

مدل‌سازی پیچیدگی فضایی عوامل مؤثر بر وضعیت تراکم ساختمانی و فرم در کلان‌شهر اصفهان

خلیل عسکرپور؛ حسین حاتمی‌نژاد^{۱*}؛ سعید زنگنه شهرکی^۲

۱. دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، گروه جغرافیا، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. استاد، گروه جغرافیای انسانی و برنامه‌ریزی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳. دانشیار گروه جغرافیای انسانی و برنامه‌ریزی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

نسبت سطح زیربنا و فرم کالبدی در کلان‌شهرهای درحال توسعه مانند اصفهان نتیجه تعامل پیچیده متغیرهای کالبدی، کاربری، دسترسی و نهادی است که عملکرد تنظیمی FAR را مخدوش و نابرابری فضایی تولید کرده است. پژوهش پیش رو از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش شناختی، توصیفی - تحلیلی، آمیخته و موردپژوهی است. بازه مورد بررسی، داده‌های ۱۴۰۱_۱۳۹۱ شامل آمار سرشماری، لایه‌های پارسل تراکم و کاربری، طرح‌های شهری و گزارش‌های شهرداری است. قلمروی مطالعه به شبکه‌ای از سلول‌های شش‌ضلعی با اندازه بهینه ۳/۸۸ هکتار تقسیم و ۶۹۵ واحد متریک پرداخته است. ابزارهای مورد تحلیل شامل ArcGIS، Fragstats، EViews، Excel و Google Earth مبتنی بر استخراج ۴ متریک اصلی (FAR، تراکم جمعیت، درصد اشغال، شاخص تنوع عمودی)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تشکیل شاخص ترکیبی CDFI، آزمون خودهمبستگی فضایی، و مدل‌سازی مکانی (SAR/SEM، MGWR) همراه با چارچوب شبیه‌سازی (ABM و EUM/CA) سناریو بوده است. برابر یافته‌ها، دو مؤلفه نخست PCA، ۶۹/۷۴ درصد واریانس متریک‌ها را تبیین کردند. شاخص ترکیبی CDFI با دامنه ۰/۵۰۳ - ۰/۹۰۰ (بالاترین: منطقه ۴ = ۰/۹۰۰؛ پایین‌ترین: منطقه ۱۴ = ۰/۵۰۳)، خودهمبستگی فضایی معنادار (Moran's I: $R^2 \approx 0.91$) و ناهمگنی مکانی قوی بر اثر متغیرهای دسترسی و اختلاط کاربری را نشان داد. نتایج نشان می‌دهد شبکه معابر، دسترسی به حمل‌ونقل و اختلاط کاربری بیشترین سهم را در ساختار تراکم دارند. از این‌رو، FAR باید از چارچوب درآمدزایی شهرداری جدا شده و در قالب سیاست‌های محل‌محور و چندمعیاره مبتنی بر تفکیک نهادی تنظیم‌گری و درآمدزایی، تنوع‌بخشی درآمدهای شهری، هدفمندسازی مشوق‌های تراکمی بر اساس CDFI، حفظ بافت تاریخی و تقویت زیرساخت‌های سبز و حمل‌ونقل عمومی بازتنظیم شود.



COPYRIGHTS

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Askarpour Kh., Hataminezhad H. Zanganeh Shahraki S. Modeling spatial complexity of factors influencing FAR and urban morphological configurations in Isfahan metropolitan. *Urban Economics and Planning* 7(5):82-104.

DOI: [10.22034/uep.2025.550126.1725](https://doi.org/10.22034/uep.2025.550126.1725)

* نویسنده مسئول: hataminajad@ut.ac.ir

کلمات کلیدی

تراکم ساختمانی
فرم کالبدی
متریک فضایی
کلان‌شهر اصفهان
CDFI

نسبت سطح زیربنا (Floor Area Ratio, FAR) به عنوان یکی از شاخص‌های بنیادین برنامه‌ریزی شهری، نقشی کلیدی در تعیین شدت بهره‌برداری از زمین، تراکم ساختمانی و سازمان فضایی شهرها ایفا می‌کند. این شاخص علاوه بر تنظیم ساختار کالبدی شهر، پیامدهای گسترده‌ای در حوزه‌هایی همچون بهره‌وری انرژی، عدالت اجتماعی، ارزش اقتصادی زمین و پایداری محیطی دارد (Cheshmehzangi, 2021: 45; Lu, 2023: 118). در واقع، FAR فقط یک ضابطه فنی یا ابزار کنترلی نیست، بلکه مکانیزمی پیچیده برای مدیریت تعادل میان رشد شهری، کیفیت زندگی و کارایی سیستم‌های شهری محسوب می‌شود (Moon, 2019: 64). با وجود اهمیت بنیادین این شاخص، توزیع فضایی FAR برآیند برهم‌کنش متغیرهای متعددی است؛ از جمله ویژگی‌های محیط ساخته‌شده، شرایط اجتماعی-اقتصادی، دسترسی به زیرساخت‌های حمل‌ونقل و سیاست‌های مقرراتی (Yu, 2024: 37; Gao, 2006: 214). این عوامل نه تنها به صورت مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه در قالب شبکه‌ای درهم‌تنیده، تأثیرات هم‌افزا یا متناقض بر الگوهای تراکم شهری به جا می‌گذارند. به‌ویژه در زمینه کشورهای درحال توسعه، که با پدیده شهرنشینی شتابان، محدودیت‌های داده‌ای و ضعف در کارآمدی نظام‌های نظارتی مواجه‌اند، مدیریت و بهینه‌سازی FAR به چالشی حیاتی و چندبعدی بدل شده است (Shi, 2013: 76; Liu & Shi, 2022: 53). از منظر کاربردی، مسئله اصلی آن است که چگونه می‌توان در بستر شهرهای کشورهای درحال توسعه، با وجود محدودیت منابع و داده‌ها، الگوی تراکم بهینه‌ای را طراحی و مدیریت کرد که هم از منظر اقتصادی و اجتماعی عادلانه باشد و هم از نظر زیست‌محیطی پایدار بماند. چالش‌هایی نظیر گسترش نامتوازن شهرها، تراکم بیش‌ازحد در مراکز شهری، حاشیه‌نشینی و مصرف ناکارآمد انرژی از جمله پیامدهای نبود رویکردی یکپارچه در تنظیم FAR است (Cobbinah et al., 2025, 2025: 64; Huang et al., 2025: 213). از این‌رو، توسعه و به‌کارگیری چارچوب‌های تحلیلی نوین همچون هم‌نهشتی و هم‌پیچیدگی فضایی می‌تواند نه تنها به غنای نظریه‌های برنامه‌ریزی شهری بیفزاید، بلکه ابزاری کارآمد برای سیاست‌گذاران در جهت طراحی راهبردهای توسعه پایدار، کارآمد و متوازن فراهم آورد. روش‌های مدل‌سازی که پیچیدگی عوامل فضایی را به خوبی در برمی‌گیرند؛ حیاتی‌اند. رویکرد (Elastic Urban Morpho-Blocks)، که ترکیبی از اتوماتای سلولی (CA) است، برای شبیه‌سازی مؤثر دینامیک‌های فضایی شهری پیشنهاد شده است. مدل‌های CA به‌خصوص در نمایاندن ذات بالغ‌شونده شکل شهری و پیکربندی‌های ساختمانی، با در نظر گرفتن تأثیر تعاملات محلی و قوانین فضایی، تبحر دارند. این رویکرد بر اهمیت اتخاذ مدل‌هایی تأکید می‌کند که تعاملات پویا و پیچیده میان عوامل مؤثر بر تراکم ساختمانی از یک‌سو و از فرم شهری از سوی دیگر را به خوبی بازنمایی کنند (Ma et al., 2021: 28). یکی از کاستی‌ها و خلأهای مهم در پژوهش‌های پیشین، تمرکز بر روابط خطی و تک‌بعدی

میان FAR و متغیرهای توضیحی است؛ در حالی که شواهد تجربی اخیر نشان داده‌اند این روابط اغلب غیرخطی، ناهمگن و وابسته به مکان هستند (Lu, 2025: 92; Cao, 2025: 141). روش‌های نوین همچون رگرسیون جغرافیایی وزنی چندمقیاسی (MGWR) و چارچوب هم‌نهشتی فضایی (Spatial Co-Embedding) با ادغام داده‌های چندمنبعی و تحلیل روابط مکانی پیچیده، امکان کشف الگوها و تعاملاتی را فراهم می‌آورند که در رویکردهای سنتی مغفول مانده‌اند (Zheng, 2023: 205; Huang, 2022: 77). این رویکردها به‌ویژه در مدل‌سازی انرژی شهری، تحلیل اثرات زیست‌محیطی و طراحی راهبردهای توسعه پایدار، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند (Bahu, 2013: 99; Sun, 2018: 53). کلان‌شهر اصفهان به رغم برخورداری از سابقه تاریخی، ظرفیت‌های اقتصادی و جایگاه فرهنگی ویژه، در دهه‌های اخیر با چالش‌های عمیقی در حوزه مسکن و تراکم ساختمانی مواجه شده است. بخش مسکن به عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد و کالبد شهر، نه تنها کارکرد سکونت، بلکه پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌ای بر حیات شهری دارد (Zangeneh-Shahraki et al., 2023: 202). با این حال، توزیع نامتوازن تراکم ساختمانی، وابستگی شدید درآمد شهرداری به عوارض ناشی از تراکم‌فروشی و رشد غیر اصولی ساخت‌وساز، موجب شده است که مدیریت شهری اصفهان از مسیر توسعه پایدار فاصله بگیرد. افزایش بی‌رویه تراکم ساختمانی در بسیاری از مناطق شهر، بدون توجه به ظرفیت‌های زیست‌محیطی، زیرساختی و حمل‌ونقلی، پیامدهایی همچون تشدید آلودگی، بحران ترافیک، فشار بر خدمات عمومی و تخریب فضاهای سبز و بافت‌های تاریخی را به همراه داشته است. این روند نه تنها عدالت فضایی را تضعیف کرده، بلکه به دوگانگی کالبدی و اجتماعی در سطح شهر (بالاشهر - پایین‌شهر) دامن زده است. از سوی دیگر، ورود نگاه اقتصادی و کوتاه‌مدت به مقوله تراکم و تبدیل آن به ابزاری برای تأمین مالی شهرداری، کارکرد راهبردی FAR به عنوان ابزار تنظیم و هدایت توسعه شهری را به شدت مخدوش کرده است. در این میان، روند فزاینده شهرنشینی، تمرکز صنایع و خدمات در اصفهان و ناتوانی سیاست‌گذاری‌های موجود در پاسخ‌گویی به نیازهای واقعی مسکن، ضرورت بازاندیشی در الگوهای مدیریت تراکم را دوچندان می‌کند. مسئله اصلی آن است که برنامه‌ریزی شهری اصفهان طی دو دهه اخیر، بیش از آنکه بر مفهوم توسعه کیفی و پایدار متمرکز باشد، بر رشد کمی مبتنی بوده است؛ به گونه‌ای که ابزار تراکم، به جای ایفای نقشی تنظیمی، به عامل تشدید نابرابری فضایی، رکود بازار مسکن و تخریب زیست‌پذیری شهری بدل شده است. در چنین زمینه‌ای، پژوهش حاضر با تلفیق مبانی نظری و روش‌شناسی‌های پیشرفته، می‌کوشد تا ابعاد پنهان تعامل میان FAR و متغیرهای محیطی، اجتماعی و اقتصادی را آشکار سازد و پاسخی علمی به چالش‌های اساسی مدیریت تراکم در کلان‌شهرهای درحال توسعه ارائه دهد.



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش

۲. مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲.۱. پیچیدگی فضای FAR و الگوی فرم شهری

نسبت سطح زیربنا یا FAR یکی از شاخص‌های کلیدی در سنجش تراکم ساختمانی است که تأثیر مستقیمی بر الگوی توسعه شهری، کیفیت محیط زندگی، دسترسی به خدمات و پایداری شهری دارد. در ادبیات برنامه‌ریزی شهری، FAR نه تنها ابزاری کالبدی برای سنجش شدت بارگذاری است، بلکه ابزاری سیاستی و اقتصادی نیز محسوب می‌شود که بر قیمت زمین، عدالت فضایی و پویایی‌های بازار مسکن تأثیرگذار است (Bertaud, 2018). در سطح نظری، FAR با سه چارچوب مفهومی اصلی پیوند دارد: ۱) نظریه شهر فشرده (Compact City) که بر تمرکز جمعیت، استفاده کارآمد از زمین و کاهش وابستگی به خودرو تأکید می‌کند (Jenks & Burgess, 2000)؛ ۲) نظریه رشد هوشمند (Compact City) که توسعه درون‌زا، اختلاط کاربری‌ها و تراکم مناسب را از ابزارهای کلیدی دستیابی به شهر پایدار می‌داند (Neuman, 2005)؛ و ۳) نظریه عدالت فضایی (Compact City) که به پیامدهای اجتماعی - اقتصادی تراکم می‌پردازد و نشان می‌دهد سیاست‌های نامتوازن FAR می‌توانند به طرد اجتماعی و شکل‌گیری دوگانگی‌های فضایی منجر شوند (Fainstein, 2014).

از نظر روش‌شناسی، مطالعات اخیر بر ترکیب مدل‌های رگرسیون فضایی، شبیه‌سازی‌های محیطی و تحلیل‌های دسترسی متمرکز بوده‌اند تا پیچیدگی‌های فضای FAR آشکار شود. برای مثال، یافته‌ها نشان می‌دهند افزایش FAR می‌تواند الگوهای تهویه طبیعی و دمای شهری را به طور منفی تحت تأثیر قرار دهد (Huang et al.,

2018; Li et al., 2025)؛ یا به واسطه خودهمبستگی فضایی، اثرات سرریز قوی بر محلات مجاور به جا گذارد (Peng et al., 2021). یکی از چالش‌های اصلی در کشورهای در حال توسعه، تبدیل FAR از ابزاری برنامه‌ریزی به ابزاری درآمدزای شهرداری‌ها است؛ به گونه‌ای که تراکم‌فروشی به جای ابزار تنظیم توسعه شهری، به منبع مالی بدل شده و پیامدهای نامطلوبی چون رشد نامتوازن شهری، افزایش قیمت مسکن و تشدید شکاف اجتماعی را به دنبال داشته است (Cobbinah et al., 2025, 2025; Shatkin, 2017). این مسئله به‌ویژه در شهرهای پرجمعیت آسیا و آفریقا دیده می‌شود که ضعف نهادهای نظارتی و فشار بازار زمین، اعمال سلیقه‌های سیاست‌های FAR را تشدید کرده است. از سوی دیگر، رابطه FAR با شاخص‌های دسترسی و شبکه‌های شهری نیز اهمیت دارد. مطالعات نشان داده‌اند نزدیکی به مترو و شبکه حمل‌ونقل عمومی همبستگی مثبت با FAR دارد و تراکم‌های بالاتر اغلب در این محدوده‌ها متمرکز می‌شوند (Liu, 2023; Lu et al., 2016). همچنین، نسبت سطح اشغال (BCR) و الگوهای مورفولوژیک شهری در تعامل با FAR بوده و بر الگوهای رشد عمودی یا افقی اثر می‌گذارند (Zheng, 2023; Song et al., 2024). به طور کلی، مرور ادبیات نشان می‌دهد FAR رابطه‌های چندبعدی و غیرخطی با محیط زیست شهری (جزایر حرارتی، انتشار کربن) دارد. همچنین، سیاست‌های FAR می‌توانند هم ابزار تقویت توسعه پایدار و عدالت فضایی باشند و هم به ابزاری ناکارآمد برای انباشت سرمایه در بافت‌های شهری بدل شوند، و در نهایت در کشورهای در حال توسعه، چالش اصلی ناکارآمدی نهادی و اولویت‌های درآمدی شهرداری‌ها است که باعث تخریب کیفیت

