



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

فصلنامه علمی فضای جغرافیایی

دوره بیست و ششم، شماره 93

بهار 1405، صفحات 218-242

پیام رضایی^۱

محسن دادرس^۲

مهدی آجدانی^۳

شهلا پاسلار^۴

تحلیل فضایی و اولویت‌بندی پهنه‌های مناسب بلند مرتبه‌سازی در شهر بندرعباس با استفاده از GIS و شبیه‌سازی مونت کارلو

تاریخ پذیرش: 1404/12/26

تاریخ دریافت: 1404/08/19

چکیده

مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین موضوعات در برنامه‌ریزی و توسعه شهری، نقش اساسی در شکل‌دهی به ساختار فضایی شهرها دارد. در بسیاری از شهرهای در حال رشد، از جمله شهر بندرعباس، توسعه بلندمرتبه‌سازی بدون توجه کافی به اصول توسعه پایدار و تحلیل جامع معیارهای مکانی انجام شده است که می‌تواند منجر به بروز ناهماهنگی‌های فضایی و تشدید فشار بر زیرساخت‌های شهری گردد. از این‌رو، هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری مکانی برای شناسایی پهنه‌های مناسب توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری است. در این مطالعه، از ترکیب فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP) مبتنی بر روش توسعه‌ای چانگ برای تعیین وزن معیارها (4 معیار کالبدی، زیرساخت، اقتصادی-اجتماعی، فیزیکی) و زیرمعیارها (39 زیرمعیار) استفاده شد. سپس لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS استانداردسازی شده و با استفاده از روش همپوشانی وزنی خطی تلفیق گردیدند. به‌منظور ارزیابی پایداری نتایج و بررسی اثر عدم قطعیت در وزن‌دهی معیارها، شبیه‌سازی مونت کارلو با اعمال تغییرات تصادفی در وزن‌ها اجرا شد و نقشه‌های متعدد مطلوبیت تولید گردید. نتایج نشان داد که معیارهای کالبدی و دسترسی به زیرساخت‌ها به‌ترتیب با درجه عضویت فازی 0/469 و 0/300 بیشترین اهمیت را در بلندمرتبه‌سازی ساختمان‌ها دارند. نتایج نهایی عدم قطعیت مونت کارلو شامل نقشه میانگین مطلوبیت، انحراف معیار و نقشه ضریب تغییرات که به‌منظور تحلیل پایداری مکانی مورد استفاده قرار گرفت، نشان داد که ضریب تغییرات و انحراف معیار در مدل بسیار پایین است و بیانگر پایداری مدل در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس است. نتیجه همپوشانی معیارها بیان‌گر این است که مناطقی در شمال‌غربی و نیمه شرقی و بخش‌هایی در حاشیه ساحلی بندرعباس برای بلندمرتبه‌سازی مناسب‌اند. بنابراین، رویکرد پیشنهادی علاوه بر تعیین پهنه‌های مناسب توسعه، قادر است میزان عدم قطعیت و پایداری نتایج را نیز مشخص نماید. این ویژگی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود کیفیت تصمیم‌گیری‌های شهری و مدیریت توسعه عمودی در شهرهای در حال رشد ایفا کند.

واژگان کلیدی: بلندمرتبه‌سازی، تحلیل فضایی، عدم قطعیت، مکان‌یابی، پهنه‌بندی شهری.

¹ گروه مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

² گروه مهندسی عمران، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران (نویسنده مسئول) mohsen.dadras@iau.ac.ir

³ گروه مهندسی کامپیوتر، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

⁴ گروه مهندسی صنایع، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر، الگوهای توسعه فیزیکی شهری را در بسیاری از کشورهای جهان دستخوش تحول کرده است (Nzimande and Morris-Kolawole, 2024). افزایش تراکم جمعیت، محدودیت منابع زمین، گسترش بی‌رویه افقی شهرها و تشدید فشار بر زیرساخت‌ها و منابع شهری، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان را به سمت الگوهای توسعه فشرده و عمودی سوق داده است (Nethercote, 2022). در این میان، بلندمرتبه‌سازی^۵ به عنوان یکی از مهم‌ترین راهبردهای توسعه شهری، نه تنها پاسخی به کمبود زمین شهری محسوب می‌شود، بلکه ابزاری برای افزایش بهره‌وری فضایی، کنترل پراکندگی شهری^۶، ارتقای کارایی شبکه‌های خدماتی و تحقق الگوی شهر فشرده^۷ به شمار می‌رود (Kathitasapathy et al., 2023).

با این حال، تجربه بسیاری از شهرهای جهان نشان داده است که توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه در صورت فقدان برنامه‌ریزی فضایی و مکان‌یابی علمی، می‌تواند پیامدهای منفی گسترده‌ای بر محیط شهری برجای گذارد؛ از جمله تشدید جزایر حرارتی شهری، اختلال در تهویه طبیعی، افزایش تراکم ترافیکی، فشار بر زیرساخت‌ها، نابرابری فضایی، تخریب منظر شهری و کاهش کیفیت زیست‌پذیری. از این رو، در ادبیات نوین برنامه‌ریزی شهری، مکان‌یابی بلندمرتبه‌سازی به عنوان مسئله‌ای چندبعدی و پیچیده مطرح شده که نیازمند تلفیق معیارهای کالبدی، محیطی، اجتماعی، اقتصادی و اقلیمی است (Gao et al., 2024).

در دهه اخیر، رویکردهای مبتنی بر تحلیل‌های مکانی-فضایی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۸) نقش مهمی در ارزیابی تناسب فضایی توسعه شهری ایفا نموده‌اند. این رویکردها امکان تحلیل هم‌زمان متغیرهای متعدد و شناسایی پهنه‌های بهینه برای توسعه عمودی را فراهم می‌سازند. با وجود گسترش مطالعات مرتبط با مکان‌یابی بلندمرتبه‌سازی در شهرهای مختلف جهان، بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها عمدتاً بر شاخص‌های کالبدی و اقتصادی متمرکز بوده و نقش متغیرهای اقلیمی و محیطی، به‌ویژه در شهرهای گرم و مرطوب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Eng and Koh, 2022).

در ایران نیز روند فزاینده شهرنشینی و افزایش ارزش زمین شهری، زمینه گسترش بلندمرتبه‌سازی را در بسیاری از شهرها فراهم نموده است. با این حال، در اغلب موارد، توسعه عمودی شهرها بیش از آنکه مبتنی بر ظرفیت اکولوژیک و توان سرزمینی - فضایی باشد، تحت تأثیر منطق بازار زمین و ملاحظات اقتصادی قرار دارد. این مسئله موجب شکل‌گیری الگوهای نامتوازن توسعه، فشار مضاعف بر زیرساخت‌ها و بروز ناهنجاری‌های کالبدی در بسیاری از شهرهای کشور شده است.

بیان مسئله

تحولات جمعیتی و اقتصادی دهه‌های اخیر در شهرهای درحال توسعه، موجب افزایش تقاضا برای فضاهای شهری و تشدید فشار بر منابع زمین شده است. در چنین شرایطی، توسعه عمودی به عنوان یکی از راهبردهای اصلی مدیریت رشد شهری، مورد توجه گسترده برنامه‌ریزان و مدیران شهری قرار گرفته است. با این وجود، بلندمرتبه‌سازی صرفاً یک مداخله کالبدی نیست، بلکه فرآیندی پیچیده با پیامدهای گسترده فضایی، اجتماعی، محیط‌زیستی و اقلیمی است که موفقیت آن وابسته به مکان‌یابی صحیح و مبتنی بر ظرفیت‌های محیطی و زیرساختی شهرهاست (Mosseray et al., 2023).

در دهه‌های اخیر، بلندمرتبه‌سازی به یکی از مهم‌ترین رویکردهای توسعه فضایی شهرها در پاسخ به رشد سریع شهرنشینی، محدودیت منابع زمین و ضرورت تحقق توسعه پایدار شهری تبدیل شده است (Bansal et al., 2023). افزایش تراکم جمعیت شهری، گسترش افقی شهرها و تشدید فشار بر زیرساخت‌ها، موجب شده است که بسیاری از کلان‌شهرهای جهان به سمت الگوهای توسعه فشرده و عمودی حرکت کنند. در این

5 - High-Rise Development

6 - Urban Sprawl

7 - Compact City

8 - Multi-Criteria Decision-Making Methods

چارچوب، مفهوم شهر عمودی⁹ به‌عنوان پارادایمی نوین در برنامه‌ریزی شهری مطرح شده که هدف آن افزایش بهره‌وری فضایی، کاهش مصرف زمین، ارتقای کارایی حمل‌ونقل و کنترل پراکنش شهری است (Fang et al., 2023). در ادبیات معاصر شهرسازی، بلندمرتبه‌سازی صرفاً به افزایش ارتفاع ساختمان محدود نمی‌شود، بلکه بخشی از فرآیند بازتولید فضایی شهرها در راستای تحقق الگوی شهر فشرده و اهداف توسعه پایدار تلقی می‌شود (Reddy, 1996).

بر اساس تعریف شورای ساختمان‌های بلند (CTBUH¹⁰) ساختمان بلندمرتبه ساختمانی است که ارتفاع آن به‌طور معناداری بر طراحی، ساخت، بهره‌برداری و ارتباط آن با محیط شهری اثرگذار باشد (CTBUH, 2021). این نهاد بین‌المللی، ساختمان‌های مرتفع را نه صرفاً بر مبنای تعداد طبقات، بلکه بر اساس میزان تأثیر ارتفاع بر عملکرد سازه، زیرساخت، منظر شهری و شرایط محیطی تعریف می‌کند (Tamboli et al., 2008). در ادبیات تخصصی، تمایز مفهومی میان اصطلاحات مختلف نیز مورد توجه قرار گرفته است؛ به‌گونه‌ای که ساختمان‌های بلندمرتبه عموماً به بناهایی اطلاق می‌شوند که ارتفاع آن‌ها فراتر از مقیاس متعارف بافت شهری بوده و نیازمند فناوری‌ها و ملاحظات ویژه طراحی و بهره‌برداری هستند، در حالی که آسمان‌خراش‌ها¹¹ به ساختمان‌هایی با ارتفاع بسیار زیاد و نقش نمادین در سیمای شهری اشاره دارند (Milanes, 2022).

در نظام برنامه‌ریزی و ضوابط شهری ایران، ساختمان بلندمرتبه به بناهایی اطلاق می‌شود که به‌دلیل ارتفاع و مقیاس کالبدی، اثرگذاری قابل‌توجهی بر سیمای شهری، زیرساخت‌ها، ایمنی و محیط پیرامونی دارند و بنابراین نیازمند ضوابط ویژه طراحی، مکان‌یابی و مدیریت شهری هستند. در بسیاری از دستورالعمل‌های تخصصی کشور، ساختمان‌های بیش از ۱۲ طبقه یا دارای ارتفاع بیش از ۳۶ متر در گروه ساختمان‌های بلندمرتبه طبقه‌بندی می‌شوند. بر اساس «ضوابط عام استقرار ساختمان‌های بلند در شهرهای ایران» مصوب شورای عالی شهرسازی و معماری ایران، ساختمان بلندمرتبه به ساختمانی اطلاق می‌شود که دارای ارتفاع ۲۷ متر و بیشتر، یا حداقل ۸ طبقه با احتساب همکف، و یا ارتفاع بالاترین کف قابل بهره‌برداری آن بیش از ۲۳ متر از تراز متوسط زمین باشد (شورای عالی شهرسازی و معماری ایران، ۱۳۹۸).

