ISSN: 27170128
EISSN: 27170136

**Journal of Urban Sustainable Development**
Vol. 7, No. 23, Summer 2026, 69-89
https://usdjournal.daneshpajoohan.ac.ir/

USD Journal

# A Modern Classification of Passive Fresh Air Flow-Generating Strategies in Breathable Architecture with Multi-Criteria Evaluation in Four Climates of Iran[1]

**Fatemeh Firouzmandi Bandpey[2], Mostafa Gholipour Geshniani[3]***

Received: 2026/05/25 Revised: 2026/06/09 Accepted: 2026/06/19 Published: 2026/08/21

## Highlights

- This study presents a novel physical-functional classification of 17 passive ventilation strategies across four architectural categories: roof-based, wall-based, transitional spaces, and floor-based.
- Ventilation efficiency and indoor air quality were identified as the most critical decision-making criteria, collectively accounting for 36.4% of the total weight in expert evaluations.
- The performance of passive airflow strategies is significantly climate-dependent, with openings and interior layout excelling in temperate-humid and hot-humid climates, windcatchers and courtyards in hot-dry climates, and solar chimneys with Trombe walls in cold-mountainous climates.
- Effective passive ventilation emerges from synergistic combinations such as "windcatcher + courtyard + openings" in hot-dry regions and "windows + Trombe wall + atrium" in cold climates.
- The proposed framework provides architects and researchers with a decision-support tool for designing climate-responsive breathable architecture in Iran.

## Extended Abstract

### Intoduction

Indoor air quality has become a central concern in sustainable architecture, with fresh air supply impacting occupant health, comfort, and energy consumption. Passive and climate-responsive approaches enhance environmental quality while reducing mechanical system dependence (He et al., 2023). "Breathable architecture" extends beyond natural ventilation, conceptualizing buildings as dynamic systems orchestrating fresh air delivery through envelope, form, transitional spaces, and openings (Pan et al., 2024). However, existing literature remains fragmented, focusing on individual elements in isolation (Ali, 2024). This gap is significant in Iran, characterized by four climatic zones: cold-mountainous, hot-dry, hot-humid, and temperate-humid, each presenting distinct requirements. This study provides a novel classification and multi-criteria evaluation across Iran's four climates through expert judgment.

### Theoretical Framework

Breathable architecture views buildings as dynamic systems interacting with their environment. The goal is an integrated "respiratory system" managing air, moisture, and heat exchange (Stavridou, 2015). Passive ventilation strategies operate without mechanical equipment, relying on wind pressure, thermal buoyancy, or pre-conditioning (Ali, 2024). Climate variables fundamentally determine optimal strategies (Rezaei et al., 2024). Previous classifications are fragmented: driving-force categorization explains physics but not design; airflow pattern classification ignores

[1]This article is derived from the master's thesis of the first author, titled "Proposing an Optimal Model for Organizing Flow Spaces in Schools Aimed at Improving Natural Ventilation in Mild and Humid Climates; Designing an Elementary School in the City of Babol," which was presented under the guidance of the second author at the Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran

[2] Master's Student in Architectural Engineering, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

[3]* Assistant Professor of Architecture, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. Corresponding Author, Email: m.gholipour@umz.ac.ir

physical placement; element-based listings lack systematic relationships. A comprehensive design-oriented framework remains absent.

Multi-criteria decision-making provides robust evaluation against multiple criteria (Hwang & Yoon, 1981). TOPSIS ranks alternatives by proximity to ideal solutions. Shannon entropy provides objective weighting from data structure (Chen & Li, 2010), making this combination appropriate for evaluating multiple strategies across four climates.

**Methodology**

This applied research uses a mixed-methods approach. Through systematic literature review, 17 passive airflow strategies were identified and categorized into four physical groups: roof-based (solar chimney, roof window, ridge vent, double-skin roof, windcatcher, wind scoop/exhaust), wall-based (windows/openings, shading, double-skin facade, Trombe wall), transitional spaces (atrium, courtyard, interior layout, corridors/stairs), and floor-based (floor diffusers, underfloor air distribution, earth-air heat exchangers). Three-round Delphi with five experts validated this classification (Kendall's W=0.87, $p<0.01$). Eight evaluation criteria were extracted: ventilation efficiency, indoor air quality, controllability, flexibility, architectural integration, maintenance ease, implementation cost, and execution performance.

Using purposive and snowball sampling, 63 experts were recruited by climate expertise: temperate-humid (n=17), hot-dry (n=15), cold-mountainous (n=16), and hot-humid (n=15). The panel showed strong diversity (31 doctorates, 32 masters'; 32 with >15 years experience). A questionnaire included a 17×8 evaluation matrix on a five-point Likert scale and open-ended synergy questions. Reliability was confirmed ($\alpha=0.937$; ICC=0.886) and validity via CVR>0.78 and CVI=0.94.

For each climate, a decision matrix was constructed from mean expert ratings. Shannon entropy weighted criteria: ventilation efficiency (0.192) and indoor air quality (0.172) most important. TOPSIS ranked strategies using vector normalization and relative closeness coefficients. Robustness was assessed via sensitivity analysis, comparison with VIKOR, and random re-testing. Synergy analysis used co-occurrence matrices with NSC>0.6 indicating high synergy.

**Results & Discussion**

Shannon entropy confirmed ventilation efficiency (19.2%) and indoor air quality (17.2%) as most discriminating. TOPSIS rankings: In temperate-humid, top performers were windows/openings ($C_i=0.782$), interior layout (0.745), windcatcher (0.718), shading (0.694), and corridors/stairs (0.673). In hot-dry, windcatcher (0.851) and courtyard (0.823) ranked highest, followed by shading (0.779), windows (0.751), and wind scoops (0.728). In cold-mountainous, windows/openings (0.806), solar chimney (0.778), atrium (0.742), Trombe wall (0.719), and corridors/stairs (0.688) comprised the top five. In hot-humid, windows (0.794) and windcatchers (0.761) achieved highest performance, followed by shading (0.733), wind scoops (0.705), courtyards (0.672), and atria (0.648). Floor-based strategies were consistently lowest ($C_i<0.35$).

Windcatcher excelled in hot-dry (rank 1) and hot-humid (rank 2) but fell to rank 14 in cold. Windows/openings achieved rank 1 in three climates. Solar chimney performed exceptionally in cold (rank 2) but poorly elsewhere. Spearman correlations confirmed strong agreement between hot-dry and hot-humid ($\rho=0.66$, $p<0.01$) but weak correlations with cold ($\rho=-0.04$ to 0.33). Category-level analysis showed wall-based strategies dominated in temperate-humid (mean=7.25) and cold (5.50), transitional spaces led in hot-dry (6.50) and hot-humid (6.50), roof-based ranked third (8.00–9.33), and floor-based consistently lowest (14.0–14.67).

Synergy analysis revealed core pairs: "windows + interior layout" (20.6%) in temperate-humid, "courtyard + windcatcher" (19.0%) in hot-dry, "windows + Trombe wall" (18.4%) in cold, and "windows + interior layout" (16.1%) in hot-humid. Recommended three-element combinations included "windows + courtyard + windcatcher" (hot-dry) and "windows + atrium + Trombe wall" (cold). Robustness validation confirmed top-five strategies stable under ±20% weight variations; Spearman correlations between TOPSIS and VIKOR exceeded 0.8 in all climates ($p<0.01$); random re-testing maintained >95% consistency.

**Conclusion**

This study addressed the critical gap in natural ventilation literature by providing a comprehensive, climate-oriented, design-based framework for classifying and evaluating passive fresh-air flow strategies. The proposed physical-functional classification organizes 17 strategies into four categories, enabling systematic comparison across Iran's four major climates. Ventilation efficiency and indoor air quality emerged as the most influential decision-making criteria. TOPSIS demonstrated that no single strategy suits all climates; performance is directly conditioned by regional characteristics. Synergy analysis revealed that passive ventilation achieves maximum effectiveness through integrated design, confirming that breathable architecture emerges from intelligent organization of complementary strategies.

This research contributes three major outcomes: a novel design-based classification, climate-specific multi-criteria evaluation, and identification of synergistic patterns—serving as a decision-support tool for architects and researchers. This study focused on expert-based evaluation rather than physical simulation. Future research should complement these findings through CFD simulations and field measurements.

**Keywords**

Breathable Architecture, Passive Ventilation, Airflow, Multi-Criteria Decision-Making, Climate of Iran

**Author Contributions:** All authors contributed to the work, reviewed the manuscript, approved the final version, and agreed to be accountable for its content.

**Conflict of Interest:** The authors declare that there are no financial, professional, personal, or organizational conflicts of interest that could have influenced the results or interpretation of this study.

**Funding:** The authors declare that this research and the preparation of this manuscript received no financial support, research grant, or any other source of funding.

**Data Availability Statement:** The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

**AI Use Statement:** The authors declare that no generative artificial intelligence (AI) tools or AI-based technologies were used at any stage of the preparation, writing, editing, analysis, translation, or preparation of this manuscript.

Citation:

Firouzmandi Bandpey, F., &. Gholipour Geshniani, M. (2026). A Modern Classification of Passive Fresh Air Flow-Generating Strategies in Breathable Architecture with Multi-Criteria Evaluation in Four Climates of Iran. *Journal of Urban Sustainable Development*, *7*(23), 69-89.

**DOI:** https://doi.org/10.22034/usd.2026.2089672.1415

**DOR:** https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27170128.1405.7.23.5.5

**URL:** https://usdjournal.daneshpajoohan.ac.ir/article_738999.html?lang=en

Authors retain the copyright and full publishing rights.
Published by Daneshpajoohan Pishro Higher Education Institute. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

نشریه علمی توسعه پایدار شهری
دوره ۷، شماره ۲۳، تابستان ۱۴۰۵، ۸۹-۶۹.
https://usdjournal.daneshpajoohan.ac.ir/
ISSN: 27170128
EISSN: 27170136
USD Journal
مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.22034/usd.2026.2089672.1415

# طبقه‌بندی نوین راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه در معماری تنفس‌پذیر با ارزیابی چندمعیاره در چهار اقلیم ایران[۱]

فاطمه فیروزمندی بندپی[۲]، مصطفی قلی‌پور گشنیانی[۳*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰

**چکیده:** با افزایش توجه به کیفیت هوای داخلی و کاهش وابستگی به سامانه‌های مکانیکی، ضرورت بازتعریف راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه در معماری پایدار بیش‌ازپیش آشکار شده است .بررسی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد باوجود معرفی راهکارهای متعدد، همچنان فقدان یک طبقه‌بندی جامع کالبدی و عدم ارزیابی دقیق عملکرد این راهکارها در اقلیم‌های مختلف ایران، به‌عنوان یک خلأ علمی و کاربردی جدی مطرح است .هدف این پژوهش، ارائه یک طبقه‌بندی نوین بر پایه منطق کالبدی - عملکردی و اولویت‌بندی راهکارهای غیرفعال در چهار اقلیم اصلی ایران است. پژوهش حاضر کاربردی و با رویکرد ترکیبی انجام شد. ابتدا با مرور نظام‌مند منابع، ۱۷ راهکار در چهار دسته سقف محور، دیوار محور، فضاهای میانی و کف محور طبقه‌بندی گردید. سپس با مشارکت ۶۳ خبره، ۸ معیار ارزیابی استخراج و با روش آنتروپی شانون وزن‌دهی شد. در ادامه، رتبه‌بندی راهکارها در چهار اقلیم ایران با روش TOPSIS انجام گرفت و الگوهای هم‌افزایی نیز بررسی شد. نتایج نشان داد که «کارایی تهویه» و «کیفیت هوای داخل» مهم‌ترین معیارهای تصمیم‌گیری هستند. همچنین، عملکرد راهکارها به طور معناداری به اقلیم وابسته است؛ به‌گونه‌ای که بازشوها و چیدمان داخلی در اقلیم‌های معتدل و مرطوب و گرم و مرطوب، بادگیر و حیاط مرکزی در اقلیم گرم و خشک، و پنجره، دیوار ترومپ و دودکش خورشیدی در اقلیم سرد و کوهستانی بیشترین کارایی را داشتند. یافته‌ها بیانگر آن است که تهویه غیرفعال مؤثر، حاصل انتخاب یک عنصر منفرد نیست، بلکه از ترکیب هوشمندانه عناصر و انطباق دقیق با بستر اقلیمی شکل می‌گیرد.

**واژگان کلیدی:** معماری تنفس‌پذیر، تهویه غیرفعال، جریان هوا، تصمیم‌گیری چندمعیاره، اقلیم ایران

**نحوه ارجاع به مقاله:**
فیروزمندی بندپی، فاطمه، و قلی‌پور گشنیانی، مصطفی. (۱۴۰۵). طبقه‌بندی نوین راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه در معماری تنفس‌پذیر با ارزیابی چندمعیاره در چهار اقلیم ایران. *توسعه پایدار شهری*، ۷(۲۳)، ۸۹-۶۹.

