

The Impact of Courtyard Layout on Outdoor Thermal Comfort: A Parametric Study in Mid-Rise Residential Buildings in Shiraz City*

Abstract

The spatial configuration of courtyards in residential buildings plays a crucial role in outdoor thermal comfort. Courtyards, as passive cooling strategies, have been widely used in warm climates to enhance microclimatic conditions. However, despite growing global concerns about climate change, the role of courtyard placement in architectural design remains largely overlooked. Many designers fail to account for the thermal performance of courtyard layouts, leading to inefficient designs that fail to maximize outdoor comfort. This research underscores the importance of integrating computational simulations and optimization techniques in architectural design for enhancing outdoor thermal comfort. The findings provide valuable insights for architects, urban planners, and policymakers seeking to develop climate-responsive residential buildings, particularly in warm and arid regions. By incorporating data-driven methods into courtyard placement, designers can contribute to more sustainable and thermally comfortable urban environments. This study aims to address this gap by employing a postpositivist research approach, integrating simulations, field studies, and logical reasoning to optimize courtyard placement in one- to seven-storey residential buildings in Shiraz, Iran. The independent variables considered in this research include courtyard type and dimensional proportions, building orientation, and the number of floors. The dependent variables are defined as the percentage of hours in which outdoor thermal comfort is achieved in the courtyard and the adjacent pedestrian walkway. To conduct the study, various courtyard configurations were generated using Rhino software and the Grasshopper plugin. Thermal comfort simulations were then performed using the Ladybug Tools plugin, which provides detailed environmental analysis under different climatic scenarios. Additionally, optimization was conducted using the Octopus plugin, allowing for an iterative evaluation of courtyard layouts to determine the most effective configurations for maximizing outdoor thermal comfort percentage. The findings demonstrate that the optimal courtyard placement occurs when the courtyard is centrally positioned within the building mass and its main axis oriented at a 100-degree angle relative to the horizon. Under these conditions, the courtyard achieves the highest

Received: 07 Jul 2024

Received in revised form: 15 Aug 2024

Accepted: 19 Sep 2024

Iman Mohammadi Bidsardareh¹ 

PhD Candidate of Architectural Technology, Department of Architectural Technology School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: imanmohammadi.b@ut.ac.ir

Shahin Heidari²  (Corresponding Author)

Professor, Department of Architectural Technology, School of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: shheidari@ut.ac.ir

<https://doi.org/10.22059/jfaup.2025.386529.673028>

percentage of hours with acceptable outdoor thermal comfort. This suggests that such a configuration effectively balances solar exposure and natural ventilation, reducing excessive heat accumulation in the courtyard area. However, for single-storey residential buildings, a slightly different configuration is recommended. An angle of 110 degrees proved to be more effective in maximizing thermal comfort in low-rise structures, indicating that optimal orientation is influenced by building height. Furthermore, the study highlights the impact of mass distribution in courtyard configurations. Specifically, the optimal placement involves allocating approximately 22% of the total lot length near the street, while the mass at the opposite end of the plot should occupy around 38% of the total site length. This distribution regulates airflow and optimizes shading, leading to improved microclimatic conditions in both the courtyard and the adjacent pedestrian areas. Future studies should expand on these findings by incorporating additional factors such as vegetation, shading devices, and material properties to refine courtyard optimization strategies. Moreover, applying similar methodologies to different climatic regions could provide comparative insights into how courtyard design principles can be adapted for various environmental conditions.

Keywords

Outdoor Thermal Comfort, Parametric Design, Courtyard; Optimization, UTCI; Shiraz

Citation: Mohammadi Bidsardareh, Iman; Heidari, Shahin (2024). The impact of courtyard layout on outdoor thermal comfort: a parametric study in mid-rise residential buildings in Shiraz city, *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 29(3), 7-30. (in Persian)



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

*This article is extracted from the first author's doctoral dissertation, entitled: "Utilizing artificial intelligence to minimize energy consumption; Focusing on the design of central courtyards in residential block layout" under the supervision of the second author at the University of Tehran.

تأثیر جانمایی حیاط بر آسایش حرارتی بیرونی در ساختمان‌های مسکونی میان مرتبه شهر شیراز*

چکیده

جانمایی حیاط در ساختمان‌های مسکونی، به‌ویژه در ارتباط با آسایش حرارتی فضاهای بیرونی، اهمیت بسیاری دارد. با وجود هشدارهای روزافزون درباره گرمایش جهانی، این موضوع همچنان در طراحی‌های معماری مورد غفلت قرار می‌گیرد. این پژوهش در راستای پر کردن این شکاف، با استفاده از سامانه پسا اثبات گرا و ترکیب راهبردهای شبیه‌سازی،

مطالعات میدانی و استدلال منطقی، بهینه‌سازی جانمایی حیاط در خانه‌های

یک تا هفت طبقه شهر شیراز را بررسی کرده است. متغیرهای مستقل شامل نوع و تناسب ابعادی حیاط، جهت‌گیری ساختمان و تعداد طبقات و متغیرهای وابسته، درصد ساعات آسایش حرارتی در حیاط و پیاده‌رو بودند. بدین منظور، گونه‌های مختلف جانمایی حیاط با نرم‌افزار راینو و پلاگین گرس‌هاپر تولید و شبیه‌سازی‌های حرارتی با افزونه ابزارهای لیدی‌باگ انجام شد. فرایند بهینه‌یابی نیز با افزونه/ختاپوس صورت گرفت. نتایج نشان داد که جانمایی حیاط، در میان توده‌گذاری و در شرایطی که محور طولی آن، زاویه ۱۰۰ درجه نسبت به خط افق داشته باشد، بیشترین درصد ساعات آسایش حرارتی بیرونی را فراهم می‌کند. در ساختمان‌های یک طبقه، زاویه ۱۱۰ درجه مناسب‌تر بود. هم‌چنین حیاط سراسری باید به‌نحوی قرار گیرد که عرض بخشی از توده در نزدیکی خیابان، حدود ۲۲٪ و عرض بخش دیگرش، حدود ۳۸٪ طول زمین باشد.

واژه‌های کلیدی

آسایش حرارتی بیرونی، طراحی پارامتریک، حیاط، بهینه‌یابی، شاخص جهانی اقلیم حرارتی (ICTU)، شیراز

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹

ایمان محمدی بیدسردره^۱: دانشجوی دکتری فناوری معماری، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشکده‌های زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

E-mail: imanmohammadi.b@ut.ac.ir

شاهین حیدری^۲: (نویسنده مسئول): استاد گروه فناوری معماری، دانشکده معماری، دانشکده‌های زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

E-mail: shheidari@ut.ac.ir

<https://doi.org/10.22059/jfaup.2025.386529.673028>

استناد: محمدی بیدسردره، ایمان و حیدری، شاهین (۱۴۰۳)، تأثیر جانمایی حیاط بر آسایش حرارتی بیرونی در ساختمان‌های مسکونی میان مرتبه شهر شیراز، نشریه هنرهای زیبا: معماری و شهرسازی، ۲۹(۳)، ۳۰-۷.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

* مقاله حاضر برگرفته از رساله دکتری نگارنده اول با عنوان «کاربرد هوش مصنوعی در کاهش هدررفت انرژی: تمرکز بر حیاط مرکزی در چیدمان بلوک‌های مسکونی» می‌باشد که با راهنمایی نگارنده دوم و در دانشگاه تهران ارائه شده است.

© نگارنده(گان).



جدول ۱. متغیرهای پژوهش.

متغیرهای مستقل	نوع حیاط (محصور یا نیمه محصور) و تناسب ابعادی آن	جهت گیری ساختمان‌ها	تعداد طبقات
متغیرهای وابسته	آسایش حرارتی در حیاط	آسایش حرارتی در پیاده‌رو	
متغیرهای کنترل	معماری داخلی و درصد سطح بازشوها به مساحت دیوار	نوع مصالح و جزئیات اجرایی ساختمان	ارتفاع بناهای زمینه
متغیرهای مداخله‌گر	ویژگی‌های کیفی خاستگاه	آلودگی هوا	نوفه صوتی

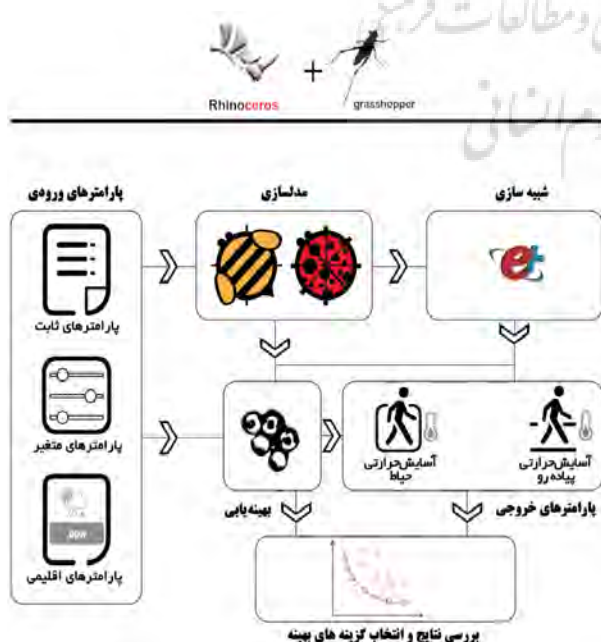
در این پژوهش از سامانه جستجوی پسا اثبات‌گرا^۱ استفاده می‌شود و راهبرد تحقیق مبتنی بر راهبرد ترکیبی است. مقصود از راهبرد ترکیبی، استفاده ترکیبی از راهبردهای شبیه‌سازی و استدلال منطقی است. گردآوری اطلاعات از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، اطلاعات موجود در بستر اینترنت و خروجی‌های رایانه‌ای انجام خواهد شد. شبیه‌سازی رایانه‌ای به منزله روشی جهت تحلیل روابط میان متغیرهای پژوهش و نوع این روابط به کار خواهد رفت. شبیه‌سازی‌های این پژوهش با استفاده از امکانات تعبیه‌شده در افزونه ابزارهای لیدی‌باگ انجام می‌شود. پژوهش‌های معتبری، از این موتورهای شبیه‌ساز جهت تحلیل عملکرد پارامترهای مختلف در حوزه انرژی و آسایش حرارتی ساختمان و فضاهای باز بهره برده‌اند (Nicholson et al., 2024). مطابق تصویر (۱)، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای این پژوهش طی دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، یک فرایند خودکار و پارامتریک تولید گونه‌های مختلف حیاط با استفاده از محیط گرس‌هاپر^۱ در نرم‌افزار راینو^۲ انجام می‌شود. در مرحله دوم، با استفاده از افزونه‌های لیدی‌باگ و هانی‌بی که در پلاگین گرس‌هاپر فعال می‌شوند، عملکرد خرد اقلیمی مدل‌های ساخته‌شده با توجه به تابع هدف مورد نظر بررسی، با وضعیت موجود مقایسه و گزینه‌های بهینه با

مقدمه

بهره‌برداری از فضاهای باز، بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. در طول تاریخ، طراحان در صدد پاسخ گویی به شرایط آب و هوایی بوده و راه آن را در طراحی اقلیمی جستجو کرده‌اند. از جمله محاسن طراحی اقلیمی، دستیابی به فضاهایی است که از نظر آسایش حرارتی، وضعیت بهینه‌ای خواهند داشت (Liu et al., 2022; Nakhaee Sharif et al., 2022). امروزه، با توجه به معضلات گرمایش جهانی که می‌تواند شهرها را به محیط‌هایی نامناسب تبدیل کند (García-Melgar et al., 2025)، خانه‌های حیاط‌دار هنوز هم می‌توانند برای ارائه راه‌هایی در راستای تأمین آسایش انسان که حاصل توازن انرژی حرارتی بین او و فضای اطراف است (Al Horr et al., 2016)، مناسب باشند. بنابراین، اتخاذ استراتژی‌های طراحی برای ارتقاء بهره‌وری فضاهای باز و کاهش عواقب منفی ناشی از طراحی نامناسب ساختمان، بسیار حیاتی است. این امر خصوصاً در مجتمع‌های مسکونی و شهرک‌های جدید که اغلب بدون توجه به شرایط محیطی محلی طراحی می‌شوند، ضروری است. آنچه که در این راستا قابل توجه بوده و فرضیه این پژوهش است، اینکه نوع طراحی و جانمایی این حیاط‌ها و فضاهای باز می‌تواند بر میزان آسایش حرارتی بیرونی تأثیرگذار باشد؛ اما در ضوابط و مقررات ساختمانی و شهرسازی کنونی نادیده انگاشته شده است. امروزه، توجه طراحان معطوف به نمای ساختمان و پوسته‌های ظاهری شده و تأثیرات اقلیمی فضاهای باز و حیاط‌ها در نظر گرفته نمی‌شوند که موضوعی نگران کننده است. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، به این پرسش پاسخ خواهد داد که الگوی بهینه توده‌گذاری بنا و جانمایی حیاط به منظور افزایش آسایش حرارتی بیرونی چیست. بدین منظور، الگوهای مختلف استقرار حیاط در ساختمان‌های مسکونی میان مرتبه یک تا هفت طبقه^۱ (Mackey, 2021) در شهر شیراز مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

روش پژوهش

انجام یک پژوهش کمی در مورد طراحی بهینه حیاط‌ها در ارتباط با میزان آسایش حرارتی، به تبیین علمی موضوع کمک فراوانی می‌کند. فرضیه اصلی این پژوهش به این صورت است که استفاده از الگوهای بهینه حیاط‌ها در طراحی ساختمان‌ها، می‌تواند درصد ساعات آسایش حرارتی در فضای باز را افزایش دهد. در این راستا، عملکرد خرد اقلیمی حیاط‌های آپارتمان‌های مسکونی یک تا هفت طبقه در شهر شیراز، با رویکردی پارامتریک بررسی و طراحی بهینه برای آن‌ها پیشنهاد خواهد شد. متغیرهایی که در این پژوهش مورد آزمایش قرار می‌گیرند از نوع متغیرهای کمی هستند. هفت متغیر پژوهش عبارتند از: حالت‌های ممکن اندازه حیاط در راستای محور طولی^۲ که مشخص کننده طول و عرض حیاط است (با توجه به اینکه سطح اشغال، ۶۰ درصد و ثابت در نظر گرفته شده است)، حالت‌های جابجایی حیاط در راستای محور طولی^۳، حالت‌های جابجایی حیاط در راستای محور عرضی^۴ که تمامی سه متغیر مذکور در جدول (۱) تحت عنوان نوع حیاط (محصور یا نیمه‌محصور) و تناسب ابعادی آن، معرفی شده است. سایر متغیرها عبارتند از: زاویه قرارگیری بنا نسبت به محور افق (محور شرقی-غربی)^۵، تعداد طبقات^۶ و درصدی از کل ساعات دوره بهره‌برداری که حیاط^۷ و پیاده‌رو^۸ در محدوده آسایش حرارتی قرار دارند.



تصویر ۱. دیاگرام گردش کار پژوهش.

جدول ۲. پارامترهای ثابت ورودی در فرایند مدلسازی هندسی.

پارامترهای ثابت ورودی	مقدار
ابعاد هر قطعه زمین	۲۷ m/۲۵ × ۲۱ m
ابعاد محدوده مورد مطالعه	۱۲۱ m × ۱۰۵ m
ارتفاع کف تا کف طبقات	۳/۶۰ m
عرض خیابان	۱۲ m
عرض پیاده رو	۲/۵ m
ارتفاع دیوارها، حداقل عرض حیاط و حداقل عرض فضاهای داخلی	۳ m
گام تغییر طول حیاط در هر مرحله	۱ m
تعداد قطعات در راستای محور طولی	۵
تعداد قطعات در راستای محور عرضی	۴
درصد سطح اشغال	۶۰٪
هندسه حیاط	همواره چهارضلعی کامل

جدول ۳. پارامترهای متغیر ورودی در فرایند مدلسازی هندسی.

پارامترهای متغیر ورودی مدلسازی هندسی	بازه	تعداد حالت	ملاحظات
تعداد طبقات	۷-۱	۷	
جهت قرارگیری	۰-۳۶۰	۷۲	گام تغییرات، ۵ درجه
حالت‌های جابجایی حیاط در راستای محور طولی	۰-۶	۷	حداکثر حرکت مجاز متغیر است
حالت‌های اندازه حیاط در راستای محور طولی	۰-۱۰۰	۱۱	
حالت‌های جابجایی حیاط در راستای محور عرضی	۰-۱۰۰	۱۱	حداکثر حرکت مجاز متغیر است
تعداد کل حالات		۴۲۶,۸۸۸	

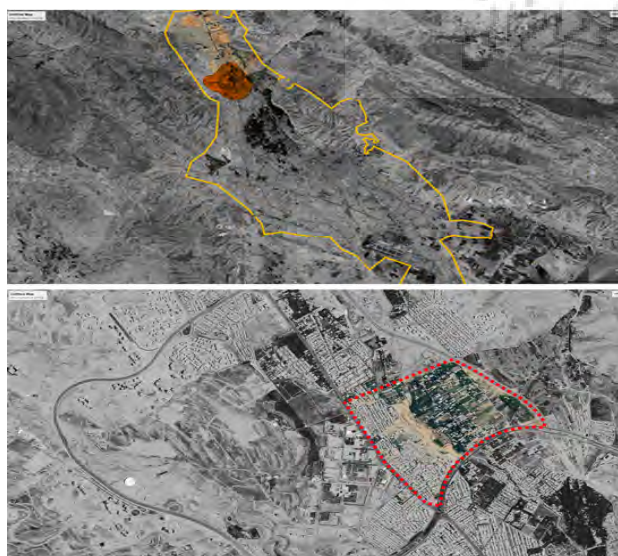
استفاده از پلاگین بهینه یابی چند هدفه^{۱۲}/ختاپوس^{۱۳} انتخاب می‌شوند. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها، در مقایسه با اطلاعات و داده‌های میدانی، اعتبارسنجی خواهند شد و آنالیز اطلاعات نهایی و تحلیل نتایج با استفاده از روش استدلال منطقی صورت می‌گیرد.

