac.ir

² **Assistant Prof.** Architecture Department, Azad Islamic Uni., Firoozkooh Branch, Iran.

گونه‌شناسی اقلیمی مسکن تاریخی همدان بر پایه ترکیب‌بندی کالبدی در چارچوب آمایش محیطی

(طراحی و اعتبارسنجی شاخص CEP براساس تحلیل آماری و شبیه‌سازی انرژی)

حجت قیاسوند¹ و جواد قیاسوند²

تاریخ پذیرش: 1404 / اسفند / 06	تاریخ بازنگری: 1404 / بهمن / 01	تاریخ دریافت: 1404 / آبان / 12
(صفحات: 223-248)		

چکیده

مقدمه: هدف اصلی این پژوهش، تدوین گونه‌شناسی اقلیمی خانه‌های تاریخی شهر همدان با تکیه بر ویژگی‌های کالبدی جهت ارتقای زیست‌پذیری بافت‌های تاریخی و بهینه‌سازی الگوی مصرف انرژی در سطح خرد آمایشی است. در اقلیم سرد همدان، تحلیل ارتباط میان فرم معماری و عملکرد حرارتی بناها، به عنوان عنصری کلیدی در برنامه‌ریزی پایدار محیط‌های مسکونی، نقش به‌سزایی در کاهش هزینه‌های انرژی و ارتقای کیفیت زیستی دارد. این ضرورت در بافت‌های تاریخی که بسترهای اصلی استقرار و سکونتگاه‌های انسانی هستند، دوچندان می‌شود.

روش تحقیق: پرسش‌های پژوهش بر شناسایی گونه‌های کالبدی، بررسی تأثیر شاخص‌های کالبدی بر عملکرد اقلیمی و تبیین الگوی پایداری محیط‌محور تمرکز دارد. در این راستا، پژوهش از رویکردی ترکیبی بهره برد. در مرحله نخست، 33 خانه تاریخی با بهره‌گیری از تحلیل‌های آماری چندمتغیره شامل خوشه‌بندی، تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون تعقیبی Tukey، در قالب هشت زیرگونه کالبدی (A1 تا C3) دسته‌بندی شدند. سپس شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (CEP) بر مبنای مؤلفه‌های کالبدی همچون جرم حرارتی، ضخامت دیوار، نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR) و نسبت کل زیربنا به سطح زمین (تراکم) طراحی و برای اعتبارسنجی این شاخص، شبیه‌سازی انرژی با استفاده از نرم‌افزار Buidler Design بر روی نمونه‌های منتخب انجام شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که زیرگونه‌هایی با شاخص CEP بالاتر (مانند A2 و B2)، مصرف انرژی پایین‌تری داشته و از منظر حرارتی عملکرد مطلوب‌تری ارائه می‌دهند. در مقابل، زیرگونه‌های دارای CEP پایین‌تر همچون (C3)، دارای مصرف انرژی بالا و عملکرد نامطلوب از منظر اقلیم‌پذیری هستند. همچنین بین CEP و پارامترهایی نظیر بار سرمایشی ($r = -0.65$) و مصرف انرژی سالانه ($r = -0.51$) همبستگی منفی مشاهده شد. **نتیجه‌گیری:** این یافته‌ها نشان می‌دهد که گونه‌شناسی اقلیمی و شاخص CEP، ابزاری راهبردی برای آمایش خرد و مدیریت ابنیه در بافت‌های تاریخی است، به گونه‌ای که می‌توان با بهره‌گیری از آن، در فرآیندهای بهسازی و نوسازی بافت‌های کهن، رویکردی اقلیم‌پاسخ و کم‌هزینه را در مقیاس مدیریت شهری اعمال نمود تا علاوه بر حفظ ارزش‌های کالبدی، در راستای توسعه پایدار و بهینه‌سازی منابع زیست محیطی محقق شود.

واژگان کلیدی: گونه‌شناسی اقلیمی، مسکن تاریخی همدان، رویکرد ترکیب‌بندی کالبدی، آمایش محیطی، شاخص CEP.

¹استادیار، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملایر، ایران. (نویسنده مسئول) ho.ghiasvand@iau.ac.ir

²استادیار، گروه معماری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد فیروزکوه، ایران.



1-مقدمه

در بستر تحولات محیطی و تشدید بحران‌های اقلیمی، بازخوانی دانش بومی و تجربه‌های زیسته جوامع در سازگاری با طبیعت و اقلیم، دوباره به یکی از حوزه‌های مهم مطالعات محیطی و برنامه‌ریزی تبدیل شده است. در ایران، به دلیل تنوع چشم‌گیر اقلیمی و فرهنگی، معماری تاریخی واجد لایه‌هایی از ارزش فنی، زیبایی‌شناختی و فرهنگی است و در عین حال، از منظر کارکرد اقلیمی نیز ظرفیت‌های قابل توجهی برای کاهش مصرف انرژی و ارتقای کیفیت زیست‌محیطی سکونتگاه‌ها دارد. در این میان، خانه‌های تاریخی شهر همدان به عنوان نمونه‌هایی شکل‌گرفته در اقلیم سرد، به دلیل ویژگی‌های کالبدی، ترکیب‌بندی فضایی و رابطه ارگانیک با محیط پیرامون، ظرفیت بالایی برای مطالعه گونه‌شناسانه و استخراج الگوهای قابل کاربری در «آمایش خرد» بافت‌های تاریخی دارند. مسأله اصلی پژوهش از یک خلأ در ادبیات تحقیق ناشی می‌شود: با وجود پژوهش‌های انجام‌شده درباره معماری بومی ایران، گونه‌شناسی اقلیمی دقیق مبتنی بر تحلیل ترکیب‌بندی کالبدی-به‌ویژه در حوزه خانه‌های تاریخی همدان-کمتر به صورت روشمند مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، تحلیل عملکرد حرارتی ساختمان‌ها در تعامل با اقلیم، پشتوانه نظری روشنی در مطالعات طراحی اقلیمی دارد. ویکتور اولگی (Olgyay, 1963) هماهنگی فرم معماری با شرایط اقلیمی را مبنای دستیابی به آسایش حرارتی با حداقل وابستگی به انرژی مکانیکی می‌داند. گیونی (Givoni, 1981) نیز بر نقش تهویه طبیعی، جرم حرارتی و نسبت پر به خالی در طراحی اقلیمی تأکید می‌کند. همچنین، لچنر (Lechner, 2015)، کنترل تابش و تهویه را از راهبردهای اصلی طراحی اقلیم‌پاسخ معرفی می‌کند. این مبانی نظری، چارچوب تحلیل شاخص CEP و انتخاب متغیرهای کالبدی و اقلیمی پژوهش حاضر را شکل داده‌اند. بیشتر پژوهش‌های پیشین یا بر ویژگی‌های کلی معماری سنتی متمرکز بوده‌اند (Jeyhani et al., 2019; Hosseini et al., 2020; Farahbakhsh et al., 2017; Hosseini et al., 2018)، یا صرفاً به بررسی عملکرد حرارتی بعضی مؤلفه‌ها نظیر مصالح یا بازشوها بسنده کرده‌اند (Saljoughinejad & Sharifabad, 2015). همچنین برخی پژوهش‌ها بیشتر ناظر بر به‌کارگیری بهینه‌سازی چندهدفه و تحلیل سلسله‌مراتبی است، که ضمن کاهش مصرف انرژی

ساختمان‌های تاریخی در عین حال اصول حفاظت میراثی را نیز تا حد زیادی حفظ می‌کنند (Roberti, et al, 2017). اهمیت و ضرورت انجام این پژوهش در چند بعد قابل تبیین است؛ نخست آن‌که یافته‌های حاصل از گونه‌شناسی اقلیمی می‌تواند مبنایی برای بازطراحی و بازآفرینی بافت‌های تاریخی فراهم آورد؛ زیرا شناسایی الگوهای فضایی، کالبدی و محیطی شکل‌گرفته در پاسخ به شرایط اقلیمی، امکان بهره‌گیری از منطق معماری بومی را در فرایند حفاظت و نوسازی فراهم آورد (Zong et al. 2024, Shou et al., 2026; Philokyprou et al., 2021). دوم آن‌که با توجه به ضرورت صرفه‌جویی انرژی و توسعه معماری پایدار، شناخت گونه‌های موفق از منظر عملکرد حرارتی و اقلیمی، برای طراحان معاصر راهگشا خواهد بود (Rasouli Rasouli Larmaei & Shahbazi, 2015; Saljoughinejad & Rashidi Sharifabad, 2015). این ساختمان‌های سنتی، علاوه بر ارزش میراثی خود، معمولاً به عنوان الگویی از پایداری در استفاده از منابع موجود، با حداقل تأثیر منفی بر محیط زیست، به حداقل رساندن هزینه‌ها و کاهش تقاضای انرژی در نظر گرفته می‌شوند (Pardo, 2023). سوم آن‌که شناسایی و طبقه‌بندی الگوهای کالبدی معماری بومی می‌تواند در تدوین سیاست‌های حفاظت و بازآفرینی بافت‌های تاریخی و انتقال دانش معماری سنتی به رویکردهای معاصر طراحی مورد استفاده قرار گیرد (Ali et al., 2025). بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش، استخراج گونه‌شناسی اقلیمی خانه‌های تاریخی همدان با تمرکز بر معیارهای ترکیب‌بندی کالبدی است؛ به‌نحوی که ارتباط فرم و عملکرد در بستر اقلیم سرد تحلیل و مدل‌سازی شود. این هدف از طریق استخراج شاخص‌هایی چون: شکل کلی (چهارطرف ساخت، سه‌طرف ساخت، دوطرف موازی یا ال شکل، یک‌طرف ساخت و برون‌گرا) و مشخصات هندسی کالبدی (توده‌گذاری طبقات، تناسبات حیاط، جهت‌گیری، جرم حرارتی، ضخامت جداره‌ها و تناسبات بازشوها) پیگیری می‌شود. پژوهش حاضر می‌کوشد به پرسش‌های زیر پاسخ دهد:

چه گونه‌هایی از مسکن تاریخی همدان، بر اساس ویژگی‌های ترکیب‌بندی کالبدی، قابل شناسایی و تفکیک هستند؟

چه رابطه/تأثیری میان شاخص‌های کالبدی (مانند ضخامت جداره، جرم حرارتی، نسبت سطح شیشه به دیوار/بازشو،

جهت‌گیری) و عملکرد اقلیمی-انرژی این گونه‌ها در اقلیم سرد همدان وجود دارد؟

شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (CEP) چگونه بر مبنای ترکیب‌بندی کالبدی و با اتکا به تحلیل‌های آماری و شبیه‌سازی انرژی تدوین و اعتبارسنجی می‌شود؟

کدام گونه‌ها بر اساس شاخص CEP، عملکرد حرارتی بهینه‌تری (کاهش مصرف انرژی) دارند و بنابراین برای کاربست در بهسازی/مدیریت بافت تاریخی در سطح خرد آمایشی مناسب‌ترند؟

روش‌شناسی این پژوهش مبتنی بر انتخاب 33 خانه تاریخی مستند از میان مجموعه خانه‌های واجد ارزش (99 خانه) همدان است که دارای نقشه، اطلاعات کالبدی و اصالت ساختاری هستند. داده‌ها با نرم‌افزارهای آماری تحلیل و گونه‌بندی می‌شوند. در ادامه، از روش «ترکیب شاخص‌ها» برای طراحی شاخص اقلیم‌پذیری (Climate Efficiency Performance - CEP) استفاده می‌شود که ترکیبی از؛ جرم حرارتی، توده‌گذاری، بازشوها، جهت‌گیری استقرار اقلیم و ضخامت جداره است. در مجموع، پژوهش حاضر با رویکردی میان‌رشته‌ای و با بهره‌گیری از پیشینه داخلی و بین‌المللی و نیز طراحی شاخص CEP می‌کوشد گونه‌شناسی اقلیمی را به‌مثابه ابزاری کارآمد در خدمت برنامه‌ریزی و بهسازی اقلیم پاسخ‌بافت‌های تاریخی (در سطح خرد آمایشی) معرفی کند؛ ابزاری که بر دانش بومی استوار است و در عین حال با ابزارهای تحلیلی روز هم‌افزایی دارد. نوآوری پژوهش حاضر در سه سطح قابل تبیین است. نخست، برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که عملکرد اقلیمی معماری تاریخی را به صورت منفرد و بر پایه یک یا چند مؤلفه کالبدی بررسی کرده‌اند، این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد گونه‌شناختی، مجموعه‌ای از ویژگی‌های ترکیب‌بندی کالبدی شامل جرم حرارتی، ضخامت جداره‌ها، نسبت بازشوها، تراکم ساختمانی و سازمان فضایی را به صورت یکپارچه تحلیل می‌کند. دوم، در این پژوهش شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (Climate Efficiency Performance - CEP) به عنوان ابزاری کمی برای ارتباط میان ویژگی‌های کالبدی و عملکرد انرژی توسعه داده شده است؛ شاخصی که امکان مقایسه عملکرد اقلیمی گونه‌های مختلف مسکن تاریخی را بدون اتکا صرف به تحلیل‌های کیفی فراهم می‌سازد. سوم، اعتبار این شاخص از طریق ترکیب تحلیل‌های آماری

چندمتغیره و شبیه‌سازی انرژی در محیط DesignBuilder بررسی شده است. از این منظر، پژوهش حاضر تلاش می‌کند چارچوبی تحلیلی برای پیوند میان دانش معماری بومی، گونه‌شناسی کالبدی و ارزیابی کمی عملکرد انرژی ارائه دهد که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با حفاظت، بهسازی و بازآفرینی بافت‌های تاریخی در اقلیم‌های سرد مورد استفاده قرار گیرد.

1-1- پیشینه تحقیق

مطالعات منتخب مرتبط با موضوع پژوهش را می‌توان در چهار محور اصلی شامل گونه‌شناسی کالبدی و فضایی، معماری اقلیمی و تنظیم حرارتی، تحلیل انرژی و شبیه‌سازی عملکردی، و مطالعات تطبیقی بین‌المللی دسته‌بندی کرد. برای تبیین جایگاه پژوهش حاضر، مطالعات شاخص هر محور از نظر موضوع، روش، یافته‌های اصلی و خلأ پژوهشی در جدول یک مقایسه شده‌اند. نخست، مطالعات گونه‌شناسی کالبدی و فضایی نشان داده‌اند که سازمان فضایی، توده‌گذاری و ویژگی‌هایی مانند حیاط مرکزی با شرایط اقلیمی و سنت‌های بومی ارتباط دارند و در شکل‌گیری زیست‌پذیری محیط‌های مسکونی مؤثرند (Saeedi & Kalantari Khalilabad, 1995; Hassanpour Lamr, 2014; Oveysi-Keykha et al., 2020; Olakanbi et al., 2025). دوم، پژوهش‌های معماری اقلیمی بر نقش ویژگی‌هایی مانند ضخامت دیوار، نسبت بازشو، جرم حرارتی و جهت‌گیری در عملکرد حرارتی و مصرف انرژی تأکید کرده‌اند (Mardani & Roustaei, 2021; Fernandes et al., 2018; Ghoddusi et al., 2020; 2015). سوم، مطالعات شبیه‌سازی انرژی نشان داده‌اند که مدل‌سازی عددی می‌تواند اثر ویژگی‌های کالبدی بر عملکرد حرارتی را کمی‌سازی و در ارزیابی و بهسازی بناهای تاریخی پشتیبانی کند (Roberti et al., 2017; Sommese & Diana, 2026; Triana et al., 2015). چهارم، مطالعات تطبیقی نشان می‌دهند که معماری بومی در اقلیم‌های مشابه، با وجود تفاوت‌های فرهنگی، از برخی راهبردهای مشترک پاسخ‌گویی به اقلیم بهره می‌گیرد؛ یافته‌هایی که امکان انتقال تجارب موفق میان محیط‌های تاریخی مشابه را تقویت می‌کند (Estrada D'amato & Kapoor, 2024; Yetkin & Yaman, 2025; Shou et al., 2026). با وجود این پیشینه، پیوند نظام‌مند میان گونه‌شناسی کالبدی و ارزیابی کمی عملکرد انرژی، به‌ویژه



قرار گرفته است. این خلأ در زمینه خانه‌های تاریخی همدان، با اقلیم سرد، محسوس‌تر است. پژوهش حاضر با توسعه شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری کالبدی (Climate Efficiency CEP؛ Performance)، این شکاف را از طریق پیوند ویژگی‌های کالبدی، طبقه‌بندی گونه‌ها و عملکرد انرژی دنبال می‌کند و قابلیت تبیین شاخص پیشنهادی را با شبیه‌سازی انرژی و تحلیل آماری ارزیابی می‌نماید.

