

Optimizing the Location and Typology of Healthcare Centers through an Integrated Machine Learning and Urban Morphology Approach: A Case Study of Borujerd City

1. Saeideh Ravanmard[✉]: Department of Architecture, Bo.C., Islamic Azad University, Borujerd, Iran

2. Mohammad Jalili^{✉*}: Department of Architecture, Bo.C., Islamic Azad University, Borujerd, Iran.

3. Farhad Karvan[✉]: Department of Architecture, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran

4. Hossein Yarahmadi[✉]: Department of Computer Engineering, Bo.C., Islamic Azad University, Borujerd, Iran

*Corresponding Author's Email Address: Mohammad.jalili@iau.ac.ir

How to Cite: Ravanmard, S., Jalili, M., Karvan, F., & Yarahmadi, H. (2026). Optimizing the Location and Typology of Healthcare Centers through an Integrated Machine Learning and Urban Morphology Approach: A Case Study of Borujerd City. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 4(4), 1-26.

Abstract:

This study aimed to optimize the location and typology of healthcare centers in Borujerd by integrating machine learning algorithms, geographic information system analyses, and urban morphological indicators. This applied study employed a descriptive–analytical spatial design. The expert population comprised 30 specialists in urban planning, geography and geographic information systems, and healthcare services management, selected through purposive sampling. The study area was divided into 50 × 50-meter grid cells, and 2,400 balanced spatial points, including 1,200 suitable and 1,200 unsuitable points, were extracted for modeling. The variables included healthcare service shortage, population density, network travel time, street configuration, land-use mix, block size, and urban permeability. Nearest-neighbor analysis, global Moran's I, network analysis, support vector machine, random forest, extreme gradient boosting, and a weighted ensemble model were applied. The overall nearest-neighbor ratio was 0.68, with a Z value of -5.62, indicating a significant clustered distribution ($p < 0.001$). Global Moran's I was 0.39 and statistically significant ($p < 0.001$). The weighted ensemble model achieved the strongest performance, with a testing accuracy of 0.932, sensitivity of 0.936, specificity of 0.928, F1 score of 0.932, kappa coefficient of 0.864, and area under the curve of 0.976. Model–expert agreement was confirmed by a kappa coefficient of 0.817, while the correlation between their rankings was 0.862 ($p < 0.001$). Implementing the proposed scenario increased favorable healthcare coverage from 72.13% to 89.46%. Integrating machine learning with urban morphology provided an accurate, interpretable, and stable framework for identifying priority areas and assigning appropriate healthcare facility types, thereby contributing to reduced spatial inequality and improved healthcare accessibility in Borujerd.

Keywords: Healthcare facility location, machine learning, urban morphology, spatial equity, geographic information system, Borujerd.

Received: 07 April 2026

Revised: 25 August 2026

Accepted: 02 September 2026

Initial Publication: 09 September 2026

Final Publication: 22 December 2026



بهینه‌سازی مکان‌یابی و گونه‌شناسی مراکز درمانی با رویکرد تلفیقی یادگیری ماشین و ریخت‌شناسی شهری: مطالعه موردی شهر بروجرد

۱. سعیده روان مرد^{ID}: گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

۲. محمد جلیلی^{ID}*: گروه معماری، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران. (نویسنده مسئول)

۳. فرهاد کاروان^{ID}: گروه معماری، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

۴. حسین یاراحمدی^{ID}: گروه مهندسی کامپیوتر، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: Mohammad.jalili@iau.ac.ir

نحوه استناددهی: روان مرد، سعیده، جلیلی، محمد، کاروان، فرهاد، و یاراحمدی، حسین. (۱۴۰۵). بهینه‌سازی مکان‌یابی و گونه‌شناسی مراکز درمانی با رویکرد تلفیقی یادگیری ماشین و ریخت‌شناسی شهری: مطالعه موردی شهر بروجرد. *تجلی هنر در معماری و شهرسازی*، ۴(۴)، ۱-۲۶.

چکیده

هدف پژوهش حاضر، بهینه‌سازی مکان‌یابی و گونه‌شناسی مراکز درمانی شهر بروجرد از طریق تلفیق الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و شاخص‌های ریخت‌شناسی شهری بود. این پژوهش کاربردی با طرح توصیفی-تحلیلی و رویکرد فضایی انجام شد. جامعه تخصصی شامل ۳۰ نفر از متخصصان برنامه‌ریزی شهری، جغرافیا و سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدیریت خدمات بهداشتی و درمانی بود که به روش هدفمند انتخاب شدند. محدوده شهر به سلول‌های 50×50 متر تقسیم و ۲۴۰۰ نقطه فضایی متوازن، شامل ۱۲۰۰ نقطه مناسب و ۱۲۰۰ نقطه نامناسب، برای مدل‌سازی استخراج شد. متغیرها شامل کمبود خدمات، تراکم جمعیت، زمان دسترسی شبکه‌ای، ساختار معابر، اختلاط کاربری، اندازه بلوک و نفوذپذیری بافت بودند. از تحلیل نزدیک‌ترین همسایه، موران جهانی، تحلیل شبکه، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، تقویت گرادیانی حدی و مدل تلفیقی وزن‌دار استفاده شد. نسبت نزدیک‌ترین همسایه برای کل مراکز ۰.۶۸ و مقدار Z برابر با -۵.۶۲ بود که الگوی خوشه‌ای معناداری را نشان داد ($p < 0.001$). شاخص موران جهانی نیز برابر با ۰.۳۹ و معنادار بود ($p < 0.001$). مدل تلفیقی با صحت آزمون ۰.۹۳۲، حساسیت ۰.۹۳۶، ویژگی ۰.۹۲۸، امتیاز F۱ برابر با ۰.۹۳۲، کاپای ۰.۸۶۴ و سطح زیر منحنی ۰.۹۷۶ بهترین عملکرد را داشت. توافق مدل و متخصصان با کاپای ۰.۸۱۷ تأیید شد و همبستگی رتبه‌بندی آنها ۰.۸۶۲ بود ($p < 0.001$). اجرای سناریوی پیشنهادی، پوشش مطلوب را از ۷۲.۱۳ درصد به ۸۹.۴۶ درصد افزایش داد. تلفیق یادگیری ماشین و ریخت‌شناسی شهری چارچوبی دقیق، تفسیرپذیر و پایدار برای شناسایی پهنه‌های اولویت‌دار و تعیین گونه مناسب مراکز درمانی فراهم کرد و می‌تواند به کاهش نابرابری فضایی و بهبود دسترسی درمانی در بروجرد کمک کند.

کلیدواژگان: مکان‌یابی مراکز درمانی، یادگیری ماشین، ریخت‌شناسی شهری، عدالت فضایی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، بروجرد.

تاریخ دریافت: ۱۸ فروردین ۱۴۰۵

تاریخ بازنگری: ۳ شهریور ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۱ شهریور ۱۴۰۵

اولین انتشار: ۱۸ شهریور ۱۴۰۵

انتشار نهایی: ۱ دی ۱۴۰۵



مقدمه

مراکز درمانی از بنیادی‌ترین اجزای زیرساخت‌های شهری به شمار می‌روند و نحوه توزیع، سلسله‌مراتب عملکردی، ظرفیت و مکان استقرار آنها تأثیری مستقیم بر سلامت عمومی، عدالت اجتماعی، تاب‌آوری شهری و کیفیت زندگی شهروندان دارد. دسترسی به خدمات درمانی صرفاً به وجود یک مرکز در محدوده شهر وابسته نیست، بلکه فاصله، زمان سفر، کیفیت شبکه معابر، ظرفیت مرکز، نوع خدمات، تراکم و ویژگی‌های جمعیت تحت پوشش و امکان پاسخ‌گویی مرکز در شرایط عادی و بحرانی نیز در آن نقش دارند. از این رو، مکان‌یابی مراکز درمانی را نمی‌توان به انتخاب قطعه‌ای دارای مساحت کافی یا مجاورت با یک خیابان اصلی تقلیل داد؛ بلکه این فرایند مسئله‌ای چندبعدی است که باید هم‌زمان ابعاد فضایی، اجتماعی، جمعیتی، کالبدی، عملکردی، محیطی و مدیریتی را در نظر بگیرد. مطالعات مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی در شهرهای ایران نیز نشان داده‌اند که تمرکز خدمات پزشکی در بخش‌های خاص شهر و ضعف دسترسی در نواحی پیرامونی می‌تواند به شکل‌گیری نابرابری فضایی در بهره‌مندی از خدمات سلامت منجر شود (1). بنابراین، برنامه‌ریزی کارآمد شبکه درمانی مستلزم عبور از رویکردهای ایستا و تک‌معیاره و حرکت به سوی روش‌هایی است که بتوانند روابط پیچیده میان تقاضای جمعیتی، ساختار فضایی شهر و ظرفیت عرضه خدمات را آشکار کنند.

اهمیت مکان‌یابی مراکز درمانی هنگامی بیشتر آشکار می‌شود که پیامدهای تأخیر در دریافت مراقبت پزشکی مورد توجه قرار گیرد. فاصله زیاد، ازدحام شبکه معابر، توزیع نامتوازن مراکز و نبود تناسب میان نوع مرکز و نیاز جمعیت می‌تواند موجب طولانی‌شدن زمان دسترسی، افزایش هزینه سفر، تشدید فشار بر مراکز موجود و کاهش احتمال دریافت به‌موقع خدمات شود. در بسیاری از وضعیت‌های بالینی، نتیجه درمان نه‌تنها به کیفیت مداخله پزشکی، بلکه به زمان مراجعه، شدت بیماری، شرایط اولیه بیمار و دسترسی به امکانات تخصصی وابسته است. بررسی مرگ‌ومیر بیمارستانی و بلندمدت پس از جراحی‌های غیرقلبی نیز نشان داده است که ارزیابی خطر، شرایط بالینی و کیفیت مراقبت بیمارستانی در پیامدهای بیماران اهمیت اساسی دارند (2). هرچند برنامه‌ریزی فضایی نمی‌تواند جایگزین کیفیت بالینی شود، می‌تواند با کاهش زمان دسترسی، توزیع منطقی ظرفیت‌ها و هدایت بیماران به سطح مناسب خدمات، بستر لازم برای اثربخشی بیشتر مراقبت‌های درمانی را فراهم سازد. در نتیجه، عدالت در سلامت بدون عدالت فضایی در توزیع مراکز، به‌ویژه در شهرهای در حال گسترش، به‌طور کامل تحقق نخواهد یافت. پیچیدگی برنامه‌ریزی مراکز درمانی از تنوع نیازهای سلامت و تفاوت چشمگیر میان گونه‌های خدماتی ناشی می‌شود. بیمارستان عمومی، بیمارستان تخصصی، درمانگاه، مرکز خدمات جامع سلامت، پایگاه سلامت، مرکز فوریت‌های پزشکی و مرکز تشخیصی-درمانی، از نظر شعاع عملکرد، جمعیت هدف، سطح تخصص، تجهیزات، الگوی مراجعه، نیاز به دسترسی و الزامات کالبدی یکسان نیستند. برخی خدمات تخصصی به تمرکز تجهیزات و نیروی انسانی ماهر نیاز دارند، درحالی‌که خدمات اولیه باید به‌صورت گسترده و نزدیک به محل سکونت جمعیت توزیع شوند. برای نمونه، دستورالعمل‌های تخصصی مربوط به تشخیص، درمان و پیگیری تومورهای استرومال دستگاه گوارش نشان می‌دهند که مراقبت از برخی بیماری‌ها مستلزم زنجیره‌ای هماهنگ از تشخیص، درمان تخصصی و پیگیری مستمر است (3). همچنین، شناخت فزاینده از نقش زیست‌لایه‌های دستگاه گوارش در سلامت و بیماری، پیچیدگی نیازهای تشخیصی و درمانی و ضرورت پیوند میان خدمات آزمایشگاهی، تشخیصی، تخصصی و پژوهشی را برجسته می‌کند (4). بنابراین، مکان‌یابی مراکز درمانی باید با گونه‌شناسی آنها همراه باشد؛ زیرا انتخاب یک مکان مناسب بدون تعیین نوع مرکز موردنیاز ممکن است به ایجاد ظرفیت نامتناسب، تکرار خدمات موجود یا استمرار خلأهای درمانی منجر شود.

گونه‌شناسی ساختمان‌ها و فضاهای خدماتی سابقه‌ای مهم در مطالعات معماری و شهرسازی دارد. گونه‌های ساختمانی تنها بر مبنای شکل ظاهری از یکدیگر متمایز نمی‌شوند، بلکه محصول تعامل میان عملکرد، فناوری ساخت، سازمان فضایی، ساختار اجتماعی و تحولات تاریخی‌اند. مطالعه تاریخ گونه‌های ساختمانی نشان می‌دهد که هر نوع بنا در پاسخ به مجموعه‌ای از نیازهای عملکردی و شرایط اجتماعی و فناورانه شکل گرفته و در طول زمان متحول شده است (5). در مورد مراکز درمانی نیز گونه کالبدی و عملکردی باید با سطح خدمت، حجم مراجعه، قلمرو پوشش، شیوه دسترسی، تجهیزات مورد نیاز و ویژگی‌های محیط پیرامون متناسب باشد. از سوی دیگر، شهروند معاصر در شبکه‌ای پیچیده از فضاها، زیرساخت‌ها، خدمات و جریان‌های شهری زندگی می‌کند و کیفیت تجربه او از شهر به نحوه سازمان‌یابی این شبکه وابسته است. مفهوم انسان شهری بر پیوند عمیق میان زندگی انسان و ساختارهای فضایی، فرهنگی و عملکردی شهر تأکید دارد (6). بر این مبنای، مرکز درمانی نباید عنصری منفرد و جدا افتاده تلقی شود، بلکه باید به‌عنوان بخشی از نظام یکپارچه زندگی شهری و مرتبط با محلات، شبکه حمل‌ونقل، مراکز جمعیتی و سایر خدمات عمومی برنامه‌ریزی شود.

در رویکردهای سنتی مکان‌یابی، غالباً مجموعه‌ای از معیارها انتخاب و پس از وزن‌دهی، لایه‌های مربوط به آنها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی هم‌پوشانی داده می‌شد. این رویکردها با وجود برخورداری از شفافیت و قابلیت تفسیر، معمولاً بر روابط خطی، وزن‌های ثابت و قضاوت‌های از پیش تعیین‌شده متکی‌اند. در واقع، اثر یک متغیر مانند تراکم جمعیت ممکن است در تمام نقاط شهر یکسان نباشد و بسته به اندازه بلوک، ظرفیت شبکه معابر، قیمت زمین، اختلاط کاربری و میزان برخورداری موجود تغییر کند. افزون بر این، رابطه میان برخی متغیرها و مطلوبیت مکانی غیرخطی است؛ برای مثال، تراکم بیشتر تا سطحی مشخص می‌تواند تقاضا و توجیه استقرار مرکز را افزایش دهد، اما تراکم بسیار زیاد ممکن است به دلیل ازدحام، کمبود زمین و دشواری توسعه، مطلوبیت را کاهش دهد. در چنین شرایطی، مدل‌های سنتی ممکن است نتوانند تعاملات، آستانه‌ها و روابط پنهان میان متغیرها را به‌درستی شناسایی کنند.