مدل مرجع

در راستای قابل استفاده بودن نتایج حاصل از پژوهش، ابعاد مدل مرجع از میانگین تقریبی قطعات بلوک‌های مسکونی منطقه ۱۰ شهر شیراز انتخاب شده است که در تصویر (۲) مشاهده می‌شود. از دلایل انتخاب این منطقه می‌توان به سابقه نسبتاً کم‌تر این بافت نسبت به بافت‌های قدیمی‌تر شهر اشاره کرد که در نتیجه ابعاد قطعات زمین در این منطقه منطبق بر واقعیات اجتماعی و اقتصادی روز است. هم‌چنین از آنجا که این منطقه در پیرامون شهر قرار دارد، در حال رشد بوده و امکان دخل و تصرف در بافت وجود دارد. به‌علاوه نزدیکی به شهرک‌های جدید و در حال احداث و توسعه از دیگر دلایل انتخاب این ناحیه بوده است. میانگین قطعات موجود بلوک‌های مسکونی، $۱۰/۵ \times ۲۷/۲۵$ متر است. در راستای ایجاد امکان طراحی داخلی نسبتاً مطلوب برای حالت‌هایی که حیاط‌های میانی به‌وجود می‌آیند، اتصال دو قطعه موجود با ابعاد نهایی $۲۷/۲۵ \times ۲۱$ متر، به‌عنوان مدل مرجع مورد پژوهش منظور شد. شایان ذکر است توده‌گذاری فعلی، همان توده‌گذاری ملاک عمل شهرداری‌ها با سطح اشغال ۶۰ درصد و در نیمه شمالی زمین است.

پارامترهای ورودی

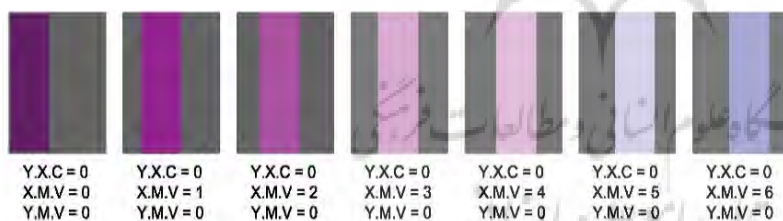
پارامترهای ورودی به پارامترهای اقلیمی، پارامترهای ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. جهت استخراج پارامترهای اقلیمی، داده‌های آب و هوایی ثبت‌شده در فرودگاه بین‌المللی شهید دستغیب شهر شیراز در بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱، مبنا قرار داده شده است. پارامترهای ثابت به مشخصات کلی زمین، محدوده مورد مطالعه و چارچوب هندسی بنا مربوط هستند که در جدول (۲) آورده شده‌اند. پارامترهای متغیر نیز شامل متغیرهای هندسی مطابق تصویر (۳) و مندرج در جدول (۳) و و پارامترهای مدلسازی آسایش حرارتی مندرج در جدول (۴) هستند.



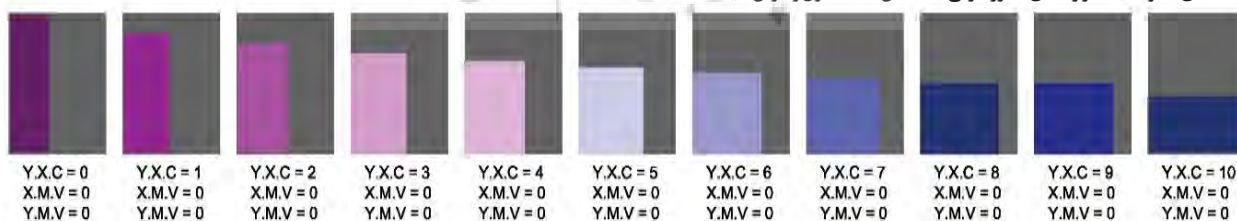
جدول ۴. پارامترهای مدلسازی آسایش حرارتی.

پارامترهای مدلسازی آسایش حرارتی	مقادیر و ملاحظات
ضوابط پایه	آخرین ویرایش‌های مقررات ملی ساختمان ایران ASHRAE 1/90 - 2019 IECC 2021
ابعاد شبکه در حیاط جهت بررسی شاخص جهانی اقلیم حرارتی	۴۰۴ m
فواصل شبکه در پیاده رو جهت بررسی شاخص جهانی اقلیم حرارتی	۴ m
ارتفاع شبکه از سطح زمین جهت بررسی شاخص جهانی اقلیم حرارتی	۱/۵ m
نسبت سطح پنجره به سطح کل دیوار نما	٪۴۰
نسبت سطح قابل باز شدن پنجره به سطح کل پنجره	٪۵۰
مصالص دیوار خارجی (به ترتیب از خارج به داخل) و ضخامت آن‌ها	آجر ۱۰ سانتی متری، بتن سبک ۱۰ سانتی متری، عایق حرارتی ۵ سانتی متری، لایه هوا ۱۰ سانتی متری، گچبرگ ۱/۲۷ سانتی متری
مصالص پشت بام (به ترتیب از خارج به داخل) و ضخامت آن‌ها	پوشش پلیمری ۱ سانتی متر، عایق حرارتی ۵ سانتی متری، بتن سبک ۱۰ سانتی متری، لایه هوا ۱۰ سانتی متری، تایل‌های آکوستیکی ۲ سانتی متری
مصالص کف زمین (به ترتیب از خارج به داخل) و ضخامت آن‌ها	عایق حرارتی ۵ سانتی متر، بتن با عیار بالا ۲۰ سانتی متر
مصالص کف طبقات (به ترتیب از خارج به داخل) و ضخامت آن‌ها	پدفرش، بتن معمولی ۱۰ سانتی متری
مصالص پنجره‌ها (به ترتیب از خارج به داخل) و ضخامت آن‌ها	شیشه شفاف ۶ میلی متری، فاصله انداز ۱۳ میلی متری با تزریق گاز آرگون، شیشه شفاف ۶ میلی متری

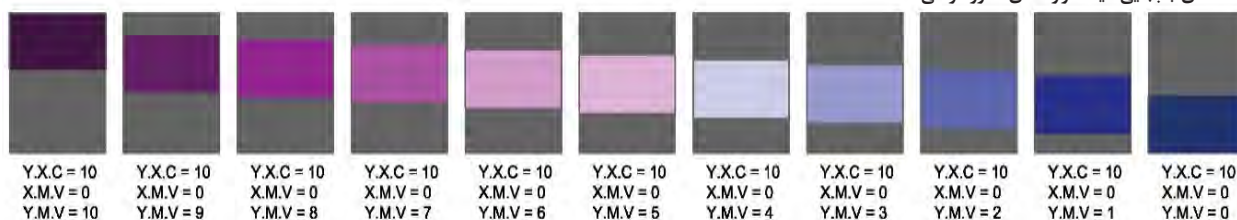
حالت‌های جابجایی حیاط در راستای محور طولی



حالت‌های اندازه حیاط در راستای محور طولی (مشخص کننده طول و عرض حیاط)



حالت‌های جابجایی حیاط در راستای محور عرضی



تصویر ۳. نمایش حالت‌های جابجایی حیاط در محدوده بنا.

تنظیمات افزونه بهینه یابی

از آنجا که هدف پژوهش، یافتن حالتی است که در آن‌ها مقادیر شاخص جهانی اقلیم حرارتی در حیاط و نیز پیاده‌رو بیشینه باشند و با توجه به اینکه افزونه بهینه یابی اختاپوس به دنبال یافتن حالت کمینه بهینه است، لذا از افزونه بهینه یاب جهت یافتن حالتی که قرینه مقادیر شاخص جهانی اقلیم حرارتی در حیاط و نیز پیاده‌رو، کمینه باشند، استفاده می‌شود. تنظیمات به کار گرفته شده جهت استفاده از این افزونه، برای پیدا کردن حالات بهینه در هر تعداد طبقه (۷ حالت: یک تا هفت طبقه) در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵. تنظیمات افزونه بهینه یابی.

درصد نخبه گرایی ^{۱۴}	۰/۷
احتمال جهش ^{۱۵}	۰/۷
نرخ جهش ^{۱۶}	۰/۸۵
نرخ تقاطع ^{۱۷}	۰/۹
اندازه جمعیت هر نسل	۱۰
حداکثر تعداد نسل	۵۰
امکان کاهش در الگوریتم تخمین ابر حجم ^{۱۸}	فعال
امکان جهش در الگوریتم تخمین ابر حجم ^{۱۹}	فعال

پارامترهای خروجی

پارامترهای خروجی قابل اندازه گیری توسط افزونه بهینه یاب، عبارتند از درصد ساعتی که حیاط و نیز پیاده‌رو، در محدوده آسایش حرارتی (بین ۹ تا ۲۶ درجه سانتی گراد) قرار می‌گیرند. بدین منظور، شبکه‌هایی فرضی تعریف شد که حیاط را می‌پوشاند و هر خانه آن، مربعی است به ابعاد ۱/۵ متر در ۱/۵ متر. در محل‌های تقاطع خانه‌های این شبکه، حسگرهایی فرضی وجود دارد. اندازه گیری شاخص جهانی اقلیم حرارتی، بر اساس محاسبات نقطه به نقطه حسگرها روی این شبکه‌های فرضی انجام می‌شود. چنین شبکه و مبنایی برای پیاده‌رو نیز تعریف شده است. نتایج، از میانگین محاسبات مربوط به رئوس این شبکه حاصل می‌شود. شایان ذکر است با توجه به اینکه پژوهشی در مورد کالیبره کردن شاخص جهانی اقلیم حرارتی در شیراز انجام نشده است، محدوده مرجع بین‌المللی ۹-۲۶ درجه سانتی گراد از شاخص جهانی اقلیم حرارتی، به عنوان محدوده بدون تنش حرارتی فضاهای خارجی در نظر گرفته شده است. برای مقایسه سناریوهای مختلف حیاط و پیاده‌رو از نظر میزان آسایش حرارتی فضاهای باز، از معیار درصد ساعات آسایش حرارتی^{۲۰}، استفاده شده است. این معیار، درصدی از کل زمان دوره بهره‌برداری است که در آن، فضا از نظر معیارهای آسایش حرارتی، در رده بدون تنش حرارتی قرار دارد (Nazarian et al., 2019).

شبیه سازی ها

در راستای پرهیز از مواجه شدن با شمار فراوان شبیه سازی‌ها برای ارزیابی متغیرهای مختلف طراحی، روش بهینه یابی مبتنی بر تغییرات پارامتریک برای هر رده از تعداد طبقه ساختمان، انتخابی مناسب است تا راه حل بهینه را بر اساس هدف طراحی پیدا کرد. پس از انجام شبیه سازی‌ها به کمک افزونه/ختاپوس، نتایج حاصله به همراه مشخصات هر شبیه سازی

به نرم افزار اکسل منتقل شد تا در تحلیل‌های آتی استفاده شود. برای هر رده از تعداد طبقه ساختمان، شبیه سازی‌ها به صورتی جداگانه انجام گرفت. برای هر رده، روند جستجو و شبیه سازی با استفاده از افزونه اختاپوس، پس از همگرایی^{۲۱} به سمت راه حل‌های بهینه غیر غالب پارتو^{۲۲} و جایی که پیشرفت‌های بیشتری در جبهه پارتو قابل مشاهده نیست، متوقف می‌شود (Zhao & Du, 2020). به این ترتیب، در مجموع تعداد ۲۷۰۰ شبیه سازی انجام گرفت که در جدول (۶)، اطلاعات مربوط به تعداد شبیه سازی‌های انجام گرفته در هر رده آمده است. با توجه به ماهیت تکنیک‌های جستجوی اکتشافی^{۲۳}، برخی از راه حل‌ها که به طور تصادفی انتخاب شدند، چندین بار در مقایسه با راه حل‌های دیگر مورد ارزیابی مجدد قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه چندین شبیه سازی از یک سناریوی هندسی منحصر به فرد، هر بار نتایج یکسانی (مقادیر تابع هدف) را به دنبال خواهد داشت، راه حل‌های تکراری شبیه سازی شده با اختاپوس در طول پردازش، از نتایج نهایی حذف شدند. از این رو، تعداد حالت‌های هندسی منحصر به فرد که مورد بررسی قرار گرفت، در مجموع ۱۷۵۲ شبیه سازی یکتا بوده است. در تصویر (۴)، نمودار ارتباطات خطی متغیرهای تمام شبیه سازی‌های انجام شده، به تفکیک تعداد طبقات بنا نمایش داده شده است.

جدول ۶. خلاصه آمار شبیه سازی‌های انجام شده به تفکیک تعداد طبقات بنا.

تعداد طبقه ساختمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تعداد نسل	۵۰	۳۰	۵۰	۵۰	۳۰	۳۰	۳۰
جمعیت نسل	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد کل شبیه سازی‌ها	۵۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
تعداد شبیه سازی منحصر به فرد	۲۹۸	۱۹۷	۳۶۴	۳۳۷	۱۳۶	۲۲۰	۲۰۰

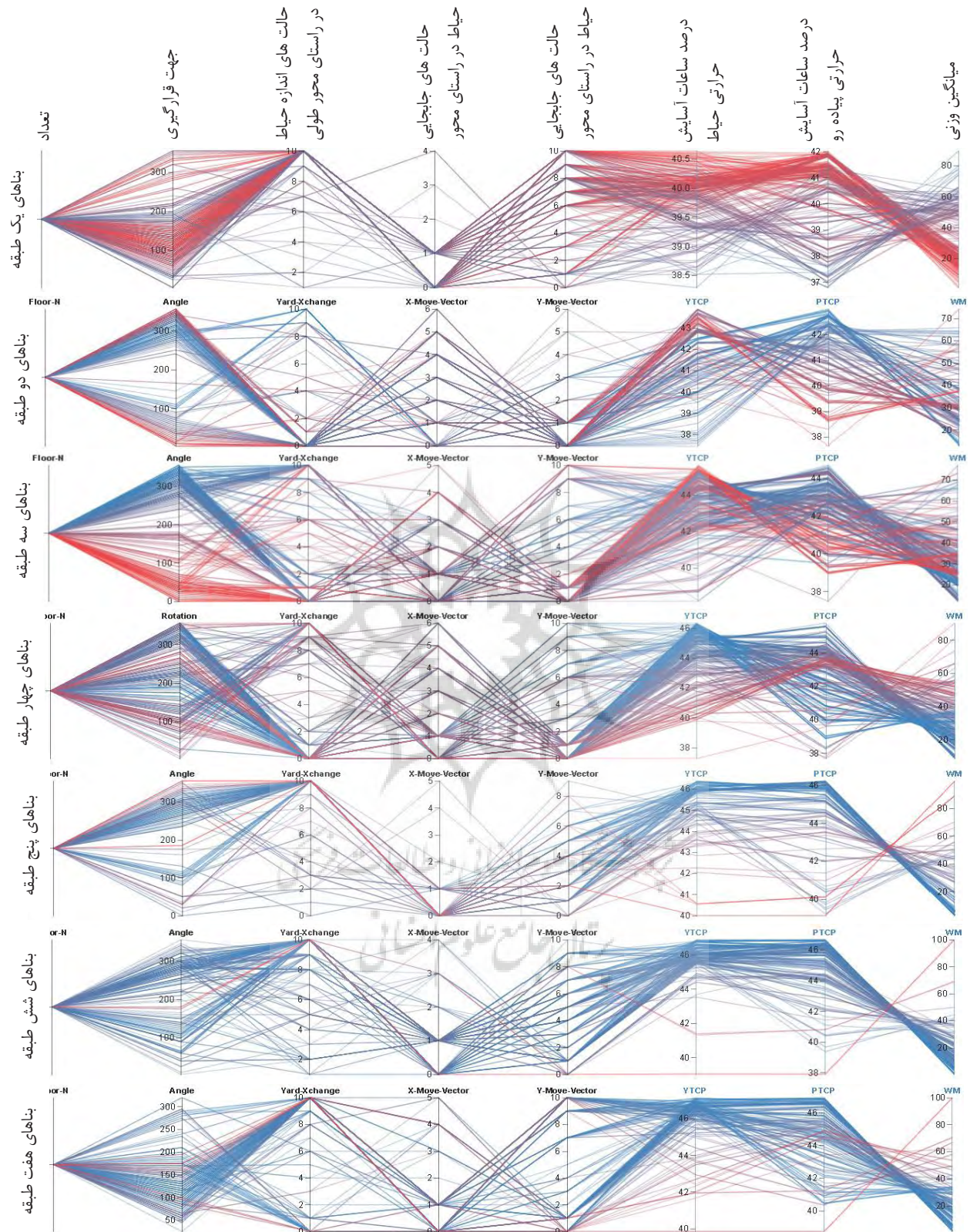
آنالیز داده‌ها

انتخاب گزینه‌های بهینه، از میان راه حل‌های جبهه پارتو صورت خواهد گرفت. برای انتخاب گزینه‌های برتر از میان راه حل‌های جبهه پارتو، می‌توان از روش جمع وزنی^{۲۴} استفاده کرد. این روش در تئوری تصمیم گیری بهینه یابی چند هدفه، یکی از بهترین روش‌های شناخته شده است (Delgarm et al., 2016; Kim & de Weck, 2005; Zhao & Du, 2020). در این راستا، نخست به مقادیر هر راه حل موجود در جبهه پارتو، به روش نرمال سازی و مطابق روابط (۱) و (۲)، عددی بین صفر تا صد تخصیص داده می‌شود.

$$YTCP_{Ni} = (YTCP_i - YTCP_{min}) * \left(\frac{100}{YTCP_{max} - YTCP_{min}} \right) \quad (1)$$

$$PTCP_{Ni} = (PTCP_i - PTCP_{min}) * \left(\frac{100}{PTCP_{max} - PTCP_{min}} \right) \quad (2)$$

در این روابط، $YTCP_{Ni}$ درصد ساعات آسایش حرارتی نرمال شده حیاط در هر راه حل، $YTCP_i$ درصد ساعات آسایش حرارتی حیاط در هر راه حل، $YTCP_{max}$ حداکثر درصد ساعات آسایش حرارتی به دست آمده حیاط در مجموعه راه حل‌های موجود در جبهه پارتو، $YTCP_{min}$ حداقل درصد ساعات آسایش حرارتی به دست آمده حیاط در مجموعه راه حل‌های موجود در جبهه پارتو، $PTCP_{Ni}$ درصد ساعات آسایش حرارتی نرمال شده پیاده‌رو در



تصویر ۴. نمودار ارتباطات خطی متغیرهای شبیه سازی‌های انجام شده به تفکیک تعداد طبقات بنا.

