Journal of Architectural and Environmental Research, Volume 4, Issue 6, September 2026, pp.163-183.

Journal of Architectural and Environmental Research

DOI: 10.30470/jaer.2026.2104526.1246

Investigating the Relationship Between Urban Square Morphology and Outdoor Thermal Comfort in Cold Climates: A Case Study of Zanjan, Iran

Mahsa Sayahhi[1] *

1. Ph.D. Graduate, University of Tehran, Tehran, Iran, Mahsa.sayyahi@ut.ac.ir

Research Article

***Corresponding Author:**
Mahsa sayyahi
Mahsa.sayyahi@ut.ac,ir

Received: 2026/02/16
Accepted: 2026/09/21

Keywords: Urban Morphology, Urban Square, Thermal Comfort, PET Index.

Abstract

Thermal comfort is an indicator of environmental quality in urban public spaces and is influenced by the morphological characteristics of the built environment and climatic conditions. In cold climates, the organization of urban squares plays a role in improving thermal conditions and encouraging users' presence by modifying microclimatic parameters. Despite research on microclimate simulation, the relationship between urban square morphology and thermal comfort in cold climates, particularly in Iranian cities, remains underexplored. Therefore, this study aims to investigate the effects of urban square morphology on users' thermal comfort in cold climates and identify climate-responsive design strategies for improving the quality of these spaces. The study is applied in terms of its objective and descriptive–analytical in terms of its methodology. Three urban squares in Zanjan, Iran, with distinct morphological characteristics were investigated. The climatic and geometric characteristics of the squares were simulated using ENVI-met, while users' thermal comfort was evaluated based on the Physiological Equivalent Temperature (PET) index. Subsequently, relationships between morphological indicators, including the degree of enclosure, H/W ratio, and sky view factor (SVF), and microclimatic parameters, including air temperature, mean radiant temperature, wind speed, and relative humidity, were examined. The results demonstrated that the morphological characteristics of the squares, particularly their geometric configuration and spatial enclosure, influence PET and users' thermal comfort by modifying radiative conditions and airflow. Comparison of the results showed that, although Enghelab Square exhibited the lowest PET value during the morning hours, the increase in mean radiant temperature to approximately 49.6 °C during the middle of the day led to an improvement in thermal conditions, with PET reaching approximately 14 °C at noon. This finding highlights the crucial role of solar radiation exposure and urban square morphology in moderating thermal comfort in cold climates. The novelty of this study lies in elucidating the mechanisms through which urban square morphology affects thermal comfort and translating simulation results into climate-responsive design strategies for urban squares in cold climates. The findings provide a basis for designing and regenerating urban public spaces to enhance environmental quality and improve users' thermal comfort.

Cite this article: Sayyahi, M. (2026). Investigating the Relationship Between Urban Square Morphology and Outdoor Thermal Comfort in Cold Climates: A Case Study of Zanjan, Iran. *Journal of Architectural and Environmental Research, 4*(6), 163–183. https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2104526.1246

Print ISSN: 2588-6363
Online ISSN: 2981-247X

Authors

نشریه پژوهش‌های معماری و محیط، دوره ۴ ، شماره ۶، شهریور ۱۴۰۵ ، صفحات ۱۶۳ -۱۸۳ .

دوفصلنامه پژوهش های معماری و محیط

دانشگاه زنجان

DOI: 10.30470/jaer.2026.2104526.1246

بررسی رابطه میان مورفولوژی میدان‌های شهری و آسایش حرارتی فضای باز در اقلیم سرد مطالعه موردی: شهر زنجان

مهسا سیاحی[۱]*

۱. دانش آموخته معماری، دانشکده معماری، دانشگاه تهران، تهران، ایران، Mahsa.sayyahi@ut.ac.ir

مقاله پژوهشی

*** نویسنده مسئول:**

نام و نام خانوادگی: مهسا سیاحی

Mahsa.sayyahi@ut.ac.ir

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

انتشارمقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

واژگان کلیدی:

مورفولوژی شهری، میدان شهری، آسایش حرارتی، شاخص PET.

چکیده:

آسایش حرارتی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت محیطی فضاهای عمومی شهری است که تحت تأثیر ویژگی‌های مورفولوژیک محیط ساخته‌شده و شرایط اقلیمی قرار دارد در اقلیم‌های سرد، سازمان فضایی میدان‌های شهری از طریق تأثیر بر پارامترهای خردااقلیمی، نقش مهمی در ارتقای کیفیت حرارتی و افزایش حضورپذیری کاربران ایفا می‌کند. با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه شبیه‌سازی خردااقلیم، رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌های شهری و آسایش حرارتی در اقلیم‌های سرد، به‌ویژه در شهرهای ایران، کمتر بررسی شده است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف تبیین تأثیر ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌های شهری بر آسایش حرارتی کاربران و استخراج راهبردهای طراحی اقلیم‌محور انجام شده است. پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر روش توصیفی—تحلیلی است. سه میدان منتخب شهر زنجان با ویژگی‌های مورفولوژیک متفاوت انتخاب شدند. داده‌های اقلیمی و هندسی میدان‌ها در نرم‌افزار ENVI-met شبیه‌سازی و با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی (PET)، شرایط آسایش حرارتی کاربران ارزیابی شد. سپس ارتباط میان شاخص‌های مورفولوژیک، شامل میزان محصوریت، نسبت ارتفاع به عرض (H/W) و ضریب دید آسمان (SVF)، و پارامترهای خردااقلیمی شامل دمای هوا، دمای متوسط تابشی، سرعت باد و رطوبت نسبی بررسی شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های مورفولوژیک میدان، به‌ویژه فرم هندسی و میزان محصوریت، از طریق تغییر شرایط تابشی و جریان هوا، تأثیر محسوسی بر PET و آسایش حرارتی دارند. میدان انقلاب با وجود پایین‌ترین مقدار PET در ساعات صبح، به دلیل افزایش دمای متوسط تابشی تا حدود ۴۹/۶۲ درجه سانتی‌گراد در ساعات میانی روز، بهبود قابل‌توجهی در شرایط حرارتی نشان داد؛ به‌گونه‌ای که مقدار PET آن در ظهر به حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد رسید. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در اقلیم سرد، دریافت تابش خورشیدی و سازمان فضایی میدان نقش تعیین‌کننده‌ای در تعدیل شرایط آسایش حرارتی دارند. نتایج پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی و بازآفرینی فضاهای عمومی شهری با هدف ارتقای کیفیت محیطی و افزایش آسایش حرارتی کاربران قرار گیرد.

استناد به این مقاله: سیاحی، مهسا (۱۴۰۵) بررسی رابطه میان مورفولوژی میدان‌های شهری و آسایش حرارتی فضای باز در اقلیم سرد مطالعه موردی: شهر زنجان . *نشریه پژوهش‌های معماری و محیط*، ۴ (۶)، ۱۶۳-۱۸۳ .

https://doi.org/10.30470/jaer.2026.2104526.1246

شاپا چاپی: ۲۵۸۸-۶۲۶۳

شاپا الکترونیکی: ۲۴۷۸-۲۹۸۱

پدیدآوندگان

مقدمه

آسایش حرارتی در فضاهای باز شهری یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت محیطی محسوب می‌شود و نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان حضورپذیری، فعالیت‌های اجتماعی، سلامت جسمی و روانی شهروندان و پایداری محیط‌های شهری دارد. در دهه‌های اخیر، با تشدید تغییرات اقلیمی، افزایش نوسانات دمایی و رشد شهرنشینی، توجه پژوهشگران به بررسی شرایط آسایش حرارتی در فضاهای عمومی شهری به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در این میان، میدان‌های شهری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فضاهای عمومی، به دلیل تمرکز فعالیت‌های اجتماعی و تعاملات شهری، اهمیت ویژه‌ای در مطالعات اقلیم شهری یافته‌اند. مطالعات زیست‌اقلیمی نشان می‌دهد که آسایش حرارتی در فضای باز تنها تابع شرایط جوی نیست، بلکه به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های کالبدی و مورفولوژی محیط قرار دارد. عواملی نظیر هندسه فضا، میزان محصوریت، نسبت ارتفاع به عرض (H/W) ضریب دید آسمان (Sky View Factor)، جهت‌گیری معابر، پوشش گیاهی و مصالح سطوح می‌توانند از طریق تغییر در دریافت تابش خورشیدی، دمای متوسط تابشی (Tmrt)، الگوی جریان باد و تبادل حرارتی، شرایط متفاوتی از آسایش حرارتی را برای کاربران ایجاد کنند. بنابراین، مورفولوژی شهری یکی از مهم‌ترین ابزارهای طراحی برای کنترل خرداقلیم و ارتقای کیفیت محیطی فضاهای عمومی به شمار می‌رود. در میان شاخص‌های مختلف ارزیابی آسایش حرارتی، شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی (PET) به دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان دمای هوا، دمای متوسط تابشی، سرعت باد و رطوبت نسبی، یکی از معتبرترین شاخص‌های ارزیابی آسایش حرارتی در فضاهای باز شهری محسوب می‌شود. از سوی دیگر، نرم‌افزار ENVI-met نیز به‌عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارهای شبیه‌سازی خرداقلیم شهری، امکان تحلیل اثر ویژگی‌های مورفولوژیک بر متغیرهای اقلیمی را فراهم می‌کند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده بر بررسی آسایش حرارتی در اقلیم‌های گرم و معتدل یا در مقیاس خیابان‌ها و بلوک‌های شهری متمرکز بوده‌اند؛ در حالی که پژوهش‌های اندکی به نقش مورفولوژی میدان‌های شهری در اقلیم‌های سرد، به‌ویژه در شهرهای ایران، پرداخته‌اند. همچنین در بسیاری از این مطالعات، نتایج شبیه‌سازی صرفاً گزارش شده و ارتباط علت و معلولی میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌ها و تغییرات شاخص‌های آسایش حرارتی به‌صورت نظام‌مند تحلیل نشده است. این خلأ پژوهشی ضرورت انجام مطالعه حاضر را آشکار می‌کند. شهر زنجان به دلیل اقلیم سرد و نیمه‌خشک، زمستان‌های طولانی و دماهای پایین، نمونه مناسبی برای بررسی نقش فرم میدان‌های شهری در بهبود آسایش حرارتی فضای باز محسوب می‌شود. در چنین شرایطی، طراحی صحیح فرم و ساختار کالبدی میدان‌ها می‌تواند با افزایش دریافت تابش خورشیدی، کاهش اتلاف حرارت و تعدیل اثر باد، شرایط مطلوب‌تری برای حضور شهروندان در فضاهای عمومی فراهم کند. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر تحلیل رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌های شهری و آسایش حرارتی فضای باز در اقلیم سرد شهر زنجان است. برای دستیابی به این هدف، سه میدان شاخص شهر زنجان با ویژگی‌های کالبدی متفاوت انتخاب شده و اثر تفاوت‌های مورفولوژیک آن‌ها بر پارامترهای خرداقلیمی و شاخص PET با استفاده از شبیه‌سازی ENVI-met و تحلیل در نرم‌افزار RayMan بررسی شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای ارائه راهبردهای طراحی اقلیم‌محور میدان‌های شهری در شهرهای دارای اقلیم سرد باشد. نوآوری پژوهش حاضر در بررسی همزمان ویژگی‌های مورفولوژیک، پارامترهای خرداقلیمی و شاخص PET در میدان‌های شهری با فرم‌های متفاوت و در ساعات مختلف روز در اقلیم سرد شهر زنجان است. این رویکرد امکان بررسی این موضوع را فراهم می‌کند که آیا یک ویژگی مورفولوژیک مشخص می‌تواند به‌تنهایی عملکرد حرارتی میدان را توضیح دهد یا اینکه عملکرد حرارتی حاصل تعامل میان مورفولوژی، شرایط تابشی، جریان هوا و زمان ارزیابی است.

