

فرم شهر و انرژی تاب‌آوری؛ مروری نظام‌مند بر روش‌ها، شاخص‌ها و روندها

مریم روستا^{۱*} - رزا وکیلی‌نژاد^۲ - فاطمه نوروزی^۳

۱. دانشیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران (نویسنده مسئول).
۲. دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۳. دانشجوی دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳ تاریخ اصلاحات: ۱۴۰۵/۰۳/۲۲ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۳۱

چکیده

همزمان با تغییرات اقلیمی، رشد شهرنشینی، مصرف بی‌رویه انرژی و نگرانی از به زوال رفتن منابع آن، از چالش‌هایی است که پس از تبیین رویکرد تاب‌آوری شهری در دو دهه اخیر، در مجامع علمی و پژوهشی در قالب «انرژی تاب‌آوری» به آن پرداخته شده است. در این زمینه تبیین رابطه فرم شهری بر انرژی تاب‌آوری از موضوعاتی است که در سال‌های اخیر مورد توجه بوده است. مرور مقالات اخیر در این زمینه، هم‌فهم جامعی از شاخص‌های اثرگذار فرم بر انرژی تاب‌آوری به‌دست می‌دهد و هم با تحلیل سیر و روند پژوهش‌های اثرگذار در این حوزه موضوعی، مسیر پژوهش‌های آتی را روشن می‌نماید. این پژوهش با هدف تبیین مهم‌ترین شاخص‌ها، روش‌ها و روندها در پژوهش‌های حوزه فرم شهر و انرژی تاب‌آوری به مرور نظام‌مند پژوهش‌های پیشین به خصوص در دهه اخیر پرداخته است. به این منظور، ضمن پیش‌برد فرآیند جستجو در پایگاه علمی Scopus و دستیابی به ۴۱۳ پژوهش اولیه، به کمک چارچوب پریزما و پس از طی سه مرحله غربال، تعداد ۳۱ مقاله را به منظور بررسی و تحلیل انتخاب نموده است. مقالات منتخب از نظر سیر زمانی انتشار، خاستگاه جغرافیایی پژوهش، حوزه‌های مفهومی و کلیدواژه‌گانی مشترک، روش‌شناسی، مقیاس و نیز شاخص‌های مورد بررسی، تحلیل گردیده‌اند. یافته‌های پژوهش ضمن تبیین مهم‌ترین شاخص‌های اثرگذار در حوزه فرم شهر بر انرژی تاب‌آوری در مقیاس‌های کلان، میانه و خرد، رویکردهای روش‌شناسانه در این زمینه را دسته‌بندی و تحلیل نموده و در لایه بحث، روندهای جریان‌شناسانه پژوهش‌ها را تبیین نموده است. این یافته‌ها هم در محافل علمی به منظور تدوین طرح پژوهش دانشجویان تحصیلات تکمیلی و اعضای هیأت علمی و هم در مجامع حرفه‌ای، به منظور تدوین طرح‌های توسعه و بازنگری و نیز تنظیم ضوابط و مقررات شهری می‌تواند مورد کاربرد قرار گیرد.

واژگان کلیدی: فرم شهر، مورفولوژی، انرژی تاب‌آوری، تغییرات اقلیمی.

۱. مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی به عنوان پیامد افزایش جمعیت و کاهش فرصت‌های اقتصادی در مناطق روستایی، در دهه‌های اخیر یکی از مهم‌ترین روندهای جهانی به شمار می‌رود. این فرآیند به‌طور مستقیم با تغییرات اقلیمی و تشدید مصرف منابع طبیعی، به‌ویژه انرژی، پیوند خورده است (Ang, Berzolla, and Reinhart 2020). شهرها که امروز میزبان بیش از نیمی از جمعیت جهان هستند و انتظار می‌رود این سهم تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۸۰ درصد برسد (Dab'at and Alqadi 2024)، به کانون اصلی مصرف انرژی و انتشار کربن تبدیل شده‌اند. در نتیجه، مسئله مصرف انرژی و مدیریت آن در شهرها نه تنها یک چالش محیطی، بلکه ضرورتی برای تحقق پایداری و کاهش آسیب‌پذیری در برابر بحران‌های اقلیمی محسوب می‌شود (Bansal and Quan 2022).

در چنین شرایطی، مفهوم تاب‌آوری که طی دو دهه اخیر وارد ادبیات شهرسازی شده، دیگر صرفاً به توانایی شهرها در مقابله با سوانح محدود نمی‌شود، بلکه به عنوان یک کیفیت کلان شهری تفسیر می‌گردد که باید پاسخگوی چالش‌های فراگیری چون تغییرات اقلیمی و بحران انرژی باشد. در همین راستا مفهوم «شهر انرژی تاب‌آور» و «فرم شهری انرژی تاب‌آور» در دهه اخیر و از سال ۲۰۱۵ در ادبیات پژوهشی دنیا وارد شده است که به بررسی شاخص‌های مؤثر از حوزه برنامه‌ریزی و فرم شهر بر کارایی انرژی و کاهش آسیب‌پذیری در این حوزه می‌پردازد (P.P. Yang and Quan 2016; Sharifi and Yamagata 2015; Aldieri, Gatto, and Vinci 2021; Gatto and Drago 2023).

تاب‌آوری انرژی به‌ویژه به دلیل سهم بالای بخش ساختمان در مصرف انرژی شهری (حدود ۴۰ درصد)، اهمیتی دوچندان دارد؛ زیرا تغییرات قابل اعمال در این حوزه می‌تواند به‌طور چشمگیری بر الگو و میزان مصرف انرژی اثر بگذارد. از سوی دیگر، با توجه به شرایط اقلیمی خاص ایران و سهم بالای اقلیم گرم و خشک در پهنه جغرافیایی کشور، ضرورت پرداختن به این موضوع در بستر بومی بیش از پیش احساس می‌شود. ایران، یکی از غنی‌ترین کشورها در حوزه معادن نفت و گاز است. با این وجود مصرف بی‌رویه انرژی و کمبود عرضه آن سال‌های اخیر، به خصوص در ماه‌های گرم و سرد سال، چالش‌ها و نگرانی‌های بسیاری به همراه داشته است. سرانه مصرف انرژی شهری در ایران، ۲۸۵ کیلووات ساعت بر مترمربع است که این میزان بیش از ۲ برابر بسیاری از کشورهای در حال توسعه است.

هدف اصلی پژوهش حاضر مروری بر ادبیات موجود و تحلیل رابطه میان فرم شهری و تاب‌آوری انرژی است. این مطالعه در پی آن است که بر اساس مرور پژوهش‌های پیشین در دنیا، شاخص‌های بررسی این موضوع، روش‌های مهم به کار گرفته شده، مفاهیم اصلی و شاخص‌های کلیدی

مورفولوژی شهری مؤثر بر انرژی تاب‌آوری را شناسایی کرده و روندهای اخیر در پژوهش‌های این حوزه را تبیین نماید. در این راستا، پرسش محوری پژوهش عبارت‌اند از: مهم‌ترین روش‌ها و شاخص‌های مورد استفاده در مطالعات پیشین حوزه فرم شهر و انرژی تاب‌آوری کدامند؟ چه روندهایی بر پژوهش‌های این حوزه در سال‌های اخیر حاکم است؟ پرسش اول ناظر به ابعاد محتوایی و پرسش دوم ناظر به ابعاد رویه‌ای پژوهش‌های این حوزه است و می‌تواند در تبیین مسیرهای پژوهشی پیش رو کمک‌کننده باشد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند هم در مجامع علمی و دانشگاهی، به منظور تشخیص خلأهای پژوهش و توسعه پژوهش‌های داخلی در این زمینه کاربردی باشد و هم در مجامع حرفه‌ای مدیریت و برنامه‌ریزی شهری به منظور کاربست در فرایندهای تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

مرور پیشینه نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها تا سال ۲۰۲۰ به بررسی شاخص‌های مورفولوژیک شهر مانند تراکم، تخلخل، نسبت ارتفاع به عرض معابر، اندازه بلوک‌ها و نوع کاربری زمین پرداخته‌اند. بسیاری از این مطالعات تراکم شهری را عاملی مؤثر در کاهش مصرف انرژی معرفی کرده‌اند (Sharifi 2019; X.). Liu et al. 2020 در حالی که برخی دیگر به پیامدهای منفی آن مانند افزایش جزایر حرارتی و کاهش فضای سبز اشاره داشته‌اند (Oh and Kim 2019). همچنین پژوهش‌هایی بر اهمیت کاربری تجاری در افزایش کارایی انرژی تأکید کرده‌اند (You and Kim 2018; Chen, Han, and De Vries 2020).

در مقیاس کلان، مطالعاتی همچون پژوهش فاجر و میلز (۲۰۱۳) و چارچوب مفهومی شریفی و یاماگاتا (۲۰۱۵) نشان داده‌اند که فرم شهر می‌تواند به عنوان ابزاری مدیریتی برای کنترل مصرف انرژی به کار گرفته شود. در مقیاس خرد نیز مدل‌سازی‌های گوناگون نشان داده‌اند که عواملی چون جهت‌گیری ساختمان‌ها، تراکم ارتفاعی، یا الگوی پلان بر نیاز سرمایشی و گرمایشی اثرگذارند (Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Mangan et al. 2021; Futcher and Mills 2013). با این حال، نتایج پژوهش‌ها در اقلیم‌های متفاوت همواره یکسان نبوده است؛ برای نمونه فضای سبز در اقلیم‌های سرد سبب افزایش اتلاف حرارتی و در اقلیم‌های گرم عامل کاهش مصرف انرژی است (Chen, Han, and De Vries 2020; Leng et al. 2020).

بررسی‌های فراتحلیلی اخیر نشان داده‌اند که بخش عمده‌ای از این مطالعات در کشورهای توسعه‌یافته اروپایی، آمریکایی و شرق آسیا انجام شده است، در حالی که سهم کشورهای جنوب غرب آسیا و به‌ویژه ایران بسیار محدود است (کم‌تر از دو درصد) (Shoja, Pourjafar, and Tabibian 2019). از این رو، انجام مطالعه‌ای مروری در حوزه تأثیر فرم شهری بر تاب‌آوری انرژی، ضمن پرکردن

است. تاب‌آوری انرژی صرفاً به بازیابی پس از شوک محدود نمی‌شود، بلکه شامل توانایی کاهش آسیب‌پذیری، سازگاری پیش‌دستانه و ارتقای عملکرد سیستم انرژی در برابر اختلالات نیز هست (Ping et al. 2025). گاتو و دراگو انرژی تاب‌آوری شهری را توانایی سازگاری شهر با اختلالات حوزه انرژی و توانایی پیشگیری و جهش به جلو در این زمینه می‌دانند (Gatto and Drago 2023). این رویکرد با تأکید بر کمی‌سازی شاخص‌ها، امکان تحلیل و مقایسه الگوهای مختلف شهری را فراهم می‌سازد. شریفی و یاگوماتا، تاب‌آوری انرژی را به عنوان طیف وسیعی از اقدامات آماده‌سازی، جذب، بازیابی و سازگاری تعریف می‌کنند که در دسترس بودن، مقرون‌به‌صرفه بودن و حد مطلوبی از تأمین، انتقال و توزیع انرژی را در طول زمان تضمین می‌کند (Sharifi and Yamagata 2015). بر این اساس، پیوند میان فرم شهر و تاب‌آوری انرژی به‌عنوان چارچوبی نظری مطرح می‌شود که به کمک آن می‌توان نقش طراحی شهری و الگوهای کالبدی را در کاهش مصرف انرژی، ارتقاء بهره‌وری و افزایش پایداری شهرها تحلیل نمود (Yang and Quan 2016).

مهم‌ترین کلیدواژه مطرح در بررسی انرژی تاب‌آوری در شهر، «کارایی انرژی» است. در پژوهش‌های این حوزه کارایی انرژی در مقیاس‌های مختلف به کمک شبیه‌سازی نمونه‌های موردی و یا با تکیه بر مبانی نظری و نظرات خبرگانی مورد بررسی قرار گرفته و چارچوب‌های تبیینی، ارزیابانه و یا راهبردی در این موضوع ارائه شده است (Sharifi and Yamagata 2015; Gatto and Drago 2023; Aldieri, Gatto, and Vinci 2021; Yang 2015).