---

[۱] این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده فاطمه فیروزمندی بندپی با عنوان " ارائه الگوی بهینه سازماندهی فضاهای جریان‌ساز مدارس با هدف بهبود تهویه طبیعی در اقلیم معتدل و مرطوب ؛طراحی مدرسه ابتدایی در شهر بابل " به راهنمایی نویسنده مصطفی قلی پور گشنیانی در دانشگاه مازندران می باشد.

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.
[۳*] استادیار، گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. نویسنده مسئول: Email: m.gholipour@umz.ac.ir

## ۱- مقدمه و بیان مسئله

در دهه‌های اخیر، کیفیت هوای داخل ساختمان به موضوعی مهم در معماری پایدار تبدیل شده است. تأمین هوای تازه از طریق تهویه مناسب، بر سلامت، آسایش، بهره‌وری و مصرف انرژی تأثیر مستقیم دارد. رویکردهای غیرفعال و اقلیمی می‌توانند کیفیت محیط و کارایی انرژی را بهبود بخشند (He & et al., 2023; Alshakir Abed Hassan, 2025).

با تشدید بحران انرژی، راهبردهای طراحی غیرفعال، با اتکای حداقلی به تجهیزات مکانیکی، اهمیت یافته‌اند. جریان‌سازی غیرفعال هوای تازه، ضمن کاهش وابستگی به سیستم‌های فعال، ارتباط مؤثری میان طراحی معماری، اقلیم و سلامت کاربران برقرار می‌کند (Ali, 2024; He et al., 2023).

«معماری تنفس‌پذیر»، فراتر از تهویه طبیعی، ساختمان را سامانه‌ای پویا در نظر می‌گیرد که از طریق پوسته، فرم، فضاهای میانی، بام، زمین و بازشوها، هدایت و تبادل هوای تازه را سامان می‌دهد. این رویکرد، مجموعه‌ای از راهکارها را در بر می‌گیرد که متناسب با شرایط اقلیمی، کارایی و محدودیت‌های خاص دارند (Pan et al., 2024; Stavridou, 2015; Zhang et al., 2024).

ادبیات موجود در معرفی و ارزیابی این راهکارها پراکنده است و پژوهش‌ها اغلب بر راهکارهای منفردی چون بادگیر، دودکش خورشیدی، تهویه متقاطع، پوسته دوم، آتریوم و حیاط مرکزی متمرکز بوده‌اند (Ali, 2024; Pan & et al., 2024; Alshakir Abed Hassan, 2025). این مطالعات فاقد چارچوبی جامع، اقلیم محور و مقایسه‌پذیر برای انتخاب و ترکیب راهکارها هستند.

این موضوع در ایران با تنوع اقلیمی بالا اهمیت بیشتری دارد. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دکتر حسن گنجی، کشور ایران به چهار اقلیم اصلی کلان شامل سرد و کوهستانی، گرم و خشک، گرم و مرطوب و معتدل و مرطوب تقسیم می‌شود. هر یک از این اقلیم‌ها الزامات متفاوتی در زمینه تهویه، کنترل رطوبت و تعدیل حرارت دارند؛ بنابراین، راهکاری که در یک اقلیم کارآمد است، در اقلیم دیگر ممکن است نامطلوب باشد.

عملکرد واقعی ساختمان حاصل برهم‌کنش عناصر مختلف است؛ ازاین‌رو، نگاه تک راهکاری کافی نیست. باوجود توجه روزافزون به تهویه طبیعی، هنوز خلئی در ارائه نظامی جامع و اقلیم محور برای راهکارهای جریان‌ساز هوای تازه وجود دارد. همچنین مطالعات اندکی ترکیب‌های هم‌افزای این راهکارها را با نظر متخصصان بررسی کرده‌اند؛ بنابراین، مسئله اصلی پژوهش، دشواری انتخاب آگاهانه راهکارها در نبود طبقه‌بندی منسجم و اقلیم محور است. هدف، ارائه طبقه‌بندی نوین و ارزیابی اقلیمی آن‌ها در چهار اقلیم ایران با نظر متخصصان است تا زمینه انتخاب و ترکیب بهینه فراهم آید.

## ۲- پیشینه و مبانی نظری پژوهش

### ۲-۱- معماری تنفس‌پذیر و مفهوم جریان‌سازی هوای تازه

معماری تنفس‌پذیر پارادایمی در طراحی اقلیمی است که ساختمان را سامانه‌ای پویا در تعامل با محیط پیرامون می‌داند، نه کالبدی صلب و ایزوله. در این رویکرد، هدف فراتر از تأمین حداقل تهویه است و تلاش می‌شود یک «سیستم تنفسی» یکپارچه برای ساختمان ایجاد شود که تبادل هوا، رطوبت و حرارت را از طریق عناصر کالبدی مدیریت کند (Stavridou, 2015).

در این دیدگاه، پوسته، فرم و فضاهای داخلی ساختمان به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که جریان کنترل‌شده هوای تازه را تسهیل کرده و آلاینده‌های داخلی را به بیرون هدایت کنند. عناصر معماری مانند بازشوها، پوسته‌های متخلخل، حیاط‌های مرکزی و دودکش‌های خورشیدی به ساختمان امکان می‌دهند با اقلیم بیرونی ارتباط برقرار کرده و شرایط آسایش داخلی را تنظیم کند. این فرایند علاوه بر جابه‌جایی هوا، شامل مدیریت رطوبت و دفع حرارت اضافی نیز می‌شود و به بهبود کیفیت هوای داخل (IAQ) کمک می‌کند (Zhang et al., 2024; Pan et al., 2024).

اگرچه این رویکرد بر تهویه طبیعی متکی است، اما با آن یکسان نیست. تهویه طبیعی معمولاً به فن‌هایی مانند تهویه متقاطع یا اثر دودکشی اشاره دارد، درحالی‌که معماری تنفس‌پذیر یک رویکرد جامع و کل‌نگر است که این راهبردها را در قالب یک سیستم هماهنگ برای مدیریت هوا، رطوبت و آلاینده‌ها به کار می‌گیرد(Stavridou, 2015) .

این رویکرد نقش مهمی در بهبود کیفیت محیط داخلی (IEQ) و آسایش کاربران دارد. جریان مداوم هوای تازه موجب کاهش آلاینده‌هایی مانند $CO_2$، ترکیبات آلی فرار (VOCs) و رطوبت اضافی شده، احتمال بروز «سندرم ساختمان بیمار» را کاهش می‌دهد و با ایجاد جریان هوای مطلوب، محدوده آسایش حرارتی را به‌ویژه در اقلیم‌های گرم گسترش می‌دهد (Abed & He et al., 2023; Alshakir Hassan, 2025).

### ۲-۲. راهکارهای غیرفعال تهویه و جریان‌سازی هوا

راهکارهای غیرفعال تهویه، بدون نیاز به تجهیزات مکانیکی و تنها با کمک شرایط اقلیمی و معماری ساختمان، هوای تازه را تأمین و هدایت می‌کنند. رایج‌ترین این راهکارها شامل تهویه متقاطع، تک‌سویه و دودکشی، بازشوها، آتریوم، حیاط مرکزی، نمای دوپوسته، دودکش خورشیدی، بادگیر و سامانه‌های زمین مبنا است. عملکرد این سیستم‌ها عمدتاً بر پایه نیروی باد، شناوری حرارتی یا پیش تعدیل هوا استوار است (Ali, 2024; He et al., 2023).

در این میان، نکته مهم آن است که عملکرد این راهکارها به‌صورت منفرد قابل‌فهم نیست، بلکه در بسیاری موارد، اثربخشی آن‌ها به نحوه ترکیب با سایر عناصر معماری بستگی دارد. برای مثال، حیاط مرکزی در ترکیب با بازشوهای مناسب، یا بادگیر در پیوند با فضاهای نیمه مدفون، می‌تواند کارایی بیشتری نسبت به استفاده مستقل داشته باشد. ازاین‌رو، نگاه سیستمی به راهکارهای غیرفعال، برای فهم عملکرد واقعی آن‌ها ضروری است.

### ۲-۳. تأثیر اقلیم بر انتخاب راهکارهای غیرفعال

انتخاب راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوا تحت‌تأثیر شرایط اقلیمی قرار دارد. متغیرهایی مانند دما، رطوبت، شدت تابش خورشید، جهت و سرعت باد و دامنه نوسانات حرارتی، تعیین می‌کنند که چه راهبردی بیشترین کارایی را داشته باشد (Minaei&Moallemi Khiavi ؛Rezaee et al., 2024 2023 ). ازاین‌رو، نمی‌توان یک راهکار واحد را برای تمامی اقلیم‌ها مناسب دانست و طراحی باید مبتنی بر تحلیل دقیق بستر محیطی انجام گیرد. تهویه طبیعی در ایران مانند جورچین است که هر اقلیم قطعه خاص خود را دارد؛ برای مثال، بادگیر در اقلیم گرم و خشک، بالکن‌های گسترده در اقلیم معتدل و مرطوب، و حیاط مرکزی با حوض آب در اقلیم گرم و خشک، نمونه‌هایی از این تطابق هستند ( Pesaran et al., 2019). در مناطق گرم و مرطوب، ایجاد منطقه آسایش تنها از طریق تهویه طبیعی ممکن نیست و لازم است با سایر تدابیر اقلیمی ترکیب شود ( Rezadoost Dezfuli et al., 2023).

### ۲-۴. طبقه‌بندی‌های پیشین در ادبیات

ادبیات تهویه طبیعی راهکارهای غیرفعال جریان هوا را به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی کرده است. یکی از رایج‌ترین دسته‌بندی‌ها بر اساس نیروی محرک (باد، شناوری حرارتی، ترکیبی) است که سازوکار فیزیکی حرکت هوا را تبیین می‌کند؛ اما برای انتخاب در طراحی معماری کافی نیست (Pan et al., 2024).

رویکرد دیگر طبقه‌بندی بر اساس الگوی جریان هوا مثل تهویه متقاطع، تک‌سویه، عمودی و شبانه است که بیشتر به عملکرد جریان توجه دارد تا منطق کالبدی استقرار (Ghahreman Izadi et al., 2023 ؛ Rahaei, 2021 ؛ Ali, 2024).

برخی مطالعات راهکارها را بر اساس عناصر معماری (پنجره، بادگیر، آتریوم و نماهای دوپوسته) معرفی کرده‌اند که بیشتر فهرست‌وار است و روابط میان عناصر و مسیر جریان هوا را نظام‌مند نمی‌کند ( Pan et al., 2024; Salam et al., 2024).

گروهی دیگر با تمرکز بر پاسخ اقلیمی، مجموعه راهکارهای مناسب برای شرایط مختلف را پیشنهاد داده‌اند،

اما بیشتر توصیه‌ای و فاقد چارچوب منسجم هستند (Rezadoost Dezfuli et al., 2023).

در کل، طبقه‌بندی‌های پیشین پراکنده و تک‌بعدی‌اند و خلأ یک چارچوب طراحی محور، منسجم و کاربردی برای مقایسه راهکارهای غیرفعال جریان هوا همچنان محسوس است. این نیاز به تدوین نظامی جامع است که منطق کالبدی، عملکرد تهویه و قابلیت ارزیابی اقلیمی را هم‌زمان پوشش دهد.

## ۲-۵. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[1] در ارزیابی راهکارهای معماری

تصمیم‌گیری چندمعیاره[2]، چارچوبی ریاضی و منطقی برای ارزیابی مجموعه‌ای از گزینه‌ها بر اساس چندین معیار مختلف (و گاه متضاد) ارائه می‌دهد (Hwang & Yoon, 1981; Balali & Yunusa-Kaltungo, 2025). در مسائل پیچیده، ارزیابی گزینه‌ها تنها بر اساس یک شاخص امکان‌پذیر نیست و باید از فن‌هایی استفاده کرد که بتوانند ابعاد مختلف موضوع را هم‌زمان بسنجند. از کارآمدترین تکنیک‌های این حوزه برای رتبه‌بندی راهکارها، می‌توان به روش تاپسیس و روش‌های وزن‌دهی عینی مانند آنتروپی شانون اشاره کرد (Zavadskas et al., 2014; Shemshadi et al., 2011).

### ۲-۵-۱-مفهوم و منطق روش تاپسیس[3]

تکنیک تاپسیس نخستین‌بار توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ معرفی شد. مبنای نظری این روش بر یک مفهوم هندسی و منطقی استوار است: گزینه برتر باید هم‌زمان کمترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل مثبت بهترین حالت ممکن در تمام معیارها، نشان‌داده‌شده با $A^+$ و بیشترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل منفی بدترین حالت ممکن، نشان‌داده‌شده با $A^-$ داشته باشد. روش تاپسیس به دلیل درنظرگرفتن هم‌زمان فواصل مثبت و منفی، توانایی پردازش تعداد زیادی از گزینه‌ها، و ارائه یک شاخص نزدیکی نسبی برای رتبه‌بندی نهایی، از اعتبار بالایی در ادبیات تحقیق برخوردار است (Hwang & Yoon, 1981, 128).