ظهور یادگیری ماشین امکان تحلیل این روابط پیچیده را فراهم کرده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند با استفاده از داده‌های مشاهده‌شده، الگوهای غیرخطی و تعاملات چندمتغیره را شناسایی و احتمال مناسب بودن هر مکان را پیش‌بینی کنند. مرور کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در برنامه‌ریزی کاربری زمین نشان می‌دهد که روش‌هایی مانند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های تقویت گرا دیانی می‌توانند برای طبقه‌بندی، پیش‌بینی تغییرات، ارزیابی سناریوها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری فضایی به کار روند (7). یادگیری ماشین به‌ویژه زمانی ارزشمند است که داده‌ها دارای ابعاد زیاد، هم‌بستگی پیچیده یا روابط غیرخطی باشند. با این حال، استفاده از این الگوریتم‌ها در برنامه‌ریزی شهری نباید به تولید یک خروجی غیرقابل تفسیر محدود شود؛ بلکه لازم است عملکرد مدل با شاخص‌های معتبر ارزیابی و سهم متغیرها در تصمیم نهایی آشکار شود.

کاربرد یادگیری ماشین در طراحی و برنامه‌ریزی شهری به پیش‌بینی یک وضعیت منفرد محدود نیست و می‌تواند در ارزیابی سناریوهای متفاوت توسعه نیز به کار گرفته شود. پژوهش‌های مربوط به سناریوهای کاربری زمین و طراحی شهری نشان داده‌اند که مدل‌های یادگیری ماشین قابلیت یادگیری از ساختار موجود شهر و پیش‌بینی پیامدهای سناریوهای جایگزین را دارند (8). این قابلیت برای برنامه‌ریزی مراکز درمانی اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تصمیم‌گیرندگان معمولاً با چند گزینه از نظر مکان، نوع مرکز، ظرفیت، سطح خدمت و زمان اجرای پروژه مواجه‌اند. مدل می‌تواند نشان دهد که استقرار یک بیمارستان، درمانگاه یا پایگاه سلامت در هر پهنه چه تأثیری بر پوشش جمعیتی، زمان دسترسی و هم‌پوشانی شعاع عملکرد مراکز خواهد داشت. بدین ترتیب، یادگیری ماشین می‌تواند از یک ابزار صرفاً پیش‌بینی‌کننده به یک سامانه پشتیبان تصمیم تبدیل شود که گزینه‌های برنامه‌ریزی را بر اساس شواهد فضایی مقایسه می‌کند.

پیشرفت فناوری‌های نوظهور، داده‌های بزرگ شهری و هوش مصنوعی، چشم‌انداز تازه‌ای برای طراحی و مدیریت شهرها پدید آورده است. مرور نظام‌مند کاربرد فناوری‌های نوظهور و هوش مصنوعی در طراحی و برنامه‌ریزی شهری نشان می‌دهد که این ابزارها می‌توانند تحلیل‌های پیچیده فضایی، پیش‌بینی تغییرات، مدیریت زیرساخت‌ها و مشارکت در تصمیم‌گیری را ارتقا دهند (9). با این حال، اثربخشی هوش مصنوعی به کیفیت داده‌های ورودی، تناسب الگوریتم، کنترل سوگیری، اعتبارسنجی خروجی و امکان تفسیر نتایج وابسته است. در حوزه فوریت‌های پزشکی نیز تأکید شده است که ساخت مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین مستلزم تعریف دقیق مسئله، آماده‌سازی مناسب داده‌ها، انتخاب متغیرهای مرتبط، تفکیک مجموعه‌های آموزش و آزمون و ارزیابی عملکرد بر اساس شاخص‌های چندگانه است (10). این الزامات در تحلیل‌های مکانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند، زیرا نزدیکی جغرافیایی نمونه‌ها ممکن است به وابستگی فضایی و برآورد بیش‌ازحد دقت مدل منجر شود. از این رو، اعتبارسنجی فضایی و جلوگیری از نشت اطلاعات میان نقاط مجاور باید بخشی از طراحی مدل باشد. یکی از حوزه‌های مهم کاربرد تحلیل داده در خدمات درمانی، شناسایی گونه‌های پنهان مراکز بر اساس ویژگی‌های عملکردی آنهاست. مطالعه گونه‌شناسی بخش‌های اورژانس نشان داده است که مراکز ظاهراً مشابه ممکن است از نظر حجم مراجعه، الگوی بیماران، منابع، سازمان‌دهی خدمات و عملکرد، در گروه‌های متمایزی قرار گیرند (11). این یافته نشان می‌دهد که طبقه‌بندی رسمی مراکز همیشه برای توصیف نقش واقعی آنها کافی نیست. ممکن است دو درمانگاه با عنوان یکسان، از نظر قلمرو پوشش، تنوع تخصص، ظرفیت، ساعات فعالیت و ارتباط با شبکه بیمارستانی تفاوت چشمگیری داشته باشند. بنابراین، گونه‌شناسی مبتنی بر داده می‌تواند در کنار طبقه‌بندی اداری، تصویری دقیق‌تر از ساختار واقعی شبکه درمانی ارائه دهد. تلفیق این گونه‌شناسی با تحلیل مکان‌یابی امکان پاسخ به دو پرسش مرتبط را فراهم می‌کند: کدام پهنه برای توسعه خدمات مناسب‌تر است و چه نوع مرکز درمانی باید در آن استقرار یابد؟

در کنار یادگیری ماشین، ریخت‌شناسی شهری چارچوبی ضروری برای فهم شرایط کالبدی و فضایی استقرار خدمات فراهم می‌آورد. ریخت‌شناسی شهری به مطالعه ساختار و تحول عناصر تشکیل‌دهنده شهر، از جمله شبکه معابر، بلوک‌ها، قطعات، ساختمان‌ها، تراکم، کاربری زمین و روابط میان آنها می‌پردازد. اندازه و شکل بلوک، ریزدائگی یا درشت‌دائگی قطعات، تراکم تقاطع‌ها، پیوستگی معابر، نفوذپذیری، هم‌پیوندی فضایی و اختلاط کاربری می‌توانند بر قابلیت دسترسی، جریان حرکت و امکان توسعه یک مرکز درمانی اثر بگذارند. یک پهنه ممکن است از نظر فاصله مستقیم به جمعیت نزدیک باشد، اما به دلیل بلوک‌های بزرگ، معابر بن‌بست یا پیوستگی ضعیف، دسترسی واقعی نامناسبی داشته باشد. در مقابل، بافتی با شبکه متصل و نفوذپذیر می‌تواند زمان سفر را کاهش دهد و قلمرو پوشش مؤثر مرکز را افزایش دهد. به همین دلیل، تحلیل فاصله بدون شناخت شکل و ساختار بافت شهری، ارزیابی کاملی از دسترسی ارائه نمی‌دهد.

ویژگی‌های کالبدی شهر علاوه بر دسترسی روزمره، در میزان تاب‌آوری مراکز و شبکه درمانی در برابر بحران‌ها مؤثرند. تجربه همه‌گیری کووید-۱۹ نشان داد که تراکم، الگوی کاربری زمین، کیفیت فضاهای باز، ساختار شبکه معابر و توزیع زیرساخت‌های حیاتی می‌توانند توانایی شهرها را برای پاسخ‌گویی به بحران‌های سلامت عمومی تقویت یا تضعیف کنند. بررسی شهرهای اروپایی نشان داده است که ویژگی‌های برنامه‌ریزی شهری در شکل‌گیری شهرهای تاب‌آور در برابر همه‌گیری نقش قابل‌توجهی دارند (12). شناخت اولیه کووید-۱۹ نیز بر قابلیت انتقال، سرعت گسترش و ضرورت واکنش هماهنگ نظام سلامت تأکید داشت (13). این تجربه نشان داد که تمرکز بیش‌ازحد ظرفیت‌های درمانی در چند نقطه، وابستگی زیاد به بیمارستان‌های مرکزی و فقدان مراکز محلی می‌تواند در زمان افزایش ناگهانی تقاضا آسیب‌پذیری ایجاد کند. بنابراین، مکان‌یابی مراکز درمانی باید علاوه بر کارایی روزمره، توزیع متوازن ظرفیت و امکان تداوم خدمت‌رسانی در وضعیت‌های بحرانی را نیز مورد توجه قرار دهد.

همه‌گیری همچنین موجب گسترش پایش از راه دور و خدمات سلامت دیجیتال شد. پایش از راه دور در دوران کووید-۱۹ به‌عنوان ابزاری برای کاهش مراجعات غیرضروری، مراقبت از بیماران در خارج از بیمارستان و حفظ ارتباط درمانی مطرح شد (14). با این حال، توسعه خدمات دیجیتال به معنای کاهش اهمیت مکان مراکز درمانی نیست. خدمات از راه دور در موارد متعددی به معاینه حضوری، تصویربرداری، آزمایش، مداخله فوری یا ارجاع تخصصی منتهی می‌شوند. در نتیجه، شبکه فیزیکی مراکز درمانی و شبکه دیجیتال سلامت باید مکمل یکدیگر باشند. گونه‌شناسی مراکز می‌تواند مشخص کند کدام خدمات قابلیت ارائه از راه دور دارند و کدام خدمات نیازمند دسترسی فیزیکی سریع‌اند. این موضوع امکان برنامه‌ریزی شبکه‌ای ترکیبی را فراهم می‌کند که در آن مراکز محلی، خدمات تشخیصی، فوریت‌های پزشکی و بیمارستان‌های تخصصی در یک نظام ارجاع منسجم با یکدیگر ارتباط دارند.

عملکرد مراکز درمانی افزون بر مکان استقرار، به قابلیت اطمینان تجهیزات و زیرساخت‌های آنها وابسته است. استفاده از اینترنت اشیا و نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات پزشکی می‌تواند خرابی‌ها را پیش از وقوع شناسایی و تداوم خدمات حیاتی را تقویت کند (15). این مسئله در گونه‌شناسی مراکز اهمیت دارد؛ زیرا نیازهای زیرساختی یک بیمارستان تخصصی یا مرکز تشخیصی مجهز با نیازهای یک پایگاه سلامت یکسان نیست. همچنین، کاربرد یادگیری ماشین برای پایش مصرف انرژی سامانه‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع در یک مرکز درمانی نشان داده است که روش‌های داده‌محور می‌توانند الگوی تقاضا را شناسایی و مدیریت عملکرد ساختمان را بهبود بخشند (16). بنابراین، انتخاب محل و نوع مرکز باید با ملاحظات بهره‌برداری، انرژی، نگهداری و ظرفیت زیرساختی همراه باشد. مکانی که تنها بر اساس دسترسی مناسب ارزیابی می‌شود، در صورت ناتوانی شبکه‌های آب، برق، انرژی یا ارتباطات در پشتیبانی از نوع مرکز پیشنهادی، ممکن است در عمل گزینه مطلوبی نباشد.

پایداری محیطی ساختمان‌ها نیز یکی دیگر از ابعاد مهم برنامه‌ریزی مراکز درمانی است. مفهوم ساختمان سبز بر کاهش مصرف منابع، کنترل پیامدهای زیست‌محیطی و افزایش کارایی در طول چرخه عمر ساختمان تأکید دارد. مدل‌سازی ساختمان‌های سبز در چارچوب شهرهای پایدار نشان می‌دهد که تصمیمات مربوط به ساخت‌وساز باید در ارتباط با تغییرات اقلیمی و پایداری شهری ارزیابی شوند (17). استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان نیز می‌تواند طراحی، هماهنگی و مدیریت عملکرد ساختمان‌های سبز را ارتقا دهد، هرچند موانع فنی، سازمانی و اقتصادی بر پذیرش آن اثر می‌گذارند (18). در ساختمان‌های درمانی، نیاز مستمر به تهویه، کنترل دما و حفظ استانداردهای محیط داخلی باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود. بررسی ظرفیت صرفه‌جویی انرژی سامانه‌های گرمایش تابشی همراه با پمپ حرارتی نیز اهمیت انتخاب فناوری مناسب و طراحی هماهنگ سامانه‌های ساختمانی را نشان داده است (19). در نتیجه، مکان‌یابی و گونه‌شناسی باید امکان توسعه مراکز را فراهم کند که افزون بر دسترسی و کارایی، از نظر انرژی و محیط‌زیست نیز پایدار باشند.

سامانه اطلاعات جغرافیایی بستر اصلی تلفیق داده‌های ناهمگون مورد نیاز مکان‌یابی است. داده‌های جمعیتی، شبکه معابر، کاربری زمین، مراکز موجود، محدودیت‌های محیطی، تراکم ساختمانی، ساختار قطعات و ویژگی‌های ریخت‌شناسی را می‌توان در محیط این سامانه یکپارچه و در مقیاس‌های مختلف تحلیل کرد. فناوری‌های تجسم سه‌بعدی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی و واقعیت مجازی نیز ظرفیت نمایش و ارزیابی بهتر شرایط ساخت، مدیریت و تعاملات فضایی را فراهم کرده‌اند (20). تجسم نتایج برای تصمیم‌گیرندگان اهمیت زیادی دارد؛ زیرا نقشه مطلوبیت باید نه تنها دقت آماری، بلکه قابلیت فهم و استفاده در برنامه‌ریزی را نیز داشته باشد. نمایش هم‌زمان طبقات مطلوبیت، مراکز موجود، پهنه‌های کم‌برخوردار و گونه‌های پیشنهادی می‌تواند ارتباط میان خروجی مدل و تصمیم‌گیری را روشن سازد.

با وجود پیشرفت‌های موجود، بخش قابل توجهی از مطالعات مکان‌یابی مراکز درمانی همچنان بر ترکیب معیارها با وزن‌های ثابت تمرکز دارد و روابط پیچیده میان ریخت‌شناسی شهری، تقاضای سلامت و عملکرد شبکه درمانی کمتر بررسی شده است. برخی مطالعات صرفاً مناسب بودن یا نبودن مکان را تعیین می‌کنند، بدون آنکه مشخص سازند چه نوع مرکز درمانی برای هر پهنه مناسب است. در گروهی دیگر از پژوهش‌ها، یادگیری ماشین برای پیش‌بینی به کار رفته، اما تفسیرپذیری مدل، وابستگی فضایی نمونه‌ها و اعتبارسنجی نتایج با نظر متخصصان به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته است. از سوی دیگر، مطالعات ریخت‌شناسی شهری معمولاً بر فرم شهر، حمل‌ونقل یا کاربری زمین متمرکزند و ارتباط آنها با سلسله‌مراتب خدمات سلامت کمتر در قالب یک مدل یکپارچه بررسی شده است. در نتیجه، خلأ اصلی در تلفیق سه مؤلفه مکان‌یابی فضایی، گونه‌شناسی عملکردی و یادگیری ماشین تفسیرپذیر نهفته است.

این خلأ در شهرهای متوسطی مانند بروجرد اهمیت ویژه‌ای دارد. ساختار شهر بروجرد حاصل هم‌زیستی هسته تاریخی، بافت‌های میانی، محلات جدید، توسعه‌های پیرامونی و محورهای ارتباطی متنوع است. تفاوت در اندازه بلوک‌ها، تراکم ساختمانی، پیوستگی معابر، اختلاط کاربری و توزیع جمعیت موجب می‌شود که نیاز و قابلیت استقرار خدمات درمانی در تمامی قسمت‌های شهر یکسان نباشد. تمرکز مراکز تخصصی و تشخیصی در بخش‌های مرکزی می‌تواند دسترسی جمعیت ساکن در نواحی پیرامونی را محدود کند و در عین حال موجب افزایش سفرهای درون‌شهری و فشار بر شبکه معابر مرکزی شود. توسعه بدون برنامه مراکز جدید نیز ممکن است به هم‌پوشانی خدمات در پهنه‌های برخوردار و استمرار کمبود در محلات کم‌برخوردار بینجامد. از این رو، تحلیل شهر بروجرد نیازمند رویکردی است که از یک سو ویژگی‌های محلی بافت و شبکه معابر را در نظر گیرد و از سوی دیگر بتواند بر اساس داده‌های متعدد، مناسب‌ترین مکان و متناسب‌ترین گونه مرکز را پیش‌بینی کند.