در خانه‌های تاریخی اقلیم سرد، همچنان محدود است. بخش عمده مطالعات یا بر گونه‌شناسی کیفی و ویژگی‌های فضایی و کالبدی تمرکز داشته‌اند یا اثر مؤلفه‌های منفردی مانند مصالح، جرم حرارتی و بازشوها را از طریق شبیه‌سازی بررسی کرده‌اند. در نتیجه، استفاده همزمان از داده‌های میدانی، تحلیل آماری چندمتغیره، گونه‌بندی کالبدی، شاخص ترکیبی عملکرد اقلیمی و شبیه‌سازی انرژی برای اعتبارسنجی کمتر مورد توجه

جدول ۱- مقایسه تحلیلی مطالعات پیشین مرتبط با گونه‌شناسی کالبدی، معماری اقلیمی و عملکرد انرژی در بناهای تاریخی
Tab. 1- Analytical comparison of previous studies related to physical typology, climate-responsive architecture, and energy performance in historical buildings

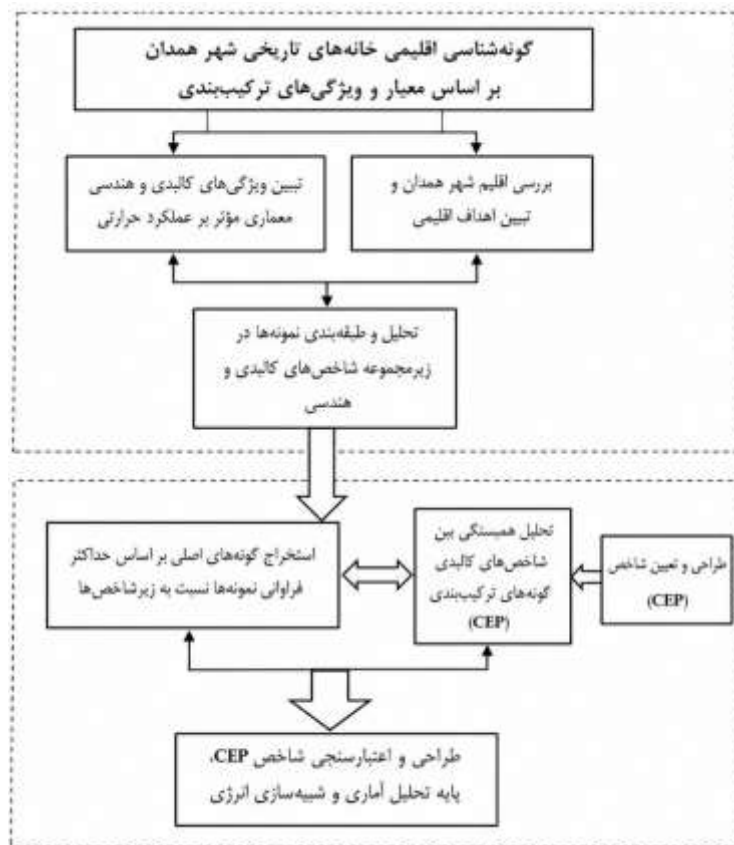
پژوهش	موضوع مطالعه	روش تحقیق	یافته‌های اصلی	خلأ پژوهش نسبت به مطالعه حاضر
Saeedi & Kalantari Khalilabad, 1995 Hassanpour Lamr, S. (2014)	گونه‌شناسی خانه‌های سنتی ایران ساختار فضایی خانه‌های تاریخی	تحلیل توصیفی-کالبدی و گونه‌شناختی تحلیل گونه‌شناختی و فضایی	ارتباط میان سازمان فضایی، حیاط مرکزی و الگوهای سکونت سنتی را تبیین کرد نقش ترکیب‌بندی فضایی و سازمان فضایی در شکل‌گیری الگوهای معماری بومی را بررسی کرد	فاقد ارزیابی کمی عملکرد اقلیمی و انرژی گونه‌های شناسایی شده عدم پیوند گونه‌شناسی با شبیه‌سازی یا شاخص کمی عملکرد اقلیمی
Oveysi-Keykha, et al, (2020)	ویژگی‌های کالبدی معماری بومی	تحلیل کالبدی و مقایسه ویژگی‌های معماری	نقش فرم، سازمان فضایی و ویژگی‌های کالبدی در پاسخ‌گویی به شرایط اقلیمی را نشان داد	نبود مدل ترکیبی کمی برای رتبه‌بندی عملکرد اقلیمی گونه‌ها
Fernandes et al. (2020)	عملکرد حرارتی معماری بومی	پایش میدانی، ارزیابی آسایش و تحلیل عملکرد حرارتی	نشان داد راهبردهای غیرفعال معماری بومی می‌توانند در بهبود عملکرد حرارتی مؤثر باشند؛ در یک مطالعه نیز نقش بالکن شیشه‌ای در بهره‌گیری از gains خورشیدی و کاهش اتلاف حرارت بررسی شد	تمرکز بر یک بنای راهبردی مشخص و عدم توسعه شاخص ترکیبی مبتنی بر چند متغیر کالبدی
Roberti et al. (2017)	بهسازی انرژی و حفاظت بنای تاریخی	شبیه‌سازی دینامیکی، بهینه‌سازی چندهدفه و AHP	امکان مقایسه گزینه‌های بهسازی از نظر مصرف انرژی، آسایش حرارتی و سازگاری با حفاظت میراثی را نشان داد؛ در مطالعه موردی کاهش قابل توجه نیاز انرژی با حفظ سطح بالای آسایش امکان‌پذیر بود	تمرکز بر بهسازی یک بنای تاریخی و عدم استخراج گونه‌های کالبدی یا شاخص ترکیبی پیشینی برای رتبه‌بندی نمونه‌ها
Triana et al. (2015)	گونه‌های نماینده مسکن و عملکرد انرژی	تحلیل ۱۰۸ پروژه، استخراج تیپ‌های نماینده و ارزیابی حرارتی-انرژی	نشان داد می‌توان از ویژگی‌های مشترک پروژه‌ها، تیپ‌های نماینده استخراج و عملکرد انرژی آن‌ها را ارزیابی کرد	مطالعه بر مسکن اجتماعی معاصر متمرکز است و شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری برای خانه‌های تاریخی ارائه نمی‌کند
Estrada D'amato & Kapoor (2024)	راهبردهای پاسخ‌گویی اقلیمی در معماری بومی	مطالعه تطبیقی در چند زمینه اقلیمی و فرهنگی و استفاده از Case Study و Mahoney Table	وجود طیفی از راهبردهای غیرفعال پاسخ‌گو به اقلیم را در زمینه‌های فرهنگی و اقلیمی مختلف نشان داد	رویکرد عمدتاً تطبیقی و راهبردمحور است و گونه‌بندی کمی همراه با شاخص ترکیبی و اعتبارسنجی انرژی ارائه نمی‌کند
Shou et al. (2026)	ساخت اکولوژیک و سازمان فضایی خانه‌های حیاطدار بومی Huizhou	تحلیل دیگرامی و بررسی ترکیب فضایی-منظر	الگوهای ترکیب فضایی و ارتباط میان سازمان فضایی و راهبردهای بومی ساخت را بررسی کرد	تمرکز بر سازمان فضایی و ترکیب معماری بوده و فاقد شاخص کمی چندمتغیره برای ارزیابی عملکرد اقلیمی نمونه‌هاست
Yetkin & Yaman (2025)	سازگاری اقلیمی خانه‌های بومی آناتولی	شبیه‌سازی انرژی با DesignBuilder و مقایسه مصالح سنگی و خشتی در اقلیم‌های مختلف	تفاوت مصالح و شرایط اقلیمی بر مصرف انرژی، اثرات زیست‌محیطی و آسایش حرارتی اثرگذار است؛ مطالعه، عملکرد خانه‌های بومی را در چند شرایط اقلیمی مقایسه کرد	تمرکز بر مقایسه مصالح و یک چارچوب شبیه‌سازی؛ فاقد گونه‌شناسی کالبدی و شاخص ترکیبی مبتنی بر PCA برای رتبه‌بندی خانه‌های تاریخی

پژوهش	موضوع مطالعه	روش تحقیق	یافته‌های اصلی	خلا پژوهش نسبت به مطالعه حاضر
Yang & Misni (2025)	راهبردهای طراحی پایدار در خانه‌های بومی حیاطدار چین	پایش میکروکلیمایی و مقایسه خانه‌های بومی و معاصر	نقش حیاط، جرم حرارتی، بازشوها و راهبردهای غیرفعال را در تعدیل شرایط حرارتی بررسی کرد	مطالعه بر عملکرد خرد اقلیمی و مقایسه موردی متمرکز است و شاخص ترکیبی برای گونه‌شناسی و رتبه‌بندی کالبدی ارائه نمی‌کند

2-1- مبانی نظری تحقیق

در گونه‌شناسی مبتنی بر ویژگی‌های ترکیب‌بندی، بناها بر اساس شاخص‌های کالبدی تحلیل شده و نمونه‌های مشابه در یک گروه قرار می‌گیرند (Mashhadi & Aminpour, 2017). این رویکرد در مطالعات آمایش محیط، به عنوان ابزاری برای سازمان‌دهی فضایی سکونتگاه‌ها و تحلیل سازگاری کالبد با شرایط محیطی کاربرد دارد و امکان می‌دهد ارزش‌های معماری بومی در چارچوبی کمی و قابل تصمیم‌گیری بازشناسی شوند. این فرایند شامل مراحل زیر است: الف) تعریف شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها: متناسب با اهداف پژوهش و شرایط بومی. ب) گردآوری داده‌ها: اندازه‌گیری و ثبت داده‌های مربوط به هر شاخص در نمونه‌های منتخب. ج) طبقه‌بندی نمونه‌ها: بر اساس بیشترین شباهت در ویژگی‌های ترکیب‌بندی. د) تحلیل تمایزات: شناسایی ویژگی‌های منحصربه‌فرد هر گروه. ر) تفسیر نتایج: با در نظر گرفتن معیارهای اقلیمی، شکلی، تاریخی و الزامات سازماندهی فضایی در بافت‌های تاریخی. این مراحل به شناسایی گونه‌های متمایز و تحلیل تفاوت‌های کالبدی-اقلیمی کمک می‌کنند و چارچوبی برای تحلیل رفتار محیطی بناها در راستای آمایش خرد سکونتگاه‌های تاریخی فراهم می‌آورند. بر اساس بررسی ادبیات و مطالعات میدانی، معیارهای کالبدی کلیدی مؤثر بر عملکرد حرارتی خانه‌های تاریخی همدان عبارتند از: شکل کلی بنا (توده‌گذاری) - تناسبات و مساحت حیاط - جهت‌گیری محور طولی - میزان تراکم و نسبت فضای پر به خالی - توده‌گذاری طبقات و ارتفاع بنا - جرم حرارتی و ظرفیت ذخیره حرارتی - ضخامت جداره‌ها (پیرامونی و داخلی) - تناسبات بازشوها (WWR) و نسبت عرض به ارتفاع. این شاخص‌ها مبنای محاسبه شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (CEP) هستند. در چارچوب آمایش محیطی، این شاخص‌ها به عنوان متغیرهای مؤثر در مدیریت انرژی، زیست‌پذیری و تاب‌آوری محیط‌های تاریخی نیز عمل می‌کنند. مدل مفهومی پژوهش، ارتباطی دوطرفه میان شناخت اقلیم و ویژگی‌های معماری

برقرار کرده و از طریق تحلیل داده‌های کمی، گونه‌های شاخص و بهینه را استخراج می‌کند. این مدل، معیارهای ترکیب‌بندی فضایی-کالبدی (مانند جرم حرارتی، ضخامت جداره، نسبت پر به خالی، نسبت بازشو، نسبت زیربنا به زمین و جهت‌گیری) را به عنوان متغیرهای مؤثر بر رفتار حرارتی در نظر می‌گیرد (شکل یک). در نگاه آمایشی، این مدل مفهومی نقش واسط را میان "شناخت کالبدی" و "سیاست‌گذاری محیطی" ایفا می‌کند و می‌تواند در تصمیم‌سازی برای بهسازی و ساماندهی فضایی بافت‌های تاریخی به کار گرفته شود. این رویکرد امکان دسته‌بندی علمی گونه‌های معماری تاریخی همدان و ارزیابی همزمان کیفیت طراحی بومی و کارایی انرژی را از طریق شاخص CEP فراهم می‌آورد. هدف، شناسایی الگوهای بهینه برای حفاظت از ارزش‌های معماری بومی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در بافت‌های تاریخی و معاصر است. در سطح کاربردی، این الگوها می‌توانند مبنایی برای برنامه‌ریزی محیطی، اولویت‌بندی مداخلات مرمتی و مدیریت انرژی در سکونتگاه‌های تاریخی باشند. مدل پیشنهادی، با استانداردسازی و نرمال‌سازی ویژگی‌های کالبدی و همبستگی آن‌ها با داده‌های عملکرد انرژی، قابلیت شناسایی گونه‌های سازگار با اقلیم را دارد و به عنوان الگویی برای آمایش خرد و بازآفرینی پایدار در بافت‌های تاریخی مورد استفاده قرار می‌گیرد به طور خلاصه، مدل تحلیلی این پژوهش مسیری دوگانه را دنبال می‌کند: حفاظت و بازتولید ارزش‌های معماری بومی بر پایه شواهد کمی. بهینه‌سازی مصرف انرژی از طریق انطباق فرم و کالبد با الزامات اقلیمی. این رویکرد با پیوند دادن ارزش‌های فرهنگی-تاریخی به جنبه‌های عملکردی و محیطی، بنیانی نظری برای تصمیم‌سازی مبتنی بر شواهد در مدیریت پایدار بافت‌های تاریخی فراهم می‌آورد و خلاصه پژوهش‌های پیشین را در سطح آمایش محیط پر می‌کند. در همین راستا، مدل مفهومی پژوهش (شکل یک) ساختار عملیاتی این رویکرد را در قالب یک فرآیند تصمیم‌یار آمایشی، از سطح شناخت کالبدی تا ارزیابی اقلیمی، ترسیم کرده است.