### ۲-۵-۲-نظریه آنتروپی شانون[4]

در مدل‌های تصمیم‌گیری، تعیین وزن یا میزان اهمیت هر معیار نشان‌داده‌شده با $W_j$ مرحله‌ای حیاتی است. روش آنتروپی شانون یک رویکرد عینی[5] برای وزن‌دهی است که نیازی به قضاوت ذهنی مستقیم ندارد، بلکه اوزان را از روی ساختار درونی خود داده‌ها استخراج می‌کند. مفهوم آنتروپی در نظریه اطلاعات، معیاری برای بیان میزان عدم قطعیت یا محتوای اطلاعاتی است. در تصمیم‌گیری چندمعیاره، منطق آنتروپی شانون بیان می‌کند که هرچه پراکندگی داده‌ها و تمایز مقادیر در یک معیار بیشتر باشد، آن معیار اطلاعات بیشتری به تصمیم‌گیرنده می‌دهد؛ در نتیجه، وزن و اهمیت آن در تصمیم‌گیری نهایی بیشتر خواهد بود (Chen & Li, 2010; Das & De, 2023).

### ۲-۵-۳ تناسب روش‌های منتخب با ساختار پژوهش حاضر

باتوجه‌به مبانی نظری ذکر شده، انتخاب ترکیب «آنتروپی شانون و تاپسیس» برای این پژوهش کاملاً منطقی و کارآمد است. ازآنجاکه در این تحقیق ارزیابی تعداد نسبتاً زیادی از راهکارها در چهار اقلیم متفاوت مدنظر است، روش‌های مبتنی بر مقایسات زوجی (مانند AHP) به دلیل طولانی‌شدن فرایند و احتمال بروز خطای انسانی در پاسخگویی، کارایی لازم را ندارند. در مقابل، روش تاپسیس قابلیت بالایی در پردازش تعداد زیاد گزینه‌ها بر اساس داده‌های ارزیابی مطلق (طیف لیکرت) دارد. همچنین، بهره‌گیری از آنتروپی شانون این امکان را فراهم می‌آورد تا وزن معیارها به‌صورت عینی و بر اساس ساختار واقعی پاسخ‌های خبرگان استخراج شود که این امر منجر به ارزیابی دقیق‌تر و استخراج راهکارهای بهینه و اختصاصی برای هر یک از اقلیم‌های موردمطالعه می‌گردد.

---

[1] (MCDM)
[2] (Multi-Criteria Decision Making)
[3] (TOPSIS)
[4] (Shannon Entropy)
[5] (Objective)

### ۲-۶- جمع‌بندی و استخراج شکاف پژوهشی

مرور پیشینه نشان می‌دهد پژوهش‌های حوزه تهویه طبیعی عمدتاً با سه خلأ مواجه‌اند:

۱. **نگاه تک عنصری:** تمرکز بر یک یا دو عنصر خاص و بی‌توجهی به ترکیب‌های هم‌افزا در قالب «معماری تنفس‌پذیر».

۲. **فقدان طبقه‌بندی طراحی محور:** دسته‌بندی راهکارها عمدتاً بر اساس فیزیک سیالات بوده و چارچوب کالبدی – معماری مغفول مانده است.

۳. **خلأ ارزیابی چندمعیاره جامع:** محدود بودن مطالعات به یک راهکار و یک اقلیم خاص و عدم مقایسه همه‌جانبه آن‌ها.

برای رفع این شکاف‌ها، پژوهش حاضر ضمن ارائه یک طبقه‌بندی نوین کالبد محور از راهکارهای غیرفعال، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (آنتروپی شانون برای وزن‌دهی و تاپسیس برای رتبه‌بندی)، به ارزیابی و اولویت‌بندی نظام‌مند این راهکارها در چهار اقلیم ایران می‌پردازد.

## ۳- روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر، تحقیقی «کاربردی» با رویکرد «آمیخته (کمی - کیفی)» است .بخش کیفی پژوهش شامل دو گام اصلی می‌شود: (۱) استخراج و طبقه‌بندی راهکارها و معیارهای ارزیابی از طریق مرور نظام‌مند منابع و اجرای تکنیک دلفی ، و (۲) تحلیل هم‌افزایی راهکارها از طریق سؤال باز پاسخ پرسش‌نامه و بررسی کیفی ترکیب‌های سه‌تایی پیشنهادی خبرگان. بخش کمی پژوهش نیز شامل دو گام دیگر است: (۱) گردآوری داده‌های کمّی از طریق پرسش‌نامه با طیف پنج‌گزینه‌ای لیکرت از ۶۳ خبره، و (۲) تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از روش‌های آنتروپی شانون (وزن‌دهی عینی معیارها) و TOPSIS (رتبه‌بندی راهکارها در چهار اقلیم).

### ۳-۱- استخراج راهکارها و معیارهای ارزیابی (گام کیفی)

- **شناسایی راهکارها:** ابتدا با مرور نظام‌مند پیشینه تحقیق در پایگاه‌های معتبر علمی، ۱۷ راهکار غیرفعال جریان‌ساز هوا شناسایی و در ۴ گروه کالبدی دسته‌بندی شدند. به‌منظور اعتبارسنجی این طبقه‌بندی، از تکنیک دلفی کلاسیک در سه دور با مشارکت ۵ خبره بهره‌گیری شد که نتایج حاکی از توافق بالای برخوردار بود (ضریب کندال $W = 0.87$و سطح معناداری $p < 0.01$).
- **تعیین معیارها:** با تلفیق یافته‌های کتابخانه‌ای و مصاحبه‌های اکتشافی با ۵ متخصص، و متعاقباً اجرای روش «دلفی فازی» طی سه دور (با مشارکت ۱۰ خبره)، ۸ معیار کلیدی برای ارزیابی راهکارها استخراج گردید (ضریب توافق دور سوم: $W = 0.852$). این معیارها شامل کارایی تهویه، کیفیت هوای داخلی، کنترل‌پذیری، انعطاف‌پذیری، یکپارچگی معماری، سهولت نگهداری، هزینه اجرا و عملکرد اجرایی است.

### ۳-۲. جامعه آماری و ابزار گردآوری داده‌ها

جامعه آماری پژوهش را متخصصان حوزه معماری اقلیمی و انرژی ساختمان تشکیل می‌دهند. با استفاده از روش‌های نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی، ۶۳ خبره انتخاب و بر اساس تخصص اقلیمی، در چهار گروه دسته‌بندی شدند: معتدل و مرطوب (۱۷ نفر)، گرم و خشک (۱۵ نفر)، سرد و کوهستانی (۱۶ نفر) و گرم و مرطوب (۱۵ نفر).

داده‌ها از طریق یک پرسش‌نامه محقق ساخته گردآوری شد. این ابزار شامل یک ماتریس ارزیابی (۱۷ راهکار در برابر ۸ معیار) با طیف پنج‌گزینه‌ای لیکرت و یک سؤال باز پاسخ جهت بررسی هم‌افزایی راهکارها بود.

- **پایایی ابزار:** پایایی پرسش‌نامه از طریق آلفای کرونباخ ($\alpha = 0.937$) و آزمون - بازآزمون ($ICC = 0.886$) تأیید شد.

- **روایی ابزار:** با محاسبه نسبت روایی محتوا ($CVR > 0.78$) و شاخص روایی محتوا ($CVI = 0.94$) به اثبات رسید.

## ۳-۳. مدل‌سازی ریاضی و تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)

### ۳-۳-۱. نحوه تشکیل ماتریس تصمیم و تجمیع داده‌های

برای هر یک از چهار اقلیم به طور مستقل، یک ماتریس تصمیم به ابعاد ۱۷ راهکار × ۸ معیار تشکیل گردید. داده‌های اولیه از پرسش‌نامه‌های توزیع‌شده میان خبرگان هر اقلیم استخراج شد. تعداد خبرگان در هر اقلیم عبارت بود از: معتدل و مرطوب (۱۷ نفر)، گرم و خشک (۱۵ نفر)، سرد و کوهستانی (۱۶ نفر) و گرم و مرطوب (۱۵ نفر).

مقدار هر درایه از ماتریس تصمیم $(x_{ij})$ برابر با میانگین حسابی امتیازات همه خبرگان آن اقلیم به راهکار $i$ در معیار $j$ است:

$$x_{ij}^{(\text{اقلیم})} = \frac{1}{n_{\text{اقلیم}}} \sum_{k=1}^{n_{\text{اقلیم}}} s_{ijk}$$

که در آن:

- $s_{ijk}$ :امتیاز خبره $k$-ام (در مقیاس پنج‌گزینه‌ای لیکرت از ۱ تا ۵) به راهکار $i$ در معیار $j$
- $n_{\text{اقلیم}}$ :تعداد خبرگان آن اقلیم
- $x_{ij}^{(\text{اقلیم})}$ :مقدار نهایی درایه $i,j$ در ماتریس تصمیم آن اقلیم

به‌این‌ترتیب، چهار ماتریس مستقل (یکی برای هر اقلیم) به دست آمد که مبنای محاسبات بعدی قرار گرفت.

**الف) تعیین وزن معیارها (روش آنتروپی شانون):**

برای جلوگیری از اعمال سوگیری‌های شخصی، وزن عینی معیارها بر اساس میزان پراکندگی پاسخ‌های خبرگان محاسبه شد. در این مرحله، ماتریس تصمیم به ابعاد ۱۷×۸ بر اساس میانگین امتیازات کل ۶۳ خبره (بدون تفکیک اقلیمی) تشکیل گردید تا وزن معیارها به‌صورت کلی و مستقل از اقلیم استخراج شود.

مراحل محاسبه:

گام ۱ – نرمال‌سازی داده‌ها برای محاسبه آنتروپی:

برای هر معیار $j$، مقادیر $x_{ij}$ (میانگین امتیازات) با استفاده از نرمال‌سازی مبتنی بر مجموع (احتمالی) به مقیاس احتمال تبدیل می‌شوند:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{17} x_{ij}}, i = 1.17, j = 1.8$$

این روش نرمال‌سازی استاندارد برای آنتروپی شانون است و تضمین می‌کند که $\sum_{i=1}^{17} p_{ij} = 1$ .توجه شود که این نرمال‌سازی با روش نرمال‌سازی تاپسیس متفاوت است.

گام ۲ – محاسبه مقدار آنتروپی:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{17} p_{ij} \ln (p_{ij})$$

با درنظرگرفتن $k = \frac{1}{\ln (17)}$.

گام ۳ – محاسبه وزن نهایی هر معیار:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{8} d_j}$$

که در آن $d_j = 1 - E_j$ درجه تنوع است.

نتایج این بخش نشان داد که معیارهای «کارایی تهویه» ($w = 0.192$) و «کیفیت هوای داخلی» ($w = 0.172$) از بالاترین درجه اهمیت برخوردارند.

**ب) رتبه‌بندی راهکارها (روش تاپسیس):**

ماتریس تصمیم برای هر اقلیم به‌صورت جداگانه تشکیل و رتبه‌بندی راهکارها با روش تاپسیس انجام پذیرفت. مقادیر ورودی این ماتریس‌ها، همان میانگین امتیازات خبرگان همان اقلیم است که در بخش ۱-۳-۳ محاسبه گردید.

مراحل محاسبه:

گام ۱ – نرمال‌سازی برداری (روش وکتور) ماتریس تصمیم:

برای هر اقلیم، ماتریس تصمیم اولیه $(x_{ij})$ با استفاده از روش نرمال‌سازی اقلیدسی (برداری) به مقیاس یکسان تبدیل می‌شود. این روش استاندارد TOPSIS است:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{17} x_{ij}^2}}, i = 1.17, j = 1.8$$

دراین‌رابطه، $x_{ij}$ همان میانگین امتیازات خبرگان است (که در بخش ۱-۳-۳ محاسبه شد) و $r_{ij}$ مقدار نرمال‌شده است. مزیت این روش نسبت به نرمال‌سازی خطی، حفظ فاصله اقلیدسی بین گزینه‌هاست.

در این پژوهش دو نوع نرمال‌سازی متفاوت به‌کاررفته است: آنتروپی شانون با نرمال‌سازی مبتنی بر مجموع (احتمالی) و تاپسیس با نرمال‌سازی برداری (اقلیدسی).

گام ۲ - تشکیل ماتریس بی‌مقیاسِ موزون:

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}$$

که در آن $w_j$ وزن معیار $j$ از مرحله آنتروپی است.