هر راه حل، $PTCP_i$ درصد ساعات آسایش حرارتی پیاده‌رو در هر راه حل، $PTCP_{max}$ حداکثر درصد ساعات آسایش حرارتی به‌دست آمده پیاده‌رو در مجموعه راه‌حل‌های موجود در جبهه پارتو و $PTCP_{min}$ حداقل درصد ساعات آسایش حرارتی به‌دست آمده پیاده‌رو در مجموعه راه‌حل‌های موجود در جبهه پارتو هستند.

$$wM_i = \frac{(\alpha.YTCP_{Ni} + \beta.PTCP_{Ni})}{(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

درگام بعد با توجه به ضرایب هر کدام از اهداف مسأله، میانگین وزنی^{۲۵} هر راه حل موجود در جبهه پارتو مطابق رابطه (۳) به‌دست می‌آید. راه‌حلی که دارای کم‌ترین مقادیر به‌دست آمده از این راه هستند، به‌عنوان حالت‌های بهینه انتخاب می‌شوند.

در رابطه فوق، α ضریب تخصیص داده شده به درصد ساعات آسایش حرارتی نرمال شده حیاط و β ضریب تخصیص داده شده به درصد ساعات آسایش حرارتی نرمال شده پیاده‌رو است. ضریب اهمیت مربوط به درصد ساعات آسایش حرارتی نرمال شده حیاط، دو و ضریب مربوط به درصد ساعات آسایش حرارتی نرمال شده پیاده‌رو ۱/۵ در نظر گرفته شده است.

پیشینه پژوهش

حیاط‌ها از دیرباز در معماری عملکردهای مختلفی داشته‌اند که گاهی تاکنون کارایی خود را حفظ کرده‌اند. به‌عنوان مثال در مناطق پرجمعیت، حیاط‌ها حریم خصوصی و امنیت را فراهم می‌کنند. در نتیجه، پذیرش آن‌ها رو به‌فزونی است (Soflaei et al., 2020). هم‌چنین در مناطق گرم و خشک، حیاط‌های دارای سایه می‌توانند محیط مطبوعی ایجاد کنند. تحقیقات متمرکز رو به رشد بر روی ایجاد آسایش مکان‌های باز (Zhan et al., 2022)، نشان دهنده این است که خرداقلیم‌ها از عوامل زیستی مؤثر بر سلامت جسمی هستند و باید مورد توجه طراحان قرار گیرند (Pi-jpers-van Esch, 2015). ایجاد خرداقلیم در مکان‌های مختلف، متأثر از شرایط جغرافیایی و آب و هوایی آن‌هاست، (Hermawan & Šva-jlenka, 2022) اما مصنوعات بشری با توجه به تأثیراتی که بر فاکتورهای اقلیمی می‌گذارند (Cetin et al., 2018)، می‌توانند اقلیم مصنوعی در ساختار خرد اقلیم پدید آورند (Liu, 2023). شکل شهر و عناصر آن، نه تنها بر کیفیت شهر اثر می‌گذارند، بلکه کیفیت هوا را نیز می‌توانند تغییر دهند (Dong et al., 2021; Dwijendra et al., 2022; Grazulevici-ute-Vileniske et al., 2022; Liu et al., 2022).

نوع چیدمان حیاط‌ها در بلوک‌های شهری، می‌تواند منجر به تغییر میزان آسایش حرارتی در شهرها شود (Moraci et al., 2020). بسیاری از پژوهش‌ها، تأثیر ایجاد سایه بر کاهش دما و متعاقباً بهبود شرایط آسایش در نواحی گرم و خشک را مورد مطالعه قرار داده‌اند (Zamani et al., 2018). توجه به ارتفاع ساختمان‌ها و الگوی سایه‌اندازی آن‌ها، امری بسیار ضروری در مراحل پیش‌طراحی است (Shareef, 2021). تراکم بنا نیز که بر اساس مساحت زمین و زیربنای ساختمان محاسبه می‌شود، از عوامل مؤثر بر آسایش حرارتی بیرونی است. از دیگر عوامل تعیین‌کننده، جهت‌گیری ساختمان است که با دسترسی به نور خورشید مرتبط بوده و بر میزان آسایش حرارتی تأثیر می‌گذارد (Futcher et al., 2017). هر یک از فرم‌های چیدمان ساختمان‌های مسکونی مانند به‌هم‌چسبیده و جدا،

خطی، حیاط میانی و بلوک‌های بلندمرتبه، دارای ویژگی‌های خاصی بوده و از نظر و مواجهه با باد و دسترسی به نور خورشید، تغییراتی را در میزان آسایش حرارتی بیرونی ایجاد می‌کند (Pacheco et al., 2012). جریان هوا و تهویه نیز از دیگر فاکتورهای اساسی در عملکرد خرداقلیمی حیاط است. جریان هوا در مقیاس شهری که تحت تأثیر ریخت‌شناسی شهری است، در سلامتی انسان، آسایش حرارتی خارجی و داخلی، کیفیت هوا و عملکرد حرارتی مناسب ساختمان‌ها مسئله‌ای حیاتی است (Yang & Li, 2011). از جمله عوامل مؤثر در الگوی جریان هوا در حیاط، نسبت ارتفاع به عرض حیاط و زاویه بین جهت جریان غالب و محور اصلی حیاط است (Moonen et al., 2011; Rojas et al., 2012).

پتانسیل خنک‌کنندگی حیاط‌ها^{۲۶} به‌عنوان کهن‌الگوهای عملکردی متخلخل، ارزشی است که باید در شهرهای معاصر در نظر گرفته شود. این پتانسیل به دلیل اثرات ترمودینامیکی حیاط‌ها (Rivera-Gómez et al., 2019; Zamani et al., 2019) و در نتیجه تفاوت دمای سطوح است. اثرات لایه‌بندی و همرفت معمولاً منجر به اختلاف دما بین فضای بیرون و داخل حیاط (Nasrollahi et al., 2017; Taleghani, Tenpierik, van den Dobbelsteen, et al., 2014) در گرم‌ترین زمان روز می‌شود. اثربخشی حیاط‌ها در تلطیف فضا، به ویژگی‌هایی مانند هندسه (Mu-haisen, 2006; Muhaisen & Gadi, 2006a, 2006b)، نسبت ارتفاع به عرض (Qaid & Ossen, 2015; Rodríguez-Algeciras et al., 2018)، جهت‌گیری حیاط (Oktay, 2002)، وجود پوشش گیاهی یا آب (Lai et al., 2020)، میزان قرار گرفتن در معرض باد (Safarzadeh & Ba-hadori, 2005; Taleghani, 2018) و ضریب آلودگی یا سپیدایی مصالح (Taleghani, 2018) بستگی دارد. از آنجایی که حیاط‌ها مجاور چندین اتاق یا فضای داخلی ساختمان هستند، این استراتژی‌های غیرفعال را می‌توان در حیاط‌های موجود نیز پیاده‌سازی کرد و خرداقلیم آن‌ها را به روشی کنترل‌شده اصلاح کرد.

مبانی نظری پژوهش

شاخص‌های اندازه‌گیری آسایش حرارتی در فضای باز

تا آغاز قرن بیست و یکم، موضوع آسایش حرارتی در محیط باز شهری کم‌تر مورد توجه قرار گرفته بود، در حالی که در دو دهه اخیر توجه‌ها را به خود جلب کرده است (Sehgal & Kumar, 2025). شاخص‌های حرارتی اولیه بر اثرات منفی آب و هوا بر انسان‌ها مانند تنش‌های گرمایی و سرمایایی متمرکز بودند (Olgyay et al., 2015). برخی از آن‌ها برای شرایط گرم مناسب‌تر هستند (d'Ambrosio Alfano et al., 2015). به‌عنوان مثال دمای جهانی حباب مرطوب^{۲۸} (Yaglou & Minaed, 1957)، شاخص عدم آسایش^{۲۹} (Thom, 1959)، شاخص تنش حرارتی^{۳۰} (Givoni, 1963)، شاخص گرما^{۳۱} (Steadman, 1979) و شاخص کرنش حرارتی^{۳۲} (Sharma & Sharafat, 1986). این در حالی است که برخی شاخص‌های دیگر برای شرایط سرد مناسب‌تر هستند، مانند شاخص سرمایش باد^{۳۳} و دمای معادل سرمایش باد^{۳۴} (ISO, 1993). در دهه‌های گذشته، توجه فزاینده‌ای به شرایط حرارتی فضای باز شهری برای ساکنان شهر به‌عنوان یک زمینه تحقیقاتی جدید با هدف ارائه راهبردهایی برای برنامه‌ریزی شهری پایدار معطوف شده است (Givo-ni et al., 2003; Knez & Thorsson, 2006; Nikolopoulou et

جهانی اقلیم حرارتی هستند (Potchter et al., 2018). این سه شاخص ویژگی‌های یکسانی دارند؛ از جمله اینکه شاخص‌های جهانی مناسب برای محیط‌های سرد و گرم هستند و طیف وسیعی از طبقه‌بندی تنش‌های حرارتی را پوشش می‌دهند.

در این بین، شاخص جهانی اقلیم حرارتی از سال ۲۰۱۲ به‌طور مداوم استفاده می‌شود و دفعات استفاده از آن نیز افزایش یافته است (Potchter et al., 2018). شاخص جهانی اقلیم حرارتی، بر اساس شدت واکنش‌های فیزیولوژیکی عینی به تنش حرارتی محیطی در طیف گسترده‌ای از آب و هوا است (Błażejczyk et al., 2010). در این شاخص، دسته «بدون تنش حرارتی» برای همه اقلیم‌ها مشترک و بین ۹ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد بر اساس محاسبات این شاخص است (Zheng et al., 2025). شایان ذکر است که مقیاس‌های شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی و شاخص جهانی اقلیم حرارتی، می‌توانند برای استفاده محلی کالیبره شوند (Krüger et al., 2018; Potchter et al., 2017). در جدول (۸)، برخی از مطالعاتی که با استفاده از این شاخص و در اقلیم‌های متفاوت انجام شده است، ذکر شده‌اند.

شاخص جهانی اقلیم حرارتی، به‌عنوان دمای محیطی معادل یک محیط مرجع تعریف می‌شود که همان احساس و پاسخ فیزیولوژیکی یک فرد مرجع را در محیط واقعی به دنبال دارد (Błażejczyk et al., 2012). به عبارت دیگر، این شاخص تخمینی از دمایی که بدن فرد، در یک محیط احساس می‌کند ارائه می‌دهد. مشخصات این محیط مرجع (Bröde et al., 2012) به این صورت است که سرعت راه رفتن شخص، ۴ کیلومتر بر ساعت معادل ۱/۱۱ متر بر ثانیه، نرخ سوخت و ساز حدود ۲/۳ MET، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، ۰/۵ متر بر ثانیه (معادل حدود ۰/۳۶ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین)، متوسط

جدول ۷. شاخص‌های حرارتی مورد استفاده غالب برای مطالعات آسایش حرارتی در فضای باز.

شاخص	واحد	منبع	مورد استفاده	طبقه‌بندی احساس حرارتی	اقلیم مناسب جهت استفاده	توضیحات
شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی	°C	(Mayer & Höppe, 1987)	در نظر گرفته شده برای فضای باز	مقیاس ۹-۷ گانه، از وضعیت بسیار سرد تا وضعیت بسیار گرم	همه اقلیم‌ها	توصیه می‌شود برای اقلیم‌های مختلف، بررسی و اصلاحات لازم انجام شود (Matzarakis et al., 1999)
شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده (متوسط نظرات)	رأی	(Fanger, 1972)	عمدتاً برای فضای داخلی	مقیاس هفت گانه از وضعیت سرد تا وضعیت گرم	همه اقلیم‌ها	برای طیف گسترده‌ای از اقلیم‌ها در نظر گرفته شده است.
		(Gagge et al., 1986)	اعمال شده برای فضای باز			
شاخص جهانی اقلیم حرارتی	°C	(Jendritzky et al., 2012; Jendritzky et al., 2009)	در نظر گرفته شده برای فضای باز	مقیاس ۱۰ گانه از وضعیت بسیار سرد (استرس سرمایی شدید) تا وضعیت بسیار گرم (استرس گرمایی شدید)	همه اقلیم‌ها	برای طیف گسترده‌ای از اقلیم‌ها در نظر گرفته شده است (Błażejczyk et al., 2010).
شاخص دمای مؤثر استاندارد*	°C	(Gonzalez et al., 1974)	عمدتاً برای فضای داخلی	مقیاس چهار گانه از خنک تا بسیار گرم	اقلیم‌های معتدل تا گرم	برای اقلیم گرم تنظیم شده است
		(Gagge et al., 1986)	اعمال شده برای فضای باز			
شاخص دمای مؤثر استاندارد در فضای باز*	°C	(Pickup & de Dear; Spagnolo & de Dear, 2003)	در نظر گرفته شده برای فضای باز	مقیاس پنج گانه از سرد تا گرم	اقلیم‌های معتدل تا گرم	برای اقلیم گرم تنظیم شده است

al., 2001; Nikolopoulou & Lykoudis, 2006; Spagnolo & de Dear, 2003). هم‌چنین تلاش‌های جدی برای توسعه شاخص‌های جهانی انجام شده که قادر به ارزیابی شرایط سرد و گرم هستند (Co-). از جمله این شاخص‌های جدید می‌توان به شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده یا متوسط نظرات^{۳۵} (Fanger, 1972)، دمای معادل فیزیولوژیکی^{۳۶} (Höppe, 1999; Mayer & Höppe, 1987)، شاخص رطوبت دما^{۳۷} (Kyle, 1994)، دمای درک شده^{۳۸} (Staiger et al., 2012)، دمای مؤثر استاندارد^{۳۹} (Gagge et al., 1986; Gonzalez et al., 1974)، دمای مؤثر استاندارد در فضای باز^{۴۰} (Pickup & de Dear) و شاخص اقلیم حرارتی جهانی^{۴۱} (Jendritzky et al., 2012) اشاره کرد. از سال ۲۰۱۷ نیز یک شاخص حرارتی جدید در دسترس قرار گرفته است که به‌عنوان دمای معادل فیزیولوژیکی اصلاح شده^{۴۲} شناخته می‌شود (Chen & Matzarakis, 2018). اخیراً، برخی تحقیقات از دمای پوست برای پیش‌بینی آسایش حرارتی در فضای باز و به‌دست آوردن دقت پیش‌بینی بالا استفاده کردند (Lai et al., 2017a, 2017b; Liu et al., 2020; Xie et al., 2020). با این حال، دانستن دمای پوست افراد از قبل دشوار است. هم‌چنین روی برخی شاخص‌های جدید نیز تحقیقاتی انجام شده است (Cheung & Jim, 2019; Oh et al., 2019).

از ۱۶۵ شاخص حرارتی که توسعه داده شده است، مطابق جدول (۷)، چهار شاخص حرارتی دمای معادل فیزیولوژیکی، شاخص جهانی اقلیم حرارتی (Vaz et al., 2025)، شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده و دمای مؤثر استاندارد، به‌طور گسترده برای مطالعات آسایش حرارتی در فضای باز استفاده می‌شود که سه شاخص مورد استفاده غالب، دمای معادل فیزیولوژیکی، شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده و شاخص

جدول ۸. برخی مطالعات انجام شده در اقلیم‌های مختلف با استفاده از شاخص جهانی اقلیم حرارتی.