تلفیق یادگیری ماشین با تحلیل ریخت‌شناسی شهری می‌تواند چارچوبی جامع برای پاسخ به این نیاز فراهم آورد. در این چارچوب، متغیرهایی مانند کمبود خدمات، تراکم و ترکیب جمعیت، زمان دسترسی شبکه‌ای، فاصله از شریان‌ها و حمل‌ونقل عمومی، هم‌پیوندی و انتخاب شبکه، اندازه و فشردگی بلوک، تراکم قطعات، اختلاط کاربری، نفوذپذیری بافت، محدودیت‌های محیطی و ظرفیت توسعه به صورت هم‌زمان وارد مدل می‌شوند. الگوریتم‌های مختلف می‌توانند از نظر دقت، حساسیت، ویژگی، قابلیت تعمیم و قدرت تفکیک مقایسه شوند و مدل تلفیقی برای کاهش وابستگی نتیجه به یک الگوریتم واحد به کار رود. سپس، با استفاده از روش‌های تفسیرپذیری می‌توان تعیین کرد که هر متغیر چگونه و تا چه اندازه بر مطلوبیت تأثیر گذاشته است. ارزیابی خروجی توسط متخصصان و اجرای تحلیل حساسیت نیز امکان سنجش اعتبار و پایداری تصمیم‌ها را فراهم می‌کند. چنین رویکردی ضمن افزایش دقت علمی، قابلیت تبدیل نتایج به پیشنهادها و اجرایی برای برنامه‌ریزان شهری و مدیران نظام سلامت را دارد.

هدف پژوهش حاضر، بهینه‌سازی مکان‌یابی و گونه‌شناسی مراکز درمانی شهر بروجرد از طریق تلفیق الگوریتم‌های یادگیری ماشین، تحلیل‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و شاخص‌های ریخت‌شناسی شهری به منظور شناسایی پهنه‌های اولویت‌دار، تعیین گونه مناسب مرکز برای هر پهنه و ارتقای عدالت فضایی در دسترسی به خدمات درمانی است.

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی بود که با رویکرد آمیخته فضایی و در قالب مطالعه موردی در شهر بروجرد انجام شد. محدوده مکانی پژوهش، محدوده قانونی شهر بروجرد و حریم بلافاصله آن بود و واحد تحلیل فضایی را قطعات و سلول‌های مکانی واقع در این محدوده تشکیل دادند. برای دستیابی به دقت فضایی مناسب، محدوده مطالعه پس از یکسان‌سازی دستگاه مختصات همه لایه‌ها، به سلول‌های شبکه‌ای ۵۰×۵۰ متر تقسیم شد و سلول‌های واقع در پهنه‌های غیرقابل ساخت، از جمله بستر و حریم رودخانه‌ها، اراضی دارای شیب بسیار زیاد، حریم تأسیسات زیربنایی پرخطر، گورستان‌ها و سایر کاربری‌های ناسازگار، از فرایند تحلیل کنار گذاشته شدند. جامعه پژوهش در بخش فضایی شامل تمامی مراکز درمانی فعال واقع در محدوده شهر بروجرد بود که اطلاعات مکانی و توصیفی آنها از طریق سرشماری کامل مراکز موجود، بررسی اسناد سازمانی، تطبیق با نقشه‌های شهری و بازدید میدانی گردآوری شد. در بخش انسانی، جامعه تخصصی شامل کارشناسان و متخصصان حوزه‌های برنامه‌ریزی شهری، جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، سامانه اطلاعات جغرافیایی، معماری و طراحی شهری، مدیریت خدمات بهداشتی و درمانی و برنامه‌ریزی سلامت بود. از میان این جامعه، ۳۰ نفر با روش نمونه‌گیری هدفمند و بر اساس معیارهای برخورداری از حداقل مدرک کارشناسی ارشد، دست‌کم پنج سال سابقه حرفه‌ای یا پژوهشی مرتبط و آشنایی با ساختار فضایی شهر بروجرد انتخاب شدند. ترکیب مشارکت‌کنندگان شامل ۱۰ متخصص برنامه‌ریزی و طراحی شهری، ۱۰ متخصص جغرافیا، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و ۱۰ متخصص برنامه‌ریزی و مدیریت خدمات بهداشتی و درمانی بود. مشارکت این افراد با رضایت آگاهانه صورت گرفت و به آنان اطمینان داده شد که پاسخ‌ها صرفاً در چارچوب اهداف پژوهش تحلیل می‌شوند و مشخصات فردی آنها محرمانه باقی خواهد ماند. معیار ورود به بخش تخصصی، برخورداری از تجربه مرتبط با مکان‌یابی خدمات شهری یا برنامه‌ریزی مراکز درمانی و معیار خروج، ناقص‌بودن بیش از ۱۰ درصد پاسخ‌ها یا انصراف در هر مرحله از پژوهش بود. برای آموزش و ارزیابی مدل‌های یادگیری ماشین، ۲۴۰۰ نقطه نمونه فضایی از محدوده مطالعه استخراج شد که شامل ۱۲۰۰ نقطه معرف پهنه‌های مناسب و ۱۲۰۰ نقطه معرف پهنه‌های نامناسب بود. برحسب‌گذاری این نقاط بر اساس تلفیق وضعیت استقرار مراکز موجود، معیارهای برنامه‌ریزی شهری، محدودیت‌های مکانی و اجماع اعضای پانل تخصصی انجام گرفت تا مجموعه داده‌ای متوازن برای آموزش الگوریتم‌ها فراهم شود.

داده‌های موردنیاز پژوهش با استفاده از چک‌لیست برداشت مکانی مراکز درمانی، پرسشنامه محقق‌ساخته ارزیابی معیارهای مکان‌یابی و گونه‌شناسی، فرم ثبت ویژگی‌های ریخت‌شناسی شهری، گیرنده سامانه موقعیت‌یاب جهانی و لایه‌های اطلاعاتی سامانه اطلاعات جغرافیایی گردآوری شد. چک‌لیست برداشت مکانی برای ثبت نام مرکز، مختصات جغرافیایی، نوع مالکیت، سطح عملکرد، دامنه خدمات، ظرفیت، ساعات فعالیت، مساحت قطعه، مساحت زیربنا، تعداد طبقات، تعداد تخت یا واحدهای ارائه خدمت، وضعیت دسترسی سواره و پیاده، امکان توقف خودرو، مجاورت‌های کارکردی و ویژگی‌های کالبدی پیرامون هر مرکز طراحی شد. به‌منظور گونه‌شناسی مراکز درمانی، مراکز موجود بر اساس سطح عملکرد و دامنه خدمات در گروه‌های بیمارستان و مرکز درمانی تخصصی، درمانگاه و پلی‌کلینیک، مرکز خدمات جامع سلامت و پایگاه سلامت، مرکز فوریت‌های پزشکی و مرکز تشخیصی-درمانی طبقه‌بندی شدند. صحت مختصات و اطلاعات توصیفی مراکز از طریق تطبیق هم‌زمان داده‌های سازمانی، تصاویر ماهواره‌ای و بازدید میدانی بررسی شد. داده‌های پایه شامل شبکه معابر، سلسله‌مراتب راه‌ها، ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، کاربری اراضی، تراکم جمعیت، توزیع گروه‌های سنی، تراکم ساختمانی، سطح اشغال، تعداد طبقات، قدمت بافت، اندازه و شکل قطعات، اندازه بلوک‌های شهری، پهنه‌های فرسوده، مراکز محله‌ای، فضاهای باز، کاربری‌های ناسازگار، گسل‌ها، شیب زمین، مسیرهای آب سطحی و حریم

تأسیسات شهری بود. این داده‌ها از نقشه‌های طرح جامع و تفصیلی، داده‌های سرشماری، اسناد دستگاه‌های متولی، تصاویر ماهواره‌ای و برداشت‌های میدانی استخراج و پس از کنترل توپولوژی، در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی یکپارچه شدند.

پرسشنامه محقق‌ساخته برای تعیین اهمیت شاخص‌های مکان‌یابی و ارزیابی تناسب گونه‌های مختلف مراکز درمانی طراحی شد. معیارهای اصلی شامل دسترسی و پیوندپذیری شبکه معابر، پوشش جمعیتی، عدالت فضایی، سازگاری کاربری‌ها، ایمنی محیطی، ویژگی‌های اقتصادی زمین، ظرفیت توسعه، کیفیت محیطی و ریخت‌شناسی شهری بود. در بخش ریخت‌شناسی، شاخص‌هایی مانند تراکم تقاطع‌ها، پیوستگی شبکه معابر، مرکزیت فضایی، عمق و هم‌پیوندی، اندازه بلوک، کشیدگی بلوک، تراکم قطعات، ریزدانگی بافت، نسبت سطح اشغال، تراکم ساختمانی، اختلاط کاربری، نفوذپذیری بافت و نسبت فضای باز اندازه‌گیری شد. روایی صوری و محتوایی پرسشنامه با نظر ۱۰ نفر از متخصصان خارج از نمونه اصلی بررسی شد و گویه‌های مبهم یا دارای هم‌پوشانی مفهومی اصلاح شدند. برای ارزیابی کمی روایی محتوا، نسبت روایی محتوا و شاخص روایی محتوا محاسبه شد و تنها گویه‌هایی حفظ شدند که مقادیر آنها از حدود پذیرفتنی بیشتر بود. پایایی ابزار نیز در یک اجرای مقدماتی با مشارکت ۱۵ متخصص بررسی شد و مقدار آلفای کرونباخ برای کل پرسشنامه بیشتر از ۰/۷۰ به دست آمد. همچنین، ثبات قضاوت‌های تخصصی با استفاده از ضریب توافق درون‌طبقه‌ای ارزیابی شد. فاصله از خدمات، جمعیت تحت پوشش و شاخص‌های دسترسی با تحلیل شبکه محاسبه شد و به‌جای اتکای صرف بر فاصله اقلیدسی، زمان سفر در شبکه معابر، سلسله‌مراتب خیابان‌ها، محدودیت‌های حرکتی و قابلیت دسترسی پیاده و سواره مورد توجه قرار گرفت. برای کاهش اثر تفاوت مقیاس اندازه‌گیری، همه متغیرهای پیوسته با روش حداقل-حداکثر در دامنه صفر تا یک نرمال‌سازی شدند و جهت معیارهای هزینه‌ای، مانند فاصله از کاربری‌های ناسازگار یا خطرپذیری، پیش از ورود به مدل اصلاح شد.

تحلیل داده‌ها در چند مرحله مرتبط انجام شد. ابتدا پایگاه داده مکانی تشکیل و تمامی لایه‌ها به دستگاه مختصات یکسان تبدیل شدند. خطاهای هندسی، داده‌های تکراری، مقادیر گم‌شده و نقاط پرت بررسی شدند و داده‌های گم‌شده محدود با استفاده از میانه متغیرهای مجاور فضایی برآورد شدند. سپس شاخص‌های توصیفی شامل فراوانی، درصد، میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر برای ویژگی‌های مراکز درمانی و متغیرهای کالبدی-فضایی محاسبه شد. برای شناسایی الگوی استقرار مراکز موجود، از شاخص نزدیک‌ترین همسایه، تراکم کرنل، خودهمبستگی فضایی موران و تحلیل لکه‌های داغ استفاده شد. شاخص نزدیک‌ترین همسایه برای تعیین خوشه‌ای، تصادفی یا پراکنده‌بودن الگوی استقرار، تراکم کرنل برای شناسایی تمرکز خدمات درمانی، شاخص موران برای ارزیابی وابستگی فضایی و تحلیل لکه‌های داغ برای تشخیص پهنه‌های برخورددار و کم‌برخورددار به کار رفت. میزان برخورداری محله‌ها نیز با توجه به جمعیت، ظرفیت مراکز، زمان دسترسی شبکه‌ای و شعاع عملکرد هر گونه درمانی محاسبه شد. برای ارزیابی عدالت فضایی، نسبت عرضه خدمات درمانی به تقاضای جمعیت و میزان هم‌پوشانی یا خلأ پوشش خدمات در مقیاس محله و سلول فضایی تعیین شد.

در مرحله بعد، شاخص‌های ریخت‌شناسی شهری از طریق تحلیل شبکه معابر، تحلیل نحوی فضا و سنجه‌های هندسی بلوک و قطعه استخراج شدند. مرکزیت، هم‌پیوندی، انتخاب، عمق فضایی، تراکم تقاطع و دسترسی شبکه‌ای برای هر بخش از بافت شهری محاسبه شد. شاخص اختلاط کاربری با استفاده از آنتروپی شانون و فشردگی یا پراکندگی بلوک‌ها با استفاده از نسبت محیط به مساحت و شاخص شکل تعیین شد. برای جلوگیری از ورود متغیرهای تکراری و کاهش بیش‌برازش، همبستگی میان متغیرهای پیش‌بین و عامل تورم واریانس بررسی شد؛ متغیرهایی با همبستگی بیشتر از ۰/۸۰ یا عامل تورم واریانس بیشتر از ۵ پس از

بررسی اهمیت نظری، حذف یا با یکدیگر ترکیب شدند. در مواردی که تعداد شاخص‌های همبسته زیاد بود، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای کاهش ابعاد داده‌ها استفاده شد و مؤلفه‌هایی حفظ شدند که در مجموع حداقل ۷۰ درصد واریانس داده‌ها را تبیین می‌کردند.

برای پیش‌بینی مناسب بودن مکان استقرار مراکز درمانی، سه الگوریتم جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و تقویت گرادیانی حدی اجرا شد. متغیر وابسته، مناسب یا نامناسب بودن هر نقطه فضایی و متغیرهای مستقل، شاخص‌های جمعیتی، دسترسی، کاربری زمین، ایمنی، ویژگی‌های محیطی و سنجه‌های ریخت‌شناسی شهری بودند. مجموعه داده به صورت طبقه‌بندی شده به سه بخش آموزش، اعتبارسنجی و آزمون تقسیم شد؛ به گونه‌ای که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۵ درصد برای تنظیم مدل و ۱۵ درصد برای آزمون نهایی اختصاص یافت. به منظور جلوگیری از نشت اطلاعات ناشی از مجاورت نقاط، تقسیم داده‌ها با در نظر گرفتن بلوک‌های فضایی انجام شد. تنظیم ابرپارامترهای مدل‌ها از طریق جست‌وجوی شبکه‌ای و اعتبارسنجی متقاطع فضایی پنج‌بخشی صورت گرفت. عملکرد الگوریتم‌ها با استفاده از صحت، حساسیت، ویژگی، دقت مثبت، امتیاز $F1$ ، ضریب کاپا و سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده ارزیابی شد. مدل دارای بیشترین سطح زیر منحنی، بالاترین امتیاز $F1$ و کمترین اختلاف عملکرد میان داده‌های آموزش و آزمون به عنوان مدل نهایی انتخاب شد. برای تبیین سهم متغیرها در پیش‌بینی و افزایش شفافیت مدل، اهمیت ویژگی‌ها و مقادیر شاپلی محاسبه شد تا جهت و شدت اثر هر معیار بر مطلوبیت مکانی مشخص شود.