گام ۳ - تعیین گزینه‌های ایده‌آل مثبت $(A^+)$ و منفی $(A^-)$:

از میان ۸ معیار استخراج‌شده، ۷ معیار شامل کارایی تهویه، کیفیت هوای داخلی، کنترل‌پذیری، انعطاف‌پذیری، یکپارچگی معماری، سهولت نگهداری و عملکرد اجرایی از نوع سودمند هستند (هرچه بزرگ‌تر، بهتر) و یک معیار (هزینه اجرا) از نوع هزینه‌ای است (هرچه کوچک‌تر، بهتر)؛ بنابراین:

- برای معیارهای سودمند:

$$A^+ = \max(v_{ij}), A^- = \min(v_{ij})$$

- برای معیار هزینه‌ای (هزینه اجرا):

$$A^+ = \min(v_{ij}), A^- = \max(v_{ij})$$

گام ۴ - محاسبه فواصل گزینه‌ها از مرزهای ایده‌آل:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{8} (v_{ij} - A^+)^2}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{8} (v_{ij} - A^-)^2}$$

گام ۵ - تعیین شاخص شباهت نسبی درصد نزدیکی به ایده‌آل:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

مقدار $C_i$ بین ۰ تا ۱ متغیر است. هرچه $C_i$ بزرگ‌تر باشد، گزینه به راه‌حل ایده‌آل نزدیک‌تر و در نتیجه در رتبه بالاتری قرار می‌گیرد.

### ج) کنترل استواری نتایج

به‌منظور ارزیابی پایایی و استواری رتبه‌بندی‌های حاصل از روش TOPSIS ، دو روش تکمیلی به کار گرفته شد:

۱ .تحلیل حساسیت :وزن معیارهای اصلی (کارایی تهویه و کیفیت هوای داخلی) به میزان ۲۰± درصد تغییر داده شد و تأثیر این تغییرات بر پایداری رتبه‌بندی پنج راهکار برتر در هر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت.

۲ .مقایسه با روش VIKOR : رتبه‌بندی راهکارها با استفاده از روش ویکور (VIKOR) نیز محاسبه گردید. سپس ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بین نتایج TOPSIS و VIKORتعیین شد تا میزان همگرایی دو روش سنجیده شود .

### ۴-۳. تحلیل هم‌افزایی[1]

باهدف فراتر رفتن از بررسی‌های تک عاملی و دستیابی به راهکارهای ترکیبی، پیشنهادهای سه‌تایی خبرگان تحلیل شد. با تشکیل ماتریس هم وقوع $17 \times 17$، ضریب هم‌افزایی نرمال‌شده $(NSC)$ برای تمامی زوج راهکارها محاسبه گردید:

$$NSC_{ab} = \frac{O_{ab}}{\max(O_a, O_b)}$$

دراین‌رابطه، $O_{ab}$نشان‌دهنده بسامد کاربرد هم‌زمان راهکارهای $a$و $b$، و $O_a$معرف بسامد کل انتخاب راهکار

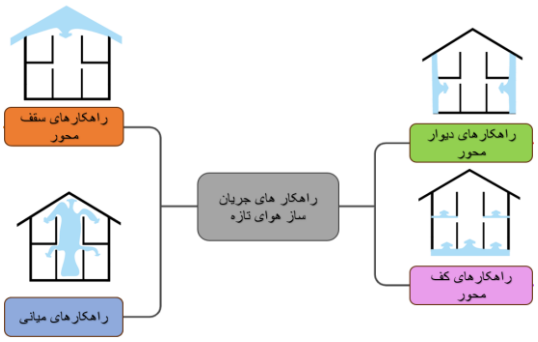
[1] (Synergy Analysis)

$a$است. ترکیباتی با مقدار $NSC > 0.6$به‌عنوان بسته‌های دارای هم‌افزایی بالا شناخته شدند.

## ۴- بحث و یافته‌های پژوهش

### ۴-۱- چارچوب پیشنهادی طبقه‌بندی راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه در معماری تنفس‌پذیر

در پژوهش حاضر، چارچوبی نوین مبتنی بر منطق کالبدی – عملکردی و جایگاه عنصر در پیکره ساختمان ارائه می‌شود. مبنای اصلی این طبقه‌بندی، مسیر ورود، هدایت و تخلیه هوای تازه در ارتباط با اجزای اصلی کالبد ساختمان (سقف، دیوار، کف و فضاهای میانی) است. انتخاب این منطق سه مزیت کلیدی دارد: (۱) هم‌راستایی با فرایند تصمیم‌گیری در طراحی معماری؛ (۲) تسهیل شناسایی ترکیب‌های هم‌افزا (مثلاً بادگیر در کنار حیاط مرکزی و حوض آب)؛ و (۳) شفافیت در ارزیابی اقلیمی. براین‌اساس، راهکارها در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شوند (شکل شماره ۱).




**شکل ۱.چارچوب طبقه‌بندی نوین راهکارهای جریان‌ساز هوای تازه**

#### ۴-۱-۱-معرفی و تحلیل طبقه‌بندی نوین

**۱.راهکارهای سقف محور**[1]

این دسته شامل مجموعه راهکارهایی است که در بخش سقف مستقر شده و با بهره‌گیری از اثر دودکشی (شناوری حرارتی)، جریان عمودی هوای تازه را ایجاد می‌کنند (Chen et al., 2022). هوای گرم داخل به سمت بالا حرکت کرده و با خروج از بالاترین نقطه، هوای خنک را از بازشوهای پایین می‌کشد. بادگیر نیز در این دسته می‌تواند باد را از ارتفاع دریافت کند (Golabzadeh Yazdi, 2019; Nejat, 2018). مهم‌ترین راهکارها: دودکش خورشیدی، پنجره سقفی، دریچه خطالرأس، سقف دوپوسته، بادگیر، بادخور و بادخان. مزیت اصلی آن‌ها تقویت تخلیه طبیعی هوا و تهویه شبانه و عمودی است. این راهکارها در شرایط اختلاف دمایی یا تابش مناسب، بسیار مؤثرند. بااین‌حال، عملکردشان به ارتفاع، جهت‌گیری، اتصال به فضاهای داخلی و اقلیم وابسته است. همچنین طراحی نادرست ممکن است به افزایش گرمای ناخواسته، نفوذ باران یا دشواری نگهداری انجامد (Sasan Kamelia & Ibrahimb, 2025; Nguyen et al., 2021; Chen et al., 2022).

**۲.راهکارهای دیوار محور**[2]

راهکارهای دیوار محور در پوسته عمودی ساختمان (نما و دیوارهای پیرامونی) با استفاده از اختلاف فشار باد یا دما، جریان هوای تازه را به‌صورت افقی هدایت می‌کنند (Yin et al., 2024; Tablada et al., 2020). باد در سمت رو به باد فشار مثبت و در پشت به باد فشار منفی ایجاد می‌کند؛ بازشوهای مناسب تهویه متقاطع را ممکن می‌سازند. برخی مانند دیوار ترومپ از حرارت خورشیدی برای حرکت عمودی هوا بهره می‌برند (Dhahri et al., 2021; Brito-Coimbra et al., 2021). راهکارهای اصلی: پنجره و بازشو، سایبان، نمای دوپوسته، دیوار ترومپ. امتیاز این گروه، انعطاف‌پذیری بالا و کنترل مناسب است. این راهکارها ساده‌تر از بسیاری سامانه‌ها اجرا می‌شوند. در مقابل، عملکردشان به‌شدت تحت‌تأثیر جهت و سرعت باد، آلودگی، تابش، امنیت و حریم خصوصی است. همچنین طراحی بدون تعادل ورود و خروج هوا، به تهویه ناکافی می‌انجامد (Zarghami & Abad, 2015; Zhang et al., 2021).

**۳ .راهکارهای فضاهای میانی**[3]

فضاهای میانی، فضاهای نیمه‌باز، باز یا بسته در میانهٔ پلان هستند که به‌عنوان «ریه» یا «شفت تنفسی» عمل می‌کنند. این فضاها با اتصال به بخش‌های مختلف، جریان هوای تازه را توزیع و هوای آلوده را تخلیه می‌نمایند (Sha et al., 2022;

[1] (Roof based Strategies)
[2] (Wall based Strategies)
[3] (Intermediate Space Strategies)

ایجاد حفره عمودی یا افقی در (Moosavi et al., 2015). مرکز ساختمان، اختلاف فشار و دما را برقرار می‌کند. در ساختمان‌های چندطبقه، آتریوم و حیاط مرکزی با اثر دودکشی، هوای گرم را از بالا خارج و هوای خنک را از پایین می‌کشند؛ چیدمان داخلی و راهروها نیز مجرای توزیع افقی هستند (Loo et al., 2021; Zhang et al., 2024; Fam et al., 2025). راهکارهای اصلی: آتریوم، حیاط مرکزی، چیدمان داخلی، راهروها و پلکان‌ها. مزیت اساسی این گروه، عملکرد فراتر از یک جزء منفرد و سازماندهی رفتار هوایی کل ساختمان است. این راهکارها بیشترین ظرفیت را برای ترکیب‌پذیری دارند؛ زیرا بستر اتصال میان ورودی‌ها، خروجی‌ها و فضاهای بهره‌برداری را شکل می‌دهند. بااین‌حال، اجرای مؤثر نیازمند تصمیم‌گیری از مراحل اولیه طراحی است و بر فرم، تراکم، سطح اشغال و الگوی سازه تأثیر می‌گذارد. همچنین در برخی اقلیم‌ها یا بافت‌های متراکم شهری، کارایی این فضاها ممکن است به دلیل محدودیت زمین، تابش شدید، رطوبت بالا یا نبود جریان مناسب هوا کاهش یابد (Salameh et al., 2024; Almhafdy et al., 2019; Yang & Misni, 2025).

### ۴ .راهکارهای کف محور[1]

این دسته شامل راهکارهای مستقر در تراز کف یا زیر سطح زمین است که با بهره‌گیری از دمای ثابت خاک، هوای تازه را از پایین‌ترین نقطه وارد و به‌صورت عمودی به سمت بالا هدایت می‌کنند (Zhang et al., 2020; Zolfaghari et al., 2021). در عمق ۳ تا ۵ متر، دمای خاک نوسان سالانه بسیار کمی دارد (۲۰-۱۵ درجه سانتی‌گراد). کانال‌های زیرزمینی هوا را از خارج گرفته، با عبور از این لایه با دمای پایدار، در تابستان خنک و در زمستان گرم می‌کنند. سپس هوای پیش تعدیل‌شده از طریق دریچه‌های کف یا سیستم کف کاذب وارد شده و به دلیل چگالی بیشتر، در ترازپایین باقی‌مانده و به‌تدریج بالا می‌رود (لایه‌بندی حرارتی) (Alsaad et al., 2018). راهکارهای اصلی این دسته شامل دریچه‌های کف، سیستم توزیع هوای زیر کف (UFAD) و کانال‌های زیرزمینی (EAHE) هستند. مهم‌ترین مزیت آن‌ها، پیش تعدیل هوا و کاهش بار حرارتی تهویه است. اگرچه UFAD در کاربرد متداول به فن‌های مکانیکی وابسته است، در این پژوهش صرفاً به‌عنوان مجرای توزیع غیرفعال و با بهره‌گیری از اثر شناوری حرارتی (بدون مصرف انرژی فعال) در نظر گرفته شده است.

### ۴-۱-۲ .چارچوب نهایی طبقه‌بندی: جدول جامع راهکارها

بر اساس مرور نظام‌مند منابع و تحلیل کالبدی-عملکردی، ۱۷ راهکار غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه در قالب چهار دسته اصلی طبقه‌بندی شده‌اند. این چارچوب با ارائه منطق عملکردی و ارجاعات گسترده (شامل منابع بین‌المللی و داخلی معتبر) به طور کامل در زیر بیان شده است (جدول شماره ۱).