در سیاست‌گذاری تاب‌آوری انرژی شهری، توجه به تأثیر فرم شهر بر مصرف انرژی در کنار اقدامات دیگری همچون نوسازی مواد ساختمانی، ارتقاء سیستم‌های گرمایشی، بهبود تهویه و قیمت‌گذاری بسیار حائز اهمیت است (Quan and Li 2021). بخش زیادی از مصرف انرژی (به طور میانگین ۸۰ درصد) به تأثیرات مستقیم فرم‌های شهری مختلف مربوط است (Zhao et al. 2024). فرم شهری هم به طور مستقیم و هم به‌طور غیرمستقیم بر مصرف انرژی ساختمان تأثیرگذار است. این تأثیر بین می‌تواند میزان گرمای جذب‌شده از تابش خورشیدی را کاهش داده و در الگوی مصرف انرژی شهر تغییر ایجاد کند. تفاوت در عملکرد انرژی ساختمان که تحت تأثیر مستقیم قرار دارد، به ویژگی‌های هندسی ساختمان‌های اطراف و شدت تابش خورشیدی در مناطق مورد بررسی بستگی دارد (K. Liu et al. 2023). بنابراین شناخت ویژگی‌ها و شاخص‌های مؤثر فرم شهر بر انرژی تاب‌آوری در زمینه‌ها و خرده‌اقلیم‌های مختلف، نیازمند تکرار و توسعه پژوهش‌ها و نیز مرور پژوهش‌های گذشته در این زمینه است.

این خلأ علمی، می‌تواند مبنایی برای بازاندیشی در الگوهای رایج شهرسازی کشور و تطبیق آن‌ها با الزامات پایداری و تاب‌آوری در ایران فراهم آورد.

۲. مبانی نظری

۲-۱- فرم شهری و شاخص‌های آن

دو مفهوم فرم شهری و ریخت‌شناسی شهری در مطالعات صورت‌گرفته در این موضوع، بعضاً به جای یکدیگر استفاده می‌شوند به همین علت بررسی این دو مفهوم به‌طور مجزا اهمیت پیدا می‌کند.

فرم شهری و ریخت‌شناسی دو مفهوم نزدیک ولی متمایز هستند. ریخت‌شناسی بر مطالعه کالبدی و تکامل تاریخی ساختار شهرها و عناصر آن مانند ساختمان‌ها، قطعات و شبکه معابر تأکید دارد (Marshall and Çalışkan 2011). در حالی که فرم شهری علاوه بر ویژگی‌های کالبدی، با الگوهای فضایی، کاربری زمین، تراکم و نحوه سازمان‌یابی فضاها مرتبط است (Leng et al. 2020; Roostami, Nasrollahi, and Khodakarami 2024). فرم شهری نه تنها بازتابی منفعل از توسعه شهری نیست، بلکه عاملی تعیین‌کننده در شکل‌دهی به رفتار شهروندان، الگوهای سفر، سلامت عمومی و کارایی محیطی محسوب می‌شود. شاخص‌های اصلی فرم شهری شامل اندازه، شکل، شدت، توزیع فضایی، تنوع و اتصال‌پذیری هستند که در مقیاس‌های مختلف (ساختمان، بلوک، محله و شهر) قابل بررسی‌اند (Tümtürk, Karakiewicz, and de Haan 2024; Xing et al. 2024; Ji et al. 2022; Jianqi Li and Li 2024).

مرز سیستمی فرم شهری به عنوان فرم فیزیکی تعریف می‌شود که شامل ویژگی‌های هندسی ساختمان‌ها و عناصر منظر است. ویژگی‌های هندسی شامل خصوصیات هندسی ساختمان‌ها و چیدمان آن‌ها می‌شود و عناصر منظر به کاربری زمین و پوشش گیاهی اشاره دارند. هرچند مرز سیستمی فرم شهری می‌تواند دچار گسترش شود به طوری که عوامل عملکردی و عوامل اجتماعی-اقتصادی را نیز به عنوان یک سیستم پیچیده شهری شامل شود (Quan and Li 2021).

لی و لی (۲۰۲۴) نحوه تقسیم‌بندی شاخص‌های فرم را بر اساس مقیاس‌های کلان، میانه و خرد در شش دسته‌بندی قرار دادند: اندازه، شکل، توزیع فضایی، شدت، اتصال‌پذیری و تنوع. شاخص‌های اندازه، شکل و شدت در سطح ساختمان‌های منفرد به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری هستند، اما سایر شاخص‌ها برای اندازه‌گیری نیازمند کمی‌سازی در مقیاس‌های بزرگ‌تر مانند خیابان‌ها، بلوک‌ها هستند (Jianqi Li and Li 2024).

۲-۲- انرژی تاب‌آوری و فرم شهر

مفهوم تاب‌آوری انرژی در پاسخ به بحران‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضای انرژی مطرح شده

۳. روش پژوهش

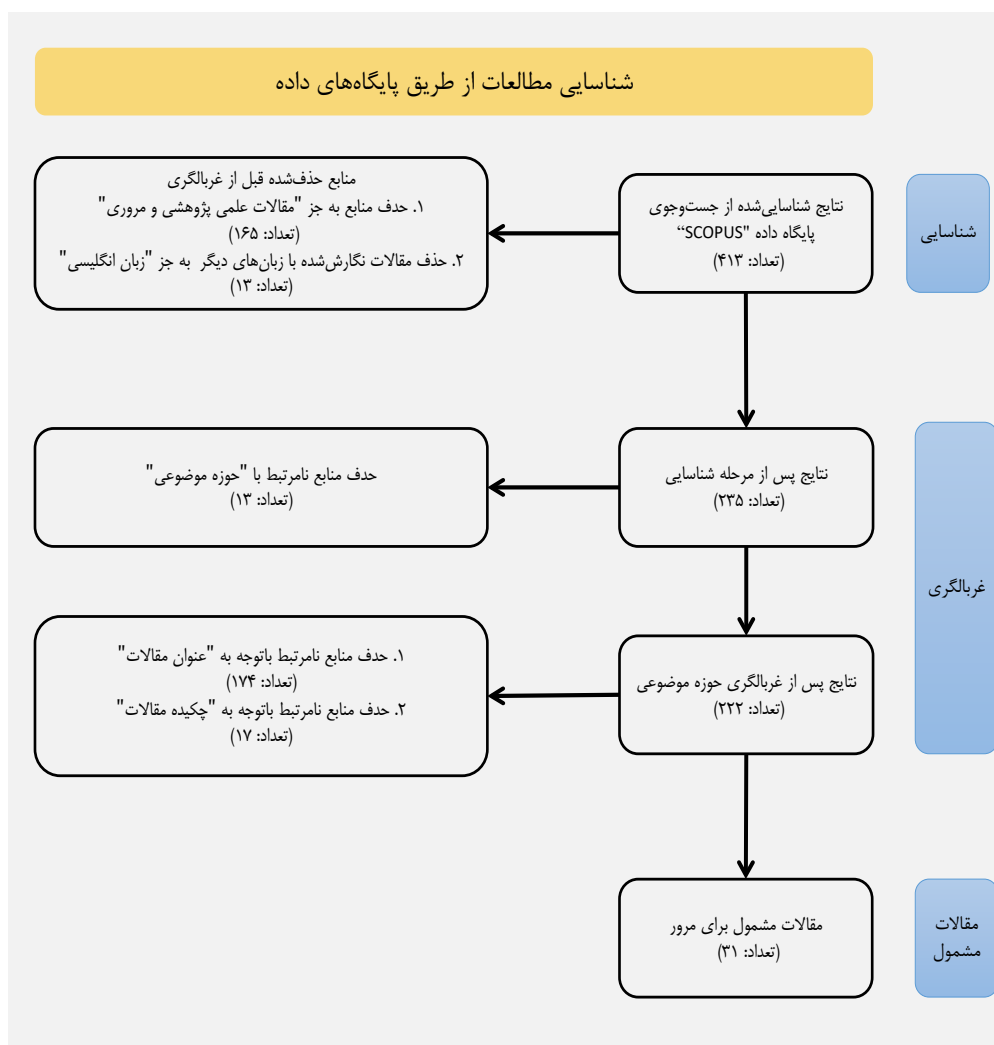
این پژوهش با هدف مروری بر معیارهای موثر فرم شهری بر ارتقاء انرژی تاب‌آوری، به بررسی مفهوم فرم شهری و شاخص‌های آن و همچنین انرژی تاب‌آوری و ارتباط آن با فرم شهری می‌پردازد. روش گردآوری داده‌های این پژوهش از طریق بررسی منابع موجود پیرامون موضوعات فرم شهری و تاب‌آوری انرژی در پایگاه علمی Scopus شامل سه مرحله می‌باشد:

۱. شناسایی: در این مرحله تمرکز بر جستجو روی موضوعات و چکیده‌ها بود است و در مجموع ۴۱۳ نتیجه به‌دست آمده است. در این جستجو از کلمات کلیدی و اصطلاحات جستجوی زیر استفاده شد: (AND (Energy) (“resilience” OR “resiliency” OR “resilient”)

AND (“urban” OR “city”) AND (“form” OR “morphology” OR “geometry”)

در مرحله اول غربال، به مقالات مجلات داوری‌شده و منتشرشده به زبان انگلیسی تمرکز گردید و تنها مقالات پژوهشی و مطالعات مروری انتخاب شدند که بر این اساس، ۲۳۵ مورد مقاله باقی ماند. در مرحله دوم، با محدود کردن حوزه موضوعی و بررسی عناوین مقالات، تعداد کل مقالات به ۲۲۲ مورد کاهش یافت. در مرحله سوم، با نگاه انتقادی، پس از مطالعه دقیق‌تر چکیده مقالات، مقالاتی که انرژی تاب‌آوری و ارتباط آن با فرم شهری را بررسی کرده بودند، شناسایی شده و ۳۱ مطالعه به منظور پردازش نهایی و مرور نظام‌مند باقی ماند. این فرآیند در قالب چارچوب پریزما در شکل ۱ نشان داده شده است.