زندگی و ناپایداری شهری می‌شود. این یافته‌ها ضرورت به کارگیری رویکردهای پیچیدگی فضایی را برای مدل‌سازی و سیاست‌گذاری FAR برجسته می‌سازد؛ چراکه تنها از رهگذر تحلیل چندلایه‌ای (محیطی، اقتصادی، اجتماعی) می‌توان مسیر دستیابی به توسعه شهری متوازن و پایدار را ترسیم کرد. بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد نسبت سطح زیربنا (FAR) در ادبیات جهانی و داخلی همواره به عنوان شاخصی کلیدی در مدیریت تراکم ساختمانی و سازمان فضایی شهرها مطرح بوده است. در شهرهای چین، پژوهش‌هایی همچون ژنگ (۲۰۲۳) و لی (۲۰۲۱) بر اهمیت دسترسی به زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی و فضاهای سبز در شکل‌دهی به توزیع نامگن FAR تأکید کرده‌اند؛ یافته‌هایی که با نتایج پژوهش لیو (۲۰۲۱) در شانگهای همسواست و ارتباط تراکم بالا با تمرکز خدمات عمومی را نشان می‌دهد. در همین راستا، مطالعات گوانگزو (Peng et al., 2021) پیوند میان FAR با نرخ خالی بودن مسکن و ارزش زمین را آشکار ساخته و ضرورت توسعه متوازن برای جلوگیری از گسترش ناموزون شهری را برجسته کرده است. در ارومچی، فن (۲۰۲۳) پیامدهای زیست‌محیطی تراکم بالا را در کاهش جریان هوا و افزایش انتشار کربن برجسته کرد، در حالی که کارن و پارک (۲۰۲۲) در نیپال نشان دادند ابزارهای تشویقی FAR می‌توانند در سکونتگاه‌های غیررسمی بستری برای تأمین مسکن به‌صرفه فراهم کنند. در سطح کلان‌تر، پژوهش‌های چشمه‌زنگی و داویدو (۲۰۲۲) و جونگ و یوون (۲۰۲۱) به ارتباط مستقیم FAR با مصرف انرژی و کیفیت ریزاقلیم اشاره کرده‌اند؛ یافته‌هایی که ضرورت پیوند میان سیاست‌های تراکم و راهبردهای پایداری انرژی را تقویت می‌کند. همچنین، وورم و همکاران (۲۰۲۱) با تکیه بر ادراک شناختی شهروندان، آستانه‌هایی برای شناسایی مراکز شهری بر پایه تراکم ساختمانی پیشنهاد کردند که بُعد ادراکی و اجتماعی سیاست‌گذاری تراکم را برجسته می‌سازد. در سطح ملی، نتایج پژوهش‌های داخلی نیز مؤید چالش‌های مشابه است. نیک‌پور و همکاران (۲۰۲۲) در همدان توزیع خوشه‌ای و نامتوازن تراکم را گزارش کرده‌اند که به تمرکز جمعیت و فعالیت در برخی نواحی و رکود سایر بخش‌ها انجامیده است. محمدپور چابکی و حسن‌پور (۲۰۲۲) در تهران پیامدهای فروش مازاد تراکم را در به هم زدن تعادل فضایی و سوداگری زمین و مسکن نشان داده‌اند، در حالی که حسنی و تابان (۲۰۲۲) در اراک رابطه مستقیم تراکم ساختمانی با افزایش آلودگی هوا را آشکار ساخته‌اند. مطالعاتی همچون بقایی و همکاران (۲۰۲۱) و نورانی و شاه محمدی (۲۰۲۱) نیز بر اهمیت پیوند تراکم با کیفیت محیط داخلی مجتمع‌های مسکونی و طراحی پایدار شهری تأکید دارند. در تبریز، علیزاده و اصغری زمانی و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند وابستگی درآمدی شهرداری‌ها به فروش تراکم، ساخت‌وسازها را از کارکرد تنظیمی خارج کرده و به ابزاری برای تأمین مالی بدل کرده است؛ روندی که لاله‌پور (۲۰۲۱) و خرم‌آباد و مختاری (۲۰۲۱) در تهران نیز آن را در قالب گسترش افقی بی‌رویه و ناکارآمدی اقلیمی گونه‌های پرتراکم تأیید کرده‌اند. از منظر نظری و دانشی، شکاف اصلی بین منابع خارجی و داخلی در این است که ادبیات بین‌المللی به طور سیستماتیک FAR را به عنوان بخشی از یک سامانه شهری پیچیده و تطوری پذیر (Complex adaptive system) می‌نگرد؛ یعنی تراکم، مورفولوژی، دسترسی و کارکردهای اجتماعی - اقتصادی را به عنوان متغیرهایی که هم‌زمان بر هم اثر می‌گذارند، مسیرهای بازخوردی و وابستگی به تاریخچه (Path-dependence) نشان می‌دهند - در حالی که پژوهش‌های داخلی

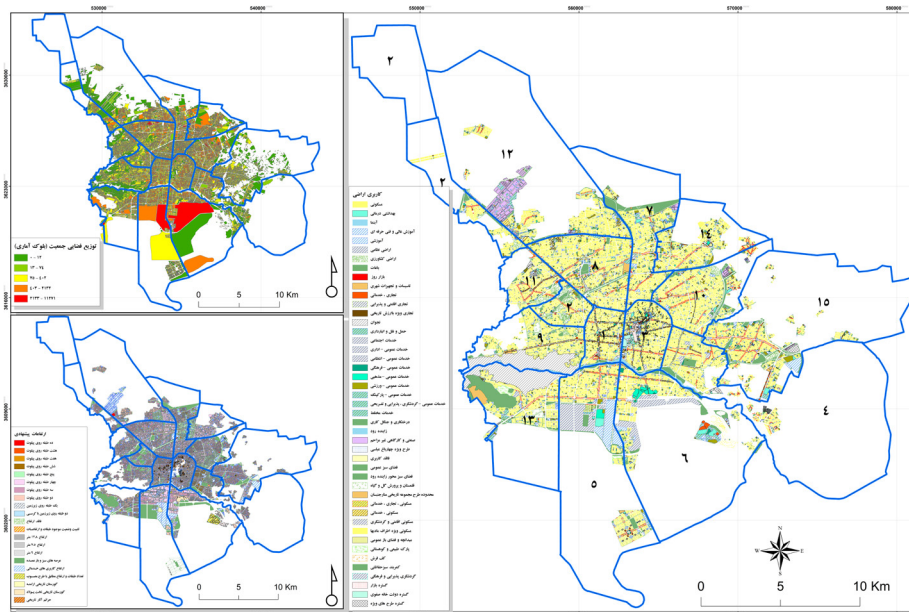
اغلب FAR را به‌مثابه یک متغیر منفرد یا نتیجه تصمیمات مقطعی شهرداری و بازار تحلیل می‌کنند و کمتر به روابط همپوشان، بازخوردی‌های زمانی و سازوکارهای نهادی تولید تراکم پرداخته‌اند؛ این تفاوت نظری باعث شده که پرسش‌های بنیادینی مانند تعامل میان سیاست‌های درآمدزایی شهرداری (تراکم‌فروشی) و نتایج فضایی نابرابر، یا نقش آستانه‌ها و نقطه‌گذارهای غیرخطی در انتقال وضعیت‌های کالبدی، در مطالعات داخلی به‌درستی طرح و آزمون نشوند. از منظر روش‌شناختی، خلأها عمیق‌تر و چندوجهی‌اند: بسیاری از مطالعات داخلی به تحلیل‌های توصیفی یا مدل‌های همبستگی خطی بسنده کرده‌اند و به مشکلات شناخته‌شده‌ای همچون خودهمبستگی فضایی، اثرات سرریز (Spatial spillovers)، تعارض مکانی (Spatial endogeneity)، مسئله واحد مکانی تغییرپذیر (MAUP) و حساسیت مقیاس پاسخ روشن نداده‌اند؛ همچنین کمبود داده‌های زمانی و فقدان رویکردهای چندمقیاسی و چندمنبعی (Multi-scale & POI)، کاداستر، سنجش از دور، داده‌های مالیاتی/پروانه باعث شده که تحلیل‌های پویای فضایی - زمانی و اعتبارسنجی سیاست (Counterfactual policy evaluation) کمتر مورد توجه قرار گیرند. از لحاظ روش‌شناسی پیشرفته نیز، کاربرد تکنیک‌هایی که بتوانند ناهمگنی مکانی و عدم خطیت را هم‌زمان مدل کنند - مانند MGWR، Spatial Durbin/Spatial Panel، Bayesian hierarchical spatial Models (مثلاً INLA)، یا ترکیب سازه‌های رگرسیونی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین تفسیرپذیر (Explainable ML with SHAP) در متون داخلی محدود است؛ همچنین کمتر به مدل‌سازی ترکیبی و شبیه‌سازی (Hybrid modeling) شامل هم‌نهشتی فضایی، اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی مورفولوژی (Elastic Urban Morpho- Blocks)، عامل‌محور (ABM) برای رفتار بازیگران و CFD برای پیامدهای ریزاقلیمی پرداخته شده است. این شکاف‌های نظری و روش‌شناختی دو پیامد کلیدی دارند: اول، نتایج سیاستی که از مطالعات محلی استخراج می‌شود معمولاً عمومی‌سازی‌پذیر یا زمانمند نیست (فاقد اعتبار برون‌نمونه و سازوکارشناسی)؛ دوم، اثرات توزیعی و عدالت‌محور تراکم از منظر گروه‌های اجتماعی مختلف یا فضاهای تاریخی به‌خوبی کمی‌سازی نمی‌شود و بنابراین، سیاست‌ها ممکن است پیامدهای بازدارنده یا معکوس تولید کنند. نوآوری تحقیق حاضر دقیقاً در تمرکز بر پر کردن همین شکاف‌ها قرار دارد: از بعد نظری، پژوهش فراتر از نگاه تک‌محوری به FAR می‌رود و آن را به عنوان یک متن ارتباطی میان ساختار کالبدی، شبکه‌های فضایی و پویایی‌های نهادی تبیین می‌کند، به طوری که بازخوردی‌های زمانی، مسیرهای وابستگی و پیامدهای توزیعی به عنوان مؤلفه‌های محوری تفسیر می‌شوند؛ از منظر روش‌شناسی، تحقیق از یک چارچوب ترکیبی استفاده می‌کند که سه سطح مکمل را پوشش می‌دهد: (۱) تحلیل اقتصادسنجی فضایی قوی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی با داده‌های فضایی، زمانی و مکانی (Spatial Durbin/Spatial Panel) و ابزارهای کنترلی برای درون‌زایی (IV's & spatial instruments) به منظور استخراج اثرات سبب‌و‌سبب‌وند و سرریز؛ (۲) مدل‌سازی ناهمگنی محلی با MGWR و تکنیک‌های هم‌جاگذاری مشترک (Co-Embedding) برای فشرده‌سازی و هم‌جاسازی نمایه‌های مورفولوژیک و اجتماعی؛ و (۳) شبیه‌سازی و سناریوسازی با ترکیب EUM/CA و ABM و ادغام CFD برای برآورد پیامدهای توسعه فرم یا الگوی کالبدی شهر. نتیجه این ترکیب نظری و روش‌شناختی سه خروجی عملی و علمی تولید می‌کند که درجه نوآوری را مشخص می‌سازد:

اول، ارائه یک نظریه میان‌رشته‌ای که FAR را هم‌زمان به عنوان محرک کالبدی، نتیجه ساختارهای نهادی و عامل توزیع‌کننده آثار زیست‌محیطی/اجتماعی تبیین می‌کند؛ دوم، توسعه یک چارچوب تحلیلی - شبیه‌سازی قابل تعمیم و بازتولید (Reproducible pipeline) که می‌تواند آستانه‌های بهینه FAR، نقاط شکست غیرخطی و پیامدهای توزیعی را کمی کند؛ سوم، ارائه ابزارهایی برای سیاست‌گذاران که نه فقط تأثیر میانگین را نشان می‌دهد، بلکه توزیع مکانی - اجتماعی آثار را نیز آشکار می‌سازد و به طراحی سیاست‌های متوازن (مثلاً تنظیم اعتبارات، مشوق‌های هدفمند، جایگزین‌های درآمدی برای شهرداری) منجر می‌شود. در مجموع، تحقیق حاضر هم شکاف نظری نگاه خطی و تک‌متغیره را پر می‌کند و هم کمبود روش‌شناختی مدل‌های چندمنبعی، غیرخطی، و تشریح‌پذیر را با یک رویکرد ترکیبی و سیاست‌محور جبران می‌سازد؛ امتیاز علمی آن در ترکیب استدلال علی مکانی، اعتبارسنجی شبه‌تجربی و شبیه‌سازی سناریو است که به طور مستقیم قابلیت تبدیل شدن به راهنمای عمل برای مدیریت تراکم در کلان‌شهرهای کشورهای در حال توسعه را دارد.

۳. محدوده مورد مطالعه

شهر تاریخی اصفهان، سومین کلان‌شهر پرجمعیت ایران، مرکز استان اصفهان، با وسعتی حدود ۴۸۲ کیلومتر مربع، در مرکز فلات ایران است. از نظر موقعیت جغرافیایی در ۵۱ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی در زاینده‌رود و کوه‌های زاگرس (صفه) قرار دارد. شهر اصفهان در دشتی نسبتاً هموار با شیب حدود ۲ درصد و به سمت شمال شرقی بنا شده و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۸۰ متر است (Dehqani, 2019:124). اقلیم اصفهان معتدل و چهار فصل آن منظم است. این شهر در چهار راه شمال، جنوب، شرق و غرب کشور واقع شده و طی تاریخ محل رفت و آمد و ملاقات اقوام و فرهنگ‌های مختلف بوده است. علت وجود و پیدایش این شهر را باید به آب‌هایی نسبت داد که از کوه‌های مرتفع

زاگرس به نام زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و زاینده‌رود را به وجود آورده است. توسعه شهر طی قرون متمادی به سمت جنوب غربی بوده است، زیرا در این منطقه آب بیشتر و آلودگی کمتری وجود داشته است. بر اساس آخرین سرشماری رسمی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۵، جمعیت شهر اصفهان یک میلیون و ۹۶۱ هزار و ۲۶۰ نفر بوده است (Isfahan Provincial Governor's Office, 2022). این شهر در حال حاضر ۱۵ منطقه شهرداری دارد. با توجه به ساختار صنعتی - خدماتی، وضعیت امکانات فرهنگی این کلان‌شهر نسبتاً مطلوب است. با وجود امکانات فراوان، نکته حائز اهمیت، توزیع نامتناسب خدمات و زیرساخت‌ها است که به طور عادلانه در بین مناطق مختلف شهر اصفهان توزیع نشده است. اساس آخرین مستندات سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ شهر اصفهان ۱۵ منطقه شهرداری و ۱۹۸ محله دارد. عوامل تأثیرگذاری مانند توپوگرافی رشته‌کوه‌های زاگرس و شانه‌های موازی این شهر در توسعه شهر دخیل هستند. عوارض طبیعی از قبیل امتداد غربی - شرقی رودخانه زاینده‌رود و ارتفاعات اطراف شهر مانند کوه صفه با ارتفاع ۲۲۳۲ متر به عنوان عوارض طبیعی درون‌شهری قابل اشاره هستند. جهات توسعه شهر متأثر از این عوامل و از جنوب به شمال بوده و اساس شکل‌گیری محلات اولیه مسائل فرهنگی و اجتماعی جامعه است. محلات شکل گرفته پس از دهه ۱۳۴۰ به بعد و پس از تهیه طرح‌های شهری، تقسیمات کالبدی و فضایی پیش‌بینی شده در این طرح‌ها و متأثر از عواملی مانند معیار اصلی، مراکز خدمات، حدود محلات و عوارض طبیعی بوده است. جدول ۱ مشخصات جمعیتی و کالبدی مناطق شهرداری کلان‌شهر اصفهان در سال ۱۳۹۵ را نشان داده است. جمعیت شهر اصفهان از حدود ۲۸۷ هزار نفر در سال ۱۳۳۵ به حدود ۲ میلیون نفر در سال ۱۳۹۵ رسیده که طی ۵۵ سال، نزدیک به ۸ برابر افزایش را نشان می‌دهد. میزان رشد جمعیت شهر در دهه‌های ۱۳۳۰ - ۱۳۴۰ در بالاترین حد خود بوده و حدود دو دهه است که تقریباً در ۲/۵ درصد محدود شده است.