**جدول ۱. طبقه‌بندی نوین راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه بر اساس منطق کالبدی-عملکردی (مأخذ: نگارنده)**

| دسته | کد و راهکار | منطق عملکردی اصلی | (همراه با رفرنس) |
|---|---|---|---|
| سقف محور | R1 دودکش خورشیدی | اثر دودکشی ناشی از جذب حرارت خورشیدی | (Sasan Kamelia & Ibrahimb, 2025; Nguyen et al., 2021; |
| | R2 پنجره سقفی | تهویه شناوری و باد محور از سقف؛ خروج هوای گرم از بالا | (Chen et al., 2022; Yin et al., 2024) |
| | R3 دریچه خطالرأس | خروج هوای گرم از بالاترین نقطه؛ تقویت تهویه متقاطع | (Chen et al., 2022) |
| | R4 سقف دوپوسته | حفره هوایی میانی با اثر دودکشی و عایق‌بندی پویا | (Abuseif & Gou, 2018) |
| | R5 بادگیر | هدایت باد از ارتفاع بالا؛ ترکیب با سرمایش تبخیری | (Nejat, 2018) |

[1]( Floor based Strategies)

| دسته | کد و راهکار | منطق عملکردی اصلی | (همراه با رفرنس) |
|---|---|---|---|
| | بادخور/بادخان R6 | فشار مثبت (دمش) یا منفی (مکش) ناشی از باد | (MohammadRezaei&Khodabakhshian) |
| دیوار محور | پنجره و بازشو W1 | اختلاف فشار ناشی از باد؛ تهویه متقاطع و تک‌سویه | (Yin et al., 2024; Rahaee et al., 2024) |
| | W2 سایبان | هدایت و تعدیل جریان باد ورودی؛ کاهش بار حرارتی | (Tablada et al., 2020; Zhang et al., 2021; Rahaee et al., 2024) |
| | نمای دوپوسته W3 | حفره هوای عمودی با تهویه طبیعی در حفره | (Zarghami & Abad, 2015; Siadati et al., 2021) |
| | دیوار ترومپ W4 | جذب حرارت خورشیدی توسط دیوار با جرم حرارتی بالا | (Dhahri et al., 2021; Brito-Coimbra et al., 2021) |
| عناصر میانی | M1 آتریوم | اثر دودکشی در مقیاس ساختمان؛ تهویه عمودی ناشی از شناوری حرارتی | (Sha et al., 2022; Moosavi et al., 2015) |
| | حیاط مرکزی M2 | تعدیل اقلیم خرد؛ اثر دودکشی و تهویه باد محور | (Salameh et al., 2024; Yang & Misni, 2025) |
| | چیدمان داخلی M3 | هدایت و توزیع جریان هوا با پارتیشن‌بندی | (Zhang et al., 2024; Fam et al., 2025) |
| | راهرو و پلکان M4 | مجرای افقی و عمودی جریان هوا؛ تقویت اثر دودکشی | (Loo et al., 2021) |
| کف محور | F1 دریچه کف | ورود هوای خنک‌تر از ترازپایین به دلیل اختلاف دما | (Zolfaghari et al., 2021; Zhang et al., 2020) |
| | سیستم توزیع هوای زیر کف F2 | لایه‌بندی حرارتی؛ جریان از پایین‌به‌بالا؛ هوای تازه در منطقه تنفسی | (Zolfaghari et al., 2021; Xia & Lyu, 2024) |
| | کانال‌های F3 زیرزمینی | پیش سرمایش/پیش‌گرمایش با دمای پایدار خاک در عمق ۳-۵ متر | (Zhang et al., 2020; Maerefat & Haghighi, 2010) |

چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش، بر خلاف طبقه‌بندی‌های پیشین که عمدتاً فیزیک-محور یا فهرست‌وار بودند، یک نظام طراحی-محور و معماری-پایه است. در این نظام، هر راهکار نه‌تنها بر اساس عملکرد فیزیکی، بلکه بر اساس جایگاه کالبدی و نقش آن در سامانه یکپارچه تنفس ساختمان تعریف شده است. این ویژگی امکان مقایسه سیستماتیک، انتخاب آگاهانه و ترکیب هدفمند راهکارها را در فرایند طراحی معماری تنفس‌پذیر برای اقلیم‌های چهارگانه ایران فراهم می‌آورد.

## ۲-۴- نتایج ارزیابی چند معیاری خبرگان

در این بخش، یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌های پرسش‌نامه‌های توزیع‌شده میان ۶۳ خبره (شامل ۱۷ پاسخ برای اقلیم معتدل و مرطوب، ۱۵ پاسخ برای اقلیم گرم و خشک، ۱۶ پاسخ برای اقلیم سرد و کوهستانی و ۱۵ پاسخ برای اقلیم گرم و مرطوب) ارائه می‌شود.

### ۱-۲-۴. تحلیل توصیفی نمونه خبرگانی

جامعه آماری این پژوهش شامل ۶۳ نفر از متخصصان حوزه معماری اقلیمی، انرژی ساختمان و تهویه غیرفعال بود. از نظر سطح تحصیلات، ۳۱ نفر دارای مدرک دکتری و ۳۲ نفر دارای مدرک کارشناسی‌ارشد بودند. همچنین، ۳۲ نفر بیش از ۱۵ سال، ۱۲ نفر بین ۱۰ تا ۱۵ سال، ۱۵ نفر بین ۵ تا ۱۰ سال و ۴ نفر کمتر از ۵ سال سابقه فعالیت حرفه‌ای داشتند. از منظر حوزه تخصصی نیز، ۲۶ نفر در طراحی معماری، ۲۵ نفر در پژوهش دانشگاهی، ۸ نفر در نظارت اجرایی و ۴ نفر در مشاوره انرژی فعالیت داشتند. این ترکیب نشان می‌دهد که نمونه پژوهش از تنوع علمی و حرفه‌ای مطلوبی برخوردار بوده و به دلیل غلبه خبرگان باسابقه طولانی و تجربه تخصصی

مرتبط، از اعتبار لازم برای داوری و ارزیابی موضوع پژوهش برخوردار است.

### ۴-۲-۲ .وزن‌دهی معیارهای ارزیابی با روش آنتروپی شانون

برای ۸ معیار اصلی (کارایی تهویه، کیفیت هوای داخلی، عملکرد اجرایی، هزینه اجرا، یکپارچگی معماری، سهولت نگهداری، کنترل‌پذیری، انعطاف‌پذیری)، ماتریس تصمیم به ابعاد ۱۷ (راهکار) × ۸ (معیار) از میانگین امتیازات همه اقلیم‌ها تشکیل شد. وزن‌ها با استفاده از روابط آنتروپی شانون محاسبه گردیده و نتایج وزن‌دهی ارائه شده است (جدول شماره ۲).

**جدول ۲.وزن نهایی معیارها بر اساس روش آنتروپی شانون**

| ردیف | معیار | آنتروپی (E_j) | درجه تنوع (d_j) | وزن نهایی (w_j) |
|---|---|---|---|---|
| ۱ | کارایی تهویه | ۰/۹۵۳۲ | ۰/۰۴۶۸ | ۰/۱۹۲ |
| ۲ | کیفیت هوای داخلی | ۰/۹۵۸۱ | ۰/۰۴۱۹ | ۰/۱۷۲ |
| ۳ | عملکرد اجرایی | ۰/۹۶۱۴ | ۰/۰۳۸۶ | ۰/۱۵۹ |
| ۴ | هزینه اجرا | ۰/۹۶۷۳ | ۰/۰۳۲۷ | ۰/۱۳۴ |
| ۵ | یکپارچگی معماری | ۰/۹۷۱۵ | ۰/۰۲۸۵ | ۰/۱۱۷ |
| ۶ | سهولت نگهداری | ۰/۹۷۴۴ | ۰/۰۲۵۶ | ۰/۱۰۵ |
| ۷ | کنترل‌پذیری | ۰/۹۷۸۲ | ۰/۰۲۱۸ | ۰/۰۸۹ |
| ۸ | انعطاف‌پذیری | ۰/۹۷۹۳ | ۰/۰۲۰۷ | ۰/۰۸۵ |
| جمع | | | ۰/۲۴۳۸ | ۱/۰۰۰ |

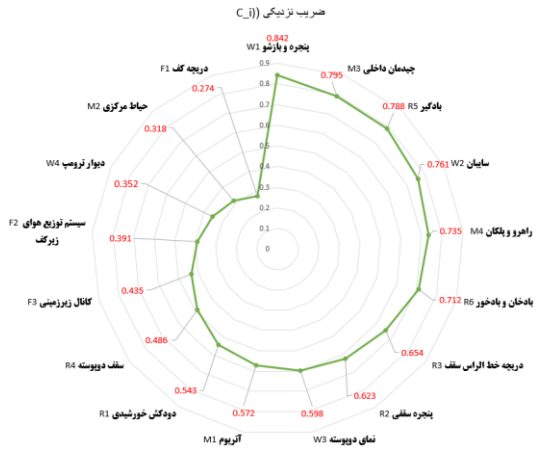
با بررسی بیشترین وزن‌ها، کارایی تهویه (۱۹/۲٪) و کیفیت هوای داخلی (۱۷/۲٪) مهم‌ترین معیارها از دیدگاه عینی داده‌ها بودند که پراکندگی بالای امتیازهای خبرگان در این دو معیار نشان می‌دهد تمایز راهکارها عمدتاً بر اساس این دو مؤلفه شکل می‌گیرد و همین‌طور معیار انعطاف‌پذیری (۸/۵٪) و کنترل‌پذیری (۸/۹٪) کمترین نقش را در تمایز راهکارها دارند.

### ۴-۲-۳ .رتبه‌بندی راهکارها با روش TOPSIS در چهار اقلیم ایران

ماتریس تصمیم اولیه برای هر اقلیم به ابعاد ۱۷ راهکار × ۸ معیار از میانگین امتیازات خبرگان (مقیاس ۱ تا ۵) تشکیل شد. پس از نرمال‌سازی برداری (روش وکتور) و تعیین ایده‌آل مثبت ($A^+$) و منفی($A^-$) ، فاصله هر راهکار از ایده‌آل‌ها و ضریب نزدیکی ($C_i$) محاسبه گردید.

#### ۱. اقلیم معتدل و مرطوب

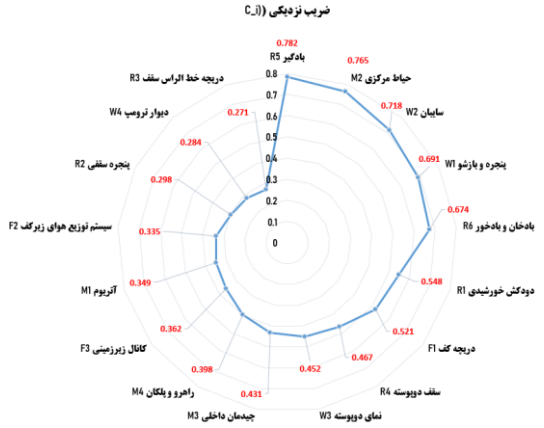
پنج راهکار برتر در اقلیم معتدل و مرطوب به ترتیب عبارت‌اند از :پنجره و بازشو، چیدمان داخلی، بادگیر، سایبان و راهرو و پلکان هستند و ازسوی‌دیگر، دریچه کف، حیاط مرکزی و دیوار ترومپ کمترین اثربخشی را نشان دادند (شکل شماره ۲).




**شکل ۲. رتبه‌بندی راهکارها در اقلیم معتدل و مرطوب**

#### ۲. اقلیم گرم و خشک

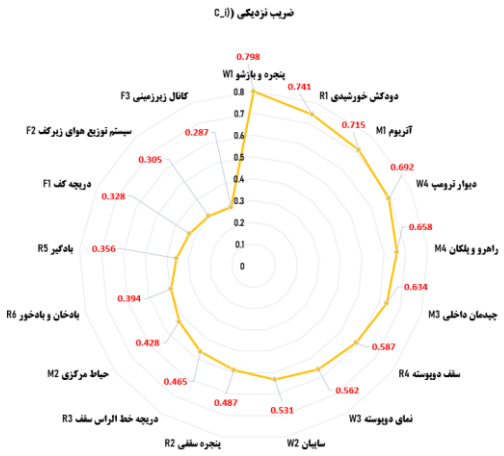
در اقلیم گرم و خشک، بادگیر و حیاط مرکزی بیشترین کارایی را در جریان‌سازی هوای تازه دارند. سایبان، پنجره و بازشو و بادخور و بادخان نیز در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. راهکارهایی مانند دریچه خط الراس سقف، دیوار ترومپ و پنجره سقفی کمترین اثربخشی را نشان دادند (شکل شماره ۳).




شکل ۳. رتبه‌بندی راهکارها در اقلیم گرم و خشک

## ۳. اقلیم سرد و کوهستانی

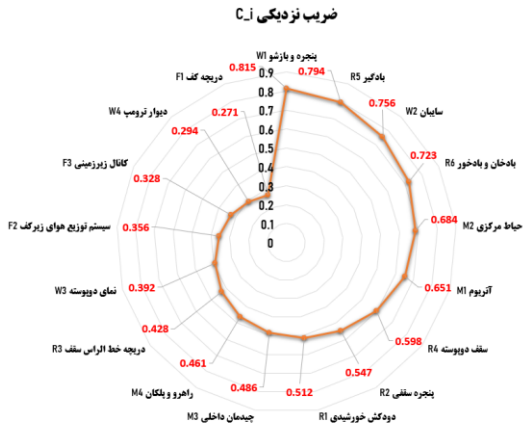
در اقلیم سرد و کوهستانی، پنج راهکار برتر شامل پنجره و بازشو، دودکش خورشیدی، آتریوم، دیوار ترومپ و راهرو و پلکان هستند، درحالی‌که سیستم توزیع هوای زیر کف، بادگیر، دریچه کف و کانال زیر زمینی به‌عنوان راهکارهای ضعیف ارزیابی شده‌اند (شکل شماره ۴).