شکل ۱: فرآیند پریزما به منظور انتخاب مقالات نهایی برای مرور نظام‌مند

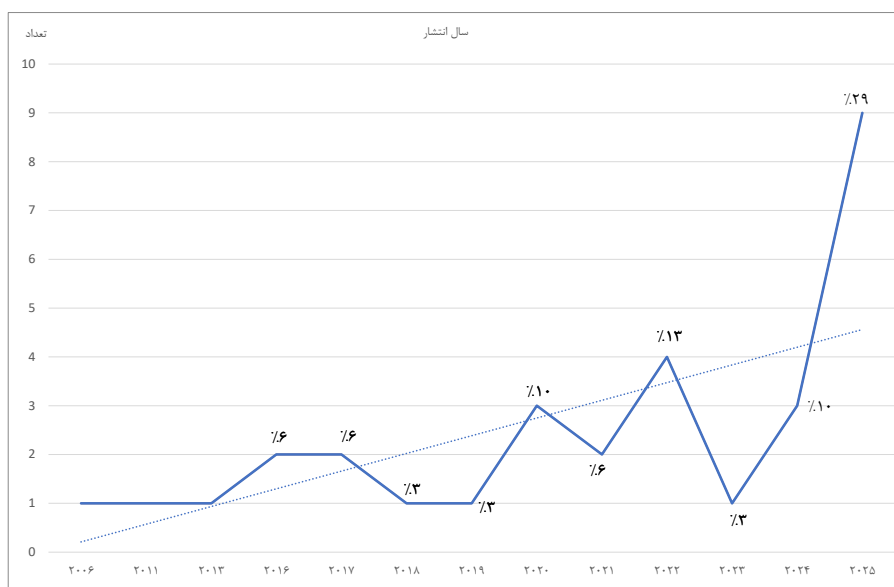


۴. یافته‌ها

۴-۱- سیر زمانی انتشار

همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، مقالات بررسی‌شده

شکل ۲: سیر زمانی انتشار مقالات منتخب و فراوانی

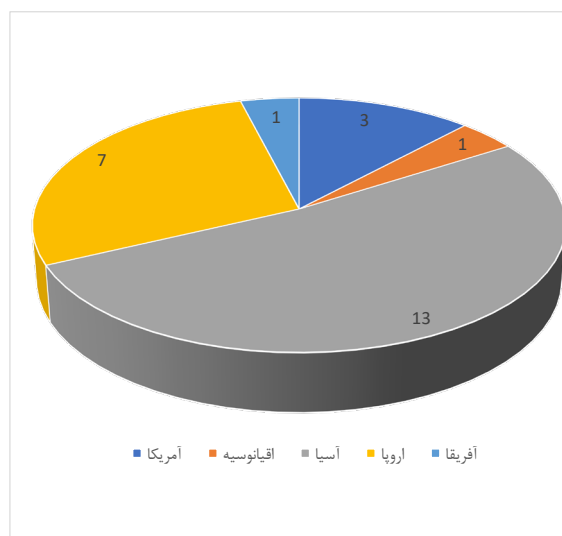


۴-۲- پراکنش جغرافیایی پژوهش‌ها

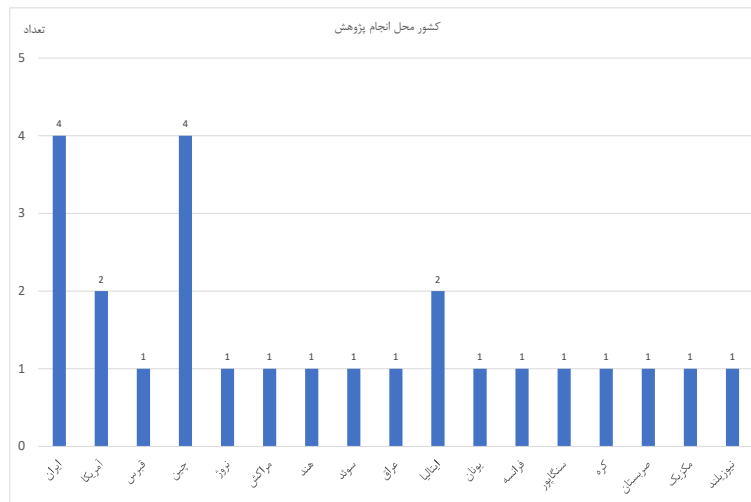
کشورهای اروپایی بیش‌ترین سهم پژوهش‌ها در این زمینه را داشته‌اند. در نمودار شکل ۴ کشورهای محل انجام پژوهش‌ها نیز به تفکیک آمده است.

همان‌گونه که در شکل ۳ قابل مشاهده است، بیش‌ترین تعداد مقالات مورد بررسی مربوط به کشورهای آسیایی بوده است. پس از آن، کشورهای آمریکایی و سپس

شکل ۳: خاستگاه جغرافیایی پژوهش‌های منتخب به تفکیک قاره‌ها



شکل ۴: فراوانی خاستگاه جغرافیایی مقالات منتخب به تفکیک کشورها

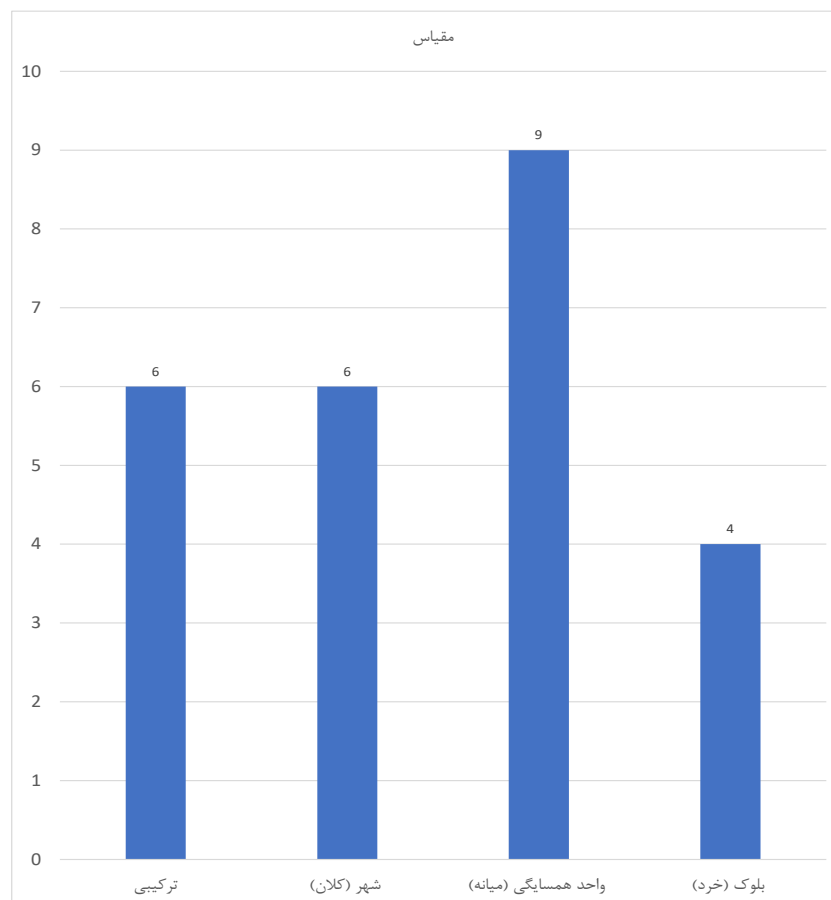


۴-۳- مقیاس‌های مورد پژوهش

بیش‌ترین مقیاس مورد مطالعه و بررسی بوده است. پس از آن، مقیاس کلان در پهنه کل شهر و سپس مقیاس‌های خرد در اندازه بلوک و قطعه، بیش‌ترین فراوانی را در مقیاس‌های مورد بررسی داشته‌اند.

در میان مقالات منتخب به منظور بررسی، همان‌گونه که در شکل ۵ دیده می‌شود مقیاس میانه و بررسی در مقیاس نواحی همسایگی یا پهنه‌های درون‌شهری،

شکل ۵: فراوانی مقیاس مورد بررسی در مقالات منتخب



جدول ۱: فراوانی و منابع مقیاس مورد مطالعه در مقالات منتخب

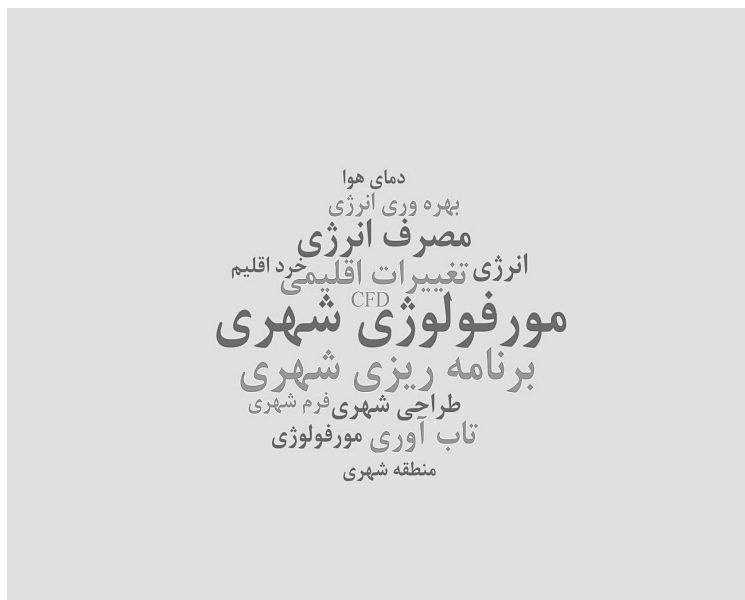
مقیاس	تعداد	درصد	منابع
ترکیبی	۶	۲۴	(Vurro et al. 2025; Bian et al. 2025; Hosseini et al. 2025; Shi et al. 2025; Javanroodi et al. 2022; Wang et al. 2020)
کلان	۶	۲۴	(X. Li et al. 2023; Mohabat Doost et al. 2020; Lazarević, Keković, and Antonić 2018; Khan and Pinter 2016; Saun- (ders, Dantas, and Krumdieck 2006; Dieleman 2013
میان	۹	۳۵	(Seelig 2011; Yuan et al. 2020; Esfandi et al. 2022; Palus- ci et al. 2022; Basee and Abdulla 2022; Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Rachidi and Mounir 2025; Rezaeirad, (Pouramin, and Afzali 2025; Koştourou 2021
خرد	۴	۱۶	(Najian and Goudarzi 2025; Xu et al. 2024; Perera, Javan- (roodi, and Nik 2021; Lee and Jeong 2017

۴-۴- حوزه‌های مفهومی و واژگانی مشترک

در شکل ۶، ابر واژگان حاصل از مقالات مورد بررسی آمده است. در این شکل پرتکرارترین واژگان مشترک میان محتوای متون مقالات جستجو و نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در خاستگاه و بستر دانشی، «برنامه‌ریزی شهری» و «طراحی شهری» دو حوزه دانشی اصلی هستند که خاستگاه اصلی مقالات این موضوع بوده‌اند. مفاهیمی مانند «مورفولوژی شهری» به

عنوان دانشی که به بررسی فرم شهر می‌پردازد، از دیگر واژگان پرتکرار در مقالات منتخب بوده است. «تغییرات اقلیمی»، «خرده‌اقلیم» و «تاب‌آوری اقلیمی» نیز به عنوان مفاهیم واسط هستند که در حوزه تاب‌آوری انرژی و کارایی انرژی پرتکرار هستند. دو پارامتر «دمای هوا» و «باد» نیز به عنوان دو متغیر اصلی حوزه آسایش حرارتی هستند که در مقالات موضوعی انرژی به عنوان متغیرهای واسط و اثرگذار مورد بررسی و اشاره قرار گرفته‌اند.

شکل ۶: ابر واژگان و حوزه‌های مفهومی مشترک در مقالات منتخب



۴-۵- روش‌شناسی

در یک دسته‌بندی کلی، همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، بیش از ۸۰ درصد مقالات مورد بررسی، از جنس مقالات علمی، پژوهشی و با رویکردهای تجربی و

نیمه‌تجربی بوده‌اند و تنها حدود ۲۰ درصد از مقالات نیز رویکرد مروری و نظری داشته‌اند. مقالات مروری در پی تدوین چارچوب نظری در راستای افزایش انرژی تاب‌آوری سیستم شهری (Javanroodi et al. 2022) و بعضاً به کمک ابزارهای هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین

(Bhavsar, Sharma, Xu et al. 2024)، راینو و بایو مورفر^۶ (Shi et al. 2025) (and Kapadia 2024) انرژی پلاس^۷ از ابزارهای مورد استفاده در شبیه‌سازی بوده‌اند. بعثی و عبدالله در مطالعه خود از داده‌های نرم‌افزار دپتمپ و بررسی چیدمان فضا برای تحلیل و تبیین روابط پیکره‌بندی با مصرف انرژی پرداخته‌اند (Basee and Abdulla 2022).

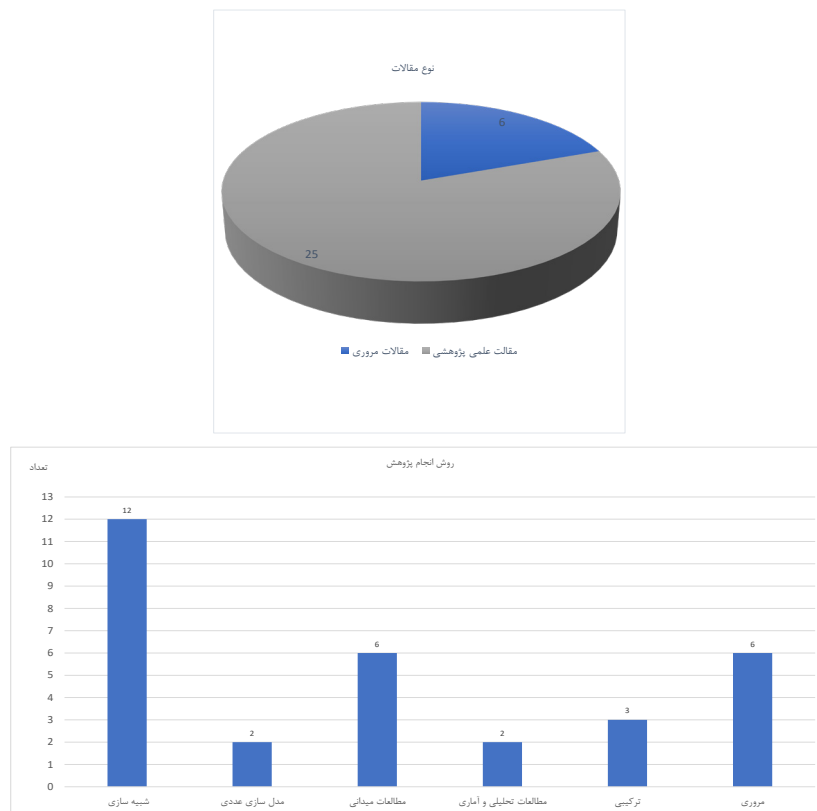
در مطالعات تحلیلی و آماری، استفاده از تکنیک‌های فازی مانند ANP (Esfandi et al. 2022) و یا آزمون‌های تحلیلی آماری مانند رگرسیون و هم‌بستگی (Khan and Pinter 2016; Lee and Jeong 2017) متداول بوده است. بسیاری از پژوهش‌ها نیز روش‌های ترکیبی را به منظور دستیابی به اهداف خود اتخاذ نموده‌اند. استفاده از هم‌بستگی و رگرسیون میان داده‌های ماهواره‌ای از دمای زمین از یک‌سو و فرم شهری از سوی دیگر و مصرف انرژی (Rezaeirad, Pouramin, and Afzali 2025) از جمله این رویکردها است. در مطالعه‌ای ضمن بررسی ۱۸ پهنه شهری در هنگ‌کنگ ابتدا به کمک لایه‌های GIS شاخص‌های مختلف فرمی پژوهش مکان‌مند شده‌اند، داده‌های آماری متغیرهای واسط مانند جزایر حرارتی، دمای سطح زمین، میزان انتشار کربن و مصرف انرژی نیز جمع‌آوری شده و سپس به کمک ابزارهای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین با تدوین مدلی روابط درونی میان این متغیرها تبیین شده است (Bian et al. 2025).