منبع	شهر، کشور	اقلیم بر اساس سامانه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن ^{۴۳}
(Krüger et al., 2017)	ریودوژانیرو، برزیل	اقلیم استوایی ساوانا با زمستان‌های خشک (Aw)
(Rutty & Scott, 2015)	باربادوس، سنت لوسیا، توباگو، جزایر کارائیب	اقلیم استوایی ساوانا / استوایی موسمی (Aw, Am)
(Lam et al., 2021)	گوانگژو، چین	اقلیم نیمه حاره‌ای مرطوب (Cfa)
(Lucchese et al., 2016)	کامپوگرانده، برزیل	اقلیم نیمه حاره‌ای مرطوب، اقلیم استوایی ساوانا (Cfa, Aw)
(Lam et al., 2021)	ملبورن، استرالیا	اقلیم اقیانوسی (Cfb)
(Li et al., 2020)	هنگ کنگ	اقلیم موسمی (نیمه حاره‌ای مرطوب با زمستان خشک) (Cwa)
(Lai et al., 2014)	تیانجین، چین	اقلیم نیمه‌خشک (بیابان سرد) (BSk)

نسبت به بقیه راه‌حل‌های موجود در فضای جستجو برتری دارند. مفهوم تسلط یا غلبه یا برتری، یک مفهوم اساسی در بهینه‌سازی چند هدفه است. جبهه پارتو صرفاً شامل تمامی راه‌حل‌های نامغلوب^{۴۸} است (Gou et al., 2018). زمانی راه‌حلی بر دیگری تسلط دارد که حداقل در یکی از اهداف بهتر باشد و در سایر اهداف یکسان یا بهتر باشد. اگر هیچ‌کدام از یک جفت راه‌حل بر دیگری تسلط نداشته باشد، گفته می‌شود که آن راه‌حل‌ها نامغلوب هستند و از این‌رو، در جبهه پارتو قرار دارند (Bandy et al., 2015). به‌طور کلی می‌توان روش‌های حل مسائل چندهدفه^{۴۹} را به دو دسته کلی روش‌های تجمعی^{۵۰} و روش‌های تکاملی^{۵۱} (استفاده از الگوریتم‌های تکاملی^{۵۲}) تقسیم کرد. روش‌های تجمعی یا روش‌های سنتی بهینه‌سازی چند هدفه، توابع هدف مختلف را به یک تابع واحد تبدیل می‌کنند. به منظور ایجاد یک تقریب نمونه از کل جبهه پارتو، می‌بایست چندین شبیه‌سازی با تنظیمات پارامترهای مختلف انجام شود. برخی از روش‌های این دسته عبارتند از: روش جمع وزنی^{۵۳}، روش محدودیت اپسیلون-قید^{۵۴}، برنامه ریزی هدف^{۵۵}، روش نقطه مرجع^{۵۶}، روش جهت مرجع^{۵۷} و روش جستجوی پرتو نور^{۵۸} که به اختصار در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرد.

الگوریتم‌های تکاملی^{۵۹} به دو دلیل موفقیت زیادی در حل مسائل چندهدفه به‌دست آورده‌اند: این الگوریتم‌ها امکان یافتن چندین عضو از مجموعه بهینه پارتو را در یک مرتبه از اجرای الگوریتم می‌دهند. همچنین این الگوریتم‌ها حساسیت کمتری به شکل جبهه پارتو دارند. بنابراین، الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه^{۶۰} اغلب برای حل مسائل چندهدفه استفاده شده‌اند. اغلب الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه، اثربخشی و کارایی خود را در تضمین همگرایی به سمت جبهه پارتو و همچنین تنوع بین راه‌حل‌های به‌دست‌آمده نهایی نشان داده‌اند (Bechikh et al., 2013; Bechikh et al., 2011; Kalbousi et al., 2013).

یکی از دو روش بسیار پرکاربرد در الگوریتم‌های تکاملی، روش‌های تکاملی مبتنی بر پارتو^{۶۱} است که خود این روش‌ها به سه نسل تقسیم می‌شوند. نسل اول شامل رویکردهای غیر نخبه‌گرایانه^{۶۲}، نسل دوم شامل روش‌های نخبه‌گرایانه^{۶۳} و نسل سوم که شامل هم الگوریتم‌های تکاملی مبتنی بر تجزیه^{۶۴} (استفاده از توابع اسکالرز برای تجزیه مسائل چند هدفه اصلی به مجموعه‌ای از مسائل فرعی) و هم الگوریتم‌های مبتنی بر شاخص^{۶۵} است. چنانچه از نام‌گذاری نسل‌ها نیز مشخص است، نسل سوم این الگوریتم‌ها جدیدتر و کاراتر هستند و در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته‌اند. از نقاط ضعف اصلی الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه مبتنی

دمای تابشی برابر با دمای هوا، برای دمای هوای زیر ۲۹ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۵۰ درصد و برای دمای بالای ۲۹ درجه سانتی‌گراد، فشار بخار جزئی آب، ۲۰ هکتوپاسکال است. یک مدل پوشاک برای محاسبه این شاخص ارائه و فرض شده که شخص، نرخ لباس خود را در تطابق با شریط محیطی فضای باز تغییر می‌دهد. برخلاف سایر شاخص‌ها، این شاخص واکنش لحظه‌ای کل بدن را در شرایطی که افراد معمولاً لباس کم‌تری به تن دارند، ارزیابی می‌کند. (Havenith et al., 2012) برای محاسبه شاخص جهانی اقلیم حرارتی، متغیرهای دمای هوا (دمای خشک) بر حسب درجه سانتی‌گراد، متوسط دمای تابشی بر حسب درجه سانتی‌گراد، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه و فشار جزئی بخار آب (درصد رطوبت نسبی) مطابق رابطه (۴) استفاده می‌شوند (Bröde et al., 2012).

$$UTCI(T_a, T_r, V_a, P_a) = T_a + offset(T_a, T_r, V_a, P_a) \quad (4)$$

در این رابطه، T_a دمای هوا (در محدوده ۵۰- تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد)، T_r بیانگر متوسط دمای تابشی، V_a سرعت باد در بازه ۵/ تا ۱۷ متر بر ثانیه و P_a فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال^{۴۴} است. به این ترتیب با داشتن این داده‌ها، می‌توان مقدار شاخص جهانی اقلیم حرارتی را محاسبه نمود. پس از به‌دست آوردن عدد شاخص جهانی اقلیم حرارتی، با استفاده از مقادیر پیشنهادی برای رده بدون تنش حرارتی (Cheung & Jim, 2017) می‌توان احساس حرارتی را به‌دست آورد. از آنجا که شاخص جهانی اقلیم حرارتی، شاخصی پرکاربرد بوده و در افزونه نرم‌افزاری هانی‌بی^{۴۵} و ابزارهای لیدی‌باگ^{۴۶} که اساس مدلسازی و شبیه‌سازی انرژی این پژوهش است نیز قابل بهره‌برداری بوده، در این مطالعه از این شاخص در اندازه‌گیری آسایش حرارتی فضاهای باز استفاده شده است.

بهینه‌سازی چندهدفه

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه در بسیاری از علوم و زمینه‌های مختلف متداول است، چراکه اغلب مسائل دنیای واقعی نیازمند حل موازنه هم‌زمان میان دو یا چند هدف متناقض است. به این ترتیب، ممکن است هیچ راه‌حل بهینه واحدی وجود نداشته باشد، زیرا توابع هدف اغلب متضاد هستند. در عوض، خانواده‌ای از راه‌حل‌های بهینه به نام مجموعه راه‌حل بهینه پارتو یا جبهه پارتو^{۴۷} در فضای توابع هدف وجود دارد. در مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها، جبهه پارتو راه‌حلی است که در آن نمی‌توان یکی از اهداف را بدون بدتر کردن هدف دیگر بهبود بخشید. این جبهه، مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها است که تحت تسلط یکدیگر نیستند اما

انتخاب شد. ساختمان مورد نظر، جنوبی بوده و دارای سه طبقه روی پیلوت است. از یک سو، نخست هندسه ساختمان، حیاط، پوشش‌های گیاهی، بازشوها، عناصر سایه‌انداز و تمام همسایگی‌ها در نرم‌افزار ساخته شده و مشخصات مربوطه برای شبیه‌سازی وارد شدند. در گام بعد، نقطه‌ای به ارتفاع ۱/۵ متری از کف و به همین فاصله نیز از دیوارهای ساختمان و حیاط در شمال شرقی حیاط در نظر گرفته شده، شبیه‌سازی‌های مربوطه انجام و نتایج شبیه‌سازی برای این نقطه استخراج شدند. از سوی دیگر، همین نقطه در حیاط ملک نیز مشخص و برداشت‌های میدانی داده‌های آب و هوایی برای آن انجام شد. برای اطمینان بیشتر از صحت نتایج برداشت‌ها در دو نوبت انجام شدند. یک نوبت در سردترین هفته سال، در سال ۱۴۰۱ و دیگری در گرم‌ترین هفته سال، در سال ۱۴۰۲ هجری خورشیدی. بررسی داده‌های اقلیمی نشان می‌دهد که در شهر شیراز، گرم‌ترین هفته سال، بین تاریخ‌های ۵ تا ۱۱ مردادماه، و سردترین هفته سال بین تاریخ‌های یک تا هفت دی‌ماه است. بنابراین، در این دو هفته با حضور در محل، برداشت‌ها به صورت مستمر و ۲۴ ساعته انجام شدند و در مجموع ۱۶۸ داده برای هر کدام از متغیرهای اقلیمی مورد مطالعه در هر نوبت، ثبت شد. دستگاه‌های مورد استفاده جهت برداشت‌ها، مطابق جدول (۹) است.

پس از برداشت‌های میدانی و برای محاسبه مقادیر شاخص جهانی اقلیم حرارتی، توجه به انجام فرایندها و نکاتی ضروری است. فرمول و برنامه مربوط به محاسبه شاخص جهانی اقلیم گرمایی، به زبان برنامه‌نویسی فرترن در دسترس است. در این فرمول، T_g دمای هوا (در محدوده ۵۰- تا ۵۰ درجه سانتی گراد)، T_r بیانگر متوسط دمای تابشی، V_g سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین (در بازه ۰/۵ تا ۱۷ متر بر ثانیه) و P_g فشار بخار آب بر حسب هکتوپاسکال است. پس از برداشت‌های میدانی، برای محاسبه اجزای فرمول از روابط زیر استفاده می‌شود:

الف) برای محاسبه متوسط دمای تابشی از رابطه (۵) استفاده می‌شود (ASHRAE, 2021).

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 V_g^{0.6}}{ED^{0.4}} * (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273.15 \quad (5)$$

در این رابطه، T_{mrt} متوسط دمای تابشی بر حسب درجه سانتی گراد و T_g دمای کروی بر حسب درجه سانتی گراد، V_g سرعت هوا بر حسب متر بر ثانیه، T_a دمای هوا بر حسب درجه سانتی گراد، D قطر کره دماسنج کروی

بر تجزیه، کاهش پراکندگی و توزیع راه حل در هنگام رویارویی با مسائلی است که در آن‌ها توابع هدف از مقیاس یکسانی برخوردار نیستند (Elarbi et al., 2017). الگوریتم تکاملی مبتنی بر شاخص می‌تواند کیفیت تقریب مجموعه پارتوی تولید شده را تا حد زیادی بهبود بخشد. علاوه بر این، الگوریتم تکاملی مبتنی بر شاخص از نظر همگرایی بهتر عمل می‌کند (Bechikh et al., 2017). دو شاخص که برای اغلب رویکردهای مبتنی بر شاخص در حل مسائل بهینه‌سازی با تعداد اهداف زیاد استفاده شده‌اند، عبارتند از شاخص ابر حجم^{۶۶} و شاخص $R2$. نتایج تجربی نشان داده است که الگوریتم تخمین ابر حجم، بر روی برخی از آزمون‌ها با حداکثر ۵۰ هدف، از عملکرد رقابتی برخوردار بوده و کارا تر است (Bechikh et al., 2017). برای مقابله با هزینه محاسباتی بالای استفاده از شاخص ابر حجم، الگوریتم تخمین ابر حجم^{۶۷} معرفی شده است (Bader & Zitzler, 2011) که در آن از الگوریتم مونت کارلو^{۶۸} (Bader et al., 2010) برای تقریب مقادیر دقیق ابر حجم استفاده می‌شود. بر این اساس، استفاده از دسته‌ای از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه مبتنی بر شاخص که راهی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه هستند (Azzouz et al., 2014; Zitzler & Künzli, 2004)، تحت عنوان الگوریتم تخمین ابر حجم، مبنای حل مسئله بهینه‌سازی این پژوهش قرار گرفته است.

بر پایه موارد اشاره شده و نیز پیشینه پژوهش‌های انجام گرفته، از میان متغیرهای مؤثر بر میزان آسایش حرارتی بیرونی، متغیرهای شکل و نوع حیاط، نسبت ابعادی آن، جهت قرارگیری، تعداد طبقات و میزان سایه‌اندازی، زاویه بین جهت غالب باد و محور اصلی حیاط، بر آسایش حرارتی فضای باز بسیار تأثیرگذار خواهند بود. لذا گزینه بهینه، می‌بایست عوامل مذکور را پاسخ دهد. همچنین از میان انبوه شاخص‌های اندازه‌گیری آسایش حرارتی در فضای باز، شاخص جهانی اقلیم حرارتی، شاخص مناسب برای انجام این پژوهش خواهد بود. به علاوه، در بهینه‌یابی چندهدفه از میان گزینه‌های مختلف، بهتر است الگوریتم‌های مبتنی بر پارتو و دسته‌ای از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه مبتنی بر شاخص تحت عنوان الگوریتم تخمین ابر حجم، مبنای حل مسئله بهینه‌سازی قرار گیرند.

اعتبارسنجی

به منظور بررسی صحت داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها، مطابق تصویر (۵) یکی از قطعات زمین‌های ساخته شده در محدوده مورد مطالعه



تصویر ۵. موقعیت و تصویر ساختمان مورد مطالعه.

جدول ۹. مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده جهت برداشت داده‌های میدانی.

دستگاه	Delta Ohm TP3275	Delta Ohm HP3217R	Delta Ohm AP3203.2	Delta Ohm HD32.3	تصویر
پارامتر قابل اندازه‌گیری	دمای کروی	دمای هوا، رطوبت نسبی	سرعت هوا	نمایشگر دارای امکان ثبت و ضبط اطلاعات	
طبقه بندی دقت	۱/۳ DIN	دمای هوا: ۱/۳ DIN رطوبت نسبی: ± ۱/۵ (۰-۹۰٪ RH) / ± ۳٪ (۹۰-۱۰۰٪ RH)	± ۰/۵ + ۰/۵٪		
بازه اندازه‌گیری	-۳۰ تا ۱۲۰ °C	T = -۴۰ تا ۱۰۰ °C RH = ۰ تا ۱۰۰٪	۰/۰۵ تا ۵ m/s		
دقت	۰/۱ °C	۰/۱ °C و ۰/۱ RH	۰/۰۱ m/s		

$$e_s = 0.61078 \exp \frac{21.8745584 * T}{T + 265.5} \quad (۸)$$

در این روابط e_s ، فشار بخار آب اشباع در دمای مورد نظر بر حسب کیلو پاسکال و T دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد است. اما در دستورالعمل محاسبه شاخص جهانی اقلیم حرارتی (Bröde, 2009)، از رابطه (۹) برای محاسبه مقدار فشار بخار آب اشباع استفاده شده است (Hardy, 1990) که حاصل محاسبات آن، با روابط بالا اختلاف جزئی دارد و این رابطه اخیر در محاسبات این مطالعه به کار رفته است.

$$\ln e_s = \sum_{i=0}^6 g_i T^{i-2} + g_7 \ln T \quad (۹)$$

$$g_0 = -2.8365744 * 10^3$$

$$g_1 = -6.028076559 * 10^3$$

$$g_2 = 1.954263612 * 10^1$$

$$g_3 = -2.737830188 * 10^{-2}$$

$$g_4 = 1.6261698 * 10^{-5}$$

$$g_5 = 7.0229056 * 10^{-10}$$

$$g_6 = -1.8680009 * 10^{-13}$$

$$g_7 = 2.7150305$$

در این رابطه، e_s فشار بخار اشباع بر حسب پاسکال و T دمای هوا بر حسب درجه کلوین است.

پس از اتمام برداشت‌ها و وارد کردن داده‌ها به نرم‌افزار اکسل، فرایند اعتبارسنجی داده‌ها انجام شد. مطابق دستورالعمل اشری (۱۴، ۲۰۱۴)، می‌بایست در وهله اول، ضریب تغییرات خطای جذر میانگین مربعات γ و خطای میانگین بایاس نرمال شده^{۱۱} داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های حاصل از برداشت‌های میدانی محاسبه شوند. با توجه به اینکه، داده‌ها به‌صورت ساعتی (زیر یک ماه) ثبت شده‌اند، مقدار ضریب تغییرات خطای جذر میانگین مربعات برای این نوع داده‌ها، باید کمتر از ۳۰٪ و مقدار خطای میانگین بایاس نرمال شده باید زیر ۱۰٪ باشند و در این صورت داده‌های شبیه‌سازی معتبر خواهند بود (ASHRAE, 2014). مطابق

بر حسب متر (در دماسنج کروی مورد استفاده، قطر این کره ۰/۱۵ متر است)، ε ضریب انتشار که مطابق مشخصات مندرج در کاتالوگ محصول، ۰/۹۵ در نظر گرفته می‌شود.