شکل ۴. رتبه‌بندی راهکارها در اقلیم سرد و کوهستانی

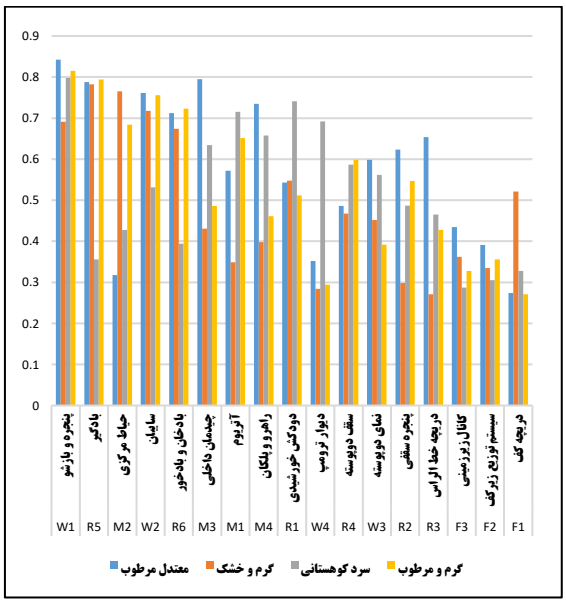
## ۴. اقلیم گرم و مرطوب

در اقلیم گرم و مرطوب، پنجره و بازشو و بادگیر بیشترین کارایی را در ایجاد جریان هوای تازه دارند .سایبان با هدایت جریان هوا و ایجاد سایه، رتبه سوم را کسب کرده است .بادخان و بادخور، حیاط مرکزی و آتریوم نیز عملکرد مطلوبی نشان می‌دهند. در مقابل، دریچه کف، دیوارترومپ و کانال زیرزمینی کمترین اثربخشی را دارند (شکل شماره ۵).




شکل ۵. رتبه‌بندی راهکارها در اقلیم گرم و مرطوب

مقایسه تطبیقی ضریب نزدیکی $(C_i)$ راهکارهای غیرفعال تهویه در اقلیم‌های چهارگانه ایران بر اساس روش TOPSIS(شکل شماره ۶).




شکل ۶. ضریب نزدیکی راهکارها در چهار اقلیم

### ۴-۲-۴ .مقایسه تطبیقی رتبه‌بندی در چهار اقلیم

عملکرد هر راهکار به شرایط اقلیمی وابسته است. بادگیر (R5)در اقلیم‌های گرم خشک (۱) و گرم مرطوب (۲) بهترین عملکرد را دارد، اما در اقلیم سرد تا رتبه ۱۴ افت می‌کند. در مقابل، پنجره و بازشو (W1) با رتبه‌های اول در سه اقلیم (معتدل مرطوب، سرد، گرم مرطوب) و رتبه ۴ در گرم خشک، بیشترین انعطاف‌پذیری را نشان می‌دهد.

دودکش خورشیدی (R1) در اقلیم سرد بسیار مؤثر است (رتبه ۲)، اما در سایر اقلیم‌ها عملکرد متوسط تا ضعیفی دارد. آتریوم (M1) در اقلیم سرد (۳) و گرم مرطوب (۶) مناسب است، ولی در گرم خشک (۱۳) و معتدل مرطوب (۱۰) چندان موفق نیست (جدول شماره ۳).

**جدول ۳. خلاصه رتبه هر راهکار در اقلیم‌های مختلف**

| کد راهکار | عنوان راهکار | معدل مرطوب | گرم و خشک | سرد کوهستانی | گرم و مرطوب |
|---|---|---|---|---|---|
| W1 | پنجره و بازشو | ۱ | ۴ | ۱ | ۱ |
| M3 | چیدمان داخلی | ۲ | ۱۰ | ۶ | ۱۰ |
| R5 | بادگیر | ۳ | ۱ | ۱۴ | ۲ |
| W2 | سایبان | ۴ | ۳ | ۹ | ۳ |
| M4 | راهرو و پلکان | ۵ | ۱۱ | ۵ | ۱۱ |
| R6 | بادخان و بادخور | ۶ | ۵ | ۱۳ | ۴ |
| R3 | دریچه خط الرأس سقف | ۷ | ۱۷ | ۱۱ | ۱۲ |
| R2 | پنجره سقفی | ۸ | ۱۵ | ۱۰ | ۸ |
| W3 | نمای دوپوسته | ۹ | ۹ | ۸ | ۱۳ |
| M1 | آتریوم | ۱۰ | ۱۳ | ۳ | ۶ |
| R1 | دودکش خورشیدی | ۱۱ | ۶ | ۲ | ۹ |
| R4 | سقف دوپوسته | ۱۲ | ۸ | ۷ | ۷ |
| F3 | کانال زیرزمینی | ۱۳ | ۱۲ | ۱۷ | ۱۵ |
| F2 | سیستم توزیع هوای زیرکف | ۱۴ | ۱۴ | ۱۶ | ۱۴ |
| W4 | دیوار ترومپ | ۱۵ | ۱۶ | ۴ | ۱۶ |
| M2 | حیاط مرکزی | ۱۶ | ۲ | ۱۲ | ۵ |
| F1 | دریچه کف | ۱۷ | ۷ | ۱۵ | ۱۷ |

### ۴-۲-۵ .تحلیل حساسیت و پایایی رتبه‌بندی

برای بررسی استواری نتایج TOPSIS ، سه نوع تحلیل انجام شد: تحلیل حساسیت اوزان، مقایسه با روش VIKOR و بازآزمایی تصادفی با حذف داده‌های پرت.

**الف) تحلیل حساسیت اوزان:** وزن دو معیار با اهمیت‌ترین («کارایی تهویه» ۰/۱۹۲ و «کیفیت هوای داخلی» ۰/۱۷۲) به‌صورت جداگانه ±۱۰٪ و ±۲۰٪ تغییر یافت و وزن سایر معیارها به‌تناسب تعدیل شد. در تمامی سناریوها، پنج راهکار برتر هر اقلیم بدون تغییر ماندند و حداکثر جابه‌جایی در رتبه‌های ۶ تا ۱۰ رخ داد.

**ب) مقایسه با روش VIKOR :** رتبه‌بندی راهکارها با روش VIKORنیز محاسبه و ضریب همبستگی اسپیرمن بین دو روش به دست آمد (جدول شماره ۴).

**جدول ۴ .همبستگی اسپیرمن بین رتبه‌بندی TOPSIS و VIKOR**

| اقلیم | ρ | p-value |
|---|---|---|
| معتدل و مرطوب | ۰/۸۷ | p < 0.01 |
| گرم و خشک | ۰/۸۴ | p < 0.01 |
| سرد و کوهستانی | ۰/۹۱ | p < 0.01 |
| گرم و مرطوب | ۰/۸۵ | p < 0.01 |

همبستگی بالای ۰/۸ در همه اقلیم‌ها نشان‌دهنده استقلال نسبی نتایج از روش تصمیم‌گیری است.

**ج) بازآزمایی تصادفی(Random Re-test)**

به‌منظور اطمینان از عدم اثرگذاری داده‌های پرت، ۱۰٪ از داده‌های هر اقلیم (به طور تصادفی) حذف و مجدداً رتبه‌بندی با TOPSIS انجام شد. فرایند یادشده ۵۰ بار تکرار گردید. در بیش از ۹۵٪ تکرارها، پنج راهکار برتر هر اقلیم مشابه نتایج

اصلی بودند که حاکی از استواری نتایج در برابر حذف تصادفی داده‌هاست.

**د) همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن بین اقلیم‌ها**

افزون بر تحلیل‌های فوق، برای بررسی میزان توافق یا تمایز اولویت‌بندی راهکارها در چهار اقلیم، ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (ρ) محاسبه شد این ضریب در دامنه [−۱, +۱] نشان‌دهنده تشابه الگوی رتبه‌بندی است. (جدول شماره ۵).

**جدول ۵. ضریب همبستگی اسپیرمن بین رتبه‌بندی اقلیم‌ها**

| جفت اقلیم | ضریب همبستگی اسپیرمن(ρ) | سطح معناداری (p-value) |
|---|---|---|
| معتدل مرطوب - گرم خشک | ۰/۲۵ | ۰/۳۳ غیرمعنادار |
| معتدل مرطوب - گرم مرطوب | ۰/۶۱ | ۰/۰۱ معنادار |
| گرم خشک - گرم مرطوب | ۰/۶۶ | ۰/۰۱> معنادار |
| معتدل مرطوب - سرد کوهستانی | ۰/۳۳ | ۰/۲۰ غیرمعنادار |
| گرم خشک - سرد کوهستانی | -۰/۰۴ | ۰/۸۷ غیرمعنادار |
| سرد کوهستانی - گرم مرطوب | ۰/۲۶ | ۰/۳۲ غیرمعنادار |

**تحلیل یافته‌های همبستگی:**

- همبستگی قوی و معنادار بین اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب (ρ=0.66, p<0.01) نشان می‌دهد که در هر دو اقلیم گرم، راهکارهای ایجاد جریان هوای افقی با سرعت بالا (بادگیر، بازشوها، سایبان) اولویت مشابهی دارند. تفاوت در رتبه حیاط مرکزی (رتبه ۲ در گرم خشک در برابر رتبه ۶ در گرم مرطوب) ناشی از نقش سرمایش تبخیری در اقلیم خشک است که در اقلیم مرطوب کارایی ندارد.
- همبستگی ضعیف و غیرمعنادار اقلیم سرد با سایر اقلیم‌ها (ρ بین ۰/۰۴- تا ۰/۳۳) تأیید می‌کند که الگوی تهویه غیرفعال در اقلیم سرد کاملاً متفاوت است؛ هدف اصلی «تهویه با حداقل اتلاف حرارت» است، بنابراین راهکارهایی مانند دیوار ترومپ و دودکش خورشیدی رتبه بالایی دارند.
- همبستگی غیرمعنادار بین اقلیم معتدل مرطوب و گرم خشک (ρ=0.25, p=0.33) تأیید می‌کند که این دو اقلیم نیازمند راهبردهای تهویه کاملاً متفاوتی هستند.

**جمع‌بندی کنترل استواری:** نتایج سه آزمون مستقل (تحلیل حساسیت اوزان، مقایسه باVIKOR ، بازآزمایی تصادفی) و نیز تحلیل همبستگی اسپیرمن، همگی مؤید آن است که رتبه‌بندی ارائه‌شده در این پژوهش از استواری و پایایی مناسبی برخوردار بوده و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری در طراحی معماری تنفس‌پذیر اقلیم‌های ایران قرار گیرد.

### ۶-۲-۴ .یافته‌های تحلیل هم‌افزایی راهکارها

به‌منظور شناسایی ترکیب‌های هم‌افزا، از خبرگان هر اقلیم خواسته شد سه راهکار با بالاترین قابلیت همکاری مؤثر را معرفی کنند. مجموع زوج‌های استخراج‌شده در اقلیم‌های معتدل مرطوب (۴۱ زوج)، گرم خشک (۴۵ زوج)، سرد کوهستانی (۴۸ زوج) و گرم مرطوب (۴۵ زوج) مورد تحلیل قرار گرفت. ترکیب‌های سه‌تایی پر تکرار در اقلیم‌های مختلف در زیر آمده است (جدول شماره ۶).

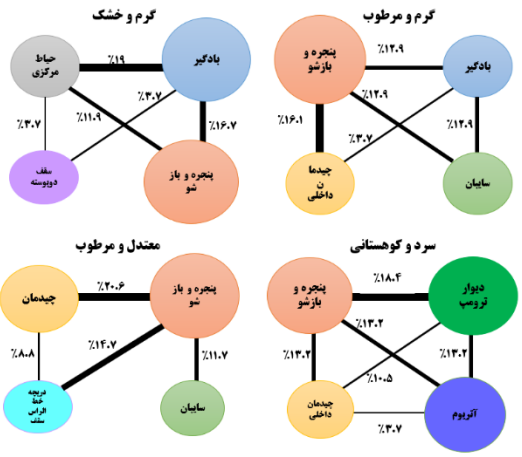
**جدول ۶.ترکیب‌های سه‌تایی هم‌افزا (پرتکرارترین) در چهار اقلیم**

| تعداد | ترکیب سه‌تایی (راهکار اول + دوم + سوم) | اقلیم |
|---|---|---|
| ۳ | پنجره و بازشو +دریچه خط الراس +چیدمان داخلی سقف | معتدل و مرطوب |
| ۲ | سایبان +پنجره و بازشو +نمای دوپوسته | |
| ۴ | پنجره و بازشو +آتریوم +دیوار ترومپ | سرد و کوهستانی |
| ۲ | دودکش خورشیدی +آتریوم +نمای دوپوسته | |
| ۳ | پنجره و بازشو +چیدمان داخلی +دیوار ترومپ | |
| ۴ | پنجره و بازشو +حیاط مرکزی +بادگیر | گرم و خشک |
| ۳ | سقف دوپوسته +حیاط مرکزی +بادگیر | |
| ۳ | پنجره و بازشو +حیاط مرکزی +چیدمان داخلی | گرم و مرطوب |

| تعداد | ترکیب سه‌تایی (راهکار اول + دوم + سوم) | اقلیم |
|---|---|---|
| ۳ | سایبان +پنجره و بازشو +بادگیر | |

در اقلیم معتدل و مرطوب، محور هم‌افزایی بر زوج «پنجره و بازشو + چیدمان داخلی» (٪ ۲۰/۶) استوار است و سپس زوج‌های «پنجره و بازشو + دریچه خط الراس سقف» (٪۱۴/۷) و «سایبان + پنجره و بازشو» ( ٪۱۱/۸ ) قرار دارند. در اقلیم سرد و کوهستانی، تمرکز بر دریافت حرارت خورشیدی است؛ زوج «پنجره و بازشو + دیوار ترومپ» با ٪۱۸/۴ بیشترین همراهی را دارد و سه زوج دیگر (پنجره+آتریوم، آتریوم+دیوار ترومپ، پنجره+چیدمان داخلی) هرکدام٪ ۱۳/۲ همراهی نشان می‌دهند.