پس از انتخاب مدل بهینه، احتمال مناسب بودن هر سلول در محدوده شهر پیش‌بینی و نقشه پیوسته مطلوبیت مکانی تهیه شد. مقادیر احتمال پیش‌بینی شده با استفاده از روش شکست‌های طبیعی به پنج طبقه بسیار نامناسب، نامناسب، متوسط، مناسب و بسیار مناسب تقسیم شدند. سپس محدودیت‌های قطعی مکانی به صورت لایه‌های صفر و یک بر نقشه اعمال شد و پهنه‌های غیرقابل احداث از گزینه‌های نهایی حذف شدند. برای تعیین گونه مناسب مرکز درمانی در هر پهنه، یک تحلیل چندکلاسه اجرا شد که در آن ویژگی‌های جمعیت تحت پوشش، تراکم و ساختار سنی جمعیت، موقعیت در سلسله مراتب فضایی شهر، زمان دسترسی، ظرفیت شبکه معابر، اندازه قطعات، قیمت نسبی زمین، شدت کمبود خدمات و مشخصات ریخت‌شناختی بافت به عنوان متغیرهای پیش‌بین در نظر گرفته شدند. خروجی این مرحله نشان می‌داد که هر پهنه برای استقرار بیمارستان، درمانگاه، مرکز خدمات جامع سلامت، پایگاه سلامت، مرکز فوریت‌های پزشکی یا مرکز تشخیصی-درمانی تا چه اندازه مناسب است. در صورت هم‌زمانی مطلوبیت برای چند گونه، اولویت نهایی بر اساس بیشترین احتمال پیش‌بینی شده، شدت نیاز جمعیت و کمترین هم‌پوشانی با شعاع عملکرد مراکز موجود تعیین شد.

اعتبار نقشه نهایی از طریق بازدید میدانی، مقایسه با وضعیت عملکرد مراکز موجود و ارزیابی مستقل متخصصان بررسی شد. برای این منظور، پهنه‌های پیشنهادی بدون نمایش طبقه پیش‌بینی شده در اختیار اعضای پانل قرار گرفت و آنان تناسب هر پهنه را از نظر دسترسی، ایمنی، سازگاری کاربری، قابلیت اجرا و پاسخ‌گویی به نیاز جمعیت ارزیابی کردند. میزان انطباق نظر متخصصان با خروجی مدل با ضریب کاپا و همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن محاسبه شد. علاوه بر این، تحلیل حساسیت با حذف یا تغییر وزن مهم‌ترین متغیرها انجام گرفت تا پایداری رتبه‌بندی پهنه‌ها مشخص شود. در نهایت، سناریوی تلفیقی دارای بیشترین دقت پیش‌بینی، بالاترین توافق تخصصی و بیشترین پایداری در تحلیل حساسیت به عنوان مبنای تعیین مکان‌ها و گونه‌های پیشنهادی مراکز درمانی شهر بروجرد انتخاب شد. پردازش‌های آماری و یادگیری ماشین در محیط Python و تحلیل‌ها و ترسیمات فضایی در نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شد و سطح معناداری آزمون‌های استنباطی ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

در این پژوهش، ۳۰ نفر از متخصصان در فرایند ارزیابی معیارها، اعتبارسنجی داده‌های مکانی و بررسی نتایج مدل‌های یادگیری ماشین مشارکت داشتند. از این تعداد، ۲۱ نفر معادل ۷۰.۰۰ درصد مرد و ۹ نفر معادل ۳۰.۰۰ درصد زن بودند. میانگین سن مشارکت‌کنندگان ۴۳.۲۷ سال با انحراف معیار ۶.۸۴ سال و دامنه سنی آنان بین ۳۲ تا ۵۸ سال بود. از نظر سطح تحصیلات، ۱۸ نفر معادل ۶۰.۰۰ درصد دارای مدرک دکتری و ۱۲ نفر معادل ۴۰.۰۰ درصد دارای مدرک کارشناسی ارشد بودند. از نظر حوزه تخصصی نیز ۱۰ نفر در زمینه برنامه‌ریزی و طراحی شهری، ۱۰ نفر در حوزه جغرافیا، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و ۱۰ نفر در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت خدمات بهداشتی و درمانی فعالیت داشتند. میانگین سابقه حرفه‌ای مشارکت‌کنندگان ۱۴.۶۳ سال با انحراف معیار ۵.۲۱ سال بود و سابقه آنان در دامنه ۶ تا ۲۷ سال قرار داشت. همچنین، ۱۹ نفر معادل ۶۳.۳۳ درصد دارای سابقه مستقیم همکاری در طرح‌های مکان‌یابی خدمات شهری، ۱۷ نفر معادل ۵۶.۶۷ درصد دارای سابقه فعالیت در پروژه‌های برنامه‌ریزی شهری شهر بروجرد و ۱۴ نفر معادل ۴۶.۶۷ درصد دارای تجربه تخصصی در برنامه‌ریزی فضایی خدمات بهداشتی و درمانی بودند. از مجموع پرسشنامه‌های توزیع‌شده، تمامی ۳۰ پرسشنامه به‌صورت کامل تکمیل و وارد تحلیل شد و هیچ موردی به دلیل نقص اطلاعات کنار گذاشته نشد.

سرشماری مراکز درمانی فعال نشان داد که در زمان انجام پژوهش، ۸۶ مرکز درمانی در محدوده قانونی شهر بروجرد فعالیت داشتند. این مراکز شامل ۶ بیمارستان و مرکز درمانی تخصصی، ۱۳ درمانگاه و پلی‌کلینیک، ۲۱ مرکز خدمات جامع سلامت و پایگاه سلامت، ۸ مرکز فوریت‌های پزشکی و ۳۸ مرکز تشخیصی-درمانی بودند. نتایج بررسی توزیع مکانی اولیه نشان داد که بخش چشمگیری از مراکز درمانی، به‌ویژه درمانگاه‌ها، پلی‌کلینیک‌ها و مراکز تشخیصی-درمانی، در نواحی مرکزی و میانی شهر تمرکز داشتند؛ در مقابل، نواحی توسعه‌یافته شمال شرقی، جنوب شرقی و بخش‌هایی از غرب و جنوب غربی شهر از پوشش فضایی و ظرفیت خدماتی کمتری برخوردار بودند. از میان ۸۶ مرکز موجود، ۵۴ مرکز معادل ۶۲.۷۹ درصد در پهنه‌های مرکزی و میانی، ۱۹ مرکز معادل ۲۲.۰۹ درصد در پهنه‌های شمالی و شرقی و ۱۳ مرکز معادل ۱۵.۱۲ درصد در پهنه‌های جنوبی و غربی شهر قرار داشتند. این الگوی توزیع اولیه بیانگر تمرکز خدمات درمانی در بخش‌های برخوردارتر و دارای دسترسی شبکه‌ای بهتر و کمبود نسبی خدمات در بافت‌های پیرامونی و نواحی جدید توسعه شهری بود.

جدول ۱. شاخص‌های توصیفی متغیرهای فضایی، جمعیتی، دسترسی و ریخت‌شناسی شهری در نقاط نمونه

متغیر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
فاصله شبکه‌ای تا نزدیک‌ترین مرکز درمانی، متر	۱۱۲۸.۴۶	۶۸۴.۳۷	۴۲.۱۸	۳۶۸۴.۵۵
زمان دسترسی سواره تا نزدیک‌ترین مرکز، دقیقه	۶.۸۳	۳.۲۹	۰.۶۲	۱۹.۴۷
زمان دسترسی پیاده تا نزدیک‌ترین مرکز، دقیقه	۱۵.۷۲	۸.۶۱	۰.۸۴	۴۷.۹۳
تراکم جمعیت، نفر در هکتار	۱۲۶.۳۸	۵۷.۴۲	۱۸.۶۳	۲۹۴.۷۱
جمعیت تحت پوشش در شعاع عملکردی	۷۴۲۸.۵۶	۳۸۱۶.۲۹	۶۸۳.۰۰	۱۹۶۴۲.۰۰
نسبت جمعیت سالمند، درصد	۹.۸۴	۳.۱۷	۲.۹۱	۱۸.۷۶
نسبت جمعیت کودک، درصد	۲۱.۳۷	۴.۸۲	۹.۶۴	۳۴.۱۸
تراکم تقاطع، تعداد در کیلومتر مربع	۷۴.۲۶	۲۹.۵۳	۱۲.۰۰	۱۴۸.۰۰
شاخص هم‌پیوندی شبکه معابر	۱.۱۸	۰.۳۹	۰.۳۱	۲.۴۶
شاخص انتخاب شبکه‌ای	۰.۴۷	۰.۲۱	۰.۰۵	۰.۹۶

۷۸۶۴.۳۹	۳۸۴۲.۱۷	۱۱۲۶.۴۴	۲۲۴۱۸.۶۳	میانگین مساحت بلوک شهری، مترمربع
۰.۶۲	۰.۱۶	۰.۲۱	۰.۹۳	شاخص فشردگی بلوک
۱۸.۷۴	۷.۸۲	۳.۱۶	۴۲.۵۷	تراکم قطعات، قطعه در هکتار
۴۶.۸۳	۱۴.۲۶	۸.۴۲	۷۹.۶۱	نسبت سطح اشغال، درصد
۱۳۹.۷۲	۶۱.۴۸	۲۱.۶۵	۳۲۷.۸۴	تراکم ساختمانی، درصد
۰.۵۸	۰.۱۹	۰.۰۷	۰.۹۴	شاخص اختلاط کاربری
۰.۵۵	۰.۱۸	۰.۱۱	۰.۹۱	شاخص نفوذپذیری بافت
۴۲۶.۱۹	۲۷۵.۶۴	۱۸.۳۵	۱۴۸۹.۷۲	فاصله تا ایستگاه حمل و نقل عمومی، متر
۳۱۸.۴۷	۲۲۶.۳۱	۷.۸۴	۱۲۷۶.۵۳	فاصله تا شریان درجه یک یا دو، متر
۸۷۴.۶۲	۴۸۶.۱۷	۳۶.۲۹	۲۴۱۸.۷۶	فاصله تا کاربری ناسازگار، متر
۰.۵۴	۰.۲۴	۰.۰۳	۰.۹۷	شاخص کمبود خدمات درمانی
۰.۶۱	۰.۲۲	۰.۰۸	۰.۹۶	امتیاز نهایی مطلوبیت مکانی

بر اساس نتایج جدول ۱، میانگین فاصله شبکه‌ای نقاط مورد بررسی تا نزدیک‌ترین مرکز درمانی برابر با ۱۱۲۸.۴۶ متر و میانگین زمان دسترسی سواره و پیاده به‌ترتیب برابر با ۶.۸۳ و ۱۵.۷۲ دقیقه بود. دامنه نسبتاً گسترده فاصله و زمان دسترسی نشان داد که برخورداری فضایی در سطح شهر یکسان نبود و برخی نقاط پیرامونی فاصله‌ای بیش از ۳۰۰۰ متر و زمان دسترسی پیاده‌ای نزدیک به ۴۸ دقیقه تا نزدیک‌ترین مرکز درمانی داشتند. میانگین تراکم جمعیت برابر با ۱۲۶.۳۸ نفر در هکتار بود؛ با این حال، تغییرات آن از ۱۸.۶۳ تا ۲۹۴.۷۱ نفر در هکتار نشان‌دهنده ناهمگونی قابل توجه ساختار جمعیتی در محدوده مطالعه بود. میانگین شاخص هم‌پیوندی شبکه معابر ۱.۱۸ و میانگین شاخص انتخاب شبکه‌ای ۰.۴۷ به دست آمد که بیانگر تفاوت محسوس میان بافت مرکزی متصل و نفوذپذیر و بافت‌های پیرامونی دارای پیوستگی کمتر بود. میانگین مساحت بلوک شهری ۷۸۶۴.۳۹ مترمربع و میانگین شاخص فشردگی بلوک ۰.۶۲ بود. هم‌زمان، شاخص نفوذپذیری بافت با میانگین ۰.۵۵ و شاخص اختلاط کاربری با میانگین ۰.۵۸ نشان داد که بسیاری از پهنه‌های شهری از وضعیت متوسطی در زمینه تنوع کارکردی و قابلیت دسترسی برخوردار بودند. میانگین شاخص کمبود خدمات درمانی برابر با ۰.۵۴ بود و در برخی نقاط به ۰.۹۷ رسید که وجود پهنه‌هایی با کمبود بسیار شدید خدمات درمانی را تأیید کرد. امتیاز نهایی مطلوبیت مکانی نیز میانگین ۰.۶۱ داشت و دامنه آن بین ۰.۰۸ و ۰.۹۶ قرار گرفت. این پراکندگی نشان داد که متغیرهای مورد استفاده توانایی مناسبی برای تفکیک پهنه‌های نامطلوب از پهنه‌های واجد ظرفیت استقرار مراکز درمانی داشتند.

جدول ۲. نتایج تحلیل الگوی فضایی، پوشش جمعیتی و دسترسی به مراکز درمانی موجود

شاخص	بیمارستان و مرکز درمانگاه تخصصی	مرکز درمانگاه پلی‌کلینیک	و مرکز و پایگاه سلامت	فوریت‌های پزشکی	مرکز تشخیصی-کل	کل مراکز
تعداد مراکز	۶	۱۳	۲۱	۸	۳۸	۸۶
میانگین فاصله مشاهده‌شده نزدیک‌ترین همسایه، متر	۱۷۲۴.۳۶	۶۸۴.۲۲	۷۳۱.۴۸	۱۱۸۶.۷۳	۳۹۱.۶۴	۴۲۸.۵۷
میانگین فاصله مورد انتظار، متر	۱۳۸۶.۲۵	۸۱۲.۴۷	۹۲۶.۳۱	۱۰۶۲.۸۴	۵۸۲.۹۱	۶۳۴.۲۸
نسبت نزدیک‌ترین همسایه	۱.۲۴	۰.۸۴	۰.۷۹	۱.۱۲	۰.۶۷	۰.۶۸
مقدار Z نزدیک‌ترین همسایه	۱.۳۱	-۱.۷۴	-۲.۳۸	۰.۷۱	-۳.۹۴	-۵.۶۲

سطح معناداری	۰.۱۹۰	۰.۰۸۲	۰.۰۱۷	۰.۴۷۸	<۰.۰۰۱	<۰.۰۰۱
شاخص موران جهانی	۰.۱۸	۰.۳۱	۰.۲۷	۰.۱۲	۰.۴۶	۰.۳۹
مقدار Z شاخص موران	۱.۶۲	۲.۷۳	۲.۴۹	۱.۱۷	۴.۸۶	۴.۲۱
سطح معناداری موران	۰.۱۰۵	۰.۰۰۶	۰.۰۱۳	۰.۲۴۲	<۰.۰۰۱	<۰.۰۰۱
جمعیت دارای دسترسی مطلوب، درصد	۷۱.۸۴	۶۸.۲۷	۷۳.۹۱	۶۴.۳۸	۷۶.۴۶	۷۲.۱۳
جمعیت دارای دسترسی متوسط، درصد	۱۸.۶۷	۱۹.۸۲	۱۷.۴۶	۲۱.۳۵	۱۵.۷۳	۱۷.۹۲
جمعیت دارای دسترسی نامطلوب، درصد	۹.۴۹	۱۱.۹۱	۸.۶۳	۱۴.۲۷	۷.۸۱	۹.۹۵
میانگین زمان دسترسی شبکه‌ای، دقیقه	۸.۷۴	۶.۱۹	۵.۸۳	۷.۶۲	۴.۹۶	۶.۲۸
ضریب تغییرات دسترسی محله‌ای	۰.۴۱	۰.۳۸	۰.۳۵	۰.۴۷	۰.۳۲	۰.۳۹