شکل ۲. تقسیمات مناطق شهرداری اصفهان، کاربری اراضی، توزیع فضایی جمعیت به همراه طبقات کاربری ۱۴۰۴

جدول ۱. مشخصات جمعیتی و کالبدی مناطق شهرداری کلان‌شهر اصفهان در سال ۱۳۹۵، منبع: (Isfahan Provincial Governor's Office, 2022)

مناطق شهرداری	جمعیت	مساحت (هکتار)	نرخ رشد (درصد) ۹۰ - ۹۵
۱	۷۹۰۹۱	۸۱۰	۰.۳
۲	۶۹۱۲۰	۲,۱۴۵	۱.۳
۳	۱۱۰,۳۶۸	۱۱۴۸	۰.۱
۴	۱۳۳,۷۳۱	۱۳۳,۷۳۱	۱.۲
۵	۱۵۰,۸۶۵	۱۷۰۲	-۱.۶
۶	۱۱۲,۱۲۹	۶,۶۰۰	۰.۱
۷	۱۶۸,۷۳۲	۱,۳۵۷	۲.۶
۸	۲۳۹,۷۵۶	۲,۰۳۹	۰.۲
۹	۷۵,۱۶۸	۱۰۵۴	۰.۵
۱۰	۲۰۷,۸۰۳	۲۲۰۰	-۰.۴
۱۱	۵۸۸,۴۱	۱۱۴۰	-۰.۱
۱۲	۱۳۶,۳۷۶	۱۶۰۸	۱.۶
۱۳	۱۳۲,۴۶۹	۲,۰۱۰	۲.۳
۱۴	۱۶۴,۸۵۰	۹۴۰	-۰.۳
۱۵	۱۲۱,۹۶۱	۱,۶۶۴	۱.۶
جمع	۱,۹۶۱,۲۶۰	۱۴,۶۳۸,۷۷۶	۰.۵

شهر واقع شده و علت عمده گرانی قیمت زمین در این منطقه، وجود بازار و مراکز تجاری است. متوسط نرخ رشد تقریباً ۳۵ درصد بوده است که بیشترین نرخ رشد مربوط به مناطق ۵ و ۶ با ۸۱ درصد و مناطق ۱، ۳ و ۴ با ۷۷ درصد بوده است. در شرایط موجود که درآمد شهرداری اصفهان با نوسان‌های خاصی همراه است و بخش قابل ملاحظه‌ای از منبع درآمدی شهرداری‌های مناطق ۱۵ گانه برای تأمین هزینه‌های شهری متکی بر عوارض و تراکم‌های ساختمانی و اراضی است. این اتکالی بیش از حد به عواید ناشی از بخش مسکن و همچنین، وجود نرخ‌های نامتناسب تراکم و عوارض شهرداری در بخش مسکن، باعث تشدید قیمت‌ها و تسری آن به قیمت سایر کالاها می‌شود و تقاضای ساخت‌وساز و خرید و فروش را با رکود مواجه می‌سازد. رونق یا رکود در فعالیت‌های بخش مسکن نیز شهرداری اصفهان را در مقاطع زمانی مختلف با مشکلات و بحران‌های مالی قطعی مواجه می‌سازد. رکود در فعالیت‌های ساختمانی و خرید و فروش مسکن، شهرداری‌های مناطق را که بخش عمده درآمد آن‌ها فقط از این نوع عوارض تأمین می‌شود، با مشکلات مالی فراوان روبه‌رو می‌کند تا جایی که امکان تأمین درآمد یا جبران کاهش درآمد از سایر منابع در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نیست و برای جبران این مسئله تراکم‌فروشی به معضلی قانونی بدل می‌شود.

شهر اصفهان ۲۲۳/۳۴ کیلومتر مربع (حریم شهر ۱۰۰۵/۶۷ کیلومتر مربع) وسعت دارد و بر همین اساس، سومین شهر بزرگ ایران (به لحاظ مساحت) پس از تهران و مشهد محسوب می‌شود، به طوری که جمعیت این شهر از ۲۵۴۷۰۸ در سال ۱۳۳۵، در سال ۱۳۹۵ خورشیدی حدود ۱۹۶۱۲۶۰ نفر (حریم شهر نزدیک به ۳ میلیون نفر) بوده و اخیراً به بیش از ۲۱۲۳۶۵۷ نفر رسیده است که در صورت ادامه توسعه افقی این کلان‌شهر تا ۱۰ سال آینده ناگزیر باید بیش از مساحت موجود شهر به کاربری‌های مسکونی اختصاص پیدا کند که نتیجه این گسترش کالبدی، تبدیل شدن مزارع، باغستان‌ها و مراکز زیستی اطراف به محل‌های مسکونی، خدماتی، صنعتی و نظایر آن‌هاست. وجود معضلات بی‌شماری همچون بدمسکنی و پایین بودن کیفیت مسکن در سطح وسیعی از شهر اصفهان، فقدان مالکیت مسکن برای سهم قابل توجهی از خانوارهای شهری و نیز ضعف در تخصیص عادلانه اعتبارات دولتی بخش مسکن در مناطق مختلف شهر اصفهان از چالش‌های اصلی به شمار می‌روند. مطابق آمار یک دهه اخیر، قیمت متوسط یک مترمربع زمین در مناطق مختلف شهر اصفهان متفاوت است. بالاترین نرخ زمین مسکونی در شهر اصفهان در مناطق ۶ و ۵ قرار دارد که این دو منطقه در جنوب شهر اصفهان واقع شده‌اند. بعد از این دو منطقه، زمین مسکونی در منطقه ۳ دارای گران‌ترین قیمت است که در بافت قدیمی و تاریخی



شکل ۳. الف) سیمای کالبدی بخشی از بافت شهر اصفهان در حاشیه زاینده رود؛ ب) نمایی از خط آسمان در شهر اصفهان و برج‌های دور دست؛ ج) برج‌های مسکونی ۴۰۰ واحدی آفتاب در خیابان برازنده اصفهان؛ د) برج‌های مسکونی سپهر

۴. مواد و روش‌ها

اگرچه در گذشته سنج‌های فضایی عمدتاً تحت عنوان «معیارهای سیمای سرزمین» برای کمی‌سازی شکل و الگوی پوشش گیاهی در محیط‌های طبیعی به کار می‌رفتند، امروزه تحلیل ساختارها و آرایش‌های فضایی به عنوان بخش جدایی‌ناپذیر از برنامه‌ریزی شهری محسوب می‌شود. مفاهیم کلانی همچون مکان، فاصله، جهت، پیوند و الگو، به عنوان مبانی نظری تحلیل‌های فضایی در شهرسازی مطرح بوده‌اند. در این پژوهش، با اتکا به مرور نظام‌مند پیشینه نظری و تجربی، مهم‌ترین ضعف موجود در زمینه مدل‌سازی فرم و تراکم شهری را می‌توان در حوزه روش‌شناسی ردیابی کرد. به طور خاص، تکیه بر روش‌های یکسان و گاه نامناسب، استفاده از داده‌های غیرقابل اتکا و شاخص‌های ساخته‌شده فاقد پایه علمی مستحکم، به تقلیل‌گرایی، شتاب‌زدگی و در نهایت، درکی نادرست از پیچیدگی‌های الگوهای فضایی منجر شده است. در پاسخ به این خلأ روش‌شناختی، این پژوهش برای نخستین بار استفاده از «واحدهای پایه فضایی» را به عنوان حلقه واسط و بنیانی برای برنامه‌ریزی و تحلیل‌های فضای شهری پیشنهاد می‌شود. انتخاب مقیاس و نوع این واحدهای پایه (سنجه‌ها یا متریک‌ها) تابعی از سه اصل وسعت محدوده مطالعه، اهداف پژوهش و ماهیت داده‌های در دسترس است. با این حال، به دلایل سه‌گانه دقت (Accuracy)، قابلیت پیوند (Linkability) و قابلیت اشتراک‌گذاری (Shareability) کاربست این رویکرد دارای مزیت‌های بارزی است. از طریق الحاق (Join) لایه‌های اطلاعاتی در سطوح مختلف فضایی از مقیاس‌های خرد همچون قطعات ملکی (پارسل) و بلوک‌های ساختمانی تا مقیاس‌های کلان‌تر مانند کاربری اراضی امکان ردیابی و

ارتباط‌سنجی وضعیت تراکم و فرم شهری از سطح واحد مسکونی تا محله، ناحیه و کل منطقه شهری فراهم می‌شود. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش، تحلیلی - توصیفی با رویکرد کمی است. به منظور مدل‌سازی پیچیدگی فضایی عوامل مؤثر بر تراکم ساختمانی و فرم شهری در کلان‌شهر اصفهان، در گام نخست، شاخص‌های کالبدی - فضایی مؤثر بر اساس آمار و اطلاعات اسنادی معتبر شامل داده‌های سرشماری، بلوک آماری، داده‌های مطالعات طرح تفصیلی و جامع و سایر اسناد فرادست و همچنین، گزارش‌های سالانه و فصلی شهرداری اصفهان در یک بازه ده‌ساله (۱۳۹۱-۱۴۰۱) استخراج و مورد تحلیل قرار گرفتند. پس از عملیاتی‌سازی و کمی‌سازی این شاخص‌ها، به منظور ارزیابی الگوهای فضایی، نقشه صحیحی از متریک‌های فضایی مرتبط با ساختار کالبدی شهر اصفهان تهیه و دقت آن اعتبارسنجی شد. در ادامه، پس از تعیین واحد پایه تحلیل (شبکه‌ای از سلول‌های شش‌ضلعی) و بررسی خودهمبستگی فضایی، داده‌های کمی هر یک از شاخص‌ها به این واحدهای پایه فضایی اختصاص یافتند. با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی، مقادیر نهایی برای هر سلول محاسبه و در نهایت، متریک نهایی ترکیبی از شاخص‌های تأثیرگذار بر تراکم و فرم شهری تولید شد. در این فرایند، از نرم‌افزارهای تخصصی از جمله Arc GIS برای تحلیل‌های فضایی و ترسیم نقشه‌ها، Fragstats برای محاسبه برخی از متریک‌های پیشرفته فضایی، Eviews برای تحلیل‌های آمار فضایی، Excel برای سازماندهی داده‌ها و Google Earth برای استخراج اولیه اطلاعات کنترل صحت مکانی استفاده شده است.

جدول ۲. مؤلفه‌ها، شاخص‌ها و متغیرهای عملیاتی پژوهش برای مدل‌سازی وضعیت تراکم ساختمانی و فرم مناطق ۱۵گانه اصفهان

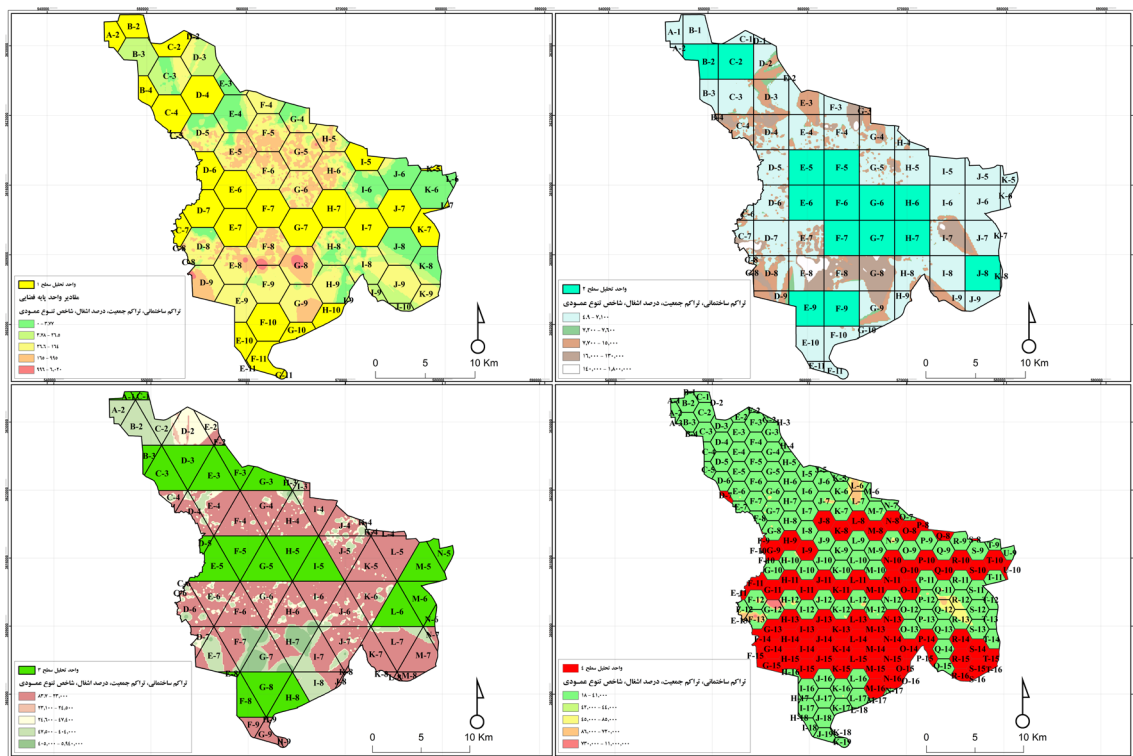
مؤلفه بُعد	شاخص عملیاتی	گویه/متغیرهای اندازه‌گیری	فرمول‌ها و روش‌های محاسبه دقیق	مأخذ
تراکم و اشغال کلیدی	تراکم ساختمانی نسبت سطح زیربنا به مساحت قطعه (FAR) تراکم ناخالص جمعیت (نفر/هکتار) درصد سطح اشغال (Ratio)	$FAR = \sum(GFA_i) / Plot_Area$ $Population_Density = Population_Count / Area_hectares$ $Coverage\ Ratio: CR = \sum(Building_Footprints) / Total_Plot_Area \times 100$	FAR و شاخص‌های تراکمی مشابه از مبانی استاندارد برنامه‌ریزی شهری هستند؛ به عنوان مثال انجل و همکاران (۲۰۲۱) «آنانومی تراکم شهری» را با عوامل سازنده تراکم ارائه کرده‌اند.	Angel et al. (2021)
	اشغال‌گذاری عمودی میانگین تعداد طبقات (Mean_Floors) ضریب تغییرات ارتفاع ساختمان‌ها (CV_Height) شاخص تنوع عمودی (Diversity Index)	$Mean_Floors = \sum(Floors_i) / n$ $CV_Height = \sigma(Height) / \mu(Height)$ $VDI = -\sum[(h_i/H_total) \times \ln(h_i/H_total)]$	شاخص‌های مرتبط با ارتفاع ساختمان (مانند میانگین طبقات) در مطالعات شهرسازی برای نشان دادن تراکم عمودی مورد استفاده‌اند. (برای نمونه، انجل و همکاران ضریب اشغال طبقات را در کنار FAR جهت تبیین تراکم بررسی کرده‌اند).	
کاربری و اختلاط	شاخص آنترپوی (Entropy Index) شاخص تنوع مبتنی بر فاصله (Distance-based Diversity) شاخص هرفیندال (HHI)	$Entropy: SH = -\sum p_i \ln(p_i) / \ln(k)$, $p_i = Area_i / Total_Area$ $DBI: DBI = \sum_j w(d_{ij}) \times Diversity_j$, $w(d_{ij}) = \exp(-d_{ij}) / \sigma$ $HHI: HHI = \sum (p_i)^2$	شاخص آنترپوی و هرفیندال - هیرشمن از روش‌های رایج در سنجش اختلاط کاربری است. به عنوان مثال، جیو و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کرده‌اند که این شاخص‌ها در مطالعات آمیختگی کاربری متداول‌اند و فرمول‌های مربوطه را توضیح داده‌اند.	Jiao et al. (2021)
	دسترسی به خدمات (عمومی) میانگین فاصله تا نزدیک‌ترین خدمت (متر) تعداد خدمات در شعاع ۵۰۰ متر امتیاز دسترسی (SFCA2)	فاصله شبکه‌ای: $Dist_{min} = \min(NetworkDist(i,j))$ شمارش خدمات: $Count_{500m} = \sum(Services_j \text{ in radius}(500m))$ SFCA2: روش دو گام شناسایی (SFCA) با توزیع عرضه و تقاضا در محدوده فاصله (فرمول عمومی در منبع مربوطه)	دسترسی به خدمات اغلب با ترکیبی از فاصله تا ایستگاه/خدمت و روش SFCA2 سنجیده می‌شود. مثلاً تائو و همکاران (۲۰۲۰) روش SFCA2 سلسله‌مراتبی را معرفی کرده‌اند؛ همچنین معیارهای ساده‌تر مانند میانگین فاصله یا تعداد در شعاع معین، در مطالعات دسترسی به خدمات به کار می‌روند.	Tao et al. (2020)
شبکه معیار و اتصال	پیوستگی شبکه تراکم تقاطع‌ها (تقاطع‌ها / km ²) درصد تقاطع‌های چندوجهی شاخص پیوستگی (Connectivity Index)	$Intersection_Density = N_{intersections} / Area_{km^2}$ %چندراه-راه: $N_{multi-legged} / N_{total} \times 100$ Connectivity: α, β یا ترکیبی دیگر (هر نوع مدل اتصال شبکه)	تراکم تقاطع خیابان به عنوان معیار سنجش اتصال شبکه، در مطالعات برنامه‌ریزی ترافیک و طراحی شهری کاربرد دارد. در منابع رسمی برنامه‌ریزی (مانند بانک اطلاعات EPA) تراکم تقاطع به عنوان معیار شبکه قابل استخراج ذکر شده است.	EPA (2021)
	دسترسی به حمل‌ونقل عمومی فاصله تا نزدیک‌ترین ایستگاه مترو/ BRT تعداد خطوط در شعاع ۵۰۰ متر شاخص فرکانس سرویس‌دهی	فاصله شبکه‌ای: $Transit_Access = \min(NetworkDist(i, station_j))$ تعداد خطوط: $Lines_{500m} = \text{Count}(transit_lines \text{ within } 500m)$ Service freq: مجموع حرکت‌ها در بازه زمانی معین (فرمول ناوگان)	برای سنجش دسترسی حمل‌ونقل عمومی معمولاً از معیارهایی مانند کمترین فاصله شبکه‌ای یا تعداد ایستگاه/خط در محدوده معینی استفاده می‌شود. همچنین EPA شاخص‌هایی برای تراکم خدمات ترانزیت (فرکانس سرویس) معرفی کرده است.	
بافت و ریخت‌سناسی	ریزمقیاس بودن بافت مساحت متوسط قطعات (m ²) تراکم بلوک (بلوک / km ²) شاخص دانه‌بندی (ضریب تغییرات مساحت قطعات)	$Mean_Parcel = \sum(Area_i) / n$ $Block_Density = N_{blocks} / Area_{km^2}$ $Grain\ Index = \sigma(parcel_areas) / \mu(parcel_areas)$	«دانه‌بندی شهری» به معنای الگوی ریز یا درشت قطعات است که از معیارهایی مانند واریانس مساحت قطعات یا تراکم بلوک استفاده می‌شود. مطالعات بافت شهری نشان داده‌اند محله‌های ریزدانه ارتباط بیشتری با فعالیت‌های پیاده دارند.	Lam et al. (2024)
	تراکم‌پذیری و نفوذپذیری درصد سطح نفوذناپذیر (ISA%) تراکم شبکه معیار محلی شاخص نفوذپذیری پیاده‌روی	$ISA\% = (\text{Built_area} + Roads_area) / Total_area \times 100$ $Local_Density = Length_local_roads / Area_{hectare}$ $Walkability = Pedestrian_network_length / Area$	درصد مساحت نفوذناپذیر (سطح آسفالت و بنا) معمولاً از تصاویر ماهواره‌ای با شاخص‌های پوشش (مانند NDBI یا ISA) استنتاج می‌شود. همچنین، طول شبکه پیاده‌رو و خیابان‌های فرعی محلی معیارهای نفوذپذیری شهری در مطالعات پیاده‌روی است.	