شکل 1- مدل مفهومی پژوهش در راستای آمایش خرد بافت‌های تاریخی و ارزیابی عملکرد اقلیمی کالبد

Fig-1- Conceptual model of the research for micro-spatial planning of historical fabrics and evaluating the climatic performance of building physical form

بودند، به‌عنوان نمونه نهایی انتخاب شدند. بنابراین، انتخاب نمونه بر اساس کامل بودن داده‌ها و قابلیت مقایسه کالبدی انجام شد و نه صرفاً بر مبنای دسترسی یا انتخاب تصادفی. سپس با استفاده از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی، این خانه‌ها در قالب 8 زیرگونه کالبدی از A1 تا C3 طبقه‌بندی شدند. به طوری که هر زیرگونه، الگوی متمایزی از سازماندهی کالبدی مسکن تاریخی در بستر بافت شهری همدان را نمایندگی می‌کند. برای سنجش عملکرد اقلیمی گونه‌ها، شاخص ترکیبی تحت عنوان CEP (Climate Efficiency Performance) طراحی شد که بر پایه مؤلفه‌هایی نظیر ضخامت دیوارهای خارجی، جرم حرارتی، نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR)، نسبت پر به خالی (سطح اشغال) و جهت‌گیری محاسبه شد. این شاخص‌ها به‌منزله ابزاری کمی برای مقایسه و رتبه‌بندی گونه‌های کالبدی از منظر کارایی اقلیمی و مصرف انرژی، در مقیاس واحدهای مسکونی و به عنوان ورودی تصمیم‌سازی در برنامه‌ریزی و مدیریت بافت

2-روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع کاربردی-تحلیلی است که با رویکردی کمی و ترکیبی، به بررسی اقلیم‌پذیری کالبدی خانه‌های تاریخی همدان در راستای ارتقای کیفیت زیست‌محیطی و آمایش خرد بافت تاریخی می‌پردازد. در گام نخست، با استناد به نقشه‌های برداشت شده، داده‌های معماری و بازدیدهای میدانی، ویژگی‌های کالبد 33 خانه تاریخی استخراج شد. جامعه اولیه پژوهش شامل 99 خانه تاریخی شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه بود. انتخاب نمونه نهایی بر اساس معیارهای مشخصی شامل برخورداری از اطلاعات کالبدی قابل اتکا، دسترسی به نقشه یا امکان برداشت دقیق، قابلیت استخراج تمامی متغیرهای مورد نیاز پژوهش و امکان مقایسه همسان میان نمونه‌ها انجام شد. خانه‌هایی که فاقد اطلاعات کافی، نقشه قابل اعتماد، دسترسی مناسب برای برداشت یا داده‌های کامل برای متغیرهای اصلی پژوهش بودند، از تحلیل حذف و در نهایت، 33 خانه که تمامی معیارهای ورود به تحلیل را دارا

تاریخی به کار گرفته شد. به منظور تعیین اوزان مؤلفه‌ها و کاهش ابعاد، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بهره گرفته شد. پیش از استخراج مؤلفه‌ها، کفایت داده‌ها برای اجرای PCA با استفاده از آزمون KMO و آزمون کرویت بارلت بررسی شد. تعداد مؤلفه‌های اصلی بر اساس معیار مقدار ویژه بزرگ‌تر از یک تعیین و بارهای عاملی حاصل از مؤلفه‌های استخراج شده برای تعیین وزن متغیرها مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به وجود بارهای عاملی مثبت و منفی، پیش از ورود متغیرها به شاخص نهایی، جهت اثر آنها بر عملکرد اقلیمی بررسی و متغیرها به گونه‌ای هم‌جهت شدند که مقدار بالاتر هر مؤلفه در شاخص نهایی بیانگر عملکرد اقلیمی مطلوب‌تر باشد. سپس وزن متغیرها بر اساس قدر مطلق بارهای عاملی متناظر تعیین و در ترکیب خطی وزن‌دار شاخص CEP به کار گرفته شد. در نهایت مقادیر نهایی شاخص CEP با میانگین وزنی نرمال‌شده (روش Min-Max) محاسبه شد. برای تحلیل تفاوت آماری میان گروه‌ها، از آزمون ANOVA و آزمون تعقیبی Tukey HSD استفاده شد تا گونه‌های کالبدی از نظر کارایی اقلیمی برای اولویت‌بندی در مداخلات بهسازی و بازآفرینی، به صورت معنادار تفکیک شوند. همچنین به منظور ارزیابی تأثیر متغیرهای کالبدی بر CEP، ابتدا از تحلیل همبستگی پیرسون استفاده شد و سپس یک مدل رگرسیون خطی چندگانه برای تحلیل حساسیت پیشرفته متغیرها نسبت به شاخص CEP اجرا شد. در ادامه، به منظور بررسی اکتشافی اهمیت نسبی متغیرهای کالبدی در ارتباط با شاخص CEP، از مدل Random Forest Regressor استفاده شد. با توجه به محدود بودن حجم نمونه (33 خانه)، این مدل با هدف ارائه یک پیش‌بینی تعمیم‌پذیر به کار نرفته، بلکه برای تحلیل اهمیت نسبی متغیرها و مقایسه سهم عوامل کالبدی در تبیین تغییرات CEP مورد استفاده قرار گرفت. این مدل با استفاده از داده‌های 33 خانه، اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای کالبدی را در ارتباط با تغییرات CEP ارزیابی کرد. خروجی مدل، اهمیت نسبی متغیرهای کالبدی را نشان داد که در میان آن‌ها نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR) و نسبت سطح اشغال بیشترین اهمیت را داشتند. جهت اعتبارسنجی عملکرد شاخص CEP، شبیه‌سازی انرژی برای 6 خانه منتخب با اقلیم واقعی همدان در نرم‌افزار DesignBuilder صورت پذیرفت و

شاخص‌هایی مانند مصرف انرژی سالانه سرمایشی و گرمایشی استخراج شد. همبستگی نتایج شبیه‌سازی با شاخص CEP، همخوانی نسبی شاخص CEP با عملکرد انرژی را نشان داد و پشتوانه‌ای کمی برای به‌کارگیری آن در برنامه‌ریزی محیطی و آمایش خرد بافت تاریخی فراهم ساخت. برای مقایسه مستقیم CEP با عملکرد انرژی، مقادیر مصرف انرژی به مقیاس بدون واحد تبدیل و میزان انطباق آن‌ها با شاخص CEP با استفاده از ضریب همبستگی، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد. با توجه به محدود بودن تعداد نمونه‌های اعتبارسنجی، نتایج این بخش به‌عنوان شواهدی از همخوانی نسبی شاخص CEP با عملکرد انرژی تفسیر شده و تعمیم آن به سایر بافت‌های تاریخی با احتیاط انجام گرفت. در نهایت، با تلفیق گونه‌شناسی کالبدی، تحلیل آماری، روش‌های یادگیری ماشین و شبیه‌سازی عددی، چارچوبی جامع و مبتنی بر شواهد برای تحلیل اقلیم‌پذیری معماری سنتی در اقلیم سرد ارائه شد که می‌تواند در خدمت سیاست‌گذاری بهسازی، بازآفرینی پایدار و مدیریت انرژی در بافت‌های تاریخی قرار گیرد. مراحل انجام پژوهش در جدول دو آمده است.

3- نتایج و بحث

3-1- یافته‌ها

3-1-1- داده‌های کالبدی خانه‌های تاریخی

تحلیل اولیه ویژگی‌های کالبدی 33 خانه تاریخی همدان نشان داد که الگوهای غالب معماری این بناها با راهبردهای سازگار با اقلیم سرد منطقه همخوانی دارند. بررسی جهت‌گیری نشان داد که حدود 61 درصد نمونه‌ها دارای استقرار جنوب شرقی هستند که امکان بهره‌گیری مناسب از تابش زمستانی را فراهم می‌سازد. از نظر سازمان فضایی، فرم‌های درون‌گرا و حیاط‌محور بیشترین فراوانی را داشته‌اند؛ به گونه‌ای که خانه‌های دارای حیاط مرکزی یا نیمه‌محصور، الگوی غالب در نمونه‌های تاریخی محسوب می‌شوند. نتایج تحلیل توده‌گذاری نشان داد که اغلب خانه‌ها در دو یا سه طبقه شکل گرفته‌اند و استفاده از زیرزمین به عنوان یک راهبرد حرارتی بومی در بخش قابل توجهی از نمونه‌ها مشاهده شد.



جدول 2- مراحل اجرای پژوهش و ابزارهای مورد استفاده

Tab. 2- Research implementation stages and tools used

گام	توضیح	نرم افزار / ابزار مورد استفاده
1- انتخاب نمونه‌ها	انتخاب 33 خانه از میان 99 خانه تاریخی همدان و طبقه‌بندی اولیه آن‌ها بر اساس دوره‌های تاریخی (قاجار، قاجار-پهلوی، پهلوی)	Excel + برداشت میدانی + مستندات میراث فرهنگی
2- استخراج شاخص‌های کالبدی	استخراج ویژگی‌های کالبدی شامل: ضخامت دیوار، جرم حرارتی، WWR، سطح اشغال و...	AutoCAD + Excel
3- گونه‌شناسی ترکیب بندی کالبدی	دسته‌بندی خانه‌ها به 8 گونه با استفاده از تحلیل فراوانی و تحلیل خوشه‌ای	SPSS / Excel
4- طراحی شاخص CEP	طراحی شاخص ترکیبی با نرمال‌سازی Min-Max، بررسی کفایت داده‌ها برای PCA با آزمون‌های KMO و Bartlett و تعیین وزن متغیرها بر اساس بارهای عاملی	SPSS + Excel
5- تحلیل آماری (مقایسه گونه‌ها)	تحلیل تفاوت‌های آماری میان گونه‌ها با آزمون ANOVA و Tukey HSD	SPSS
6- شبیه‌سازی انرژی	شبیه‌سازی انرژی برای 6 خانه منتخب در اقلیم همدان و مقایسه CEP با عملکرد انرژی با استفاده از ضریب همبستگی، MAE و RMSE	DesignBuilder
7- تحلیل حساسیت پیشرفته	مدل رگرسیون خطی چندگانه برای تحلیل تأثیر متغیرها بر CEP	SPSS + Excel
8- مدل یادگیری ماشین	اجرای مدل Random Forest Regressor با هدف تحلیل اکتشافی اهمیت نسبی متغیرهای کالبدی در ارتباط با CEP، با توجه به محدودیت حجم نمونه (n=33)	Python (scikit-learn + pandas)

توده‌گذاری متراکم، جداره‌های سنگین و کنترل بازشوها، راهبردی چندلایه برای پاسخ به شرایط اقلیمی ایجاد کرده است. دامنه‌ها و فراوانی‌های اصلی این ویژگی‌ها در جدول سه خلاصه شده است. این متغیرها در مراحل بعدی پژوهش به عنوان ورودی تحلیل گونه‌شناسی و توسعه شاخص CEP مورد استفاده قرار گرفتند.

همچنین، جداره‌های ضخیم، نسبت پایین‌تر بازشو به سطح نما و جرم حرارتی بالا، از ویژگی‌های تکرارشونده در بخش زیادی از خانه‌های تاریخی بود. این ویژگی‌ها با افزایش ظرفیت ذخیره حرارت و کاهش نوسانات دمایی داخلی، نقش مهمی در سازگاری بناها با شرایط سرد اقلیم همدان داشته‌اند. در مجموع، یافته‌های کالبدی نشان می‌دهد که معماری تاریخی همدان از طریق ترکیب همزمان جهت‌گیری مناسب،

جدول 3- خلاصه ویژگی‌های کالبدی و الگوهای غالب خانه‌های تاریخی همدان

Tab. 3- Summary of physical characteristics and dominant patterns of historical houses in Hamadan

شاخص کالبدی	یافته غالب در 33 خانه تاریخی	فراوانی/دامنه غالب	تفسیر اقلیمی
جهت‌گیری	جنوب شرقی	حدود 36%؛ چرخش 9 تا 61 درجه	بهره‌گیری مناسب از تابش زمستانی و کنترل تابش نامطلوب
توده‌گذاری افقی	برون‌گرا و یک‌طرف‌ساخت	36% و 25%	سازمان‌دهی توده و فضای باز در پاسخ به شرایط اقلیمی
حیاط و فضای باز	حیاط‌های 100-300 مترمربع	33%	تعدیل جریان هوا، ایجاد سایه و تنظیم تبادل حرارتی
توده‌گذاری عمودی	دو و سه طبقه، همراه با زیرزمین	54% و 28%	بهره‌گیری از ظرفیت حرارتی خاک و کاهش تبادل مستقیم با محیط
تراکم و نسبت پر به خالی	نسبت 0.5-1	49%	ایجاد تعادل میان فضای باز و بسته و تأثیر بر سایه‌اندازی و ذخیره حرارت
پوسته و جرم حرارتی	دیوارهای ضخیم و جرم حرارتی بالا	دیوار خارجی: 0.9-1 متر؛ سقف: حدود 0.6 متر؛ دیوار حیاط: 0.5-0.7 متر؛	افزایش تأخیر حرارتی و کاهش نوسانات دمایی
بازشوها	WWR پایین و بازشوهای نسبتاً عمودی	WWR حدود 20%-30%؛ نسبت عرض به ارتفاع حدود 0.55-0.5	کنترل تبادل حرارتی، تابش و نورگیری
جرم حرارتی داخلی	نسبت سطح دیوار داخلی به مساحت پلان	حدود 0.2	افزایش ظرفیت ذخیره و آزادسازی تدریجی حرارت

2-3- گونه‌شناسی خانه‌ها با معیار ویژگی‌های ترکیب‌بندی
گونه‌شناسی بر اساس اهداف اقلیمی، ساختار فضایی، و ویژگی‌های کالبدی در سه سطح کلی، میانی و جزئی انجام شد. در این مسیر، خانه‌ها به صورت تطبیقی و با استفاده از جدول فراوانی شاخص‌های ترکیب‌بندی، در گونه‌هایی دسته‌بندی شدند که ویژگی‌های مشترک اقلیمی-فضایی را بروز می‌دادند. معیارهای مورد استفاده برای گونه‌شناسی، مؤلفه‌هایی جدول شماره چهار است. برای ایجاد دسته‌بندی علمی و معتبر، داده‌های به‌دست‌آمده به روش تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی مورد پردازش قرار گرفت. این روش آماری امکان آن را فراهم ساخت که خانه‌ها بر مبنای شباهت‌ها و تفاوت‌های کالبدی-اقلیمی خود در قالب زیرگونه‌هایی قرار گیرند که ویژگی‌های مشترک فضایی و اقلیمی را بروز می‌دادند. بر این اساس، گونه‌هایی استخراج شد که هر یک، الگوی پاسخ خاصی به شرایط اقلیمی ارائه می‌دادند. این رویکرد گونه‌شناسانه، با شناسایی الگوهای بهینه، ابزاری راهبردی برای تصمیم‌سازان حوزه‌ی آمایش محیط فراهم می‌آورد تا بتوانند در فرآیند بازآفرینی پایدار، مداخلات کالبدی را بر مبنای توان اقلیمی هر گونه سازماندهی کنند. نتایج تحلیل‌های گونه‌شناسی نشان داد که خانه‌های تاریخی همدان (در سه گروه تاریخی اصلی؛ قاجار، قاجار-پهلوی، پهلوی) به هشت گونه ترکیب‌بندی (A1, A2, B1, B2, B3, C1, C2, C3) دسته‌بندی می‌شود (جدول شماره پنج). خانه‌های گروه A که اغلب مربوط به دوره قاجارند، با فرم درون‌گرا، حیاط مرکزی، تناسبات پیچیده، و جداره‌های ضخیم شناخته می‌شوند. این خانه‌ها از نظر نظری، بر پایه اصول

معماری اقلیمی سنتی شکل گرفته‌اند. گونه‌های A1 و A2 تفاوت‌هایی در میزان ضخامت جداره‌ها و فرم کلی دارند که ممکن است بر عملکرد حرارتی آن‌ها تأثیرگذار باشد. گروه B که به دوره گذار از قاجار به پهلوی تعلق دارد، با حفظ درون‌گرایی، نشانه‌هایی از تغییرات فضایی نظیر شکل‌گیری بالکن، جابجایی پله‌ها و تغییرات تدریجی در نما را نشان می‌دهند. گونه‌های B1 تا B3 در متغیرهایی مانند ضخامت جداره‌ها، شکل کلی و نسبت سطح بازشو تفاوت دارند. گروه C مربوط به دوره پهلوی است و ویژگی‌هایی چون برون‌گرایی پلان، ساده‌سازی نما، کاهش جداره‌های ضخیم و حضور بالکن در نماهای شهری دارد. ویژگی‌های کالبدی تکرارشونده در گونه‌هایی مانند A1 یا B2 مانند درون‌گرایی، جداره‌های قطور، توده‌گذاری متراکم و نسبت بازشوی متعادل بر اساس ادبیات نظری معماری اقلیمی، می‌تواند نشانگر پتانسیل عملکرد مناسب‌تر در اقلیم سرد و بیشترین هماهنگی با اصول طراحی اقلیمی باشد. در مقابل، زیرگونه‌های C3 و C2 و C1 با کاهش ضخامت جداره‌ها، افزایش بازشوها و مصالح سبک، عملکرد حرارتی ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهند. شناسایی این تفاوت در عملکرد حرارتی میان گونه‌ها، نقطه عطفی برای برنامه‌ریزی محیطی است؛ چرا که مشخص می‌کند کدام یک از گونه‌های بافت تاریخی نیازمند مداخلات تقویتی برای ارتقای پایداری انرژی هستند. با این حال، قضاوت نهایی درباره اقلیم‌پذیری هر گونه، به طراحی شاخص CEP، تحلیل آماری و شبیه‌سازی انرژی در مراحل بعدی وابسته است.