بر اساس جدول ۲، نسبت نزدیک‌ترین همسایه برای کل مراکز درمانی برابر با ۰.۶۸ و مقدار Z متناظر با آن برابر با -۵.۶۲ بود که در سطح کمتر از ۰.۰۰۱ معنادار شد. بنابراین، فرض تصادفی بودن توزیع مراکز رد شد و الگوی کلی استقرار مراکز درمانی شهر بروجرد از نوع خوشه‌ای تشخیص داده شد. بیشترین شدت خوشه‌ای شدن به مراکز تشخیصی-درمانی اختصاص داشت؛ به طوری که نسبت نزدیک‌ترین همسایه برای این مراکز ۰.۶۷، مقدار Z برابر با -۳.۹۴ و سطح معناداری کمتر از ۰.۰۰۱ بود. مراکز و پایگاه‌های سلامت نیز با نسبت ۰.۷۹ و مقدار Z برابر با -۲.۳۸، الگوی خوشه‌ای و معنادار داشتند. در مقابل، الگوی استقرار بیمارستان‌ها و مراکز فوریت‌های پزشکی از نظر آماری تفاوت معناداری با الگوی تصادفی نشان نداد؛ هرچند مقادیر نسبت نزدیک‌ترین همسایه بیشتر از ۱.۰۰ بیانگر گرایش محدود آنها به پراکندگی بود. شاخص موران جهانی برای کل مراکز برابر با ۰.۳۹ و در سطح کمتر از ۰.۰۰۱ معنادار بود که وجود خودهمبستگی فضایی مثبت و تمرکز مراکز در پهنه‌های مجاور یکدیگر را تأیید کرد. بالاترین مقدار شاخص موران به مراکز تشخیصی-درمانی با مقدار ۰.۴۶ اختصاص داشت. نتایج پوشش جمعیتی نشان داد که در مجموع ۷۲.۱۳ درصد جمعیت شهر از دسترسی مطلوب، ۱۷.۹۲ درصد از دسترسی متوسط و ۹.۹۵ درصد از دسترسی نامطلوب به خدمات درمانی برخوردار بودند. با این حال، دسترسی نامطلوب به خدمات فوریت‌های پزشکی با ۱۴.۲۷ درصد و درمانگاه‌ها و پلی‌کلینیک‌ها با ۱۱.۹۱ درصد بیشتر از سایر گونه‌ها بود. میانگین زمان دسترسی شبکه‌ای به کل مراکز ۶.۲۸ دقیقه به دست آمد، اما ضریب تغییرات دسترسی محله‌ای برابر با ۰.۳۹ نشان داد که این میانگین، تفاوت‌های قابل توجه میان محله‌های مرکزی و پیرامونی را پنهان می‌کند. بیشترین نابرابری محله‌ای به دسترسی به مراکز فوریت‌های پزشکی با ضریب تغییرات ۰.۴۷ مربوط بود؛ بنابراین، گسترش هدفمند این مراکز در نواحی کم‌برخوردار باید یکی از اولویت‌های برنامه‌ریزی فضایی شهر باشد.

جدول ۳. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی مطلوبیت مکانی مراکز درمانی

الگوریتم	صحت آموزش	صحت آزمون	حساسیت	ویژگی	دقت مثبت	امتیاز F1	ضریب کاپا	سطح زیر منحنی
ماشین بردار پشتیبان	۰.۹۰۱	۰.۸۶۴	۰.۸۵۱	۰.۸۷۶	۰.۸۷۳	۰.۸۶۲	۰.۷۲۸	۰.۹۱۴
جنگل تصادفی	۰.۹۴۷	۰.۹۰۳	۰.۸۹۶	۰.۹۱۰	۰.۹۰۹	۰.۹۰۲	۰.۸۰۶	۰.۹۵۱
تقویت گرادیانی حدی	۰.۹۳۹	۰.۹۲۱	۰.۹۲۸	۰.۹۱۴	۰.۹۱۶	۰.۹۲۲	۰.۸۴۲	۰.۹۶۸
مدل تلفیقی وزن‌دار	۰.۹۴۱	۰.۹۳۲	۰.۹۳۶	۰.۹۲۸	۰.۹۲۹	۰.۹۳۲	۰.۸۶۴	۰.۹۷۶

طبق نتایج جدول ۳، هر سه الگوریتم توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی مطلوبیت مکانی مراکز درمانی داشتند؛ با این حال، عملکرد آنها یکسان نبود. ماشین بردار پشتیبان با صحت آزمون ۰.۸۶۴، امتیاز F1 برابر با ۰.۸۶۲ و سطح زیر منحنی ۰.۹۱۴، ضعیف‌ترین عملکرد نسبی را در میان مدل‌ها نشان داد. جنگل تصادفی با صحت آزمون ۰.۹۰۳، ضریب کاپای ۰.۸۰۶ و سطح زیر منحنی ۰.۹۵۱ عملکرد مناسب‌تری داشت، اما اختلاف ۰.۰۴۴ میان صحت آموزش و آزمون نشان‌دهنده وجود مقدار محدودی بیش‌برازش بود. الگوریتم تقویت گرادیانی حدی با صحت آزمون ۰.۹۲۱، حساسیت ۰.۹۲۸، امتیاز F1 برابر با ۰.۹۲۲ و سطح زیر منحنی ۰.۹۶۸، بهترین عملکرد را در میان مدل‌های منفرد به دست آورد. در ادامه، خروجی احتمالی سه الگوریتم بر اساس عملکرد اعتبارسنجی آنها وزن‌دهی و در قالب یک مدل تلفیقی ادغام شد. مدل تلفیقی وزن‌دار با صحت آزمون ۰.۹۳۲، حساسیت ۰.۹۳۶، ویژگی ۰.۹۲۸، ضریب کاپای ۰.۸۶۴ و سطح زیر منحنی ۰.۹۷۶ بالاترین قدرت تفکیک را نشان داد. فاصله محدود میان صحت آموزش و آزمون در مدل تلفیقی نیز بیانگر تعمیم‌پذیری مطلوب و کنترل بیش‌برازش بود. بر این اساس، مدل تلفیقی وزن‌دار به عنوان مدل نهایی برای تهیه نقشه مطلوبیت مکانی و تعیین پهنه‌های اولویت‌دار انتخاب شد. ضریب کاپای ۰.۸۶۴ نشان داد که توافق میان طبقه‌بندی مدل و طبقه‌بندی واقعی بسیار فراتر از توافق تصادفی بود و مدل توانست پهنه‌های مناسب و نامناسب را با قابلیت اعتماد بالایی از یکدیگر تفکیک کند. تحلیل اهمیت متغیرها در مدل نهایی نشان داد که شاخص کمبود خدمات درمانی با اهمیت نسبی ۰.۱۶۴ مؤثرترین متغیر در پیش‌بینی مطلوبیت مکانی بود. پس از آن، زمان دسترسی شبکه‌ای با اهمیت ۰.۱۳۷، تراکم جمعیت با اهمیت ۰.۱۲۱، شاخص هم‌پیوندی شبکه معابر با اهمیت ۰.۰۹۶، فاصله تا شریان‌های درجه یک و دو با اهمیت ۰.۰۸۳، اختلاط کاربری با اهمیت ۰.۰۷۱، تراکم تقاطع‌ها با اهمیت ۰.۰۶۴، فاصله تا حمل‌ونقل عمومی با اهمیت ۰.۰۵۸، اندازه بلوک شهری با اهمیت ۰.۰۵۱ و نفوذپذیری بافت با اهمیت ۰.۰۴۶ قرار گرفتند. سایر متغیرها در مجموع ۰.۱۰۹ از اهمیت مدل را تشکیل دادند. تحلیل مقادیر شاپلی نشان داد که افزایش کمبود خدمات، تراکم جمعیت، هم‌پیوندی شبکه و اختلاط کاربری، احتمال مطلوب شناخته‌شدن یک پهنه را افزایش می‌داد؛ در مقابل، افزایش زمان دسترسی، فاصله زیاد از شریان‌های اصلی، مجاورت با کاربری‌های ناسازگار، اندازه بسیار بزرگ بلوک و کاهش نفوذپذیری بافت اثر منفی بر مطلوبیت مکانی داشت. همچنین، رابطه تراکم ساختمانی و مطلوبیت خطی نبود؛ به گونه‌ای که تراکم ساختمانی متوسط تا نسبتاً زیاد باعث افزایش مطلوبیت می‌شد، اما در پهنه‌های بسیار متراکم و فاقد ظرفیت توسعه، اثر این متغیر منفی بود.

بر نتایج، از کل مساحت قابل تحلیل شهر بروجرد، ۱۱.۸۴ درصد در طبقه بسیار مناسب، ۲۱.۶۷ درصد در طبقه مناسب، ۲۸.۴۶ درصد در طبقه متوسط، ۲۳.۱۹ درصد در طبقه نامناسب و ۱۴.۸۴ درصد در طبقه بسیار نامناسب قرار گرفت. پهنه‌های بسیار مناسب عمدتاً در بخش‌های شمال شرقی، شرق میانی، جنوب شرقی و برخی محورهای توسعه غربی شهر مشاهده شدند. ویژگی مشترک این پهنه‌ها شامل تراکم جمعیتی متوسط تا زیاد، کمبود محسوس خدمات درمانی، دسترسی مناسب به معابر شریانی، فاصله قابل قبول از ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، اختلاط کاربری مناسب، اندازه متوسط بلوک‌ها و برخورداری از ظرفیت فیزیکی برای توسعه بود. در مقابل، بخش‌هایی از هسته تاریخی و مرکزی شهر، با وجود دسترسی شبکه‌ای و هم‌پیوندی زیاد، به دلیل تمرکز مراکز موجود، تراکم ساختمانی بسیار زیاد، محدودیت قطعات قابل توسعه، ازدحام ترافیکی و هم‌پوشانی بالای شعاع عملکرد مراکز در طبقات متوسط یا نامناسب قرار گرفتند. پهنه‌های حاشیه‌ای بسیار کم‌تراکم و اراضی دارای محدودیت‌های محیطی نیز به دلیل تقاضای جمعیتی کم، فاصله زیاد از شبکه حمل‌ونقل عمومی و ضعف پیوستگی معابر در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار گرفتند. این الگو نشان داد که مطلوبیت استقرار مراکز درمانی صرفاً تابع دسترسی به مرکز شهر نیست، بلکه از بهرهم‌کنش میان نیاز جمعیت، کمبود خدمات، ساختار شبکه معابر، ریخت‌شناسی بافت، ظرفیت توسعه و محدودیت‌های محیطی تأثیر می‌پذیرد. همچنین، مقایسه نقشه مطلوبیت با

توزیع مراکز موجود نشان داد که بخش مهمی از پهنه‌های بسیار مناسب خارج از کانون‌های فعلی تمرکز خدمات قرار داشت؛ بنابراین، الگوی پیشنهادی مدل می‌تواند به تعدیل تمرکز فضایی و ارتقای عدالت در دسترسی کمک کند.

جدول ۴. پهنه‌های اولویت‌دار و گونه پیشنهادی مراکز درمانی بر اساس مدل تلفیقی

کد پهنه	موقعیت عمومی پهنه	گونه پیشنهادی	امتیاز مطلوبیت	احتمال پیش‌بینی مدل	جمعیت تحت پوشش	میانگین دسترسی دقیقه	زمان فعلی، دسترسی، درصد	کاهش برآوردشده زمان اجرا	اولویت
P۱	شمال شرقی شهر	بیمارستان عمومی و تخصصی	۰.۹۴	۰.۹۶	۳۱۸۴۰	۱۴.۶۲	۴۲.۱۸	۱	
P۲	جنوب شرقی شهر	درمانگاه و پلی‌کلینیک	۰.۹۲	۰.۹۴	۲۴۷۱۰	۱۲.۸۴	۳۹.۷۲	۲	
P۳	غرب میانی شهر	مرکز خدمات جامع سلامت	۰.۹۰	۰.۹۳	۱۸۴۶۰	۱۰.۷۳	۳۶.۹۱	۳	
P۴	جنوب غربی شهر	مرکز فوریت‌های پزشکی	۰.۸۹	۰.۹۲	۲۱۳۸۰	۱۳.۴۸	۴۵.۳۶	۴	
P۵	شرق میانی شهر	مرکز تشخیصی-درمانی	۰.۸۷	۰.۹۱	۱۹۶۲۰	۹.۸۶	۳۱.۴۴	۵	
P۶	شمال غربی شهر	درمانگاه و پلی‌کلینیک	۰.۸۵	۰.۸۹	۱۷۱۹۰	۱۱.۳۲	۳۴.۸۷	۶	
P۷	جنوب میانی شهر	مرکز خدمات جامع سلامت	۰.۸۳	۰.۸۸	۱۵۸۴۰	۱۰.۹۴	۳۳.۲۶	۷	
P۸	محدوده توسعه شرقی	پایگاه سلامت	۰.۸۱	۰.۸۶	۱۲۷۶۰	۹.۷۱	۲۹.۶۵	۸	
P۹	محور توسعه غربی	مرکز فوریت‌های پزشکی	۰.۷۹	۰.۸۴	۱۴۶۹۰	۱۲.۱۶	۳۸.۱۴	۹	
P۱۰	شمال میانی شهر	مرکز تشخیصی-درمانی	۰.۷۷	۰.۸۲	۱۳۶۵۰	۸.۹۳	۲۷.۴۸	۱۰	

نتایج جدول ۴ نشان داد که ۱۰ پهنه دارای بالاترین امتیاز ترکیبی برای توسعه شبکه مراکز درمانی بودند. پهنه P۱ در شمال شرقی شهر با امتیاز مطلوبیت ۰.۹۴ و احتمال پیش‌بینی ۰.۹۶، بالاترین اولویت را به دست آورد. جمعیت بالقوه تحت پوشش این پهنه ۳۱۸۴۰ نفر برآورد شد و میانگین زمان دسترسی فعلی جمعیت آن به خدمات بیمارستانی ۱۴.۶۲ دقیقه بود. استقرار یک بیمارستان عمومی و تخصصی در این پهنه می‌توانست زمان دسترسی را حدود ۴۲.۱۸ درصد کاهش دهد. پهنه P۲ در جنوب شرقی شهر با امتیاز ۰.۹۲ برای احداث درمانگاه و پلی‌کلینیک مناسب تشخیص داده شد. این پهنه ۲۴۷۱۰ نفر جمعیت بالقوه تحت پوشش داشت و اجرای پیشنهاد مدل می‌توانست زمان دسترسی آنان را ۳۹.۷۲ درصد کاهش دهد. پهنه P۳ در غرب میانی شهر با امتیاز ۰.۹۰ برای استقرار مرکز خدمات جامع سلامت پیشنهاد شد؛ زیرا این محدوده ضمن برخورداری از تراکم جمعیتی مناسب، دارای کمبود خدمات سطح اول و دسترسی مطلوب به شبکه معابر محلی بود. پهنه P۴ در جنوب غربی شهر، با احتمال پیش‌بینی ۰.۹۲ و کاهش برآورد شده ۴۵.۳۶ درصدی زمان دسترسی، مناسب‌ترین گزینه برای استقرار مرکز فوریت‌های

پزشکی بود. این مقدار، بیشترین کاهش زمان دسترسی در میان پهنه‌های پیشنهادی را نشان داد و اهمیت راه‌اندازی پایگاه فوریت‌های پزشکی در این محدوده را برجسته ساخت.