مؤلفه/بُعد	شاخص عملیاتی	گروه/متغیرهای اندازه‌گیری	فرمول‌ها و روش‌های محاسبه دقیق	مأخذ
تاب‌آوری حرارتی شاخص سطوح نفوذناپذیر (ISA) تراکم پوشش گیاهی (NDVI) دمای سطح زمین (LST) انحراف LST نسبت به میانگین	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$ $LST \text{ (Landsat8)}: \$LST = BT - 273.15$ $BT = K2 / \ln(K1/ML + 1)$ $LST_anomaly = \$LST_{\{local\}} - LST_{\{regional_mean\}}$	شاخص ISA از نقشه‌های کاربری و پوشش زمینی قابل محاسبه است. شاخص NDVI استاندارد و تعریف‌شده در داده‌های Landsat است. دمای سطح زمین از داده‌های حرارتی ماهواره با معادلات شناخته‌شده استخراج می‌شود (USGS ارائه داده‌های NDVI و LST را توضیح داده است).	U.S. Geological Survey (2024)	مأخذ
فرم تاریخی درصد بافت‌های ارزشمند تاریخی تراکم کاربری‌های فرهنگی/مذهبی شاخص انسجام بافت	$Historic\% = \$Historic_area / Total_area \times 100$ $Cultural_Density = \$N_{\{cultural_POIs\}} / Area_{\{km^2\}}$ $Connectivity \text{ (انسجام)} = \text{مثال: نسبت لینک‌های متصل در شبکه}$	حفظ و احیای بافت‌های تاریخی معمولاً با معیارهایی مانند سهم مساحت بافت تاریخی یا چگالی کاربری‌های فرهنگی بررسی می‌شود. مطالعات اخیر به نقش فرم تاریخی در ارزش اجتماعی توجه کرده‌اند (برای نمونه، در چین و اروپا بررسی شده).	Zhang et al. (2024)	میراث و هویت شهری
فرسودگی بافت درصد سطوح فرسوده شاخص سن ساختمان‌ها متوسط وضعیت فیزیکی بناها	$Deterioration\% = \$Deteriorated_area / Total_area \times 100$ $Age_Index = \$\sum (Current_year - Construction_year) / n$ $Physical_Condition = \$\sum (Condition_scores) / n$	فرسودگی شهری اغلب با داده‌های بازرسی محلی یا دیداری تخمین زده می‌شود. شاخص سن ساختمان و وضعیت ساختاری نیز در پژوهش‌های شهرسازی برای برآورد کیفیت بافت استفاده شده‌اند.	Zhang et al. (2021)	تحلیل فضایی و مدل‌سازی
همبستگی فضایی ضریب موران جهانی (Moran's I) شاخص‌های LISA محلی آزمون Getis-Ord Gi*	$Global \text{ Moran's } I: \$I = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})^2}$ $Local \text{ LISA}: \$I_i = (x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) / \sigma^2$ $Getis-Ord \text{ } G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_j w_{ij}}$	شاخص موران و آزمون‌های LISA از روش‌های استاندارد سنجش خودهمبستگی فضایی هستند. منابع تخصصی آمار فضایی فرمول‌های یادشده را شرح داده‌اند (برای مثال آنسلین ۱۹۹۵ و آرایه‌های بعدی).	Fotheringham & Li (2023); Fotheringham et al., (2023)	تحلیل فضایی و مدل‌سازی
مدل‌سازی رگرسیونی رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) - MGWR مدل‌های خودهمبستگی فضایی (SAR/SEM)	$GWR: \$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{\{ik\}} + \epsilon_i$ $MGWR: \$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, bw_k) x_{\{ik\}} + \epsilon_i$ $SAR: \$y = \rho W y + X \beta + \epsilon$	مدل‌های محلی‌ساز چندمقیاسی (MGWR) نسل جدیدی از GWR است که هر متغیر ضریبی با مقیاس مکانی متفاوت دارد. این روش‌ها در مطالعات فضایی معاصر برای مدل‌سازی عدم‌پایستگی استفاده می‌شوند (فوترینگهام و اوشن، ۲۰۲۳).		

۵. یافته‌های تحقیق

نسبت سطح زیربنا به مساحت قطعه (FAR)، تراکم ناخالص جمعیت، درصد سطح اشغال و شاخص تنوع عمودی» که ویژگی‌های متمایزی از ساختار کالبدی شهر را نمایندگی می‌کنند، انتخاب شدند. با تلفیق داده‌های میدانی و نقشه‌های پارس‌بندی شهر (مطابق لایه وضع موجود کاربری اراضی)، واحدهای hexagonal با مساحت‌های ۳، ۵ و ۷ هکتار در محیط ArcGIS ایجاد و تحلیل‌های فضایی روی آن‌ها انجام شد. پس از محاسبه متریک‌های منتخب در هر واحد، منحنی‌های تغییرات هر متریک بر اساس مساحت پهنه‌ها رسم و تحلیل شد. پهنه‌هایی که در منحنی هر متریک بالاترین میزان همبستگی را نشان دادند، به عنوان واحدهای با الگوی فضایی پایدار در نظر گرفته شده و برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شدند. در نهایت، برای کلان‌شهر اصفهان، چهار متریک منتخب در ۱۵ پهنه - منطقه (واحد نمونه‌برداری) محاسبه و پس از انجام تحلیل‌های فضایی در سطح کلاس، مقادیر خروجی در قالب فایل‌های متنی (txt) و Excel ذخیره و به عنوان داده‌های ورودی برای مراحل بعدی مدل‌سازی در نرم‌افزار Fragstats آماده شدند.

انتخاب محدوده مورد مطالعه و ادغام مجموعه داده‌های متنوع برای مدل‌سازی دقیق هم‌نهستی فضایی عوامل مؤثر بر FAR حیاتی است. این پژوهش بر نواحی شهری با تغییرات چشمگیر در FAR، تراکم جمعیت و الگوهای کاربری زمین تمرکز دارد، چرا که این عوامل برای درک ناهمگونی فضایی ضروری‌اند. به منظور ارزیابی الگوهای فضایی تراکم ساختمانی (مرتبط با سطح موقعیت منحصر به فرد هر متریک) و فرم شهری و مدلسازی پیچیدگی عوامل مؤثر در کلان‌شهر اصفهان، محدوده مورد مطالعه به شبکه‌ای از واحدهای شش‌ضلعی (Hexagonal)، سه‌ضلعی (Triangle) و مربعی (Square) با ابعاد مشخص تقسیم شد و محاسبات متریک‌های فضایی مربوطه در این واحدها انجام گرفت. در گام اول مدل‌سازی، برای تعیین مناسب‌ترین مقیاس و مجموعه متریک‌های فضایی، روشی مبتنی بر انتخاب متریک‌هایی با کمترین همبستگی فضایی و قابلیت نمایش (Google Earth) ابعاد مختلف تراکم و فرم ساختمانی به کار گرفته شد. بر این اساس، چهار متریک «مثلاً:



شکل ۴. پردازش و تلفیق شاخص‌های عملیاتی و نحوه اضافه کردن هر شاخص به واحد پایه فضایی (متریک)

متغیر در تحلیل، نخست فرایند استانداردسازی داده‌ها با استفاده از روش نرمال‌سازی بر مبنای انحراف معیار انجام پذیرفت. این مرحله باعث می‌شود که میانگین هر متغیر به صفر و واریانس آن به یک تبدیل شود. در گام بعد، ماتریس کوواریانس محاسبه و مقادیر ویژه و بردارهای ویژه آن استخراج شد. بردارهای ویژه جهت‌های اصلی پراکندگی داده‌ها و مقادیر ویژه نیز نشان‌دهنده میزان اهمیت هر مؤلفه هستند. در نهایت، از مقادیر ویژه که بیانگر سهم هر مؤلفه در تبیین واریانس کل Dataset هستند، به عنوان مبنای تعیین ضرایب وزنی سنج‌های اولیه در ترکیب نهایی مدل استفاده شد. این رویکرد مبتنی بر اصول آماری، امکان تشکیل یک شاخص ترکیبی قدرتمند را فراهم می‌سازد که حداکثر اطلاعات مربوط به هم‌پیچگی فضایی عوامل مؤثر بر تراکم و فرم شهری در کلان‌شهر اصفهان را در بردارد.

با توجه به ضرورت تلفیق سنج‌های فضایی برای مدل‌سازی جامع الگوهای تراکم ساختمانی و فرم شهری، رویکرد تحلیل مؤلفه‌های اصلی به عنوان چارچوب روش‌شناختی انتخاب شد. از آنجا که هر یک از سنج‌های فضایی به تنهایی قادر به بازتاب کامل ابعاد پیچیده هم‌پیچگی فضایی نیستند، ترکیب چندمتغیره این سنج‌ها با اختصاص ضرایب وزنی بهینه امری ضروری است. در این راستا، پس از استخراج مقادیر هر یک از چهار سنج فضایی در واحدهای تحلیلی پایه (PCA)، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین ساختار بهینه وزنی استفاده شد. مبنای ریاضی این روش بر محاسبه ماتریس کوواریانس برای شناسایی جهت‌های حداکثر واریانس در Dataset استوار است که توسط محورهای جدیدی به نام مؤلفه‌های اصلی تعریف می‌شوند. به منظور حذف سوگیری ناشی از دامنه متفاوت مقادیر سنج‌ها و تضمین صحت مشارکت متعادل هر

جدول ۳. ویژگی واحدهای پایه تحلیل به ازای هر متریک فضایی

ویژگی	واحد تحلیل	حروف اختصاری	رابطه	واحد	دامنه
	تعداد متریک	NP	n_i	-	$NP > 0$
Level	تراکم متریک	PD	$\frac{n_i}{A} 100000$	تعداد در صد	$PD > 0$
Density	مساحت متریک	AREA_MN	$a_{ij} \left(\frac{1}{100000} \right)$	هکتار	$AREA \geq 0$
Margin	درصد متریک	PLAND	$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$	درصد	$0 \leq PLAND \leq 100$

ویژگی	واحد تحلیل	حروف اختصاری	رابطه	واحد	دامنه
Level		MESH	$\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}{A} \left(\frac{1}{10000} \right)$	مترمربع	\geq مساحت کل پهنه \leq MESH مساحت پهنه
Density	شاخص از هم گسستگی	DIVISION	$\left 1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right $	نسبی	$0 \leq \text{DIVISION} < 1$
Margin					
Shape	میانگین شاخص شکل متریک	SHAPE_MN	$\frac{0.25 P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$	بدون واحد	SHAPE ≥ 1
Contiguity	میانگین فاصله اقلیدسی	ENN_MN	h_{ij}	متریک	ENN > 0
proximity	نزدیک ترین همسایه				

(ni): تعداد متریک در براساس نوع؛ A: مساحت متریک؛ aij: مساحت متریک منحصربه فرد؛ pij: محیط متریک؛ hij: فاصله با نزدیک ترین متریک؛ cijr: ارزش مجاورت؛ V: مجموع ارزش ها در هر متریک)

فضایی عوامل مؤثر بر تراکم ساختمانی و فرم شهری ارائه می دهد. رابطه ۱: شاخص ترکیبی تراکم و فرم شهری: $\text{CDFI} = E_1 \times [\Sigma(L_{1i} \times M_i)] + E_2 \times [\Sigma(L_{2i} \times M_i)] + \dots + E_n \times [\Sigma(L_{ni} \times M_i)]$ که در آن: CDFI: شاخص ترکیبی تراکم و فرم شهری (Composite Density and Form Index)
N: تعداد متریک (No. of each metric)
E_n: مقدار ویژه مؤلفه nام (Eigenvalue of the nth component)
L_{ni}: بار عاملی سنجه nام در مؤلفه nام هر متریک (Factor loading of ith metric in nth component)
M_i: مقدار استاندارد شده سنجه nام هر متریک (Standardized value of ith metric)
این فرمول بندی امکان محاسبه یک شاخص یکپارچه از برهم کنش پیچیده عوامل فضایی مؤثر بر تراکم و فرم شهری را فراهم می کند که می تواند به عنوان مبنایی برای تحلیل های پیچیدگی فضایی در کلان شهر اصفهان مورد استفاده قرار گیرد.

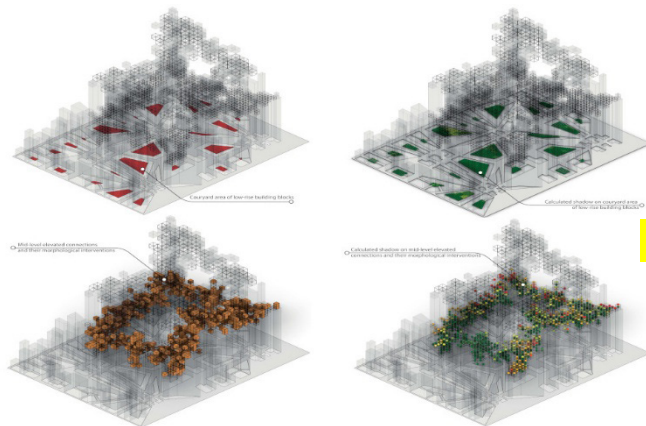
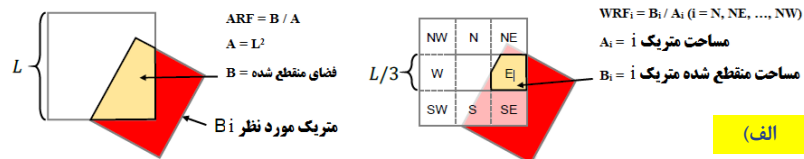
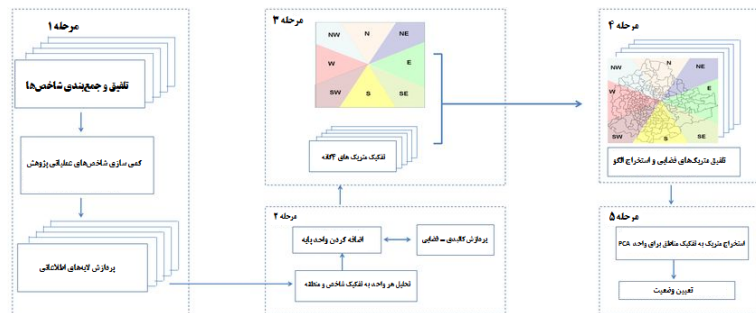
با تکیه بر یافته های حاصل از تحلیل مؤلفه های اصلی، سنجه های تأثیرگذار در مدل سازی الگوی تراکم ساختمانی و فرم شهری بر اساس مقادیر ویژه مربوطه دسته بندی شده و با بهره گیری از بارهای عاملی هر سنجه به عنوان ضریب وزنی در مدل نهایی، شاخص ترکیبی تراکم و فرم برای پهنه های مختلف کلان شهر اصفهان تدوین شد. فرمول کلی این شاخص که در رابطه ۱ ارائه شده است، بر مبنای ترکیب خطی وزنی سنجه های استاندارد شده با در نظر گرفتن اهمیت آماری هر مؤلفه اصلی طراحی شده است. در این رابطه، مقادیر ویژه (E) به عنوان وزن هر مؤلفه اصلی و بارهای عاملی (L) به عنوان سهم هر سنجه در تشکیل مؤلفه ها عمل می کنند. به عبارت ریاضی، شاخص نهایی از حاصل جمع وزنی ترکیبات خطی سنجه های استاندارد شده (M) در هر مؤلفه اصلی به دست می آید که در آن هر مؤلفه با مقدار ویژه مربوطه ضریب می خورد. این رویکرد امکان تلفیق چند بعدی سنجه های فضایی را با حفظ ساختار پراکندگی داده ها فراهم می سازد و تصویر جامعی از پیچیدگی