ب) برای به‌دست آوردن سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین نیز، از رابطه (۶) استفاده می‌شود (Fiala et al., 2012):

$$v_h = v_r \frac{\log\left(\frac{h}{r}\right)}{\log\left(\frac{h_r}{r}\right)} \quad (۶)$$

که در آن، v_h سرعت در ارتفاع دلخواه مدنظر از سطح زمین، h ارتفاع دلخواه از سطح زمین (معمولاً برای محاسبه شاخص جهانی اقلیم حرارتی، ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین (Lam et al., 2021) در نظر گرفته می‌شود که در این مطالعه نیز ملاک عمل قرار گرفت)، v_r سرعت باد در ارتفاع مرجع (ارتفاع ۱۰ متر)، h_r ارتفاع مرجع از سطح زمین (معمولاً در داده‌های هواشناسی، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری ارائه شده است که این ارتفاع، ارتفاع مرجع در نظر گرفته می‌شود) و r طول زیری^{۱۲} است. ج: با توجه به اینکه دستگاه مورد استفاده در برداشت‌های میدانی، درصد رطوبت نسبی را ثبت می‌کند، برای راحتی کار و با استفاده از فرمول‌های مربوطه، رابطه ارائه‌شده در برنامه‌نویسی فرترن، با هدف جایگزینی مقدار فشار بخار آب جزئی با رطوبت نسبی، به زبان برنامه‌نویسی پایتون برگردانده شد. برای تبدیل فشار بخار آب جزئی به درصد رطوبت نسبی، باید نخست مقدار فشار بخار آب اشباع در دمای هوای مورد نظر را به‌دست آورد و سپس با داشتن میزان فشار بخار آب موجود، می‌توان مقدار رطوبت نسبی را محاسبه نمود. عموماً مقدار فشار بخار آب اشباع را از روابط زیر محاسبه می‌کنند (Monteith & Unsworth, 2013; Mur-
ray, 1967). رابطه (۷) برای دماهای بالای صفر و رابطه (۸) برای دماهای زیر صفر درجه سانتی‌گراد است.

$$e_s = 0.61078 \exp \frac{17.2693882 * T}{T + 237.3} \quad (۷)$$

و مقدار خطای میانگین بایاس نرمال شده، برای هر کدام از متغیرهای مورد مطالعه در تصویر (۱۱) نمایش داده شده است. مطابق جدول (۱۰)، برای همه متغیرها و در هر دو فصل زمستان و تابستان، مقادیر کم‌تر از حدود اشاره شده در دستورالعمل اشری ۱۴ بوده و بنابراین، داده‌های شبیه‌سازی شده معتبر قلمداد می‌شوند. با توجه به اینکه متغیر وابسته مورد مطالعه، درصد ساعات آسایش حرارتی یا بدون تنش حرارتی است، بررسی داده‌های برداشت شده میدانی نشان می‌دهد که در توده‌گذاری فعلی، در فصل تابستان ۳۱٪ و در فصل زمستان، ۷٪ اوقات مورد مطالعه، شاخص جهانی اقلیم حرارتی، در رده «بدون تنش حرارتی» قرار می‌گیرد. هم‌چنین بررسی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی نیز عیناً همین درصدها را نشان می‌دهد؛ به عبارتی تطابق ۱۰۰ درصدی در مورد درصد ساعاتی که حیاط در رده بدون تنش حرارتی قرار می‌گیرد، وجود دارد.

یافته‌ها و بحث

پس از آنالیز داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، نتایج به دست آمده ثابت می‌کند که جانمایی مناسب حیاط در زمین، با توجه به تأثیرات خرد اقلیمی

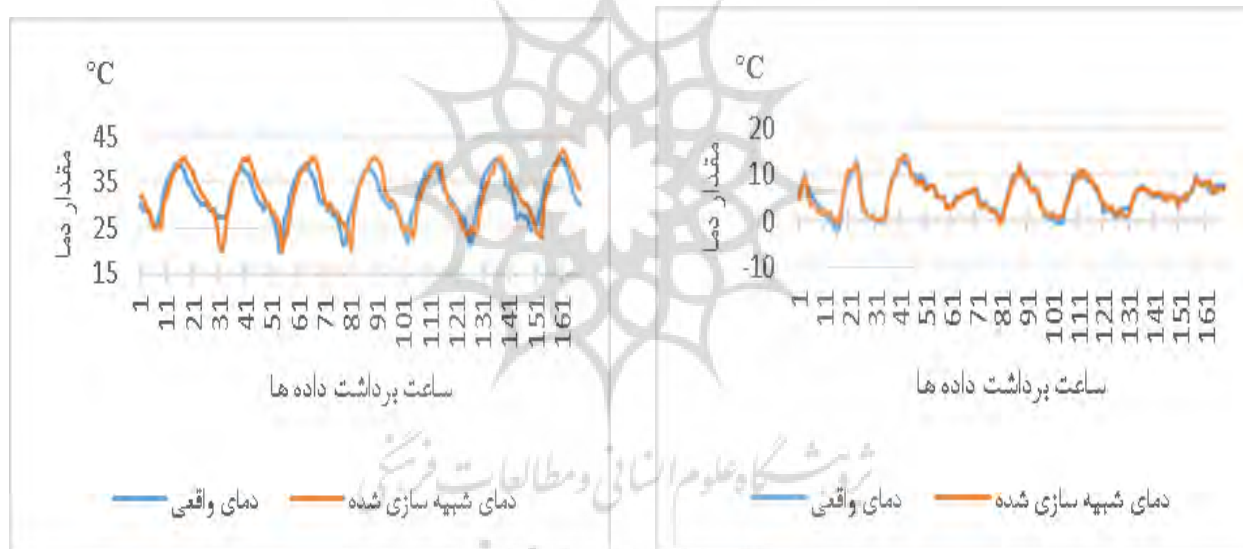
دستورالعمل اشری ۱۴، مقادیر این دو پارامتر از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs} - x_{sim})^2}{(n-1)}}}{\bar{x}} \quad (10)$$

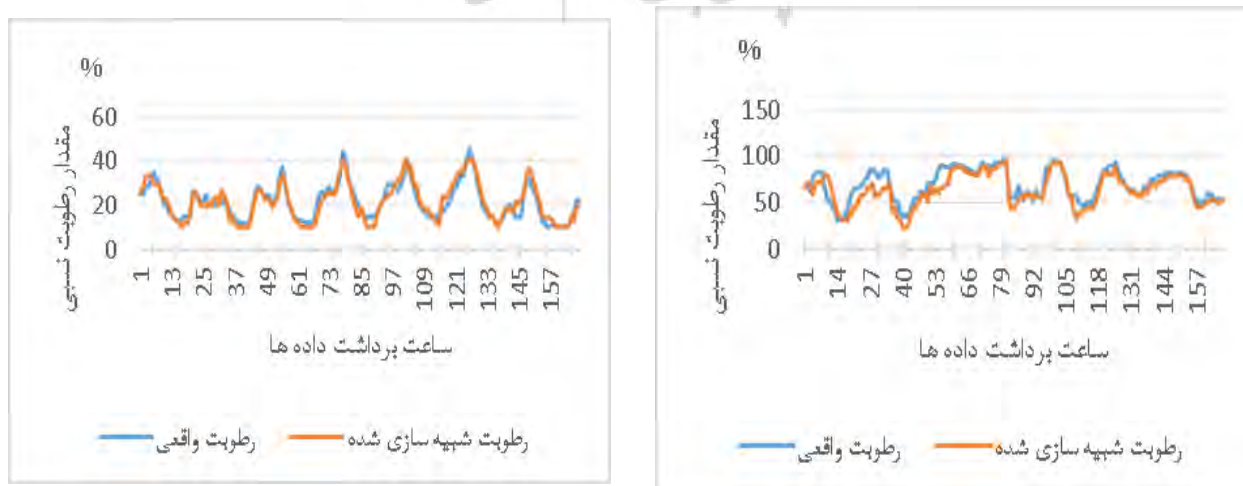
$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{obs} - x_{sim})}{(n-1) \cdot \bar{x}} \quad (11)$$

در روابط فوق، x_{obs} مقادیر واقعی داده‌های مشاهده شده، x_{sim} مقادیر داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، n تعداد کل داده‌ها که در این مطالعه ۱۶۸ داده برای هر کدام از متغیرها و میانگین مقادیر میدانی مشاهده شده هستند.

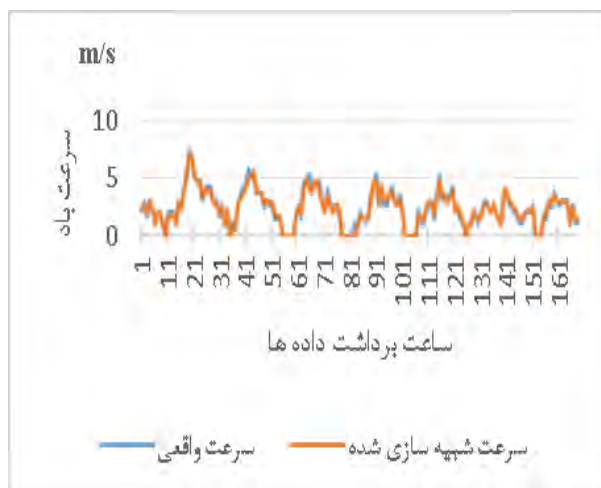
در تصاویر (۶) تا (۱۰)، مقایسه میان داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و برداشت‌های میدانی برای هر کدام از متغیرها مشاهده می‌شود. هم‌چنین مقادیر محاسبه شده برای ضریب تغییرات خطای جذر میانگین مربعات



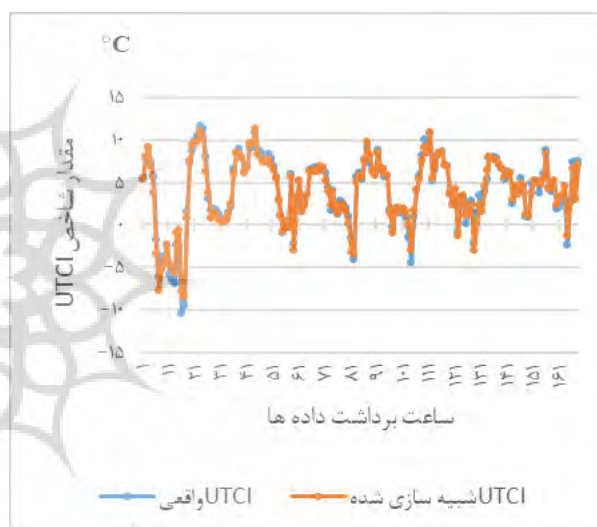
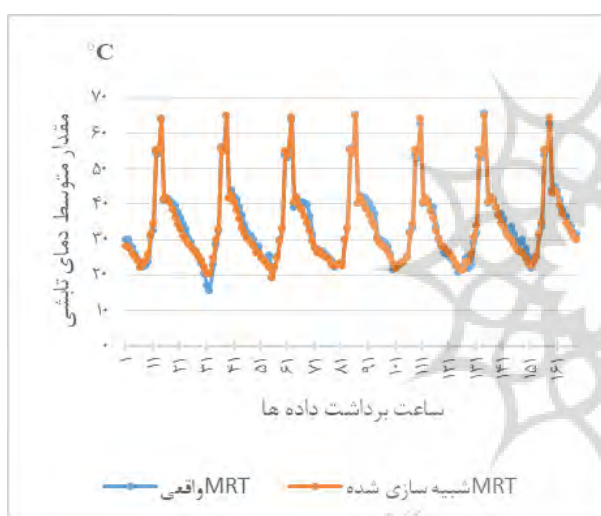
تصویر ۶. مقایسه دمای حاصل از داده‌های شبیه‌سازی شده و برداشت‌های میدانی در دو فصل زمستان (راست) و تابستان (چپ).



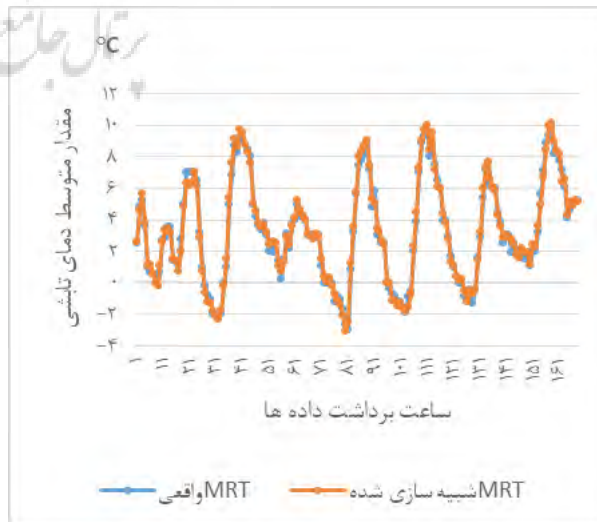
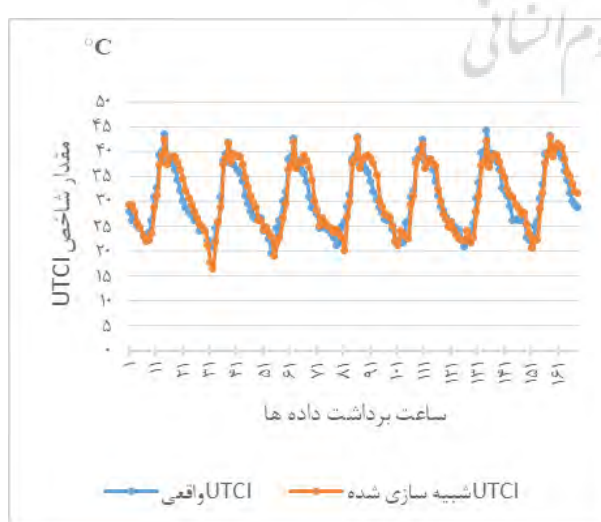
تصویر ۷. مقایسه درصد رطوبت نسبی حاصل از داده‌های شبیه‌سازی شده و برداشت‌های میدانی در دو فصل زمستان (راست) و تابستان (چپ).



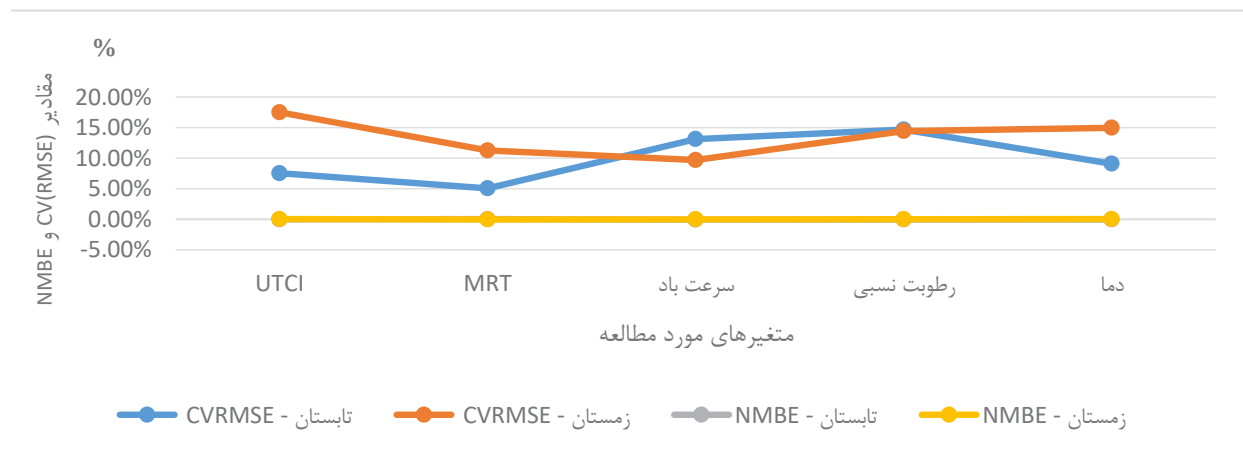
تصویر ۸. مقایسه سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر حاصل از داده‌های شبیه سازی شده و برداشت‌های میدانی در دو فصل زمستان (راست) و تابستان (چپ).



تصویر ۹. مقایسه دمای متوسط تابشی حاصل از داده‌های شبیه سازی شده و برداشت‌های میدانی در دو فصل زمستان (راست) و تابستان (چپ).



تصویر ۱۰. مقایسه دمای شاخص جهانی اقلیم حرارتی حاصل از داده‌های شبیه سازی شده و برداشت‌های میدانی در دو فصل زمستان (راست) و تابستان (چپ).



تصویر ۱۱. مقادیر NMBE و CV(RMSE) برای هر کدام از متغیرهای مورد مطالعه در روزهای مورد مطالعه فصول زمستان و تابستان.

جدول ۱۰. مقادیر NMBE و CV(RMSE) برای هر کدام از متغیرهای مورد مطالعه در روزهای مورد مطالعه فصول زمستان و تابستان.