در اقلیم گرم و خشک، هسته اصلی هم‌افزایی «حیاط مرکزی + بادگیر» ( ٪۱۹/۰ ) است و پس از آن «پنجره و بازشو + بادگیر» ( ٪۱۶/۷ ) و «پنجره و بازشو + حیاط مرکزی» (٪۱۱/۹) قرار دارند. در اقلیم گرم و مرطوب، بیشترین همراهی متعلق به زوج «پنجره و بازشو + چیدمان داخلی» (٪۱۶/۱) است و سه زوج «سایبان+پنجره»، «سایبان+بادگیر» و «پنجره+بادگیر» هرکدام با ٪۱۲/۹ در رتبه بعدی قرار می‌گیرند (شکل شماره ۷).




**شکل ۷.زوج راهکارهای دوتایی با بیشترین هم وقوع**

### ۸-۲-۴ -تحلیل عملکرد دسته‌بندی چهارگانه راهکارها در اقلیم‌های مختلف

افزون بر رتبه‌بندی تک راهکارها، پرسش کلیدی دیگر آن است که کدام دسته کالبدی (سقف محور، دیوار محور، فضاهای میانی، کف محور) در هر اقلیم عملکرد بهتری داشته است. برای پاسخ، میانگین رتبه تمام راهکارهای هر دسته در هر اقلیم محاسبه شد (هرچه میانگین کمتر، عملکرد بهتر) (جدول شماره ۷).

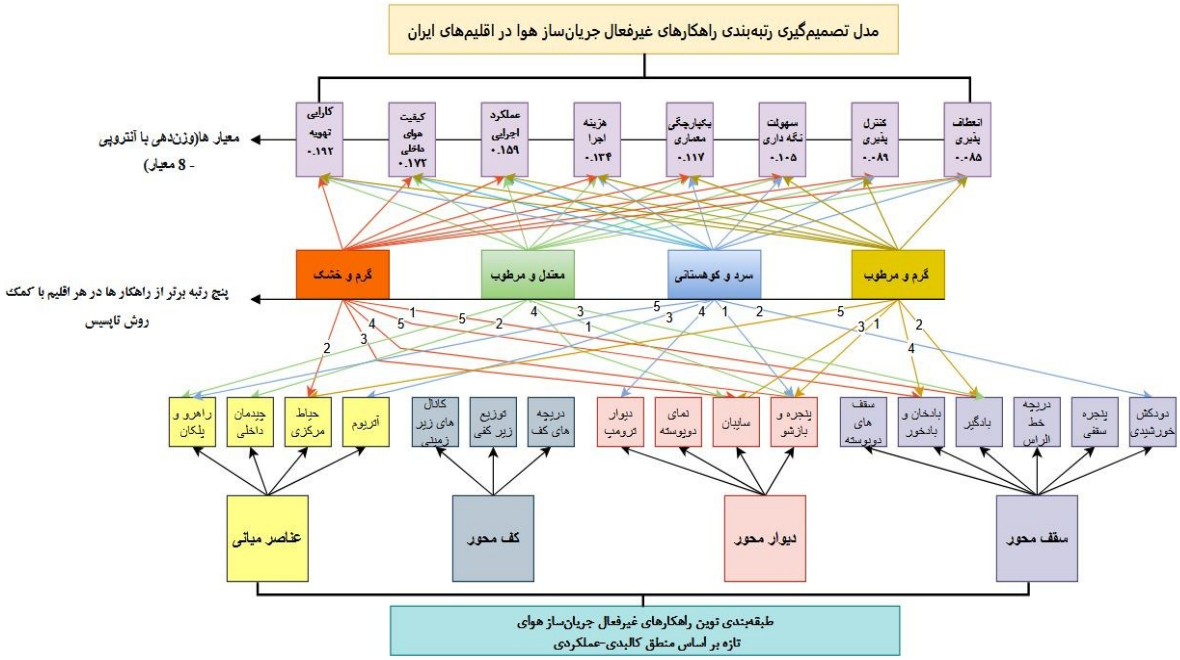
**جدول ۷. میانگین رتبه هر دسته کالبدی در چهار اقلیم ایران**

| دسته اصلی | اقلیم معتدل مرطوب | اقلیم گرم و خشک | اقلیم سرد و کوهستانی | اقلیم گرم و مرطوب |
|---|---|---|---|---|
| دیوار محور | ۷/۲۵ (رتبه ۱) | ۷/۵۰ (رتبه ۲) | ۵/۵۰ (رتبه ۱) | ۷/۵۰ (رتبه ۲) |
| فضاهای میانی | ۸/۰۰ (رتبه ۲) | ۶/۵۰ (رتبه ۱) | ۷/۷۵ (رتبه ۲) | ۶/۵۰ (رتبه ۱) |
| سقف محور | ۸/۰۰ (رتبه ۲) | ۹/۱۷ (رتبه ۳) | ۹/۳۳ (رتبه ۳) | ۸/۸۳ (رتبه ۳) |
| کف محور | ۱۴/۶۷ (رتبه ۴) | ۱۴/۰۰ (رتبه ۴) | ۱۴/۶۷ (رتبه ۴) | ۱۴/۶۷ (رتبه ۴) |

نتایج نشان می‌دهد که عملکرد راهکارها را نمی‌توان صرفاً بر اساس نوع تکنیک تهویه ارزیابی کرد، بلکه «مسیر کالبدی حرکت هوا» تعیین‌کننده‌تر است. در اقلیم معتدل مرطوب با اختلاف دمای محدود، شناوری حرارتی نقشی ندارد و الگوی غالب تهویه افقی و متقاطع است؛ ازاین‌رو بازشوهای دیوار محور و چیدمان داخلی بهترین عملکرد را دارند و فضاهای میانی نقش توزیع هوا را ایفا می‌کنند.

در اقلیم گرم و خشک، اختلاف دمای زیاد شناوری حرارتی را فعال کرده و تهویه عمودی حاکم می‌شود؛ بادگیر و حیاط مرکزی سیستم کارآمدی ایجاد می‌کنند که با معماری سنتی کویری ایران همخوانی کامل دارد. در اقلیم سرد و کوهستانی، هدف اصلی تأمین هوای تازه همراه با حفظ گرمای داخلی است؛ ازاین‌رو عناصر دیوار محور مانند پنجره، دیوار ترومپ و دودکش خورشیدی بهترین عملکرد را دارند. در اقلیم گرم و مرطوب نیز دیوار محورها غالب‌اند، اما وابستگی به‌سرعت جریان هوا به دلیل رطوبت بالا شدیدتر است؛ بنابراین بازشوها، بادگیر و سایبان در رتبه‌های بالا قرار می‌گیرند و سقف محورها می‌توانند جریان عمودی را تقویت کنند.

آنچه تا اینجا از یافته‌ها برمی‌آید، وابستگی عمیق عملکرد راهکارهای غیرفعال به شرایط اقلیمی و نیز نقش تعیین‌کننده «مسیر کالبدی حرکت هوا» در کنار نوع تکنیک تهویه است. برای‌آنکه این ارتباط پیچیده میان ورودی‌ها، روش‌ها و خروجی‌های پژوهش به‌صورت یکپارچه و بصری قابل‌درک باشد، مدل مفهومی تصمیم‌گیری چندمعیاره در زیر ارائه شده است (شکل شماره ۸).




**شکل ۸. مدل مفهومی تصمیم‌گیری نهایی**

## ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

پژوهش حاضر باهدف پاسخ به خلأ موجود در ادبیات تهویه طبیعی، یعنی نبود یک چارچوب جامع، اقلیم محور و طراحی پایه برای طبقه‌بندی و ارزیابی راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه، انجام شد. نتایج نشان داد که طبقه‌بندی‌های پیشین، هرچند از منظر فیزیکی یا عنصری ارزشمند بوده‌اند، اما برای تصمیم‌گیری در فرایند طراحی معماری تنفس‌پذیر کافی نبوده‌اند؛ زیرا رابطه میان جایگاه کالبدی عناصر، مسیر حرکت هوا و شرایط اقلیمی را به‌صورت یکپارچه تبیین نمی‌کردند. براین‌اساس، چارچوب پیشنهادی این پژوهش باتکیه‌بر منطق کالبدی - عملکردی، راهکارهای غیرفعال را در چهار دسته‌ی سقف محور، دیوار محور، فضاهای میانی و کف محور سامان داد و امکان مقایسه‌پذیری و تحلیل طراحی محور آن‌ها را فراهم ساخت.

یافته‌های ارزیابی چندمعیاره نشان داد که در میان معیارهای بررسی‌شده، «کارایی تهویه» و «کیفیت هوای داخلی» بیشترین وزن را در تصمیم‌گیری نهایی دارند. این نتیجه بیانگر آن است که از نگاه خبرگان، موفقیت یک راهکار غیرفعال بیش از هر چیز به توان آن در تأمین هوای تازه، کاهش آلاینده‌ها و بهبود شرایط سلامت و آسایش وابسته است. در مقابل، معیارهایی مانند انعطاف‌پذیری و کنترل‌پذیری اگرچه مهم‌اند، اما نقش کمتری در تمایز میان گزینه‌ها داشته‌اند؛ بنابراین، در طراحی راهکارهای تنفس‌پذیر، اولویت اصلی باید بر عملکرد واقعی جریان هوا و کیفیت محیط داخل متمرکز باشد، نه صرفاً بر سهولت استفاده یا قابلیت تغییرپذیری.

تحلیل TOPSIS در چهار اقلیم ایران نشان داد که هیچ راهکار واحدی برای همه شرایط اقلیمی مناسب نیست و کارایی هر راهکار به طور مستقیم از ویژگی‌های اقلیم

تبعیت می‌کند. در اقلیم معتدل و مرطوب، راهکارهای دیوار محور و فضاهای میانی، به‌ویژه پنجره‌ها و چیدمان داخلی، عملکرد برتری داشتند. در اقلیم گرم و خشک، بادگیر و حیاط مرکزی به‌عنوان عناصر اصلی تهویه عمودی و تعدیل‌کننده جریان هوا، بالاترین رتبه را کسب کردند. در اقلیم سرد و کوهستانی، راهکارهای دیوار محور مانند پنجره، دیوار ترومپ و دودکش خورشیدی مؤثرتر بودند؛ زیرا امکان تأمین هوای تازه همراه با حفظ حرارت داخلی را فراهم می‌کردند. در اقلیم گرم و مرطوب نیز بازشوها، بادگیر و سایبان در رتبه‌های بالاتر قرار گرفتند، زیرا در این شرایط، افزایش سرعت جریان هوا و کاهش فشار رطوبتی نقش تعیین‌کننده‌ای دارد.

ازسوی‌دیگر، تحلیل هم‌افزایی نشان داد که تهویه غیرفعال زمانی بیشترین کارایی را دارد که به‌صورت ترکیبی و نه منفرد طراحی شود. ترکیب‌هایی مانند «بادگیر + حیاط مرکزی + بازشوها» در اقلیم گرم و خشک، یا «پنجره + دیوار ترومپ + آتریوم» در اقلیم سرد، نشان دادند که هم‌افزایی میان عناصر معماری می‌تواند عملکرد تهویه را به طور معناداری ارتقا دهد. در نتیجه، معماری تنفس‌پذیر نه بر پایه‌ی یک عنصر منفرد، بلکه بر اساس سازماندهی هوشمندانه‌ی چند راهکار مکمل شکل می‌گیرد.