پهنه‌های P5 و P10 برای استقرار مراکز تشخیصی-درمانی پیشنهاد شدند، اما اولویت آنها پایین‌تر از مراکز سطح اول، درمانگاه‌ها و فوریت‌های پزشکی بود؛ زیرا تحلیل پوشش نشان داده بود که مراکز تشخیصی موجود بیش از سایر گونه‌ها در بخش مرکزی شهر متمرکز شده‌اند. با این حال، استقرار کنترل‌شده این مراکز در شرق میانی و شمال میانی شهر می‌تواند از سفرهای درون‌شهری به هسته مرکزی بکاهد. پهنه‌های P6 و P7 به‌ترتیب برای احداث درمانگاه و پلی‌کلینیک و مرکز خدمات جامع سلامت مناسب شناخته شدند. پهنه P8 در محدوده توسعه شرقی به دلیل جمعیت فعلی کمتر اما روند توسعه سریع کالبدی، برای استقرار پایگاه سلامت پیشنهاد شد تا هم‌زمان با افزایش جمعیت، امکان ارتقای آن به مرکز خدمات جامع سلامت وجود داشته باشد. پهنه P9 در محور توسعه غربی نیز به‌عنوان دومین محل پیشنهادی برای مرکز فوریت‌های پزشکی تعیین شد. در مجموع، اجرای پیشنهادها ۱۰ پهنه می‌توانست پوشش مطلوب خدمات درمانی را از ۷۲.۱۳ درصد به ۸۹.۴۶ درصد افزایش دهد، سهم جمعیت دارای دسترسی نامطلوب را از ۹.۹۵ درصد به ۳.۱۸ درصد کاهش دهد و میانگین زمان دسترسی شبکه‌ای به خدمات را از ۶.۲۸ دقیقه به ۴.۴۷ دقیقه برساند.

اعتبارسنجی مستقل نتایج توسط متخصصان نشان داد که میانگین امتیاز تناسب پهنه‌های پیشنهادی از نظر دسترسی ۴.۴۸، از نظر پاسخ‌گویی به نیاز جمعیت ۴.۵۳، از نظر سازگاری کاربری ۴.۲۶، از نظر ایمنی محیطی ۴.۳۱، از نظر قابلیت اجرایی ۴.۱۲ و از نظر تناسب ریخت‌شناختی ۴.۳۹ از دامنه ۱ تا ۵ بود. میانگین کلی ارزیابی متخصصان برابر با ۴.۳۵ و انحراف معیار آن ۰.۴۱ به دست آمد. ضریب توافق درون‌طبقه‌ای میان ارزیابان ۰.۸۸۴ و ضریب کاپای توافق میان طبقه‌بندی مدل و داوری تخصصی ۰.۸۱۷ بود که هر دو بیانگر توافق زیاد و اعتبار مناسب خروجی مدل بودند. همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن میان رتبه‌بندی مدل و رتبه‌بندی متخصصان نیز ۰.۸۶۲ به دست آمد و در سطح کمتر از ۰.۰۰۱ معنادار بود. بنابراین، پهنه‌هایی که مدل یادگیری ماشین امتیاز مطلوبیت بیشتری به آنها اختصاص داده بود، در ارزیابی مستقل متخصصان نیز عمدتاً رتبه بالاتری دریافت کردند.

نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که نقشه نهایی از پایداری مناسبی برخوردار بود. با کاهش و افزایش ۱۰ درصدی اهمیت متغیرهای اصلی، ۸۷.۶۳ درصد سلول‌ها در همان طبقه مطلوبیت اولیه باقی ماندند، ۱۱.۴۲ درصد تنها یک طبقه جابه‌جا شدند و فقط ۰.۹۵ درصد تغییر بیش از یک طبقه داشتند. حذف شاخص کمبود خدمات درمانی بیشترین تغییر را در رتبه‌بندی پهنه‌ها ایجاد کرد و ضریب همبستگی رتبه‌ای سناریوی حاصل با مدل اصلی را به ۰.۷۸۱ کاهش داد. پس از آن، حذف زمان دسترسی شبکه‌ای و تراکم جمعیت به‌ترتیب ضرایب همبستگی ۰.۸۲۴ و ۰.۸۴۶ را ایجاد کرد. در مقابل، حذف جداگانه متغیرهای کم‌اهمیت‌تر، مانند نسبت فضای باز یا شاخص شکل قطعه، تغییر چشمگیری در رتبه‌بندی نهایی به وجود نیاورد و ضریب همبستگی در تمامی این سناریوها بیشتر از ۰.۹۳۰ باقی ماند. برآیند نتایج نشان داد که مدل تلفیقی ضمن برخورداری از دقت پیش‌بینی زیاد، نسبت به تغییرات محدود در متغیرها پایدار بود و می‌توانست مبنای قابل‌اعتمادی برای تعیین مکان و گونه مناسب مراکز درمانی شهر بروجرد فراهم سازد.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بهینه‌سازی مکان‌یابی و گونه‌شناسی مراکز درمانی شهر بروجرد از طریق تلفیق یادگیری ماشین، سامانه اطلاعات جغرافیایی و شاخص‌های ریخت‌شناسی شهری انجام شد. نتایج سرشماری مراکز موجود نشان داد که ۸۶ مرکز درمانی در محدوده شهر فعالیت داشتند که شامل ۶ بیمارستان و مرکز درمانی تخصصی، ۱۳ درمانگاه و پلی‌کلینیک، ۲۱ مرکز خدمات جامع سلامت و پایگاه سلامت، ۸ مرکز فوریت‌های پزشکی و ۳۸ مرکز تشخیصی-درمانی بودند. با این حال، توزیع فضایی این مراکز متوازن نبود؛ به گونه‌ای که ۶۲.۷۹ درصد آنها در پهنه‌های مرکزی و میانی شهر تمرکز داشتند و سهم پهنه‌های جنوبی و غربی تنها ۱۵.۱۲ درصد بود. نسبت نزدیک‌ترین همسایه برای کل مراکز برابر با ۰.۶۸ و شاخص موران جهانی برابر با ۰.۳۹ به دست آمد که هر دو وجود الگوی خوشه‌ای و خودهمبستگی فضایی مثبت را تأیید کردند. این یافته نشان می‌دهد که گسترش تاریخی خدمات درمانی بروجرد بیش از آنکه تابع توزیع متوازن جمعیت و نیازهای محله‌ای باشد، در امتداد کانون‌های مرکزی، محورهای برخورداری و نواحی دارای تمرکز فعالیت‌های شهری رخ داده است.

تمرکز خدمات درمانی در بخش مرکزی شهر با نتایج مطالعات دسترسی فضایی به خدمات سلامت همسو است. بررسی دسترسی به مراکز پزشکی و بهداشتی در مشهد نیز نشان داده است که استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌تواند نابرابری میان نواحی شهری و تفاوت در پوشش مراکز درمانی را آشکار سازد (1). تمرکز مراکز در مناطق مرکزی معمولاً از دسترسی بهتر به شریان‌های اصلی، تراکم فعالیت‌های تجاری، حضور خدمات پشتیبان، ارزش اقتصادی مراجعه‌کنندگان و سابقه توسعه شهری ناشی می‌شود. با این حال، تداوم این الگو به افزایش سفرهای درمانی از نواحی پیرامونی، ازدحام شبکه معابر مرکزی و کاهش دسترسی گروه‌هایی می‌انجامد که از خودروی شخصی برخوردار نیستند. بر مبنای دیدگاه انسان شهری، کیفیت زندگی در شهر به رابطه میان انسان، خدمات و سازمان فضایی محیط وابسته است و زیرساخت‌های شهری باید در هماهنگی با الگوهای واقعی زندگی شهروندان توزیع شوند (6). بنابراین، تمرکز خدمات درمانی در مرکز بروجرد را نمی‌توان صرفاً نشانه برخورداری بالای شهر دانست، زیرا این تمرکز در سطح محله‌ها با نابرابری قابل توجه همراه شده است.

نتایج تحلیل پوشش نشان داد که ۷۲.۱۳ درصد جمعیت از دسترسی مطلوب، ۱۷.۹۲ درصد از دسترسی متوسط و ۹.۹۵ درصد از دسترسی نامطلوب به مجموعه مراکز درمانی برخوردار بودند. اگرچه برخورداری مطلوب بیش از دوسوم جمعیت ممکن است در نگاه نخست مناسب به نظر برسد، ضریب تغییرات دسترسی محله‌ای برابر با ۰.۳۹ و دامنه گسترده زمان‌های سفر نشان داد که میانگین‌های شهری قادر به نمایش کامل نابرابری‌های درون‌شهری نیستند. بیشترین دسترسی نامطلوب به مراکز فوریت‌های پزشکی با ۱۴.۲۷ درصد و درمانگاه‌ها و پلی‌کلینیک‌ها با ۱۱.۹۱ درصد تعلق داشت. این وضعیت از نظر برنامه‌ریزی سلامت اهمیت زیادی دارد؛ زیرا دسترسی به خدمات فوری و سطح میانی درمان نسبت به برخی خدمات انتخابی یا برنامه‌ریزی‌شده حساسیت زمانی بیشتری دارد. شواهد مربوط به پیامدهای بیمارستانی و بلندمدت بیماران نشان می‌دهد که وضعیت اولیه بیمار، سطح خطر و کیفیت مراقبت از عوامل مهم تعیین‌کننده پیامدهای درمانی هستند (2). بر این اساس، کاهش زمان دسترسی به مراقبت مناسب، به‌ویژه برای بیماران پرخطر، باید یکی از معیارهای اصلی در بازآرایی شبکه درمانی باشد.

تحلیل گونه‌های مراکز نشان داد که بیشترین شدت خوشه‌ای شدن به مراکز تشخیصی-درمانی مربوط بود؛ به گونه‌ای که نسبت نزدیک‌ترین همسایه برای آنها ۰.۶۷ و شاخص موران ۰.۴۶ بود. تمرکز این مراکز می‌تواند ناشی از وابستگی به پزشکان متخصص، آزمایشگاه‌ها، مراکز تصویربرداری، بیمارستان‌ها و بازار خدمات پزشکی باشد. با این حال، این تمرکز سبب می‌شود جمعیت نواحی پیرامونی برای دریافت خدمات تشخیصی به بخش‌های مرکزی سفر کند. یافته مذکور اهمیت تمایز میان گونه‌های درمانی را نشان می‌دهد؛ زیرا هر گونه از نظر شعاع عملکرد، سطح تخصص، الگوی مراجعه و نیازهای زیرساختی ویژگی متفاوتی دارد. پژوهش مربوط به شناسایی گونه‌های پنهان بخش‌های اورژانس نیز نشان داده است که مراکز دارای عنوان مشابه ممکن است بر اساس حجم مراجعه، منابع و شیوه

سازمان‌دهی خدمات در گونه‌های متفاوتی قرار گیرند (11). بنابراین، طبقه‌بندی مراکز فقط بر مبنای عنوان اداری آنها برای برنامه‌ریزی فضایی کافی نیست و ویژگی‌های واقعی عملکرد، ظرفیت و جمعیت تحت پوشش نیز باید در گونه‌شناسی لحاظ شود.

اهمیت گونه‌شناسی هنگامی بیشتر می‌شود که نیازهای متفاوت زنجیره مراقبت مورد توجه قرار گیرد. برخی بیماری‌ها مستلزم پیوند نظام‌مند میان تشخیص، درمان تخصصی و پیگیری بلندمدت‌اند. دستورالعمل‌های بالینی مربوط به تومورهای استرومال دستگاه گوارش بر ضرورت هماهنگی خدمات تخصصی در مراحل تشخیص، درمان و پیگیری تأکید دارند (3). همچنین، پیچیدگی عوامل زیستی مؤثر بر بیماری‌های دستگاه گوارش نشان می‌دهد که ارائه خدمات مناسب ممکن است به امکانات تشخیصی، آزمایشگاهی و تخصص‌های مکمل نیاز داشته باشد (4). در نتیجه، پیشنهاد استقرار یک مرکز تشخیصی یا درمانگاه در یک پهنه نباید صرفاً بر اساس کمبود عددی مراکز انجام شود، بلکه باید با سطح تقاضا، نظام ارجاع و دسترسی به خدمات مکمل هماهنگ باشد. این برداشت با دیدگاه تاریخی گونه‌شناسی ساختمان‌ها نیز سازگار است که بر شکل‌گیری هر گونه ساختمانی در پاسخ به عملکرد، سازمان فضایی و نیاز اجتماعی مشخص تأکید دارد (5).

نتایج مربوط به شاخص‌های ریخت‌شناسی نشان داد که مطلوبیت مکان تابعی از فاصله ساده نبود، بلکه از ساختار شبکه معابر، تراکم تقاطع‌ها، هم‌پیوندی، اندازه بلوک، نفوذپذیری و اختلاط کاربری نیز تأثیر می‌پذیرفت. در مدل نهایی، شاخص کمبود خدمات با اهمیت نسبی ۰.۱۶۴، زمان دسترسی شبکه‌ای با ۰.۱۳۷، تراکم جمعیت با ۰.۱۲۱ و هم‌پیوندی شبکه معابر با ۰.۰۹۶ مهم‌ترین متغیرها بودند. مقادیر شاپلی نیز نشان دادند که افزایش کمبود خدمات، تراکم جمعیت، اختلاط کاربری و هم‌پیوندی شبکه، احتمال مطلوبیت پهنه را افزایش می‌دهد؛ درحالی‌که زمان سفر زیاد، فاصله از شریان‌های اصلی، بلوک‌های بسیار بزرگ و نفوذپذیری کم اثر منفی دارند. این نتایج نشان می‌دهد که فاصله اقلیدسی به‌تنهایی معیار مناسبی برای سنجش دسترسی نیست. دو محله با فاصله مستقیم مشابه ممکن است به دلیل تفاوت در پیوستگی معابر، تعداد تقاطع‌ها و وجود موانع کالبدی، زمان دسترسی کاملاً متفاوتی داشته باشند.

نقش ریخت‌شناسی شهری در مطلوبیت استقرار مراکز درمانی با نتایج مطالعات مربوط به تاب‌آوری شهری نیز همسو است. بررسی تأثیر ویژگی‌های برنامه‌ریزی شهری بر پیامدهای همه‌گیری در شهرهای اروپایی نشان داده است که تراکم، سازمان فضایی، کاربری زمین و دسترسی به زیرساخت‌ها بر توانایی شهر در مقابله با بحران‌های سلامت عمومی اثر می‌گذارند (12). تجربه کووید-۱۹ نیز آشکار ساخت که سرعت انتقال بیماری و افزایش ناگهانی تقاضا می‌تواند ظرفیت نظام درمانی را تحت فشار قرار دهد (13). بنابراین، توزیع متوازن مراکز، وجود مسیرهای دسترسی جایگزین و کاهش وابستگی به چند کانون مرکزی، نه‌تنها عدالت فضایی روزمره بلکه تاب‌آوری شبکه درمانی را افزایش می‌دهد. پیشنهاد مراکز جدید در شمال شرقی، جنوب شرقی، جنوب غربی و محور توسعه غربی بروجرد از این منظر قابل تبیین است، زیرا توسعه خدمات در این پهنه‌ها می‌تواند وابستگی جمعیت پیرامونی به مرکز شهر را کاهش دهد.