UTCI	MRT	سرعت باد	رطوبت نسبی	دما		
٪۷/۵۴	٪۵/۰۷	٪۱۳/۱۳	٪۱۴/۶۸	٪۹/۱۰	CV(RMSE)	تابستان
-٪۰/۰۳	٪۰/۰۴	-٪۰/۰۷	-٪۰/۰۳	-٪۰/۰۴	NMBE	
٪۱۷/۵۱	٪۱۱/۲۷	٪۹/۷۰	٪۱۴/۴۵	٪۱۴/۹۸	CV(RMSE)	زمستان
٪۰/۰۳	-٪۰/۰۲	٪۰/۰۰	٪۰/۰۰	٪۰/۰۴	NMBE	

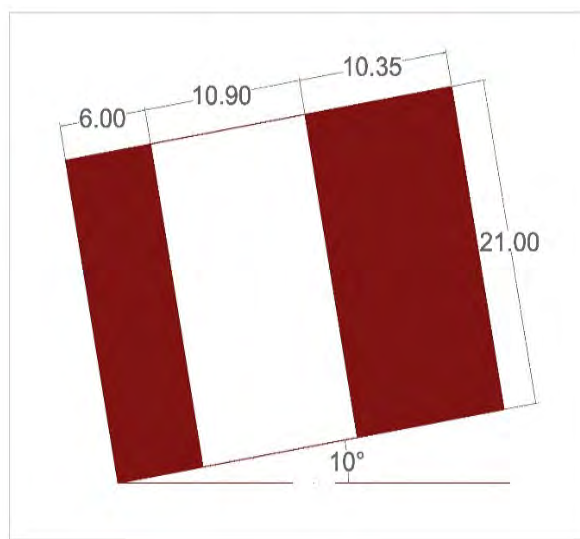
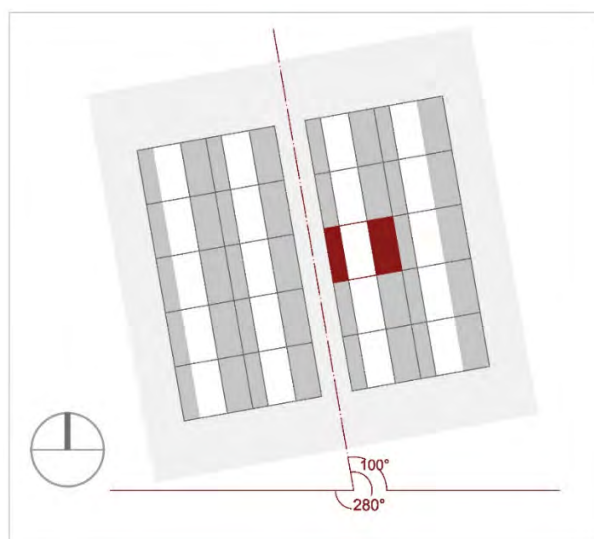
برخی پژوهش‌ها از جمله مطالعه بولوس (۲۰۱۸)، تأثیر مثبت متغیر جهت‌گیری، بر حیاط‌های محصور نشان داده شده بود. دیگر یافته مهم، تأثیر افزایش ارتفاع با افزایش تعداد طبقات است. افزایش ارتفاع حیاط می‌تواند باعث بهبود عملکرد سایه و در نتیجه دمای آسایش در حیاط‌ها شود (Soflaei et al., 2017). تغییر تناسب ارتفاع به طول ساختمان که ضریب دید به آسمان^{۲۲} حیاط را تغییر می‌دهد و بر میزان دسترسی به خورشید و سایه‌اندازی مؤثر است، از دیگر عوامل تأثیرگذار بر افزایش درصد ساعات آسایش حرارتی است (Martinelli & Matzarakis, 2017). حیاط ساختمان‌های هفت طبقه در حدود ۴۷٪ اوقات مورد بهره‌برداری در محدوده آسایش حرارتی قرار می‌گیرد و حیاط بناهای یک طبقه در ۴۱٪، هم‌چنین این نسبت‌ها در مورد پیاده‌روها به ترتیب حدود ۴۷ و ۴۲ درصد است. بنابراین با افزایش ارتفاع، شرایط آسایش حرارتی بهتری در حیاط فراهم می‌شود؛ چنانچه این امر در برخی پژوهش‌های دیگر (Diz-Mellado et al., 2023) نیز اشاره شده است. به‌علاوه، در پژوهشی با بررسی عددی عملکرد حرارتی پیکربندی‌های مختلف حیاط‌های سنتی شیراز برای دستیابی به آسایش حرارتی مطلوب، نشان داده شده که استفاده از نسبت‌های بیشتر ارتفاع به عرض حیاط مناسب‌تر است (Nasrollahi et al., 2017).

از دیگر سو، تأثیر تناسب حیاط نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه در فرایند بهینه‌یابی، حیاط‌های با تناسب مختلف عرض به طول مورد بررسی قرار گرفته است، حیاط بهینه معرفی شده که دارای نسبت عرض به طول ۱ به ۱/۹۳ بوده، بیشترین تأثیر را در افزایش درصد ساعات آسایش حرارتی داشته است. چنانچه پیش‌تر در پژوهشی مشابه، نشان داده شد که نسبت‌های ابعاد حیاط یک عامل تعیین کننده در به

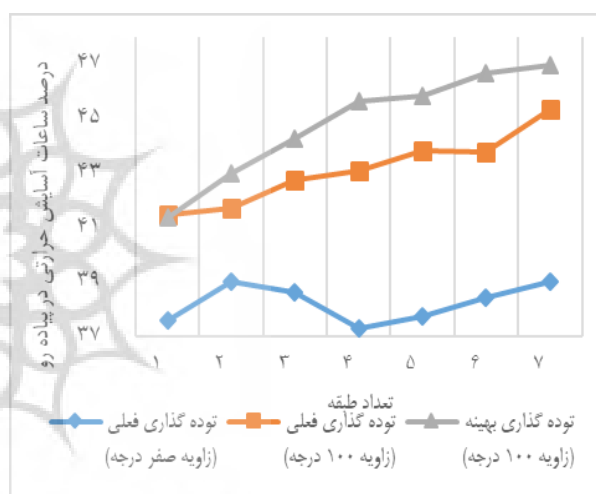
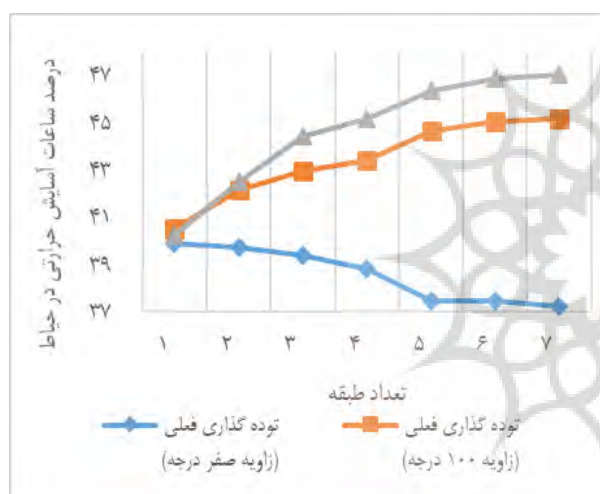
آن، می‌تواند تأثیر مثبتی بر آسایش حرارتی استفاده‌کنندگان از فضاهای باز داشته باشد. یافته‌های این مطالعه در ادامه پژوهش‌های مشابه در دیگر مناطق دنیا، نشان می‌دهد که فاکتورهای طراحی حیاط از جمله شکل (Yang & Li, 2011)، جهت‌گیری (Taleghani, Tenpierik, & van den Dobbelsteen, 2014)، تناسب و زاویه بین جهت جریان غالب با محور اصلی حیاط (Moonen et al., 2011; Rojas et al., 2012)، بر عملکرد حرارتی فضای باز مؤثر است.

از نظر شکل و نوع حیاط، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که حیاط میانی محصور می‌تواند درصد ساعات آسایش حرارتی فضای باز را ارتقا دهد. این موضوع همسو با نتیجه مطالعه لویز و همکارانش (۲۰۲۳) بوده که نشان دادند حیاط محصور می‌تواند اثر پتانسیل خنک‌کنندگی حیاط را تا ۱/۶ و آسایش حرارتی را تا ۱/۴ درجه در مقیاس شاخص اقلیم حرارتی جهانی افزایش دهد. هم‌چنین طبق تصویر (۱۲)، حیاط سراسری به عرض ۱۰/۹ متر (۴۰٪ طول زمین)، باید به‌نحوی قرار گیرد که عرض بنا در بخش نزدیک به خیابان، ۶ متر (حدود ۲۲٪ طول زمین) و در انتهای دیگر زمین، ۱۰/۳۵ متر (حدود ۳۸٪ طول زمین) باشد.

مطابق تصویر (۱۲)، برای ساختمان‌های دو تا هفت طبقه، در شرایطی که زاویه قرارگیری عرض بنا، محور حیاط و خیابان نسبت به خط افق ۱۰۰ درجه (نسبت به وضعیت پیش فرض توده‌گذاری در ابتدای شبیه‌سازی‌ها، ۲۸۰ درجه) و بنا دارای یک حیاط میانی باشد، درصد ساعات آسایش حرارتی در حیاط و پیاده‌رو نسبت به وضعیت توده‌گذاری فعلی، بیشتر خواهد بود. تنها در ساختمان‌های یک طبقه، وضعیت توده‌گذاری فعلی با زاویه قرارگیری ۱۱۰ درجه نتایج بهتری نشان می‌دهد. پیش‌تر نیز در



تصویر ۱۲. مشخصات هندسی حالت بهینه.



تصویر ۱۳. نمودارهای مقایسه‌ای مقادیر درصد ساعات آسایش حرارتی در حیاط و پیاده‌رو برای حالت بهینه و توده‌گذاری پیش فرض فعلی به تفکیک تعداد طبقات.

بهینه تأثیر شایانی دارد. جهات غالب وزش باد در شهر شیراز، در محدوده ۲۷۰ تا ۳۰۰ درجه است و بر این اساس، آنالیز باد، توسط افزونه‌ای دی‌تری دی^۳ (Kastner & Dogan, 2021) که در نرم افزار راینو و گرس‌هاپر فعال می‌شود، انجام شد. نکته شایان توجه در ارتباط با بهره‌گیری از باد، زاویه قرارگیری بنا و معابر است؛ به نحوی که بتواند باد را به درون حیاط و معابر هدایت کند. چنانچه در تصاویر (۱۵-۱۶) مشاهده می‌شود، سرعت جریان هوا در نمونه‌های مورد مطالعه، تقریباً نزدیک به هم بوده و اختلاف جزئی حداکثر ۰/۳ متر بر ثانیه دارند که نمی‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تفاوت در مقادیر شاخص جهانی اقلیم گرمایی داشته باشد. بنابراین، آنچه در این ارتباط تأثیر قابل توجه خواهد داشت، مقدار متوسط دمای تابشی است.

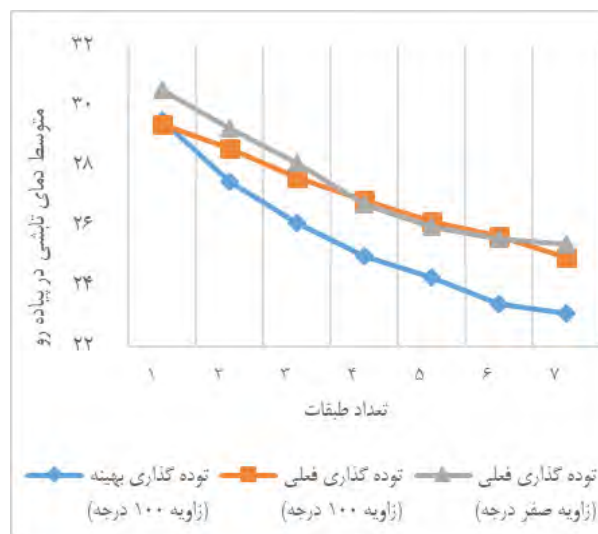
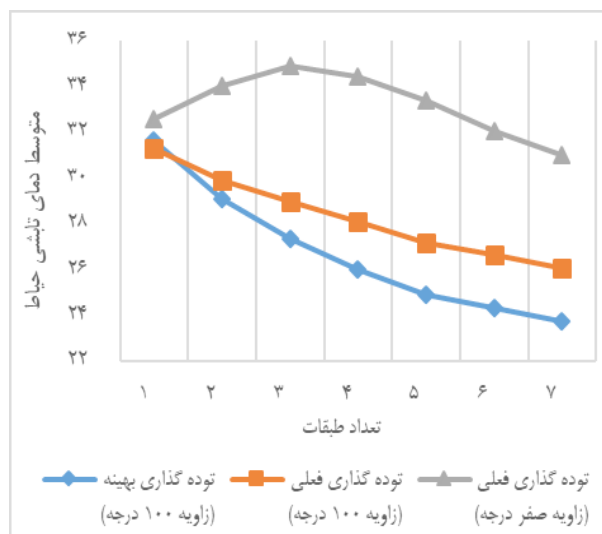
نتیجه‌گیری

این پژوهش، با هدف افزایش استفاده از فضاهای باز سکونتگاه‌های مسکونی طراحی شده بر اساس اقلیم و انتقال تجربه‌های کارآمد گذشته به طرح‌های امروزی، الگوهای مختلف استقرار حیاط در ساختمان‌های

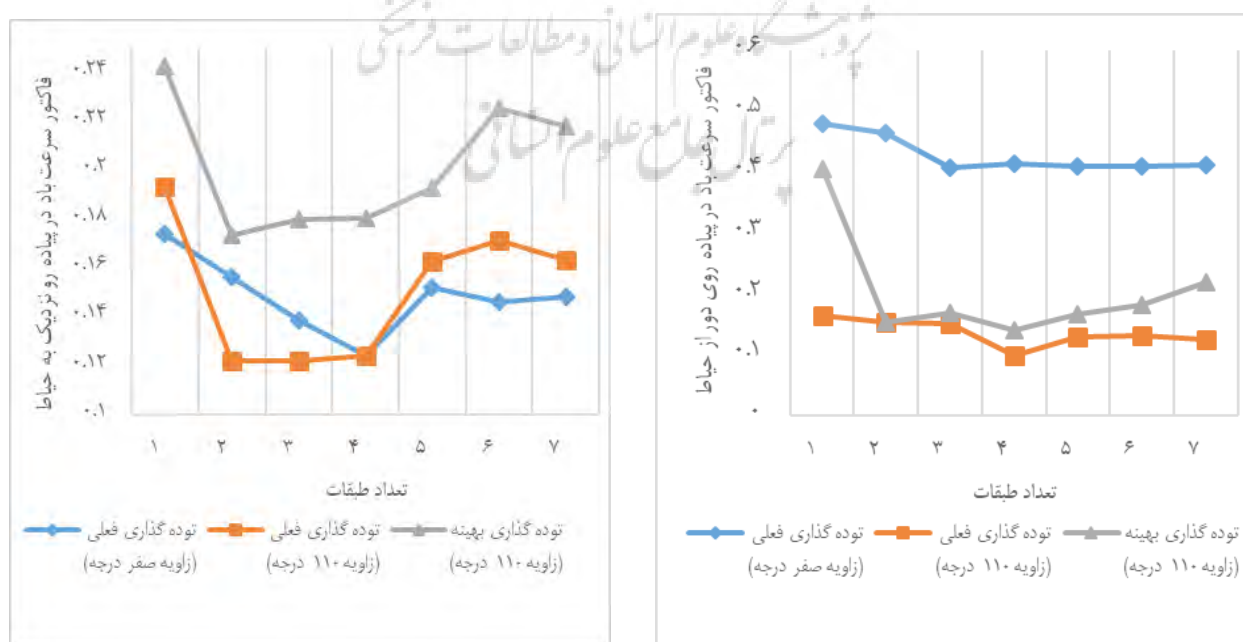
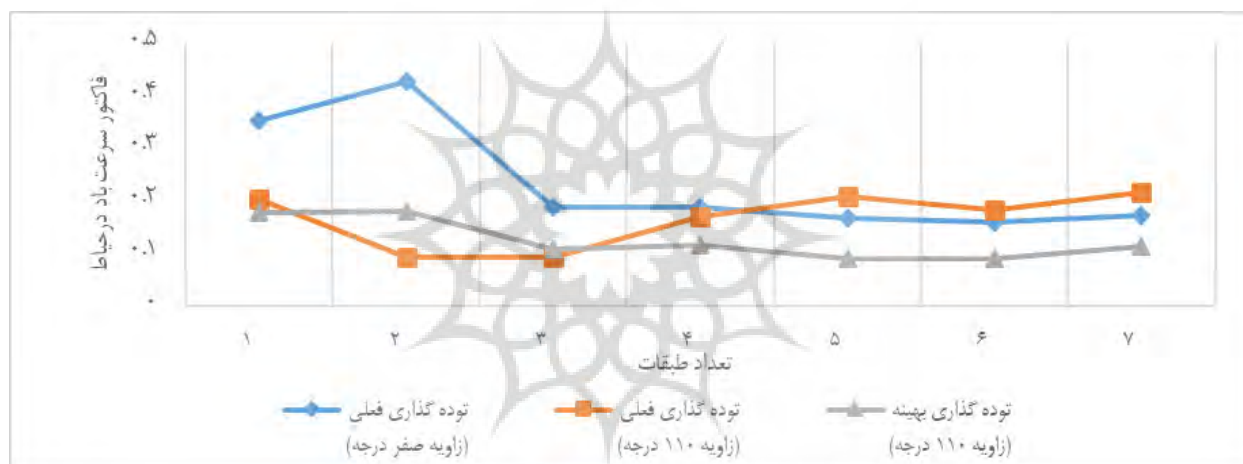
حداکثر رساندن پتانسیل خنک‌کنندگی حیاط بوده و حیاط‌های دارای نسبت طول به عرض بزرگتر، راه‌حل‌های مناسبی به ویژه در گرم‌ترین مناطق هستند که مدیریت عملکرد خرداقلیمی را در تابستان تقویت می‌کنند (Carlos et al., 2019).