(ML) تدوین شده‌اند (Marey et al. 2025). در نگاه دقیق‌تر، روش‌های شبیه‌سازی به کمک سناریوها، مطالعات میدانی و کاربست لایه‌بندی‌های مکان‌مند به کمک ابزارهایی نظیر GIS، مطالعات مروری، مطالعات تحلیلی و آماری و مدل‌سازی‌های عددی بیش‌ترین فراوانی روش‌شناسانه را داشته‌اند. استفاده از مدل‌های عددی و کمی مانند WRF^۱ و BEM^۲ به منظور پیش‌بینی و محاسبه پارامترهای اقلیمی از یک سو و مصرف انرژی از سوی دیگر (Vurro et al. 2020; Wang et al. 2025)، استفاده از مدل UWG^۳ (Shi et al. 2025; Rachidi and Mounir 2025) نیز استفاده از مدل‌های عددی مبتنی بر یادگیری ماشین (Bian et al. 2025).

هم‌چنین در مطالعات مدل‌سازی عددی، در نمونه‌هایی، از مدل‌های رفتار سیالات مانند CFD^۴ برای بررسی اثر متغیرهایی مانند باد و تهویه استفاده شده و تأثیر آن بر مصرف انرژی بررسی شده است (Palusci et al. 2022; Najian and Goudarzi 2025). جوان‌رودی و همکاران در مطالعه خود از ترکیب دینامیک سیالات محاسباتی و شبکه‌های عصبی برای توصیف شرایط حدی خرداقلیمی و تأثیر مورفولوژی بر مصرف انرژی در این زمینه کمک گرفته‌اند (Javanroodi et al. 2022).

در میان نرم‌افزارها و پلاگین‌های شبیه‌سازی تصویری نیز گرس هاپر^۵ (Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024);

شکل ۷: فراوانی روش‌شناسی در مقالات منتخب



۴-۶- شاخص‌های اثرگذار فرم بر انرژی تاب‌آوری در شهر

مهم‌ترین هدف و مهم‌ترین یافته پژوهش حاضر، استخراج و دسته‌بندی شاخص‌های اثرگذار فرم شهری بر مصرف انرژی است. بدین منظور در میان مقالات مورد بررسی، به کمک تحلیل محتوای کیفی، به استخراج شاخص‌های اثرگذار و مورد بررسی در پژوهش‌های پیشین پرداخته شد. شاخص‌های مستخرج، مطابق دسته‌بندی متداول شاخص‌های فرم شهر ابتدا در سه مقیاس خرد، میانه و کلان دسته‌بندی شد و پس از آن به دلیل هم‌پوشانی زیاد شاخص‌های مقیاس کلان و میانه (مقیاس‌های پهنه‌ای)، شاخص‌های این دو مقیاس به صورت ترکیبی مورد تحلیل قرار گرفت. لازم به ذکر است که در جداول ۲ و ۳، شاخص‌های با تکرار کم‌تر از سه بار، حذف شدند.

- مقیاس میانه و کلان

همان‌گونه که در جدول ۲ و نمودار شکل ۸ دیده می‌شود، در میان شاخص‌ها و متغیرهای فرم در مقیاس شهر و پهنه‌های شهری، تراکم و فشردگی، از پرتکرارترین شاخص‌ها در پژوهش‌های پیشین هستند. در مورد رابطه بین تراکم و مصرف انرژی ساختمان‌ها نظرات مختلفی وجود دارد و بسیاری از پژوهش‌گران معتقدند که رابطه بین تراکم و میزان مصرف انرژی ساختمان‌ها، الگوی پیچیده‌ای داشته و در محدوده‌های مختلف متفاوت است (Quan and Li 2021). مطالعه‌ای در رم نشان می‌دهد در سطح محلات شهری، ارتفاع و تراکم ساخت در مورد شاخص واسط تهویه، همبستگی دارند و با افزایش ارتفاع و تراکم، تهویه در سطح عابر پیاده کاهش یافته و مصرف انرژی افزایش می‌یابد (Palusci et al. 2022). نتایج برخی پژوهش‌ها بیانگر تاثیر مثبت افزایش تراکم بر کاهش میزان مصرف انرژی است (Roostami, Nasrollahi, and Khoda-karami 2024; Leng et al. 2020; X. Liu et al. 2020). تراکم ساخت تا ۲۷ درصد تقاضای مصرف انرژی را افزایش می‌دهد (Perera, Javanroodi, and Nik 2021). از طرف دیگر ژائو و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که کاهش تراکم ساختمانی تاثیر قابل توجهی در کاهش اثر جزیره حرارتی شهری دارد (Zhao et al. 2024). نتایج دیگری از مطالعه در کپنهاگ نشان داد که تراکم ساختمان‌ها بر نورپردازی طبیعی و انرژی خورشیدی دریافتی ساختمان‌ها تاثیر می‌گذارد و مصرف انرژی برای نورپردازی، سرمایش و گرمایش را تا ۳۰ درصد برای دفاتر و ۱۹ درصد برای واحدهای مسکونی افزایش می‌دهد (Leng et al. 2020). در مورد ارتفاع هم -به عنوان شاخص پرتکرار دیگر در این مقیاس- یافته‌های متفاوتی وجود دارد و مؤید لزوم انجام پژوهش در هر زمینه اقلیمی به طور مجزا است. نتایج پژوهشی نشان می‌دهد که ارتفاع بر میزان تقاضای

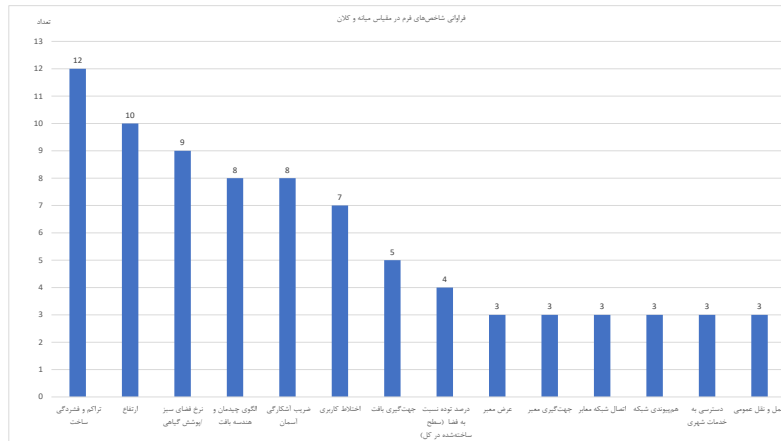
خنک‌کنندگی بین ۷.۳ درصد و ۸.۶ درصد اما بر تقاضای گرمایش بین ۱۳.۶ درصد و ۳۱.۲ درصد تاثیرگذار بوده است (Xie et al. 2023). افزایش ارتفاع باعث کاهش شدت مصرف انرژی می‌شود. افزایش ارتفاع ساختمان درصد فضای کف تحت تاثیر سایه‌اندازی متقابل را کاهش داده و نسبت سطح به حجم^۸ را تغییر می‌دهد (Bansal and Quan 2022). از طرفی، نتایج به‌دست آمده از بررسی‌ها در ووهان در ارتباط با رابطه بین ارتفاع ساختمان با میزان مصرف انرژی نشان‌دهنده همبستگی ضعیف مثبت است. این همبستگی ضعیف مثبت بین ارتفاع ساختمان و شدت مصرف انرژی نشان می‌دهد که ساختمان‌های مرتفع‌تر ممکن است به مصرف انرژی بیش‌تری نیاز داشته باشند، که احتمالاً به دلیل افزایش نیاز به انرژی برای آسانسورها و سیستم‌های تهویه مطبوع^۹ است (Du et al. 2025).

نرخ پوشش گیاهی و فضای سبز از دیگر شاخص‌های پرتکرار در مقیاس‌های پهنه‌ای است. محدوده‌هایی که پوشش گیاهی بیش‌تری دارند، مصرف انرژی کم‌تری دارند (Dab'at and Alqadi 2024). پوشش گیاهی، بارهای سرمایشی تابستان را کاهش می‌دهد (Roostami, Nasrollahi, and Khodakarami 2024).

در مقیاس کلان، یکی دیگر از مهم‌ترین و پرتکرارترین شاخص‌ها، الگوی هندسی و مورفولوژیکی بافت است. نتایج نشان می‌دهد که یک مورفولوژی شهری بهینه‌شده در مقیاس کلان و میانی شهر می‌تواند می‌تواند هزینه تراز شده برای زیرساخت‌های انرژی را تا ۳۰ درصد کاهش دهد (Perera, Javanroodi, and Nik 2021). مطالعه حسینی و همکاران در نروژ بیان‌گر تأثیر الگوی خوشه‌بندی بر کاهش مصرف و هزینه انرژی است (Hos-seini et al. 2025). مطالعه رشیدی و منیر در مراکش با مقایسه تطبیقی الگوهای سنتی (ارگانیک) و جدید فرم شهری انجام پذیرفته و هر یک از این الگوها را واجد معایب و مزایایی در حوزه مصرف انرژی می‌داند (Rachidi and Mounir 2025). مطالعه بعثی و عبدالله در بغداد در مورد تأثیرات تغییر ساختار سنتی شهرهای تاریخی بر تاب‌آوری آن‌ها در ابعاد مختلف از جمله انرژی کارایی نشان‌دهنده افزایش آسیب‌پذیری این بافت‌ها بر اثر کاهش پیوند درونی آن‌هاست (Basee and Abdulla 2022).

ضریب آشکارگی آسمان و در کل، شاخص‌های مرتبط با نسبت ارتفاع به عرض نیز از دیگر شاخص‌های پرتکرار در مقیاس‌های کلان و میانه است که به نوعی به ویژگی‌های شبکه معبر نیز مرتبط است. این شاخص به‌طور مستقیم بر دمای سطح، جذب تابش خورشید، تهویه طبیعی و سرمایش شبانه اثرگذار است. معمولاً حد بالایی از این ضریب باعث کاهش بار سرمایشی می‌شود اما از طرفی می‌تواند گرمای شبانه را تشدید نماید (Najjan and Goudarzi 2025).

شکل ۸: فراوانی شاخص‌های فرم مقیاس میانه و کلان



کالبدی، شاخص‌های عملکردی فرم مانند اختلاط کاربری، دسترسی به خدمات شهری و حمل و نقل عمومی نیز در پژوهش‌های این حوزه مد نظر قرار گرفته است.