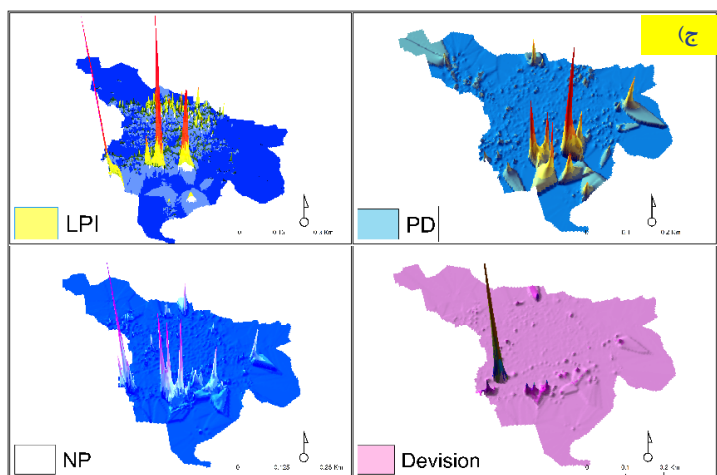
جدول ۴. نتایج پردازش متریک های فضایی در ارتباط با واحد تحلیل (PCA)

مؤلفه/بند	شاخص عملیاتی	گویه/متغیرهای اندازه گیری	فرمول/روش محاسبه	a1 (NP)	a2 (Division)	a3 (PD)	a4 (LPI)	R ²	Prob.	St.d
تراکم و اشغال کالبدی	تراکم ساختمانی	FAR، تراکم جمعیت، Coverage Ratio	$FAR = \Sigma(GFA)/\text{Plot_Area}$ $CR = \Sigma(\text{Footprint})/\text{Total_Area} \times 100$	۳.۰۲۴	۰.۰۰۹	۲.۰۰۱	۱.۲۲۰	۰.۴۴۱	۰.۰۰۱	۲.۰۰۳
	اشغال گذاری عمودی	میانگین طبقات، VDI ارتفاع، CV	$\text{Mean_Floors} = \Sigma(\text{Floors})/n$ $\text{VDI} = \frac{\Sigma[(h/H) \ln(h/H)]}{\Sigma[(h/H) \ln(h/H)]}$	۲.۰۱۴	۰.۰۰۷	۰.۳۳۳	۰.۲۵۸	۰.۳۶۹	۰.۰۰۵	۴.۰۰۱
کاربری و اختلاط	اختلاط کاربری	آنتروپی، HHI، تنوع فاصله ای	$H = -\Sigma p_i \ln(p_i) / \ln(k)$ $HHI = \frac{\Sigma(p_i^2)}{\Sigma(p_i)}$	۴.۰۱۸	۰.۰۲۵	۰.۴۱۱	۵.۰۶۸	۰.۴۴۱	۰.۰۰۰	۰.۳۶۹
	دسترسی به خدمات عمومی	Dist_min، Count_500m، SFCA2	$\text{Dist_min} = \min(\text{NetworkDist})$ عرضه/تقاضا طبق شعاع ۵۰۰m	۱.۰۳۶	۱.۰۵۴	۰.۳۷۱	۰.۱۷۰	۰.۲۵۸	۰.۰۰۰	۱.۳۶۹
شبکه معابر و اتصال	پیوستگی شبکه	تراکم تقاطع، شاخص اتصال	$\text{Intersection_Density} = \frac{N_intersections}{\text{Area_km}^2}$ Connectivity: α, β indices	۰.۹۷۱	۰.۰۶۸	۱.۰۴۲	۰.۳۳۶	۰.۱۴۷	۰.۰۰۰	۶.۲۱۴
	دسترسی به حمل و نقل عمومی	فاصله تا ایستگاه، تعداد خطوط	$\text{Transit_Access} = \min(\text{NetworkDist})$ $\text{Lines_500m} = \text{Count}(\text{lines within 500m})$	۳.۳۳۰	۰.۱۴۷	۳.۰۱۴	۲.۰۲۱	۰.۸۷۴	۰.۰۰۰	۲.۳۱۴

St.d	Prob.	R ²	a4 (LPI)	a3 (PD)	a2 (Division)	a1 (NP)	فرمول / روش محاسبه	گونه/متغیرهای اندازه گیری	شاخص عملیاتی	مؤلفه/بُعد
۰.۶۶۹	۰.۰۰۵	۱.۲۵۰	۴.۱۴۰	۰.۴۴۸	۰.۲۵۸	۱.۰۰۹	Mean_Parcel = ΣArea/ nBlock_Density = N_blocks/ Area_km²	مساحت متوسط قطعات، تراکم بلوک	ریزمقیاس بودن بافت	مساحت و تراکم بافت
۱.۸۲۰	۰.۰۰۱	۰.۶۸۰	۱.۸۲۰	۲.۲۲۰	۰.۰۹۵	۲.۴۸۰	ISA% = (Built_area + Roads_ area)/Total_area × 100 Walkability = Ped_network_length/Area	ISA%، طول شبکه Walkability، محلی	تراکم پذیری / نفوذ پذیری	
۱.۵۰۰	۰.۰۰۰۵	۰.۷۲۰	۱.۹۵۰	۲.۷۰۰	۰.۱۲۰	۲.۹۰۰	NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED) LST (L8): BT-273.15; LST_anom = LST_local - LST_regional_mean	NDVI، LST، ISA، LST_anomaly	تاب آوری حرارتی	پایداری محیطی و انرژی
۰.۴۲۰	۰.۰۰۰	۰.۵۲۰	۴.۵۰۰	۰.۶۰۰	۰.۰۳۰	۳.۵۲۰	Historic% = Historic_area/ Total_area × 100 Cultural_Density = N_cultural_POIs/Area_km²	Historic%، تراکم POI، فرهنگی، density	فرم تاریخی	تراکم و فرم تاریخی
۱.۱۰۰	۰.۰۰۲	۰.۳۳۰	۰.۲۱۰	۰.۵۲۰	۰.۰۹۵۰	۱.۱۸۰	D% = Deteriorated_area/Total × 100 Age_Index = Σ(Current- Year-ConstructYear)/n	Deterioration%، Age Index، Physical_Condition	فرسودگی بافت	
۰.۸۰۰	۰.۰۰۰	۰.۹۱۰	۳.۲۰۰	۲.۹۰۰	۰.۱۵۰	۳.۸۰۰	Moran's I: I = (n/W) ΣiΣj w_ij(x_i - x̄)(x_j - x̄)/Σ(x_i - x̄)²	Moran's I، LISA، Gi*	همبستگی فضایی	تحلیل فضایی و مدل سازی

**a1/NP; a2/ Division/ a3/PD; a4/LPI.

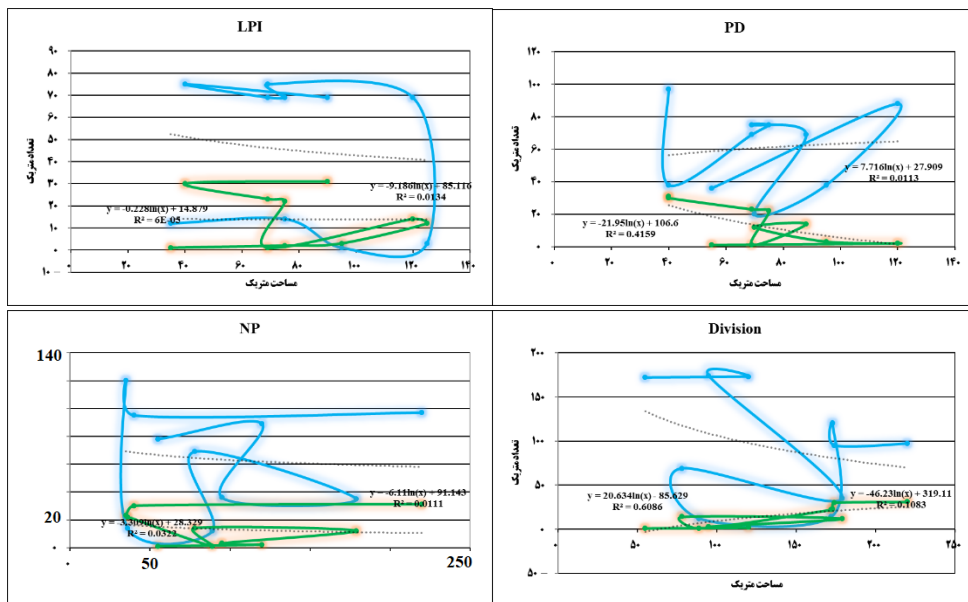




شکل ۵. الف) فرایند محاسبه (ب) اضافه کردن متغیرهای ابزاری به (ج) واحد پایه فضایی براساس ۴ متریک مورد مطالعه

فایده‌های مدل تدوین‌شده به صورت نظام‌مند در کلیه سنجه‌های استخراج‌شده از پهنه‌های مطالعاتی اجرا شد و شاخص ترکیبی تراکم و فرم شهری برای هر واحد فضایی محاسبه شد. بر این اساس، نقشه نهایی الگوی فضایی از تلفیق خروجی‌های حاصل از تمامی واحدها تولید شد. در ادامه و به منظور افزایش دقت مدل، پهنه‌هایی که در شاخص تعداد لکه (NP) مقادیر پایین‌تر از حد انتظار را نشان می‌دادند، در محیط ArcGIS به عنوان Zones Exhibiting No Significant Spatial Pattern شناسایی و تفکیک شدند. این پهنه‌های

فایده‌های مدل تدوین‌شده به صورت نظام‌مند در کلیه سنجه‌های استخراج‌شده از پهنه‌های مطالعاتی اجرا شد و شاخص ترکیبی تراکم و فرم شهری برای هر واحد فضایی محاسبه شد. بر این اساس، نقشه نهایی الگوی فضایی از تلفیق خروجی‌های حاصل از تمامی واحدها تولید شد. در ادامه و به منظور افزایش دقت مدل، پهنه‌هایی که در شاخص تعداد لکه (NP) مقادیر پایین‌تر از حد انتظار را نشان می‌دادند، در محیط ArcGIS به عنوان Zones Exhibiting No Significant Spatial Pattern شناسایی و تفکیک شدند. این پهنه‌های



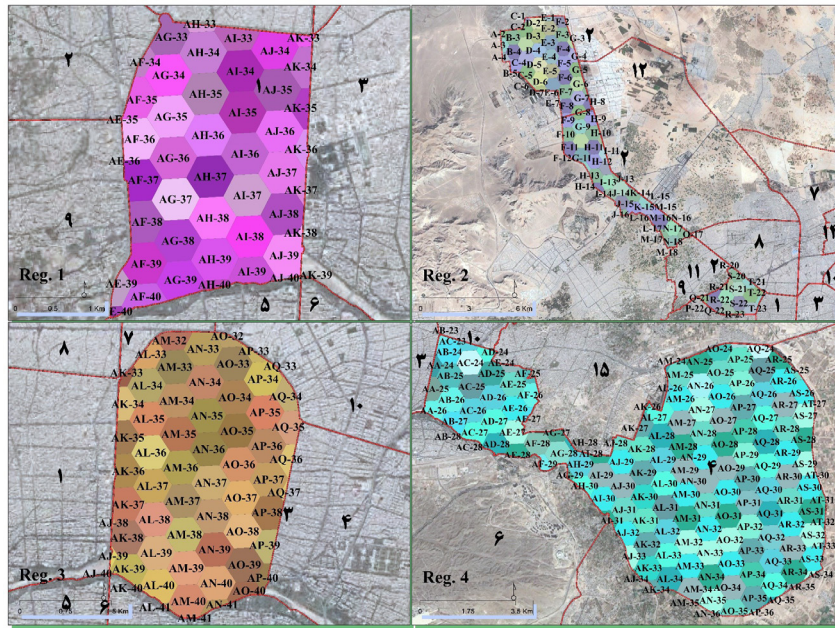
تعداد مناطق	تعداد متریک	میانگین (Mean)	واریانس (Var)	حداقل (Min)	حداکثر (Max)	درصد واریانس (Var.Per)	wij / مؤلفه اصلی (PCI)
۱۵	۴	۱.۱۸۰	۰.۷۴۱۰	۱.۰۰۸۷	۳.۸۵۴۱	۱۴.۰۲	شاخص فضای باز، تمرکز و انزوای فضایی، رشد کالبدی
۱۵	۴	۲.۰۳۶	۱.۰۲۵۸	۱.۳۶۷۰	۳.۳۲۵۸	۱۲.۱۰	شاخص دسترسی، تراکم و پراکنش کاربری‌ها
۱۵	۴	۲.۳۶۹	۰.۸۸۵۱	۱.۸۷۴۰	۴.۳۶۹۰	۱۵.۹۰	شبکه معابر، اتصال و دسترسی
۱۵	۴	۱.۲۵۷	۰.۹۶۱۴	۰.۹۸۴۲	۱.۷۴۵۲	۶.۳۵	بافت، ریخت‌شناسی و پایداری محیطی

$$\left[1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right]$$

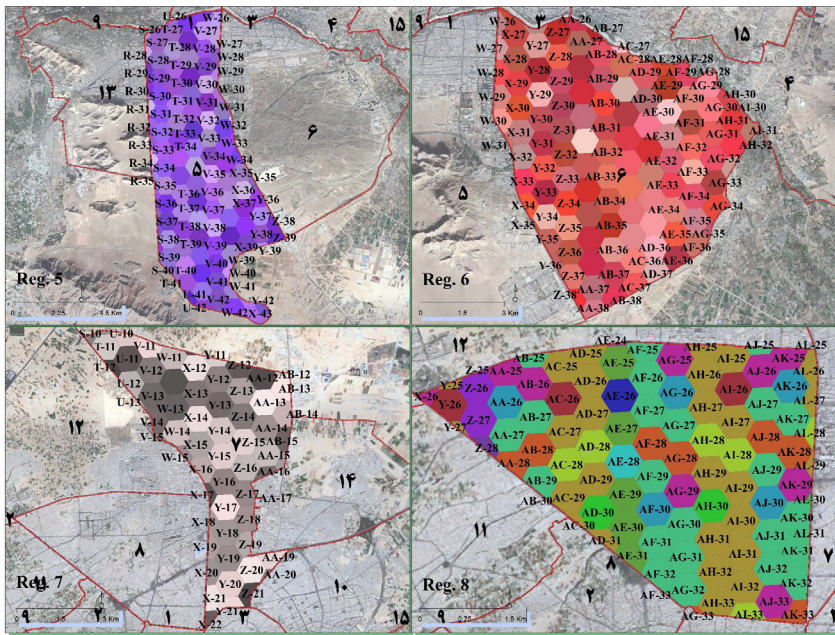
مطابق نتایج جدول ۵، واریانس‌ها، بازه‌های حداقل و حداکثر و میانگین‌های هر مؤلفه نمایانگر گستردگی و دامنه تغییرات در سطح مناطق هستند که بر مبنای آن می‌توان شناخت دقیق‌تری از مقیاس‌های فضایی بهینه برای مداخلات و برنامه‌ریزی شهری به دست آورد. درصد واریانس هر مؤلفه، بیانگر میزان اطلاعات و تفسیری است که آن مؤلفه توانسته از مجموعه داده‌های پیچیده چندبعدی استخراج کند، در نتیجه انتخاب این ابعاد برای مدل‌سازی پیچیدگی فضایی تأیید شده است و می‌تواند راهنمایی اثربخش برای سیاست‌گذاری و طراحی شهری ارائه دهد. مؤلفه «شاخص دسترسی، تراکم و پراکنش کاربری‌ها» که با ۲۶/۴۱ درصد سهم واریانس بالاترین میزان تبیین تغییرات فضایی را دارد، بیانگر نقش اساسی این پارامترها در شکل‌گیری و تغییرات فضایی شهر است. این سهم واریانس بالا نشان می‌دهد چگونگی توزیع مکانی کاربری‌ها و دسترسی به آن‌ها به طور مستقیم بر ویژگی‌های تراکم و ساختار کالبدی شهر اثرگذار است. علاوه بر این، میانگین این مؤلفه ۳/۰۱۴ است که نشان‌دهنده سطح قابل توجهی از تغییرات بین مناطق مورد مطالعه است و این مهم بیانگر پراکندگی و تنوع بالای عملکردی در سطح کلان‌شهر اصفهان است. از سوی دیگر، مؤلفه «بافت، ریخت‌شناسی و پایداری محیطی» با تنها ۶/۳۵ درصد واریانس کمترین تأثیر را در واریانس کل داده‌ها دارد، که نشان از نسبتاً یکنواخت بودن این ویژگی‌ها در پهنه‌های مختلف شهر و یا کم‌اهمیت‌تر بودن آن‌ها در تغییرات ساختاری در مقایسه سایر مؤلفه‌ها دارد. میانگین این مؤلفه نیز پایین بوده (۱/۲۵۷) که تأییدی بر فقدان نوسان‌های شدید در این بعد است. مؤلفه «دسترسی به مراکز خدمات شهری در مقیاس منطقه‌ای» با میانگین ۵/۰۲۱ بالاترین مقدار میانگین را به خود اختصاص داده و واریانس ۲/۲۲۰ را دارد که حاکی از اهمیت فراوان این متغیر در شبکه فضایی