با توجه به تأثیر مستقیم ویژگی‌های کالبدی و مورفولوژیک فضاهای باز شهری بر شرایط خرداقلیمی و آسایش حرارتی کاربران، بررسی چگونگی ارتباط فرم میدان‌های شهری با متغیرهای اقلیمی در اقلیم سرد اهمیت ویژه‌ای دارد. در شهر زنجان، ویژگی‌هایی همچون میزان محصوریت، نسبت ارتفاع جداره به عرض فضا و ضریب دید آسمان (SVF) می‌توانند با تغییر در دریافت و بازتاب تابش خورشیدی، دمای متوسط تابشی و الگوی جریان باد، شرایط حرارتی متفاوتی را در میدان‌های شهری ایجاد کنند. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف مقایسه عملکرد فرم‌های مختلف میدان‌های مورد مطالعه و شناسایی عوامل مؤثر بر آسایش حرارتی، به بررسی رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک فضا، پارامترهای ریزاقلیمی و شاخص دمای فیزیولوژیکی معادل (PET) می‌پردازد. بر این اساس، سؤالات و فرضیه پژوهش در ادامه بدین‌گونه تدوین شده‌اند.

پرسش‌ها و فرضیه پژوهش

۱. عملکرد حرارتی میدان‌ها با فرم‌های هندسی متفاوت در ساعات مختلف روز چه تفاوتی دارد؟

۲. کدام پارامترهای ریزاقلیمی در ایجاد تفاوت‌های عملکرد حرارتی میدان‌های مورد مطالعه نقش دارند؟

«ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌های شهری، به‌ویژه میزان محصوریت و ضریب دید آسمان، از طریق تغییر در دمای متوسط تابشی و سرعت باد، تأثیر محسوسی بر شاخص آسایش حرارتی PET در اقلیم سرد دارند.»

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱. میدان شهری و کیفیت فضایی

میدان شهری یکی از بنیادی‌ترین عناصر ساختار فضایی شهر و از مهم‌ترین فضاهای عمومی است که علاوه بر سازمان‌دهی حرکت و دسترسی، بستری برای تعاملات اجتماعی، فعالیت‌های فرهنگی، اقتصادی و مدنی فراهم می‌کند. میدان‌ها از گذشته تاکنون به‌عنوان هسته‌های اصلی حیات شهری شناخته شده و کیفیت طراحی آن‌ها تأثیر مستقیمی بر سرزندگی، خوانایی، هویت و کیفیت محیط شهری دارد. کارمونا[1] و همکاران، (۲۰۱۰)؛ گهل، (۲۰۱۱).در نظریه‌های طراحی شهری، کیفیت میدان شهری را به میزان تعادل میان بازبودگی و محصوریت نسبت می دهند. جام گهل معتقد است که میدان‌های موفق، فضاهایی هستند که ضمن ایجاد حس امنیت و محصوریت، امکان حضور، توقف و تعامل اجتماعی را برای شهروندان فراهم می‌کنندگهل[2]، (۲۰۱۱) و راب کریر[3] (۱۹۷۹) محصوریت فضایی را یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت میدان دانسته و بیان می‌کنند که تناسب میان ابعاد میدان و ارتفاع ساختمان‌های پیرامونی، ادراک فضایی کاربران را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اوکه[4]، (۱۹۸۸)؛ امانوئل[5]، (۲۰۰۵) بیان کردند، میدان‌ها به دلیل وسعت فضای باز و قرارگیری در معرض تابش خورشید، جریان باد و تبادل حرارتی، از حساس‌ترین فضاهای شهری نسبت به تغییرات شرایط جوی هستند. ویژگی‌های مورفولوژیک میدان، به‌ویژه میزان محصوریت، ضریب دید آسمان، جهت‌گیری و هندسه فضایی، الگوی دریافت تابش خورشیدی، سرعت باد، دمای متوسط تابشی (Tmrt) و سایر مؤلفه‌های خرداقلیم را تغییر می‌دهند و در نتیجه بر آسایش حرارتی کاربران اثرگذارند.

۲. مورفولوژی میدان های شهری

واژه مورفولوژی (Morphology) از ریشه یونانی Morphē به معنای شکل و Logos به معنای شناخت و مطالعه گرفته شده و به معنای مطالعه شکل و ساختارآن است. این مفهوم نخستین‌بار در مطالعات زیست‌شناسی توسط گوته[6] (۲۰۰۹) مطرح شد و بعدها به حوزه‌های جغرافیا، معماری و شهرسازی راه یافت. در مورد میدان‌های شهری، مورفولوژی به‌طور مشخص شامل فرم هندسی میدان، نسبت ارتفاع جداره‌های پیرامونی به عرض فضا (H/W)، ضریب دید آسمان و سازمان فضایی جداره‌ها است. این عناصر از طریق تأثیر بر پارامترهای خرداقلیمی، به‌ویژه دمای متوسط تابشی و جریان باد، شرایط آسایش حرارتی کاربران را شکل می‌دهند (اوکه، ۱۹۸۸). ازاین‌رو، در پژوهش حاضر، «مورفولوژی میدان» به مجموعه ویژگی‌های کالبدی و هندسی میدان‌های شهری اطلاق می‌شود که عملکرد حرارتی فضای باز را در اقلیم سرد تحت تأثیر قرار می‌دهند.بر این اساس، سه متغیر اصلی شامل فرم هندسی میدان، نسبت ارتفاع به عرض (H/W) و ضریب دید آسمان (SVF) به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای مستقل در تحلیل تأثیر فرم و مورفولوژی میدان‌های منتخب شهر زنجان بر آسایش حرارتی در نظر گرفته شده‌اند.

۳. شاخص آسایش حرارتی بیرونی

شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی (Physiological Equivalent Temperature: PET) یکی از پرکاربردترین شاخص‌های ارزیابی آسایش حرارتی در فضاهای باز شهری است که برای سنجش احساس حرارتی انسان در محیط بیرونی به کار می‌رود. این شاخص بر مبنای مدل تعادل انرژی مونیخ (Munich Energy Balance Model for Individuals: MEMI) توسعه یافته و اثر هم‌زمان پارامترهای اقلیمی شامل دمای هوا، دمای متوسط تابشی، رطوبت نسبی و سرعت باد را بر وضعیت حرارتی انسان در نظر می‌گیرد (هوپه[۷]، ۱۹۹۹). برخلاف برخی شاخص‌های حرارتی که عمدتاً برای فضاهای داخلی طراحی شده‌اند، PET به دلیل توانایی در ارزیابی شرایط محیط‌های باز، در مطالعات اقلیم شهری کاربرد گسترده‌ای یافته است. این شاخص، شرایط حرارتی یک محیط واقعی را با یک محیط مرجع استاندارد مقایسه کرده و نتیجه را بر حسب درجه سانتی‌گراد بیان می‌کند؛ ازاین‌رو، تفسیر آن برای پژوهشگران و طراحان شهری آسان‌تر است. ماتزاراکیس[۸] و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعات

احساس حرارتی	UTCI (°C)	PET (°C)
به‌شدت سرد	< -۴۰	
بسیار سرد	-۴۰	کمتر از ۴
	-۲۷	۴
سرد		
	-۱۳	۸
خنک		
	۰	۱۳
کمی خنک		
	۱۸	۱۸
محدوده آسایش حرارتی		
	۲۶	۲۳
کمی گرم		
	۳۲	۲۹
گرم		
	۳۸	۳۵
داغ		
	۴۶	۴۱
بسیار داغ		
	بیشتر از ۴۶	بیشتر از ۴۱

شکل ۱. محدوده شاخص های utci برای درجه های مختلف احساس حرارتی. (نصرالهی و همکاران، ۲۰۱۷)

متعددی نشان دادند که شاخص PET در مقایسه با بسیاری از شاخص‌های دیگر، دقت بیشتری در ارزیابی آسایش حرارتی فضاهای باز دارد و می‌تواند تأثیر تغییرات خرداقلیمی ناشی از ویژگی‌های مورفولوژیک را به‌خوبی نشان دهد (طالقانی[۹]، ۲۰۱۵). به همین دلیل، در پژوهش حاضر از این شاخص برای تحلیل رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌های شهری و آسایش حرارتی کاربران استفاده شده است.

شکل ۱ محدوده مقادیر شاخص UTCI را در ارتباط با درجات مختلف احساس حرارتی نشان می‌دهد. این طبقه‌بندی به‌عنوان یکی از معیارهای استاندارد ارزیابی آسایش حرارتی در فضاهای باز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

٤. اقلیم شهر زنجان

شهر زنجان با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه شرقی و ۳۶ درجه شمالی، در ارتفاع حدود ۱۶۳۰ تا ۱۶۶۰ متر از سطح دریا واقع شده است. میانگین دمای سالانه این شهر حدود ۱۱ تا ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداکثر دمای روزانه حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن—گایگر، زنجان دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک (BSk) است. جهت باد غالب در بیشتر دوره‌ها جنوب‌شرقی گزارش شده، هرچند بادهای محلی نیز در شکل‌گیری شرایط خرداقلیمی نقش دارند. سردترین ماه سال دی (ژانویه) با میانگین دمای نزدیک به صفر یا کمی زیر صفر و میانگین حداقل حدود ۵- تا ۶- درجه سانتی‌گراد است. گرم‌ترین ماه‌ها تیر و مرداد با میانگین حدود ۲۳ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد هستند. زمستان‌های زنجان طولانی، سرد و اغلب همراه با یخبندان و بارش برف است و دمای شبانه در این فصل به‌طور مکرر به زیر صفر می‌رسد.

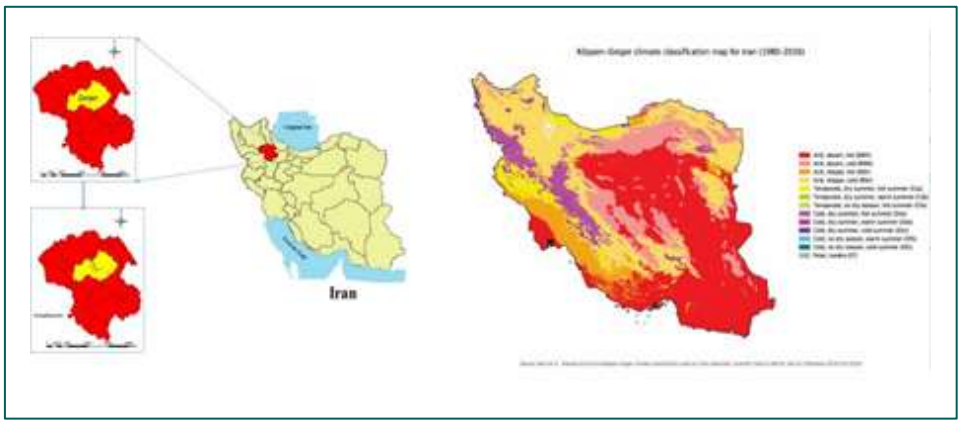
بارش سالانه نسبتاً کم و حدود ۲۹۵ تا ۳۲۰ میلی‌متر است که بیشتر در فصول پاییز، زمستان و بهار متمرکز شده و تابستان‌ها خشک‌اند. اختلاف دمای شب و روز در این شهر قابل‌توجه است.