مقایسه الگوریتم‌ها نشان داد که ماشین بردار پشتیبان با سطح زیر منحنی ۰.۹۱۴، جنگل تصادفی با ۰.۹۵۱ و تقویت گرادیانی حدی با ۰.۹۶۸، قدرت پیش‌بینی مناسبی داشتند، اما مدل تلفیقی وزن‌دار با صحت آزمون ۰.۹۳۲، امتیاز F۱ برابر با ۰.۹۳۲، ضریب کاپای ۰.۸۶۴ و سطح زیر منحنی ۰.۹۷۶ بهترین عملکرد را به دست آورد. برتری مدل تلفیقی نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم‌هایی با سازوکارهای یادگیری متفاوت می‌تواند خطاهای اختصاصی هر مدل را کاهش دهد و قابلیت تعمیم را افزایش دهد. این نتیجه با مرور کاربرد یادگیری ماشین در برنامه‌ریزی کاربری زمین همسو است که قابلیت الگوریتم‌های داده‌محور را در طبقه‌بندی، پیش‌بینی و ارزیابی الگوهای پیچیده شهری تأیید کرده است (7). مطالعات مربوط به سناریوهای کاربری زمین و طراحی شهری نیز نشان داده‌اند که یادگیری ماشین می‌تواند برای مقایسه گزینه‌های توسعه و پشتیبانی از تصمیم‌گیری فضایی به کار رود (8).

فاصله محدود میان صحت آموزش و آزمون مدل تلفیقی نشان داد که بیش‌برازش تا حد زیادی کنترل شده است. این امر را می‌توان به استفاده از نمونه متوازن، تفکیک فضایی داده‌های آموزش و آزمون و اعتبارسنجی متقاطع فضایی نسبت داد. در ساخت مدل‌های هوش مصنوعی پزشکی، بر تعریف دقیق مسئله، آماده‌سازی داده‌ها، جداسازی داده‌های آموزش و آزمون و استفاده هم‌زمان از چند شاخص عملکرد تأکید شده است (10). در پژوهش حاضر نیز اتکا نکردن به صحت کلی و استفاده از حساسیت، ویژگی، امتیاز $F1$ ، ضریب کاپا و سطح زیر منحنی سبب شد عملکرد مدل از جنبه‌های متفاوت ارزیابی شود. این موضوع به‌ویژه در داده‌های فضایی ضروری است، زیرا نزدیکی نقاط می‌تواند شباهت مصنوعی میان داده‌های آموزش و آزمون ایجاد کند. بنابراین، دقت زیاد مدل نهایی را می‌توان حاصل تلفیق مناسب داده‌های فضایی، کنترل وابستگی مکانی و استفاده از چند الگوریتم دانست.

برتری رویکرد تلفیقی با روندهای جدید استفاده از هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی شهری نیز هماهنگ است. مرور فناوری‌های نوظهور در طراحی و برنامه‌ریزی شهری نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند تحلیل داده‌های پیچیده، پیش‌بینی تحولات و پشتیبانی از تصمیم‌های برنامه‌ریزی را ارتقا دهد، مشروط بر آنکه داده‌های معتبر و سازوکارهای تفسیرپذیری در دسترس باشند (9). در پژوهش حاضر، استفاده از مقادیر شاپلی باعث شد مدل از حالت جعبه سیاه خارج شود و جهت و شدت اثر متغیرها قابل تفسیر باشد. این ویژگی از نظر برنامه‌ریزی اجرایی اهمیت دارد؛ زیرا تصمیم‌گیرندگان باید بدانند یک پهنه به چه دلیل مناسب شناخته شده است. بالا بودن اهمیت کمبود خدمات و زمان دسترسی نشان داد که مدل صرفاً پهنه‌های دارای ساختار کالبدی مطلوب را انتخاب نکرد، بلکه عدالت فضایی و نیاز واقعی جمعیت را نیز در اولویت قرار داد.

نقشه نهایی نشان داد که ۱۱.۸۴ درصد از محدوده قابل تحلیل در طبقه بسیار مناسب و ۲۱.۶۷ درصد در طبقه مناسب قرار داشت. پهنه‌های بسیار مناسب عمدتاً در شمال شرقی، شرق میانی، جنوب شرقی و برخی محورهای توسعه غربی متمرکز بودند. در مقابل، هسته مرکزی با وجود دسترسی مناسب به شبکه معابر، به دلیل تمرکز مراکز موجود، ازدحام، تراکم ساختمانی زیاد و محدودیت توسعه در طبقات متوسط یا نامناسب قرار گرفت. این یافته نشان می‌دهد که دسترسی شبکه‌ای زیاد لزوماً به معنای مناسب بودن برای احداث مرکز جدید نیست. هنگامی که شعاع عملکرد مراکز موجود هم‌پوشانی زیادی دارد، اضافه کردن یک مرکز جدید در همان پهنه ممکن است بازده فضایی کمتری از توسعه خدمات در ناحیه‌ای کم‌پرخوردار داشته باشد. قابلیت سامانه اطلاعات جغرافیایی در تلفیق و نمایش این ابعاد، امکان تبدیل نتایج پیچیده مدل به نقشه‌ای قابل استفاده برای مدیران را فراهم کرد. فناوری‌های تجسم سه‌بعدی مبتنی بر GIS نیز ظرفیت بالایی برای نمایش شرایط فضایی و پشتیبانی از مدیریت ساخت‌وساز دارند (20).

رتبه‌بندی پهنه‌ها نشان داد که $P1$ در شمال شرقی با امتیاز مطلوبیت ۰.۹۴ برای بیمارستان عمومی و تخصصی و $P2$ در جنوب شرقی با امتیاز ۰.۹۲ برای درمانگاه و پلی‌کلینیک بالاترین اولویت را داشتند. همچنین، $P4$ در جنوب غربی به‌عنوان مناسب‌ترین مکان برای مرکز فوریت‌های پزشکی تعیین شد و استقرار آن می‌توانست زمان دسترسی را ۴۵.۳۶ درصد کاهش دهد. پیشنهاد گونه‌های متفاوت برای پهنه‌ها یکی از نتایج اصلی پژوهش بود؛ زیرا نشان داد پاسخ به کمبود خدمات نباید در تمام شهر یکسان باشد. در نواحی دارای جمعیت زیاد، کمبود خدمات تخصصی و قابلیت دسترسی منطقه‌ای، بیمارستان یا پلی‌کلینیک توجیه بیشتری دارد؛ درحالی‌که در توسعه‌های جدید با جمعیت فعلی کمتر، پایگاه سلامت انعطاف‌پذیرتر و اقتصادی‌تر است. این رویکرد می‌تواند از ایجاد ساختمان‌های بزرگ و کم‌استفاده یا مراکز کوچک فاقد توان پاسخ‌گویی جلوگیری کند.

اجرای سناریوی پیشنهادی می‌توانست پوشش مطلوب را از ۷۲.۱۳ درصد به ۸۹.۴۶ درصد افزایش دهد، جمعیت دارای دسترسی نامطلوب را از ۹.۹۵ درصد به ۳.۱۸ درصد کاهش دهد و میانگین زمان دسترسی شبکه‌ای را از ۶.۲۸ دقیقه به ۴.۴۷ دقیقه برساند. این تغییرات نشان می‌دهد که مکان‌یابی هدفمند تعداد محدودی مرکز می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر عدالت فضایی داشته باشد، مشروط بر آنکه نوع مرکز با نیاز هر پهنه هماهنگ باشد. گسترش پایش از راه دور نیز می‌تواند بخشی از مراجعات غیرضروری را کاهش دهد و ارتباط مستمر با بیماران را تقویت کند (14)؛ بالاین حال، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که خدمات دیجیتال جایگزین شبکه فیزیکی متوازن نیست، به‌ویژه در فوریت‌ها، خدمات تشخیصی و مداخلات حضوری. بهترین راهبرد، تلفیق مراکز محلی با شبکه ارجاع، خدمات دیجیتال و مراکز تخصصی است.

پایداری مراکز پیشنهادی صرفاً به انتخاب مکان مناسب محدود نمی‌شود و لازم است الزامات بهره‌برداری نیز مورد توجه قرار گیرد. نگهداری پیش‌بینانه مبتنی بر اینترنت اشیا می‌تواند خرابی تجهیزات پزشکی را کاهش داده و تداوم خدمت‌رسانی را بهبود بخشد (15). مدل‌های یادگیری ماشین همچنین برای پایش مصرف برق سامانه‌های تهویه در مراکز درمانی کارایی نشان داده‌اند (16). در پهنه‌هایی که برای بیمارستان یا مرکز تشخیصی پیشنهاد شدند، ظرفیت شبکه انرژی، پایداری تجهیزات و امکان نگهداری باید پیش از اجرا بررسی شود. همچنین، اصول ساختمان سبز و سازگاری اقلیمی می‌تواند مصرف منابع و هزینه‌های بلندمدت مراکز را کاهش دهد (17). استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان نیز می‌تواند هماهنگی طراحی و بهره‌برداری ساختمان‌های درمانی را تقویت کند (18). بنابراین، خروجی مکان‌یابی باید نقطه آغاز امکان‌سنجی تفصیلی باشد و با طراحی پایدار، ارزیابی زیرساخت و تحلیل اقتصادی تکمیل شود.

اعتبارسنجی تخصصی، قابلیت اعتماد نتایج را بیشتر تأیید کرد. میانگین کلی ارزیابی متخصصان ۴.۳۵ از ۵، ضریب توافق درون‌طبقه‌ای ۰.۸۸۴، ضریب کاپای توافق مدل و متخصصان ۰.۸۱۷ و همبستگی رتبه‌ای آنها ۰.۸۶۲ بود. این نتایج نشان داد پهنه‌هایی که مدل در رتبه‌های بالا قرار داده بود، از نظر متخصصان نیز از دسترسی، سازگاری، ایمنی و قابلیت اجرایی مناسبی برخوردار بودند. افزون بر این، تحلیل حساسیت نشان داد که ۸۷.۶۳ درصد سلول‌ها پس از تغییر ۱۰ درصدی اهمیت متغیرها در طبقه اولیه باقی ماندند. در نتیجه، نقشه نهایی به وزن یا متغیر خاصی وابستگی افراطی نداشت. بیشترین تغییر پس از حذف شاخص کمبود خدمات رخ داد که بار دیگر نشان می‌دهد نیاز برآورده‌نشده جمعیت، مؤلفه محوری مدل بوده است. در مجموع، یافته‌ها از کارایی رویکرد تلفیقی برای تبدیل داده‌های جمعیتی، دسترسی و ریخت‌شناختی به پیشنهادها مشخص درباره مکان و گونه مراکز درمانی حمایت می‌کنند.

پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی همراه بود که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. بخشی از داده‌های جمعیتی و کاربری زمین به دوره‌های زمانی متفاوت تعلق داشت و احتمال تغییرات محدود در تراکم جمعیت، ساخت‌وسازها و فعالیت مراکز درمانی وجود داشت. اطلاعات مربوط به ظرفیت واقعی برخی مراکز، حجم روزانه مراجعه، تعداد کارکنان، کیفیت خدمات و الگوهای ارجاع به‌صورت کامل در دسترس نبود؛ از این رو، بخشی از گونه‌شناسی بر اطلاعات ثبتی و برداشت میدانی استوار شد. زمان دسترسی بر اساس ساختار شبکه معابر و شرایط معمول محاسبه شد و تغییرات ساعات اوج ترافیک، انسدادهای موقت و تفاوت سرعت وسایل نقلیه به‌طور کامل بازنمایی نشد. همچنین، مدل بر اساس ساختار فعلی شهر آموزش دید و تحولات بلندمدت جمعیت، قیمت زمین و توسعه کالبدی را به‌صورت پویا شبیه‌سازی نکرد. ارزیابی متخصصان نیز، با وجود تنوع حوزه‌های تخصصی، ممکن است تحت تأثیر تجربه و قضاوت حرفه‌ای آنان قرار گرفته باشد. در نهایت، نتایج مکان‌یابی در سطح راهبردی ارائه شد و جایگزین مطالعات تفصیلی مالکیت زمین، ژئوتکنیک، آثار محیطی و امکان‌سنجی مالی نیست.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده از داده‌های زمانی و برخط برای مدل‌سازی پویای دسترسی و تقاضای خدمات درمانی استفاده کنند و تغییرات جمعیت، ترافیک و توسعه کالبدی را در چند سناریوی کوتاه‌مدت و بلندمدت بررسی نمایند. افزودن داده‌های ناشناس‌شده مراجعات، نوع بیماری، ظرفیت تخت، حجم ارجاع، زمان انتظار و کیفیت عملکرد می‌تواند گونه‌شناسی مراکز را دقیق‌تر سازد. مقایسه مدل‌های تلفیقی با شبکه‌های عصبی مکانی، مدل‌های گرافنی و روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه نیز می‌تواند به ارتقای دقت پیش‌بینی کمک کند. انجام تحلیل جداگانه برای دسترسی پیاده، حمل‌ونقل عمومی، خودروی شخصی و آمبولانس، تصویری واقع‌بینانه‌تر از نابرابری دسترسی فراهم می‌آورد. همچنین، پیشنهاد می‌شود مدل در شهرهای متوسط دیگر اجرا و قابلیت انتقال آن میان ساختارهای ریخت‌شناختی متفاوت ارزیابی شود. مشارکت مستقیم ساکنان، بیماران، سالمندان، افراد دارای معلولیت و کارکنان درمانی در ارزیابی پهنه‌ها نیز می‌تواند ابعاد ادراکی و تجربه‌شده دسترسی را وارد فرایند تصمیم‌گیری کند.

پیشنهاد می‌شود مدیریت شهری بروگرد و دستگاه‌های متولی سلامت، پهنه‌های P۱ تا P۴ را در اولویت مطالعات امکان‌سنجی، تأمین زمین و برنامه‌ریزی بودجه قرار دهند و از صدور مجوز برای مراکز جدید صرفاً بر مبنای تقاضای سرمایه‌گذار خودداری کنند. ایجاد بیمارستان یا مرکز تخصصی در شمال شرقی، درمانگاه در جنوب شرقی و پایگاه فوریت‌های پزشکی در جنوب غربی می‌تواند بیشترین تأثیر را بر کاهش شکاف دسترسی داشته باشد. توسعه مراکز باید مرحله‌ای و متناسب با رشد جمعیت انجام شود؛ به گونه‌ای که در نواحی جدید ابتدا پایگاه سلامت قابل‌ارتقا ایجاد و با افزایش تقاضا به مرکز جامع یا درمانگاه تبدیل شود. لازم است بانک اطلاعات مکانی واحدی از ظرفیت، ساعات فعالیت، تجهیزات و جمعیت تحت پوشش تمام مراکز تشکیل و به‌طور منظم به‌روزرسانی شود. همچنین، پیش از انتخاب قطعه نهایی، ظرفیت شبکه‌های آب، برق، ارتباطات، دسترسی آمبولانس، امکان پارک خودرو، ایمنی محیطی و قابلیت توسعه آتی بررسی شود. استفاده از طراحی پایدار، تجهیزات کم‌مصرف، نگهداری پیش‌بینانه و اتصال مراکز محلی به سامانه ارجاع و خدمات سلامت دیجیتال نیز برای افزایش کارایی بلندمدت شبکه درمانی توصیه می‌شود.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

در انجام این پژوهش تمامی موازن و اصول اخلاقی رعایت گردیده است.

خلاصه مبسوط

Extended Abstract

Introduction

Healthcare centers constitute a critical component of urban infrastructure, and their spatial distribution directly affects public health, social equity, urban resilience, and residents' quality of life. Effective access to healthcare is not determined solely by the presence of a facility within an urban area. It is also influenced by travel time, transportation networks, service capacity, facility type, population density, demographic composition, and the correspondence between healthcare demand and the functional level of available facilities. An inefficient spatial distribution may increase travel costs, intensify pressure on central facilities, delay access to urgent care, and reproduce inequalities between central and peripheral neighborhoods. Geographic information system-based research has demonstrated that spatial analysis can identify inequalities in access to medical and healthcare facilities and distinguish adequately served areas from disadvantaged urban zones (1).