خدمات شهری و تفکیک فضایی مناطق کلان‌شهر است. این مؤلفه به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی، تأثیر قابل توجه بر پویایی‌های کالبدی و فعالیت‌های شهری دارد و تغییرات قابل توجه میان مناطق مختلف را بازتاب می‌دهد. علاوه بر این، مؤلفه‌هایی همچون «شبکه معابر، اتصال و دسترسی» با سهم واریانس ۱۵/۹۰ و «تراکم و اشغال کالبدی فضای شهری» با ۱۳/۳۵ درصد نیز نشان‌دهنده نقش مهم ساختار شبکه ارتباطی و چگالی فیزیکی در تعیین وضعیت فضایی شهر هستند. این نتایج بر اهمیت متقابل عناصر کالبدی و سازمان فضایی در تحلیل‌های فضایی تأکید می‌کند. به طور خلاصه، نتایج بیانگر این نکته است که برای درک و تغییرات مؤثر در تراکم ساختمانی و فرم کلان‌شهر اصفهان، تمرکز ویژه بر پارامترهای مربوط به تراکم، پراکنش کاربری‌ها و شبکه دسترسی الزامی است، در حالی که سایر ابعاد علی‌رغم اهمیت درک ساختار کلی، نقش کاهش‌یافته‌تری در تغییرات واقعی فضایی ایفا می‌کنند. با توجه به نتایج، مدل نهایی شاخص تراکم ساختمانی و فرم کلان‌شهر اصفهان در رابطه ۲ با تلفیق مقادیر ویژه تمامی متغیرهای ابزاری، مقادیر بار عاملی متریک‌ها به عنوان ضرایب مدل برای محدوده ۱۵ گانه شهر محاسبه، تشکیل و در نقشه‌های ۶ تا ۹ نمایش داده شد. رابطه ۲:

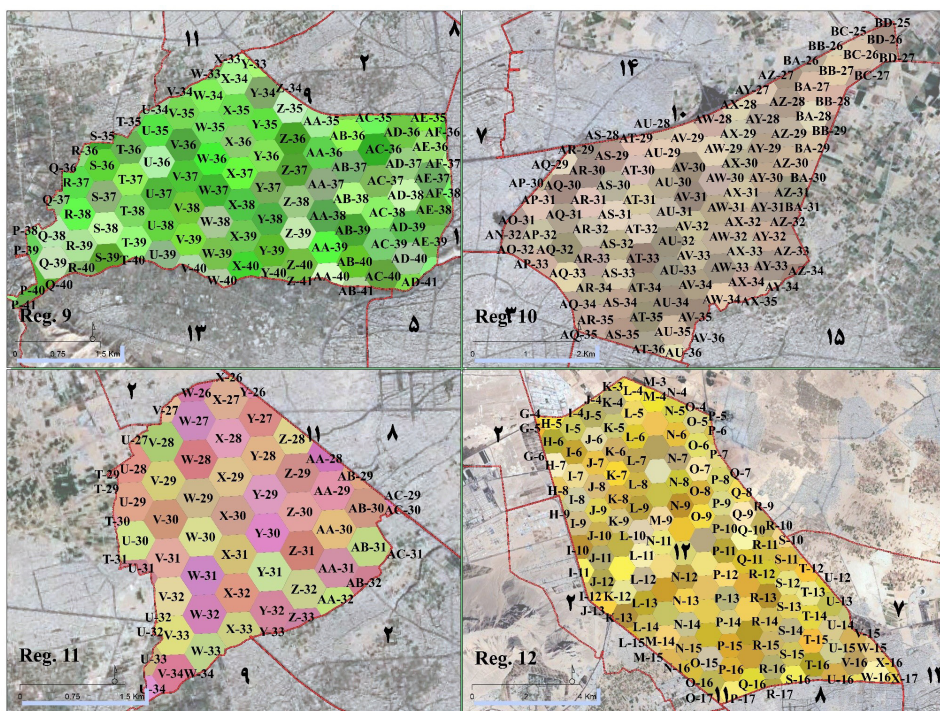
$$CDFI = ((Outdoor\ Index, Spatial\ Concentration\ and\ Isolation\ Index, Physical\ Growth\ Index\ of\ Regions, FAR, Index\ of\ Density\ and\ Distribution\ of\ Land\ Uses\ and\ Access\ to\ Municipal\ Service\ Centers\ on\ a\ Regional\ Scale))\ N1 \times (L1 \times NPi \times L2 \times PDi + L3 \times SHAPeMNI + L4 \times FRACMNI + L1 \times CONTIGMNI + L2 \times ENNMNI + L3 \times DIVISIONi + E1 \times (L4 \times PLANDi + L2 \times LPIi + L3 \times AREA_MNI + L1 \times MESH) + E2 \times (L1 \times SPLITi))$$



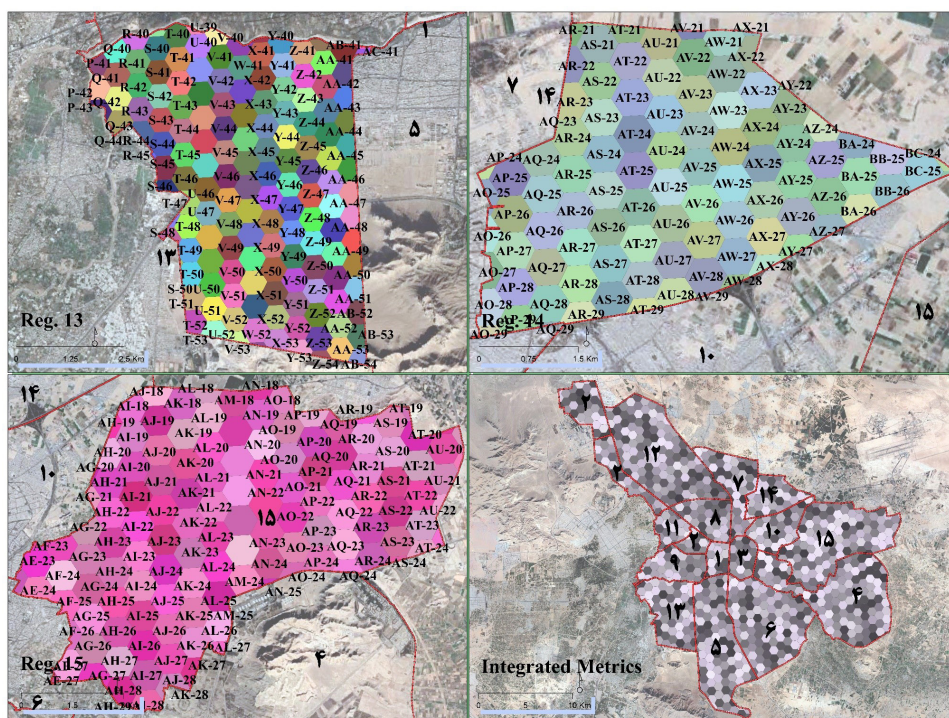
شکل ۶. نتایج نهایی الگوهای CDFI مناطق ۱ تا ۴ بر مبنای تلفیق متریک‌های فضایی



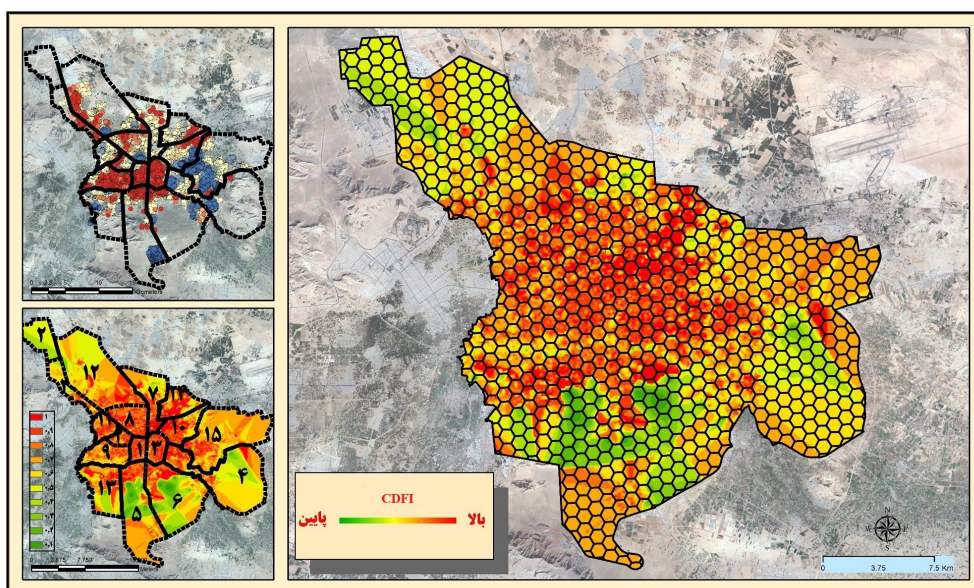
شکل ۷. نتایج نهایی الگوهای CDFI مناطق ۵ تا ۸ بر مبنای تلفیق متریک‌های فضایی



شکل ۸. نتایج نهایی الگوهای CDFI مناطق ۹ تا ۱۲ بر مبنای تلفیق متریک‌های فضایی



شکل ۹. نتایج نهایی الگوهای CDFI مناطق ۱۳ تا ۱۵ بر مبنای تلفیق متریک‌های فضایی



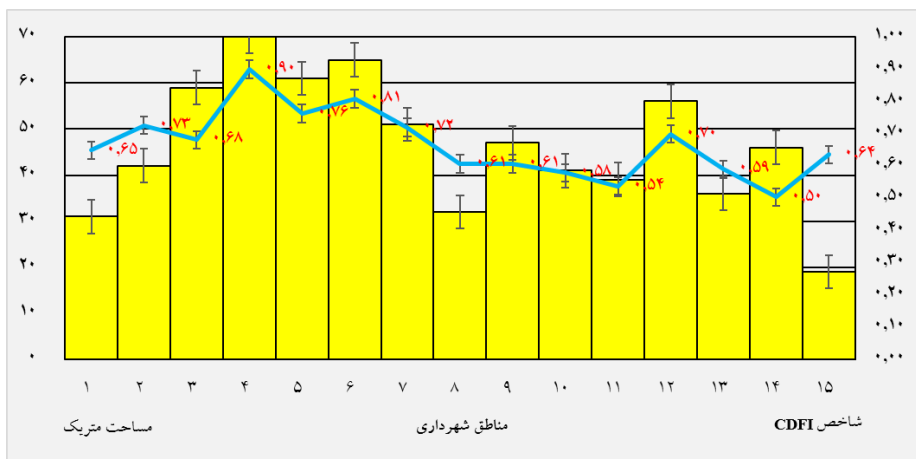
شکل ۱۰. نتایج نهایی الگوهای تراکم و فرم مناطق کلان‌شهر اصفهان و نقشه متریک‌های فضایی نهایی بر مبنای شاخص CDFI

مطابق نتایج جدول ۶ با اجزاء مدل تراکم و فرم در رابطه ۲ جدول در ۱۰ کلاس با دامنه تراکم بالا و فرم نامتناسب (پایین ۰/۱) تا ۶ و شکل ۱۰ در تمام ۶۹۵ متریک ایجاد شده ۴۶/۳ پهنه با توجه به تراکم بهینه و فرم متناسب بالا (۱) تعیین و نقشه طبقات به صورت هیستوگرام و دامنه پراکنش شاخص CDFI که صفر تا ۱ بوده است یکپارچه تهیه شد.

جدول ۶. شاخص تراکم و فرم مناطق بر اساس نوع متریک و مساحت

r.	CDFI	F.Met (نسبت تعداد متریک‌های CDFI (هکتار) به کل متریک‌های (هکتار) هر منطقه)	S.Met	درصد از مساحت	مساحت (هکتار)	تعداد متریک	مناطق	نوع متریک
۸	۰.۶۴۸	۴.۴۶	۳۶۱۲.۹۵۰	۰.۵۵۳	۸۱۰	۳۱	۱	LPI
۴	۰.۷۲۶	۶.۰۴	۱۲.۹۶۳	۰.۰۰۱	۲.۱۴۵	۴۲	۲	LPI
۷	۰.۶۸۱	۸.۴۹	۹۷۴۵.۶۱۲	۰.۷۸۴	۱۱۴۸	۵۹	۳	PD
۱	۰.۹۰۰	۱۰.۰۷	۱۳۴۶۹۳۰.۹۳۵	۹۱.۳۵۵	۱۳۳۷۳۱	۷۰	۴	Division
۳	۰.۷۶۲	۸.۷۸	۱۴۹۳۸.۴۱۷	۱.۱۶۳	۱۷۰۲	۶۱	۵	LPI
۲	۰.۸۰۸	۹.۳۵	۶۱.۷۲۷	۰.۰۰۵	۶۶۰۰	۶۵	۶	Division
۵	۰.۷۱۹	۷.۳۴	۹.۹۵۸	۰.۰۰۱	۱.۳۵۷	۵۱	۷	NP
۱۰	۰.۶۰۶	۴.۶۰	۹۳۸۸.۲۰۱	۱.۳۹۳	۲۰۳۹	۳۲	۸	PD
۱۱	۰.۶۰۶	۶.۷۶	۷۱۲۷.۷۷۰	۰.۷۲۰	۱۰۵۴	۴۷	۹	LPI
۱۳	۰.۵۷۹	۵.۹۰	۱۲۹۷۸.۴۱۷	۱.۵۰۳	۲۲۰۰	۴۱	۱۰	LPI
۱۴	۰.۵۳۷	۵.۶۱	۰.۷۷۹	۳۷۴	۱۱۴۰	۳۹	۱۱	LPI
۶	۰.۶۹۹	۸.۰۶	۱۰.۹۸	۶۳۹۷.۱۲۲	۱۶۰۸	۵۶	۱۲	Division
۱۲	۰.۵۹۰	۵.۱۸	۰.۰۰۱	۱۲۹۵۶.۵۴۷	۲۰۰۱۰	۳۶	۱۳	PD
۱۵	۰.۵۰۳	۶.۶۲	۰.۶۴۲	۱۰.۴۱۲	۹۴۰	۴۶	۱۴	PD
۹	۰.۶۳۵	۲.۷۳	۰.۰۰۱	۶۲۲۱.۵۸۳	۱۶۶۴	۱۹	۱۵	LPI
-	۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۴۶۳۸۵۷۷.۶۰۰	۱۴۶۳۸۵.۷۷۶	۶۹۵	جمع	





نمودار ۲. وضعیت شاخص نهایی CDFI با تعداد متریک (مساحت به هکتار) هر یک از مناطق ۱۵ گانه

و HHI ($R^2=0.441$, $a1=4.018$) بیشترین تأثیر را بر هماهنگی و ترکیب فضایی متریک‌ها دارد، در حالی که دسترسی به خدمات عمومی ($R^2=0.258$, $a1=1.036$) اثرات تکمیلی را نشان می‌دهد. شبکه معابر و اتصال شهری نیز با شاخص‌های دسترسی به حمل‌ونقل عمومی ($R^2=0.874$, $a1=3.330$) و پیوستگی شبکه ($R^2=0.147$, $a1=0.971$) نقش کلیدی در تسهیل جریان شهری و توزیع متریک‌ها دارد، به‌ویژه در مناطق ۴، ۶ و ۱۲ که همبستگی فضایی بالا و CDFI برتر دارند. بافت و ریخت‌شناسی و تراکم‌پذیری با $Walkability$ و $ISA\%$ با مقادیر $a1=2.480$ و $R^2=0.680$ نشان‌دهنده توانایی مناطق در حفظ انسجام ساختاری و تسهیل نفوذپذیری شهری است، که در مناطق ۴، ۶ و ۵ به‌وضوح قابل مشاهده است. مؤلفه‌های میراث و هویت شهری، شامل فرم تاریخی و فرسودگی بافت ($R^2=0.520$ و $a1=3.520$) برای فرم تاریخی، نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ ویژگی‌های فرهنگی و ریخت‌شناسی مناطق مرکزی و تاریخی دارند و اثر آن بر هماهنگی فضایی در مناطق ۱ و ۵ مشهود است. شاخص همبستگی فضایی Moran's $a1=3.800$ و $R^2=0.910$ نیز تأیید می‌کند که توزیع متریک‌ها نه تنها تصادفی نیست، بلکه الگوهای منظم هم‌پیچیده و خوشه‌ای در سراسر شهر شکل گرفته است. در تحلیل نهایی، مناطق با بالاترین CDFI (۴، ۶، ۵، ۷ و ۱۲) دارای تراکم متریک‌های هماهنگ، مساحت وسیع و انسجام فضایی بالا هستند که تعامل پیچیده میان تراکم ساختمانی، اختلاط کاربری، دسترسی شبکه معابر و ویژگی‌های ریخت‌شناسی را نشان می‌دهد. در مقابل، مناطق با CDFI پایین‌تر (۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴ و ۱۵) با پراکندگی متریک‌ها و انسجام کمتر فرم شهری، نمونه‌ای از ناهماهنگی نسبی تراکم و فرم را ارائه می‌دهند. این تحلیل یکپارچه و فنی چارچوبی علمی برای مدیریت تراکم، بهینه‌سازی فرم شهری و برنامه‌ریزی مبتنی بر داده‌های فضایی در کلان‌شهر اصفهان فراهم می‌کند و امکان پیش‌بینی، کنترل و بهبود انسجام فضایی در سطوح مختلف شهری را با دقت و اعتبار بالا میسر می‌سازد.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های محوری این پژوهش، از جمله نقش برجسته شبکه معابر و دسترسی حمل‌ونقل، اهمیت اختلاط کاربری در تبیین توزیع FAR و الگوهای فرم شهری، ناهمگنی مکانی شدید (مؤید شاخص‌های