در چنین شرایط اقلیمی، آسایش حرارتی فضای باز در فصل سرد به‌شدت وابسته به دو عامل کلیدی است:

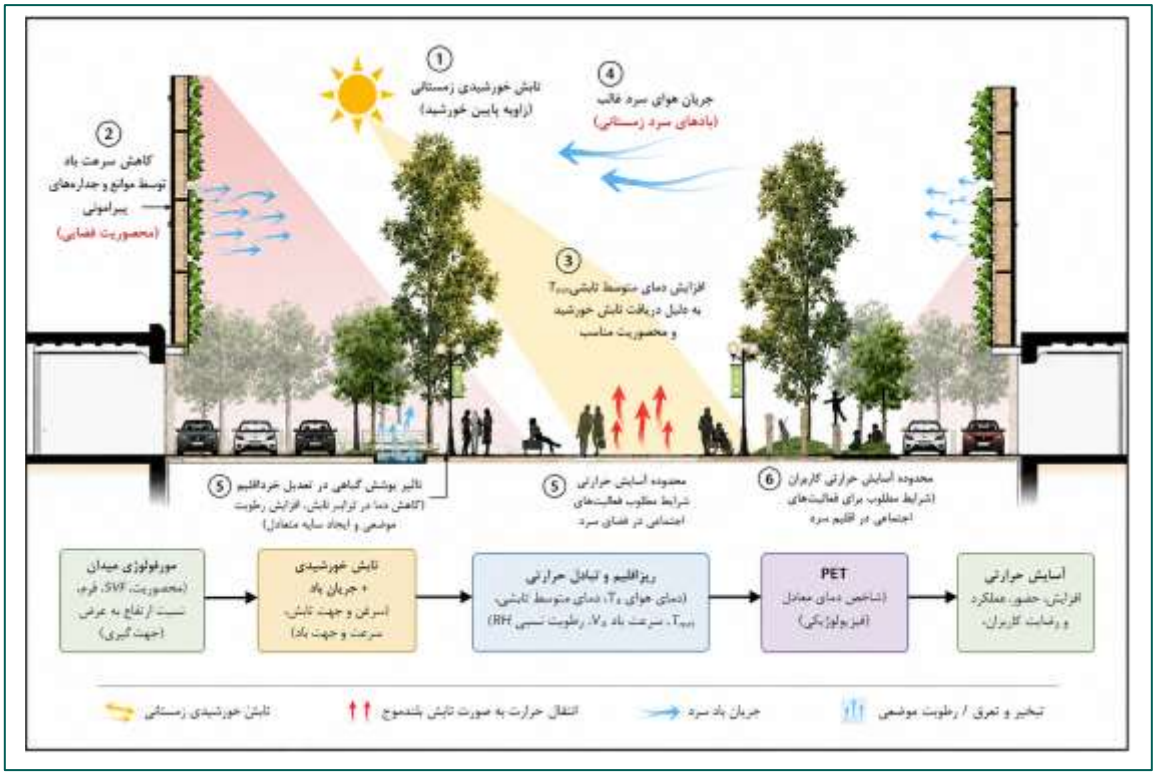
۱ .میزان دریافت و نگهداشت تابش خورشیدی زمستانی

۲ .کنترل مواجهه با بادهای سرد

میدان‌هایی که بتوانند با فرم هندسی مناسب، محصوریت متعادل و سازمان‌دهی جداره‌ها، تابش خورشیدی را بهتر جذب و حفظ کنند و هم‌زمان سرعت بادهای سرد را کاهش دهند، شرایط مطلوب‌تری برای حضور شهروندان فراهم می‌آورند. این ویژگی‌ها مستقیماً با فرم و مورفولوژی میدان در ارتباط هستند و ضرورت بررسی رابطه میان فرم میدان‌های شهری و آسایش حرارتی در زنجان را توجیه می‌کنند.



شکل ۲. موقعیت شهر زنجان و طبقه بندی (بک و همکاران،۲۰۱۸).



شکل ۳. مدل مفهومی تأثیر ویژگی‌های مورفولوژیک میدان شهری بر شکل‌گیری خردااقلیم و آسایش حرارتی کاربران در اقلیم سرد (تدوین: نگارنده).

شکل ۳ مدل مفهومی پژوهش را نشان می‌دهد. در این مدل، ویژگی‌های مورفولوژیک میدان (فرم هندسی، میزان محصوریت، نسبت ارتفاع به عرض و سازمان فضایی جداره‌ها) از طریق تأثیر بر دریافت تابش خورشیدی زمستانی، کاهش سرعت باد و تغییر دمای متوسط تابشی، پارامترهای خرداقلیمی را تعدیل می‌کنند. این تغییرات در نهایت بر شاخص آسایش حرارتی (PET) و میزان حضورپذیری کاربران در فضای باز اثر می‌گذارند.

مطالعات مرتبط با آسایش حرارتی فضای باز طی دو دهه اخیر، هم‌زمان با افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات اقلیمی و کیفیت محیط‌های شهری، رشد قابل توجهی داشته است. این پژوهش‌ها را می‌توان در سه محور اصلی شامل مطالعات مورفولوژی شهری، مطالعات آسایش حرارتی فضای باز و مطالعات مربوط به میدان‌های شهری دسته‌بندی کرد. نخستین مطالعات در زمینه ارتباط میان فرم شهری و اقلیم توسط اولگی[۱۰] (۱۹۶۳) و سپس اوکه (۱۹۸۷[۱۱]، ۱۹۸۸) انجام شد. این پژوهش‌ها نشان دادند که هندسه فضاهای شهری، نسبت ارتفاع به عرض معابر، میزان محصوریت و ضریب دید آسمان (SVF) بر دریافت تابش خورشیدی، تهویه طبیعی، جریان باد و در نهایت بر شرایط خرداقلیم شهری تأثیر مستقیم دارند.

این مطالعات، مبنای توسعه پژوهش‌های بعدی در زمینه طراحی اقلیم‌محور شهری شدند. در ادامه، استیمرز[۱۲] (۲۰۰۳) با مقایسه چند الگوی هندسی شهری در لندن نشان دادند که تغییر فرم کالبدی می‌تواند میزان دریافت انرژی خورشیدی و شرایط آسایش محیطی را به طور قابل توجهی تغییر دهد. همچنین راتی و همکاران[۱۳] (۲۰۰۳) در مطالعه‌ای بر روی فرم حیاط‌های شهری در اقلیم سرد بیان کردند که فرم‌های فشرده‌تر ضمن کاهش اتلاف حرارت، امکان بهره‌گیری بیشتر از تابش خورشیدی را فراهم می‌کنند و در فصل سرد عملکرد اقلیمی مطلوب‌تری دارند.

با توسعه مدل‌های زیست‌اقلیمی، پژوهش‌های متعددی از شاخص‌های آسایش حرارتی نظیر PET و UTCI برای ارزیابی کیفیت محیط‌های شهری استفاده کردند. ماتزاراکیس و همکاران[۱۴] (۱۹۹۹) شاخص PET را به عنوان یکی از معتبرترین شاخص‌های ارزیابی آسایش حرارتی معرفی کردند که اثر هم‌زمان دمای هوا، دمای متوسط تابشی، سرعت باد و رطوبت نسبی را بر احساس حرارتی انسان در نظر می‌گیرد. در ادامه، پژوهش‌های مختلف کارایی این شاخص را در تحلیل شرایط حرارتی فضاهای باز شهری تأیید کردند. هم‌زمان با توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌سازی خرداقلیم، استفاده از ENVI-met در مطالعات آسایش حرارتی گسترش یافت.

پژوهش‌های انجام‌شده در کشورهای مختلف نشان داده‌اند که این نرم‌افزار توانایی مناسبی در شبیه‌سازی اثر مورفولوژی شهری بر پارامترهای اقلیمی از جمله دمای هوا، دمای متوسط تابشی، رطوبت نسبی و سرعت باد دارد و نتایج آن با اندازه‌گیری‌های میدانی از همبستگی قابل قبولی برخوردار است. در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به نقش میدان‌های شهری در ایجاد آسایش حرارتی نیز افزایش یافته است. زولچ و همکاران[۱۵] (۲۰۱۹) نشان دادند که طراحی کالبدی میدان‌ها، به‌ویژه میزان محصوریت، ضریب دید آسمان و نحوه استقرار پوشش گیاهی، می‌تواند شرایط حرارتی کاربران را به طور محسوسی تغییر دهد. همچنین لنژهولزر[۱۶] (۲۰۱۲) تأکید می‌کند که طراحی اقلیم‌محور میدان‌های شهری باید بر پایه شناخت هم‌زمان رفتار تابش خورشیدی، جریان باد و ویژگی‌های هندسی فضا انجام گیرد.

در ایران نیز پژوهش‌هایی در زمینه آسایش حرارتی فضای باز انجام شده است. ورد و همکاران (۱۳۹۷) پارامترهای اقلیمی مؤثر بر آسایش حرارتی در فضاهای باز و نیمه‌باز تهران را بررسی کردند و نشان دادند که ویژگی‌های کالبدی فضاها نقش مهمی در کیفیت آسایش حرارتی کاربران دارند. دهناد و همکاران (۱۴۰۰) نیز با مطالعه مورفولوژی مجتمع‌های مسکونی دریافتند که تفاوت در ساختار کالبدی و میزان محصوریت فضاها موجب تغییر معنی‌دار در شاخص PET می‌شود. خوشبخت و همکاران (۱۳۹۹) نیز با استفاده از شبیه‌سازی ENVI-met در شهر همدان نشان دادند که هندسه بلوک‌های شهری می‌تواند شرایط آسایش حرارتی فصل سرد را بهبود بخشد.

بررسی مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که اگرچه اثر مورفولوژی شهری بر آسایش حرارتی در مقیاس خیابان‌ها، بلوک‌های شهری و محله‌های مسکونی به طور گسترده مطالعه شده است، اما پژوهش‌های اندکی به تحلیل نقش مورفولوژی میدان‌های شهری در اقلیم سرد ایران پرداخته‌اند. علاوه بر این، در بیشتر مطالعات، ارتباط علت و معلولی میان شاخص‌های مورفولوژیک مانند ضریب دید آسمان، میزان محصوریت و شکل هندسی میدان با تغییرات شاخص PET به صورت تحلیلی تبیین نشده و نتایج عمدتاً به گزارش خروجی‌های شبیه‌سازی محدود شده‌اند.

از این رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر میدان‌های شهری زنجان تلاش می‌کند این خلأ پژوهشی را برطرف کرده و رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان، پارامترهای خرداقلیم و آسایش حرارتی فضای باز را به صورت یکپارچه تحلیل کند.