مقادیر درصد ساعات آسایش حرارتی در حیاط و پیاده‌رو، برای حالت‌های توده‌گذاری بهینه و فعلی در تصویر (۱۳) ارائه شده است. چنانچه پیش‌تر اشاره شد، شاخص جهانی اقلیم گرمایی از برهم‌کنش متوسط دمای تابشی، سرعت جریان هوا، مقدار رطوبت نسبی و دمای خشک هوا محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه دمای خشک هوا و میزان رطوبت نسبی در همه گزینه‌های شبیه‌سازی شده یکسان است، آنچه در اینجا باعث ایجاد تفاوت در مقادیر شاخص جهانی اقلیم گرمایی می‌شود، سرعت جریان هوا و متوسط دمای تابشی است. مقایسه مقادیر متوسط دمای تابشی برای حالت‌های توده‌گذاری فعلی و حالت بهینه در تصویر (۱۴) آمده است. چنانچه از نمودارهای ارائه‌شده بر می‌آید، متوسط دمای تابشی حالت بهینه در حیاط و پیاده‌روها کمتر از حالات فعلی است که بر افزایش درصد ساعات آسایش حرارتی در حیاط و پیاده‌رو در حالت

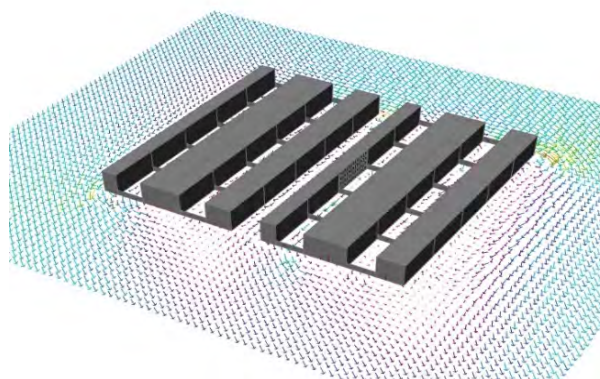
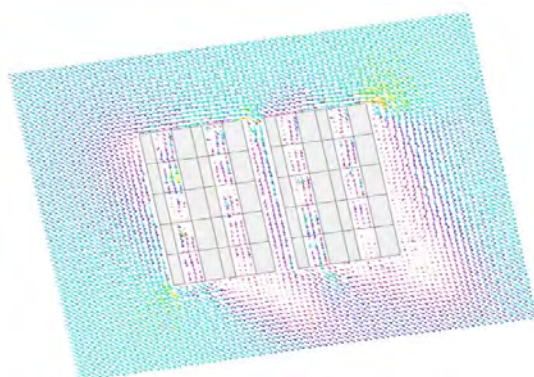
تأثیر جانمایی حیاط بر آسایش حرارتی بیرونی در ساختمان‌های مسکونی میان مرتبه شهر شیراز



تصویر ۱۴. نمودارهای مقادیر متوسط دمای تابشی در حیاط و پیاده‌رو برای حالت بهینه و توده‌گذاری فعلی به تفکیک تعداد طبقات.



تصویر ۱۵. نمودارهای مقایسه‌ای فاکتور سرعت باد در حیاط و پیاده‌رو برای حالت بهینه و توده‌گذاری فعلی به تفکیک تعداد طبقات.



تصویر ۱۶. وکتورهای جریان هوا در ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین.

پیاده‌روها، متعاقباً می‌تواند به‌طور قابل توجهی به افزایش امکان استفاده از این فضاها کمک کند. جهت بهینه‌سازی قرارگیری و ارتفاع بنا، بر پتانسیل سایه‌اندازی مؤثر هستند. افزایش ارتفاع حیاط با افزایش تعداد طبقات ساختمان و یا افزایش سقف مجاز ارتفاع برای هر طبقه، می‌تواند باعث بهبود عملکرد سایه و در نتیجه دمای آسایش در حیاط‌ها شود. با توجه به اینکه در حیاط‌های میانی محصور بناهای دو تا هفت طبقه مطابق هندسه حالت بهینه معرفی شده، سایه‌اندازی مناسبی ایجاد می‌شود که باعث کاهش متوسط دمای تابشی می‌شود، می‌توان از پتانسیل حرارتی و تلطیف این حیاط‌ها استفاده کرد. هم‌چنین در این راستا، پیشنهاد می‌شود که در طراحی‌های شهری آینده، علاوه بر استفاده از حیاط‌های محصور، به ترکیب با آب، پوشش‌های گیاهی مانند درختان و گیاهان بومی نیز توجه شود تا پتانسیل سایه‌اندازی در این فضاها به‌طور بهینه‌تری به کار گرفته شود.

د) تأثیر تناسبات حیاط بر آسایش حرارتی

این مطالعه، اهمیت تناسبات حیاط و نحوه جانمایی آن را نشان می‌دهد. تناسبات صحیح حیاط و جانمایی آن، در افزایش جریان هوا و بهبود تهویه طبیعی نقش دارند. با توجه به شرایط اقلیمی شیراز، انتخاب اندازه و موقعیت دقیق حیاط می‌تواند به‌طور چشم‌گیری بر راحتی ساکنین تأثیر بگذارد. حیاط برگزیده دارای شکل مستطیلی و تناسبات تقریبی ۱ به ۱/۹۳ بوده که باید در میان زمین قرار گیرد، به‌گونه‌ای که در بخش نزدیک به خیابان آن، حدود ۲۲٪ طول زمین توده‌گذاری شود و در بخش دیگر حیاط نیز، حدود ۳۸٪ توده‌گذاری انجام شود. طول حیاط برابر با عرض زمین است.

ه) توجه به اقلیم و نیازهای محلی

این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی حیاط‌ها و جانمایی آن‌ها باید با توجه به ویژگی‌های اقلیمی خاص هر منطقه انجام گیرد. در شهرهایی مانند شیراز که تابش شدید خورشید و دمای بالای تابستان وجود دارد، نیاز به طراحی فضاهای باز با تأکید بر سایه‌اندازی و تهویه طبیعی به‌وضوح احساس می‌شود. در این راستا، همکاری بین معماران، مهندسان انرژی، و طراحان شهری ضروری است تا بتوان به طراحی‌هایی دست یافت که نه تنها آسایش حرارتی بهینه را فراهم کنند، بلکه مصرف انرژی را نیز به حداقل برسانند.

پژوهش حاضر گامی به‌سوی معماری همساز با اقلیم است و

مسکونی میان‌مرتبه (یک تا هفت طبقه) در شهر شیراز را مورد بررسی قرار داده است. با تجزیه و تحلیل ادبیات پژوهش، می‌توان دریافت که یک رویکرد جایگزین برای طراحی ساختمان به منظور بهبود عملکرد زیست محیطی آن، مورد نیاز است. در این راستا، مطالعات و شبیه‌سازی‌های لازم انجام و نتایج زیر حاصل شدند:

الف) تأثیر شکل و محصوریت حیاط بر عملکرد خرد اقلیمی آن

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در بناهای دو تا هفت طبقه، حیاط‌های میانی محصور نسبت به حیاط‌های نیمه‌محصور و باز عملکرد بهتری دارند. در طراحی فضاهای باز، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک مانند شیراز، کاهش تابش مستقیم خورشید و استفاده از سایه دیوارها می‌تواند دمای محیط را کاهش داده و در نتیجه آسایش حرارتی را بهبود بخشد. حیاط‌های میانی محصور با ایجاد فضای بسته‌تر و کنترل‌شده‌تر، فضایی فراهم می‌آورند که هوا به‌طور بهینه در آن جریان پیدا کند و در عین حال تابش مستقیم خورشید را به حداقل می‌رساند.

ب) زاویه قرارگیری ساختمان و تأثیر آن بر آسایش حرارتی

در صورتی که زاویه قرارگیری عرض بنا و محور حیاط و خیابان نسبت به خط افق ۱۰۰ درجه باشد، این امر موجب افزایش درصد ساعات آسایش حرارتی در حیاط بناهای دو تا هفت طبقه و نیز پیاده‌روها شده و می‌تواند در طراحی‌های معماری در مناطق مشابه مفید باشد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت تحلیل دقیق جهت‌گیری ساختمان‌هاست که نقش مهمی در کاهش تابش مستقیم خورشید و بهینه‌سازی تهویه طبیعی ایفا می‌کند. تنها در ساختمان‌های یک طبقه استثنایی وجود دارد که آن را می‌توان به‌دلیل کاهش اثر سایه‌اندازی عمودی دانست. در این راستا، توصیه می‌شود که در طرح‌های شهری و معماری شهرهای مختلف، جهت‌گیری ساختمان‌ها به‌دقت مطالعه و طراحی شود تا به پتانسیل بهینه‌سازی حرارتی دست یافت.

ج) تعداد طبقات، پتانسیل سایه‌اندازی و تأثیر آن بر کاهش دمای تابشی

نکته مهم دیگر، تأثیر سایه‌اندازی مناسب در حیاط‌های میانی محصور و تأثیر آن‌ها بر سایه‌اندازی بیشتر در پیاده‌روهاست. سایه‌اندازی می‌تواند نقش بسیار مهمی در کاهش دمای متوسط تابشی ایفا کند؛ به‌ویژه، در فضاهای باز که با تابش شدید خورشید مواجه هستند. استفاده از طراحی‌های مبتنی بر سایه‌اندازی در فضاهای باز مسکونی و

روش‌های غیرفعال را دریابند. چراکه حیاط‌های بهینه‌شده، به کاهش اثر جزایر حرارتی در مقیاس محله، امکان استفاده بیشتر از فضاهای باز و سرزندگی فضاهای زندگی و شهری کمک می‌کنند. برای گسترش این نتایج در آینده، پیشنهاد می‌شود که فاکتورهای دیگری مانند مصالح نما و ضریب سپیدایی آن‌ها، سایبان‌های موضعی یا کلی، پوشش‌های گیاهی، حوض و تکنیک‌های نوین برای بهبود کیفیت محیط در فضای باز و نیز مقدار مصرف انرژی، مورد پژوهش قرار گیرند.

می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای بازنگری در مقررات ملی ساختمان ایران و ضوابط شهرداری در خصوص محل قرارگیری توده ساختمانی و یا حتی چیدمان بلوک‌های شهری مورد استفاده سیاست‌گذاران قرار گیرد. برای پیاده‌سازی نتایج در مقیاس کلان، لازم است در مقررات ملی ساختمان و دستورالعمل‌های شهرداری‌ها، به این موضوع توجه شده و رعایت زوایا و تناسبات بهینه در پروانه‌های ساخت ساختمان‌های میان‌مرتبه، الزامی شود. همچنین معماران و طراحان شهری باید آموزش داده شوند و اهمیت افزایش درصد ساعات آسایش حرارتی فضاهای باز با استفاده از

پی‌نوشت‌ها

۱. مطابق تعاریف مقررات ملی ساختمان، چنانچه ارتفاع ساختمان بیش از ۲۳ متر باشد، در طبقه‌بندی ساختمان‌های بلندمرتبه قرار می‌گیرد، اما در این مقررات تعریفی از بناهای کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه ارائه نشده است. از سوی دیگر، در تنظیمات نرم‌افزار مورد استفاده جهت شبیه‌سازی‌های آسایش حرارتی (افزونه ابزارهای لیدی‌باگ)، به‌طور کلی دو طبقه‌بندی بناهای میان‌مرتبه و بلندمرتبه وجود دارد و بنا به اظهارات سازندگان این افزونه، شبیه‌سازی‌های بناهای کوتاه‌مرتبه نیز با استفاده از تنظیمات طبقه‌بندی بناهای میان‌مرتبه انجام می‌شود (Mackey, 2021). لذا با توجه به اینکه ساختمان‌های تا هفت طبقه، عموماً زیر ۲۳ متر ارتفاع خواهد داشت و نیز به توصیه سازندگان افزونه ابزارهای لیدی‌باگ، نام‌گذاری ساختمان‌های مسکونی میان‌مرتبه، برای بناهای یک تا هفت طبقه انتخاب شده است.

36. PET: Physiologically Equivalent Temperature.
37. THI: Temperature Humidity Index.
38. PT: Perceived Temperature.
39. SET: Standard Effective Temperature.
40. OUT - SET.
41. UTCI: Universal Thermal Climate Index.
42. mPET: modified Physiologically Equivalent Temperature.
43. Köppen climate classification.
۴۴. یک هکتوپاسکال، برابر ۱۰۰ پاسکال یا ۰/۱ کیلو پاسکال یا ۱ میلی‌بار است.
45. Honeybee.
46. Ladybug Tools.
47. Pareto front.
48. Non-dominated Solutions.
49. Multi-Objective Problems (Mops).
50. Aggregative Methods.
51. Evolutionary Methods.
52. Evolutionary Algorithms (Eas).
53. The Weighted Sum Method.
54. The E-Constraint Method.
55. The Goal Programming.
56. The Reference Point Method.
57. The Reference Direction Method.
58. The Light Beam Search Method.
59. Evolutionary Algorithms (Eas).
60. Multi-Objective Evolutionary Algorithms (Moeas).
61. Pareto-Based Evolutionary Methods.
62. Non-Elitist Approaches.
63. Elitist Methods.
64. Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based On Decomposition (Moea/D).
65. Indicator-Based Evolutionary Algorithm (Ibea).
66. Hypervolume Indicator.
67. Hypervolume Estimation Algorithm (Hype).
68. Monte Carlo Algorithm.
69. Roughness Length.
70. Cv(Rmse): The Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error.
71. Nmbe: Normalized Mean Bias Error.
72. Sky View Factor.
73. Eddy 3D.

فهرست منابع

Al Horr, Y., Arif, M., Kaushik, A., Mazroei, A., Katafygiotou, M., & Elsarrag, E. (2016). Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. *Building*

2. Yard X Change (Y.X.C).
3. X Move Vector (X.M.V).
4. Y Move Vector (Y.M.V).
5. Rotation Angle (R.A.).
6. Floor Number (F.N.).
7. Yard Thermal Comfort Percent (%) (YTCP).
8. Pedestrian Thermal Comfort Percent (%) (PTCP).
9. Postpositivism.
10. Grasshopper.
11. Rhino.
12. MOO: Multiobjective Optimization.
13. Octopus.
14. Elitism.
15. Mut. Probability.
16. Mutation Rate.
17. Crossover rate.
18. HypE Reduction.
19. HypE Mutation.
20. OTCA: Outdoor Thermal Comfort Autonomy.
21. Convergence.
22. The Pareto Optimal Non-Dominated Solutions.
23. Heuristic Search Techniques.
24. Wsm: Weighted Sum Method.
25. Weighted Arithmetic Mean.
26. Courtyard Tempering Effect.
۲۷. Albedo: آلبدو یا سپیدایی به مفهوم درصد بازتاب نور از سطح یک جسم است. مقادیر این کمیت می‌تواند از صفر (تاریک مطلق) تا یک (روشن مطلق) تغییر پیدا کند.
28. WBGT: Wet Bulb Globe Temperature.
29. DI: Discomfort Index.
30. ITS: Index of Thermal Stress.
31. HI: Heat Index.
32. TSI: Thermal Strain Index.
33. WCI: Wind Chill Index.
34. WCET: Wind Chill Equivalent Temperature.
35. PMV: Predicted Mean Vote.

and Environment, 105, 369-389. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>

ASHRAE. (2014). ASHRAE Guideline 14: Measurement of energy, demand, and water savings. In (Vol. 4, pp. 1-150).

ASHRAE. (2021). ASHRAE Handbook: Fundamentals. ASHRAE. <https://books.google.com/books?id=5P-szgEACAAJ>

Azzouz, N., Bechikh, S., & Said, L. B. (2014). Steady state IBEA assisted by MLP neural networks for expensive multi-objective optimization problems Proceedings of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation, Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.1145/2576768.2598271>

Bader, J., Deb, K., & Zitzler, E. (2010). Faster Hypervolume-Based Search Using Monte Carlo Sampling. Multiple Criteria Decision Making for Sustainable Energy and Transportation Systems, Berlin, Heidelberg.

Bader, J., & Zitzler, E. (2011). HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization. Evolutionary Computation, 19(1), 45-76. https://doi.org/10.1162/EVCO_a_00009

Bandyopadhyay, S., Chakraborty, R., & Maulik, U. (2015). Priority based ϵ dominance: A new measure in multiobjective optimization. Information Sciences, 305, 97-109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.01.018>

Bechikh, S., Ben Said, L., & Ghedira, K. (2013). Group Preference-based Evolutionary Multi-objective Optimization with Non-Equally Important Decision Makers: Application to the Portfolio Selection Problem. International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications, 5.

Bechikh, S., Elarbi, M., & Ben Said, L. (2017). Many-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: A Survey. In S. Bechikh, R. Datta, & A. Gupta (Eds.), Recent Advances in Evolutionary Multi-objective Optimization (pp. 105-137). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42978-6_4

Bechikh, S., Said, L. B., & Ghédira, K. (2011, 5-8 Dec. 2011). Negotiating decision makers' reference points for group preference-based Evolutionary Multi-objective Optimization. 2011 11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS),

Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., & Kunert, A. (2010). Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. Miscellaneous Geographica, 14(1), 91-102.

Błażejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. International Journal of Biometeorology, 56(3), 515-535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>

Bröde, P. (2009). UTCI Fortran Sources: Program for calculating UTCI Temperature. Retrieved April, 21 from <https://www.utci.org/cost.html>

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G.,

Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). International Journal of Biometeorology, 56(3), 481-494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>

Bulus, M. (2018). Optimum microclimate effect of fully-enclosed courtyard ratios and orientation in Nigerian temperate hot-dry climate [Article]. Alam Cipta, 11(1), 16-22. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85056723096&partne rID=40&md5=df7282f51155b175981819f169cb3dda>

Carlos, R. G., Eduardo, M. D. M., Carmen, G. M., & Victoria, L. C. (2019). Tempering potential-based evaluation of the courtyard microclimate as a combined function of aspect ratio and outdoor temperature [Article]. Sustainable Cities and Society, 51, Article 101740. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101740>

Cetin, M., Adiguzel, F., Kaya, O., & Sahap, A. (2018). Mapping of bioclimatic comfort for potential planning using GIS in Aydin. Environment, Development and Sustainability, 20(1), 361-375.