بر اساس تحلیل داده‌های ارائه‌شده، وضعیت تراکم ساختمانی و فرم شهری کلان‌شهر اصفهان را می‌توان به صورت یکپارچه و علمی با تمرکز بر پیچیدگی فضایی عوامل مؤثر در مقیاس ۱۵ منطقه شهری تفسیر و مدل‌سازی کرد. شاخص ترکیبی CDFI و متریک‌های NP، Division، PD و LPI به عنوان معیارهای اصلی مدل‌سازی، تعامل پیچیده و وابستگی متقابل میان تراکم، انسجام فضایی و فرم شهری را به صورت کمی و قابل مقایسه در سرتاسر شهر بازتاب می‌کنند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد منطقه ۴ با شاخص CDFI برابر ۰/۹۰ و ۷۰ متریک Division به مساحت ۱۳۳۷۳۱ هکتار، بالاترین میزان پیچیدگی فضایی را دارد. این شاخص نه تنها نشان‌دهنده تراکم متریک‌های بهینه است، بلکه توزیع یکنواخت و مقیاس وسیع متریک‌ها بیانگر انسجام فضایی بالا و کنترل‌شدگی فرم شهری در سطح منطقه‌ای است. منطقه ۶ با ۶۵ متریک Division و CDFI برابر ۰/۸۰۸ نیز در جایگاه دوم قرار دارد و همچون منطقه ۴، الگوی تراکم و فرم هماهنگ را به‌وضوح نشان می‌دهد. مناطق ۵، ۷ و ۱۲ نیز با CDFI بین ۰/۷۶۲ تا ۰/۷۱۹، در رده مناطق با هماهنگی بالای نسبی قرار دارند، اگرچه مقیاس و پراکندگی متریک‌ها نسبت به مناطق ۴ و ۶ کمتر است. در دیگر مناطق، مانند مناطق ۳، ۸، ۱۳ و ۱۴، متریک‌های PD با تراکم‌های متغیر (بین ۳۲ تا ۵۹ متریک) و مساحت بین ۹۴۰ تا ۱۱۴۸ هکتار، نشان‌دهنده پراکندگی نسبی متریک‌ها و انسجام کمتر فرم شهری هستند، هرچند تأثیر پراکندگی بر CDFI هنوز قابل توجه است و مناطق ۳ و ۸ با CDFI ۰/۶۸۱ و ۰/۶۰۶، توانسته‌اند سطح متوسطی از هماهنگی فضایی را حفظ کنند. متریک‌های LPI در مناطق ۱، ۲، ۵، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۵ بیشتر دیده می‌شوند و این مناطق با تراکم‌های متریک پایین تا متوسط، CDFI بین ۰/۵۳۷ تا ۰/۷۲۶ دارند، که نشان‌دهنده تمرکز کمتر متریک‌ها و تأثیر محدود فرم پیوسته در هماهنگی کلان‌شهری است. منطقه ۱۵ با تنها ۱۹ متریک LPI و CDFI ۰/۶۳۵، پایین‌ترین تراکم متریک و کوچک‌ترین مساحت پوشش‌دهی را دارد که بیانگر انسجام فضایی محدود و پراکندگی نسبی فرم است. تحلیل مؤلفه‌های شاخصی نشان می‌دهد مؤلفه‌های تراکم و اشغال کالبدی (FAR، تراکم جمعیت و Coverage Ratio) با مقادیر $a1=3.024$ و $R^2=0.441$ (و همچنین اشغال‌گذاری عمودی، میانگین طبقات و شاخص VDI) با $a2=2.014$ و $R^2=0.369$ ، نقش اصلی در ایجاد الگوی تراکم و حجم فضایی دارند. در بعد کاربری، اختلاط کاربری با شاخص‌های آنتروپی

Moran's و LISA) و تسلط مؤلفه‌های تراکمی - اشغالی و توزیع کاربری‌ها در تبیین واریانس فضایی، هم‌راستا با بخش بزرگی از ادبیات بین‌المللی و داخلی است. به طور مشخص، همبستگی مثبت میان نزدیکی به شبکه‌های حمل‌ونقل و تراکم بالاتر، یافته‌ای است که مطالعاتی همچون (Liu, 2023; Lu et al., 2016) گزارش کرده‌اند؛ این همسویی نشان می‌دهد در بافت اصفهان نیز همان پیوند ساختار دسترسی و گزینش توسعه عمودی/افقی وجود دارد و از منظر نظری، از چارچوب‌های نظری شهر فشرده و رشد هوشمند (Jenks & Burgess, 2000; Neuman, 2005) پشتیبانی می‌کند. علاوه بر این، نقش اختلاط کاربری به عنوان یکی از مؤلفه‌های بار بالای عاملی در PCA، با ادبیات نشان‌دهنده تأثیر کارکردی توزیع فعالیت‌ها بر تراکم (Jiao et al., 2021) هم‌خوانی دارد و تأکید می‌کند که سیاست‌های FAR نمی‌توانند مستقل از ساختار کارکردی و شبکه‌های شهر طراحی شوند. از منظر تبیینی، یافته‌های «مؤلفه‌های تراکم و پراکنش کاربری‌ها» که بیشترین سهم واریانس را دارند، با نتایج پژوهش‌های (Peng et al., 2021; Zheng, 2023) هم‌سو است که نشان می‌دهند توزیع فضایی کاربری‌ها و ساختار شبکه‌های محرک‌های اصلی نابرابری‌های تراکمی‌اند. تحلیل مکانی - ناهمگن (MGWR/SAR) در مطالعه نشان داد اثرات توضیحی متغیرها ناهمگون و وابسته به مکان‌اند؛ این نتیجه دقیقاً بر انتظار نظری مبنی بر رفتار غیرخطی و وابسته به مقیاس متغیرهای فضایی (Lu, 2025; Cao, 2025) منطبق است و ضرورت کاربرد مدل‌های محلی‌ساز مانند MGWR را توجیه می‌کند. بنابراین، این پژوهش نه تنها تأییدی بر مشاهدات پیشین است، بلکه از منظر روش‌شناختی آن‌ها را تعمیق می‌بخشد؛ به‌ویژه با ارائه شاخص ترکیبی CDFI که تعامل هم‌زمان چند متریک فضایی را در یک پیمانۀ واحد تلفیق می‌کند و امکان شناسایی آستانه‌ها و طبقات تراکمی را فراهم می‌آورد - امری که در بسیاری از مطالعات تک‌متغیری پیشین غایب بوده است. در عین حال، برخی جنبه‌های نتایج با آنچه در ادبیات زیست‌محیطی و ریزاقلمی گزارش شده اختلاف دارد. برای نمونه، در حالی که مطالعاتی مانند (Huang et al., 2025; Li et al., 2018) تأثیر معنادار تراکم بر پارامترهای ریزاقلمی (LST, NDVI) را برجسته کرده‌اند، در این مقاله مؤلفه‌های «بافت، ریخت‌شناسی و پایداری محیطی» سهم واریانس کمتری (~۶/۳۵ درصد) نشان داد. این اختلاف را می‌توان با چند مکانیسم توضیح داد: اول، عدم همخوانی فضایی و یکنواختی نسبی شاخص‌های پوشش گیاهی و سطوح نفوذناپذیر در برخی پهنه‌های اصفهان موجب کاهش متغیرپذیری مکانی این پارامترها شده است؛ دوم، در بستر سیاست‌گذاری محلی، اولویت‌های درآمدزایی شهرداری و فشار توسعه مسکن (تراکم‌فروشی) ممکن است تصمیمات مکانی را طوری سوق دهد که اثرات زیست‌محیطی بالقوه تراکم، در عمل کمرنگ شود؛ این توضیح با یافته‌های (Cobbinah et al., 2025; Shatkin, 2017) که فروش تراکم را به عنوان محرک نابرابری و ناپایداری در شهرهای درحال توسعه معرفی می‌کنند سازگار است. از این‌رو، اختلاف ظاهری با برخی مطالعات زیست‌محیطی بیشتر ناشی از اهمیت مداخله نهادی - سیاستی و تفاوت در مقیاس/پراکندگی متغیرها است تا تناقض نظری واقعی. یافته دیگر برجسته پژوهش حاضر، ظرفیت قوی شاخص CDFI برای افشای نواحی «هماهنگ» و «ناهماهنگ» در توزیع تراکم است؛ این خروجی هم‌زمان با مطالعات نظری درباره ناهمگنی و مسیرهای بازخورد تاریخی تولید تراکم هم‌جهت است

(Bertaud, 2018; Zheng, 2023). از منظر مقایسه با مطالعات داخلی، مشاهدات در اصفهان از جمله نقش تعیین‌کننده مناطق ۴ و ۶ در داشتن CDFI بالا و انسجام فضایی با نتایج پژوهش‌های نیک‌پور و همکاران (۲۰۲۲) و علیزاده و اصغری زمانی (۲۰۲۱) هم‌راستا است؛ آن‌ها نیز نشان داده‌اند تمرکز سیاست‌ها و بازار در برخی نواحی، الگوهای خوشه‌ای تراکمی تولید می‌کند. بنابراین یافته‌های پژوهش، این ادبیات را تأیید و تقویت می‌کند و در عین حال با ارائه فرمول‌بندی وزنی و تلفیقی (رابطه CDFI) امکان استخراج آستانه‌های سیاستی را می‌دهد؛ امری که مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته‌اند. در قالب تبیین علی، می‌توان گفت که الگوی تراکم در اصفهان محصولی از سه بسته هم‌پوشان است: توان شبکه‌های دسترسی‌پذیری (شبکه معابر و ترانزیت)، کارکرد و ترکیب فضایی فعالیت‌ها (اختلاط کاربری) و مشوق‌های نهادی - اقتصادی (فروش تراکم و ساختار درآمدی شهرداری). این ترکیب علی با شواهد نظری موجود در ادبیات ترکیب حکمروایی شهری، اقتصاد زمین و مطالعات فضایی هم‌راستا است و تبیین می‌کند چرا در برخی پهنه‌ها ملاحظات زیست‌محیطی نتوانسته‌اند تأثیر قاطعی بر تصمیمات توسعه‌ای داشته باشند؛ زیرا محرک‌های اقتصادی و ساختاری قوی‌تر هستند (Shatkin, 2017; Cobbinah et al., 2025). از منظر روش‌شناختی، توانایی مدل تلفیقی حاضر (اقتصادسنجی فضایی + MGWR + PCA + شیه‌سازی EUM/CA-ABM) در آشکارسازی ناهمگنی مکانی و آستانه‌های غیرخطی یک دستاورد روشن است که محدودیت‌های مدل‌های خطی - کلان را رفع می‌کند؛ این نتیجه ضمن اشاره به بهره‌گیری از روش‌های چندمنبعی و چندمقیاسی در ادبیات (Zheng, 2023; Fotheringham & Li, 2023) همخوانی و نشان می‌دهد تحلیل‌های سیاست‌محور باید مبتنی بر ابزارهایی باشند که هم ناهمگنی مکانی و هم تعاملات بین‌بخشی را لحاظ کنند. در مجموع با توجه به مطالب یادشده، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مسئله تراکم ساختمانی و فرم شهری را نمی‌توان در قالب روابط خطی، یک‌بعدی و مقطعی فهمید. یافته‌های کمی و کیفی این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد پویایی‌های فضایی کلان‌شهر اصفهان برآیند یک «سیستم پیچیده تطبیق‌پذیر» است که در آن شاخص‌های کالبدی، اقتصادی - اجتماعی، نهادی و محیطی در قالب شبکه‌های درهم‌تنیده و با وابستگی متقابل شدید عمل می‌کنند. تدوین و محاسبه شاخص ترکیبی CDFI که توانسته است ۶۹/۷۴ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین کند، نه تنها صحت این فرضیه را تأیید می‌کند، بلکه نشان‌دهنده شکست رویکردهای متداول در مدل‌سازی پدیده‌های شهری است. مقایسه نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین در شهرهای ایرانی همچون تهران، تبریز و همدان، حاکی از وجود الگویی مشابه از ناهمگنی فضایی است؛ الگویی که ریشه در «واماندگی نهادی» و «شکاف دانشی» بین نظام برنامه‌ریزی و واقعیت‌های پویای شهری دارد. در سطح نظری، این پژوهش نشان می‌دهد مفهوم FAR در بستر شهرهای درحال توسعه‌ای مانند اصفهان، ماهیتی «چندوجهی» و «تضادآلود» دارد. از یک سو، به عنوان ابزاری فنی برای تنظیم توسعه کالبدی تعریف می‌شود، و از سوی دیگر، به مکانیسمی برای «انباشت سرمایه» و «درآمدزایی کوتاه‌مدت» بدل شده است. این دوگانگی ذاتی، به شکل‌گیری «منطق فضایی معیوب» منجر شده که در آن توزیع تراکم نه بر اساس ملاحظات پایداری، عدالت فضایی و کارایی عملکردی، بلکه تحت تأثیر فشار بازار زمین و کسری بودجه شهرداری‌ها صورت

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول ۷۰ درصد، نویسنده دوم ۱۵ درصد و نویسنده سوم ۱۵ درصد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از رساله نویسنده اول با عنوان «تبیین و ارائه الگوی مناسب تراکم ساختمانی در شهر اصفهان» به راهنمایی نویسنده دوم و سوم در پردیس البرز دانشگاه تهران است. نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به ویژه کسانی که در ارزیابی کیفیت مقاله نقش داشتند، تشکر و قدردانی می‌کنند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

- Abrego, N., & Ovaskainen, O. (2023). Evaluating the predictive performance of presence-absence models: Why can the same model appear excellent or poor? *Ecology and Evolution*, 13(12), e10784. <https://doi.org/10.1002/ece3.10784>
- Ahmed, Z. U., Sun, K., Shelly, M., & Mu, L. (2021). Explainable artificial intelligence (XAI) for exploring spatial variability of lung and bronchus cancer (LBC) mortality rates in the contiguous USA. *Scientific reports*, 11(1), 24090. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03198-8>
- Ahn, Y., Leyk, S., Uhl, J. H., & McShane, C. M. (2024). An integrated multi-source dataset for measuring settlement evolution in the United States from 1810 to 2020. *Scientific data*, 11(1), 275. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03081-x>
- Alizadeh S., & Asghari-Zamani A. (2021). Investigation of Changes in Construction Density in Iranian Metropolitan Cities (Case Study: Zafaranieh Neighborhood, Tabriz Metropolis). *Economic Geography Research*, 2(5): 15–31. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27173747.1400.3.2.2.3> [In Persian].
- Angel, S., Lamson-Hall, P., & González-Blanco, Z. (2021). Anatomy of density: Measurable factors that constitute urban density. *Buildings & Cities*, 2(1), 264–282. <https://doi.org/10.5334/bc.91> journal-buildingscities.org
- Asghari Zamani A., & Alizadeh S. (2021). Investigating the Relationship between Decreasing Building Life and Increasing Regional Value in Tabriz Metropolis (Case Study of Zafaranieh Town). *Urban Environmental Planning and Development*, 1(4): 41-56. <https://dori.net/dor/20.1001.1.27833496.1400.1.4.4.8> [In Persian].
- Baqaei M., Ziyari Y., Zarabadi Z., Sadat S., & Majedi H. (2021). Evaluation and Explanation of a Sustainable Urban Design Model Based on a Density-Oriented Approach in Urban Fabric (Case Study: District 2 of Tehran). *Geographical Studies (Regional Planning)*, 11(4): 261–285. https://www.jgeoqeshm.ir/article_136682.html [In Persian].
- Bertaud, A. (2018). Order without design: How markets shape cities. MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/10671.001.0001>