جدول ۱. پیشینه پژوهش. (تدوین: نگارنده)

موارد مرتبط با پژوهش حاضر	مهم‌ترین یافته	موضوع پژوهش	سال	پژوهشگر
مبنای نظری بررسی اثر مورفولوژی میدان‌های شهری	فرم شهری بر تابش، باد و خرداقلیم اثر مستقیم دارد	اقلیم لایه شهری و مورفولوژی	1987, 1988	اوکه وهمکاران
مبنای ارزیابی آسایش حرارتی پژوهش حاضر	شاخص PET معتبرترین شاخص ارزیابی آسایش حرارتی فضای باز است	فرم شهری و دسترسی به تابش	2003	استیمرز وهمکاران
تبیین اثر هندسه فضا بر آسایش حرارتی	تغییر فرم کالبدی باعث تغییر شرایط حرارتی می‌شود	طراحی اقلیم‌محور	2005	اماتوئل وهمکاران
چارچوب تحلیل متغیرهای اقلیمی	مورفولوژی بر دریافت تابش و تهویه اثرگذار است	کیفیت فضاهای عمومی	2011	گهل وهمکاران
مبنای تحلیل میدان‌های شهری	محصوریت مناسب کیفیت حضور در میدان را افزایش می‌دهد	آسایش حرارتی میدان‌ها	2012	لتزهولزر وهمکاران
ارتباط مستقیم با طراحی میدان شهری	طراحی اقلیم‌محور باید همزمان تابش و باد را کنترل کند	آسایش حرارتی فضاهای باز	2014–2017	نصرالهی وطالقانی
تأیید نتایج پژوهش حاضر	فرم‌های فشرده در اقلیم سرد عملکرد بهتری دارند	زیرساخت سبز و میدان‌های شهری	2019	زولچ وهمکاران
مقایسه با نتایج میدان‌های زنجان	SVF و پوشش گیاهی آسایش حرارتی را تغییر می‌دهند	بلوک‌های شهری همدان	1399	خوشبخت، مدی و آزموده
مشابه اقلیم سرد زنجان	هندسه شهری آسایش حرارتی زمستان را بهبود می‌دهد	مورفولوژی مجتمع‌های مسکونی	1400	زارعی و همکاران

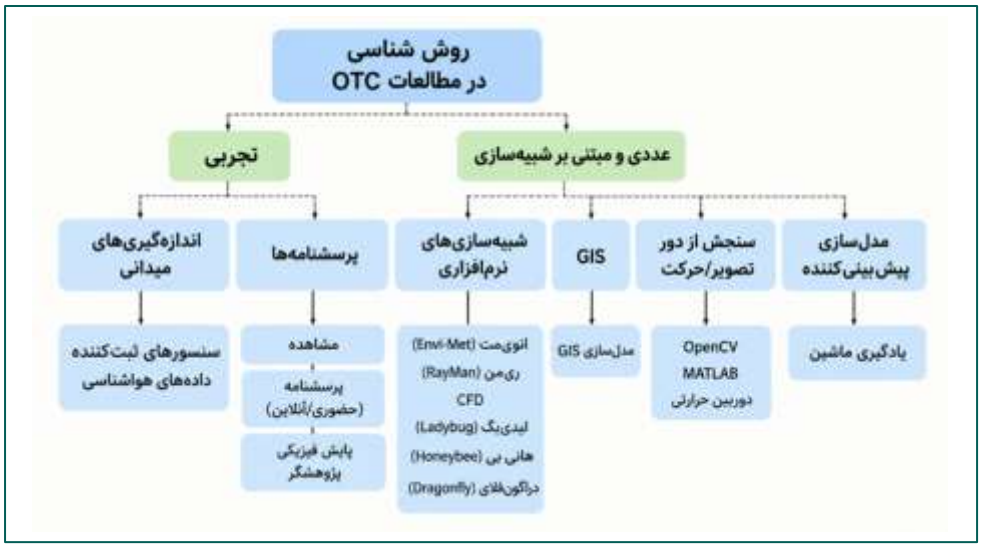
بررسی پژوهش‌های داخلی و خارجی نشان می‌دهد که نقش مورفولوژی شهری در شکل‌گیری خرداقلیم و آسایش حرارتی به‌خوبی اثبات شده است. با این حال، بیشتر مطالعات بر خیابان‌ها، بلوک‌های شهری یا محله‌های مسکونی و عمدتاً در اقلیم‌های گرم و معتدل تمرکز داشته‌اند. همچنین، در بسیاری از آن‌ها تنها نتایج شبیه‌سازی گزارش شده و سازوکار اثرگذاری ویژگی‌های مورفولوژیک بر پارامترهای خرداقلیمی و شاخص PET به‌صورت یکپارچه تحلیل نشده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر میدان‌های شهری زنجان در اقلیم سرد، این شکاف را پوشش می‌دهد و ارتباط میان ویژگی‌های مورفولوژیک، متغیرهای خرداقلیم و شاخص PET را به‌صورت علّی و تحلیلی بررسی می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

روش‌شناسی مطالعات آسایش حرارتی فضای باز (OTC) به‌طور کلی در دو دسته اصلی تجربی و عددی—شبیه‌سازی قابل طبقه‌بندی است. هر یک از این رویکردها ابزارها و تکنیک‌های متنوعی را برای گردآوری داده و تحلیل شرایط حرارتی محیط‌های شهری به کار می‌گیرند.

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در رویکرد تجربی داده‌ها از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی با سنسورهای هواشناسی و همچنین پرسشنامه‌های حضوری یا آنلاین گردآوری می‌شود.

در رویکرد عددی و مبتنی بر شبیه‌سازی نیز نرم‌افزارهایی مانند ENVI-met، RayMan، CFD، Ladybug، Honeybee و Dragonfly به‌همراه ابزارهای GIS، سنجش از دور و مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب این دو رویکرد امکان اعتبارسنجی نتایج و ارائه تحلیل دقیق‌تری از شرایط آسایش حرارتی فضاهای شهری را فراهم می‌سازد.



شکل ۴. روش شناسی پژوهش در مطالعات آسایش حرارتی بیرونی OTC. (تدوین: نگارنده).

۱. طرح پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی—تحلیلی است که با رویکرد ترکیبی (شبیه‌سازی عددی خرداقلیم و پایش میدانی) انجام شده است. چارچوب پژوهش بر تحلیل تأثیر ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌های شهری بر شرایط خرداقلیمی و آسایش حرارتی فضای باز استوار است. بدین‌منظور، سه میدان شاخص شهر زنجان شامل میدان انقلاب، میدان استقلال و میدان آزادی به‌دلیل تفاوت در فرم هندسی، میزان محصوریت، نسبت ارتفاع به عرض (H/W) و ضریب دید آسمان (SVF) به‌عنوان نمونه‌های مورد مطالعه انتخاب شدند.

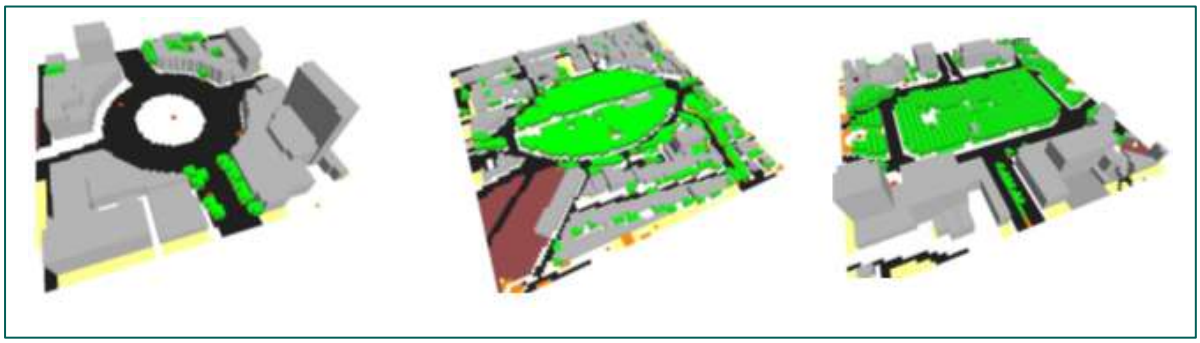


شکل ۵. از راست به چپ: تصاویر هوایی میدان آزادی، میدان استقلال، میدان انقلاب واقع در زنجان. (Google map, 2024/09/04).

این انتخاب امکان مقایسه عملکرد حرارتی فرم‌های مختلف میدان را در شرایط اقلیمی سرد فراهم می‌کند.

۲. روش و ابزار گردآوری داده ها

در این پژوهش از ترکیب روش‌های کمی و کیفی برای گردآوری داده‌ها استفاده شده است. در مرحله کمی، شبیه‌سازی خرداقلیم با نرم‌افزار ENVI-met و محاسبه شاخص آسایش حرارتی با نرم‌افزار RayMan انجام گرفت. داده‌های اقلیمی مورد نیاز شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد از ایستگاه سینوپتیک زنجان برای سردترین روز سال (۲۰ بهمن ۱۴۰۳) استخراج و به مدل وارد شد. شبیه‌سازی برای سه بازه زمانی ۹:۰۰، ۱۲:۰۰ و ۱۵:۰۰ اجرا گردید تا تغییرات روزانه پارامترهای خرداقلیمی بررسی شود.اطلاعات هندسی میدان‌ها از طریق برداشت میدانی، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های موجود تهیه و مدل سه‌بعدی هر میدان در نرم‌افزار ENVI-met بازسازی شد.



شکل ۶. مدلسازی میادین واقع در زنجان درنرم افزار انویمت. (تدوین: نگارنده)

برای پایش میدانی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، از دستگاه دیتالاگر Kestrel 4000 در مرکز میدان استقلال استفاده گردید. در مرحله کیفی نیز ویژگی‌های کالبدی میدان‌ها از طریق مشاهده مستقیم، عکس‌برداری و تحلیل تصاویر هوایی مستندسازی شد.

۳. جامعه، نمونه و روش نمونه گیری

جامعه آماری این پژوهش شامل میدان‌های شهری شهر زنجان است. نمونه‌گیری به‌صورت هدفمند انجام شد و سه میدان با فرم‌های هندسی متفاوت شامل میدان انقلاب (فرم دایره‌ای)، میدان استقلال (فرم بیضی‌شکل) و میدان آزادی (فرم مستطیل‌شکل) انتخاب گردیدند. معیار انتخاب این میدان‌ها، تفاوت در ویژگی‌های مورفولوژیک از جمله فرم هندسی، میزان محصوریت، نسبت ارتفاع به عرض (H/W) و ضریب دید آسمان (SVF) بود تا امکان مقایسه عملکرد حرارتی فرم‌های مختلف فراهم شود.برای پایش میدانی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، مرکز میدان استقلال به‌عنوان نقطه اندازه‌گیری تعیین شد.

٤. روایی، پایایی و اعتبارسنجی

به منظور بررسی اعتبار نتایج شبیه‌سازی، خروجی‌های ENVI-met با داده‌های برداشت میدانی در شرایط زمانی مشابه مقایسه شد. برداشت‌های میدانی در مرکز میدان استقلال با استفاده از دستگاه Kestrel 4000 انجام گرفت. داده‌ها در ساعات ۰۹:۰۰، ۱۲:۰۰ و ۱۵:۰۰ ثبت و با نتایج شبیه‌سازی ENVI-met بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک زنجان در تاریخ ۱۴۰۳/۱۱/۲۰ مقایسه شدند.