مقایسه تعاریف و رویکردهای موجود نشان می‌دهد که اگرچه در نظام برنامه‌ریزی ایران، تعریف ساختمان بلندمرتبه عمدتاً مبتنی بر معیارهای کمی نظیر تعداد طبقات و ارتفاع است، اما در ادبیات بین‌المللی، رویکردی عملکردمحور و زمینه‌گرا بر تعریف این ساختمان‌ها حاکم است. در واقع، نهادهای بین‌المللی، بلندمرتبه‌سازی را نه صرفاً یک پدیده کالبدی، بلکه بخشی از فرآیند توسعه عمودی و بازآفرینی فضایی شهرها تلقی می‌کنند که باید در چارچوب اصول پایداری شهری، ظرفیت زیرساختی و ملاحظات اقلیمی ارزیابی شود (Ali and Al-Kodmany, 2012). این تفاوت رویکرد، ضرورت بهره‌گیری از مدل‌های جامع مکان‌یابی و ارزیابی تناسب فضایی در برنامه‌ریزی بلندمرتبه‌سازی شهرهای ایران را آشکار می‌سازد (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌ها و رویکردهای بلندمرتبه‌سازی ساختمان‌های شهری

ردیف	معیار	رویکرد بلندمرتبه‌سازی در ایران	رویکرد بلندمرتبه‌سازی در سطح بین‌المللی
۱	مبنای تعریف	ترکیبی از تعداد طبقات، ارتفاع و اثرگذاری شهری	اثرگذاری ارتفاع بر طراحی، عملکرد و ارتباط با شهر
۲	تعریف رایج	ساختمان‌هایی با ارتفاع قابل توجه که نیازمند ضوابط ویژه طراحی، ایمنی و شهرسازی هستند	ساختمان‌هایی که ارتفاع آن‌ها بر طراحی، ساخت و بهره‌برداری تأثیر مستقیم دارد
۳	مرجع اصلی	شورای عالی شهرسازی و معماری ایران، مقررات ملی ساختمان، ضوابط آتش‌نشانی	Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH)
۴	معیار ارتفاع	معمولاً بیش از ۱۲ طبقه یا حدود ۳۶ متر	فاقد عدد ثابت جهانی؛ وابسته به زمینه شهری
۵	معیار عملکردی	نیاز به کنترل ویژه در ایمنی، ترافیک، منظر و زیرساخت	تأثیر ارتفاع بر سازه، تأسیسات، آیرودینامیک و فرم شهری
۶	نگاه برنامه‌ریزی شهری	کنترل تراکم، مدیریت رشد شهری و حفاظت از سیمای شهر	توسعه عمودی، شهر فشرده و پایداری شهری
۷	ملاحظات اصلی	پدافند غیرعامل، ظرفیت معابر، منظر شهری، ضوابط اقلیمی	بهره‌وری فضایی، مصرف انرژی، آسایش اقلیمی، کیفیت محیط شهری
۸	رویکرد به مکان‌یابی	پهنه‌بندی و انطباق با طرح‌های توسعه شهری	تحلیل فضایی و تصمیم‌گیری چندمعیاره
۹	مفهوم غالب	بلندمرتبه‌سازی کنترل‌شده	بلندمرتبه‌سازی و شهر عمودی

⁹ - Vertical Urbanism

¹⁰ - Council on Tall Buildings and Urban Habitat

¹¹ - Skyscrapers

در بسیاری از شهرهای ایران، توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه عمدتاً تحت تأثیر سودآوری اقتصادی و ارزش زمین صورت گرفته و فرآیند مکان‌یابی آن کمتر بر پایه تحلیل جامع و نظام‌مند معیارهای توسعه پایدار شهری و به‌ویژه هدف 11 از SDGs¹² مبنی بر شهر ایمن و پایدار استوار بوده است. پیامد چنین رویکردی، بروز مشکلاتی نظیر تراکم نامتوازن، اختلال در شبکه حمل‌ونقل، کاهش کیفیت محیط شهری، ناهنجاری در اکوسیستم شهر و زیرسیستم‌های آن، تشدید جزایر حرارتی و ناهماهنگی در سیمای سرزمین شهری بوده است (Ghadami and Newman, 2019). این مسئله در شهرهای دارای حساسیت‌های اقلیمی و محیطی، از جمله بندرعباس، ابعاد پیچیده‌تری پیدا می‌کند.

شهر بندرعباس به‌عنوان مهم‌ترین کلان‌شهر ساحلی جنوب ایران و یکی از قطب‌های راهبردی اقتصاد دریامحور کشور، طی سال‌های اخیر با رشد سریع جمعیت، توسعه فعالیت‌های بندری و افزایش مهاجرت مواجه بوده است. محدودیت اراضی قابل توسعه از یک‌سو و افزایش تقاضا برای کاربری‌های مسکونی، تجاری و خدماتی از سوی دیگر، ضرورت توجه به الگوهای توسعه عمودی را در این شهر دوجندان کرده است. با این حال، شرایط خاص اقلیمی بندرعباس شامل گرمای شدید، رطوبت بالا، تابش شدید خورشیدی، الگوهای خاص جریان باد و حساسیت محیط ساحلی، سبب می‌شود که هرگونه بلندمرتبه‌سازی بدون ارزیابی دقیق فضایی و اقلیمی، پیامدهای منفی قابل توجهی برای پایداری محیط شهری به همراه داشته باشد.

علاوه بر این، ویژگی‌های توپوگرافیک، محدودیت ظرفیت شبکه معابر، ملاحظات پدافند غیرعامل، حفاظت از کریدورهای منظر به ساحل خلیج فارس و کوه گنو، و همچنین ضرورت حفظ کیفیت اکوسیستم شهری، بر پیچیدگی فرآیند مکان‌یابی بلندمرتبه‌سازی در بندرعباس می‌افزاید. در نتیجه، نیاز به چارچوبی ساختارمند برای شناسایی پهنه‌های مناسب توسعه عمودی، بیش از پیش احساس می‌شود. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مکان‌یابی پهنه‌های مناسب برای بلندمرتبه‌سازی در شهر بندرعباس، از طریق تلفیق معیارهای کالبدی، دسترسی، زیرساختی، محیط‌زیستی و اقلیمی، در پی ارائه الگویی هدفمند برای هدایت توسعه فضایی شهر بندرعباس است. نوآوری اصلی این پژوهش در تأکید هم‌زمان بر ملاحظات اقلیمی و برنامه‌ریزی فضایی در فرآیند مکان‌یابی بلندمرتبه‌سازی در یک شهر ساحلی گرم و مرطوب نهفته است؛ موضوعی که در مطالعات داخلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

پیشینه

یکی از معدود مطالعاتی که مستقیماً به مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه پرداخته، پژوهش Aulia و همکاران (2014) است که در شهر سورابایا اندونزی انجام شد. آنها تناسب اراضی برای احداث ساختمان‌های بلند با استفاده از GIS و روش AHP ارزیابی کردند. معیارهای مورد استفاده شامل آسیب‌پذیری خاک، خطر زلزله، دسترسی به زیرساخت‌ها، اندازه بازار و ترجیحات سرمایه‌گذاران بود. نتایج نشان داد برخی از مناطق دارای جذابیت اقتصادی، از نظر شرایط ژئوتکنیکی برای ساخت برج‌ها مناسب نیستند و تلفیق معیارهای فیزیکی و اقتصادی برای توسعه بلندمرتبه ضروری است. همچنین در شهرهای شانگهای و تیانجین در چین، Cui و همکاران (2015) اثر متقابل ساختمان‌های بلندمرتبه و خاک‌های نرم بر پدیده فرونشست زمین را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که تمرکز ساختمان‌های مرتفع در مناطق دارای خاک نرم می‌تواند موجب افزایش نشست زمین و تغییر رفتار ژئوتکنیکی بستر شود. پژوهشگران با تحلیل شرایط خاک، بارگذاری سازه‌ها و میزان نشست، تأکید کردند که ویژگی‌های ژئوتکنیکی و ظرفیت تحمل خاک نقش اساسی در مکان‌یابی ساختمان‌های بلند دارند و بی‌توجهی به این عوامل می‌تواند خطرات سازه‌ای و ناپایداری زمین را افزایش دهد. نتایج تحقیق بر ضرورت ارزیابی دقیق شرایط زمین و مطالعات ژئوتکنیک پیش از توسعه بلندمرتبه‌سازی تأکید دارد.

¹² -Sustainable Development Goals

پژوهشگران در هند رویکردی مبتنی بر GIS برای انتخاب ایمن محل احداث ساختمان ارائه کردند. آنها عوامل توپوگرافی، شیب، پایداری زمین و مخاطرات طبیعی در فرآیند مکان‌یابی لحاظ کردند و نتایج آنها نشان داد تحلیل فضایی در محیط GIS می‌تواند مناطق ایمن‌تر برای توسعه ساختمان‌ها را شناسایی کند و خطرات ساخت‌وساز را کاهش دهد (Kumar and Bansal, 2016).

منصوری و همکاران (2017) تناسب اراضی برای ساختمان‌های بلندمرتبه در مشهد را با بهره‌گیری از GIS و فرایند تحلیل شبکه (ANP) شناسایی کردند. آنها معیارهای محیطی و طبیعی شامل گسل‌ها، شیب، خطر سیلاب و آلودگی‌های اکولوژیک در قالب لایه‌های اطلاعاتی را تحلیل کردند و نقشه نهایی تناسب اراضی تهیه گردید. نتایج نشان داد مناطق ۵ و ۱۰ مشهد به دلیل خطرپذیری کمتر و شرایط محیطی مناسب، بیشترین قابلیت توسعه بلندمرتبه را دارند؛ در حالی که مناطق ۸ و ۹ به علت وجود گسل، شیب زیاد و خطر سیلاب، از تناسب پایینی برخوردارند. همچنین پژوهش نشان داد بخش قابل توجهی از برج‌های موجود در مناطق نامناسب ساخته شده‌اند که با اصول پایداری محیطی مغایرت دارد.

میزان پذیرش اجتماعی ساختمان‌های بلندمرتبه در راستای توسعه پایدار شهری یکی از مهمترین مولفه‌ها در ساختمان‌سازی است که در یکی از شهرهای غنا توسط Agyemang و همکاران (2018) بررسی شد. این مطالعه با تأکید بر ابعاد اجتماعی بلندمرتبه‌سازی، دیدگاه شهروندان نسبت به مزایا و پیامدهای ساختمان‌های مرتفع را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد عواملی مانند بهبود استفاده از زمین، کاهش گسترش افقی شهر، دسترسی بهتر به خدمات و توسعه زیرساخت‌ها موجب افزایش پذیرش اجتماعی ساختمان‌های بلند می‌شود؛ در مقابل نگرانی‌هایی مانند تراکم جمعیت، فشار بر خدمات شهری و تغییر سیمای شهری از مهم‌ترین چالش‌های مطرح‌شده بودند. می‌توان نتیجه گرفت که موفقیت توسعه بلندمرتبه در شهرها علاوه بر معیارهای فنی و کالبدی، به میزان پذیرش اجتماعی و انطباق با نیازهای جامعه شهری نیز وابسته است.

Husin و همکاران (2021) چالش‌های ناشی از تراکم در توسعه مجتمع‌های مسکونی بلندمرتبه در مالزی را بررسی کردند و به تحلیل پیامدهای کالبدی، اجتماعی و زیرساختی ناشی از افزایش تراکم ساختمانی پرداخته و نشان دادند که توسعه بلندمرتبه بدون برنامه‌ریزی مناسب می‌تواند موجب فشار بر زیرساخت‌های شهری، کاهش کیفیت محیط زندگی، کمبود فضاهای باز و افزایش ازدحام جمعیتی شود. نتایج پژوهش تأکید می‌کند که در برنامه‌ریزی ساختمان‌های بلندمرتبه، علاوه بر معیارهای اقتصادی، باید ظرفیت زیرساخت‌ها، کیفیت محیط شهری و استانداردهای تراکم‌پذیری نیز مورد توجه قرار گیرد تا توسعه شهری به شکل پایدار انجام شود.

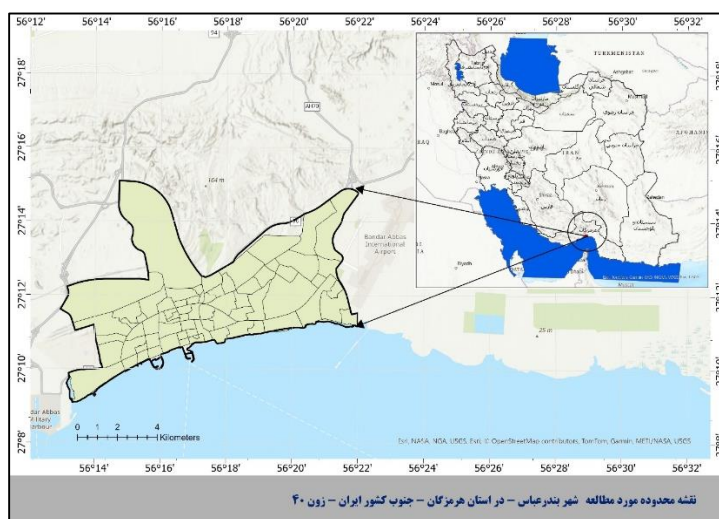
Ma و همکاران (2024) اثرات زیست‌محیطی و میزان کربن نهفته در ساختمان‌های بلندمرتبه با استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM) و ارزیابی چرخه عمر (LCA) را با تحلیل مصالح و سیستم‌های سازه‌ای مختلف بررسی کردند و نشان دادند که ساختمان‌های بلند می‌توانند سهم قابل توجهی در تولید کربن و مصرف انرژی داشته باشند و انتخاب نوع سازه و مصالح نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد. نتایج پژوهش بر ضرورت توجه به شاخص‌های پایداری محیطی و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی و توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه تأکید می‌کند. همچنین Lin و همکاران (2017) تأثیر شاخص‌های برنامه‌ریزی شهری بر پدیده جزیره حرارتی شهری در محیط‌های متراکم و بلندمرتبه را با تمرکز بر نقش پارک‌های کوچک شهری بررسی کردند و نشان دادند که شاخص‌هایی مانند تراکم ساختمانی، ارتفاع ساختمان‌ها، نسبت سطح اشغال و میزان فضای سبز تأثیر مستقیمی بر شدت جزیره حرارتی دارند. نتایج پژوهش بیانگر آن است که توسعه بلندمرتبه بدون تأمین فضای سبز کافی می‌تواند موجب افزایش دمای محیط شهری شود، در حالی که طراحی مناسب فضاهای سبز شهری نقش مؤثری در بهبود شرایط اقلیمی و ارتقای پایداری محیط شهری دارد.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش عمده پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه بلندمرتبه‌سازی در ایران، یا بر جنبه‌های معماری و سازه‌ای تمرکز داشته‌اند یا صرفاً به تحلیل‌های کالبدی محدود شده‌اند. در مقابل، پژوهش‌های اندکی به ارزیابی تک‌بعدی از معیارهای اقلیمی، محیط‌زیستی، زیرساختی و دسترسی در فرآیند مکان‌یابی بلندمرتبه‌سازی پرداخته‌اند؛ به‌ویژه در شهرهای ساحلی گرم و مرطوب که شرایط اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت توسعه شهری دارد. بنابراین، شکاف اصلی پژوهش حاضر، فقدان یک چارچوب جامع و چندمعیاره برای ارزیابی تناسب فضایی بلندمرتبه‌سازی در شهر بندرعباس است. بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش آن است که کدام پهنه‌های شهری بندرعباس با توجه به معیارهای کالبدی، اقلیمی، محیط‌زیستی، دسترسی و زیرساختی، دارای بیشترین تناسب برای توسعه بلندمرتبه‌سازی هستند؟ پژوهش حاضر تلاش

می‌کند با بهره‌گیری از روش‌های تحلیل مکانی و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، ضمن شناسایی پهنه‌های مناسب توسعه عمودی، چارچوبی علمی برای هدایت سیاست‌های بلندمرتبه‌سازی در راستای توسعه پایدار شهری ارائه کند.