در جدول ۲، لیست پرتکرارترین شاخص‌های مقیاس میانه و کلان در پژوهش‌های منتخب آمده است. همان‌گونه که در انتهای این جدول دیده می‌شود، علاوه بر شاخص‌های

جدول ۲: شاخص‌های فرم و فراوانی آن‌ها در مقیاس میانه و کلان

شاخص	مصادر	فراوانی
۱ الگوی چیدمان و هندسه بافت	Hosseini et al. 2025; Javanroodi et al. 2022; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Sharifi and Yamagata 2016; Rachidi and Mounir 2025; Bhavsar, (Sharma, and Kapadia 2024; Esfandi et al. 2022; Schoeman 2016	۸
۲ جهت‌گیری بافت	Bian et al. 2025; Sharifi and Yamagata 2016; Javanroodi et al. 2022; (Rachidi and Mounir 2025; Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024	۵
۳ ضریب آشکارگی آسمان	Javanroodi et al. 2022; Bian et al. 2025; Sharifi and Yamagata 2016; Rachidi and Mounir 2025; Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Marey (et al. 2025; Javanroodi et al. 2023; Najian and Goudarzi 2025	۸
۴ نرخ فضای سبز / پوشش گیاهی	Vurro et al. 2025; Shi et al. 2025; Bian et al. 2025; Y. Wang et al. 2020; Rachidi and Mounir 2025; Esfandi et al. 2022; Marey et al. 2025; Rezaei-rad, Pouramin, and Afzali 2025; Lee and Jeong 2017	۹
۵ تراکم و فشردگی ساخت	Shi et al. 2025; Bian et al. 2025; Vurro et al. 2025; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Khan and Pinter 2016; Sharifi and Yamagata 2016; Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Marey et al. 2025; Rezaeirad, Pouramin, and Afzali 2025; Lee and Jeong 2017; Koštourou 2021; Xu (et al. 2024	۱۲
۶ ارتفاع	Rachidi and Mounir 2025; Marey et al. 2025; Javanroodi et al. 2022; Lee and Jeong 2017; Wang et al. 2020; Vurro et al. 2025; Bian et al. 2025; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Shi et al. 2025; Palusci et al. (2022	۱۰
۷ درصد توده نسبت به فضا (سطح ساخته‌شده در کل)	Lee and Jeong 2017; Y. Wang et al. 2020; Perera, Javanroodi, and Nik (2021; Yuan et al. 2020	۴
۸ عرض معبر	Rezaeirad, Pouramin, and Afzali 2025; Wang et al. 2020; Bian et al. (2025	۳
۹ جهت‌گیری معبر	Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Wang et al. 2020; Lee and Jeong (2017	۳
۱۰ اتصال شبکه معابر	(Wang et al. 2020; Sharifi and Yamagata 2016; Basee and Abdulla 2022)	۳
۱۱ هم‌پیوندی شبکه	(Wang et al. 2020; Sharifi and Yamagata 2016; Basee and Abdulla 2022)	۳

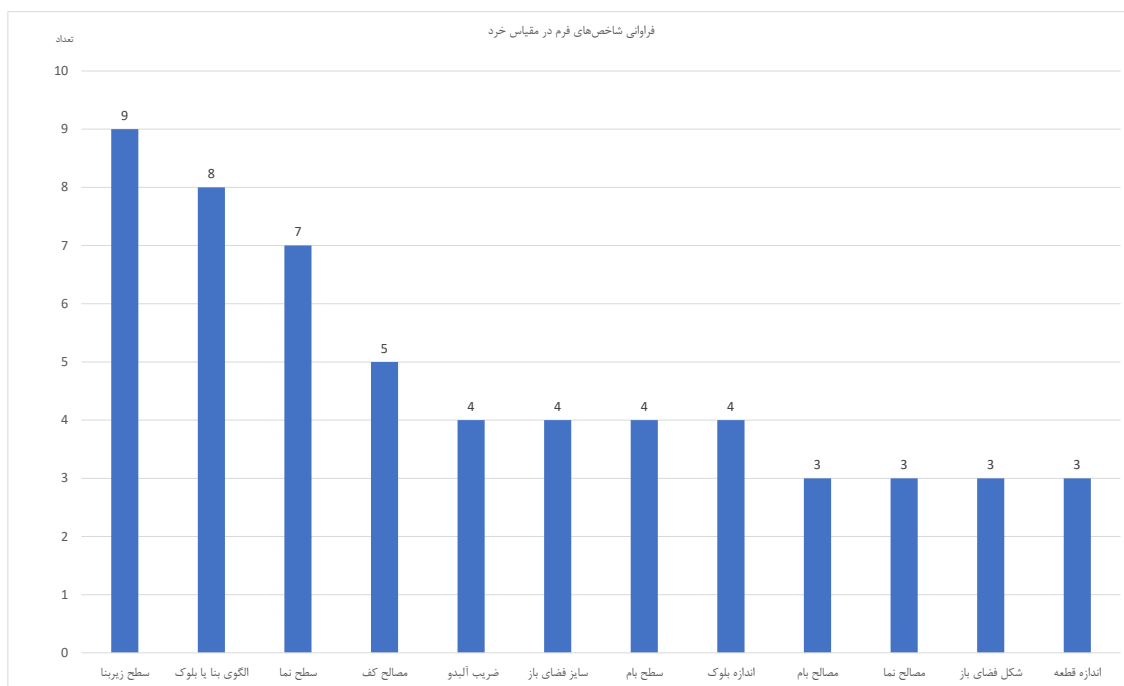
شاخص	منابع	فراوانی
۱۲ اختلاط کاربری	Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Schoeman 2016; Esfandi et al. 2022; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Sharifi and Yamagata 2016; (Mohabat Doost et al. 2020; Saunders, Dantas, and Krumdieck 2006)	۷
۱۳ دسترسی به خدمات شهری	Schoeman 2016; Esfandi et al. 2022; Saunders, Dantas, and Krumdieck (2006)	۳
۱۴ حمل و نقل عمومی	Schoeman 2016; Esfandi et al. 2022; Saunders, Dantas, and Krumdieck (2006)	۳

- مقیاس خرد

در جدول ۳ شاخص‌های فرمی اثرگذار بر انرژی تاب‌آوری در مقیاس خرد آمده است و در شکل ۹ نیز به منظور مقایسه، جمع‌بندی شده است. این شاخص‌ها، فرم شهر را در مقیاس بلوک و قطعه تحلیل می‌نمایند. شاخص سطح زیربنا یکی از پرتکرارترین این شاخص‌هاست که بر جذب انرژی تابشی، تهویه، سایه‌اندازی، انتقال حرارت و جزیره حرارتی شهری اثر گذاشته و از آن طریق بر مصرف انرژی شهر مؤثر است (Esfandi et al. 2022; Lee).

معمولاً حد پایینی از این شاخص سطوح در معرض تابش و تقاضای انرژی سرمایشی را افزایش می‌دهد و حد بالای آن با سایه‌اندازی و کاهش تابش مستقیم باعث کاهش بار سرمایشی می‌شود (Bian et al. 2025; Xu et al. 2024). اما کاهش تهویه و افزایش تجمع حرارت در مقادیر بالای این شاخص در اقلیم‌های گرم و مرطوب و گرم و خشک دمای شبانه و مصرف انرژی را افزایش می‌دهد (Perera, Javanroodi, and Nik 2021).

شکل ۹: فراوانی شاخص‌های فرم مقیاس خرد



تهویه طبیعی داخلی بلوک را بهبود بخشد و مصرف انرژی را کاهش دهد (Wang et al. 2021) و یا پژوهش دیگری در ووهان چین به این نتیجه دست یافته است که عمولاً طرح‌های طراحی با پلکان، چیدمان پلان پلکانی شمال-جنوب و تغییر ارتفاع ساختمان در جهت شرق-غرب می‌توانند مزایای مشترک بهتری در زمینه مصرف انرژی و دیگر متغیرهای محیطی داشته باشند (Xu et al. 2024).

الگوی شکل بنا نیز از دیگر شاخص‌های پرتکرار در مقیاس خرد در زمینه انرژی تاب‌آوری است. یافتن الگوی بهینه نیازمند پژوهش‌های مفصل در هر خرده‌اقلیم و زمینه جغرافیایی است. به عنوان مثال در اقلیم گرم و مدیترانه‌ای الگوی ساختمانی حیاطدار از نظر میزان مصرف انرژی بهینه عمل می‌کند (Rachidi and Mounir 2025). همچنین الگوی حیاط مرکزی می‌تواند به‌طور قابل توجهی احتمال تمرکز گرما در بلوک را کاهش داده و

جدول ۳: شاخص‌های فرم و فراوانی آن‌ها در مقیاس خرد

شاخص	منابع	فراوانی
۱ سائز فضای باز	Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Kostourou 2021; Wang et al. 2020; Lee and Jeong 2017	۴
۲ شکل فضای باز	(Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Javanroodi et al. 2023; Lee and Jeong 2017)	۳
۳ اندازه بلوک	Bian et al. 2025; Sharifi and Yamagata 2016; Palusci et al. 2022; Khan and Pinter (2016)	۴
۴ اندازه قطعه	(Bian et al. 2025; Sharifi and Yamagata 2016; Palusci et al. 2022)	۳
۵ سطح زیرینا	Bian et al. 2025; Javanroodi et al. 2022; Javanroodi et al. 2023; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Lee and Jeong 2017; Marey et al. 2025; Rezaeirad, Pouramin, and Afzali 2025; Esfandi et al. 2022; Xu et al. 2024	۹
۶ ضریب آلبدو	Sharifi and Yamagata 2016; Y. Wang et al. 2020; Marey et al. 2025; Rachidi and Mounir 2025	۴
۷ مصالح کف	Bian et al. 2025; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Wang et al. 2020; Marey et al. (2025; Rezaeirad, Pouramin, and Afzali 2025	۵
۸ سطح نما	Lee and Jeong 2017; Javanroodi et al. 2022; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; (Sharifi and Yamagata 2016; Wang et al. 2020; Marey et al. 2025; Yuan et al. 2020	۷
۹ مصالح نما	(Lee and Jeong 2017; Bian et al. 2025; Perera, Javanroodi, and Nik 2021)	۳
۱۰ مصالح بام	(Lee and Jeong 2017; Bian et al. 2025; Perera, Javanroodi, and Nik 2021)	۳
۱۱ سطح بام	Javanroodi et al. 2023; Lee and Jeong 2017; Sharifi and Yamagata 2016; Wang et al. 2020	۴
۱۲ الگوی بنا یا بلوک	Bhavsar, Sharma, and Kapadia 2024; Javanroodi et al. 2023; Lee and Jeong 2017; Bian et al. 2025; Javanroodi et al. 2022; Perera, Javanroodi, and Nik 2021; Palusci et al. 2022; Xu et al. 2024	۸

- شاخص‌ها و متغیرهای واسط

در میان پژوهش‌های این حوزه، علاوه بر شاخص‌های فرم شهری که به آن‌ها اشاره شد؛ در اکثر مقالات منتخب، شاخص‌ها و متغیرهای دیگری هم مورد بررسی قرار گرفته بودند که یا به صورت واسط و یا به صورت همزمان و موازی، تأثیر شاخص‌های فرم بر آن‌ها سنجیده شده بود. برخی پژوهش‌ها مدل را برای پیش‌بینی رفتار در «شرایط حدی اقلیمی» تدوین نموده‌اند (Javanroodi et al. 2022). توجه ویژه به خرده‌اقلیم‌ها به خصوص در پژوهش‌های اخیر، به عنوان بسترهای اقلیمی محلی در اثرگذاری فرم بر مصرف انرژی مورد توجه بوده است (Javanroodi et al. 2022). شاخص‌های مربوط به دما (دمای روزانه و شبانه) (Wang et al. 2020; Rezaeirad, Pouramin, and Afzali 2025; Lee and Jeong 2017)، استرس و تنش حرارتی (Palusci et al. 2022; Vurro et al. 2025) و آسایش حرارتی (Bian et al. 2025; Xu et al. 2024) از جمله مهم‌ترین و پرتکرارترین این شاخص‌ها هستند (Marey et al. 2025). در برخی پژوهش‌ها به خصوص در شهرهای بلندمرتبه، بررسی اثر «جزایر حرارتی» در رابطه میان فرم و انرژی‌تاب‌آوری مورد نظر بوده است (Bian et al. 2025; Rachidi and Mounir 2025; Yuan et al. 2020).

موضوع آلودگی هوا، انتشار کربن و میزان گازهای گلخانه‌ای به کمک آمارهای پایگاه داده نیز از دیگر شاخص‌های مورد بررسی موازی در پژوهش‌ها بوده است. در میان شاخص‌های اقلیمی سطح رطوبت، اثر باد و تهویه در حالت‌های مختلف به خصوص در اقلیم‌های گرم و خشک و گرم و مرطوب به عنوان متغیر واسط مورد توجه بوده است (Marey et al. 2025; Palusci et al. 2022; Lee and Jeong 2017).