جدول 4- گونه‌بندی معیارها و شاخص‌های تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی خانه‌های تاریخی همدان

Tab. 4- Categorization of criteria and indicators affecting the thermal performance of historical houses in Hamadan

معیار کالبدی	کد گونه‌ها و توضیحات
شکل کلی (SH)	SH1: گوشک؛ SH2: یک‌طرف ساخت؛ SH3: دوطرف ساخت (L شکل)؛ SH4: دوطرف ساخت (موازی)؛ SH5: سه‌طرف ساخت؛ SH6: چهارطرف ساخت
مساحت حیاط (S)	S1: 100-300 مترمربع؛ S2: 300-500 مترمربع؛ S3: 500-700 مترمربع؛ S4: 700-1000 مترمربع؛ S5: بالاتر از 1000 مترمربع
جهت‌گیری (O)	O4: EN؛ O3: WN؛ O2: SW؛ O1: SE
میزان تراکم (D)	D1: 0-0.5؛ D2: 0.5-1؛ D3: 1-1.5؛ D4: 1.5-2؛ D5: بالاتر از 2
توده‌گذاری طبقات (F)	F1: همکف؛ F2: زیرزمین-همکف؛ F3: همکف-اول؛ F4: زیرزمین-همکف-اول؛ F5: همکف-اول-دوم؛ F6: زیرزمین-همکف-اول-دوم
جرم حرارتی (M)	M1: 0.1؛ M2: 0.2؛ M3: 0.3؛ M4: 0.4
ضخامت دیوارهای خارجی پیرامونی (TW)	TW1: 0.6 متر؛ TW2: 0.7 متر؛ TW3: 0.8 متر؛ TW4: 0.9 متر؛ TW5: 1 متر؛ TW6: 1.1 متر



معیار کالبدی	کدگونه‌ها و توضیحات
ضخامت دیوارهای خارجی مجاور حیاط (TY)	0.3 TY1: متر؛ 0.4 TY2: متر؛ 0.5 TY3: متر؛ 0.6 TY4: متر؛ 0.7 TY5: متر؛ 0.8 TY6: متر؛ 0.9 TY7: متر
نسبت سطح باز شو به سطح نما (PO)	PO1: 20-30%؛ PO2: 30-40%؛ PO3: 40-45%؛ PO4: 45-55%
نسبت عرض به ارتفاع باز شو (PH)	PH1: 0.40-0.45؛ PH2: 0.50-0.55؛ PH3: 0.60-0.65؛ PH4: 0.70-0.80؛ PH5: بالاتر از 1

جدول 5- گونه‌بندی خانه‌های تاریخی همدان با شاخص‌های ترکیبی بر اساس خوشه‌ای سلسله‌مراتبی

Tab. 5- Typology of historical houses in Hamadan using composite indicators based on hierarchical clustering

زیر گونه	نمونه‌ها	جهت‌گیری غالب	میانگین ضخامت دیوار (متر)	فرم کلی رایج	جرم حرارتی	نسبت سطح باز شو (WWR)	ویژگی شاخص ترکیب‌بندی غالب
A1	خانه انتظام، شهپازیان، غضنفری	O1	0.7-0.8 (TY2, TW3)	SH3, SH4	M2	PO3-PO4	جهت‌گیری SE با چرخش کم، ضخامت دیوار بالا (TY6)، جرم حرارتی بالا، نسبت باز شوهای عمودی متعادل، فرم فشرده دو طبقه
A2	خانه نراقی، پرسپاوشیان	O1	0.9-1.0 (TW5-6)	SH6	M2	PO1	جهت‌گیری SE، ضخامت بیشتر (TY7)، جرم حرارتی متعادل، باز شوها نسبتاً باریک، توده‌گذاری سه طبقه با تراکم بالا
B1	نایینی، صمدیان، شهید مدنی، مصمص	O1-O2	0.8-0.9 (TW3, TY4)	SH3-SH4	M2	PO2-PO4	ضخامت متوسط، جرم حرارتی متوسط، ترکیب توده‌گذاری دوطبقه یا سه‌طبقه، باز شوهای عمودی باریک، فرم مستطیل کشیده یا ترکیبی
B2	شریفی، ابراهیم شرفی، پوستی‌زاده، عراقچی، احمدی، تاج‌خشیان، خلیانی، سیفی، فیضی	O1	0.6-0.7 (TW2-TW3)	SH1-SH4	M2	PO2	جهت‌گیری SE با تکرار زیاد، ضخامت متوسط، باز شوهای عمودی میانه، شکل SH2 تا SH5، ترکیب پلان فشرده دو جبهه یا سه‌جبهه
B3	ضرابی، سماوات، بیژن	O1	0.5-0.6 (TW2)	SH1-SH2	M3	PO4	پراکندگی در ویژگی‌ها، اما اشتراک در باز شوهای محدود، ضخامت دیوار متوسط، فرم سه‌طبقه، باز شوهای افقی یا با تناسب متفاوت
C1	باغ نظری، عبادی، مازوچی، دکتر شیر، آموزش و پرورش، باغ آمریکایی‌ها	O2-O3	0.9 (TW6)	SH1	M2-M3	PO2	فرم حجیم‌تر، جهت‌گیری متنوع‌تر، ضخامت دیوار بالا (TW5) یا (TW6)، کاهش نسبت باز شو به نما، جرم حرارتی متنوع، ساخت در قطعه‌های بزرگ یا باز
C2	صابریون، صارم‌اصلاتی، چیت‌ساز	O1-O2	0.9-1.0 (TY7, TW6)	SH1	M2	PO1	باز شوهای کوچک‌تر، شکل‌های منسجم‌تر، ضخامت سقف بیشتر، فرم نسبتاً فشرده، استفاده بهینه از زیرزمین و سیزان
C3	باغ اعتمادیه، قراگزلو، باغ جنت	O4	0.5-0.6 (TW1-TW2)	SH1-SH4	M1-M2	PO1-PO2	فرم گسترده باغ‌مانند، پایین‌ترین جرم حرارتی (MI)، ضخامت بالا، توده‌گذاری همکف، باز شوهای بسیار محدود و نماهای کم‌تحرک

3-2- تحلیل آماری یافته‌ها

3-2-1- تحلیل شاخص‌های کالبدی گونه‌های ترکیب‌بندی

با توجه به نمودار جعبه‌ای شکل دو، جهت بررسی تفاوت آماری میان گونه‌های تاریخی ساختمان‌ها بر اساس شاخص‌های کالبدی و هندسی، از تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA)

استفاده شد. این تحلیل با هدف شناسایی الگوهای متغیر کالبدی در بستر زمان و ارزیابی اثرات آن‌ها بر پایداری محیطی بافت انجام و به دلیل نابرابری تعداد نمونه‌ها و احتمال عدم تجانس واریانس‌ها، در ادامه از آزمون تعقیبی توکی استفاده

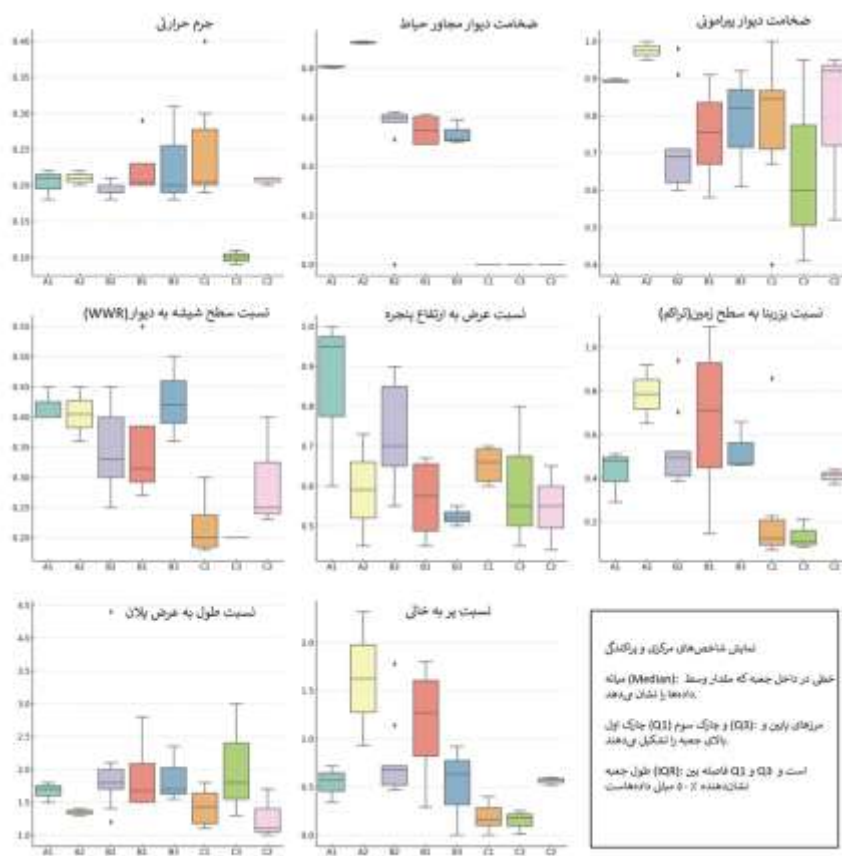
شد. نتایج نشان داد که برای چندین شاخص، تفاوت معنادار آماری بین برخی از گونه‌های تاریخی وجود دارد، به طور خاص:

- ضخامت دیوار مجاور حیاط: تفاوت معناداری بین گونه‌های قاجار (A1) و قاجار-پهلوی (B1/B2/B3)، مشاهده شد ($p < 0.05$) این یافته حاکی از کاهش معنادار ضخامت دیوار در دوره قاجار-پهلوی نسبت به دوره قاجار است، که می‌تواند ناشی از تغییر مصالح و فناوری ساخت باشد.
- نسبت سطح شیشه به سطح دیوار؛ (WWR) تفاوت معناداری بین برخی از زیرگونه‌های قاجار با گونه پهلوی به ویژه C1 و C3 وجود داشت. ($p < 0.05$) این افزایش سهم شفافیت در بناهای پهلوی بیانگر افزایش وابستگی به نور طبیعی و تغییر در الگوهای بازسوهاست.
- سطح اشغال به زمین: تفاوت معناداری میان گونه‌های قاجار-پهلوی و پهلوی وجود داشت (مثلاً بین B1 و C1، B1 و C3)، که بیانگر تمایل به اشغال بیشتر سطح زمین در دوره پهلوی است، همسو با تحول در کاربری و نحوه

سازمان‌دهی فضایی.

- جرم حرارتی نیز در چند مورد، تفاوت‌های آماری معناداری با پشتیبانی آزمون توکی بین گونه‌های خاصی از پهلوی و قاجار-پهلوی نشان دادند. در مقایسه گونه قاجار (A2) و پهلوی (C1)، جرم حرارتی به طور معناداری کاهش یافته است، که احتمالاً به دلیل کاهش ضخامت دیوارهای داخلی و خارجی و فرم‌های فضایی بازتر در دوره مدرن‌تر پهلوی است.

در مقابل، برای برخی شاخص‌ها از جمله؛ نسبت عرض به ارتفاع پنجره، نسبت کل زیربنا به زمین و بخشی از مقایسه‌های درونی زیرگونه‌ها (مثلاً A1 با A2 یا B2 با B3)، تفاوت آماری معناداری مشاهده نشد. ($p > 0.05$) عدم تفاوت معنادار در این شاخص‌ها نشان‌دهنده وجود مؤلفه‌های کالبدی پایدار در سازماندهی محیطی همدان است که علیرغم تغییرات تاریخی، به‌عنوان اصول ثابت سازگاری با اقلیم سرد حفظ شده‌اند.