منطقه مورد مطالعه

بندرعباس، به‌عنوان مهم‌ترین کلان‌شهر ساحلی جنوب ایران و مرکز سیاسی-اداری استان هرمزگان، در حاشیه شمالی خلیج فارس و در موقعیتی راهبردی در کریدورهای ملی و بین‌المللی حمل‌ونقل دریایی قرار گرفته است (شکل 1). اما این شهر، بر روی بستری نرم از رسوبات شور و آهکی ساحلی گسترده شده است و عمق تراز ایستایی در نقاط مختلف این شهر، کمتر از 10 متر است که عملیات ساختمان‌سازی را در آن دشوار نموده است. از طرفی، موانع طبیعی (صخره‌های تیز شمالی و دریا در جنوب) و موانع انسانی (فرودگاه در شرق، صنایع و مراکز نظامی در غرب)، منجر به گُند شدن روند رشد فیزیکی شهر در بُعد افقی شده است (Dadras et al., 2014)؛ حتی در مواردی که شهرک‌سازی در بُعد افقی در شمال‌غربی شهر انجام شده است، با بحران فرونشست بستر زمین مواجه شده‌اند. بنابراین، طرح بلندمرتبه‌سازی با در نظر گرفتن ملاحظات کالبدی، محیط‌زیست شهری، آسایش حرارتی و سیمای سرزمین شهری، می‌تواند بخشی از مشکلات مسکن و ساخت‌وساز در بندرعباس را کاهش دهد.



شکل 1- منطقه مورد مطالعه: شهر بندرعباس

روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف در دسته تحقیقات کاربردی- توسعه‌ای قرار می‌گیرد. این مطالعه با هدف ارزیابی و شناسایی مکان‌های مناسب برای احداث ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس انجام گردید که قابلیت استفاده عملی در شرایط واقعی بندرعباس را دارد. بنابراین نتایج پژوهش می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های اجرایی و برنامه‌ریزی توسعه شهری مورد استفاده قرار گیرد. از نظر ماهیت و روش، این تحقیق کمی بوده و بر پایه تحلیل داده‌های عددی و پردازش‌های مکانی انجام گردید. در این راستا، داده‌های مکانی- فضایی با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های تصمیم‌گیری تحلیل شده و خروجی‌ها به صورت نقشه‌های فضایی برای تصمیم و اجرا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل و مکان‌یابی مناسب برای توسعه بلندمرتبه‌سازی در شهر بندرعباس، از مجموعه‌ای از داده‌های مکانی، کالبدی، زیرساختی و جمعیتی بندرعباس شامل طرح جامع و طرح تفصیلی شهر بندرعباس به عنوان سند فرادست شهری، ضوابط اجرایی ساخت‌وساز، تراکم ساختمانی، تعداد طبقات مجاز، سطح اشغال و نحوه استفاده از اراضی شهری، نقشه کاداستر شهری برای بررسی قطعات ثبتی، ابعاد و مساحت

پلاک‌ها، معابر و مالکیت اراضی، بانک اطلاعات زیرساخت‌های شهری مربوط به شبکه‌های زیربنایی شامل برق، آب، گاز و سایر تأسیسات شهری از سازمان‌ها و شرکت‌های خدمات‌رسان، داده‌های جمعیتی و بلوک‌های آماری شامل تراکم جمعیت، تعداد خانوار و توزیع جمعیتی استفاده گردید.

دسته‌بندی معیارها و زیرمعیارها

با توجه به ماهیت چندبُعدی مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه و تأثیر همزمان عوامل طبیعی، کالبدی، زیرساختی و محیطی در توسعه عمودی شهر بندرعباس، در این پژوهش معیارها و زیرمعیارهای مؤثر با استفاده از روش دلفی فازی و بهره‌گیری از نظر خبرگان شناسایی و نهایی شدند. بدین منظور، پس از بررسی مطالعات پیشین و استخراج شاخص‌های اولیه، مجموعه‌ای از معیارها در اختیار متخصصان حوزه‌های برنامه‌ریزی شهری، ژئوتکنیک و مدیریت شهری قرار گرفت و طی چند مرحله ارزیابی، مهم‌ترین شاخص‌های مؤثر انتخاب گردید. در نهایت، چهار معیار اصلی شامل معیارهای دسترسی و زیرساخت‌ها، کالبدی، اقتصادی-اجتماعی، فیزیکی به‌همراه زیرمعیارهای مرتبط به‌عنوان عوامل مؤثر در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس تعیین شدند که در شکل (2) ارائه شده‌اند.



شکل 2- دسته بندی معیارها و زیرمعیارها در تناسب اراضی برای بلندمرتبه سازی ساختمان های شهری در بندرعباس

وزن دهی (تحلیل سلسله مراتبی فازی)

در این پژوهش، به‌منظور تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه شهر بندرعباس، از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP) مبتنی بر روش توسعه‌ای چانگ استفاده شد. این روش با ترکیب منطق فازی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، امکان مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام موجود در قضاوت‌های انسانی را فراهم می‌کند. در روش AHP فازی، مقایسات زوجی بر اساس اعداد فازی مثلثی انجام می‌شود. عدد فازی مثلثی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Chang, 1996):

$$\tilde{A} = (l, m, u)$$

که در آن، l حد پایین، m مقدار محتمل و u حد بالای عدد فازی است. در این پژوهش، برای انجام مقایسات زوجی از مقیاس فازی ساعتی استفاده شد. پس از تکمیل پرسشنامه‌ها توسط خبرگان، ماتریس مقایسات زوجی فازی به صورت زیر تشکیل گردید:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

در ادامه، مجموع مقادیر فازی هر سطر محاسبه شد:

$$\tilde{M}_i = \sum_{j=1}^m \tilde{M}_{ji}^j$$

سپس مقدار توسعه فازی برای هر معیار بر اساس روش چانگ از رابطه زیر به دست آمد:

$$S_i = \tilde{M}_i \otimes \left(\sum_{i=1}^n \tilde{M}_i \right)^{-1}$$

برای مقایسه اعداد فازی و تعیین درجه امکان‌پذیری، از رابطه زیر استفاده شد:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & m_2 \geq m_1 \\ 0 & l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \end{cases}$$

پس از محاسبه درجه امکان‌پذیری، بردار وزن‌های اولیه به صورت زیر استخراج شد:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$$

در نهایت، وزن نهایی معیارها از طریق نرمال‌سازی بردار وزن‌ها به دست آمد:

$$W' = \left(\frac{d'(A_1)}{\sum d'(A_1)}, \frac{d'(A_2)}{\sum d'(A_2)}, \dots, \frac{d'(A_n)}{\sum d'(A_n)} \right)^T$$

به‌منظور بررسی میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان، نرخ ناسازگاری ماتریس‌ها محاسبه شد. ابتدا شاخص ناسازگاری از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

سپس نرخ ناسازگاری به صورت زیر تعیین شد:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

که در آن، CI شاخص ناسازگاری، CR نرخ ناسازگاری و RI شاخص تصادفی و λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس است. در صورتی که مقدار (CR < 0.1) باشد، سازگاری ماتریس مقایسات زوجی قابل قبول در نظر گرفته می‌شود.

اعمال وزن و همپوشانی

پس از تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، فرآیند تحلیل فضایی و تهیه نقشه تناسب اراضی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد. در این مرحله، برای هر یک از زیرمعیارهای پژوهش، لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز جمع‌آوری و به نقشه‌های رستری تبدیل گردید. به‌منظور ایجاد قابلیت مقایسه بین لایه‌ها و حذف اختلاف مقیاس داده‌ها، تمامی نقشه‌های رستری بر اساس میزان مطلوبیت هر زیرمعیار در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه استانداردسازی شدند. استانداردسازی لایه‌ها با استفاده از روش مقیاس خطی و در دامنه صفر تا یک انجام گرفت. (Malczewski, 1999)

$$\text{Positive indicators: } x_{ij*} = \frac{(x_{ij} - \min(x_j))}{(\max(x_j) - \min(x_j))}$$

$$\text{Negative indicators: } x_{ij*} = \frac{(\max(x_j) - x_j)}{(\max(x_j) - \min(x_j))}$$

در این معادله، x_{ij} مقدار نرمال شده شاخص j است؛ $\max(x_j)$ و $\min(x_j)$ به ترتیب نشان دهنده حداکثر و حداقل مقادیر شاخص j در محدوده مورد مطالعه هستند.

در ادامه، وزن نهایی هر زیرمعیار که از روش AHP فازای به دست آمده بود، در لایه رستری متناظر ضرب شد تا نقشه وزن دار هر زیرمعیار تولید گردد. این فرآیند بر اساس رابطه زیر انجام شد:

$$WLC_i = W_i \times X_i$$

که در آن، WLC_i نقشه وزن دار زیرمعیار، W_i وزن زیرمعیار و X_i مقدار استاندارد شده لایه رستری است. سپس نقشه‌های وزن دار زیرمعیارهای مرتبط با هر معیار اصلی، با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی (WLC^{13}) و عملگر همپوشانی وزنی در محیط GIS با یکدیگر تلفیق شدند و نقشه نهایی هر معیار استخراج گردید:

$$S_j = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i$$

که در آن، S_j مقدار نهایی تناسب برای هر معیار، W_i وزن زیرمعیار، X_i مقدار استاندارد شده هر زیرمعیار و n تعداد زیرمعیارها است. در نهایت، نقشه‌های نهایی معیارهای اصلی شامل معیارهای دسترسی و زیرساخت‌ها، کالبدی، اقتصادی-اجتماعی، فیزیکی، بر اساس وزن نهایی هر معیار با یکدیگر همپوشانی شدند و نقشه نهایی تناسب اراضی برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس تهیه گردید:

$$LSM = \sum_{j=1}^m W_j \times S_j$$

که در آن، LSM نقشه نهایی تناسب اراضی، W_j وزن هر معیار اصلی، S_j نقشه تناسب هر معیار و m تعداد معیارهای اصلی است. خروجی نهایی پژوهش، نقشه‌ای از میزان تناسب اراضی شهر بندرعباس برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه است که مناطق مختلف را بر اساس میزان مطلوبیت برای بلندمرتبه‌سازی طبقه‌بندی می‌کند.

تحلیل حساسیت مدل با مونت کارلو

به منظور ارزیابی میزان عدم قطعیت و بررسی پایداری نتایج مدل مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس، از شبیه‌سازی مونت کارلو بر روی وزن معیارهای به دست آمده از روش AHP فازای استفاده شد. در این راستا، با توجه به ماهیت ذهنی و مبتنی بر قضاوت خبرگان در فرآیند تعیین وزن‌ها، عدم قطعیت موجود در مقادیر وزنی به عنوان یک منبع خطا در نظر گرفته شد. در این مطالعه، وزن معیارهای اصلی شامل معیارهای دسترسی و زیرساخت‌ها، کالبدی، اقتصادی-اجتماعی، فیزیکی به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال حول مقادیر اولیه AHP فازای مدل‌سازی شدند. در هر تکرار، وزن‌ها با استفاده از رابطه زیر دچار تغییرات تصادفی گردیدند:

$$W_i^{(k)} = W_i \times \epsilon_i$$

که در آن W_i وزن اولیه معیار i ، ϵ_i مقدار تصادفی با توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار مشخص است. سپس وزن‌ها در هر تکرار نرمال‌سازی شده به گونه‌ای که مجموع آن‌ها برابر یک گردد (Metropolis and Ulam, 1949):