به طور مثال در مقاله ناجیان و گودرزی بر تأثیر فرم بر دینامیک رفتار باد در سطح عابر پیاده تمرکز شده است (Najian and Goudarzi 2025). توجه به این متغیرهای واسط با توجه به شخصیت اقلیمی محلی در تدوین طرح پژوهش در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

۵. بحث

توجه به سیر زمانی پژوهش‌های در حوزه فرم شهر و انرژی تاب‌آوری در دو دهه اخیر نشان از روند رویکردهای خطی و یک‌بعدی در تبیین رابطه این دو، به سمت پژوهش‌های چندبعدی و پیچیده دارد. این موضوع، هم در طرح تحقیق و توجه به مؤلفه‌ها و متغیرهای واسط مشهود است و هم در رویکردهای روش‌شناسانه ترکیبی و پیچیده‌ای که در

محاسباتی و تحلیلی و تبیین الگوهای پیش‌بینی‌کننده از دیگر نکات مهمی است که می‌توان در تحلیل زمانی روند پژوهش‌های این حوزه بدان اشاره نمود. به نظر می‌رسد ادغام تکنیک‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین با ارائه پیش‌بینی‌های مقیاس‌پذیر، کارآمد و دقیق، به پیش‌بینی‌های خرداقلیم و نیز انرژی تاب‌آوری کمک کرده است. مارای و همکاران در پژوهش خود از اثرگذاری کاربست مدل‌هایی مانند شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNNs)، شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTMs) و چارچوب‌های ترکیبی و پتانسیل قابل توجه آن‌ها در تبیین تعاملات غیرخطی بین مورفولوژی شهری، انرژی تاب‌آوری و عوامل خرداقلیم تأکید نموده‌اند (Maracy et al. 2025). جوان‌رودی و همکاران در پژوهش‌های خود در حوزه اروپای غربی معتقدند در بررسی تعاملات پیچیده میان فرم شهر و مصرف انرژی و سایر شاخص‌های خرداقلیمی نیاز به بینشی عمیق‌تر با استفاده از فرصت‌های نوظهور، کلان‌داده‌ها و فناوری‌های پیشرفته مانند هوش مصنوعی و یادگیری ماشین ضروری است (Javanroodi et al. 2022; Javanroodi et al. 2023). الگوریتم‌هایی مانند جنگل‌های تصادفی^{۱۱}، ماشین‌های بردار پشتیبان^{۱۲} و شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور گسترده برای پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان، شدت جزیره گرمایی شهری و تولید انرژی تجدیدپذیر به کار گرفته شده‌اند. به عنوان مثال، لی و همکاران، ۲۶ شاخص مورفولوژیکی مؤثر بر مصرف انرژی ساختمان را با استفاده از معیارهای مجاور مکانی و هوش مصنوعی قابل توضیح (SHAP) کمی‌سازی کردند و ویژگی‌های مؤثر و سازگار انواع مختلف ساخت را تبیین نمودند (Jianqi Li and Li 2024). لی و همکاران شبکه‌های عصبی گراف (GNN) را با یک الگوریتم ژنتیک (GA) ترکیب کردند تا انتشار کربن در ساعات اوج مصرف در شانگهای را از طریق بهبود فرم شهری بهینه کنند (Jianyi Li et al. 2025). لیو و همکاران از تحلیل SHAP برای کشف تأثیرات غیرخطی ویژگی‌های محیط ساخته‌شده بر تاب‌آوری گرمای شهری در پکن استفاده نمودند (Liu, Wang, and Bai 2024). اوکوموس و آکای و لی و همکاران تأثیرات غیرخطی منطقه‌ای از معیارهای مورفولوژیکی -مانند نسبت مساحت زمین و ساختار شبکه جاده بر گرمای شهری و انتشار کربن- را با استفاده از مدل‌های رگرسیون وزنی جغرافیایی XGBoost-SHAP نشان دادند (Jianyi Li et al. 2025; Okumus and Akay 2025). این رویکردهای مبتنی بر یادگیری عموماً دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مدل‌های آماری سنتی دارند و نقطه عطفی در روند پژوهش‌های اخیر این حوزه محسوب می‌شوند.

رویکرد دیگری که در تحلیل سیر و جریان‌شناسی پژوهش‌های این حوزه به چشم می‌خورد، توجه به داده‌های خرده‌اقلیمی در محاسبات است. پژوهش‌های اخیر عمدتاً

چند سال اخیر به خصوص در نشریات معتبر، به سمت آن رفته‌اند دیده می‌شود. البته که هم تاب‌آوری ماهیتی پویا، چندوجهی و پیچیده دارد و هم سیستم شهر در ذات خود این‌گونه است. شریفی و یاماگاتا در تبیین دستاوردهای پژوهش مروری خود تأکید می‌نمایند که بررسی ارتباط بین اجزای چارچوب تاب‌آوری نشان می‌دهد که تصمیمات مربوط به یک جزء احتمالاً بر سایر اجزا نیز تأثیر می‌گذارد. این امر، ماهیت پیچیده، به‌هم‌پیوسته و چندوجهی تاب‌آوری انرژی را به عنوان یک مفهوم هم‌افزایی برجسته می‌کند و اهمیت اتخاذ یک رویکرد سیستمی برای بهبود آن را برجسته می‌سازد (Sharifi and Yamagata 2016). یکی از نکات مورد توجه در بررسی سیر پژوهش‌های این حوزه در سال‌های اخیر، در نظر گرفتن متغیرهای واسط و اثرگذار مانند تابش، رطوبت، دمای زمانی، آسایش حرارتی، جزایر حرارتی، تهویه و غیره است که نشان‌دهنده در نظر گرفتن واقعیت و ماهیت پیچیده ارتباط فرم شهر و انرژی تاب‌آوری است. در پژوهش بیان و همکارانش در سال ۲۰۲۵ به مطالعه ۱۸ منطقه شهری در هنگ‌کنگ و بررسی روابط درونی بیش از ۱۰ شاخص فرمی از یک سو و داده‌های حاصل از جزایر حرارتی، تنش گرمایی، انتشار کربن و مصرف انرژی از سوی دیگر پرداخته است (Bian et al. 2025). در پژوهش مشابه دیگری شنکسو و همکاران بیش از ۴۰ پروتوتایپ فرمی را در ۱۱۴ بلوک در ووهان چین بررسی کرده‌اند و در بررسی رابطه فرم و انرژی تاب‌آوری، به آسایش حرارتی و متغیرهای واسط در حوزه اقلیمی نیز پرداخته‌اند (Xu et al. 2024). در این رویکردها توجه به اثرات هم‌افزایی یا تضاد منافع^{۱۳} میان شاخص‌های یک حوزه در بررسی اقلیمی با حوزه دیگر بسیار حائز اهمیت است. پژوهش‌های بسیاری به بررسی همزمان اثرات مثبت و منفی دو یا چند حوزه در این زمینه پرداخته‌اند و سعی بر آن داشته‌اند که حد واسطی برای تأمین همزمان انرژی تاب‌آوری، آسایش اقلیمی، انتشار کربن، جزایر حرارتی و غیره بیابند (Bian et al. 2025; Javanroodi et al. 2022; Xu et al. 2024). همان‌گونه که بیان و همکاران در پژوهش خود تأکید دارند که بررسی همزمان معیارهای متعدد حوزه اقلیمی و مصرف انرژی و روابط متقابل آن‌ها به صورت بهینه به‌ندرت انجام شده و اغلب پژوهش‌ها به تک‌معیارهایی مانند مصرف انرژی، شدت جزیره گرمایی شهری، پتانسیل خورشیدی، آسایش حرارتی داخلی و انتشار کربن و غیره را به صورت جداگانه یا در مدل‌های خطی و دوبعدی بررسی کرده‌اند و نتوانسته‌اند به طور کامل از ویژگی‌های مورفولوژیکی سه‌بعدی در یک زمینه بهینه‌سازی چندهدفه و یکپارچه استفاده کنند (Bian et al. 2025).

گذر از محدودیت روش‌های سنتی و استفاده از پتانسیل رویکردهای جدید و میان‌رشته‌ای به خصوص کاربست هوش مصنوعی و ماشین یادگیری در تدوین مدل‌های

ساختمانی پیچیده و نامنظم، با افزایش سطح تماس با محیط بیرونی، به اتلاف انرژی بیش‌تری منجر می‌شوند. در مقابل، فرم‌های فشرده‌تر و حیاطدار، با نسبت سطح به حجم پایین‌تر، کارایی انرژی بهتری دارند (Natanian and Wortmann 2021).

مهم‌ترین خلأ پژوهش در حوزه موضوعی فرم شهر و انرژی و نیز پیشنهاد پژوهش‌های آتی به خصوص در مقیاس داخلی را می‌توان در دو وجه محتوایی و رویه‌ای تدوین نمود. در لایه محتوایی، اهمیت توجه به رویکردهای چندبعدی و بررسی رابطه فرم و انرژی تاب‌آوری در بستر چندوجهی مسائل اقلیمی و نیز توجه به هم‌افزایی و تعارضات منافع دستیابی به اهداف در این زمینه‌ها رویکردی است که در پژوهش‌های داخلی باید به سمت آن حرکت نمود. نگاه خطی و یک‌بعدی به این رابطه، بسیاری از واقعیت‌های محیطی را نادیده می‌گیرد و نتایج سطحی به دست می‌دهد. در این لایه هم‌چنین اهمیت تکرار پژوهش در خرده‌اقلیم‌های مختلف، استفاده از داده‌های خردمقیاس و عدم تعمیم داده‌های اقلیمی کلان منطقه‌ای نکته لازم به توجهی است که بر دقت پژوهش‌ها و کاربردی نمودن آن‌ها خواهد افزود.

در وجه رویه‌ای، اهمیت کاربست رویکردهای جدید در روش‌شناسی به خصوص مدل‌های عددی مبتنی بر یادگیری ماشین به کمک انجام پژوهش‌های میان‌رشته بسیار ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های سنتی در پرداخت عمیق به این موضوع با محدودیت‌های بسیاری مواجه‌اند و لازم است با رویکردی عمیق و سیستمی، ضمن در نظر گرفتن واقعیت پویا و پیچیده لایه‌های فرم شهر از یک‌سو و تاب‌آوری از سوی دیگر، به سمت کاربست رویکردهای جدید روش‌شناسی و ابزار و مدل‌های جدید در این حوزه حرکت نمود.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف تبیین مهم‌ترین شاخص‌ها، روش‌ها و روندها در پژوهش‌های حوزه فرم شهر و انرژی تاب‌آوری به مرور نظام‌مند پژوهش‌های پیشین به خصوص در دهه اخیر پرداخت. به این منظور ضمن کاربست چارچوب پریزما و طی فرآیند انتخاب مقالات، ۳۱ مقاله را در زمینه‌های سیر زمانی انتشار، خاستگاه جغرافیایی، مقیاس، روش‌شناسی، حوزه‌های مفهومی مشترک و شاخص‌های اثرگذار مورد بررسی قرار داد و نتایج آن‌ها را ارائه نمود.