جدول ۲. اطلاعات اطلاعات اقلیمی مورد استفاده شبیه سازی درسردترین روزسال. (تدوین: نگارنده)

زمان	تاریخ	دمای هوا	رطوبت نسبی%	سرعت باد
09:00	1403.11.20	-10 (_C)	64%	2m/s
12:00	1403.11.20	-4 (_C)	61%	2m/s
15:00	1403.11.20	-2 (_C)	59%	4m/s

جدول ۳. اطلاعات ثبت شده توسط دیتالاگر. (تدوین: نگارنده)

زمان	تاریخ	دمای هوا	رطوبت نسبی%	سرعت باد
09:00	1403.11.20	-4 (_C)	50%	0.8m/s
12:00	1403.11.20	-6 (_C)	50%	0.9 m/s
15:00	1403.11.20	-2 (_C)	48%	0.9 m/s



شکل ۷. دیتالاگر مدل Kestrel 4000 و برداشت میدانی از میدان استقلال. (تدوین: نگارنده)

مقایسه داده‌های اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده از دو روش از همخوانی قابل قبول برخوردارند. بیشترین میزان انطباق مربوط به دمای هوا بود، در حالی که اختلاف اندک مشاهده‌شده در سرعت باد را می‌توان با ماهیت متغیر و ناپایدار جریان هوا در فضاهای باز شهری مرتبط دانست. این میزان انطباق، استفاده از مدل شبیه‌سازی‌شده را برای تحلیل شرایط خرداقلیمی و ارزیابی آسایش حرارتی نمونه‌های مورد مطالعه پشتیبانی می‌کند.

۵. روش تحلیل داده ها

پس از انجام شبیه‌سازی خرداقلیمی در نرم‌افزار ENVI-met ، خروجی‌های مربوط به دمای هوا (Ta)، دمای متوسط تابشی (Tmrt)، سرعت باد و رطوبت نسبی استخراج گردید. این داده‌ها به نرم‌افزار RayMan منتقل شد تا شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی (PET) محاسبه شود.در محاسبات RayMan، مشخصات فرد استاندارد به‌صورت زیر در نظر گرفته شد: سن ۳۵ سال، قد ۱٫۷۵ متر، وزن ۷۵ کیلوگرم، نرخ متابولیک ۱٫۶ met و عایق پوشش لباس ۰٫۹ CLO؛ مقادیر PET به‌دست‌آمده برای سه میدان در ساعات ۰۹:۰۰، ۱۲:۰۰ و ۱۵:۰۰ با یکدیگر مقایسه شد. همچنین رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌ها (فرم هندسی، نسبت ارتفاع به عرض و ضریب دید آسمان) با تغییرات پارامترهای خرداقلیمی و شاخص PET مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل داده‌ها در دو سطح کمی (محاسبه PET و مقایسه مقادیر) و کیفی (تفسیر الگوهای فضایی تابش و باد) انجام شد.

یافته های پژوهش

۱. ویژگی‌های کالبدی و مورفولوژیک میادین

براساس نتایج به دست آمده ویژگی های کالبدی و مورفولوژیک میادین در سه میدان الگوهای فضایی متفاوتی را ایجاد کرد که نتایج آن در جدول۴ ثبت گردید. نسبت H/W در میدان آزادی ۰٫۰۷۵، استقلال ۰٫۰۵۴ و انقلاب ۰٫۱۱۰ و ضریب دید آسمان به‌ترتیب ۰٫۹۰، ۰٫۹۲ و ۰٫۸۴ محاسبه شد.

جدول ۴. ویژگی‌های کالبدی و مورفولوژیک میادین. (تدوین: نگارنده)

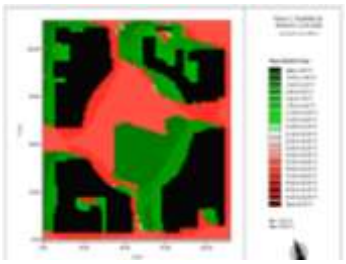
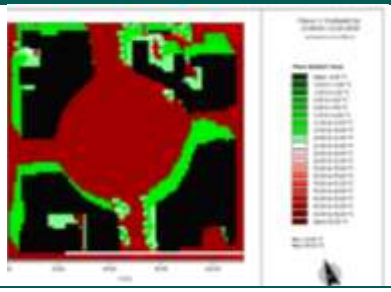
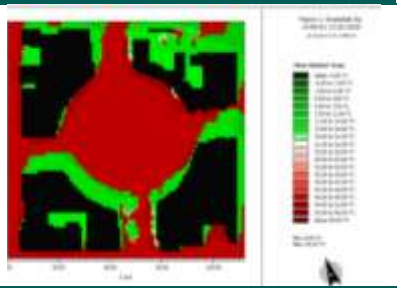
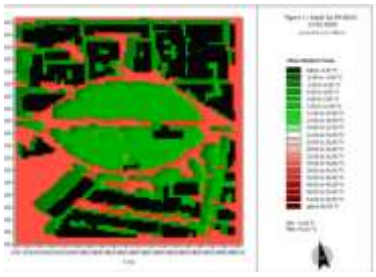
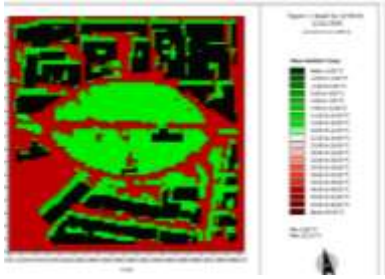
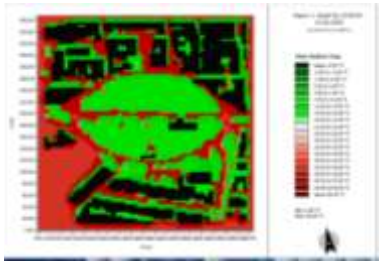
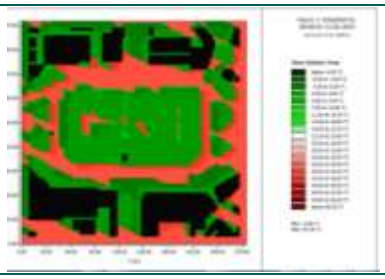
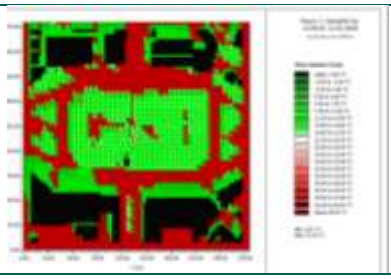
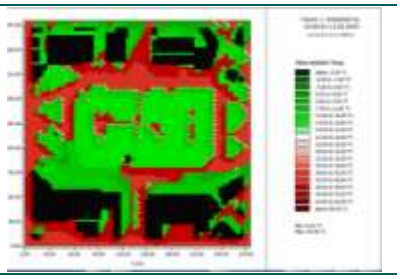
میدان	SVF	H/W	فرم هندسی
آزادی	۰٫۹۰	۰٫۰۷۵	مستطیل‌شکل
استقلال	۰٫۹۲	۰٫۰۵۴	بیضی‌شکل
انقلاب	۰٫۸۴	۰٫۱۱۰	دایره‌ای

میدان انقلاب محصورترین و میدان استقلال بازترین فضای مورد مطالعه هستند. بر اساس جدول۴ ، تفاوت در فرم هندسی و شاخص‌های محصوریت زمینه الگوهای متفاوت حرارتی را فراهم می‌کند.

۲. خروجی‌های خرداقلیمی

مقادیر دمای متوسط تابشی حاصل از شبیه‌سازی ENVI-met در سه میدان و در سه ساعت مورد بررسی در جدول ۵ گزارش شده است. در ساعت ۰۹ صبح، دمای متوسط تابشی در میدان انقلاب برابر با ۱٫۱۶— درجه سانتی‌گراد، در میدان آزادی برابر با ۲۲٫۵۸ درجه سانتی‌گراد و در میدان استقلال برابر با ۴٫۱۵ درجه سانتی‌گراد است. همچنین این مقدار در ساعت ۱۲، به‌ترتیب به ۴۹٫۶۲، ۱۴٫۵۲ و ۱۵٫۵۴ درجه سانتی‌گراد تغییر یافته است. در ساعت ۱۵ نیز دمای متوسط تابشی در میدان انقلاب ۴۷٫۶۳، در میدان آزادی ۱۱٫۳۸ و در میدان استقلال ۱۲٫۶۰ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

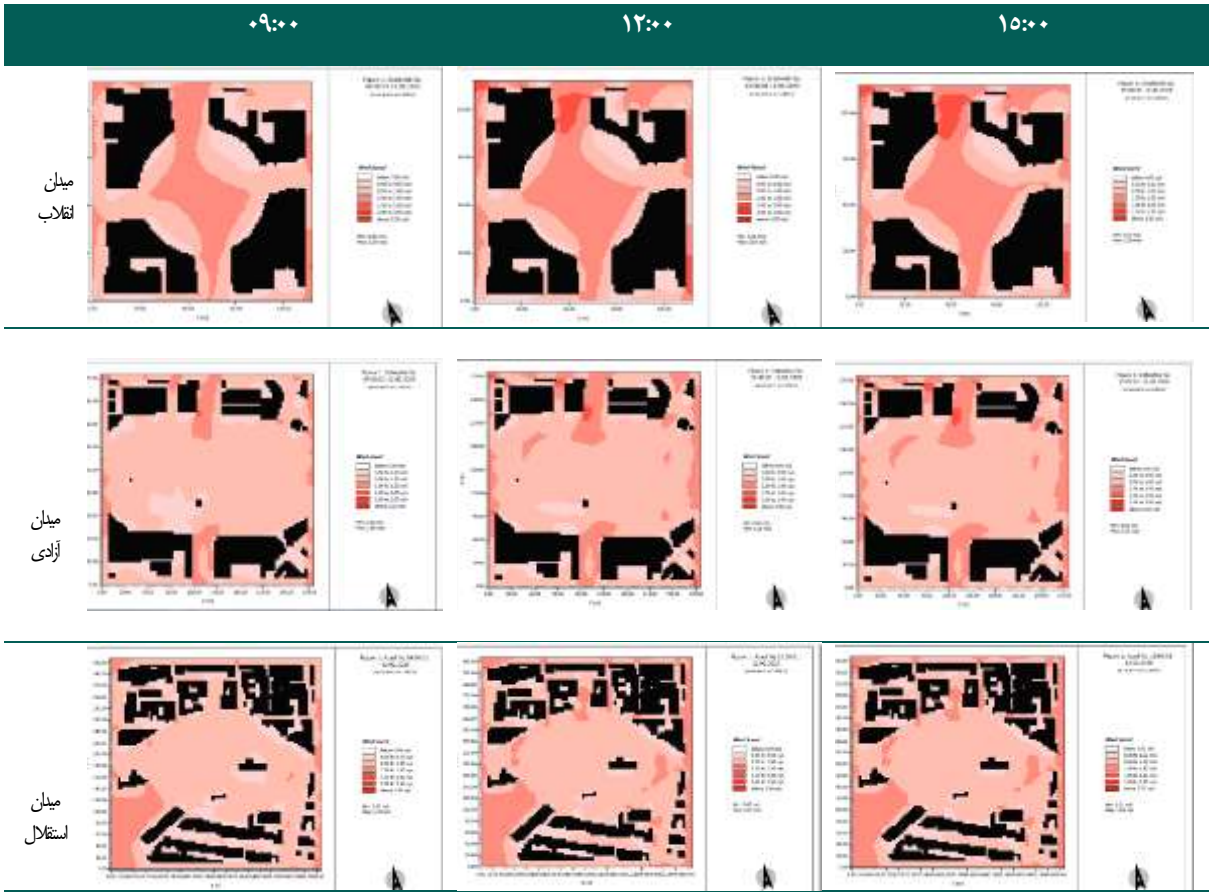
جدول ۵. میانگین دمای متوسط تابشی در میدان انقلاب، استقلال و آزادی با نرم افزار انویمت. (تدوین: نگارنده)

	۰۹:۰۰	۱۲:۰۰	۱۵:۰۰
میدان انقلاب			
میدان آزادی			
میدان استقلال			

خروجی‌های شبیه‌سازی مربوط به سرعت و الگوی جریان باد در سه میدان در ساعات ۹، ۱۲ و ۱۵ در جدول ۶ گزارش شده است. سرعت ورودی مدل بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک در ساعات ۰۹ و ۱۲ برابر با ۲ متر بر ثانیه و در ساعت ۱۵ برابر با ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. الگوی فضایی جریان باد در هر یک از میدان‌ها نیز از خروجی‌های نرم‌افزار استخراج و ثبت گردیده است. نقشه‌های جریان باد نشان داد که الگوی فضایی باد در سه میدان متفاوت است. در میدان استقلال با فرم بیضی‌شکل و کمترین محصوریت، جریان باد به‌صورت گسترده‌تر از پهنه مرکزی عبور می‌کند. در میدان انقلاب، بیشینه‌های سرعت بیشتر روی حلقه سواره‌رو و دهانه‌های دسترسی ظاهر می‌شود و پهنه داخلی میدان الگوی متفاوت و نسبتاً آرام‌تری دارد. میدان آزادی نیز الگوی میانی از خود نشان می‌دهد.