Chen, Y.-C., & Matzarakis, A. (2018). Modified physiologically equivalent temperature—basics and applications for western European climate. Theoretical and Applied Climatology, 132(3), 1275-1289. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2158-x>

Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2017). Determination and application of outdoor thermal benchmarks. Building and Environment, 123, 333-350. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.008>

Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2019). Improved assessment of outdoor thermal comfort: 1-hour acceptable temperature range. Building and Environment, 151, 303-317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.057>

Cohen, P., Potchter, O., & Matzarakis, A. (2013). Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. Applied Geography, 37, 1-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.001>

d'Ambrosio Alfano, F. R., Palella Bi Fau - Riccio, G., & Riccio, G. Thermal environment assessment reliability using temperature-humidity indices. (1880-8026 (Electronic)).

de Freitas, C. R., & Grigorieva, E. A. (2017). A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. International Journal of Biometeorology, 61(3), 487-512. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1228-6>

Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., & Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO). Applied Energy, 170, 293-303. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.141>

Diz-Mellado, E., López-Cabeza, V. P., Roa-Fernández, J., Rivera-Gómez, C., & Galán-Marín, C. (2023). Energy-saving and thermal comfort potential of vernacular urban block porosity shading. Sustainable Cities and Society, 89, 104325. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104325>

Dong, X., Wu, Y., Chen, X., Li, H., Cao, B., Zhang, X., Yan,

- X., Li, Z., Long, Y., & Li, X. (2021). Effect of thermal, acoustic, and lighting environment in underground space on human comfort and work efficiency: A review. *Science of The Total Environment*, 786, 147537.
- Dwijendra, N. K. A., Rahardja, U., Kumar, N. B., Patra, I., Zahra, M. M. A., Finogenova, Y., Guerrero, J. W. G., Izzat, S. E., & Alawsi, T. (2022). An Analysis of Urban Block Initiatives Influencing Energy Consumption and Solar Energy Absorption. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21), 14273.
- Elarbi, M., Bechikh, S., Ben Said, L., & Datta, R. (2017). Multi-objective Optimization: Classical and Evolutionary Approaches. In S. Bechikh, R. Datta, & A. Gupta (Eds.), *Recent Advances in Evolutionary Multi-objective Optimization* (pp. 1-30). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42978-6_1
- Fanger, O. (1972). *Thermal Comfort*. New York.
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429-441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>
- Futcher, J., Mills, G., Emmanuel, R., & Korolija, I. (2017). Creating sustainable cities one building at a time: Towards an integrated urban design framework. *Cities*, 66, 63-71.
- Gagge, A. P., Fobelets, A. P., & Berglund, L. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment.
- García-Melgar, P., Guerrero Delgado, M., Montero-Gutiérrez, P., Romero García, C., Sánchez Ramos, J., & Álvarez Domínguez, S. (2025). Nature-based cool pavements for urban overheating mitigation: Experimental proof of concept. *Building and Environment*, 267, 112184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112184>
- Givoni, B. (1963). *Estimation of the effect of climate on man: Development of a new thermal index*. Hebrew University, Jerusalem.
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaacov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77-86. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)
- Gonzalez, R. R., Nishi, Y., & Gagge, A. P. (1974). Experimental evaluation of standard effective temperature a new biometeorological index of man's thermal discomfort. *International Journal of Biometeorology*, 18(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/BF01450660>
- Google. (2023). *Shiraz Map*. Retrieved 26-May from https://www.google.com/maps/@29.7054122,52.4592289,786m/data=!3m1!1e3?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MTEyNC4xIKXMDSoASAFQAw%3D%3D
- Gou, S., Nik, V. M., Scartezzini, J.-L., Zhao, Q., & Li, Z. (2018). Passive design optimization of newly-built residential buildings in Shanghai for improving indoor thermal comfort while reducing building energy demand. *Energy and Buildings*, 169, 484-506. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.095>
- Grazuleviciute-Vileniske, I., Daugelaite, A., & Viliunas, G. (2022). Classification of Biophilic Buildings as Sustainable Environments. *Buildings*, 12(10), 1542.
- Hardy, B. (1990, 1998). ITS-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range -100 to +100 C.
- Havenith, G., Fiala, D., Błażejczyk, K., Richards, M., Bröde, P., Holmér, I., Rintamaki, H., Benshabat, Y., & Jendritzky, G. (2012). The UTCI-clothing model. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 461-470. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>
- Hermawan, H., & Švajlenka, J. (2022). Building Envelope and the Outdoor Microclimate Variable of Vernacular Houses: Analysis on the Environmental Elements in Tropical Coastal and Mountain Areas of Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3), 1818.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71-75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- ISO, I. O. f. S.-. (1993). Evaluation of cold environments: Determination of required clothing insulation (IREQ). In *ISO/TR 11079:1993*.
- Jendritzky, G., de Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI—Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421-428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., & Batchvarova, E. (2009). Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being. *Final Report COST Action*, 730(10).
- Kalboussi, S., Bechikh, S., Kessentini, M., & Ben Said, L. (2013, 2013/7). Preference-Based Many-Objective Evolutionary Testing Generates Harder Test Cases for Autonomous Agents. *Search Based Software Engineering*, Berlin, Heidelberg.
- Kastner, P., & Dogan, T. (2021). Eddy3D: A toolkit for decoupled outdoor thermal comfort simulations in urban areas. *Building and Environment*, 212, 108639. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108639>
- Kim, I. Y., & de Weck, O. L. (2005). Adaptive weighted-sum method for bi-objective optimization: Pareto front generation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 29(2), 149-158. <https://doi.org/10.1007/s00158-004-0465-1>
- Knez, I., & Thorsson, S. (2006). Influences of culture and environmental attitude on thermal, emotional and perceptual evaluations of a public square. *International Journal of Biometeorology*, 50(5), 258-268. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0024-0>
- Krüger, E., Drach, P., & Broede, P. (2017). Outdoor comfort study in Rio de Janeiro: site-related context effects on reported thermal sensation. *International Journal of Biometeorology*,

61(3), 463-475. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1226-8>

Kyle, W. J. (1994, 1994). The human bioclimate of Hong Kong.

Lai, D., Guo, D., Hou, Y., Lin, C., & Chen, Q. (2014). Studies of outdoor thermal comfort in northern China [Article]. *Building and Environment*, 77, 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.026>

Lai, D., Lian, Z., Liu, W., Guo, C., Liu, W., Liu, K., & Chen, Q. (2020). A comprehensive review of thermal comfort studies in urban open spaces. *Science of The Total Environment*, 742, 140092.

Lai, D., Zhou, X., & Chen, Q. (2017a). Measurements and predictions of the skin temperature of human subjects on outdoor environment. *Energy and Buildings*, 151, 476-486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.009>

Lai, D., Zhou, X., & Chen, Q. (2017b). Modelling dynamic thermal sensation of human subjects in outdoor environments. *Energy and Buildings*, 149, 16-25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.028>

Lam, C. K. C., Gao, Y., Yang, H., Chen, T., Zhang, Y., Ou, C., & Hang, J. (2021). Interactive effect between long-term and short-term thermal history on outdoor thermal comfort: Comparison between Guangzhou, Zhuhai and Melbourne. *Science of The Total Environment*, 760, 144141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144141>

Li, J., Niu, J., Mak, C. M., Huang, T., & Xie, Y. (2020). Exploration of applicability of UTCI and thermally comfortable sun and wind conditions outdoors in a subtropical city of Hong Kong. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101793. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101793>

Liu, B. (2023). Human Settlement, Inhabitation, and Travel Environment Construction Theory and Technology. In *The Trialism and Application of Human Settlement, Inhabitation and Travel Environment Studies* (pp. 185-267). Springer.

Liu, K., Nie, T., Liu, W., Liu, Y., & Lai, D. (2020). A machine learning approach to predict outdoor thermal comfort using local skin temperatures. *Sustainable Cities and Society*, 59, 102216. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102216>

Liu, Z., Cheng, K. Y., He, Y., Jim, C. Y., Brown, R., Shi, Y., Lau, K., & Ng, E. (2022). Microclimatic measurements in tropical cities: Systematic review and proposed guidelines. *Building and Environment*, 109411.

López-Cabeza, V. P., Rivera-Gómez, C., Roa-Fernández, J., Hernandez-Valencia, M., & Herrera-Limones, R. (2023). Effect of thermal inertia and natural ventilation on user comfort in courtyards under warm summer conditions. *Building and Environment*, 228, 109812. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109812>

Lucchese, J. R., Mikuri, L. P., de Freitas, N. V. S., & Andreasi, W. A. (2016). Application of selected indices on outdoor thermal comfort assessment in Midwest Brazil. *International Journal of Energy and Environment*, 7(4), 291.

Mackey, C. (2021). *Where are the building programs for individual rooms in residential buildings?* Retrieved Jan, 17 from <https://discourse.ladybug.tools/t/where-are-the-building-programs-for-individual-rooms-in-residential-buildings/15812>

Martinelli, L., & Matzarakis, A. (2017). Influence of height/width proportions on the thermal comfort of courtyard typology for Italian climate zones [Article]. *Sustainable Cities and Society*, 29, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.004>

Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76-84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>

Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43-49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>

Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. Academic press.

Moonen, P., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2011). Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 414-423.

Moraci, F., Errigo, M. F., Fazia, C., Campisi, T., & Castelli, F. (2020). Cities under pressure: Strategies and tools to face climate change and pandemic. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18), 7743.

Muhaisen, A. S. (2006). Shading simulation of the courtyard form in different climatic regions. *Building and Environment*, 41(12), 1731-1741.

Muhaisen, A. S., & Gadi, M. B. (2006a). Effect of courtyard proportions on solar heat gain and energy requirement in the temperate climate of Rome [Article]. *Building and Environment*, 41(3), 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.031>

Muhaisen, A. S., & Gadi, M. B. (2006b). Shading performance of polygonal courtyard forms [Article]. *Building and Environment*, 41(8), 1050-1059. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.027>

Murray, F. W. (1967). On the Computation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6(1), 203-204. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006<0203:OTCOSV>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006<0203:OTCOSV>2.0.CO;2)

Nakhace Sharif, A., Keshavarz Saleh, S., Afzal, S., Shoja Razavi, N., Fadaei Nasab, M., & Kadaei, S. (2022). Evaluating and Identifying Climatic Design Features in Traditional Iranian Architecture for Energy Saving (Case Study of Residential Architecture in Northwest of Iran). *Complexity*, 2022.

Nasrollahi, N., Hatami, M., Khastar, S. R., & Taleghani, M. (2017). Numerical evaluation of thermal comfort in traditional courtyards to develop new microclimate design in a hot and dry climate [Article]. *Sustainable Cities and Society*, 35, 449-467. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.017>

Nazarian, N., Acero, J. A., & Norford, L. (2019). Outdoor thermal comfort autonomy: Performance metrics for climate-

- conscious urban design. *Building and Environment*, 155, 145-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.028>
- Nicholson, S., Nikolopoulou, M., Watkins, R., Löve, M., & Ratti, C. (2024). Data driven design for urban street shading: Validation and application of ladybug tools as a design tool for outdoor thermal comfort. *Urban Climate*, 56, 102041. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102041>
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar Energy*, 70(3), 227-235. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00093-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00093-1)
- Nikolopoulou, M., & Lykoudis, S. (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces: Analysis across different European countries. *Building and Environment*, 41(11), 1455-1470. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.031>
- Oh, W., Ooka, R., Nakano, J., Kikumoto, H., & Ogawa, O. (2019). Environmental index for evaluating thermal sensations in a mist spraying environment. *Building and Environment*, 161, 106219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106219>
- Oktay, D. (2002). Design with the climate in housing environments: An analysis in Northern Cyprus [Article]. *Building and Environment*, 37(10), 1003-1012. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00086-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00086-5)
- Olgyay, V., Olgyay, A., Lyndon, D., Olgyay, V. W., Reynolds, J., & Yeang, K. (2015). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism - New and expanded Edition* (REV - Revised ed.). Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctvc77kqb>
- Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573.
- Pickup, J., & de Dear, R. (2000). An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*)-part I-the model and its assumptions.
- Pijpers-van Esch, M. (2015). Designing the Urban Microclimate: A framework for a design-decision support tool for the dissemination of knowledge on the urban microclimate to the urban design process. A+ BE | *Architecture and the Built Environment*(6), 1-308.
- Potchter, O., Cohen, P., Lin, T.-P., & Matzarakis, A. (2018). Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Science of The Total Environment*, 631-632, 390-406. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276>
- Qaid, A., & Ossen, D. R. (2015). Effect of asymmetrical street aspect ratios on microclimates in hot, humid regions. *International Journal of Biometeorology*, 59(6), 657-677. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0878-5>
- Rivera-Gómez, C., Diz-Mellado, E., Galán-Marín, C., & López-Cabeza, V. (2019). Tempering potential-based evaluation of the courtyard microclimate as a combined function of aspect ratio and outdoor temperature. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101740. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101740>
- Rodríguez-Algeciras, J., Tablada, A., Chaos-Yeras, M., De la Paz, G., & Matzarakis, A. (2018). Influence of aspect ratio and orientation on large courtyard thermal conditions in the historical centre of Camagüey-Cuba [Article]. *Renewable Energy*, 125, 840-856. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.082>
- Rojas, J. M., Galán-Marín, C., & Fernández-Nieto, E. D. (2012). Parametric study of thermodynamics in the mediterranean courtyard as a tool for the design of eco-efficient buildings. *Energies*, 5(7), 2381-2403.
- Rutty, M., & Scott, D. (2015). Bioclimatic comfort and the thermal perceptions and preferences of beach tourists. *International Journal of Biometeorology*, 59(1), 37-45. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0820-x>
- Safarzadeh, H., & Bahadori, M. N. (2005). Passive cooling effects of courtyards [Article]. *Building and Environment*, 40(1), 89-104. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.04.014>
- Sehgal, J., & Kumar, G. (2025). Thermal comfort in open public spaces – A critical review in Indian context. *Building and Environment*, 267, 112239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112239>
- Shareef, S. (2021). The impact of urban morphology and building's height diversity on energy consumption at urban scale. The case study of Dubai. *Building and Environment*, 194, 107675.
- Sharma, M. R., & Sharafat, A. (1986). Tropical summer index—a study of thermal comfort of Indian subjects. *Building and Environment*, 21(1), 11-24.
- Soflaei, F., Shokouhian, M., Abraveshdar, H., & Alipour, A. (2017). The impact of courtyard design variants on shading performance in hot- arid climates of Iran [Article]. *Energy and Buildings*, 143, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.027>
- Soflaei, F., Shokouhian, M., Tabadkani, A., Moslehi, H., & Berardi, U. (2020). A simulation-based model for courtyard housing design based on adaptive thermal comfort [Article]. *Journal of Building Engineering*, 31, Article 101335. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101335>
- Spagnolo, J., & de Dear, R. (2003). A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*, 38(5), 721-738. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00209-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00209-3)
- Staiger, H., Laschewski, G., & Grätz, A. (2012). The perceived temperature – a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *International Journal of Biometeorology*, 56(1), 165-176. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0409-6>
- Steadman, R. G. (1979). The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 18(7), 861-873.

Taleghani, M. (2018). Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2011-2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>

Taleghani, M., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2014). Energy performance and thermal comfort of courtyard/atrium dwellings in the Netherlands in the light of climate change [Article]. *Renewable Energy*, 63, 486-497. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.028>

Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelsteen, A., & Sailor, D. J. (2014). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands [Article]. *Solar Energy*, 103, 108-124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>

Thom, E. C. (1959). The Discomfort Index. *Weatherwise*, 12(2), 57-61. <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>

Vaz, I. C. M., Ghisi, E., Thives, L. P., Vieira, A. S., Rupp, R. F., Schaefer, A., Flores, R. A., Bastos, M. B., Marinoski, D. L., Silva, A. S., Weeber, M., & Invidiata, A. (2025). Dashboard for interpreting future climate files used in the simulation of buildings – An outdoor thermal comfort approach. *Energy and Buildings*, 326, 115059. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115059>

Xie, Y., Niu, J., Zhang, H., Liu, S., Liu, J., Huang, T., Li, J., & Mak, C. M. (2020). Development of a multi-nodal thermal regulation and comfort model for the outdoor environment assessment. *Building and Environment*, 176, 106809. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106809>

Yaglou, C. P., & Minaed, D. (1957). Control of heat casualties at military training centers. *Arch. Indust. Health*, 16(4), 302-316.

Yang, L., & Li, Y. (2011). Thermal conditions and ventilation in an ideal city model of Hong Kong. *Energy and Buildings*, 43(5), 1139-1148.

Zamani, Z., Heidari, S., Azmoodeh, M., & Taleghani, M. (2019). Energy performance and summer thermal comfort of traditional courtyard buildings in a desert climate [Article]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38(6), Article e13256. <https://doi.org/10.1002/ep.13256>

Zamani, Z., Heidari, S., & Hanachi, P. (2018). Reviewing the thermal and microclimatic function of courtyards [Review]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 580-595. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.055>

Zhan, D., Zhang, Q., Kwan, M.-P., Liu, J., Zhan, B., & Zhang, W. (2022). Impact of urban green space on self-rated health: Evidence from Beijing. *Frontiers in Public Health*, 10.

Zhao, J., & Du, Y. (2020). Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. *Solar Energy*, 206, 997-1017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.090>

Zheng, P., Yao, R., O'Donnell, J., Mohareb, E., Kumar, P., Pain, C., Huang, X., & Li, B. (2025). A comprehensive review of thermal comfort evaluation methods and influencing factors for urban parks. *Building and Environment*, 267, 112159. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112159>

Zitzler, E., & Künzli, S. (2004, 2004/). Indicator-Based Selection in Multiobjective Search. Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII, Berlin, Heidelberg.