آن‌چه از مرور پژوهش‌های پیشین در حوزه نحوه اثرگذاری فرم شهر بر الگوی مصرف انرژی به دست می‌آید نشان‌گر چند موضوع است: اول آن‌که اثرگذاری شاخص‌های فرم شهر بر مصرف انرژی، یک رابطه خطی نیست و وابسته به شرایط زمینه، نوع انرژی (سرمایش یا گرمایش)، نوع اقلیم و سایر ویژگی‌های کالبدی- فضایی است. بنابراین در تدوین طرح پژوهش در این زمینه توجه به ماهیت چندبعدی تاب‌آوری انرژی از یک سو و لایه‌های مختلف

محاسبات خود را برای شرایط اقلیمی کلان منطقه تکیه نمی‌کنند و داده‌های خرده‌اقلیمی را در مدل‌های عددی و آماری یا شبیه‌سازی وارد می‌نمایند (Yuan et al. 2020; Lee and Jeong 2017). جوان‌رودی و همکاران ضمن ارائه خلأ روش‌شناسانه در ارائه مدل‌های مصرف انرژی شهری، دو مدل داده‌محور را برای کوچک‌مقیاس کردن متغیرهای اقلیمی از مقیاس مزو به مقیاس خرد در مورفولوژی‌های شهری دلخواه، با تمرکز بر شرایط آب و هوایی شدید، پیشنهاد داده‌اند (Javanroodi et al. 2022). علاوه بر آن، نتایج بررسی اثر شاخص‌های یکسان در خرده اقلیم‌های متفاوت یکسان نبوده و همین مهم، اهمیت تکرار پژوهش در زمینه‌های مختلف محلی و مقیاس‌های خرد و رویکرد زمینه‌گرا در پژوهش‌های این حوزه را نیز نشان می‌دهد. در تحلیل شاخص‌های اثرگذار مقیاس میانه و کلان فرم شهری به نظر می‌رسد دستیابی به حد بهینه‌ای از تراکم و فشردگی شهری در مجموع با کاهش تقاضای انرژی همراه باشد. این حد بهینه بسته به زمینه‌های مختلف جغرافیایی و اقلیمی متفاوت و نیازمند پژوهش‌های محلی است. این راهبرد با افزایش نسبت جمعیت و خانوار در سطح، باعث کارایی انرژی شده و ضمن افزایش سایه‌اندازی در بافت، در کنار راهبردهایی مانند مکان‌گزینی مناسب کاربری‌ها، دسترسی‌پذیری و پیاده‌مداری را نیز ارتقاء بخشیده و در مجموع به کاهش مصرف انرژی منجر می‌شود (Rostami, Nasrollahi, and Khodakarami 2024; Sharifi 2019). طبعاً در کنار اتخاذ راهبرد فشردگی بایستی تأمین کافی و مناسب زیرساخت‌ها به خصوص حمل و نقل عمومی و نیز تأمین سرانه و کیفیت فضای سبز و باز شهری نیز مدنظر قرار گیرد. در مقیاس کلان، راهبرد قابل توجه دیگر، توجه به الگوهای توسعه مناسب در بافت شهری است. الگوهای چندمرکزی و چند هسته‌ای، نه تنها در حوزه انرژی بلکه در برابر سایر آسیب‌ها و بحران‌های طبیعی و مصنوع نیز تاب‌آوری بافت را افزایش می‌دهد (Sharifi 2019; Liu, Wang, and Bai 2024). این الگوها چندمرکزی ضمن کاهش اثر جزایر حرارتی شهری، دسترسی‌پذیری را ارتقاء داده و پشتیبان الگوهای پیاده‌مدار و حمل و نقل فعال و عمومی هستند و در مجموع کاهش مصرف انرژی را به همراه دارند. در مورد شبکه شهری، ضریب دید به آسمان و در کل شاخص ارتفاع به عرض معبر، یکی از پرتکرارترین شاخص‌ها در حوزه مصرف انرژی و نیز آسایش حرارتی در بافت شهری است (Du et al. 2025).

در سطح خرد، جهت‌گیری ساختمان‌ها و شکل قطعات تأثیر به‌سزایی بر تقاضای انرژی دارند. مطالعات متعددی (Huang et al. 2024; Rostami, Nasrollahi, and Khodakarami 2024) تأیید کرده‌اند که جهت‌گیری شمالی- جنوبی به دلیل توزیع متعادل تابش خورشیدی، کم‌ترین میزان مصرف کل انرژی را دارد، در حالی که جهت‌گیری شرقی- غربی در اغلب موارد منجر به افزایش بار سرمایشی می‌شود. از سوی دیگر، فرم‌های

تبیین این رابطه و تدوین مدل‌های ارزیابی و پیش‌بینی‌گر در این زمینه را دارند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی و پژوهش‌گران دانشگاهی در تدوین طرح‌های پژوهشی در این زمینه قابل کاربست بوده و در حوزه‌های آموزشی نیز، فهم عمیق‌تر و دقیق‌تری از تبیین رابطه فرم و انرژی تاب‌آوری به‌دست دهد. هم‌چنین چارچوب ارائه‌شده از شاخص‌های اثرگذار فرمی بر انرژی تاب‌آوری می‌تواند در مجامع حرفه‌ای و تصمیم‌گیران و تصمیم‌سازان حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت شهری به منظور تدوین طرح‌های توسعه و یا بازطراحی پهنه‌های موجود شهری و نیز تنظیم ضوابط و مقررات اجرایی مورد کاربست قرار گیرد.

فرم شهر از سوی دیگر و متغیرهای واسطه اقلیمی بسیار ضروری است. موضوع دوم که در ارتباط با نکته اول است آن‌که الگوی اثرگذاری فرم شهر بر مصرف انرژی، الگویی محلی است و پژوهش‌های این حوزه نمی‌توانند در مقیاس‌های وسیع قابل تعمیم باشند؛ به‌خصوص که دانش اقلیمی نیز، اهمیت و تأثیر وجود خرده اقلیم‌ها بر نتایج پژوهش‌های این‌چنین را تأیید می‌نماید. نکته سوم اهمیت کاربست روش‌های جدید به‌خصوص یادگیری ماشین و مدل‌های عددی میان‌رشته‌ای به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و عمیق‌تر در این حوزه است. روش‌های سنتی پاسخ‌گوی تحلیل روابط چندبعدی و ذات پیچیده موضوع در این زمینه نیستند و یافته‌های پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد روش‌های جدید، پتانسیل‌های قابل توجهی در

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران برگرفته از طرح شماره ۴۰۳۱۲۴۸ انجام شده است. نویسندگان مقاله مراتب سپاس خود را از بنیاد ملی علم ایران بابت حمایت از این طرح پژوهشی اعلام می‌دارند.

تعارض منافع

این مقاله فاقد هرگونه تعارض منافع است.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که کلیه اصول اخلاقی انتشار اثر علمی را براساس اصول اخلاقی COPE رعایت کرده‌اند و در صورت احراز هر یک از موارد تخطی از اصول اخلاقی، حتی پس از انتشار مقاله، حق حذف مقاله و پیگیری مورد را به مجله می‌دهند.

درصد مشارکت

نویسندگان اعلام می‌دارند به‌طور مستقیم در مراحل انجام پژوهش و نگارش مقاله مشارکت فعال داشته‌اند.

پی‌نوشت

1. Weather Research and Forecasting
2. Building Energy Parameterization/Building Energy Model
3. Urban Weather Generator
4. Computational Fluid Dynamics
5. Grasshopper
6. Biomorpher
7. Energy Plus
8. S/V
9. HVAC
10. Trade off or Co-Benefits
11. Random Forests
12. Support Vector Machines

فهرست منابع

- Aldieri, Luigi, Andrea Gatto, and Concetto Paolo Vinci. 2021. "Evaluation of energy resilience and adaptation policies: An energy efficiency analysis." *Energy Policy* 157: 112505. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112505>
- Ang, Yu Qian, Zachary Michael Berzolla, and Christoph F. Reinhart. 2020. "From concept to application: A review of use cases in urban building energy modeling." *Applied Energy* 279: 115738. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115738>
- Bansal, Parth, and Steven Jige Quan. 2022. "Relationships between building characteristics, urban form and building energy use in different local climate zone contexts: An empirical study in Seoul." *Energy and Buildings* 272: 112335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112335>
- Basee, Dheah Hameed, and Zina Riadh Abdulla. 2022. "Transformation of urban morphology, vulnerability and resilience: Haifa Street Area, as a case study." *Ain Shams Engineering Journal* 13(4): 101718. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101718>
- Bhavsar, Foram, Utpal Sharma, and Darshi Kapadia. 2024. "Optimizing Environmental Performance in High-Density Residential Neighborhoods: A Generative Approach Using Urban Form attributes and Genetic Algorithms." *International Journal of Environmental Sciences* 10(3): 30-49. DOI: [10.1051/e3sconf/202452903001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452903001)
- Bian, Chenhang, Panpan Hu, Chun Yin Li, Chi Chung Lee, and Xi Chen. 2025. "Balancing Solar Energy, Thermal Comfort, and Emissions: A Data-Driven Urban Morphology Optimization Approach." *Energies* 18(13): 3421. <https://doi.org/10.3390/en18133421>
- Chen, Hung-Chu, Qi Han, and Bauke De Vries. 2020. "Modeling the spatial relation between urban morphology, land surface temperature, and urban energy demand." *Sustainable Cities and Society* 60: 102246. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102246>
- Dab'at, Aseel Abu, and Shireen Alqadi. 2024. "The impact of urban morphology on energy demand of a residential building in a Mediterranean climate." *Energy and Buildings* 325: 114989. DOI: [10.1016/j.enbuild.2024.114989](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114989)
- Dieleman, Hans. 2013. "Organizational learning for resilient cities, through realizing eco-cultural innovations." *Journal of Cleaner Production* 50: 171-180. DOI: [10.1016/j.jclepro.2012.11.027](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.027)
- Du, Liangyu, Hanyuan Wang, Chenhang Bian, and Xi Chen. 2025. "Impact of block form on building energy consumption, urban microclimate and solar potential: A case study of Wuhan, China." *Energy and Buildings* 328: 115224. DOI: [10.1016/j.enbuild.2024.115224](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115224)
- Esfandi, Saeed, Ladan Rahmdel, Farshad Nourian, and Ayyoob Sharifi. 2022. "The role of urban spatial structure in energy resilience: An integrated assessment framework using a hybrid factor analysis and analytic network process model." *Sustainable Cities and Society* 76: 103458. DOI: [10.1016/j.scs.2021.103458](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103458)
- Fletcher, Julie Ann, and Gerald Mills. 2013. "The role of urban form as an energy management parameter." *Energy Policy* 53: 218-228. DOI: [10.1016/j.enpol.2012.10.080](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.080)
- Gatto, Andrea, and Carlo Drago. 2023. "On energy resilience and energy vulnerability measurement." *Environment, Development and Sustainability*: 1-4. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03222-z>
- Hosseini, Mohammad, Silvia Erba, Ahmad Mazaheri, Amin Moazami, and Vahid M. Nik. 2025. "From flexible building to resilient energy communities: A scalable decentralized energy management scheme based on collaborative agents." *Energy and Buildings* 337: 115651. DOI: [10.1016/j.enbuild.2025.115651](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115651)
- Huang, Yanyan, Yi Yang, Hangyi Ren, Lanxin Ye, and Qinhan Liu. 2024. "From Urban Design to Energy Sustainability: How Urban Morphology Influences Photovoltaic System Performance." *Sustainability* 16(16): 7193. <https://doi.org/10.3390/su16167193>
- Javanroodi, Kavan, Vahid M. Nik, Marco G. Giometto, and Jean-Louis Scartezzini. 2022. "Combining computational fluid dynamics and neural networks to characterize microclimate extremes: Learning the complex interactions between meso-climate and urban morphology." *Science of The Total Environment* 829: 154223. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.154223](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154223)
- Javanroodi, Kavan, ATD Perera, Tianzhen Hong, and Vahid M. Nik. 2023. "Designing climate resilient energy systems in complex urban areas considering urban morphology: A technical review." *Advances in Applied Energy* 12: 100155. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100155>
- Ji, Qunfeng, Chuancheng Li, Mehdi Makvandi, and Xilin Zhou. 2022. "Impacts of urban form on integrated energy demands of buildings and transport at the community level: A comparison and analysis from an empirical study." *Sustainable Cities and Society* 79: 103680. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103680>
- Khan, Fouad, and Laszlo Pinter. 2016. "Scaling indicator and planning plane: An indicator and a visual tool for exploring the relationship between urban form, energy efficiency and carbon emissions." *Ecological indicators* 67: 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.046>
- Kostourou, Fani. 2021. "Housing growth: impacts on density, space consumption and urban morphology." *Buildings and Cities* 2(1): 55-78. DOI: [10.5334/bc.75](https://doi.org/10.5334/bc.75)
- Lazarević, Eva Vaništa, Zoran Keković, and Branislav Antić. 2018. "In search of the principles of resilient urban