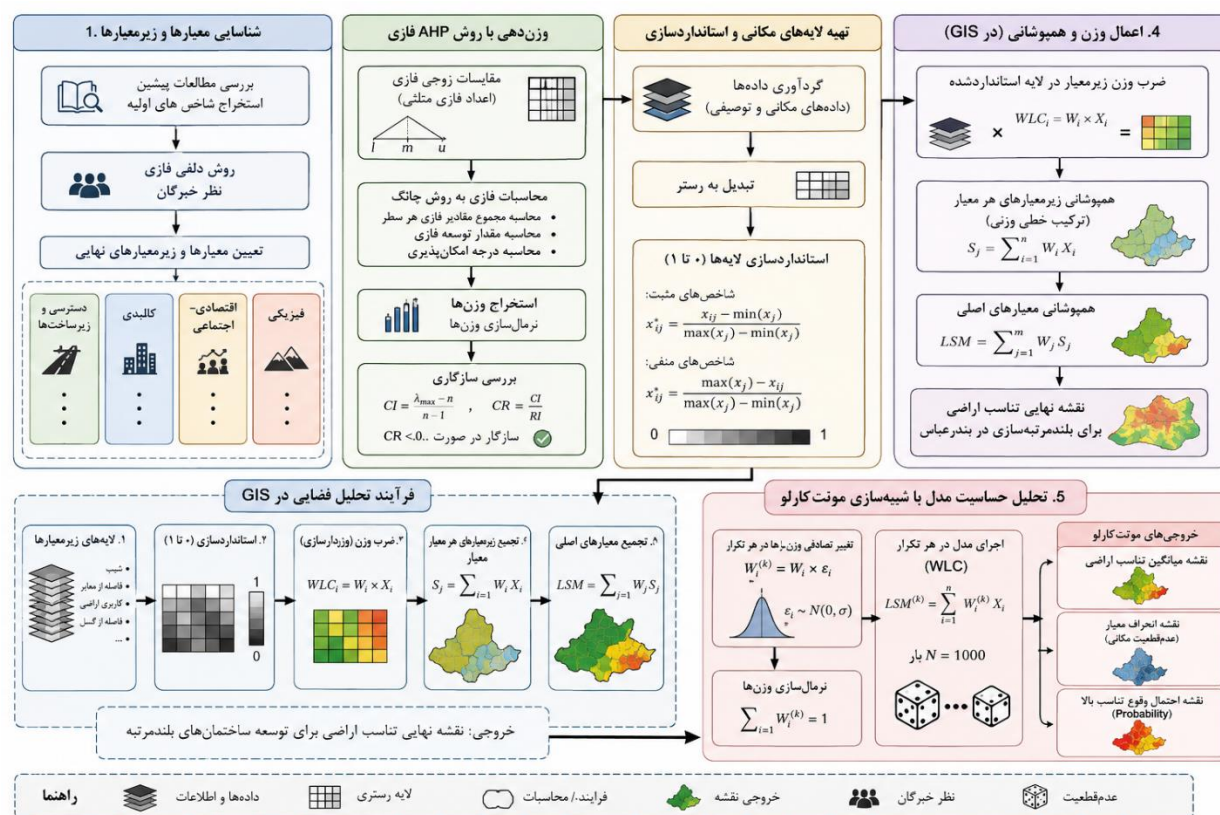
$$\sum_{i=1}^n W_i^{(k)} = 1$$

¹³ - Weighted Linear Combination

در ادامه، مدل مکان‌یابی بر اساس ترکیب خطی وزنی (WLC) برای هر تکرار اجرا شد:

$$LSM^{(K)} = \sum_{i=1}^n W_i^{(k)} X_i$$

که در آن X_i نقشه‌های رستری استاندارد شده معیارها می‌باشند. این فرآیند برای $N = 50000$ تکرار انجام شد تا توزیع فضایی نتایج مدل تحت شرایط عدم قطعیت وزن‌ها به دست آید. در نهایت، سه خروجی اصلی شامل: نقشه میانگین تناسب اراضی، نقشه انحراف معیار (به عنوان شاخص عدم قطعیت مکانی)، و نقشه احتمال وقوع تناسب بالا برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه از شبیه‌سازی مونت کارلو استخراج گردید. این رویکرد امکان ارزیابی حساسیت مدل نسبت به تغییرات احتمالی در وزن معیارها را فراهم نموده و موجب افزایش قابلیت اعتماد نتایج مکان‌یابی گردید. شبیه‌سازی مونت کارلو در محیط MATLAB اجرا شد؛ به گونه‌ای که نقشه رستری معیارها به صورت Tiff وارد نرم‌افزار شد و با کدنویسی، عدم قطعیت مونت کارلو بر روی نتیجه نهایی اجرا شد.



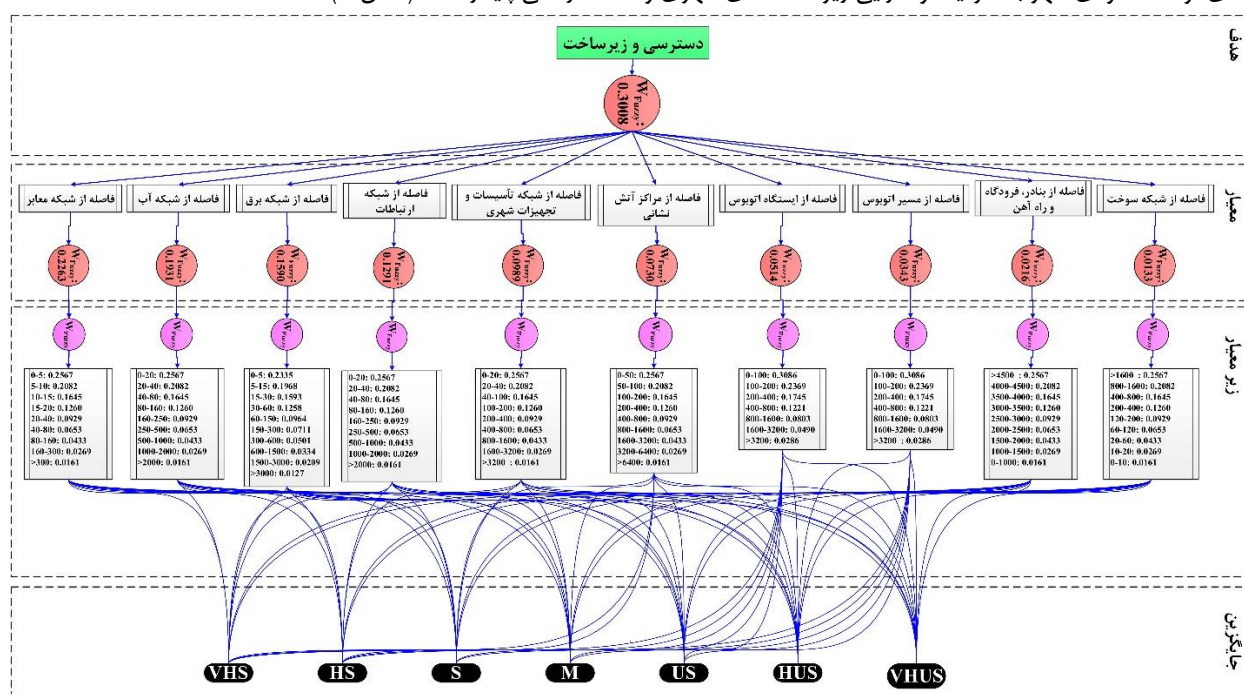
شکل 3- فلوجارتی از مسیر روش پژوهش

نتایج

معیار زیرساخت

نتایج وزن‌دهی فازی زیرمعیارهای زیرساختی نشان داد که فاصله از شبکه معابر با وزن فازی 0/152 مهم‌ترین عامل زیرساختی در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس بوده است. این نتیجه بیانگر آن است که دسترسی مناسب به شبکه ارتباطی و معابر شهری، نقش اساسی در توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه دارد؛ زیرا این نوع ساختمان‌ها به دلیل تراکم جمعیتی و عملکردی بالا، نیازمند دسترسی مطلوب برای جابه‌جایی، خدمات‌رسانی و مدیریت ترافیک شهری هستند. پس از آن، زیرمعیارهای فاصله از شبکه توزیع آب و فاصله از اتصالات شبکه توزیع آب به ترتیب با وزن فازی 0/135 و 0/118 در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت تأمین پایدار آب و دسترسی مناسب

به زیرساخت‌های آبرسانی در استقرار ساختمان‌های بلندمرتبه است. با توجه به مصرف بالای آب در این نوع توسعه شهری، نزدیکی به شبکه‌های اصلی و اتصالات توزیع آب از عوامل کلیدی در انتخاب مکان مناسب محسوب می‌شود. همچنین زیرمعیارهای فاصله از شبکه فاضلاب و فاصله از منهول شبکه فاضلاب اهمیت بالایی را به خود اختصاص دادند که بیانگر نقش زیرساخت‌های دفع و انتقال فاضلاب در توسعه پایدار شهری است. این نتایج نشان می‌دهد که قابلیت اتصال به شبکه‌های جمع‌آوری و انتقال فاضلاب، یکی از الزامات اساسی در مکان‌یابی ساختمان‌های مرتفع به شمار می‌رود. در مقابل، زیرمعیارهای مرتبط با شبکه برق شامل فاصله از شبکه توزیع برق و فاصله از پست توزیع برق نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده‌اند. این موضوع بیانگر نیاز ساختمان‌های بلندمرتبه به تأمین پایدار انرژی و ظرفیت مناسب شبکه برق شهری است. علاوه بر این، فاصله از شبکه فیبر نوری نشان‌دهنده اهمیت زیرساخت‌های ارتباطی و فناوری اطلاعات در توسعه نوین شهری و ساختمان‌های بلندمرتبه می‌باشد. به‌طور کلی، نتایج حاصل نشان می‌دهد که در میان عوامل زیرساختی، دسترسی به شبکه معابر و زیرساخت‌های اساسی شهری شامل آب، فاضلاب و برق، بیشترین نقش را در تعیین مناسب بودن اراضی برای توسعه بلندمرتبه در بندرعباس داشته‌اند. این امر بیانگر وابستگی بالای توسعه عمودی شهر به ظرفیت و کارایی زیرساخت‌های شهری و خدمات‌رسانی پایدار است (شکل 4).

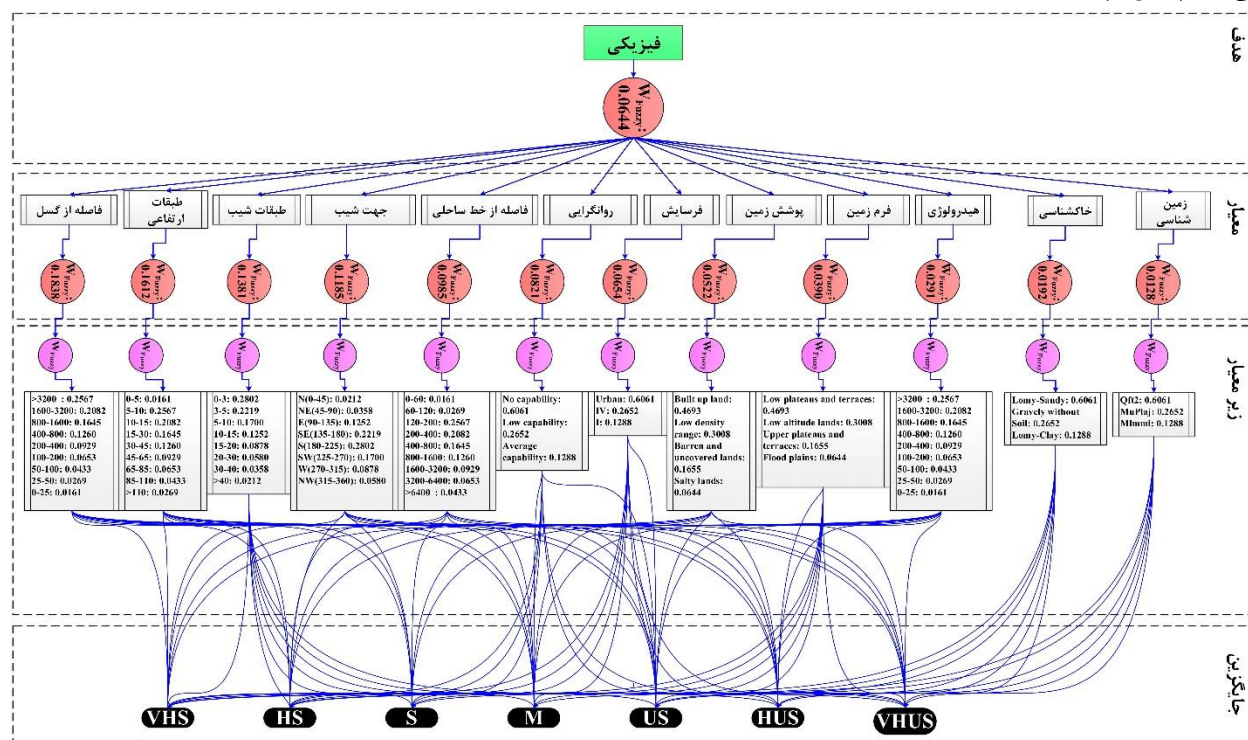


شکل 4- نمودار درختی از وزن زیرمعیارهای زیرساخت با روش FAHP

معیار فیزیکی

نتایج وزن‌دهی فازی زیرمعیارهای طبیعی و محیطی نشان داد که فاصله از گسل با وزن فازی 0/183 مهم‌ترین عامل در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس بوده است. این نتیجه بیانگر اهمیت بالای ملاحظات لرزه‌خیزی و کاهش خطرات ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی در توسعه عمودی شهر است. با توجه به قرارگیری بندرعباس در پهنه‌های با خطر نسبی زمین‌لرزه، رعایت فاصله ایمن از گسل‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین الزامات برنامه‌ریزی شهری و توسعه بلندمرتبه محسوب می‌شود. پس از آن، طبقات ارتفاعی با وزن 0/161 و طبقات شیب با وزن 0/138 در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های توپوگرافی منطقه نقش مهمی در تعیین مناسب بودن اراضی برای احداث ساختمان‌های بلندمرتبه دارند. به‌طور کلی، اراضی با ارتفاع و شیب متعادل، از نظر هزینه‌های ساخت‌وساز، پایداری سازه‌ای و امکان توسعه زیرساختی، مطلوب‌تر ارزیابی شده‌اند. زیرمعیار جهات شیب نیز با وزن 0/118 اهمیت قابل توجهی را نشان داد که می‌تواند با شرایط اقلیمی بندرعباس، میزان تابش خورشیدی، تهویه طبیعی و آسایش حرارتی مرتبط باشد. همچنین فاصله از خط ساحلی با وزن 0/098 بیانگر آن است که مجاورت با نوار ساحلی، علاوه بر ارزش اقتصادی و منظر شهری، به دلیل مخاطراتی نظیر رطوبت بالا، فرسایش ساحلی و تهدیدات محیطی،

در فرایند مکان‌یابی مورد توجه قرار گرفته است. زیرمعیارهای روانگرایی و فرسایش به ترتیب با وزن فازی 0/0821 و 0/0654 نیز به عنوان عوامل ژئوتکنیکی و محیطی مؤثر شناخته شدند که نشان‌دهنده اهمیت پایداری زمین و کاهش مخاطرات زمین‌ساختی در توسعه بلندمرتبه است. همچنین پوشش زمین، فرم زمین، هیدرولوژی، خاک‌شناسی و زمین‌شناسی، به ترتیب کمترین وزن را به خود اختصاص دادند. پایین بودن وزن این عوامل می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که در محدوده مورد مطالعه، تغییرات این پارامترها نسبت به سایر عوامل طبیعی از تأثیرگذاری کمتری برخوردار بوده یا محدودیت‌های ناشی از آن‌ها در مقیاس منطقه‌ای کمتر محسوس بوده است. به طور کلی، نتایج حاصل نشان می‌دهد که در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس، عوامل مرتبط با مخاطرات طبیعی، پایداری زمین و ویژگی‌های توپوگرافی نسبت به سایر عوامل محیطی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده‌اند؛ موضوعی که ضرورت توجه به تاب‌آوری شهری و کاهش ریسک‌های محیطی در توسعه عمودی شهر را آشکار می‌سازد (شکل 5).