شکل 2- نمودار جعبه‌ای مشخصات کالبدی گونه‌های مختلف ترکیب بندی

Fig. 2- Box plots of physical characteristics across different spatial configuration typologies



معیار کمی واحد تلفیق شده و مقایسه پذیری بین نمونه‌ها فراهم شود. شاخص CEP مبتنی بر ترکیب پنج مؤلفه کالبدی کلیدی است که در این پژوهش به عنوان عناصر راهبردی سازماندهی محیطی شناخته می‌شوند. به منظور بررسی کفایت داده‌ها و تعیین مبنای آماری وزن دهی مؤلفه‌های شاخص CEP، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی پنج متغیر شامل نسبت سطح شیشه به سطح دیوار (WWR)، نسبت پر به خالی، جرم حرارتی ساختمان، ضخامت دیوار خارجی و جهت استقرار انجام شد. نتایج آزمون کفایت نمونه‌گیری نشان داد؛ مقدار KMO برابر با 0.502 است که بیانگر کفایت مرزی داده‌ها برای اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی است. همچنین، آزمون کرویت بارلت معنادار بود ($\chi^2=31.112$ ، $p=0.001$ ، $df=10$) که وجود همبستگی معنادار میان متغیرهای مورد بررسی و امکان استفاده از PCA را تأیید می‌کند. بر اساس معیار مقدار ویژه بزرگ‌تر از 1، دو مؤلفه اصلی استخراج شد که به ترتیب؛ 40.776 و 22.082 درصد از واریانس کل را تبیین کردند؛ به طوری که مجموع واریانس تبیین شده برابر با 62.857 درصد بود. نتایج بارهای عاملی این مؤلفه‌ها مبنای تعیین اهمیت نسبی متغیرهای کالبدی در ساخت شاخص CEP قرار گرفت. در نتیجه، شاخص ترکیبی اقلیمی هر خانه به صورت ترکیب خطی وزن دار این پنج متغیر استاندارد شده محاسبه شد؛ روشی که هم مبتنی بر داده و هم سازگار با مبانی نظری معماری اقلیمی ایران است. در نهایت هر یک از مؤلفه‌های فوق با روش نرمال سازی (Min-Max) به مقادیر بدون بُعد در بازه 0 تا 1 تبدیل شدند، سپس شاخص نهایی به صورت میانگین وزنی از این مقادیر نرمال شده تعریف گردید. تفسیر سطوح این شاخص در راستای مدیریت بهسازی بافت در جدول شماره شش ارائه شده است.

$$Xi = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad \text{معادله (1)}$$

که در آن؛

Xi برابر است با نرمال شده شاخص مدنظر (X)

X برابر است با مقدار شاخص

$X_{\min}$ برابر است با کمترین مقدار آن شاخص در بین کل نمونه‌ها

$X_{\max}$ برابر است با بیشترین مقدار آن شاخص در بین کل نمونه‌ها

$$CEPi = \frac{\sum_{j=1}^n (W_j \times X_{ij})}{\sum_{j=1}^n W_j} \quad \text{معادله (2)}$$

که در آن؛

$CEPi$ - شاخص اقلیم پذیری برای خانه i

W_j - وزن شاخص j استخراج شده از بار عاملی تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

X_{ij} - مقدار نرمال شده شاخص کالبدی j برای خانه i بر اساس روش (Min-Max)

n - تعداد شاخص کالبدی در مدل

$\sum X$ - تعداد جمع وزن مقادیر هر شاخص در کل نمونه‌ها

2-2-3- شاخص اقلیم‌پذیری (Climate Efficiency Performance)

در راستای هدف این پژوهش مبنی بر گونه‌شناسی اقلیمی خانه‌های تاریخی همدان با رویکرد ترکیب بندی کالبدی با تأکید بر عملکرد اقلیمی، شاخصی ترکیبی به نام شاخص اقلیم‌پذیری (CEP) طراحی و محاسبه شد. CEP یک شاخص ترکیبی است که با استفاده از معیارهای کالبدی و معماری مؤثر بر رفتار حرارتی بنا (بدون نیاز به شبیه سازی انرژی) طراحی می‌شود. این شاخص عملکرد اقلیمی نهفته در ساختار بنا را در قالب یک نمره کمی خلاصه می‌کند و امکان تحلیل مقایسه‌ای و رتبه بندی گونه‌های معماری را برای برنامه ریزان حوزه آمایش فراهم می‌آورد تا بتوانند در مقیاس خرد شهری، اولویت‌های بهسازی و مدیریت انرژی را شناسایی کنند. شاخص از ترکیب مقادیر نرمال شده شاخص‌های کالبدی (معادله یک) و اوزان آن‌ها حاصل می‌شود. این شاخص با تکیه بر رویکردهای ترکیبی وزنی توسعه یافته است که در آن، متغیرهای مختلف عملکردی از طریق میانگین گیری وزنی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. ساختار کلی این شاخص از روش‌های ترکیب خطی وزنی (weighted linear combination) پیروی می‌کند؛ روشی که پیش تر نیز در طراحی شاخص‌های پایداری انرژی در طول چرخه عمر ساختمان‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Triana et al., 2021; Zavadskas & Turskis, 2010)، با این تفاوت که وزن شاخص‌ها بر مبنای بار عاملی مؤلفه‌های اصلی (PCA) تعیین شده است. استفاده از میانگین وزنی شاخص‌ها پس از نرمال سازی داده‌ها، با حذف اثر مقیاس و تأکید بر شاخص‌های مؤثرتر، باعث افزایش روایی (Validity) و پایایی (Reliability) مدل در تحلیل‌های آمایش محور می‌شود (Jolliffe & Cadima, 2016). همچنین، این نوع مدل سازی در فرایندهای ارزیابی عملکرد، به ویژه در تدوین شاخص‌های مرکب اقلیمی و زیست محیطی نیز کاربرد گسترده‌ای دارد، به طوری که ساختارهای ارزیابی متعددی بر اساس فرمول‌های میانگین گیری وزنی توسعه یافته‌اند (Becker et al., 2017).

در این شاخص مقادیر نرمال شده (X_{ij}) بیانگر وضعیت نسبی هر خانه در شاخص مورد نظر بوده و اوزان (W_j) با بهره گیری از نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تعیین گردیدند. در نهایت، CEP از تقسیم مجموع حاصل ضرب مقادیر نرمال شده در وزن هر شاخص، بر مجموع کل اوزان محاسبه شد (معادله دو). این رویکرد باعث می‌شود تمام شاخص‌ها در قالب یک

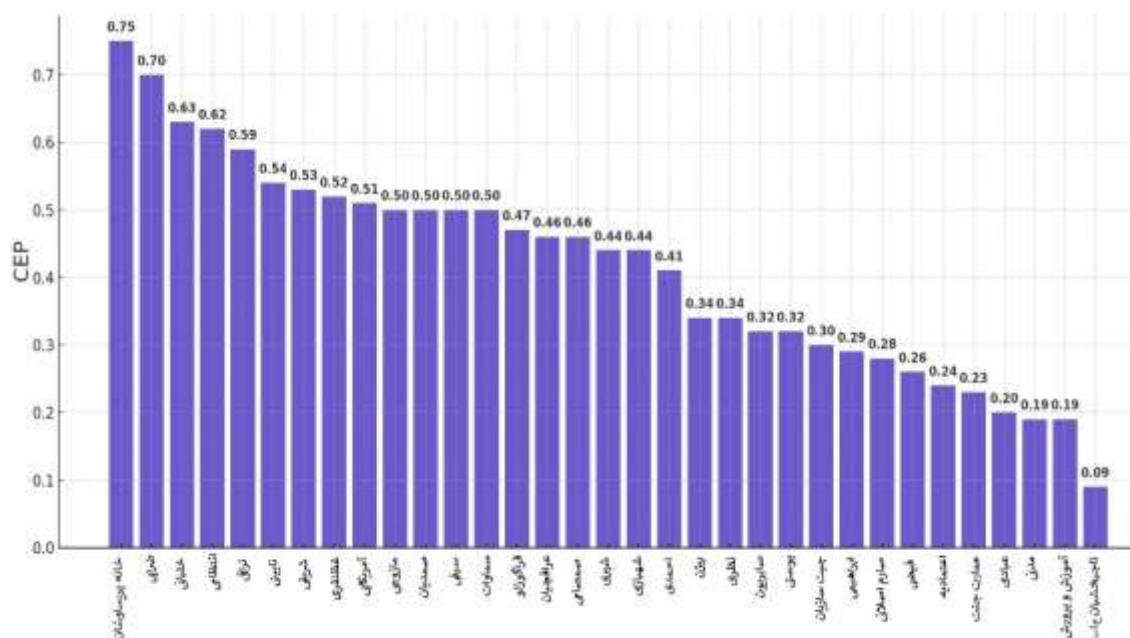
جدول 6- تفسیر شاخص CEP

Tab. 6- Interpretation of the Climatic-Energy Performance (CEP) index

مقدار CEP	عملکرد اقلیمی	پیشنهاد
$0.756 \leq CEP < 1.00$	بسیار مناسب	الگوی قابل اقتباس برای طراحی اقلیمی
$0.5 \leq CEP < 0.75$	نسبتاً مناسب	قابل بهینه‌سازی
$0.25 \leq CEP < 0.50$	ضعیف	نیازمند اصلاح ساختاری
$0.00 < CEP < 0.25$	بسیار ضعیف	بازطراحی یا استفاده غیر استاندارد

انحراف معیار حدودی آن 0.14 برآورد می‌شود که نشان‌دهنده پراکندگی متوسط در داده‌هاست. حدود 30% از خانه‌ها دارای مقدار CEP بالاتر از 0.5 (عملکرد اقلیمی بسیار مناسب) هستند که می‌توان آن‌ها را به‌عنوان الگوهای مرجع در سازماندهی محیطی پایدار تلقی کرد. در مقابل، نزدیک به نیمی از خانه‌ها دارای مقادیری پایین‌تر از میانگین هستند که حاکی از طراحی کالبدی ضعیف و نسبتاً ضعیف از منظر انطباق با اقلیم است. توزیع مقادیر به‌صورتی که از بیشتر به کمتر مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد؛ تعداد محدودی از خانه‌ها دارای عملکرد اقلیمی بسیار بالا بوده و عمده نمونه‌ها در بازه‌های متوسط یا ضعیف قرار دارند. این تحلیل کمی، زیرساخت لازم را برای «آمایش خردبافت تاریخی» فراهم می‌آورد؛ به‌طوری‌که می‌توان بر اساس این داده‌ها، نقشه اولویت‌بندی مداخلات بهسازی، بازآفرینی محیطی و مدیریت منابع انرژی را در سطح بلوک‌های شهری تدوین کرد. این یافته‌ها به برنامه‌ریزان اجازه می‌دهد تا با شناسایی نقاط حساس (دارای CEP پایین)، راهبردهای ارتقای کیفیت زیست‌محیطی را به‌صورت هدفمند پیاده‌سازی کنند.

نمودار ستونی در شکل سه، مقادیر شاخص اقلیم‌پذیری (CEP) را برای 33 خانه تاریخی همدان به‌صورت جداگانه نمایش می‌دهد و بیانگر پراکندگی قابل توجه عملکرد حرارتی در میان نمونه‌هاست. تحلیل آماری داده‌ها نشان می‌دهد که مقدار CEP در این مجموعه از حداقل 0.09 (خانه تاج‌بخشان) تا حداکثر 0.75 (خانه پرسیاوشان) متغیر است این دامنه وسیع (0.6) نشان‌دهنده ناهمگونی در سازماندهی کالبدی-اقلیمی بافت و لزوم اتخاذ سیاست‌های بهسازی تفکیک‌شده است. میانگین کلی شاخص برای کل خانه‌ها برابر با 0.41 و



شکل 3- نمودار ستونی شاخص CEP برای 33 خانه تاریخی

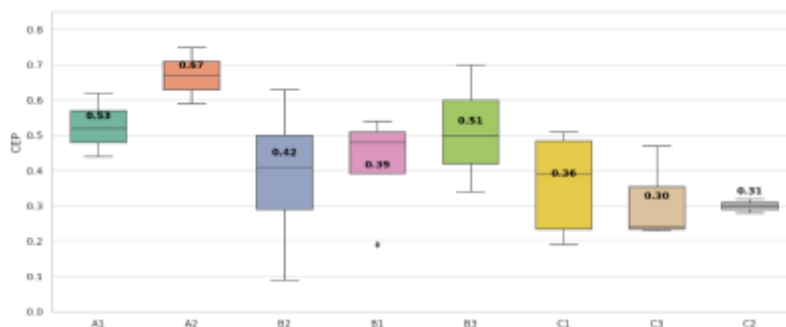
Fig. 3- Bar chart of the CEP index values for 33 historical houses



گذار قاجار - پهلوی و طراحی‌های متفاوت است، با میانگین 0.42 و انحراف معیار 0.14 عملکردی متوسط دارد، اما آزمون‌های آماری نشان داد که تفاوت میان آن و گروه‌های برتر مانند A2 از نظر آماری معنادار است ($p < 0.05$). این مسأله نشان می‌دهد که وجود پراکندگی در کیفیت کالبدی، موجب کاهش میانگین عملکرد اقلیمی این گروه شده است. نمودار جعبه‌ای CEP تأیید می‌کند در حالی که جعبه گروه A2 کوچک و فشرده است (پراکندگی پایین)، جعبه گروه‌های C1، C3 و B2 بزرگ‌تر و حاوی نقاط پرت متعدد است. برتری معنادار خانه‌های سنتی A2 را می‌توان در ویژگی‌های کالبدی بارز آن‌ها جست‌وجو کرد؛ میانگین ضخامت دیوارهای مجاور حیاط در این گروه بیش از 0.8 متر، WWR حدود 0.35 و جرم حرارتی بالا، همگی در راستای کاهش اتلاف حرارت، تهویه طبیعی کنترل‌شده و نورگیری مؤثر عمل کرده‌اند. در نقطه مقابل، عملکرد ضعیف C3 به علت کاهش محسوس ضخامت دیوارها به کمتر از 0.45 متر، استفاده از مصالح سبک، نسبت شیشه به دیوار بالا و جهت‌گیری نامناسب اقلیمی است؛ عواملی که موجب افزایش اتلاف حرارت و کاهش پایداری حرارتی شده‌اند. این تحلیل آماری دقیق، تأکیدی روشن بر نقش تعیین‌کننده ویژگی‌های فیزیکی و طراحی معماری در تعیین کیفیت اقلیمی خانه‌های تاریخی است. این تحلیل آماری، تأکیدی روشن بر نقش کلیدی متغیرهای کالبدی در ارتقای کیفیت محیط زندگی است. یافته‌ها نشان می‌دهد که ساختارهای سنتی، الگویی کارآمد برای سازماندهی پایدار فضا محسوب می‌شوند. بر همین اساس، بهره‌گیری از این تجارب زیست‌محیطی در فرآیندهای بازآفرینی و توسعه‌های نوین، ضرورتی انکارناپذیر برای دستیابی به سکونتگاه‌های پایدار و اقلیم‌پاسخ تلقی می‌شود.

3-2-3- بررسی آماری شاخص CEP در گونه‌های مختلف ترکیب‌بندی

در تحلیل آماری پیش‌رو، شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (CEP) به عنوان معیاری کمی، برای برای سنجش پایداری محیط‌محو (ارزیابی عملکرد حرارتی) 33 خانه تاریخی همدان مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص که از ترکیب مؤلفه‌های کالبدی نظیر؛ جرم حرارتی، ضخامت دیوار (WWR)، جهت، نسبت سطح اشغال بنا (نسبت پر به خالی) حاصل شده است، تصویری دقیق از میزان انطباق هر خانه با اقلیم سرد همدان (از کیفیت تعامل بنا با بستر اقلیمی) ارائه می‌دهد. با بدست آوردن نمودار جعبه‌ای برای گونه‌های مختلف ترکیب‌بندی خانه‌های تاریخی (شکل چهار) نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) نشان داد که تفاوت معناداری بین گروه‌های مختلف معماری از نظر مقدار شاخص CEP وجود دارد ($p < 0.001$, $F = 5.87$) و بنابراین فرض برابری میانگین‌ها رد می‌شود. آزمون تعقیبی Tukey HSD برای بررسی دقیق‌تر جفت مقایسه‌ها نشان داد که؛ اختلاف میانگین CEP میان خانه‌های قاجار زیرگروه A1 خانه‌های پهلوی (C3) برابر با 0.23 واحد ($p < 0.05$)، و بین A2 و C3 برابر با 0.37 واحد ($p < 0.01$) است. این اختلاف‌های معنادار ثابت می‌کند که الگوی کالبدی قاجار، به مراتب انطباق‌پذیری بالاتری با زیست‌بوم سرد همدان دارد. به‌طور خاص، گروه A2 با میانگین 0.67 و انحراف معیار تنها 0.06، از کمترین پراکندگی نیز برخوردار است. این همگنی عملکرد نشان می‌دهد که خانه‌های این گروه، به‌طور ساختاری در پاسخ به نیازهای اقلیمی طراحی شده‌اند. در مقابل، گروه C3 با میانگین 0.3 و دامنه تغییرات بیشتر، ضعیف‌ترین عملکرد اقلیمی را در میان تمام زیرگونه‌ها از خود نشان می‌دهد. گروه B2 که ترکیبی از خانه‌های دوره



شکل 4- نمودار جعبه‌ای CEP گونه‌های مختلف ترکیب‌بندی اقلیم

Fig. 4- Box plot of the CEP index across different climate-responsive spatial configuration typologies