- design: Implementability of the principles in the case of the cities in Serbia.” *Energy and buildings* 158: 1130-1138. DOI: [10.1016/j.enbuild.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.005)
- Lee, Gunwon, and Yunnam Jeong. 2017. “Impact of urban and building form and microclimate on the energy consumption of buildings-based on statistical analysis.” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 16(3): 565-572. <https://doi.org/10.3130/jaabe.16.565>
 - Leng, Hong, Xi Chen, Yanhong Ma, Nyuk Hien Wong, and Tingzhen Ming. 2020. “Urban morphology and building heating energy consumption: Evidence from Harbin, a severe cold region city.” *Energy and Buildings* 224: 110143. DOI: [10.1016/j.enbuild.2020.110143](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110143)
 - Li, Jianqi, and Chaosu Li. 2024. “Characterizing urban spatial structure through built form typologies: A new framework using clustering ensembles.” *Land Use Policy* 141: 107166. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107166>
 - Li, Jianyi, Yin Zhang, Shuo Yu, Haochen Qin, and Zhen Xu. 2025. “AI-Driven urban planning optimization: A graph neural network and genetic algorithm framework for tackling peak-hour challenges.” *Sustainable Cities and Society*: 106407. DOI: [10.1016/j.scs.2025.106407](https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106407)
 - Li, Xinqing, Lixiao Zhang, Yan Hao, Zhimin Shi, Pengpeng Zhang, Xin Xiong, Yuqin Li, and Zhongming Lu. 2023. “Understanding resilience of urban food-energy-water nexus system: Insights from an ecological network analysis of megacity Beijing.” *Sustainable Cities and Society* 95: 104605. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104605>
 - Liu, Ke, Xiaodong Xu, Ran Zhang, Lingyu Kong, Wei Wang, and Wei Deng. 2023. “Impact of urban form on building energy consumption and solar energy potential: A case study of residential blocks in Jianhu, China.” *Energy and Buildings* 280: 112722. DOI: [10.1016/j.enbuild.2022.112727](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112727)
 - Liu, Qing, Jingyi Wang, and Bowen Bai. 2024. “Unveiling nonlinear effects of built environment attributes on urban heat resilience using interpretable machine learning.” *Urban Climate* 56: 102046. <https://doi.org/10.3390/buildings16112257>
 - Liu, Xingjian, Mingshu Wang, Wei Qiang, Kang Wu, and Xiaomi Wang. 2020. “Urban form, shrinking cities, and residential carbon emissions: Evidence from Chinese city-regions.” *Applied Energy* 261: 114409. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.114409](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114409)
 - Mangan, Suzi Dilara, Gul Koclar Oral, Idil Erdemir Kocagil, and Irem Sozen. 2021. “The impact of urban form on building energy and cost efficiency in temperate-humid zones.” *Journal of Building Engineering* 33: 101626. DOI: [10.1016/j.jobbe.2020.101626](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101626)
 - Marey, Ahmed, Jiwei Zou, Sherif Goubran, Liangzhu Leon Wang, and Abhishek Gaur. 2025. “Urban morphology impacts on urban microclimate using artificial intelligence—a review.” *City and Environment Interactions*: 100221. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2025.100221>
 - Marshall, Stephen, and Olgu Çalışkan. 2011. “A joint framework for urban morphology and design.” *Built environment* 37(4): 409-426. DOI: [10.2148/benv.37.4.409](https://doi.org/10.2148/benv.37.4.409)
 - Mohabat Doost, Danial, Alessandra Buffa, Grazia Brunetta, Stefano Salata, and Guglielmina Mutani. 2020. “Mainstreaming energetic resilience by morphological assessment in ordinary land use planning. The case study of Moncalieri, Turin (Italy).” *Sustainability* 12(11): 4443. <https://doi.org/10.3390/su12114443>
 - Najian, Maede, and Navid Goudarzi. 2025. “Urban Density and Pedestrian Wind Comfort in Hot-Arid Climates: Insights for Climate-Resilient City Planning.” Available at SSRN 5016554. DOI: [10.2139/ssrn.5016554](https://doi.org/10.2139/ssrn.5016554)
 - Natanian, Jonathan, and Thomas Wortmann. 2021. “Simplified evaluation metrics for generative energy-driven urban design: A morphological study of residential blocks in Tel Aviv.” *Energy and Buildings* 240: 110916. DOI: [10.1016/j.enbuild.2021.110916](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110916)
 - Oh, Minseok, and Youngchul Kim. 2019. “Identifying urban geometric types as energy performance patterns.” *Energy for Sustainable Development* 48: 1129-15. <https://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2018.12.002>
 - Okumus, Deniz Erdem, and Mert Akay. 2025. “Quantitative assessment of non-stationary relationship between multi-scale urban morphology and urban heat.” *Building and Environment* 272: 112669. DOI: [10.1016/j.buildenv.2025.112669](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112669)
 - Palusci, Olga, Paolo Monti, Carlo Cecere, Hamid Montazer, and Bert Blocken. 2022. “Impact of morphological parameters on urban ventilation in compact cities: The case of the Tuscolano-Don Bosco district in Rome.” *Science of the Total Environment* 807: 150490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150490>
 - Perera, ATD, Kavan Javanroodi, and Vahid M. Nik. 2021. “Climate resilient interconnected infrastructure: Co-optimization of energy systems and urban morphology.” *Applied Energy* 285: 116430. DOI: [10.1016/j.apenergy.2020.116430](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116430)
 - Ping, Dazhou, Chaosu Li, Xiaojun Yu, Zhengxuan Liu, Ran Tu, and Yuekuan Zhou. 2025. “City-scale information modelling for urban energy resilience with optimal battery energy storages in Hong Kong.” *Applied Energy* 378: 124813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124813>
 - Quan, Steven Jige, and Chaosu Li. 2021. “Urban form and building energy use: A systematic review of measures, mechanisms, and methodologies.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139: 110662. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110662>

- Rachidi, Achraf, and Sanaa Hayani Mounir. 2025. "Investigating the urban heat island effect: Impacts of diverse urban morphologies in semi-arid Marrakesh." *Urban Climate* 61: 102405. DOI:[10.1016/j.uclim.2025.102405](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102405)
- Rezaeirad, Hadi, Faranak Pouramin, and Narges Afzali. 2025. "Measuring the Impact of Urban Morphology on Urban Ambient Temperature Changes." *Journal of Urban Planning and Development* 151(3): 04025027. <https://doi.org/10.1061/JUPDDM.UPENG-52>
- Roštami, Ehsan, Nazanin Nasrollahi, and Jamal Khodakarami. 2024. "A comprehensive study of how urban morphological parameters impact the solar potential, energy consumption and daylight autonomy in canyons and buildings." *Energy and Buildings* 305: 113904. DOI:[10.1016/j.enbuild.2024.113904](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113904)
- Saunders, Michael, Andre Dantas, and Susan Krumdieck. 2006. "Energy reliance, urban form and the associated risk to urban activities." *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice* 15(1): 29-43. <https://www.researchgate.net/publication/29486729>
- Schoeman, C. B. 2016. "International perspectives on transportation and urban form integration." *International Journal of Transport Development and Integration* 1(1): 1-15. DOI:[10.2495/TDI-V1-N1-1-15](https://doi.org/10.2495/TDI-V1-N1-1-15)
- Seelig, Sebastian. 2011. "A master plan for low carbon and resilient housing: The 35 ha area in Hashtgerd New Town, Iran." *Cities* 28(6): 545-556. DOI: [10.1016/J.CITIES.2011.06.001](https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2011.06.001)
- Sharifi, Ayyoob. 2019. "Resilient urban forms: A macro-scale analysis." *Cities* 85: 1-14. DOI:[10.1016/j.cities.2018.11.023](https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.11.023)
- Sharifi, Ayyoob, and Yoshiki Yamagata. 2015. "A conceptual framework for assessment of urban energy resilience." *Energy Procedia* 75: 2904-2909. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.586>
- Sharifi, Ayyoob, and Yoshiki Yamagata. 2015. "Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60: 1654-1677. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.028>
- Shi, Qian, Wensen Luo, Chao Xiao, Julian Wang, Han Zhu, and Xin Chen. 2025. "Investigating urban-scale building thermal resilience under compound heat waves and power outage events based on urban morphology analysis." *Building and Environment* 276: 112747. DOI: [10.1016/j.buildenv.2025.112747](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112747)
- Shoja, Saeedeh, Mohammadreza Pourjafar, and Manouchehr Tabibian. 2019. "Meta-Analysis of the Relationship between Urban Form and Energy: A Review of Approaches, Methods, Scales and Variables." *Urban Planning Knowledge* 3(1): 85-107. <https://doi.org/10.22124/upk.2019.13602.1220>. https://upk.guilan.ac.ir/article_3554_24ceb468e642bfb50515a85c727e0fac.pdf. [in Persian]
- Tümtürk, Onur, Justyna Karakiewicz, and Fjalar J. De Haan. 2024. "Measuring the impact of plot types on physical change: A diachronic analysis of urban form evolution in New York, Melbourne and Barcelona." *Cities* 154: 105380. DOI: [10.1016/j.cities.2024.105380](https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105380)
- Vurro, Giandomenico, Alberto Martilli, Panos Hadjinicolaou, Salvatore Carlucci, Katiana Constantinidou, and Jos Lelieveld. 2025. "Adaptation and Mitigation of Outdoor Heat Stress and Building Energy Consumption During a Heat Wave in Nicosia, Cyprus". DOI:[10.1016/j.uclim.2025.102507](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102507)
- Wang, Wei, Ke Liu, Muxing Zhang, Yuchi Shen, Rui Jing, and Xiaodong Xu. 2021. "From simulation to data-driven approach: A framework of integrating urban morphology to low-energy urban design." *Renewable Energy* 179: 2016-2035. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.024>
- Wang, Yi, Yuguo Li, Yu Xue, Alberto Martilli, Jin Shen, and Pak Wai Chan. 2020. "City-scale morphological influence on diurnal urban air temperature." *Building and Environment* 169: 106527. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106527>
- Xie, Mengju, Minghao Wang, Hua Zhong, Xinxin Li, Baofeng Li, Thushini Mendis, and Shen Xu. 2023. "The impact of urban morphology on the building energy consumption and solar energy generation potential of university dormitory blocks." *Sustainable Cities and Society* 96: 104644. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104644>
- Xing, Xiaoxu, Weihao Shi, Xiwei Wu, Yang Liu, Xiaoxi Wang, and Yaojun Zhang. 2024. "Towards a more compact urban form: A spatial-temporal study on the multi-dimensional compactness index of urban form in China." *Applied Geography* 171: 103368. DOI:[10.1016/j.apgeog.2024.103368](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2024.103368)
- Xu, Shen, Siyao Wang, Gaomei Li, Haizhu Zhou, Chong Meng, Yuchen Qin, and Bao-Jie He. 2024. "Performance-based design of residential blocks for the co-benefits of building energy efficiency and outdoor thermal comfort improvement." *Building and Environment* 264: 111926. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111926>
- Yang, Perry Pei-Ju. 2015. "Energy resilient urban form: a design perspective." *Energy Procedia* 75: 2922-2927. DOI:[10.1016/j.egypro.2015.07.592](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.592)
- Yang, Perry P. J., and Steven J. Quan. 2016. "Urban form and energy resilient strategies: A case study of the Manhattan Grid." In *Urban resilience: A transformative approach*: 153-172. Springer. DOI:[10.1007/978-3-319-39812-9_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39812-9_9)
- You, Youngsoo, and Saehoon Kim. 2018. "Revealing the mechanism of urban morphology affecting residential energy efficiency in Seoul, Korea." *Sustainable cities and society* 43: 176-190. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.019>

- Yuan, Chao, Ayu Sukma Adelia, Shuojun Mei, Wenhui He, Xian-Xiang Li, and Leslie Norford. 2020. "Mitigating intensity of urban heat island by better understanding on urban morphology and anthropogenic heat dispersion." *Building and Environment* 176: 106876. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106876>
- Zhao, Yiman, Xiaotian Ding, Ziyu Wu, Shi Yin, Yifan Fan, and Jian Ge. 2024. "Impact of urban form on building energy consumption in different climate zones of China." *Energy and Buildings* 320: 114579. DOI: [10.1016/j.enbuild.2024.114579](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114579)

نحوه ارجاع به این مقاله روستا، مریم، رزا و کیلی نژاد، و فاطمه نوروزی. ۱۴۰۵. فرم شهر و انرژی تاب آوری؛ مروری نظاممند بر روش‌ها، شاخص‌ها و روندها. نشریه معماری و شهرسازی آرمان‌شهر ۱۹ (۵۴): ۶۹-۸۸. DOI: 10.22034/AAUD.2026.557576.3009 URL: https://www.armanshahrjournal.com/article_246424.html	
COPYRIGHTS Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Armanshahr Architecture & Urban Development Journal. This is an open- access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/	