افزایش سرعت سینوپتیک در ساعت ۱۵ پتانسیل خنک‌سازی همرفتی را بالا می‌برد، اما این اثر در مقایسه با جهش Tmrt میدان انقلاب، تأثیر کمتری بر رتبه حرارتی میدان‌ها داشته است. مقادیر دمای هوا حاصل از شبیه‌سازی ENVI-met در سه میدان و در سه ساعت مورد بررسی در جدول ۷ گزارش شده است. در ساعت ۰۹صبح، دمای هوا در میدان انقلاب برابر با ۷٫۱۳— درجه سانتی‌گراد، در میدان آزادی برابر با ۵٫۹۸— درجه سانتی‌گراد و در میدان استقلال برابر با ۵٫۲۸— درجه سانتی‌گراد است. در ساعت ۱۲، این مقادیر به‌ترتیب به ۳٫۷۱—، ۳٫۷۷— و ۳٫۲۹— درجه سانتی‌گراد تغییر یافته است. در ساعت ۱۵ نیز دمای هوا در میدان انقلاب ۲٫۰۳—، در میدان آزادی ۲٫۴۹— و در میدان استقلال ۲٫۰۰— درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

جدول ۶. محاسبه توزیع جریان وسرعت باد در میدان انقلاب، استقلال و آزادی با نرم افزار انویمت. (تدوین: نگارنده).



جدول ۷. نتایج دمای هوا در میادین۳گانه. (تدوین: نگارنده).

فرم میدان	زمان	Ta (°C)
مستطیل‌شکل آزادی	۰۹	-۵٫۹۸
مستطیل‌شکل آزادی	۱۲	-۳٫۷۷
مستطیل‌شکل آزادی	۱۵	-۲٫۴۹
بیضی‌شکل استقلال	۰۹	-۵٫۲۸
بیضی‌شکل استقلال	۱۲	-۳٫۲۹
بیضی‌شکل استقلال	۱۵	-۲٫۰۰
دایره‌ای انقلاب	۰۹	-۷٫۱۳
دایره‌ای انقلاب	۱۲	-۳٫۷۱
دایره‌ای انقلاب	۱۵	-۲٫۰۳

بر اساس داده‌های جدول ۷، دمای هوا در هر سه میدان در تمام ساعات شبیه‌سازی‌شده زیر صفر درجه سانتی‌گراد قرار دارد و مقادیر آن در ساعات مختلف روز به‌صورت عددی گزارش شده است.

۳. نتایج شاخص PET

مقادیر شاخص دمای معادل فیزیولوژیکی (PET) محاسبه‌شده با نرم‌افزار RayMan بر اساس خروجی‌های ENVI-met در سه میدان و در سه ساعت مورد بررسی در جدول ۸ گزارش شده است. در ساعت ۰۹ صبح، مقدار PET در میدان آزادی برابر با ۸٫۵ درجه سانتی‌گراد، در میدان استقلال برابر با ۴- درجه سانتی‌گراد و در میدان انقلاب برابر با ۹- درجه سانتی‌گراد است. در ساعت ۱۲، این مقادیر به‌ترتیب به ۳٫۵، ۴٫۵ و ۱۴ درجه سانتی‌گراد تغییر یافته است. در ساعت ۱۵ نیز مقدار PET در میدان آزادی ۲ درجه، در میدان استقلال ۳ درجه و در میدان انقلاب ۱۳ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است.

جدول ۸. نتایج شاخص PET. (تدوین: نگارنده)

فرم میدان	زمان	PET تقریبی(°C)
مستطیل‌شکل آزادی	۰۹	۸٫۵
مستطیل‌شکل آزادی	۱۲	۳٫۵
مستطیل‌شکل آزادی	۱۵	۲
بیضی‌شکل استقلال	۰۹	-۴
بیضی‌شکل استقلال	۱۲	۴٫۵
بیضی‌شکل استقلال	۱۵	۳
دایره‌ای انقلاب	۰۹	-۹
دایره‌ای انقلاب	۱۲	۱۴
دایره‌ای انقلاب	۱۵	۱۳

نتایج شبیه‌سازی ریزاقلیمی و محاسبه شاخص آسایش حرارتی PET نشان داد که فرم هندسی میدان‌های شهری تأثیر محسوسی بر شرایط حرارتی فضای باز در اقلیم سرد زنجان دارد. مقایسه سه فرم بیانگر آن است که تفاوت در میزان فشردگی کالبدی و عامل دید آسمان (SVF) منجر به ایجاد الگوهای متفاوتی از تابش خورشیدی، دمای متوسط تابشی (Tmrt) و سرعت باد شده است. به‌طور کلی، یافته‌ها تأیید می‌کنند که دمای متوسط تابشی و مدت زمان دریافت تابش خورشیدی، که به‌شدت تحت تأثیر فرم شهری هستند، نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به سایر پارامترها در شکل‌گیری آسایش حرارتی فضاهای باز شهری در اقلیم سرد دارند. مقادیر شاخص PET محاسبه‌شده برای سه میدان در ساعات ۰۹، ۱۲ و ۱۵ در جدول فوق به‌صورت کامل گزارش شده است. این مقادیر بر اساس خروجی‌های شبیه‌سازی خرداقلیمی و با استفاده از نرم‌افزار RayMan به‌دست آمده‌اند.

بحث و تفسیر

۱. تحلیل رابطه مورفولوژی، پارامترهای خرداقلیمی و آسایش حرارتی

۱.۱. جذب و حبس تابش

در عرض جغرافیایی زنجان و در روزهای سرد زمستان، ارتفاع خورشید در صبح پایین است. در چنین شرایطی جداره‌های پیرامونی می‌توانند مسیر پرتو کم‌زاویه را ببندند. میدان انقلاب با SVF برابر ۰٫۸۴ و فرم دایره‌ای پیوسته، در ساعت ۰۹ کمترین Tmrt را دارد (۱٫۱۶- درجه). این مقدار نشان می‌دهد پهنه میدان در صبح از تابش مستقیم محروم مانده و تبادل موج بلند با سطوح سرد غالب شده است. نتیجه مستقیم آن، PET حدود ۹- درجه و قرارگرفتن در سردترین وضعیت میان سه نمونه است.در همان ساعت، میدان آزادی با فرم مستطیلی و SVF برابر ۰٫۹۰ به Tmrt برابر ۲۲٫۵۸ درجه می‌رسد. این اختلاف تابشی در حالی رخ می‌دهد که دمای هوا میان آزادی و انقلاب تنها حدود یک تا دو درجه فرق دارد. بنابراین تفاوت صبحگاهی PET اساساً تابشی است نه دمایی. فرم مستطیلی، بسته به جهت‌گیری اضلاع، می‌تواند در صبح

مسیر بازتری برای تابش کم‌زاویه روی کف و جداره فراهم کند. میدان استقلال با بیشترین (۰٫۹۲ SVF) و کمترین(۰٫۰۵۴ H/W) در صبح Tmrt تنها ۴٫۱۵ درجه دارد. گشودگی زیاد در زمستان دو اثر متضاد دارد: امکان دریافت خورشید، و همزمان اتلاف موج‌بلند به آسمان سرد. در ساعت ۹، اثر دوم غالب است؛ فضا گرما را درخود نگه نمی‌دارد وشاخص PET در طبقه خیلی‌سرد می‌ماند. این مشاهده با نقش شناخته‌شده SVF در بیلان تابشی لایه شهری همخوان است (Oke, 1988). در ظهر سازوکار معکوس می‌شود. فرم فشرده و دایره‌ای انقلاب، با بازتاب‌های متوالی از جداره‌های پیرامونی و کاهش سهم آسمان، انرژی تابشی را در پهنه میدان حبس می‌کند. جهش Tmrt تا حدود ۴۹٫۶ درجه در ساعت ۱۲ و ماندگاری آن تا حدود ۴۷٫۶ درجه در ساعت ۱۵، نشانه همین انباشت است؛ نقشه‌های فضایی نیز هسته گرم مرکزی را در همین ساعات نشان می‌دهند. در مقابل، Tmrt میدان آزادی از صبح به عصر کاهش می‌یابد. فرم مستطیلی، برخلاف فرم دایره‌ای، ظرفیت کمتری برای حبس تابش ظهرگاهی دارد و با گردش سمت خورشید سهم سطوح سایه‌دار تغییر می‌کند. استقلال الگوی ساده‌تری دارد: افزایش تا ظهر و کاهش نسبی در عصر، بدون جهش شدید میدان انقلاب.

۱.۲. فرار باد و تبادل همرفتی

باد غالب زنجان جنوب‌شرقی است و سرعت ورودی مدل از ۲ متر بر ثانیه در صبح و ظهر به ۴ متر بر ثانیه در ساعت ۱۵ می‌رسد. افزایش سرعت، پتانسیل خنک‌سازی همرفتی بدن را بالا می‌برد و در اقلیم سرد نامطلوب است. نقشه‌های باد نشان می‌دهد که «فرار باد» در میدان‌های بازتر عمدتاً به‌صورت عبور جریان از پهنه حضور عابر رخ می‌دهد. در میدان استقلال، جریان در فضای بیضی‌شکل گسترده است. در میدان انقلاب، بیشینه‌های سرعت بیشتر روی حلقه سوارمرو و دهانه‌های دسترسی ظاهر می‌شود و پهنه داخلی الگوی متفاوتی دارد.

با این حال، داده‌های دامنه سرعت اجازه نمی‌دهد محصوریت به‌تنهایی به‌عنوان عامل کاهنده قطعی بیشینه باد معرفی شود؛ زیرا در برخی ساعات، بیشینه روی کل مدل در میدان محصورتر نیز بالاست و بخشی از آن مربوط به کانالیزه‌شدن جریان در حلقه پیرامونی است. آنچه برای آسایش کاربر اهمیت دارد، سرعت در ارتفاع عابر در پهنه مکث است نه لزوماً بیشینه کل دامنه مدل. از این رو، اثر باد را باید به‌صورت الگوی فضایی فرار یا انحراف جریان خواند، نه به‌صورت یک عدد واحد. نکته تعیین‌کننده آن است که حتی با افزایش سرعت سینوپتیک در ساعت ۱۵، PET میدان انقلاب در طبقه خنک/کمی‌خنک باقی می‌ماند. این ماندگاری با Tmrt همچنان بسیار بالا قابل توضیح است. به بیان دیگر، در روز مورد مطالعه، بیلان تابشی بر بیلان همرفتی غلبه دارد و رتبه حرارتی میدان‌ها را عمدتاً Tmrt می‌سازد، نه دمای هوا و نه به‌تنهایی سرعت باد.