4-2-3- اعتبارسنجی شاخص CEP با استفاده از شبیه‌سازی انرژی

در راستای ارزیابی صحت و دقت شاخص اقلیم‌پذیری (CEP) به‌عنوان معیار ترکیبی طراحی محیطی اقلیمی در خانه‌های تاریخی همدان، از شبیه‌سازی انرژی ساختمان‌ها با نرم‌افزار DesignBuilder با تنظیمات مشخص و یکسان استفاده شد (جدول شماره هفت، هشت و نه). دیزاین‌بیلدر، از نرم‌افزارهای معتبر، در مدل‌سازی انرژی و از جهت ارزیابی عملکرد حرارتی، بسیار قوی است (Asfour and Alshawaf 2015). بعد از شبیه‌سازی انرژی الگوها، نتایج داده‌های عددی از طریق روشهای آماری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. هدف از این مرحله، اعتبارسنجی تجربی شاخص CEP از طریق تطابق آن با عملکرد واقعی حرارتی ساختمان‌ها در شرایط اقلیمی همدان است. معیار انتخاب نمونه‌ها برای شبیه‌سازی، تنها خانه‌هایی بود که الف) دارای ارزش معماری ثبت‌شده در میراث فرهنگی بوده‌اند. ب) نقشه‌ها و مستندات دقیق از آن‌ها در دسترس است. ج) امکان مدلسازی کامل فضاها با جزئیات کالبدی و مصالح موجود است. د) اطلاعات مربوط به موقعیت، جهت‌گیری، و عکس‌های وضع موجود نیز فراهم است. با توجه به هدف این مرحله که اعتبارسنجی عملکرد شاخص CEP و نه شبیه‌سازی کل جامعه آماری بود، نمونه‌ها به صورت هدفمند از میان گونه‌های استخراج شده انتخاب شد. از آنجا که هر یک

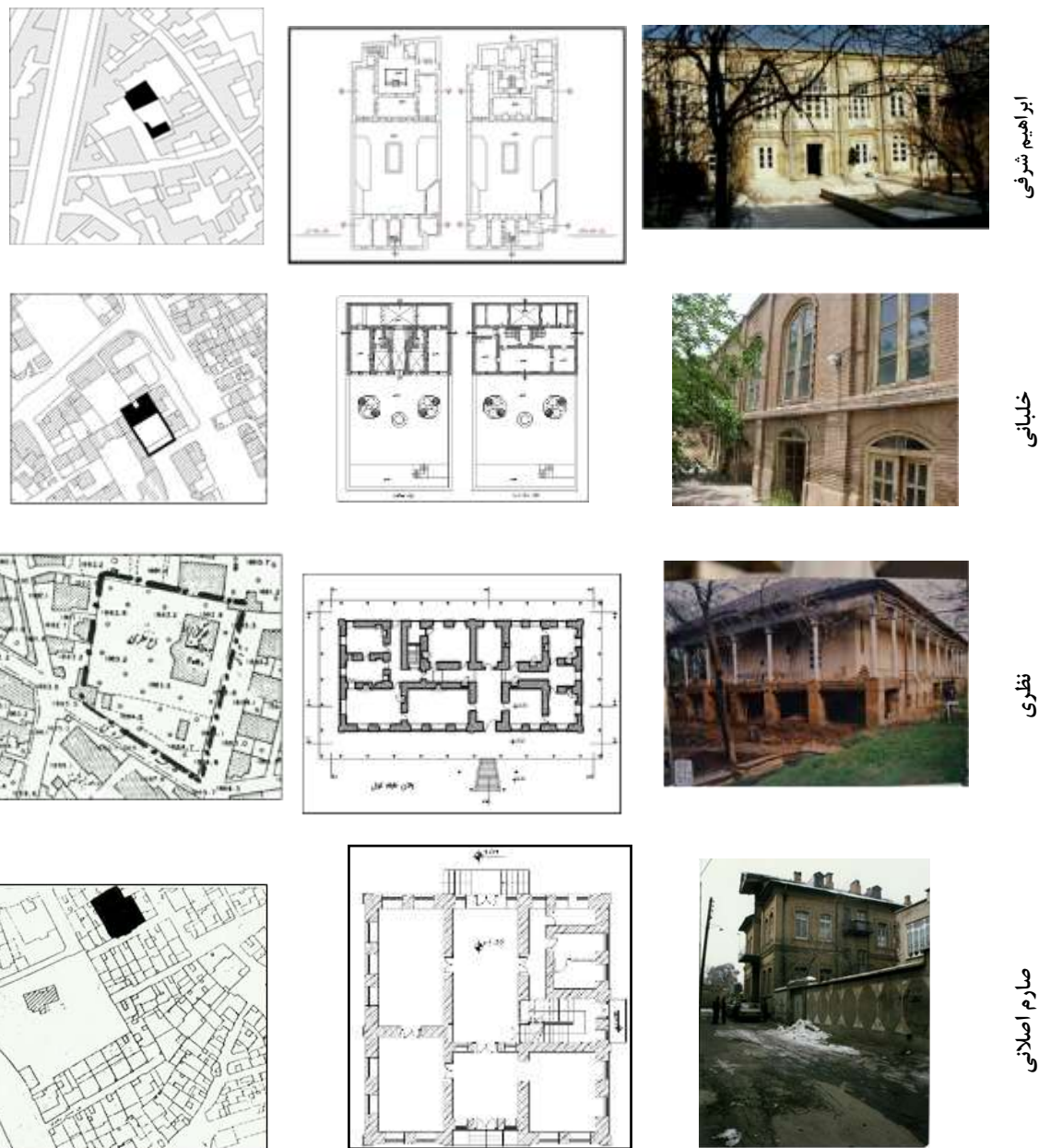
از هشت زیرگونه حاصل از تحلیل خوشه‌ای نماینده یک الگوی کالبدی مشابهند، انتخاب نمونه‌هایی از گونه‌های شاخص با بیشترین تفاوت کالبدی، امکان ارزیابی دامنه تغییرات عملکردی شاخص را فراهم می‌کند. بنابراین، شش نمونه منتخب شامل گونه‌هایی با عملکرد بالا، متوسط و ضعیف بوده و به عنوان نمونه‌های نماینده برای بررسی رابطه CEP و عملکرد انرژی استفاده شدند بر اساس این معیارها، 6 خانه به‌عنوان نماینده از گونه‌های ترکیب‌بندی مختلف (شکل پنج) برگزیده شد: خانه نراقی (A2)، خانه ضرابی (B3)، خانه ابراهیم شرفی (B2)، خانه خلبانی (B2)، خانه صارم‌اصلانی (C2)، باغ نظری (C1). برای هر یک از نمونه‌ها، شاخص‌های عملکرد حرارتی شامل؛ مصرف انرژی سرمایشی، گرمایشی و نهایی سالانه در طول سال استخراج شد (شکل شش). این نتایج سپس با مقادیر شاخص CEP برای همان خانه‌ها مقایسه شد تا: 1- میزان همبستگی میان شاخص CEP و عملکرد واقعی حرارتی سنجیده شود. 2- تحلیل تجربی از دقت دسته‌بندی گونه‌ها از نظر اقلیم‌پذیری انجام شود. 3- به‌صورت نمونه‌ای، اعتبار سنجی تجربی روش گونه‌شناسی اقلیمی تقویت شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که؛ خانه‌هایی با CEP بالاتر، عملکرد حرارتی مطلوب‌تری از نظر تعادل دمایی داخلی، کاهش ساعات نیاز به گرمایش یا سرمایش و تطابق بهتر با شرایط اقلیمی همدان (تعامل بهینه‌تر انسان و محیط) داشتند.



خانه نراقی



خانه ضرابی



شکل ۵- نقشه و تصاویر خانه های منتخب برای شبیه سازی انرژی
Fig. 5- Floor plans and photographs of selected houses for energy simulation

جدول ۷ - تنظیمات مربوط به فعالیت و بارهای حرارتی داخلی
Tab. 7. Settings for internal occupancy, activity schedules, and internal thermal loads

activity		
Activity equivalent occupancy	Sleeping(0-8)	72(w/person)
	Cooking-light manual work (8-16)	180(w/person)
	Seated quiet (16-24)	108(w/person)
	Standing relaxed	120(w/person)
		0.3(people/m2)
metabolic	Winter clothing (clo)	1
	summer clothing (clo)	0.5

activity		
Environmental control	Heating set point temperature	20
	Heating set back	12
	Cooling set point temperature	26
	Cooling set back	12
Minimum fresh air	Fresh air(l/s-person)	7
lighting	Target Illuminance (lux)	200
Other gains	Equipment	5 w/m ²

جدول 8- ویژگی حرارتی مربوط به مصالح انتخابی

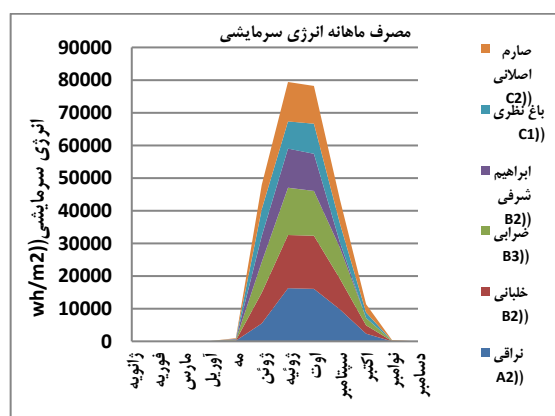
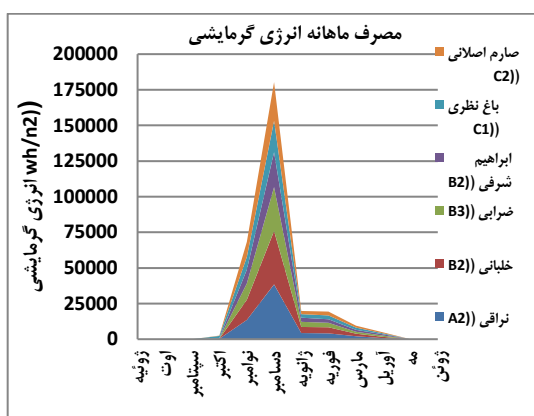
Tab. 8- Thermal properties of selected building materials

material	Conductivity (w/m.k)	Specific heat (j/kg.k)	Density (Kg/m ³)
Clay straw (کاهگل)	0.47	1008	1200
Brick mud (خشت)	0.75	880	1730
Gypsum plastering (گچ)	0.4	1000	1000
Cement plaster mortar (ملات ماسه سیمان)	0.72	840	1860
Brick (آجر)	0.8	880	1890
Loose fill/powder gravel (شفته آهک)	0.36	840	1840
Loose fill/powder-roof gravel (خاک رس شیب بندی)	1.44	1680	880
Miscellaneous materials- aggregate undried (مصالح متفرقه)	1.8	840	2240

جدول 9- مشخصات بازشوها

Tab. 9- Specifications of fenestration and openings

External windows	External glazing(single)
Frame and divider	Wooden window frame (ضخامت فریم دور 6 سانتیمتر)
Shading (پرده)	inside
Free aperture (میزان ورود هوا از بازشوها)	Glazing area opens=5%
External door	Wooden door frame



شکل 6- نمودار خطی انرژی مصرفی گرمایشی و سرمایشی

Fig. 6- Line graph of heating and cooling energy consumption

و سرمایشی $E(\text{Cooling}) = 10.85$ است، که نشان دهنده عملکرد اقلیمی بسیار مناسب و انطباق خوب طراحی کالبدی با شرایط اقلیمی است. خانه صارم اصلانی (C3) نیز با CEP پایین $(CEP = 0.28)$ مصرف انرژی کل سالانه kWh/m^2

مقایسه بین نتایج شبیه سازی انرژی و شاخص CEP نشان داد (جدول نه)؛ خانه خلبانی (B2) با مقدار شاخص بالا $(CEP=0.63)$ دارای کمترین مصرف انرژی کل سالانه $E(\text{heating})=46.45$ انرژی گرمایشی $E(\text{total})=65.61 kWh/m^2$



بیانگر نقش تعدیلگر دمایی جرم مصالح در عملکرد اقلیمی است. در سوی دیگر (جدول یازده)، تحلیل‌ها نشان داد که قوی‌ترین همبستگی منفی بین شاخص CEP و میزان مصرف سرمایشی ساختمان است ($r=-0.69$) این مقدار حاکی از آن است که خانه‌هایی با طراحی اقلیم‌پذیرتر CEP بالاتر، به‌طور محسوسی بار سرمایشی کمتری دارند؛ یعنی کمتر نیازمند سیستم‌های مکانیکی برای حفظ آسایش حرارتی در فصل گرم هستند. همبستگی منفی میان CEP و مصرف انرژی کل سالانه و انرژی گرمایشی ثبت شد ($r=-0.57$)، ($r=-0.49$) که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بهینه‌سازی کالبدی با کاهش بار گرمایشی و نهایی سالانه است. همچنین، ضخامت دیوار خارجی نیز همبستگی منفی با CEP نشان داد ($r=-0.53$)، که برخلاف انتظار اولیه، ممکن است به دلیل جنس مصالح و کیفیت اجرای این دیوارها در برخی نمونه‌ها باشد، نه صرفاً ضخامت آن. بر اساس تحلیل رگرسیون خطی ساده، قوی‌ترین مدل تک‌متغیره میان CEP و بار سرمایشی حاصل شد که ضریب تعیین ($R^2=0.47$) و ضریب منفی $\beta=-0.012$ به‌همراه $p=0.15$ را نشان داد. این مدل بیان می‌کند که با هر یک واحد افزایش بار سرمایشی، مقدار شاخص CEP به‌طور میانگین 0.012 واحد کاهش می‌یابد. مدل‌های دیگر نیز روند مشابهی داشتند؛ به ویژه مدل‌های بین CEP و ضخامت دیوار مجاور حیاط ($R^2=0.27$, $p=0.22$) و بین CEP و WWR ($R^2=0.19$, $p=0.30$) نیز اگرچه معناداری آماری نداشتند، اما جهت و قدرت نسبی تأثیرگذاری را به‌خوبی نشان می‌دادند.

$E_{(total)}=182.39$ انرژی گرمایشی $E_{(heating)}=120.64$ دارای عملکرد حرارتی ضعیفی است. به‌طور کلی در شکل هفت نقشه همبستگی بین متغیرهای کالبدی، انرژی و شاخص CEP نمایان شده است.