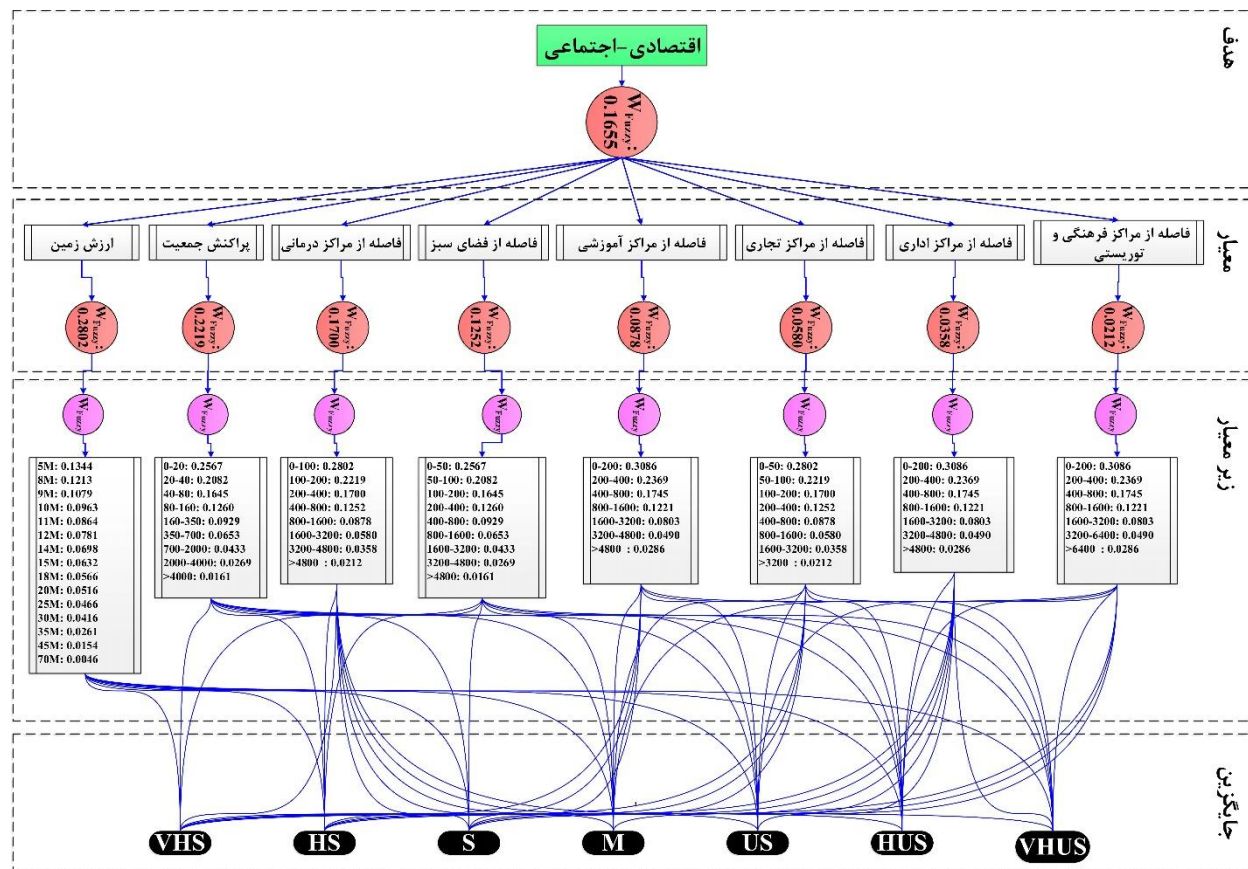


شکل 5- نمودار درختی از وزن زیرمعیارهای فیزیکی با روش FAHP

معیار اقتصادی - اجتماعی

نتایج وزن‌دهی فازی زیرمعیارهای اقتصادی - اجتماعی نشان داد که ارزش زمین با وزن فازی 0/256 مهم‌ترین عامل در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس بوده است. این نتیجه بیانگر آن است که ساخت‌وسازهای بلندمرتبه عمدتاً در پهنه‌هایی گرایش به استقرار دارند که از ارزش اقتصادی بالاتر و ظرفیت سرمایه‌گذاری بیشتری برخوردار باشند. در واقع، افزایش ارزش زمین نه تنها بازتاب‌دهنده جذابیت اقتصادی محدوده‌های شهری است، بلکه نشان‌دهنده تمرکز خدمات، زیرساخت‌ها و قابلیت توسعه شهری در این نواحی نیز می‌باشد. پس از آن، زیرمعیار تراکم جمعیت با وزن 0/208 در رتبه دوم قرار گرفت که نشان‌دهنده اهمیت تقاضای سکونت و فشار فضایی ناشی از رشد جمعیت در توسعه عمودی شهر است. این موضوع بیان می‌کند که در مناطق دارای تراکم جمعیتی بالاتر، نیاز به استفاده بهینه از زمین و توسعه بلندمرتبه بیشتر احساس می‌شود. زیرمعیار فاصله از مراکز درمانی با وزن 0/164 نیز اهمیت قابل توجهی را نشان داد. این نتیجه بیانگر نقش دسترسی به خدمات درمانی در ارتقای کیفیت زندگی و افزایش مطلوبیت سکونت در ساختمان‌های بلندمرتبه است. همچنین فاصله از فضای سبز با وزن 0/126 نشان می‌دهد که دسترسی به فضاهای باز و محیط‌های سبز شهری محسوب می‌شود.

در مقابل، زیرمعیارهای فاصله از مراکز آموزشی، فاصله از مراکز تجاری، فاصله از مراکز اداری، فاصله از مراکز فرهنگی و فاصله از مراکز توریستی وزن‌های کمتری را به خود اختصاص دادند. پایین بودن وزن این عوامل می‌تواند بیانگر آن باشد که در محدوده مورد مطالعه، نقش خدمات پایه شهری و ویژگی‌های اقتصادی اراضی نسبت به کاربری‌های فرهنگی و گردشگری تأثیر بیشتری در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه داشته است. به‌طور کلی، نتایج حاصل نشان می‌دهد که در میان عوامل اقتصادی - اجتماعی، شاخص‌های مرتبط با ارزش اقتصادی زمین، تمرکز جمعیت و دسترسی به خدمات اساسی شهری، بیشترین تأثیر را در تعیین تناسب اراضی برای توسعه بلندمرتبه در بندرعباس داشته‌اند. این موضوع بیانگر آن است که توسعه عمودی شهر بیش از هر چیز متأثر از ظرفیت اقتصادی اراضی و نیازهای جمعیتی و خدماتی ساکنان شهری است (شکل 6).

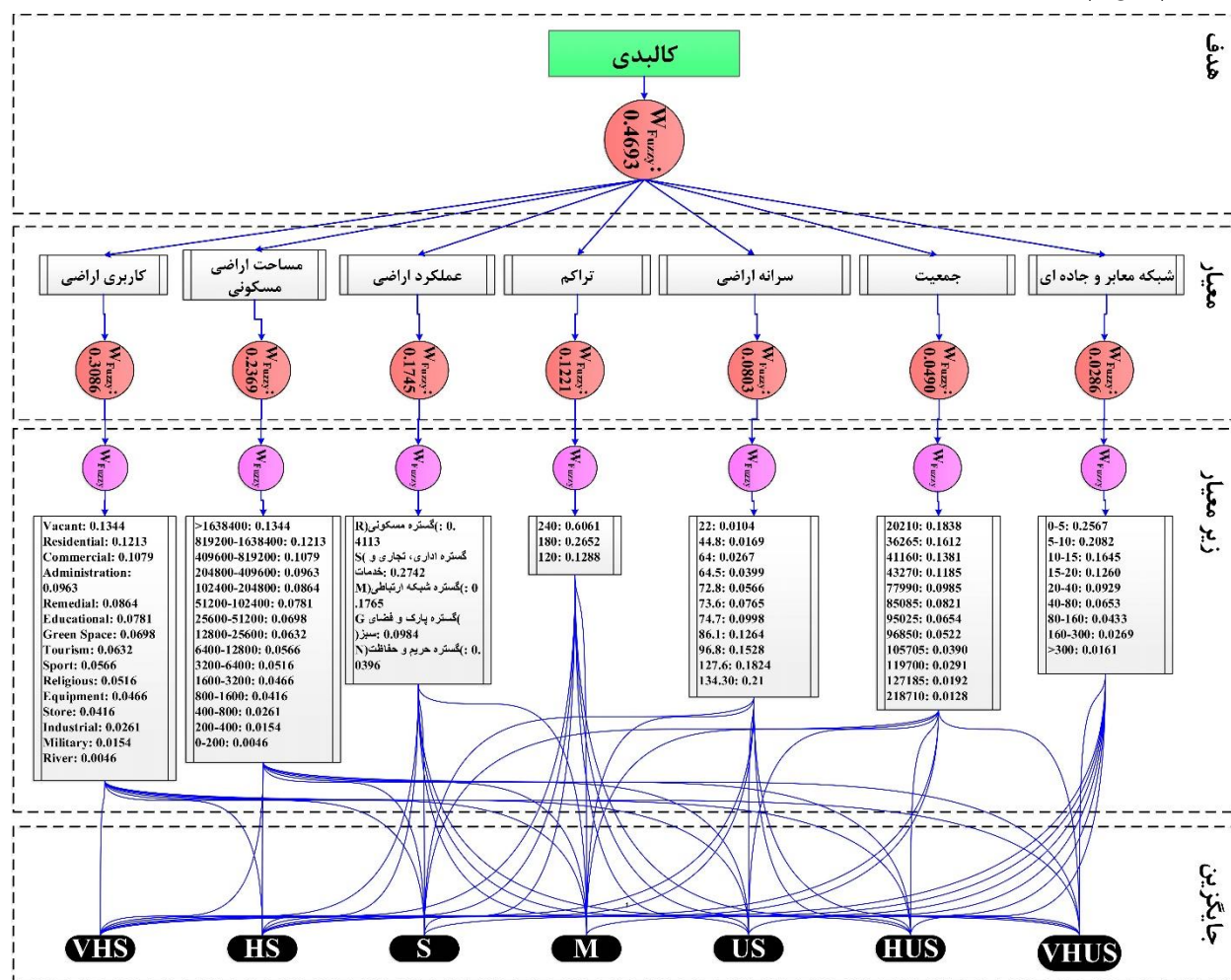


شکل 6- نمودار درختی از وزن زیرمعیارهای اقتصادی - اجتماعی با روش FAHP

معیار کالبدی

نتایج وزن‌دهی فازی زیرمعیارهای کالبدی نشان داد که کاربری اراضی با وزن فازی 0/308 بیشترین اهمیت را در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه شهری در بندرعباس دارا بوده است. این موضوع بیانگر آن است که نوع کاربری و سازگاری عملکردی اراضی با توسعه عمودی شهر، نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایند مکان‌یابی دارد. به عبارت دیگر، اراضی دارای کاربری‌های سازگار با توسعه شهری و قابلیت استقرار فعالیت‌های مسکونی و خدماتی، از اولویت بیشتری برای احداث ساختمان‌های بلندمرتبه برخوردار هستند. پس از آن، زیرمعیار مساحت اراضی مسکونی با وزن فازی 0/236 در رتبه دوم قرار گرفت که نشان‌دهنده اهمیت ظرفیت فضایی و امکان توسعه فیزیکی در بافت‌های مسکونی شهر است. این نتیجه بیان می‌کند که پهنه‌های دارای اراضی وسیع‌تر و یکپارچه‌تر، قابلیت بیشتری برای استقرار پروژه‌های بلندمرتبه دارند. زیرمعیار عملکرد اراضی نیز با وزن 0/174 به‌عنوان سومین عامل مؤثر شناخته شد که اهمیت هماهنگی میان عملکرد شهری و توسعه بلندمرتبه را نشان می‌دهد. همچنین تراکم با وزن 0/122 بیانگر آن است که تراکم موجود شهری در تعیین مناسب بودن اراضی برای توسعه عمودی مؤثر بوده، اما نسبت به نوع

کاربری و وسعت اراضی از اهمیت کمتری برخوردار است. در مقابل، زیرمعیارهای سرانه اراضی، جمعیت و شبکه معابر و جاده‌ای به ترتیب با وزن فازی 0/0803، 0/0490 و 0/0286، کمترین وزن را به خود اختصاص دادند. پایین بودن وزن شبکه معابر می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که در محدوده مورد مطالعه، دسترسی شبکه ارتباطی نسبت به سایر عوامل کالبدی محدودیت اصلی توسعه بلندمرتبه محسوب نمی‌شود. همچنین وزن پایین جمعیت بیانگر آن است که ویژگی‌های کالبدی و ساختاری اراضی، نقش پررنگ‌تری نسبت به ویژگی‌های جمعیتی در فرایند مکان‌یابی داشته‌اند (شکل 7).