در مجموع، این پژوهش سه دستاورد اصلی دارد: ارائه یک طبقه‌بندی نوین و طراحی محور، ارزیابی اقلیم محور با رویکرد چندمعیاره، و شناسایی الگوهای ترکیبی هم‌افزا. این دستاوردها می‌توانند به‌عنوان ابزاری تصمیم یار برای معماران و پژوهشگران در طراحی ساختمان‌های پایدار در ایران مورداستفاده قرار گیرند. لازم به ذکر است که پژوهش حاضر باهدف شبیه‌سازی عملکرد فیزیکی راهکارهای غیرفعال جریان‌ساز هوای تازه انجام نشده است، بلکه تمرکز آن بر ارائه یک چارچوب طبقه‌بندی نوین و اولویت‌بندی اقلیم محور بر پایه دانش خبرگان بوده است. ازاین‌رو، نتایج این مطالعه بیانگر داوری تخصصی خبرگان درباره کارایی نسبی راهکارها در اقلیم‌های مختلف ایران است و نه اندازه‌گیری مستقیم رفتار جریان هوا یا نرخ تهویه در شرایط واقعی. بدیهی است که اعتبارسنجی نتایج از طریق شبیه‌سازی‌های CFD، تحلیل‌های عددی و مطالعات میدانی می‌تواند به‌عنوان گام مکمل در پژوهش‌های آینده، به تعمیق و تعمیم‌پذیری یافته‌ها کمک کند.

**۶- مشارکت نویسندگان :**تمامی نویسندگان در انجام پژوهش مشارکت داشته، مقاله را بازبینی و نسخه نهایی آن را تأیید کرده‌اند و مسئولیت محتوای آن را پذیرفته‌اند.

**-تعارض منافع :**نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شغلی، شخصی یا سازمانی که بتواند بر نتایج یا تفسیر این پژوهش تأثیرگذار باشد، وجود ندارد.

**-تأمین مالی:** نویسندگان اظهار می‌دارند که این پژوهش و نگارش مقاله هیچ‌گونه حمایت مالی، گرنت پژوهشی یا منبع مالی دیگری دریافت نکرده است .

**-بیانیه دسترس پذیری داده ها :**داده‌های پشتیبان این پژوهش بنا به درخواست منطقی از نویسنده مسئول قابل دریافت است

**-بیانیه استفاده از هوش مصنوعی :**نویسندگان اظهار می‌دارند که در هیچ‌یک از مراحل تهیه، نگارش، ویرایش، تحلیل، ترجمه یا آماده‌سازی این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی مولد یا فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده نشده است

## ۷-منابع


- Abuseif, M., & Gou, Z. (2018). A Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness. *Energies, 11*(11), 3196.

https://doi.org/10.3390/en11113196

- Ali, M. (2024). *Enhancing Natural Ventilation in Family House Buildings in Hungary by Integrating Passive Air Conduction Systems* (Doctoral dissertation). University of Pécs.

http://pea.lib.pte.hu/handle/pea/44654

- Das, S., & De, A. (2023). Weight computation of criteria in a decision-making problem by entropy measure under interval-valued fuzzy environment. *International Journal of Mathematics in Operational Research, 24*(2), 194–209.

https://doi.org/10.1504/IJMOR.2023.129442

- Dhahri, M., Khalilpoor, N., Aouinet, H., Issakhov, A., Sammouda, H., & Emani, S. (2021). Numerical study on the thermal performance of trombe wall for passive solar building in semiarid climate. *International Journal of Photoenergy, 2021*(1), 6630140.

https://doi.org/10.1155/2021/6630140

- Fam, Y. H., Tai, V. C., Mathew, P. R., Tan, Y. C., & Moey, L. K. (2025). Assessing the effect of internal partition on performance of cross ventilation in isolated building using CFD. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3324, No. 1, p. 030028). AIP Publishing LLC.

https://doi.org/10.1063/10.1063/acp.3324.030028

- Ghahreman Izadi, N., Taghipour, M., Eskandari, H., & Movahed, Kh. (2023). The Effect of Form and Openings on Natural Ventilation of Houses in the Central Courtyard of Hot and Humid Climate from the Perspective of Air Speed and Life by CFD Method (Case Study: Dehdashti House, Bushehr City). *Sustainable Architecture and Urban Planning*, 11 (2), 165-181.

https://journals.sru.ac.ir/article_2003.html

- Golabzadeh Yazdi, M. (2019). *Passive cooling systems in traditional architecture of Iran: Windcatchers, courtyards, and subterranean spaces* (Doctoral dissertation). University of Tehran.

- He, W., Wu, Z., Jin, R., & Liu, J. (2023). Organization and evolution of climate responsive strategies, used in Turpan vernacular buildings in arid region of China. *Frontiers of Architectural Research, 12*(3), 556-574.

https://doi.org/10.1016/j.foar.2022.12.003

- Almhafdy, A., Ibrahim, N., & Ahmad, S. S. (2019). Impacts of Courtyard Geometrical Configurations on Energy Performance of Buildings. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 4 (10), 29-36.

https://doi.org/10.21834/e-bpj.v4i10.1637

- Alsaad, H., & Voelker, C. (2018). Performance assessment of a ductless personalized ventilation system using a validated CFD model. *Journal of Building Performance Simulation, 11*(6), 689–704.

https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1431806

- Alshakir, M. H., & abed Hassan, S. (2025). Enhancing Natural Ventilation in Buildings: The Integrative Role of Wind Catchers and Atriums, Insights from Ancient Mesopotamian Architectural Elements. *Sustainable Engineering and Technological Sciences, 1*(01), 52-60.

https://doi.org/10.70516/778an593

- Balali, A., & Yunusa-Kaltungo, A. (2025). Development of a knowledge-based decision support system for optimising passive design strategy selection in buildings. *Procedia CIRP, 135*, 492-497.

https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.01.073

- Brito-Coimbra, S., Aelenei, D., Gloria Gomes, M., & Moret Rodrigues, A. (2021). Building Façade Retrofit with Solar Passive Technologies: A Literature Review. *Energies, 14*(6), 1774.

https://doi.org/10.3390/en14061774

- Chen, C. M., Lin, Y. P., Chung, S. C., & Lai, C. M. (2022). Effects of the design parameters of ridge vents on induced buoyancy-driven ventilation. *Buildings, 12*(2), 112.

https://doi.org/10.3390/buildings12020112

- Chen, T. Y., & Li, C. H. (2010). Determining objective weights with intuitionistic fuzzy entropy measures: A comparative analysis. *Information Sciences, 180*(21), 4207–4222.

https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.07.009

by an obstacle in the air channel. *International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information Technology, 11*(2), 482–488.

https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.2.13904

- Pan, Y., Zhong, W., Zheng, X., Xu, H., & Zhang, T. (2024). Natural ventilation in vernacular architecture: A systematic review of bioclimatic ventilation design and its performance evaluation. *Building and Environment, 253*, 111317.

https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111317

- Pesaran, A., Kariminia, Sh., Nazemi, E. & Toghyani, Sh. (2019). Evaluating the Existence of a design mechanism based on natural ventilation in the traditional architecture of cities in hot-arid climate without the use of windcatchers (case study: outer space of four-sided Qajar buildings in Shiraz). *Journal of Architecture in Hot and Dry Climate*, 7(9), 101-119.

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453711.1398.7.9.6.5

- Rahaei, O. (2021). Investigation of air flow pattern in the central courtyard in Qajar houses of Isfahan by CFD method. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, *9*(2), 25-46.

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.25886274.1400.9.2.2.6

- Rahaee, O., Salehi, S. S., & Shirdel, A. (2024). Improving the quality of natural ventilation in Masjedsoleiman's Schools' classrooms based on the openings' position and the outdoor shading blades with CFD Method. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, 12(1), 129-150.

https://doi.org/10.22061/jsaud.2024.10110.2179

- Rezaee, V., Masoumnezhad, M., & Tahvili, A. (2024). Feasibility Study of Natural Ventilation Potential of Residential Buildings for Different Climates in Iran. *Science and Technology in Mechanical Engineering*, *3*(1), 185-206.

- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag.

- Loo, S. H., Lim, P. I., & Lim, B. H. (2021). Passive design of buildings: A review of configuration features for natural ventilation and daylighting. *Journal of Physics: Conference Series, 2053*(1), 012009.

https://doi.org/10.1088/1742-6596/2053/1/012009

- Maerefat, M., & Haghighi, A. P. (2010). Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. *Renewable Energy, 35*(10), 2316–2324.

https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.003

- Minaei, A., & Moallemi Khiavi, N. (2023). Thermal Comfort Evaluation for Naturally Ventilated Building Applying an Adaptive Model in Different Cities of Iran. Amirkabir *Journal of Mechanical Engineering*, 54(11), 2663-2680.

https://doi.org/10.22060/mej.2023.21654.7486

- MohammadRezaei, E., & Khodabakhshian, M. (2021). Evaluation of Optimal Roof Form in the Esfahan City Using Wind Tower. *Journal of Urban Sustainable Development*, 2(3), 35-46.

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27170128.1400.2.3.4.9

- Moosavi, L., Mahyuddin, N., & Ghafar, N. (2015). Atrium cooling performance in a low energy office building in the Tropics, a field study. *Building and Environment, 94*(Part 1), 384–394.

https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.019

- Nejat, P. (2018). Windcatcher as a Persian sustainable solution for passive cooling. *Civil Engineering Research Journal, 4*(2), 555634.

https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.04.555634

- Nguyen, Y. Q., Huynh, T. N., & Pham, M. A. (2021). Modifications of heat transfer and induced flow rate of a solar chimney

- Tablada, A., De la Flor, F., & Zhou, J. (2020). Optimization of louvers for daylighting and natural ventilation. *Solar Energy, 209*, 466–478.

https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.012

- Xia, Y., & Lyu, S. (2024). Direct numerical simulation of contaminant removal in presence of underfloor air distribution system. *Heliyon, 10*(2).

- Yang, C., & Misni, A. (2025). Analysis of Thermal Comfort in Single-Story Courtyard Vernacular Dwellings in Rural China: Passive Design Strategies for Adapting to the Climate. *Buildings, 15*(21), 3964.

https://doi.org/10.3390/buildings15213964

- Yin, X., Muhieldeen, M. W., Razman, R., Ee, J. Y. C., & Chiong, M. C. (2024). The potential effects of window configuration and interior layout on natural ventilation buildings: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology, 23*, 100830.

https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100830

- Zarghami, E., & Abad, A. S. (2015). New technologies in construction materials based on environmental approach (Case study: Double skin facades). *Mediterranean Journal of Social Sciences, 6*(6 S2), 17–23.

https://doi.org/10.5901/mjss.2015.v6n6s2p17

- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and economic development of economy, 20*(1), 165-179.

https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037

- Zhang, C., Wang, J., Li, L., Wang, F., & Gang, W. (2020). Utilization of earth-to-air heat exchanger to pre-cool/heat ventilation air and its annual energy performance evaluation: A case study. *Sustainability, 12*(20), 8330.

https://doi.org/10.3390/su12208330

- Zhang, X., Weerasuriya, A. U., Perera, U. S., Wang, J., Li, C. Y., Tse, K. T., & Kwok, K. C. S. (2024). Effects of internal wall

https://doi.org/10.22034/stme.2024.480524.1077

- Rezadoost Dezfuli, R., Taban, M., & Bazazzadeh, H. (2023). Investigating of ventilation in apartments in a hot and semi-humid climate. *Naqshejahan- Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning*, *13*(2), 85-103.

https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1402.13.2.5.4

- Salameh, M., Abu-Hijleh, B., & Touqan, B. (2024). Impact of courtyard orientation on thermal performance of school buildings' temperature. *Urban Climate, 54*, 101853.

https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101853

- Sasan Kamelia, S., & Ibrahimb, N. L. N. (2025). Evaluation of the Effect of Components of Solar Chimneys on Their Performance in Hot and Arid Cities of Iran. *Jurnal Kejuruteraan, 37*(2), 667-678.

- Sha, H., & Qi, D. (2022). A review of high-rise ventilation for energy efficiency and safety. *Sustainable Cities and Society, 83*, 103944.

https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103944

- Shemshadi, A., Shirazi, H., Toreihi, M., & Tarokh, M. J. (2011). A fuzzy VIKOR method for supplier selection based on entropy measure for objective weighting. *Expert systems with applications, 38*(10), 12160-12167.

https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.03.027

- Siadati, F. S., Fayaz, R., & Nikghadam, N. (2021). Optimization of thermal performance of double skin façade box window type with natural ventilation in summer in Tehran. Journal of Architecture in Hot and Dry Climate, 9(13), 155-175.

https://doi.org/10.29252/ahdc.2021.15119.1432

- Stavridou, A. D. (2015). Breathing architecture: Conceptual architectural design based on the investigation into the natural ventilation of buildings. *Frontiers of Architectural Research, 4*(2), 127–145.

https://doi.org/10.1016/j.foar.2015.03.001

design on cross-ventilation of an isolated building. *Physics of Fluids, 36*(5), 057130.

https://doi.org/10.1063/5.0213756

- Zolfaghari, A., Teymori, S., Afzalian, M., Raesi, M., & Hooshmand, S. M. (2021). Experimental evaluation of the effect of supply air direction on air current and temperature in a room with underfloor air distribution system. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53*(5), 3057–3076.

https://doi.org/10.22060/mej.2020.18105.6728