۲. ارزیابی تطبیقی آسایش حرارتی PET و مقایسه با پیشینه پژوهش

ترجمه PET به طبقات احساس حرارتی، تصویر دقیق‌تری از کیفیت فضا به دست می‌دهد تا مقایسه صرف اعداد. در سردترین روز مورد بررسی، بهترین وضعیت مشاهده‌شده «کمی خنک» است نه آسایش کامل. این نتیجه با ماهیت روز انتخاب‌شده سازگار است و نشان می‌دهد مورفولوژی می‌تواند احساس حرارتی را چند طبقه جابه‌جا کند، اما در اوج سرما به‌تنهایی فضا را به پهنه آسایش (۱۸ تا ۲۳ درجه) PET نمی‌رساند.

جدول ۹ نشان می‌دهد رتبه میدان‌ها در طول روز ثابت نیست. اگر ارزیابی فقط در صبح انجام می‌شد، فرم مستطیلی آزادی برتر به نظر می‌رسید؛ اگر فقط در ظهر سنجیده می‌شد، فرم دایره‌ای انقلاب برتر بود. این وابستگی زمانی، محدودیت نتیجه‌گیری‌های تک‌ساعته در مطالعات آسایش فضای باز را آشکار می‌کند.

جدول ۹. تفسیر نتایج شاخص PET. (تدوین: نگارنده)

پارامتر هم‌تغییر اصلی	ضعیف‌ترین PET	بهترین PET	ساعت
Tmrt صبحگاهی / دسترسی خورشید کم‌زاویه	انقلاب (خیلی سرد)	آزادی (خنک)	۰۹:۰۰
حبس تابش و هسته گرم مرکزی	آزادی (خیلی سرد)	انقلاب (کمی خنک)	۱۲:۰۰
با وجود افزایش باد، Tmrt ماندگاری	آزادی (خیلی سرد)	انقلاب (خنک / کمی خنک)	۱۵:۰۰

یافته‌های پژوهش با اصل کلاسیک اوکه (۱۹۸۸) همخوان است که هندسه فضا، تابش و باد لایه شهری را کنترل می‌کند. با این حال، داده‌های زنجان یک قید مهم به این اصل می‌افزاید: همان هندسه در دو ساعت مختلف می‌تواند اثر حرارتی متضاد ایجاد کند. بنابراین H/W و SVF شاخص‌های توصیفی ضروری‌اند، اما به‌تنهایی پیش‌بین عملکرد حرارتی نیستند و باید همراه با مسیر خورشید و زمان استفاده خوانده شوند.

راتی و همکاران و استیمرز نشان داده‌اند فرم‌های فشرده‌تر در اقلیم‌های سرد یا خشک می‌توانند اتلاف حرارت را کاهش و بهره خورشیدی را افزایش دهند. نتایج ظهرگاهی میدان انقلاب با این گزاره سازگار است، اما نتایج صبحگاهی آن را مشروط می‌کند. فشردگی وقتی سودمند است که خورشید به پهنه میدان برسد؛ اگر جداره پیوسته مسیر پرتو زمستانی صبح را ببندد، فشردگی به محرومیت تابشی تبدیل می‌شود. از این رو نمی‌توان فرم دایره‌ای یا فشرده را به‌طور مطلق فرم بهینه زمستان دانست. لنژهولزر (۲۰۱۲) تأکید کرده طراحی اقلیم‌محور میدان باید همزمان رفتار تابش و باد را در نظر بگیرد. پژوهش حاضر این حکم را در اقلیم سرد ایران تأیید می‌کند: تغییر رتبه PET تقریباً با تغییر Tmrt حرکت می‌کند و باد در درجه دوم، به‌ویژه از مسیر الگوی فضایی فرار جریان، نقش تعدیل‌کننده دارد. زولچ و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داده‌اند محصوریت و SVF آسایش میدان را تغییر می‌دهد؛ یافته زنجان علاوه بر تأیید این اثر، بُعد زمانی و معکوس‌شدن رتبه را به بحث می‌افزاید.

در مطالعات داخلی، خوشبخت و همکاران در همدان، دهناد و همکاران در مجتمع‌های مسکونی نشان داده‌اند تفاوت هندسه و محصوریت، PET دوره سرد را تغییر می‌دهد. نتایج میدان‌های زنجان در همین راستاست، با این تفاوت که مقیاس مطالعه میدان شهری است نه خیابان یا بلوک مسکونی، و تحلیل به گزارش خروجی مدل بسنده نکرده بلکه مسیر علّی مورفولوژی—خرداقلیم PET–را با قید زمان صورت‌بندی کرده است. این همان خلأیی است که در پیشینه داخلی کمتر دیده می‌شود و فرضیه پژوهش مبنی بر اثر محسوس محصوریت و SVF بر PET از مسیر Tmrt و باد، با داده‌ها پشتیبانی می‌شود؛ اما جهت این اثر یکنواخت نیست. فرضیه را باید چنین تدقیق کرد: ویژگی‌های مورفولوژیک میدان از طریق تغییر بیلان تابشی و الگوی جریان، PET را تغییر می‌دهند و علامت این تغییر در صبح و ظهر یکسان نیست. این تدقیق، وجه تمایز پژوهش نسبت به مطالعاتی است که یک فرم را در یک ساعت به‌عنوان فرم برتر معرفی می‌کنند.

۳. کاربست یافته ها در طراحی شهری و راهکارهای بهینه سازی کالبدی در اقلیم سرد

بر اساس یافته‌های پژوهش و تحلیل رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌ها با پارامترهای خرداقلیمی و شاخص PET ، مجموعه‌ای از راهبردهای طراحی اقلیم‌محور برای میدان‌های شهری در اقلیم سرد قابل استخراج است. این راهبردها با تمرکز بر ایجاد تعادل میان دریافت تابش خورشیدی زمستانی، نگهداشت حرارت و کنترل مواجهه با بادهای سرد تدوین شده‌اند و بر پایه نتایج شبیه‌سازی سه میدان مورد مطالعه در شهر زنجان استوار هستند. جزئیات این راهبردها به‌همراه مبنای تجربی هر یک و نکات اجرایی مرتبط در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰. راهبردهای طراحی اقلیم‌محور میدان‌های شهری در اقلیم سرد برگرفته از یافته‌های پژوهش PET. (تدوین: نگارنده)

راهبرد	مبنای تجربی در این پژوهش	نکته اجرایی
محصوریت متعادل به‌جای فضای بسیار باز	میدان با H/W حدود ۰٫۱۱ در ظهر و عصر، PET بهتری از میدان با H/W حدود ۰٫۰۵ داشت.	افزایش ارتفاع مؤثر جداره یا کاهش دهانه‌های بیش‌ازحد؛ نه ایجاد دره شهری عمیق.
گشودگی هدفمند به سمت مسیر خورشید زمستانی	محرومیت تابشی صبحگاهی میدان دایره‌ای، PET را به وضعیت خیلی‌سرد رساند	بازکردن جبهه جنوبی/جنوب‌شرقی کف میدان؛ پرهیز از جداره پیوسته در مسیر پرتو کم‌زاویه.
کاهش SVF های بسیار بالا	میدان با SVF برابر ۰٫۹۲ در صبح قادر به نگهداشت Tmrt نبود.	ایجاد لبه کالبدی، رواق یا تاج درختان خزان‌پذیر برای کم‌کردن دید به آسمان سرد.
انحراف باد غالب جنوب‌شرقی از پهنه مکث	در میدان باز، جریان از خود فضای میدان عبور می‌کند؛ در میدان دایره‌ای بیشتر به حلقه پیرامونی می‌رود.	بادشکن، شکست جداره و قرارگیری محل توقف در پناه، نه در دهانه رو به باد.
فرم فشرده با اصلاح جبهه آفتاب‌گیر	فرم دایره‌ای ظهرها تابش را حبس کرد اما صبح‌ها محرومیت ایجاد کرد.	حفظ پیوستگی جداره در جبهه‌های بادگیر و ایجاد برش کنترل‌شده در جبهه آفتاب‌گیر.

پوشش گیاهی خزان‌پذیر و مصالح جاذب در کف آفتاب‌گیر	Tmrt تعیین‌کننده‌ترین پارامتر هم‌تغییر با PET بود.	کف و جداره آفتاب‌گیر با ظرفیت حرارتی مناسب؛ درخت خزان‌پذیر برای سایه تابستان و آفتاب زمستان.
تطابق برنامه فعالیت با رژیم حرارتی روزانه	رتبه میدان‌ها از صبح تا ظهر عوض شد.	فعالیت جمعی ظهرگاهی زمستان در پهنه‌های محصورتر و آفتاب‌گیر؛ استقرار موقت صبحگاهی در جبهه آفتاب‌رس.

راهبردهای ارائه‌شده در جدول۱۰ نشان می‌دهد که طراحی اقلیم‌محور میدان‌های شهری در اقلیم سرد نباید بر بیشینه‌سازی یک شاخص مورفولوژیک منفرد مانند H/W یا SVF استوار باشد، بلکه لازم است مجموعه‌ای از اقدامات هماهنگ شامل تنظیم محصوریت متعادل، گشودگی هدفمند به سمت مسیر تابش زمستانی، کنترل الگوی جریان باد و تطبیق کاربری فضا با رژیم حرارتی روزانه به‌صورت یکپارچه به‌کار گرفته شود. این راهبردها می‌توانند مبنایی عملی برای طراحی و بازآفرینی میدان‌های شهری در شهرهایی با شرایط اقلیمی مشابه زنجان فراهم آورند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تحلیل رابطه میان ویژگی‌های مورفولوژیک میدان‌های شهری و آسایش حرارتی فضای باز در اقلیم سرد شهر زنجان انجام شد. نتایج نشان داد که این رابطه، مستقیم و تک‌عاملی نیست. فرم هندسی، محصوریت و ضریب دید آسمان، آسایش حرارتی را عمدتاً از مسیر تغییر دمای متوسط تابشی و الگوی جریان باد شکل می‌دهند. دمای هوا میان میدان‌ها اختلاف محدودی داشت و آنچه رتبه آسایش را تغییر داد، بیلان تابشی فضا بود. یافته مهم دیگر، زمان‌مند بودن این رابطه است. یک میدان با فرم مشخص می‌تواند در صبح نامطلوب‌ترین و در ظهر مطلوب‌ترین وضعیت را داشته باشد. بنابراین پرسش «کدام فرم هندسی بهتر است؟» بدون در نظر گرفتن زمان استفاده، کامل نیست. شکل هندسی دایره‌ای، بیضی یا مستطیلی بودن به‌تنهایی فضیلت حرارتی ایجاد نمی‌کند؛ عملکرد حرارتی از تعامل هندسه با مسیر تابش خورشیدی زمستانی، گشودگی آسمان و جریان باد شکل می‌گیرد. به همین دلیل، شاخص‌هایی مانند H/W و SVF برای توصیف فضا ضروری‌اند، اما به‌تنهایی برای پیش‌بینی آسایش کافی نیستند. در اقلیم سرد، مسئله اصلی طراحی میدان، ایجاد تعادل میان سه عامل «دسترسی به تابش خورشیدی زمستانی»، «نگهداشت حرارت» و «کنترل باد سرد» است. محصوریت می‌تواند هم‌زمان این عوامل را تقویت یا تضعیف کند. هنر طراحی، بیشینه‌سازی یک شاخص مورفولوژیک نیست، بلکه ایجاد تعادل میان این سه عامل در ساعاتی است که فضا واقعاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. یافته‌ها نشان داد که حتی مطلوب‌ترین ترکیب مشاهده‌شده نیز تنها تا آستانه «کمی خنک» پیش رفت و ادعای دستیابی به آسایش کامل زمستانی صرفاً از طریق فرم میدان، فراتر از داده‌های این پژوهش است.