شکل 7- نمودار درختی از وزن زیرمعیارهای کالبدی با روش FAHP

معیارها

نتایج وزن‌دهی معیارهای اصلی با استفاده از روش AHP و FAHP نشان داد که معیار کالبدی با وزن فازی 0/496 مهم‌ترین عامل در مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس بوده است (جدول 2 و 3). این نتیجه بیانگر آن است که ویژگی‌های کالبدی و ساختاری شهر، شامل نوع کاربری اراضی، ظرفیت توسعه فیزیکی، تراکم و سازمان فضایی شهری، بیشترین تأثیر را در تعیین تناسب اراضی برای توسعه عمودی داشته‌اند. همچنین بالا بودن وزن این معیار نشان می‌دهد که در فرایند مکان‌یابی، ملاحظات مرتبط با ساختار فضایی و قابلیت توسعه شهری نسبت به سایر عوامل در اولویت قرار گرفته‌اند. در رتبه دوم، معیار زیرساخت با وزن فازی 0/30 قرار گرفت که بیانگر اهمیت بالای دسترسی به شبکه‌های خدمات‌رسان شهری و زیرساخت‌های پشتیبان در توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه است. این موضوع نشان می‌دهد که توسعه عمودی شهر به‌شدت وابسته به ظرفیت زیرساخت‌های شهری از جمله شبکه معابر، آب، برق، فاضلاب و ارتباطات می‌باشد و بدون وجود زیرساخت‌های کارآمد، امکان استقرار مناسب ساختمان‌های مرتفع محدود خواهد بود.

معیار اقتصادی و اجتماعی نیز با وزن فازی 0/165 در رتبه سوم قرار گرفت. این نتیجه نشان می‌دهد که عواملی نظیر ارزش زمین، تراکم جمعیت و دسترسی به خدمات شهری، اگرچه در فرایند مکان‌یابی مؤثر بوده‌اند، اما نسبت به عوامل کالبدی و زیرساختی از اهمیت کمتری برخوردار بوده‌اند. به عبارت دیگر، در محدوده مورد مطالعه، ویژگی‌های فضایی و زیرساختی شهر نقش پررنگ‌تری نسبت به متغیرهای اقتصادی و اجتماعی در تعیین مکان‌های مناسب برای بلندمرتبه‌سازی داشته‌اند. در نهایت، معیار فیزیکی با وزن فازی 0/064 کمترین اهمیت را در میان معیارهای اصلی به خود اختصاص داد. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که اگرچه عوامل طبیعی و محیطی نظیر شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی و مخاطرات طبیعی در فرایند ارزیابی لحاظ شده‌اند، اما در مقایسه با محدودیت‌ها و نیازهای کالبدی و زیرساختی شهر، تأثیر کمتری بر تصمیم‌گیری نهایی داشته‌اند. همچنین مقدار نرخ ناسازگاری (CR) برابر با 0/068 به دست آمد که کمتر از مقدار استاندارد 0/1 است. این نتیجه بیانگر سازگاری قابل قبول قضاوت‌های کارشناسی و اعتبار مناسب وزن‌های استخراج‌شده در فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی می‌باشد.

جدول 2- ماتریس مقایسات زوجی معیارها در تحلیل سلسله مراتبی فازی

فیزیکی			اقتصادی و اجتماعی			زیرساخت			کالبدی			
6.00	5.00	4.00	5.00	4.00	3.00	4.00	3.00	2.00	1.00	1.00	1.00	کالبدی
5.00	4.00	3.00	4.00	3.00	2.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.33	0.25	زیرساخت
4.00	3.00	2.00	1.00	1.00	1.00	0.50	0.33	0.25	0.33	0.25	0.20	اقتصادی و اجتماعی
1.00	1.00	1.00	0.50	0.33	0.25	0.33	0.25	0.20	0.25	0.20	0.17	فیزیکی

جدول 3- وزن به دست آمده معیارها در بلندمرتبه سازی ساختمان‌ها در بندرعباس با تحلیل سلسله مراتبی فازی

معیار	وزن AHP	وزن FAHP	نرخ ناسازگاری (CR)
کالبدی	0.5200	0.4693	0.0680
زیرساخت	0.2682	0.3008	
اقتصادی و اجتماعی	0.1409	0.1655	
فیزیکی	0.0709	0.0644	

نتایج تحلیل فضایی معیارهای اصلی مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس نشان داد که الگوی توزیع پهنه‌های مناسب در هر معیار دارای تفاوت‌های معناداری است و هر یک از معیارها نقش متفاوتی در تعیین تناسب فضایی اراضی ایفا می‌کنند (شکل 8). در معیار فیزیکی، پهنه‌های با تناسب بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی و جنوبی محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شود، در حالی که نواحی شمالی و شمال‌غربی به دلیل شرایط توپوگرافی، شیب و محدودیت‌های طبیعی، در طبقات نامناسب و خیلی نامناسب قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج نمودار طبقات تناسب

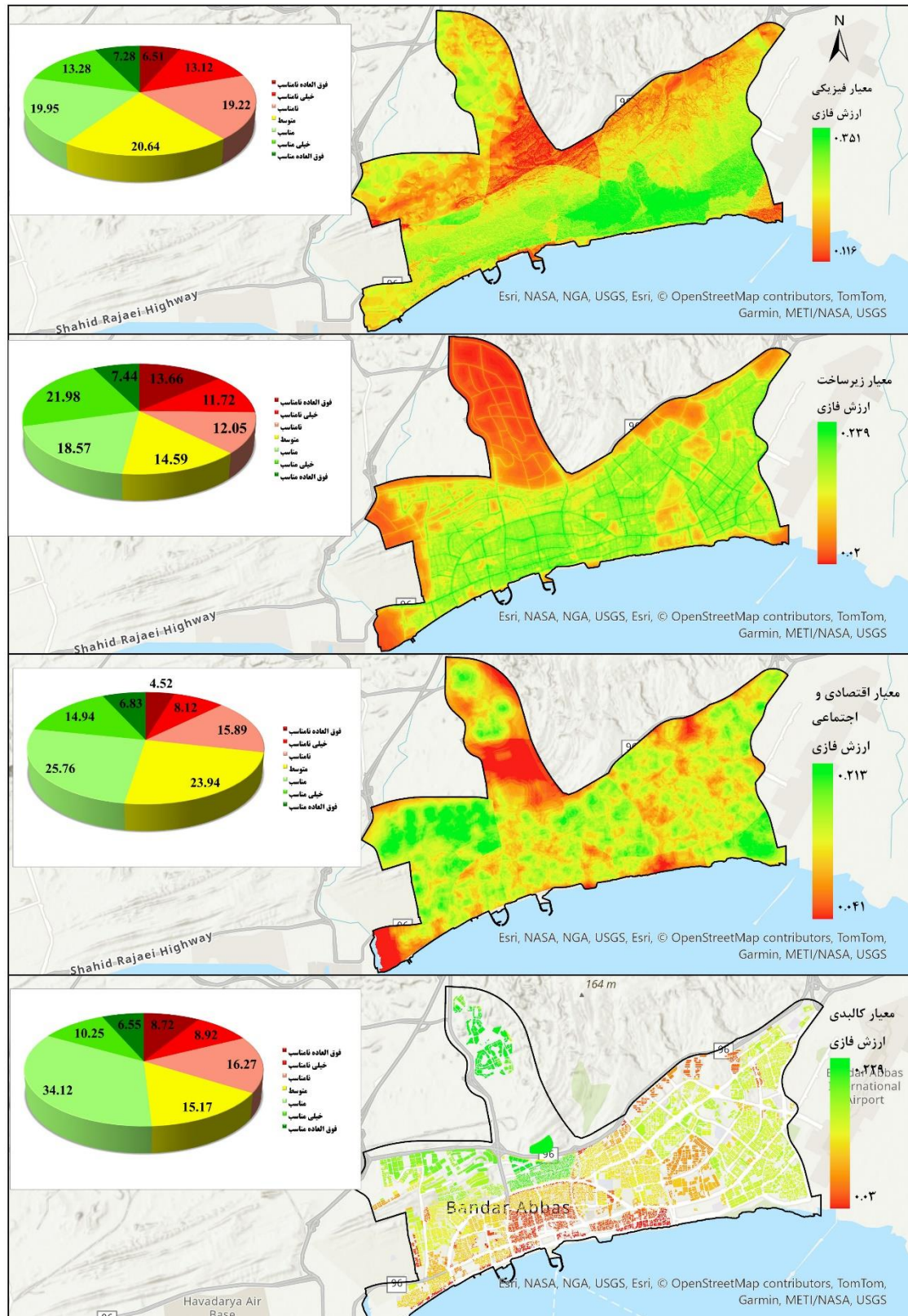
نشان داد که حدود 40 درصد از محدوده در کلاس‌های مناسب تا فوق‌العاده مناسب قرار دارد، در حالی که بخش قابل توجهی از اراضی شمالی دارای محدودیت طبیعی برای توسعه بلندمرتبه می‌باشند.

در معیار زیرساخت، الگوی فضایی تناسب به صورت متمرکز در بخش‌های میانی و شرقی شهر مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که نواحی دارای دسترسی مناسب به شبکه معابر، تأسیسات شهری و زیرساخت‌های خدمات‌رسان در طبقات با تناسب بالا قرار گرفته‌اند. در مقابل، بخش‌های حاشیه‌ای و کم‌برخوردار شهر، به‌ویژه در نواحی شمال غربی، عمدتاً در طبقات نامناسب قرار دارند. بر اساس نتایج طبقه‌بندی، حدود 30 درصد محدوده مورد مطالعه در کلاس‌های خیلی مناسب و فوق‌العاده مناسب قرار گرفته که نشان‌دهنده وضعیت نسبتاً مطلوب زیرساخت‌های شهری در بخش‌های توسعه یافته بندرعباس است.

در معیار اقتصادی - اجتماعی، الگوی پراکنش تناسب از تمرکز بیشتری در بخش‌های مرکزی و شرقی شهر برخوردار است. این نواحی به دلیل ارزش بالاتر زمین، تراکم جمعیتی بیشتر و دسترسی مناسب‌تر به خدمات شهری، در طبقات مناسب و بسیار مناسب قرار گرفته‌اند. در مقابل، برخی نواحی غربی و حاشیه‌ای شهر به دلیل پایین بودن شاخص‌های اقتصادی و خدماتی، در طبقات نامناسب مشاهده می‌شوند. همچنین نتایج نشان داد که حدود نیمی از محدوده مورد مطالعه در طبقات مناسب و خیلی مناسب قرار دارد که بیانگر ظرفیت نسبتاً مطلوب اقتصادی و اجتماعی شهر برای توسعه عمودی است.

در معیار کالبدی، الگوی تناسب بیش از سایر معیارها با ساختار فضایی و نوع توسعه شهری بندرعباس همخوانی دارد. پهنه‌های مرکزی و بخش‌هایی از شرق شهر، به دلیل سازگاری کاربری اراضی، تراکم مناسب و ظرفیت توسعه فیزیکی، در طبقات با تناسب بالا قرار گرفته‌اند. در مقابل، نوار ساحلی مرکزی و برخی نواحی متراکم قدیمی شهر در طبقات متوسط تا نامناسب قرار دارند که می‌تواند ناشی از محدودیت‌های کالبدی، تراکم زیاد و کمبود اراضی قابل توسعه باشد. نتایج طبقه‌بندی نشان داد که بیش از 50 درصد از محدوده مورد مطالعه در طبقات مناسب تا فوق‌العاده مناسب قرار دارد که بیانگر نقش تعیین‌کننده ساختار کالبدی شهر در توسعه بلندمرتبه می‌باشد.

به‌طور کلی، مقایسه چهار معیار اصلی نشان می‌دهد که پهنه‌های مرکزی، شرقی و بخش‌هایی از جنوب شرق بندرعباس از بیشترین تناسب برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه برخوردارند؛ در حالی که نواحی شمالی و شمال غربی به دلیل محدودیت‌های طبیعی، ضعف زیرساختی و شرایط نامناسب کالبدی، تناسب کمتری برای توسعه عمودی دارند. این نتایج بیانگر آن است که توسعه بلندمرتبه در بندرعباس عمدتاً متأثر از ظرفیت کالبدی و زیرساختی شهر بوده و عوامل طبیعی و اقتصادی - اجتماعی نقش تکمیلی در تعیین الگوی فضایی تناسب ایفا می‌کنند.