می‌پذیرد. نتایج کمی این پژوهش که بیانگر ناهمگونی شدید فضایی در توزیع شاخص CDFI بین مناطق ۱۵ گانه اصفهان است (از ۰/۵۰۳ در منطقه ۱۴ تا ۰/۹۰۰ در منطقه ۴)، تجلی عینی همین منطق معیوب است. منطقه ۴ با برخورداری از بالاترین میزان پیچیدگی فضایی (CDFI=0.900)، نمونه‌ای از تلفیق نسبتاً موفق تراکم، اختلاط کاربری و دسترسی است، در حالی که مناطق حاشیه‌ای‌تر با CDFI پایین، نشان‌دهنده شکست نظام برنامه‌ریزی در ایجاد توسعه متوازن هستند. از منظر روش‌شناختی، نوآوری این تحقیق در ارائه «خط لوله تحلیلی - شبیه‌سازی» یکپارچه است که سه عرصه کلان را پوشش می‌دهد: تحلیل اقتصادسنجی فضایی برای استخراج روابط علی، مدل‌سازی ناهمگنی مکانی برای درک تفاوت‌های محلی، و سناریوسازی پویا برای پیش‌بینی پیامدهای سیاست‌ها. این چارچوب ترکیبی، پاسخی مستقیم به شکاف‌های روش‌شناختی در ادبیات داخلی است که عمدتاً در دام توصیف‌گرایی، خطی‌نگری و غفلت از اثرات سرریز فضایی گرفتار آمده‌اند. کاربست موفقیت‌آمیز روش‌هایی مانند MGWR و تحلیل مؤلفه‌های اصلی در این پژوهش، اثبات می‌کند که «وابستگی مکانی» و «مقیاس‌پذیری» مفاهیمی انتزاعی نیستند، بلکه واقعیاتی هستند که باید در قلب مدل‌های تصمیم‌گیری شهری جای گیرند. در عرصه عمل، یافته‌های این پژوهش حامل یک «دکترین جدید» برای مدیریت شهری در ایران است: عبور از «برنامه‌ریزی متمرکز و یکسان‌ساز» به سمت «سیاست‌گذاری هوشمند محل‌محور». نقشه نهایی شاخص CDFI برای اصفهان به وضوح نشان می‌دهد هر منطقه شهری «امضای فضایی» منحصر به فرد خود را دارد و نیازمند بسته سیاستی خاص خود است. برای مناطق با CDFI بالا (مانند مناطق ۴ و ۶)، سیاست‌ها باید بر «حفظ انسجام» و «ارتقای کیفیت» متمرکز باشد، در حالی که برای مناطق با CDFI پایین (مانند مناطق ۱۴ و ۱۵)، «بازآفرینی ساختاری» و «جبران محرومیت» باید در اولویت قرار گیرد. این پژوهش به صورت مشخص نشان می‌دهد حل معضل تراکم‌فروشی مستلزم «چندگانگی درامدی» برای شهرداری‌ها و «تفکیک نهادی» بین وظیفه تنظیم‌گری و درآمدزایی است. افق‌های نوینی که این پژوهش می‌گشاید، فراتر از کلان‌شهر اصفهان، برای سایر شهرهای ایران نیز راهگشا است. اول، ضرورت گذار از «داده‌های مقطعی» به «پایگاه‌های داده فضایی - زمانی» که امکان ردیابی پویایی‌های شهری را طی زمان فراهم می‌کند. دوم، تلفیق هرچه بیشتر «تحلیل‌های کمی» با «روش‌های کیفی» برای درک ابعاد اجتماعی و ادراکی تراکم، سوم، توسعه «پلتفرم‌های تصمیم‌یار» مبتنی بر هوش مصنوعی که بتواند سناریوهای مختلف سیاستی را به صورت بلادرنگ شبیه‌سازی و ارزیابی کند. در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند که آینده پایدار کلان‌شهرهای ایران در گرو پذیرش «پیچیدگی» به عنوان ذات ذاتی پدیده شهری و جایگزینی «عقلانیت سیستمی» به جای «عقلانیت جزیره‌ای» حاکم بر نظام برنامه‌ریزی کنونی است. تنها از این رهگذر است که می‌توان از تراکم ساختمانی، نه به عنوان یک مشکل، بلکه به عنوان یک فرصت برای خلق شهرهای عادلانه‌تر، تاب‌آورتر و انسانی‌تر بهره جست.

- Bueno, M., Macera, B., & Montoya, N. (2023). A comparative analysis of machine learning techniques for national glacier mapping: Evaluating performance through spatial cross-validation in Perú. *Water*, 15(24), 4214. <https://doi.org/10.20944/preprints202310.0862.v1>
- Cao, Q., Chen, J., Zhao, J., & Stouffs, R. (2025). From Heuristics to Data: Quantifying Site Planning Layout Indicators with Deep Learning and Multi-Modal Data. *arXiv preprint arXiv:2508.11723*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.11723>
- Cheshmehzangi, A., & Dawodu, A. (2021). Towards a sustainable energy planning strategy: The utilisation of floor area ratio for residential community planning and design in China. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3, 687895. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.687895>
- Christen, P., & Churches, T. (2005, April). A probabilistic deduplication, record linkage, and geocoding system. In *Proceedings of the Australian Research Council Health Data Mining Workshop: Canberra, AU*. <https://www.semanticscholar.org/paper/70a-4d632a60edbce67cc787812e7e425995552>
- Cobbinah, P. B., & Finn, B. M. (2025). On Pedestrian Accessibility: Spatial Justice and Progressive Planning in African Cities. *Journal of Planning Literature*, 40(2), 170-184. <https://doi.org/10.1177/08854122241240071>
- Dehqani H. (2019). Typology of 15 Urban Districts of Isfahan with Emphasis on Social Problems in Extremely Vulnerable Neighborhoods. *Applied Sociology*, 30(2): 117–136. <https://doi.org/10.1001/1.20085745.1398.30.2.8.2> [In Persian].
- Edwards, S. E., Strauss, B., & Miranda, M. L. (2014). Geocoding large population-level administrative datasets at highly resolved spatial scales. *Transactions in GIS*, 18(4), 586-603. <https://doi.org/10.1111/tgis.12052>
- Fainstein, S. S. (2014). The just city. *International journal of urban Sciences*, 18(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10901-011-9243-8>
- Fan, C., Yang, Y., & Mostafavi, A. (2021). Neural embeddings of urban big data reveal emergent structures in cities. *arXiv preprint arXiv:2110.12371*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.12371>
- Fauzi, C. (2020). Pengembangan Sistem Informasi Geografis Menggunakan YWDM Dalam Perencanaan Tata Ruang. *J-SAKTI (Jurnal Sains Komputer dan Informatika)*, 4(2), 598-607. <https://doi.org/10.30645/J-SAKTI.V4I2.252>
- Fotheringham, A. S., & Li, Z. (2023). Measuring the unmeasurable: models of geographical context. *Annals of the American Association of Geographers*, 113(10), 2269-2286. <https://doi.org/10.1080/24694452.2023.2227690>
- Fotheringham, A. S., Oshan, T. M., & Li, Z. (2023). Multiscale geographically weighted regression: Theory and practice. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003435464>
- Gao, X., Asami, Y., & Katsumata, W. (2006). Evaluating land-use restrictions concerning the floor area ratio of lots. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 24(4), 515-532. <https://doi.org/10.1068/c0531>
- Goldberg, D. W., Wilson, J. P., & Knoblock, C. A. (2007). From text to geographic coordinates: The current state of geocoding. *URISA journal*, 19(1), 33-46. <https://www.semanticscholar.org/paper/26f64bcacac4a64693ffe76d2e894ae6bfc88e36>
- Ha, J., Lee, S., & Park, C. (2016). Temporal effects of environmental characteristics on urban air temperature: The influence of the sky view factor. *Sustainability*, 8(9), 895. <https://doi.org/10.3390/SU8090895>
- Hassani K., & Taban M. (2022). The Importance of Building Density in Reducing Urban Air Pollution (Case Study: Arak City). *Geography and Urban Space Development*, 9(1): 93–108. <https://doi.org/10.1001/1.25383531.1401.9.1.6.7> [In Persian].
- Huang, Y., Li, S., Lin, J., Zheng, L., Zhuang, C., Guan, C., & Zhuang, Y. (2025). Nonlinear and threshold effects of urban building form on carbon emissions. *Energy and Buildings*, 329, 115243. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115243>
- Isfahan Municipality, Statistical Yearbook of Isfahan City (2016). Deputy for Planning, Research, and Information Technology of Isfahan Municipality, Cultural and Recreational Organization of Isfahan Municipality. <https://www.isfahan.ir/> [In Persian].
- Isfahan Provincial Governor's Office. (2012–2022). *Statistical Yearbook of Isfahan Province*. Isfahan: Office of Statistics and Information. <https://ostan-es.ir/> [In Persian].
- Jenks, M., & Burgess, R. (2000). Compact cities: Sustainable urban forms for developing countries. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203478622>
- Jiao, J., Rollo, J., & Fu, B. (2021). The hidden characteristics of land-use mix indices: An overview and validity analysis based on the land use in Melbourne, Australia. *Sustainability*, 13(4), 1898. <https://doi.org/10.3390/su13041898>
- Jr, s., & Xm, z. (2013). A quantification analysis of suburban land use and construction intensity based on AFAR: A case of the land development around Zijiang campus, Zhejiang University. *Lowland Technology International*, 15(2), 56-65. https://doi.org/10.14247/LTI.15.2_56
- Jung, S., & Yoon, S. (2021). Analysis of the effects of floor area ratio change in urban street canyons on microclimate and particulate matter. *Energies*, 14(3), 714. <https://doi.org/10.3390/en14030714>
- Karn, P. L., & Park, J. (2022). Affordable housing for low-income households through floor area ratio incentive: the case of Manohara settlement in Kathmandu, Nepal. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 14(1), 304-318. <https://doi.org/10.1080/19463138.2022.2103823>
- Lalehpour M., Esmailpour M., & Pahlevani F. (2021). Analysis of the Physical Development of Khorramabad City with Emphasis on Indicators of Inner-City Development. *Journal of Human Settlement Planning Studies*, 16(4): 919–934. http://jshsp.iaurasht.ac.ir/article_684070.html [In Persian].
- Lam, C. J., Schram, R. J. C., & Vennemann, F. B. (2024). A walk across Europe: Development of a high-resolution walkability index. Preprint. (Arch. Pub. Data Sci.) arxiv.org
- Li, L., Yang, X., & Qian, Y. (2018). CFD simulation analysis of the influence of floor area ratio on the wind environment in residential districts. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 11(5). 185-192. <https://doi.org/10.25103/jestr.115.24>
- Li, Z., Jiao, L., Zhang, B., Xu, G., & Liu, J. (2021). Understanding the pattern and mechanism of spatial concentration of urban land use, population, and economic activities: A case study in Wuhan, China. *Geo-Spatial Information Science*, 24(4), 678-694. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1978276>
- Liu, D., & Shi, Y. (2022). The influence mechanism of urban spatial structure on urban vitality based on geographic big data: A case study in downtown Shanghai. *Buildings*, 12(5), 569. <https://doi.org/10.3390/buildings12050569>
- Liu, T. (2023). Explaining China's housing vacancies: A theory based on the incentives of local government officials. *Journal of Government and Economics*, 10, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.jge.2023.100077>
- Lu, Q., Ning, J., You, H., & Xu, L. (2023). Urban intensity in theory and practice: Empirical determining mechanism of floor area ratio and its deviation from the classic location theories in Beijing. *Land*, 12(2), 423. <https://doi.org/10.3390/land12020423>
- Lu, Z., Zhang, H., Southworth, F., & Crittenden, J. (2016). Fractal dimensions of metropolitan area road networks and the impacts on the urban built environment. *Ecological indicators*, 70, 285-

296. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.016>
- Ma, R., Li, X., & Chen, J. (2021). An elastic urban morpho-blocks (EUM) modeling method for urban building morphological analysis and feature clustering. *Building and Environment*, 192, 107646. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107646>
- Mahoney, M. J., Johnson, L. K., Silge, J., Frick, H., Kuhn, M., & Beier, C. M. (2023). Assessing the performance of spatial cross-validation approaches for models of spatially structured data. *arXiv preprint arXiv:2303.07334*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.07334>
- Mishra, U., Gautam, S., Riley, W. J., & Hoffman, F. M. (2020). An ensemble machine learning approach improves predicted spatial variation of surface soil organic carbon stocks in data-limited northern circumpolar regions. *Frontiers in Big Data*, 3, 528441. <https://doi.org/10.3389/fdata.2020.528441>
- Mohammadpour-Chabaki H., & Hassanpour R. (2022). Analysis of the Consequences of Selling Surplus Building Density in District 2 of Tehran. *Human Settlement Planning Studies*, 18(17): 829–842. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385968.1401.17.3.4.8> [In Persian].
- Mokhtari L., Karimi-Nia Sh., & Kian-Arthi M. (2021). Typology of General Form and Relative Density of Residential Buildings in Tehran from the Perspective of Climatic Performance and Energy-Consumption Optimization. *Naghsh-e-Jahan—Journal of Architecture and Urbanism*, 11(4): 60–78. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.4.5.4> [In Persian].
- Neuman, M. (2005). The compact city fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, 25(1), 11–26.
- Nikpour A., Mohammadiyari B., & Soleimani M. (2022). Spatial Modeling of Factors Influencing Building Density (Case Study: Hamedan City). *Spatial Planning*, 12(2): 27–46. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22287485.1401.12.2.1.3> [In Persian].
- Nouraei H., & Shamohammadi M. (2021). Exploring the Relationship between Housing Unit Density and Indoor Environmental Quality in Residential Complexes (Case Study: Sepahan Shahr, Isfahan). *Soffeh*, 31(1): 53–68. <https://doi.org/10.29252/soffeh.31.1.53> [In Persian].
- Peng, Y., Liu, J., Zhang, T., & Li, X. (2021). The relationship between urban population density distribution and land use in Guangzhou, China: A spatial spillover perspective. *International journal of environmental research and public health*, 18(22), 12160. <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/22/12160#>
- Pohjankukka, J., Pahikkala, T., Nevalainen, P., & Heikkonen, J. (2017). Estimating the prediction performance of spatial models via spatial k-fold cross-validation. *International Journal of Geographical Information Science*, 31(10), 2001–2019. <https://doi.org/10.1080/013658816.2017.1346255>
- Reba, M., Reitsma, F., & Seto, K. C. (2016). Spatializing 6,000 years of global urbanization from 3700 BC to AD 2000. *Scientific data*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.34>
- Shatkin, G. (2017). *Cities for profit: The real estate turn in Asia's urban politics*. Cornell University Press.
- Shebek, N., & Mayer, V. (2025). Technologies of geoinformatic modeling for spatial objects. *Urban Development and Spatial Planning*. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.286-301>
- Shi, Z., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2021). Floor area density and land uses for efficient district cooling systems in high-density cities. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102601. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102601>
- Sonderman, J. S., Mumma, M. T., Cohen, S. S., Cope, E. L., Blot, W. J., & Signorello, L. B. (2012). A multi-stage approach to maximizing geocoding success in a large population-based cohort study through automated and interactive processes. *Geospatial health*, 6(2), 273. <https://doi.org/10.4081/GH.2012.145>
- Song, C., Deng, Z., Zhao, W., Yuan, Y., Liu, M., Xu, S., & Chen, Y. (2024). Developing urban building energy models for Shanghai City with multi-source open data. *Sustainable Cities and Society*, 106, 105425. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.035>
- Statistical Center of Iran. (2016). General Census of Population and Housing: Urban Areas Results of Isfahan Province. [In Persian].
- Stock, A. (2025). Choosing blocks for spatial cross-validation: lessons from a marine remote sensing case study. *Frontiers in Remote Sensing*, 6, 1531097. <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1531097>
- Tao, Z., Cheng, Y., & Liu, J. (2020). Hierarchical two-step floating catchment area (2SFCA) method: Measuring the spatial accessibility to hierarchical healthcare facilities in Shenzhen, China. *International Journal for Equity in Health*, 19, 164. <https://doi.org/10.1186/s12939-020-01280-7> equityhealth.biomedcentral.com
- U.S. Environmental Protection Agency. (2021). Smart Location Database: Sample variables. https://www.epa.gov/smartgrowth/smart-location-mapping_epa.gov
- U.S. Geological Survey. (2024). Landsat Normalized Difference Vegetation Index. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index_usgs.gov
- Wurm, M., Goebel, J., Wagner, G. G., Weigand, M., Dech, S., & Taubenböck, H. (2021). Inferring floor area ratio thresholds for the delineation of city centers based on cognitive perception. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(2), 265–279. https://doi.org/10.1177/2399808319869341?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate
- Yu, X. (2024). Low-rise buildings in big cities: Theory and evidence from China. *Real Estate Economics*, 52(2), 366–400. <https://doi.org/10.1111/1540-6229.12476>
- Zangeneh-Shahraki S., Hamidi A., & Ghorbani R. (2023). Analyzing the Impact of Sanctions on the Urban Housing Sector of Rentier Governments (Case Study: Iranian Cities). *IUESA*, 11(44): 199–225. <http://iueam.ir/article-1-2072-fa.html> [In Persian].
- Zhang, R., Casanovas, M. M., González, M. B., & Sun, S. (2024). Revitalizing heritage: The role of urban morphology in creating public value in China's historic districts. *Land*, 13(11), 1919. <https://doi.org/10.3390/land13111919> mdpi.com
- Zheng, S. (2023). FAR, BCR, and urban energy modeling in Jinan. *Energy and Buildings*, 285, 112951.