مسیر اثرگذاری را می‌توان چنین صورت‌بندی کرد:

(وابسته به زمان ارزیابی) PET مورفولوژی میدان ← تغییر بیلان تابشی و الگوی باد ← تغییر شاخص

نوآوری این پژوهش در خوانش همزمان این زنجیره در میدان‌های شهری زنجان است، نه در معرفی یک فرم برتر. راهبردهای طراحی نیز باید از همین منطق پیروی کنند: محصوریت متعادل، گشودگی هدفمند به سمت مسیر تابش زمستانی، کاهش اتلاف حرارت به آسمان سرد و انحراف باد غالب از پهنه حضور کاربران. این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است. مطالعه به سه میدان، یک روز بسیار سرد و سه ساعت محدود شده و پوشش گیاهی و مصالح به‌صورت نظام‌مند به‌عنوان متغیر مستقل بررسی نشده‌اند. تعمیم نتایج به فصل گرم، شرایط ابری یا میدان‌های با محصوریت بسیار بالاتر نیازمند پژوهش‌های تکمیلی است. پیشنهاد می‌شود مطالعات بعدی با اعتبارسنجی کمی دقیق‌تر، بررسی سناریوهای پوشش گیاهی خزان‌پذیر و مقایسه فصل سرد و گرم، همین زنجیره علّی را مورد آزمون قرار دهند. بر اساس مدل مفهومی شکل ۸، مسیر اثرگذاری به‌صورت زنجیره‌ای و وابسته به زمان است. نوآوری این پژوهش در خوانش همزمان این زنجیره در میدان‌های شهری زنجان است، نه در معرفی یک فرم برتر. راهبردهای طراحی نیز باید از همین منطق پیروی کنند: محصوریت متعادل، گشودگی هدفمند به سمت مسیر تابش زمستانی، کاهش اتلاف حرارت به آسمان سرد و انحراف باد غالب از پهنه حضور کاربران.



شکل ۸. راهبردهای طراحی اقلیم‌محور میدان‌های شهری در اقلیم سرد برگرفته از یافته‌های پژوهش PET. (تدوین: نگارنده)

دستاورد پژوهش

پژوهش حاضر نشان داد که عملکرد حرارتی میدان‌های شهری در اقلیم سرد، حاصل تعامل میان ویژگی‌های مورفولوژیک فضا و شرایط خرداقلیمی است و نمی‌توان آن را صرفاً بر اساس فرم هندسی یا یک شاخص مورفولوژیک منفرد توضیح داد. مقایسه سه میدان مورد مطالعه در شهر زنجان نشان داد که تفاوت در فرم، میزان محصوریت، ضریب دید آسمان (SVF) و نسبت ارتفاع به عرض (H/W) با تفاوت در شرایط تابشی و در نهایت با تفاوت در مقادیر شاخص PET همراه است. در این میان، تغییرات دمای متوسط تابشی (Tmrt) همزمانی قابل‌توجهی با تغییرات PET داشت و اهمیت شرایط تابشی را در ارزیابی آسایش حرارتی فضاهای باز در اقلیم سرد برجسته کرد.یکی از مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش، نشان دادن وابستگی زمانی عملکرد حرارتی میدان‌ها است. نتایج نشان داد که یک میدان می‌تواند در ساعات مختلف روز شرایط حرارتی متفاوتی داشته باشد. بنابراین نمی‌توان یک فرم هندسی را به‌طور مطلق به‌عنوان بهترین فرم معرفی کرد. از دیگر دستاوردها، مشخص شدن محدودیت استفاده از H/W و SVF به‌عنوان معیارهای مستقل است. این شاخص‌ها برای توصیف فضا مفیدند، اما تفسیر آن‌ها باید در ارتباط با Tmrt، دمای هوا، سرعت باد و زمان ارزیابی انجام شود.از نظر کاربردی، یافته‌ها بر ضرورت ایجاد تعادل میان محصوریت فضایی، دریافت تابش خورشیدی زمستانی و کنترل بادهای سرد در طراحی و بازآفرینی میدان‌های شهری در اقلیم سرد تأکید دارد. این نتایج می‌تواند مبنایی برای تدوین راهبردهای طراحی اقلیم‌محور در زنجان و شهرهای دارای اقلیم مشابه فراهم کند و مسیر پژوهش‌های آینده را در زمینه بررسی سناریوهای پوشش گیاهی، مصالح و مقایسه فصل سرد و گرم مشخص سازد. بر این اساس، تنظیم مناسب گشودگی آسمان، توجه به نسبت H/W، سازمان‌دهی جداره‌های پیرامونی و فراهم کردن امکان دریافت تابش خورشیدی زمستانی می‌تواند در بهبود شرایط حرارتی فضاهای باز مؤثر باشد. با این حال، این راهبردها نباید به‌صورت مستقل از زمان و شرایط اقلیمی به کار گرفته شوند، بلکه لازم است عملکرد حرارتی در ساعات مختلف روز ارزیابی شود. در مجموع، دستاورد اصلی پژوهش را می‌توان در این نکته خلاصه کرد که رابطه میان مورفولوژی میدان و آسایش حرارتی، رابطه‌ای وابسته به شرایط خرداقلیمی و زمان است و نه یک رابطه ساده و تک‌عاملی. بنابراین، شاخص‌هایی مانند H/W و SVF باید در کنار Tmrt، دمای هوا، سرعت باد و شرایط تابشی در ارزیابی و طراحی فضاهای عمومی شهری مورد استفاده قرار گیرند. این یافته‌ها می‌تواند مبنایی برای تدوین راهبردهای طراحی اقلیم‌محور و بازآفرینی میدان‌های شهری در زنجان و سایر شهرهای دارای اقلیم سرد مشابه فراهم کند.

ملاحظات اخلاقی و اطلاعات تکمیلی

برگرفته از پایان نامه/رساله: «نویسندگان اعلام می‌دارند که این مقاله حاصل پژوهش مستقل بوده و مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد یا رساله دکتری نیست.»

حمایت مالی: «این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است»

تعارض منافع: «نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع شخصی، مالی یا حرفه‌ای در رابطه با پژوهش حاضر و انتشار این مقاله ندارند»

استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی: «نویسنده در این پژوهش از ابزارهای هوش مصنوعی (ChatGPT) صرفاً جهت ویرایش زبانی و بهبود روانی متن، استفاده کرده است. تمامی نویسندگان مسئولیت نهایی محتوای تولید شده و صحت مطالب علمی ارائه شده در این مقاله را بر عهده دارند و تأیید میکنند که استفاده از این ابزارها با اصول اخلاق پژوهشی و سیاستهای این نشریه همخوانی دارد»

پی‌نوشت

1. Carmona
2. Gehl
3. Krier
4. Oke (1988)
5. Emanuel
6. Goethe
7. Höppe
8. Matzarakis
9. Taleghani
10. Olgey
11. Oke (1987)
12. Steemers
13. Ratti et al.
14. Matzarakis et al.
15. Zölch et al.
16. Lenzholzer

منابع

دهناد، ن.، کریمی، ب.، و مهدی‌نژاد، ج. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر مورفولوژی مجتمع‌های مسکونی بر آسایش حرارتی فضای باز، *مطالعات مدیریت شهری*، ۱۳ (۴۶)، ۲۱–۳۳.

خوشبخت، ی.، مدی، ح.، و آزموده، م. (۱۳۹۹). بررسی هندسه بلوک‌های شهری در میزان آسایش حرارتی فضای باز در دوره سرد سال (مطالعه موردی: شهر همدان)، *هفتمین همایش ملی مطالعات و تحقیقات نوین در حوزه علوم جغرافیا، معماری و شهرسازی ایران*، ۲۲۳–۲۳۵.

ورد، م.، فیضی، م.، خاک‌زند، م.، و اوجاقلو، م. (۱۳۹۷). ویژگی‌های حرارتی فضاهای باز و نیمه‌باز در شرایط اقلیم شهر تهران، *دوفصلنامه پژوهش‌های معماری و محیط*، ۱ (۱)، ۱۶۷–۱۹۶.

ASHRAE. (2017). *ASHRAE handbook—Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution, *Scientific Data, 5*, 180214. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Blazejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmer, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., & Tinz, B. (2010). Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research on a European scale, *Miscellanea Geographica, 14*(1), 91–102. https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009

Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi-arid climate (Case of El-Oued, Algeria). *Renewable Energy, 35*(2), 343–347. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.017

Carmona, M., Heath, T., Oc, T., & Tiesdell, S. (2010). *Public places, urban spaces: The dimensions of urban design* (2nd ed.). Routledge.

Conzen, M. R. G. (1960). *Alnwick, Northumberland: A study in town-plan analysis*. Institute of British Geographers.

Emmanuel, R. (2005). *An urban approach to climate-sensitive design: Strategies for the tropics*. Taylor & Francis.

Gehl, J. (2011). *Life between buildings: Using public space*. Island Press.

Goethe, J. W. von. (2009). *The metamorphosis of plants*. MIT Press.

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

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Karimian, S., & Ahmad, S. S. (2018). Microclimatic conditions of an urban square: The role of built environment and geometry, *Asian Journal of Behavioural Studies, 3*(12), 115–123. https://doi.org/10.21834/ajbes.v3i12.128

Krier, R. (1979). *Urban space*. Academy Editions.

Lenzholzer, S. (2012). Research and design for thermal comfort in Dutch urban squares, *Resources, Conservation and Recycling, 64*, 39–48. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.015

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

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Application of the RayMan model, *International Journal of Biometeorology, 51*(4), 323–334. https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8

Moudon, A. V. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field, *Urban Morphology, 1*(1), 3–10. https://doi.org/10.51347/jum.v1i1.4047

Nasrollahi, N., Hatami, Z., & Taleghani, M. (2017). Development of outdoor thermal comfort model for tourists in urban historical areas; A case study in Isfahan, *Building and Environment, 125*, 356–372. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.006

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge.

Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate, *Energy and Buildings, 11*(1–3), 103–113. https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6

Olgyay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press.

Qi, J., Mazumdar, S., & Vasconcelos, A. C. (2024). Understanding the relationship between urban public space and social cohesion: A systematic review, *International Journal of Community Well-Being, 7*(2), 155–212. https://doi.org/10.1007/s42413-024-00204-5

Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: Archetypes, analysis and an arid climate, *Energy and Buildings, 35*(1), 49–59. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00079-8

Steemers, K. (2003). Energy and the city: Density, buildings and transport, *Energy and Buildings, 35*(1), 3–14. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00075-0

Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands, *Building and Environment, 83*, 65–78. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014

Zölch, T., Rahman, M. A., Pfleiderer, E., Wagner, G., & Pauleit, S. (2019). Designing public squares with green infrastructure to optimize human thermal comfort, *Building and Environment, 149*, 640–654. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.051