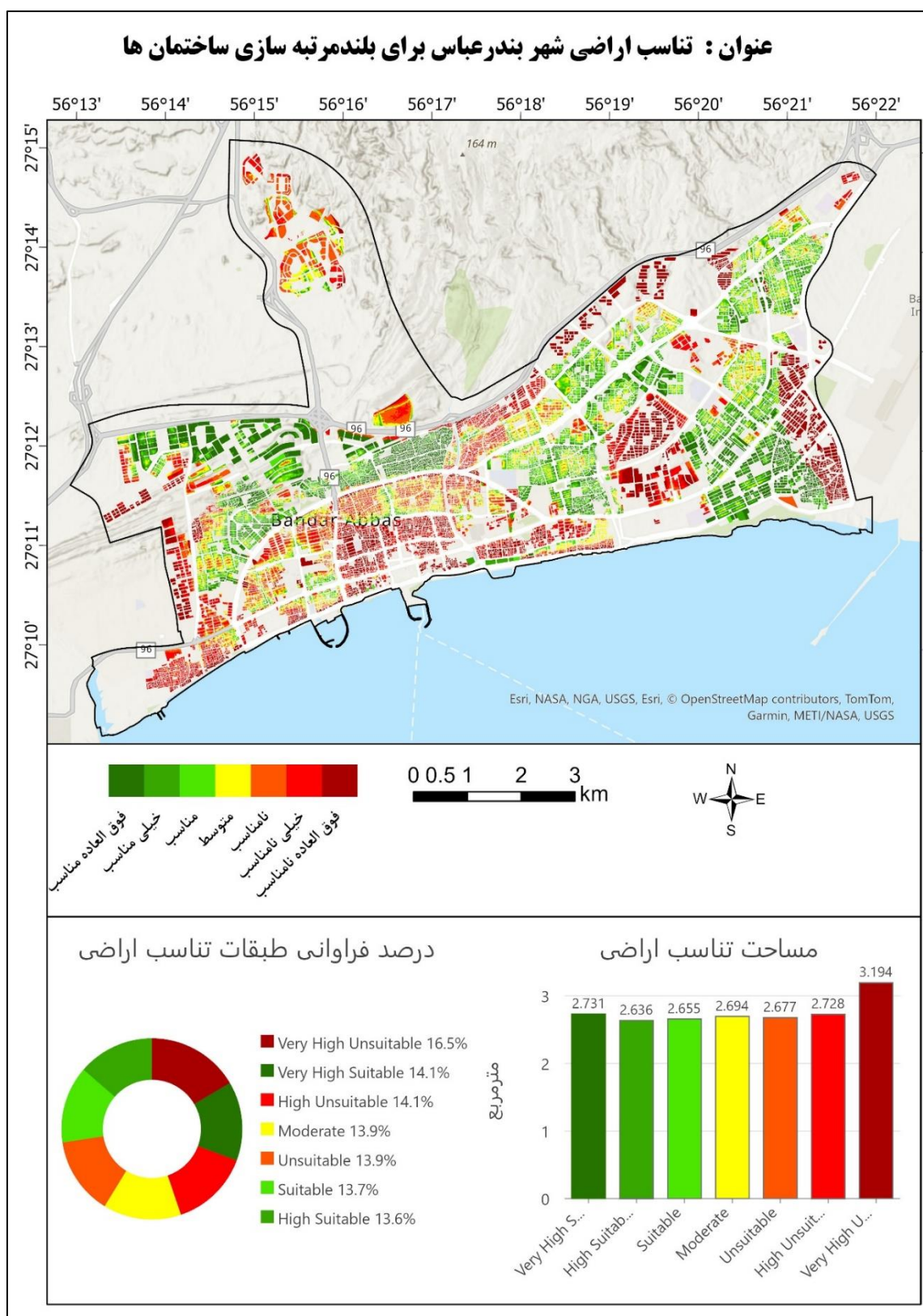
شکل 8 - نقشه های رستری از درجه مطلوبیت معیارهای پژوهش در تناسب اراضی شهر بندرعباس برای بلندمرتبه سازی

نتایج نهایی حاصل از همپوشانی معیارهای کالبدی، زیرساختی، اقتصادی - اجتماعی و فیزیکی نشان داد که الگوی تناسب اراضی برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس دارای توزیع فضایی ناهمگن و خوشه‌ای است. به‌طور کلی، پهنه‌های با تناسب بالا عمدتاً در بخش‌های مرکزی، غربی و شمال شرقی و شمال غربی شهر متمرکز شده‌اند؛ در حالی که بخش‌هایی از نوار ساحلی مرکزی، جنوب شرق و برخی نواحی حاشیه‌ای در طبقات نامناسب و بسیار نامناسب قرار گرفته‌اند (شکل 9).

بررسی نقشه نهایی تناسب اراضی نشان می‌دهد که مناطق دارای وضعیت فوق‌العاده مناسب و خیلی مناسب عمدتاً در پهنه‌هایی قرار دارند که از نظر ساختار کالبدی، دسترسی به زیرساخت‌های شهری و شرایط اقتصادی - اجتماعی در وضعیت مطلوب‌تری قرار دارند. این نواحی علاوه بر برخورداری از شبکه ارتباطی مناسب، دارای کاربری‌های سازگار، ظرفیت توسعه فیزیکی و دسترسی مطلوب به خدمات شهری می‌باشند. همچنین تمرکز بخشی از پهنه‌های مناسب در نواحی شمال شرقی و شمال غربی شهر نشان‌دهنده ظرفیت توسعه آینده و امکان گسترش توسعه عمودی در این محدوده‌ها است. در مقابل، پهنه‌های خیلی نامناسب و فوق‌العاده نامناسب عمدتاً در بخش‌های جنوبی و نوار ساحلی مرکزی شهر مشاهده می‌شوند. این وضعیت می‌تواند ناشی از تراکم بالای بافت موجود، محدودیت‌های کالبدی، کمبود اراضی قابل توسعه، فشار کاربری‌ها و برخی محدودیت‌های محیطی و زیرساختی باشد. همچنین در برخی نواحی حاشیه‌ای شمال غربی، وجود محدودیت‌های طبیعی و فاصله از زیرساخت‌های اصلی شهری سبب کاهش تناسب اراضی برای توسعه بلندمرتبه شده است.

نتایج تحلیل فراوانی طبقات تناسب اراضی نشان داد که کلاس فوق‌العاده نامناسب با $16/5$ درصد بیشترین سهم را در محدوده مورد مطالعه به خود اختصاص داده است. پس از آن، کلاس‌های فوق‌العاده مناسب با $14/1$ درصد و خیلی نامناسب با $14/1$ درصد قرار دارند. همچنین طبقات مناسب ($13/7$ درصد)، خیلی مناسب ($13/6$ درصد)، متوسط ($13/9$ درصد) و نامناسب ($13/9$ درصد) دارای توزیع نسبتاً متعادلی در سطح شهر هستند. این موضوع نشان می‌دهد که اگرچه بخش‌هایی از بندرعباس از ظرفیت بالایی برای توسعه عمودی برخوردارند، اما بخش قابل توجهی از اراضی شهری نیز با محدودیت‌های جدی برای استقرار ساختمان‌های بلندمرتبه مواجه می‌باشند.

به‌طور کلی، نتایج نهایی پژوهش نشان می‌دهد که توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه در بندرعباس باید به‌صورت هدفمند و متناسب با ظرفیت‌های کالبدی، زیرساختی و محیطی شهر هدایت شود. بر این اساس، پهنه‌های شمال غربی و شرق مرکزی-شمال شرقی شهر به‌عنوان مناسب‌ترین مناطق برای توسعه عمودی شناخته می‌شوند؛ در حالی که نواحی ساحلی متراکم و بخش‌های دارای محدودیت طبیعی، نیازمند کنترل و محدودیت بیشتر در فرایند بلندمرتبه‌سازی می‌باشند.



شکل 9 - نقشه نهایی از همپوشانی معیارهای پژوهش در تناسب اراضی برای بلندمرتبه سازی ساختمان ها در شهر بندرعباس

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مونت کارلو نشان‌دهنده توزیع فضایی مطلوبیت مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس تحت تغییرات تصادفی وزن معیارها است (شکل 10). در این مطالعه، با اجرای تکرارهای متعدد و اعمال تغییرات جزئی در وزن چهار معیار اصلی، سه نقشه شامل میانگین مطلوبیت، انحراف معیار و ضریب تغییرات (CV) تولید شد که بیانگر رفتار پایدار یا ناپایدار مدل در فضا هستند.

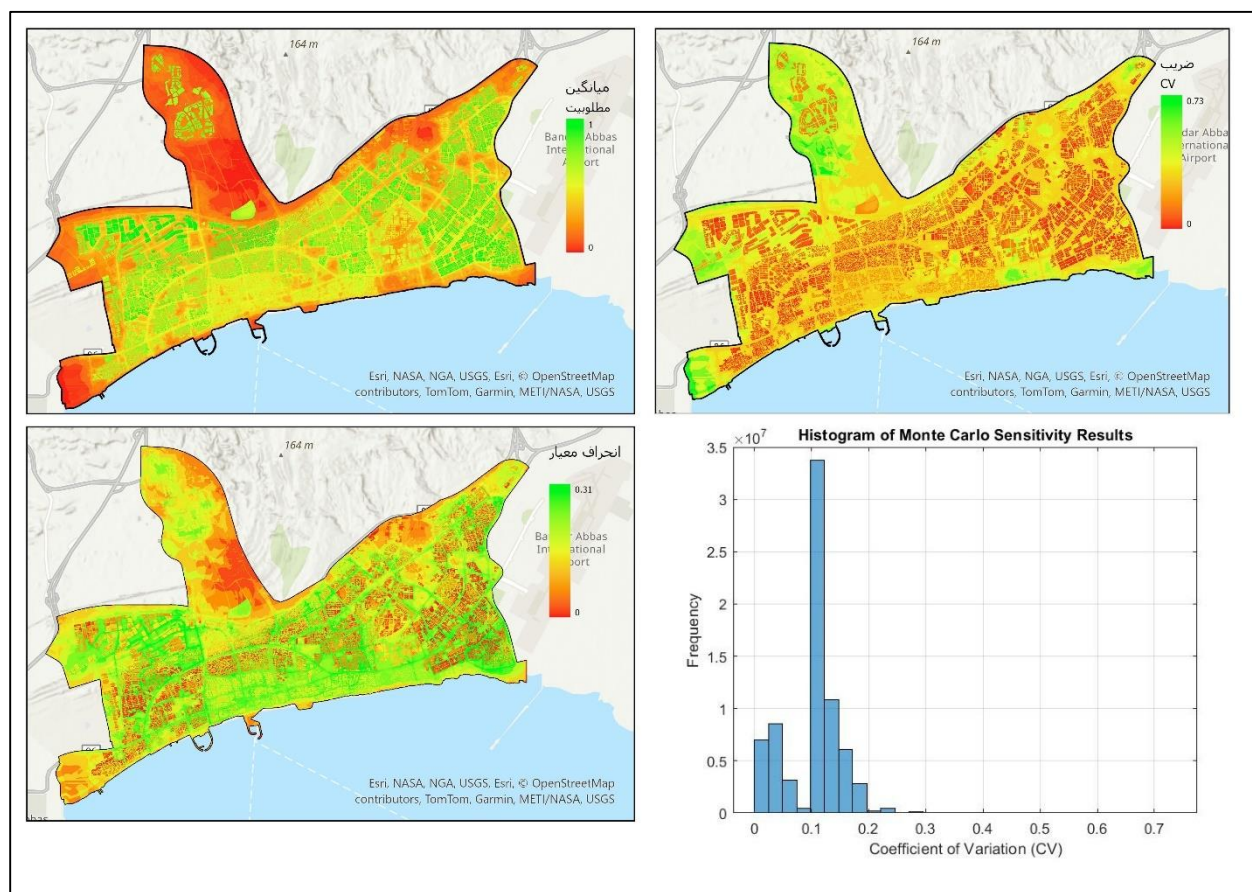
نقشه میانگین نشان می‌دهد که الگوی کلی مناسب‌ترین پهنه‌های مکانی برای توسعه بلندمرتبه‌سازی در اغلب تکرارهای مونت کارلو پایدار باقی مانده است. پهنه‌های مرکزی و برخی نواحی دارای زیرساخت مناسب، در بیشتر تکرارها دارای مقادیر بالاتر مطلوبیت بوده‌اند که بیانگر ثبات نسبی نتایج مدل در این مناطق است.

نقشه انحراف معیار میزان پراکندگی نتایج را در تکرارهای مختلف نشان می‌دهد. مقادیر پایین انحراف معیار در بخش‌های مرکزی شهر بیانگر پایداری بالای تصمیم‌گیری در این مناطق است، در حالی که در برخی نواحی حاشیه‌ای، افزایش انحراف معیار نشان‌دهنده حساسیت بالاتر این مناطق نسبت به تغییرات وزن معیارها است.