در این پژوهش، شاخص «اقلیم‌پذیری کالبدی (CEP)» به‌عنوان یک سنجش ترکیبی و بی‌نیاز از تحلیل‌های مستقیم انرژی، برای ارزیابی کیفیت حرارتی و انطباق معماری خانه‌های تاریخی همدان با اقلیم سرد منطقه تعریف شد. در گام دوم، به‌منظور اعتبارسنجی و بررسی قابلیت تبیین این شاخص، میزان همبستگی آن با متغیرهای کالبدی و انرژی (بر پایه نتایج شبیه‌سازی دینامیکی حرارتی) از طریق ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد. نقشه همبستگی ارائه‌شده در شکل هفت، روابط میان شاخص ترکیبی عملکرد اقلیمی (CEP) و متغیرهای کالبدی منتخب خانه‌های تاریخی همدان را بر اساس ضریب همبستگی پیرسون بیان می‌کند. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که؛ بالاترین همبستگی مثبت بین CEP و ضخامت دیوار مجاور حیاط با ضریب ($r=+0.52$) به دست آمد. این رابطه تأکیدی بر اهمیت این مؤلفه سنتی در ایجاد ظرفیت حرارتی ذخیره‌ای و کاهش نوسانات دمایی درون بناست. همچنین، بین CEP و نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR) نیز همبستگی مثبت متوسطی به میزان ($r=+0.44$) مشاهده شد که این ارتباط می‌تواند ناشی از بهره‌گیری مناسب از نور طبیعی و بهینه‌سازی تابش در طراحی سنتی باشد. همبستگی مثبت خفیفی نیز میان جرم حرارتی و CEP ثبت شد ($r=+0.26$) که

جدول 10- مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی انرژی و شاخص CEP و مشخصات کالبدی نمونه‌های منتخب شبیه‌سازی شده

Tab. 10- Comparison between energy simulation results, CEP index, and physical characteristics of selected simulated cases

نام خانه	جرم حرارتی	ضخامت دیوار مجاور حیاط	ضخامت دیوار مجاور خارجی	نسبت سطح شیشه به سطح دیوار	نسبت عرض به ارتفاع پنجره	CEP	گرمایشی	سرمایشی	نهایی سالانه
خانه نراقی	0.22	0.9	1	0.45	0.73	0.59	128.07	30.45	171.38
خانه خلیبانی	0.18	0.58	0.69	0.25	0.7	0.63	46.54	10.85	61.65
خانه ضرابی	0.31	0.51	0.61	0.36	0.55	0.7	103.89	27.77	150.96
خانه ابراهیمی	0.18	0.61	0.71	0.3	0.7	0.29	114.44	34.73	168.47
باغ نظری	0.30	0	1	0.18	0.7	0.34	103.89	27.77	150.96
خانه صارم اصلی	0.21	0	0.92	0.25	0.65	0.28	120.84	42.45	182.39

همچنین، جهت ضرایب مدل‌ها قابل تأمل است؛ به‌نحوی که برای متغیرهایی همچون بار سرمایشی، بار گرمایشی و بار نهایی سالانه، ضرایب همگی منفی بودند که بر کاهش عملکرد اقلیمی در صورت افزایش مصرف انرژی دلالت دارد. این روند در راستای تئوری طراحی اقلیمی سنتی نیز قرار دارد که کاهش مصرف انرژی از طریق پاسخ هوشمندانه‌ی کالبد به اقلیم محلی حاصل می‌شود. در مجموع، تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون نشان می‌دهند که شاخص CEP ارتباط قابل توجهی با کاهش بارهای انرژی، به‌ویژه سرمایشی و انرژی کل سالانه دارد. بنابراین، این شاخص می‌تواند به‌عنوان ابزاری معتبر و سریع برای سنجش عملکرد اقلیمی خانه‌های تاریخی به کار گرفته شود و پایه‌ای علمی برای تدوین راهبردهای طراحی اقلیم‌پذیر و مرمت انرژی‌محور بناهای بومی فراهم آورد. افزون بر این، به منظور ارزیابی میزان انطباق مستقیم شاخص CEP با نتایج شبیه‌سازی انرژی، از شاخص‌های میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. از آنجا که شاخص CEP در بازه 0 تا 1 تعریف شده است، در حالی که مصرف انرژی سالانه بر حسب $\text{kWh/m}^2.\text{year}$ بیان می‌شود، برای امکان مقایسه مستقیم این دو معیار، مصرف انرژی شش نمونه اعتبارسنجی به یک امتیاز عملکرد انرژی بدون واحد در بازه 0 تا 1 تبدیل شد. از آنجا که در شاخص CEP مقدار بالاتر بیانگر عملکرد اقلیمی مطلوب‌تر است، نرمال‌سازی مصرف انرژی به‌صورت معکوس انجام گرفت؛

به‌گونه‌ای که مصرف انرژی کمتر، امتیاز انرژی بالاتری دریافت کند (معادله 3). این تبدیل صرفاً برای مقایسه و محاسبه MAE و RMSE انجام شد و هیچ‌گونه تغییری در نحوه محاسبه شاخص CEP ایجاد نمی‌کند. در این معادله EnergyScore_i امتیاز عملکرد انرژی نرمال‌شده، E_i مصرف انرژی سالانه خانه i و $E_{\min}$ و $E_{\max}$ به‌ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر مصرف انرژی در میان نمونه‌های اعتبارسنجی هستند. همان‌گونه که در جدول دوازده مشاهده می‌شود مقدار MAE برابر با 0.307 و RMSE برابر با 0.340 به دست آمد. نزدیکی نسبی مقادیر MAE و RMSE نشان می‌دهد که در این مجموعه کوچک از نمونه‌های اعتبارسنجی، اختلاف میان امتیاز CEP و امتیاز انرژی نرمال شده عمدتاً در محدوده‌ای نسبتاً مشابه قرار داشته و افزایش شدید خطا در یک یا چند نمونه مشاهده نشد. بنابراین در چارچوب داده‌های این پژوهش، شاخص CEP همخوانی نسبی و اولیه با نتایج شبیه‌سازی انرژی داشته و می‌تواند به‌عنوان ابزاری سریع و کم‌هزینه برای برآورد نسبی عملکرد اقلیمی خانه‌های تاریخی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، با توجه به اعتبارسنجی بر پایه تنها شش نمونه، تعمیم نتایج به سایر بافت‌های تاریخی باید با احتیاط انجام شود.

معادله (3)

$$\text{EnergyScore}(i) = 1 - \frac{E_{\max} - E_i}{E_{\max} - E_{\min}}$$

جدول 11- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص CEP و متغیرهای انرژی و شاخص‌های کالبدی

Tab. 11- Pearson correlation coefficients between the CEP index, energy variables, and physical indicators

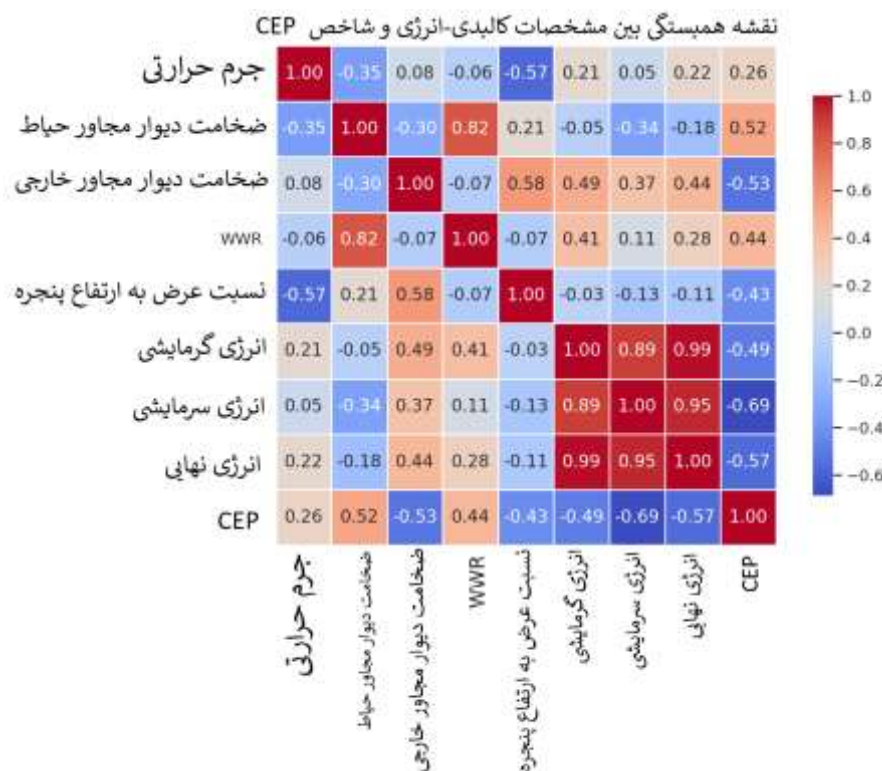
نهایی سالانه	سرمایشی	گرمایشی	نسبت عرض به ارتفاع پنجره	WWR	ضخامت دیوار مجاور خارجی	ضخامت دیوار مجاور حیاط	جرم حرارتی
-0.57	-0.69	-0.49	-0.34	+0.44	-0.53	+0.52	+0.26

جدول 12- محاسبه شاخص‌های MAE و RMSE برای ارزیابی انطباق شاخص CEP با نتایج شبیه‌سازی انرژی

Tab. 12- Calculation of MAE and RMSE metrics for evaluating the consistency of the CEP index with energy simulation results

خانه	CEP	مصرف انرژی نهایی سالانه ($\text{kWh/m}^2.\text{year}$)	امتیاز نرمال‌شده انرژی	خطا	خطا ²
نراقی	0.59	171.38	0.091	0.499	0.249
خلبانی	0.63	61.65	1.00	0.370	0.137
ضرابی	0.7	150.96	0.260	0.440	0.193
ابراهیمی	0.29	168.47	0.115	0.175	0.031
باغ نظری	0.34	150.96	0.260	0.080	0.006

خانه	CEP	مصرف انرژی نهایی سالانه (kWh/m ² .year)	امتیاز نرمال شده انرژی	خطا ²
صارم‌اصلاتی	0.28	182.39	0.000	0.078
نتیجه	—	—	—	0.340



شکل 7- نقشه همبستگی بین متغیرهای کالبدی، انرژی و شاخص CEP

Fig. 7- Correlation matrix / heatmap between physical variables, energy performance, and the CEP index

گونه‌شناسی نشان داد که؛ خانه‌های تاریخی همدان در سه دوره تاریخی (قاجار، قاجار-پهلوی، پهلوی) و هشت زیرگونه ترکیب‌بندی فرعی (A1 تا C3) قابل طبقه‌بندی هستند. این زیرگونه‌ها تفاوت‌های معناداری در شاخص‌های کالبدی نظیر ضخامت دیوارها، نسبت بازشوها، و تناسبات حجمی داشته‌اند که نشان‌دهنده دگرگونی تدریجی در الگوی سازماندهی فضایی و تغییر تعامل انسان و محیط با گذر زمان است.

در پاسخ به سؤال دوم مبنی بر «تأثیر شاخص‌های کالبدی نظیر ضخامت جداره، جرم حرارتی، نسبت بازشو و جهت‌گیری در عملکرد اقلیمی گونه‌ها»، تحلیل همبستگی پیرسون نشان داد که ضخامت دیوار مجاور حیاط ($r = 0.60$) و نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR) ($r = 0.54$) بیشترین همبستگی مثبت را با CEP دارند، در حالی که متغیرهایی مانند بار

3-3- بحث

پژوهش حاضر با هدف گونه‌شناسی اقلیمی خانه‌های تاریخی همدان بر اساس ویژگی‌های ترکیب‌بندی کالبدی، سعی داشته است تا با طراحی و اعتبارسنجی شاخصی ترکیبی تحت عنوان CEP، ارتباط میان فرم کالبدی و عملکرد حرارتی را در راستای بهینه‌سازی آمایش خرد محیطی در اقلیم سرد همدان را مورد تحلیل قرار دهد. این پژوهش از تلفیق روش‌های آماری (PCA، ANOVA، Tukey HSD) و شبیه‌سازی انرژی (DesignBuilder) بهره برد تا ضمن دسته‌بندی دقیق‌تر گونه‌ها، میزان اقلیم‌پذیری آن‌ها را با دقت بالاتری ارزیابی کند. در پاسخ به سؤال اول تحقیق مبنی بر اینکه «چه گونه‌هایی از خانه‌های تاریخی همدان بر اساس ویژگی‌های ترکیب‌بندی کالبدی قابل شناسایی هستند؟»، یافته‌های حاصل از تحلیل

سرمایشی ($r = -0.65$) و مصرف انرژی سالانه ($r = -0.51$) بیشترین همبستگی منفی را نشان دادند. این نتایج بیانگر آن است که مؤلفه‌های کالبدی، به‌ویژه در گونه‌های دارای توده‌گذاری متراکم، بازشوهای متناسب، نقشی کلیدی در ارتقای تاب‌آوری محیطی سکونتگاه‌ها (بهینه‌سازی عملکرد اقلیمی) دارند.

به منظور پاسخ به سؤال سوم، یعنی «آیا می‌توان رابطه‌ای آماری میان ترکیب‌بندی فضایی و پاسخ اقلیمی خانه‌ها برقرار کرد؟»، آزمون واریانس یک‌طرفه (ANOVA) با مقدار ($F = 4.82, p < 0.001$) نشان داد که میانگین شاخص CEP در گروه‌های کالبدی تفاوت معنادار دارد. آزمون تعقیبی Tukey نیز اختلاف معناداری میان گونه‌های قاجاری (A_2) با میانگین (0.71) و گونه‌های پهلوی (C_3) با میانگین (0.24) را تأیید کرد که نشان‌دهنده ارتباط آماری روشن میان ترکیب‌بندی فضایی و عملکرد اقلیمی است.

در پاسخ به سؤال چهارم پژوهش، «کدام گونه‌ها از منظر شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری، عملکرد حرارتی بهینه‌تری در اقلیم سرد همدان دارند؟»، یافته‌ها نشان دادند که گونه A_2 بهترین عملکرد را از نظر اقلیم‌پذیری دارد. این گونه دارای دیوارهای ضخیم‌تر از میانگین (بیش از 0.8 متر)، جرم حرارتی بالا و نسبت پر به خالی متعادل است. از سوی دیگر، گونه C_3 به عنوان ضعیف‌ترین زیرگونه، ترکیب‌بندی پراکنده‌تر و بازشوهای گسترده‌تری دارد که سبب افزایش بار سرمایشی و مصرف انرژی شده است.

تحلیل شاخص‌های کالبدی نیز نشان داد که خانه‌های تاریخی با نسبت پر به خالی بالاتر، ضخامت دیوار بیشتر و جهت‌گیری مناسب، دارای نمرات بالاتری در شاخص CEP بودند. به‌ویژه نسبت عرض به ارتفاع پنجره در حدود 0.7 که در اغلب خانه‌های A_2 و A_1 دیده می‌شود، در کنترل تهویه و تابش مؤثر بوده است. از سوی دیگر، مقایسه نمودار ستونی مقدار CEP بین 33 خانه منتخب نشان داد که الگوی متمایزی از گونه‌های قاجاری در مقایسه با گونه‌های پهلوی وجود دارد که بازتاب دهنده کاهش کیفیت کالبدی در دوره‌های متأخر است. در مقایسه با مطالعات داخلی نظیر؛ بلالی و دهقان (ارومیه) یا قاسمی سیجانی و معماریان (اصفهان)، پژوهش حاضر گامی فراتر نهاده و به‌جای تحلیل صرفاً توصیفی، رویکردی تحلیلی با تلفیق داده‌های کمی (شاخص‌های کالبدی) و نتایج