Healthcare location planning is complicated by the diversity of healthcare services. General and specialized hospitals, polyclinics, comprehensive health centers, health posts, emergency medical centers, and diagnostic facilities differ in their catchment areas, physical requirements, service capacities, target populations, and accessibility needs. Certain diseases require coordinated pathways connecting diagnosis, specialized treatment, and follow-up care, demonstrating that healthcare facilities should be organized as an interconnected service network rather than as isolated buildings (3). The complexity of diagnostic and therapeutic requirements further indicates that different healthcare functions require distinct combinations of equipment, expertise, accessibility, and supporting infrastructure (4). Consequently, determining whether a location is suitable is insufficient unless the appropriate type of healthcare facility for that location is also identified.

The concept of building typology provides an important foundation for distinguishing healthcare facilities according to their functional and spatial characteristics. Building types historically emerge in response to particular social needs, technologies, functions, and spatial organizations (5). Accordingly, healthcare typology should consider not only official administrative classifications but also actual service functions, patient volumes, referral relationships, operating hours, and infrastructure requirements. Evidence from the data-driven classification of emergency departments has shown that facilities with apparently similar formal titles may represent different underlying operational types (11). Integrating typology with location analysis can therefore address two related questions: where new healthcare services should be developed and which type of facility is most appropriate for each priority area.

Conventional healthcare location studies commonly rely on geographic information systems, multicriteria evaluation, and weighted overlay procedures. Although these approaches are transparent, they often assume fixed weights and linear relationships. In reality, relationships between urban variables and locational suitability may be nonlinear. Increasing population density, for example, can strengthen the need for healthcare services up to a certain point, while extremely high density may reduce suitability because of congestion, limited land availability, and insufficient expansion capacity. Machine learning algorithms can identify nonlinear relationships, interactions, and thresholds without requiring all associations to be

specified in advance. Reviews of machine learning applications in urban land-use planning have confirmed the usefulness of random forests, support vector machines, neural networks, and gradient-boosting algorithms for classification, prediction, scenario assessment, and spatial decision support (7). Machine learning has also been applied to land-use scenarios and urban design, indicating its capacity to compare alternative development patterns and support evidence-based planning (8).

The growing use of artificial intelligence and emerging technologies has created new opportunities for analyzing complex urban systems. These technologies can integrate high-dimensional datasets, predict spatial changes, and improve infrastructure planning, provided that data quality, interpretability, and validation are adequately addressed (9). In medical and emergency applications, constructing a reliable machine learning model requires clear outcome definitions, appropriate data preprocessing, independent training and testing datasets, hyperparameter tuning, and evaluation through multiple performance measures (10). These requirements are particularly important for spatial data because neighboring observations may be highly similar, potentially causing information leakage and an overestimation of predictive performance.

Urban morphology offers an additional analytical perspective by examining street networks, blocks, plots, buildings, density, land use, and their spatial relationships. Intersection density, street connectivity, integration, block size, plot granularity, land-use diversity, and urban permeability can influence actual access to healthcare facilities. Two locations with similar Euclidean distances from a healthcare center may have substantially different network travel times because of disconnected streets, large blocks, physical barriers, or restricted routes. Urban form also affects resilience during public-health emergencies. Research on pandemic-resilient cities has shown that urban planning characteristics, density, land-use organization, open spaces, and infrastructure distribution influence the ability of cities to respond to health crises (12). Experiences associated with COVID-19 further emphasized the vulnerability of healthcare systems to rapidly increasing demand and the need for coordinated spatial and institutional responses (13).

Despite advances in spatial analysis and artificial intelligence, limited research has jointly addressed healthcare location, facility typology, and urban morphology within an interpretable machine learning framework. This gap is especially important in medium-sized cities such as Borujerd, where a historical core, intermediate neighborhoods, peripheral development, and new urban expansion coexist. The present study therefore sought to optimize the location and typology of healthcare centers in Borujerd by integrating machine learning algorithms, geographic information system analyses, and urban morphological indicators to identify priority areas, determine the appropriate facility type for each area, and improve spatial equity in healthcare access.

Methods and Materials

This applied, descriptive–analytical study used an integrated spatial and machine learning design. The study area covered the legal urban boundary of Borujerd and its immediate surrounding development areas. The city was divided into 50 × 50-meter grid cells after all spatial layers were transformed into a common coordinate system. Non-developable cells, including river corridors, high-risk infrastructure buffers, cemeteries, environmentally restricted land, and areas with excessive slopes, were excluded.

A complete census of active healthcare facilities was conducted using organizational records, urban maps, satellite images, and field observations. The expert panel comprised exactly 30 participants selected purposively according to academic qualifications, professional experience, and familiarity with healthcare or urban location planning. It included 10 urban planning and design specialists, 10 geography, remote sensing, and GIS specialists, and 10 healthcare planning and management specialists. The spatial machine learning dataset consisted of 2,400 sample points, including 1,200 suitable and

1,200 unsuitable points classified through existing facility patterns, planning standards, spatial constraints, and expert agreement.

Data were collected using a healthcare facility spatial inventory checklist, an expert questionnaire, an urban morphology assessment form, field observations, global positioning system measurements, and GIS layers. The variables included population density, age structure, network travel time, proximity to arterial roads and public transportation, existing service coverage, incompatible land uses, environmental constraints, intersection density, street integration, network choice, block size, block compactness, plot density, building coverage, floor-area intensity, land-use mix, and urban permeability.

Spatial analyses included nearest-neighbor analysis, kernel density estimation, global Moran's I, hot-spot analysis, and network-based accessibility assessment. Correlation coefficients and variance inflation factors were examined to control redundancy and multicollinearity. Random forest, support vector machine, and extreme gradient-boosting algorithms were then trained to predict locational suitability. The data were spatially divided into training, validation, and testing subsets at proportions of 70%, 15%, and 15%, respectively. Hyperparameters were optimized using grid search and five-fold spatial cross-validation. Accuracy, sensitivity, specificity, positive predictive value, F1 score, Cohen's kappa, and the area under the receiver operating characteristic curve were used to evaluate model performance. A weighted ensemble model was subsequently constructed, and SHapley Additive exPlanations values were calculated to determine the direction and magnitude of variable effects. Final suitability was divided into five classes, and a multiclass procedure was used to assign the most appropriate healthcare facility type to each priority area. Expert validation and sensitivity analyses were conducted to assess the reliability and stability of the results.

Findings

The expert sample included 21 men and 9 women, with a mean age of 43.27 years and a standard deviation of 6.84. Eighteen participants held doctoral degrees, and 12 held master's degrees. Their mean professional experience was 14.63 years, with a standard deviation of 5.21.

A total of 86 active healthcare facilities were identified, comprising 6 hospitals and specialized treatment centers, 13 clinics and polyclinics, 21 comprehensive health centers and health posts, 8 emergency medical centers, and 38 diagnostic–therapeutic centers. Of these facilities, 62.79% were concentrated in central and intermediate areas, while only 15.12% were located in southern and western areas.

The overall nearest-neighbor ratio was 0.68, with a Z value of -5.62 and a significance level below 0.001, demonstrating a statistically significant clustered pattern. Global Moran's I was 0.39 and was also significant below 0.001, confirming positive spatial autocorrelation. Diagnostic–therapeutic centers demonstrated the strongest clustering, with a nearest-neighbor ratio of 0.67 and Moran's I of 0.46.

Accessibility analysis indicated that 72.13% of residents had favorable access, 17.92% had moderate access, and 9.95% had unfavorable access to healthcare services. Unfavorable access was highest for emergency medical centers at 14.27% and clinics and polyclinics at 11.91%. The overall mean network travel time was 6.28 minutes, while the neighborhood accessibility coefficient of variation was 0.39, indicating meaningful disparities between neighborhoods.

Among the individual algorithms, the support vector machine achieved a testing accuracy of 0.864 and an area under the curve of 0.914. Random forest achieved an accuracy of 0.903 and an area under the curve of 0.951. Extreme gradient boosting performed best among the individual models, with an accuracy of 0.921, an F1 score of 0.922, and an area under the curve of 0.968. The weighted ensemble model produced the strongest overall results, with a testing accuracy of 0.932, sensitivity of 0.936, specificity of 0.928, F1 score of 0.932, kappa coefficient of 0.864, and area under the curve of 0.976.

Service shortage was the most influential predictor, with a relative importance of 0.164, followed by network travel time at 0.137, population density at 0.121, street-network integration at 0.096, proximity to primary and secondary arterial roads at 0.083, and land-use mix at 0.071. SHAP analysis showed that greater service shortages, higher population density, stronger street integration, and greater land-use diversity increased locational suitability. Longer travel times, greater distance from arterial roads, proximity to incompatible uses, excessively large blocks, and low urban permeability reduced suitability.

The final map classified 11.84% of the analyzable area as highly suitable, 21.67% as suitable, 28.46% as moderately suitable, 23.19% as unsuitable, and 14.84% as highly unsuitable. Highly suitable areas were primarily located in northeastern, east-central, southeastern, and selected western development corridors. The northeastern P1 area was ranked first for a general and specialized hospital, with a suitability score of 0.94. The southeastern P2 area was ranked second for a clinic or polyclinic, with a score of 0.92. The southwestern P4 area was identified as the most appropriate location for a new emergency medical center and was expected to reduce travel time by 45.36%.

Implementing the 10 proposed locations was estimated to increase favorable healthcare coverage from 72.13% to 89.46%, reduce unfavorable access from 9.95% to 3.18%, and decrease mean network travel time from 6.28 to 4.47 minutes. Expert validation produced an overall mean rating of 4.35 out of 5, an intraclass correlation coefficient of 0.884, a model–expert kappa coefficient of 0.817, and a Spearman correlation of 0.862. Sensitivity analysis showed that 87.63% of cells remained in their original suitability class after a 10% change in the importance of the main predictors.

Discussion and Conclusion

The findings revealed a substantial imbalance between the numerical availability and spatial distribution of healthcare facilities in Borujerd. Although the city contained 86 active facilities and more than two-thirds of residents had favorable access, the clustered pattern indicated that aggregate urban statistics concealed important neighborhood-level inequalities. Peripheral and recently developed areas experienced longer travel times and weaker access, especially to emergency and intermediate-level services.

The superior performance of the ensemble model demonstrated that combining algorithms with different learning mechanisms improved predictive reliability. The limited difference between training and testing performance, together with strong sensitivity, specificity, kappa, and area-under-the-curve values, indicated adequate generalizability. Moreover, SHAP analysis made the model interpretable by showing that unmet healthcare need, network travel time, population density, and street integration were more decisive than simple geometric proximity.

Urban morphology made a distinct contribution to the analysis. Locations with connected street networks, moderate block sizes, mixed land uses, and adequate permeability were generally more suitable. In contrast, the central core was not automatically prioritized despite its accessibility because of service concentration, congestion, high building density, and limited expansion capacity. This finding confirms that the most accessible location is not necessarily the most equitable or operationally feasible location.

The proposed typology also demonstrated that different underserved areas required different interventions. A hospital was justified in the northeast because of population size and specialized service shortages, whereas a clinic was more appropriate in the southeast and emergency centers were prioritized in the southwest and western development corridor. A health post was considered more suitable for the eastern expansion area, where current population levels were lower but future growth was expected.

Overall, the integrated framework successfully connected spatial need, accessibility, urban form, and healthcare facility type. Its implementation could substantially improve coverage, reduce unfavorable access, and shorten travel times. The results

support a shift from demand-driven and investor-led facility development toward an evidence-based network in which the location, scale, and function of each center are coordinated with population needs and urban structure. The proposed model can provide a practical decision-support framework for municipal authorities and healthcare planners, although final site selection should additionally incorporate land ownership, construction feasibility, infrastructure capacity, environmental assessment, and financial evaluation.

References

1. Bazargan M. A case study on accessibility of medical and healthcare facilities in Mashhad using GIS. *Studies of Architecture, Urbanism and Environmental Sciences Journal*. 2018;1(1):39-48.
2. Browner WS, Li J, Mangano DT, Hollenberg M, Tubau JF, Leung JM, et al. In-hospital and long-term mortality in male veterans following noncardiac surgery. *JAMA*. 1992;268(2):228-32.
3. Casali PG, Blay JY, Abecassis N, Bajpai J, Bauer S, Biagini R, et al. Gastrointestinal stromal tumours: ESMO-EURACAN-GENTURIS clinical practice guidelines for diagnosis, treatment and follow-up. *Annals of Oncology*. 2022;33(1):20-33.
4. Motta JP, Wallace JL, Buret AG, Deraison C, Vergnolle N. Gastrointestinal biofilms in health and disease. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*. 2021;18(5):314-34.
5. Pevsner N. A history of building types. Princeton: Princeton University Press; 2023.
6. Carta M. *Homo Urbanus*. Rome: Donzelli Editore; 2022.
7. Chaturvedi V, de Vries WT. Machine learning algorithms for urban land use planning: A review. *Urban Science*. 2021;5(3):68.
8. Podrasa D, Zeile P, Neppl M, editors. Machine learning for land use scenarios and urban design. *Proceedings of REAL CORP 2021, 26th International Conference on Urban Development, Regional Planning and Information Society*; 2021; Vienna.
9. He W, Chen M. Advancing urban life: A systematic review of emerging technologies and artificial intelligence in urban design and planning. *Buildings*. 2024;14(3):835.
10. Ramlakhan SL, Saatchi R, Sabir L, Ventour D, Shobayo O, Hughes R, et al. Building artificial intelligence and machine learning models: A primer for emergency physicians. *Emergency Medicine Journal*. 2022;39(5):e1.
11. Demarquet M, Fraticelli L, Freyssegne J, Claustre C, Martinez M, Duchenne J, et al. Discovering the underlying typology of emergency departments. *BMC Medical Research Methodology*. 2021;21(1):116.
12. AbouKorin SAA, Han H, Mahran MGN. Role of urban planning characteristics in forming pandemic resilient cities: Case study of COVID-19 impacts on European cities within England, Germany and Italy. *Cities*. 2021;118:103324.
13. Sun P, Lu X, Xu C, Sun W, Pan B. Understanding of COVID-19 based on current evidence. *Journal of Medical Virology*. 2020;92(6):548-51.
14. Watson AR, Wah R, Thamman R. The value of remote monitoring for the COVID-19 pandemic. *Telemedicine and e-Health*. 2020;26(9):1110-2.
15. Shamayleh A, Awad M, Farhat J. IoT based predictive maintenance management of medical equipment. *Journal of Medical Systems*. 2020;44(4):72.
16. Zini M, Carcasci C. Machine learning-based energy monitoring method applied to the HVAC systems electricity demand of an Italian healthcare facility. *Smart Energy*. 2024;14:100137.
17. Biswas MHA, Dey PR, Islam MS, Mandal S. Mathematical model applied to green building concept for sustainable cities under climate change. *Journal of Contemporary Urban Affairs*. 2022;6(1):36-50.
18. Huang B, Lei J, Ren F, Chen Y, Zhao Q, Li S, et al. Contribution and obstacle analysis of applying BIM in promoting green buildings. *Journal of Cleaner Production*. 2021;278:123946.
19. Hwang YJ, Jeong JW. Energy saving potential of radiant floor heating assisted by an air source heat pump in residential buildings. *Energies*. 2021;14(5):1321.
20. Xu S. Three-dimensional visualization algorithm simulation of construction management based on GIS and VR technology. *Complexity*. 2021;2021:6631999.