شبیه‌سازی ارائه داده است. همچنین در سطح بین‌المللی، نتایج این پژوهش با یافته‌های پیشین در زمینه تأثیرپذیری تقاضای انرژی از شرایط خرداقلیمی و ریخت‌شناسی کالبدی (Mosteiro-Romero et al., 2020) و همچنین نقش جرم حرارتی و رفتار حرارتی جدارها در تثبیت شرایط دمایی و کاهش نیاز انرژی (Silva & Henriques, 2014) هم‌راستا است. به‌منظور ارزیابی میزان تأثیر هر یک از متغیرهای کالبدی بر عملکرد اقلیمی ساختمان‌ها، ابتدا یک تحلیل حساسیت آماری مبتنی بر رگرسیون خطی چندگانه انجام شد. نتایج این تحلیل نشان داد که از میان شش شاخص اصلی بررسی‌شده، سه متغیر شامل نسبت پر به خالی (سطح اشغال)، نسبت زیربنا به سطح زمین (تراکم ساختمانی) و نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR)، بیشترین نقش را در تبیین تغییرات شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (CEP) ایفا می‌کنند. در حالی که انتظار می‌رفت شاخص‌هایی نظیر ضخامت دیوار خارجی و جرم حرارتی نیز در این رابطه نقش پررنگی داشته باشند، اما تأثیر آماری آن‌ها کمتر از حد معنی‌داری بود و در مدل نهایی حذف شدند. این یافته نشان می‌دهد که؛ در اقلیم سرد همدان، نسبت‌های هندسی و تراکمی ساختمان نسبت به ویژگی‌های مصالح، تأثیر بیشتری بر قابلیت انطباق حرارتی دارند. این تحلیل علاوه بر ارتقاء دقت مدل، امکان ساده‌سازی محاسبات CEP و تمرکز بر مهم‌ترین عوامل مؤثر را فراهم ساخت. به منظور تحلیل دقیق‌تر تأثیر شاخص‌های کالبدی بر عملکرد حرارتی بناهای تاریخی، در گام بعدی از یک مدل یادگیری ماشین مبتنی بر الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest Regressor) استفاده شد. این مدل، با بهره‌گیری از درختان تصمیم‌گیری چندگانه و مکانیزم تجمیع نتایج، امکان ارزیابی دقیق‌تر اهمیت نسبی متغیرها در پیش‌بینی شاخص CEP را فراهم می‌سازد. نتایج نشان داد که متغیرهای WWR و نسبت سطح اشغال به‌ترتیب با سهم نسبی 31.2% و 30.50% بیشترین تأثیر را در مدل پیش‌بینی دارند؛ در حالی که سهم جرم حرارتی کمتر از 5% برآورد شد. این نتایج با یافته‌های تحلیل کلاسیک همسو بوده، اما دقت بالاتری را در تمایزگذاری و رتبه‌بندی اهمیت متغیرها ارائه می‌دهد. تطبیق این دو رویکرد تحلیلی نشان می‌دهد که بهره‌گیری از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند الگوهای پنهان و تعاملات غیرخطی میان متغیرهای کالبدی را آشکار سازد و درک دقیق‌تری از سازوکارهای حرارتی در



وجود دارد. بنابراین، CEP می‌تواند به‌عنوان یک شاخص اولیه و کم‌هزینه برای مقایسه نسبی عملکرد اقلیمی و شناسایی الگوهای کالبدی مناسب در بافت‌های تاریخی مورد استفاده قرار گیرد؛ مزیت کلیدی این پژوهش، ارائه رویکردی کمی و مقیاس‌پذیر است که قابلیت تعمیم به سایر سکونتگاه‌های اقلیم سرد را داراست. سادگی محاسبه شاخص CEP و هم‌راستایی آن با نتایج شبیه‌سازی، این امکان را فراهم می‌سازد تا از آن به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار در سیاست‌گذاری‌های بازآفرینی و مدیریت عملکردی اقلیمی در بافت‌های تاریخی استفاده شود. با این حال، استفاده از شاخص CEP جایگزین شبیه‌سازی تفصیلی انرژی نیست، بلکه می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل برای غربالگری و اولویت‌بندی اولیه نمونه‌ها به کار رود. این پژوهش گامی نو در جهت تلفیق گونه‌شناسی کالبدی، تحلیل آماری و ارزیابی عملکردی اقلیمی بناهای تاریخی به‌شمار می‌رود. محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آتی به شرح زیر است:

- محدود بودن تعداد نمونه‌های نهایی به 33 خانه، محدودیت داده‌های قابل دسترس برای برخی بناها، و انتخاب تنها شش خانه برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی انرژی از محدودیت‌های مطالعه حاضر است. همچنین، محدودیت حجم نمونه در تحلیل‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه؛ Random Forest، سبب می‌شود نتایج اهمیت متغیرها ماهیتی اکتشافی داشته باشند و نباید به‌عنوان شواهد قطعی برای پیش‌بینی تعمیم‌پذیر تلقی شوند.
- در پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود دامنه نمونه‌ها افزایش یابد، اعتبارسنجی CEP با تعداد بیشتری از خانه‌ها و در بافت‌های تاریخی سایر مناطق سردسیر انجام شود و شاخص با داده‌های واقعی مصرف انرژی، تحلیل هزینه-فایده، و سناریوهای تغییر اقلیم و بازسازی عملکردی مورد آزمون قرار گیرد. همچنین بررسی روابط بین متغیرهای بصری، روانی و کالبدی در تجربه زیسته ساکنان می‌تواند ابعاد انسانی زیست‌پذیری محیطی (اقلیم‌پذیری) را نیز در چارچوب تحلیل‌ها وارد کند.

References

Ali, R., Wilson, M. T., & Younossi, O. (2025). *Policymaking in traditional architecture and urbanism: A literature review* (WR-A4015-1). RAND Corporation.

ساختمان‌های تاریخی ارائه دهد. چنین تحلیلی می‌تواند گامی مؤثر در جهت بهینه‌سازی طراحی اقلیمی معماری سنتی و معاصر در مناطق سردسیر باشد.

4- نتیجه‌گیری

شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (CEP) که در این پژوهش طراحی شد، با هدف سنجش عملکرد اقلیمی خانه‌های تاریخی همدان، توانست ارتباط معناداری بین ترکیب‌بندی کالبدی و پایداری عملکرد اقلیمی بناها را آشکار کند. نتایج حاصل از تحلیل آماری و شبیه‌سازی انرژی تأیید کرد که گونه‌های دارای ویژگی‌هایی نظیر جرم حرارتی بالا، دیوارهای ضخیم‌تر، نسبت بازشو کنترل‌شده و جهت‌گیری مطلوب، عملکرد بهینه‌تری در اقلیم سرد همدان دارند. در این میان، گونه A2 با میانگین شاخص 0.71، بالاترین سطح اقلیم‌پذیری را به خود اختصاص داد و در مقابل، گونه C3 با میانگین 0.24 ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. همبستگی‌های منفی بین شاخص CEP و متغیرهایی نظیر بار سرمایشی ($r=-0.65$) و مصرف انرژی نهایی سالانه ($r=-0.51$)، بیانگر قابلیت اعتماد این شاخص در پیش‌بینی مصرف انرژی و عملکرد حرارتی است. به عبارتی، با توجه به محدود بودن نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده به شش خانه، این روابط باید به‌عنوان شواهد اولیه از همخوانی شاخص CEP با عملکرد انرژی تفسیر می‌شوند. همچنین تحلیل‌های همبستگی نشان دادند که ضخامت دیوار مجاور حیاط و نسبت سطح شیشه به دیوار از جمله مؤلفه‌های مؤثر در افزایش مقدار شاخص CEP محسوب می‌شوند. تحلیل حساسیت آماری مبتنی بر رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که از میان شاخص‌ها، سه متغیر؛ نسبت پر به خالی (سطح اشغال)، نسبت زیربنا به سطح زمین (تراکم ساختمانی) و نسبت سطح شیشه به دیوار (WWR)، بیشترین نقش را در تبیین تغییرات شاخص ترکیبی اقلیم‌پذیری (CEP) ایفا می‌کنند. این یافته ثابت می‌کند که در مناطق سردسیر، شاخص‌های آمایش کالبدی در مقیاس خرد، بیش از نوع مصالح بر کارایی انرژی تأثیر گذارند. اعتبارسنجی شاخص با استفاده از شبیه‌سازی انرژی شش خانه منتخب و مقایسه امتیاز CEP با امتیاز انرژی نرمال شده انجام شد. مقادیر $MAE=0.307$ و $RMSE=0.340$ نشان دادند که بین شاخص CEP و عملکرد انرژی شبیه‌سازی‌شده، در مجموعه محدود نمونه‌های اعتبارسنجی، همخوانی نسبی



- Hassanpour Lamr, S. (2014). Typology of traditional houses in Talesh county (Case study: Khaleh Sara 57 village). *Housing and Rural Environment*, 33(147), 117–131. [In Persian] URL <http://jhre.ir/article-1-594-fa.html>
- Hosseini, A., Foroutan, M., & Salehi, S. (2018). Typology of traditional houses in Arak. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 11(25), 27–44. [In Persian]
armanshahrjournal.com/article_85046_13c078fc2cab9512c84bbb9a65657b4a.pdf
- Hosseini, S. M., Hajizadeh Bastani, K., Shahbazi Shiran, H., Rezalu, R., & Sheidaei, S. (2020). Typology of historical houses in the historical fabric of Ardabil. *Iranian Journal of Archaeological Studies (Pazhohesh-ha-ye Bastan Shenasi Iran)*, 10(26), 189–214. [In Persian] 10.22084/nbsh.2020.21973.2162
- Jeyhani, H. R., Omranipour, A., Rajabi, F., & Alemi, B. (2019). Typology of historical houses of the Qajar period in Naraq. *Housing and Rural Environment*, 38(167), 115–130. [In Persian] 10.22034/38.167.115
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Mardani, A., & Roustaei, A. (2021). The impact of central courtyard geometric patterns on airflow in traditional houses of Shushtar. *Iranian Islamic City Studies*, 11(43), 71–80. [In Persian] 20.1001.1.2228639.1399.10.40.5.9
- Mashhadi, A., & Aminpour, A. (2017). Developing the process and effective indicators for architectural typology based on compositional criteria (Case study: Historical buildings of Arak). *Urban Management Studies*, 15(48), 173–186. [In Persian]
<http://ijurm.imo.org.ir/article-1-1950-fa.html>
- Mosteiro-Romero, M., Iannelli, A., & Perini, K. (2020). Coupling microclimate simulation and urban energy models: The effect of microclimate on the cooling demand at the neighbourhood scale. *Frontiers in Built Environment*, 6, 553946. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2020.553946>
- Olakanbi, A. B., Abdullahi, A. L., Zakari, A., Yaradua, A. M., Nseabasi, A. E., Danlami, N. J., & Hassan, A. T. (2025). Computational analytical <https://doi.org/10.7249/WRA4015-1>
- Asfour, O. S. & Alshawaf, E. S. (2015). Effect of housing density on energy efficiency of buildings located in hot climates. *Energy and Buildings*, 91, 131–138. 10.1016/j.enbuild.2015.01.030
- Becker, W., Paruolo, P., Saisana, M., & Saltelli, A. (2017). Weights and importance in composite indicators: Mind the gap. In R. Ghanem, D. Higdon, & H. Owahdi (Eds.), *Handbook of uncertainty quantification* (pp. 1187–1216). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-12385-1_40
- Belali Oskoui, A., & Dehghan, S. (2021). Physical typology of historical houses of Urmia during the Qajar period. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 14(37), 1–14. [In Persian] 10.22034/aud.2020.220357.2137
- Estrada D'amato, L., & Kapoor, S. (2024). *Climate responsive strategies in vernacular architecture: A comparative analysis at various latitude*. *International Research Journal of Multidisciplinary Scope*, 5(4), 1047–1068. <https://doi.org/10.47857/irjms.2024.v05i04.01637>
- Farahbakhsh, M., Hanachi, P., & Ghanaei, M. (2017). Typology of historical houses in the old fabric of Mashhad: From the early Qajar to the late first Pahlavi period. *Iranian Architectural Studies*, 6(12), 97–116. [In Persian] SID. <https://sid.ir/paper/219450/fa>
- Fernandes, J., Mateus, R., Gervásio, H., Silva, S. M., Branco, J., & Almeida, M. (2020). Thermal performance and comfort conditions analysis of a vernacular palafitic timber building in Portuguese coastline context. *Sustainability*, 12(24), 10484. <https://doi.org/10.3390/su122410484>
- Ghasemi Sichani, M., & Memarian, G. H. (2010). Typology of Qajar period houses in Isfahan. *Hoviatshahr*, 4(7), 87–94. [In Persian] 20.1001.1.17359562.1389.4.7.9.4
- Ghoddusi, M., Daneshjoo, K., & Mofidi Shemirani, S. M. (2018). Explaining geometric indicators affecting the thermal behavior of residential buildings in hot and dry climates (Case study: Yazd). *Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning*, 8(3), 143–148. [In Persian] 20.1001.1.23224991.1397.8.3.1.7



Education, Culture and Research (ACECR). [In Persian]

Saljoughinejad, S., & Rashidi Sharifabad, S. (2015). Classification of climatic strategies, used in Iranian vernacular residences based on spatial constituent elements. *Building and Environment*, 92, 475–493.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.005>

Shou, T., Pan, Y., & Zhao, B. (2026). Vernacular ecological construction: a diagrammatic exploration on the composition modes of spatial-landscape in Huizhou courtyard dwellings. *Architectural Engineering and Design Management*, 22(2), 446–470.

<https://doi.org/10.1080/17452007.2025.2517136>

Silva, H. E., & Henriques, F. M. A. (2014). Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates. *Building and Environment*, 82, 381–387.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.005>

Sommese, F., & Diana, L. (2026). Scenario-based simulation of greening adaptation strategies in a dense historic urban fabric: A comparative analysis for the case of Naples, Italy. *Sustainable Cities and Society*, 145, 107488.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107488>

Triana, M. A., Lamberts, R., & Sassi, P. (2015). Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. *Energy Policy*, 87, 524–541.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>

Triana, M. A., Lamberts, R., & Sassi, P. (2021). Sustainable energy performance in Brazilian social housing: A proposal for a sustainability index in the energy life cycle considering climate change. *Energy and Buildings*, 242, 110845.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110845>

Yang, C., & Misni, A. (2025). Comparative analysis of sustainable design strategies in Sanheyuan vernacular and modern dwellings: Effects on summer microclimate in Sha Tun village, Handan, Hebei Province, China. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*.

<https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2585698>

Yetkin, E. G., & Yaman, G. Ö. (2025). Climatic Adaptation-Based Evaluation of Vernacular

mapping of spatial organization in Kano Metropolis: A shape grammar approach to traditional Hausa houses. *SSR Journal of Artificial Intelligence*, 2(2).

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15763824>

Olgyay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.

Givoni, B. (1981). *Man, Climate and Architecture* (2nd ed.). Applied Science Publishers.

Lechner, N. (2015). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects* (4th ed.). Wiley.

Oveysi-Keykha, Z., Kavosh, H., Heydari, A., & Davtalab, J. (2020). Typology of spatial organization of vernacular housing in Sistan in terms of open and closed space formation and rural environment. *Housing and Rural Environment*, 39(171), 61–72. [In Persian]

[10.22034/39.171.61](https://doi.org/10.22034/39.171.61)

Pardo, J. M. F. (2023). Challenges and Current Research Trends for Vernacular Architecture in a Global World: A Literature Review. *Buildings*, 13(1), 162.

<https://doi.org/10.3390/buildings13010162>

Philokyprou, M., Michael, A., & Malaktou, E. (2021). A typological, environmental and socio-cultural study of semi-open spaces in the Eastern Mediterranean vernacular architecture: The case of Cyprus. *Frontiers of Architectural Research*, 10(3), 483–501.

<https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.03.001>

Rasouli Larmaci, M., & Shahbazi, Y. (2015). Evaluation of the performance of double-skin fenestration in traditional buildings in cold regions of Iran (Case studies: Qadaki and Ganjezadeh houses in Tabriz). *Iranian Architecture & Urbanism*, 6(1), 13–24. [In Persian]

<https://doi.org/10.30475/isau.2016.61997>

Roberti, F., Filippi Oberegger, U., Lucchi, E., & Troi, A. (2017). *Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process*. *Energy & Buildings*, 138, 1–10.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.028>

Saeedi, A., & Kalantari Khalilabad, H. (1995). *Architectural and structural typology of rural housing in Semnan province*. Tehran, Iran: Academic Center for

Economic Development of Economy, 16(2), 159–172. <https://doi.org/10.3846/tede.2010.10>

Zong, J., Wan Mohamed, W. S., Zaky Jaafar, M. F., & Ujang, N. (2025). Sustainable development of vernacular architecture: a systematic literature review. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 24(5), 3558–3574. <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2399685>

Anatolian Houses: A Comparative Analysis of Stone and Adobe Materials in Terms of Energy, Environment, and Thermal Comfort. *Buildings*, 15(20), 3660. <https://doi.org/10.3390/buildings15203660>

Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and*