نقشه ضریب تغییرات به‌عنوان شاخصی از عدم قطعیت نسبی، بیانگر میزان ناپایداری تصمیم‌گیری در سطح فضایی است. نتایج نشان داد که بخش عمده‌ای از محدوده دارای CV پایین بوده که نشان‌دهنده پایداری مناسب مدل مکانیابی است. با این حال، لکه‌های محدود با CV بالا در برخی نواحی مشاهده شد که این مناطق نیازمند بررسی دقیق‌تر در فرآیند برنامه‌ریزی شهری هستند.

بررسی هیستوگرام ضریب تغییرات نشان داد که توزیع عدم قطعیت به سمت مقادیر پایین متمایل است و بخش عمده سلول‌ها دارای CV کمتر از مقدار متوسط هستند. این موضوع بیانگر آن است که مدل در برابر تغییرات وزن معیارها از پایداری نسبی برخوردار بوده و تنها بخش محدودی از فضا حساسیت بالاتری نشان داده‌اند.

در مجموع، نتایج تحلیل حساسیت مونت کارلو نشان می‌دهد که الگوی مکانی مناسب برای بلندمرتبه‌سازی در شهر بندرعباس از ثبات قابل قبولی برخوردار است. اگرچه تغییرات وزن معیارها موجب تغییرات جزئی در شدت مطلوبیت برخی نواحی شده است، اما ساختار کلی پهنه‌های مناسب در اکثر تکرارها پایدار باقی مانده است. این امر بیانگر اعتبار نسبی مدل تصمیم‌گیری و قابلیت اتکای آن در برنامه‌ریزی شهری است. نواحی با CV بالا به‌عنوان مناطق حساس در تصمیم‌گیری مکانیابی شناسایی شده‌اند و می‌توانند در سیاست‌گذاری‌های شهری به‌عنوان مناطق نیازمند بررسی دقیق‌تر مدنظر قرار گیرند.



شکل 10- نتایج تحلیل عدم قطعیت همپوشانی معیارها برای بلندمرتبه سازی ساختمان‌ها در بندرعباس با شبیه سازی مونت کارلو

بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که الگوی مکانی مناسب برای توسعه ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس، تحت تأثیر ترکیب عوامل کالبدی، زیرساختی، اجتماعی- اقتصادی و فیزیکی قرار دارد. این یافته با مطالعات پیشین که بر نقش ساختار فضایی و سیاست‌های تراکم در شکل‌دهی به الگوهای رشد شهری تأکید دارند، همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از شهرهای در حال توسعه، توسعه شهری بیش از آنکه مبتنی بر برنامه‌ریزی پایدار باشد، تحت تأثیر منافع اقتصادی و ارزش زمین قرار گرفته است (Ghadami and Newman, 2019; Pilehvar, 2021).

تمرکز پهنه‌های مناسب در بخش‌هایی از شهر که دارای دسترسی بهتر به زیرساخت‌ها و خدمات شهری هستند، نشان می‌دهد که دسترسی‌پذیری و تمرکز فعالیت‌های شهری نقش کلیدی در تعیین الگوی بلندمرتبه‌سازی دارند. این نتیجه با یافته‌های مطالعات فرم شهری همسو است که بیان می‌کنند تراکم و دسترسی از مهم‌ترین محرک‌های توسعه عمودی در کلان‌شهرها هستند (Milanes, 2022).

نتایج تحلیل حساسیت مونت کارلو نشان داد که اگرچه الگوی کلی مکانیابی پایدار است، اما برخی نواحی نسبت به تغییرات وزن معیارها حساسیت بالاتری دارند. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت لحاظ کردن عدم قطعیت در مدل‌های GIS-MCDA است، زیرا روش‌های قطعی ممکن است منجر به برداشت بیش‌ازحد مطمئن از نتایج شوند. این یافته با مطالعات اخیر در حوزه تحلیل عدم قطعیت در تصمیم‌گیری فضایی همخوانی دارد که بر ضرورت ارزیابی پایداری مدل‌ها تأکید دارند (Cai et al., 2015; Hassan et al., 2017). وجود نواحی با حساسیت بالا و تغییرپذیری زیاد در نتایج می‌تواند پیامدهایی در مقیاس محیطی نیز داشته باشد، زیرا توسعه نامتوازن و تمرکز بیش از حد ساخت‌وسازهای بلندمرتبه می‌تواند موجب

تشدید اثرات منفی مانند افزایش دمای سطح زمین و شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری شود. این یافته با مطالعات اخیر در زمینه ارتباط بین فرم شهری و دمای سطح زمین همسو است (Lin et al., 2017).

در ایران نیز مطالعات متعددی نشان داده‌اند که الگوهای رشد شهری، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی مانند تهران، تحت تأثیر سیاست‌های غیرمکانی و اقتصادی بوده و این موضوع منجر به ناهماهنگی فضایی و تمرکز بیش از حد توسعه در برخی مناطق شده است (Ghadami and Newman, 2019). نتایج این پژوهش نیز این مسئله را در مقیاس شهر بندرعباس تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که بدون لحاظ کردن تحلیل‌های چندمعیاره و عدم قطعیت، تصمیم‌گیری‌های مکانی ممکن است به نتایج ناپایدار منجر شوند.

به طور کلی، ترکیب Fuzzy AHP و تحلیل حساسیت مونت کارلو در چارچوب GIS-MCDA نشان داد که این رویکرد قادر است علاوه بر تعیین پهنه‌های مناسب برای توسعه بلندمرتبه‌سازی، میزان پایداری و عدم قطعیت نتایج را نیز مشخص نماید. این ویژگی، مزیت مهمی نسبت به روش‌های قطعی تصمیم‌گیری محسوب می‌شود و می‌تواند نقش مؤثری در بهبود کیفیت تصمیم‌گیری‌های شهری در شهرهای در حال رشد ایران ایفا کند. در این پژوهش، مکان‌یابی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر بندرعباس با بهره‌گیری از ترکیب فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP) و مدل‌سازی فضایی در محیط GIS انجام شد و سپس پایداری نتایج از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو مورد ارزیابی قرار گرفت. هدف اصلی، نه تنها تعیین پهنه‌های مناسب توسعه، بلکه سنجش میزان اعتمادپذیری و حساسیت نتایج نسبت به تغییرات وزن معیارها بود. نتایج نشان داد که الگوی کلی مکان‌یابی در شهر بندرعباس از ثبات نسبی برخوردار است و پهنه‌های دارای مطلوبیت بالا در اغلب تکرارهای مونت کارلو تکرار شده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که ساختار تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌کاررفته، توانایی مناسبی در شناسایی نواحی مستعد توسعه بلندمرتبه دارد. با این حال، وجود نواحی با ضریب تغییرات بالا نشان‌دهنده حساسیت برخی مناطق نسبت به عدم قطعیت وزن معیارها است که این بخش‌ها نیازمند بررسی دقیق‌تر در فرایند برنامه‌ریزی شهری هستند. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ادغام تحلیل‌های چندمعیاره فازی با رویکردهای مبتنی بر عدم قطعیت، می‌تواند چارچوبی قابل اتکا برای تصمیم‌گیری‌های فضایی در شهرهای در حال رشد فراهم کند. این رویکرد علاوه بر ارائه نقشه‌های مکان‌یابی، امکان ارزیابی پایداری نتایج را نیز فراهم کرده و در نتیجه می‌تواند به بهبود کیفیت تصمیم‌گیری در حوزه برنامه‌ریزی شهری و مدیریت توسعه عمودی کمک نماید. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، سایر منابع عدم قطعیت مانند تغییر سناریوهای توسعه شهری و یا وزن‌دهی مبتنی بر خبرگان متعدد نیز در مدل لحاظ شود تا تصویر جامع‌تری از رفتار فضایی توسعه شهری حاصل گردد.

Spatial Analysis and Prioritization of Suitable Zones for High-Rise Development in Bandar Abbas Using GIS and Monte Carlo Simulation

Payam Rezaee¹, Mohsen Dadras^{*2}, Mahdi Ajdani³, Shahla Paslar⁴

¹Department Of Civil Engineering, Qe.c., Islamic Azad University, Qeshm, Iran

Gmail: payam.rezaei358@gmail.com

^{*2} Department of Civil Engineering, Ba.c., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

Email: mohsen.dadras@iau.ac.ir

³Department of Computer Engineering, Qe.c., Islamic Azad University, Qeshm, Iran

Email: mahdi.ajdani@iau.ac.ir

⁴ Department of Industrial Engineering, Ba.c., Islamic Azad University, Bandar Abbas, Iran

Email: shahlapaslar@iau.ac.ir

Abstract

High-rise development has become an increasingly important strategy for accommodating rapid urban growth, optimizing land use, and promoting compact urban development. Nevertheless, inappropriate site selection may impose substantial pressure on urban infrastructure, environmental resources, and spatial organization, thereby compromising the principles of sustainable urban development. Therefore, identifying suitable locations for vertical urban expansion requires comprehensive evaluation of multiple spatial criteria while accounting for uncertainty in the decision-making process. This study aims to identify and prioritize suitable areas for high-rise building development in Bandar Abbas, Iran, by integrating Geographic Information Systems (GIS), Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP), and Monte Carlo Simulation within a spatial multi-criteria decision analysis framework. Four major criteria, including physical, infrastructural, socio-economic, and environmental factors, together with thirty-nine sub-criteria, were identified through literature review and expert consultation. Criterion weights were determined using Chang's extent analysis method within the Fuzzy AHP framework. Standardized spatial layers were subsequently integrated using the Weighted Linear Combination (WLC) technique in a GIS environment to generate the final suitability map. To evaluate the robustness and reliability of the obtained results, Monte Carlo Simulation was employed by introducing random perturbations into criterion weights and generating multiple suitability scenarios. The results indicate that physical characteristics (0.469) and infrastructure accessibility (0.300) are the most influential factors affecting high-rise development suitability.

The uncertainty analysis demonstrates low standard deviation and coefficient of variation across most suitable areas, confirming the high stability and robustness of the proposed spatial decision model. The final suitability map identifies the northwestern districts, eastern neighborhoods, and selected coastal zones of Bandar Abbas as the most appropriate locations for future high-rise development. The integration of GIS, Fuzzy AHP, and Monte Carlo Simulation not only improves the accuracy of spatial suitability assessment but also provides valuable information regarding the reliability and uncertainty of planning decisions. The proposed framework offers a practical decision-support tool for sustainable urban planning and vertical development management in rapidly growing coastal cities.

****Keywords:**** High-rise Development; Spatial Suitability Analysis; Geographic Information System (GIS); Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP); Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA); Monte Carlo Simulation; Urban Planning; Bandar Abbas.

Extended Abstract

Spatial Analysis and Prioritization of Suitable Areas for High-Rise Development in Bandar Abbas Using GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis and Monte Carlo Simulation

Introduction

Rapid urbanization has become one of the most significant challenges facing cities worldwide over the last few decades. Continuous population growth, urban expansion, increasing land values, and the scarcity of developable land have considerably intensified the pressure on urban environments. Consequently, many metropolitan areas have shifted from horizontal expansion toward compact and vertical urban development as a sustainable strategy for accommodating population growth while reducing land consumption. High-rise buildings have therefore become an essential component of contemporary urban planning because they improve land-use efficiency, reduce urban sprawl, optimize infrastructure utilization, and contribute to the realization of compact city principles.

Despite these advantages, uncontrolled high-rise development may generate numerous environmental, social, and infrastructural problems when appropriate site selection is ignored. In many developing cities, the location of high-rise buildings is often determined primarily by land market forces rather than comprehensive spatial planning principles. Such an approach frequently leads to excessive pressure on transportation systems, utility networks, public services, urban landscapes, and environmental resources. Furthermore, inappropriate vertical development may intensify urban heat islands, reduce natural ventilation, increase traffic congestion, and deteriorate urban livability. Consequently, identifying suitable locations for

high-rise development has become one of the fundamental issues in sustainable urban planning.

Recent advances in Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) have substantially improved spatial decision-making processes in urban planning. GIS provides an efficient platform for integrating, managing, analyzing, and visualizing large volumes of spatial information, while MCDA techniques enable decision-makers to simultaneously evaluate multiple conflicting criteria. Among these techniques, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) has received considerable attention because it effectively incorporates expert knowledge while reducing the uncertainty associated with subjective judgments. Unlike the conventional Analytic Hierarchy Process, fuzzy theory allows decision-makers to express pairwise comparisons using linguistic variables, thereby producing more realistic weights under uncertain decision environments.

Although GIS-based MCDA techniques have been widely employed for urban land suitability assessment, most previous studies have primarily focused on deterministic models. These approaches usually assume that criterion weights remain fixed throughout the analysis, whereas real-world planning decisions are inherently uncertain. Expert judgments, data quality, model assumptions, and spatial variability may all influence the final suitability map. Therefore, evaluating the robustness of spatial decision-making models has become an increasingly important issue in urban planning research.

Monte Carlo Simulation has emerged as one of the most effective approaches for uncertainty analysis in spatial modeling. By repeatedly generating random variations in input parameters, this method allows researchers to evaluate the stability, sensitivity, and reliability of spatial suitability maps. Instead of producing a single deterministic output, Monte Carlo Simulation generates multiple realizations from which statistical indicators such as mean suitability, standard deviation, and coefficient of variation can be derived. These indicators provide valuable insights into the confidence level of spatial planning decisions.

Bandar Abbas, the capital of Hormozgan Province and the largest coastal metropolis in southern Iran, represents an appropriate case study for investigating high-rise development. Owing to its strategic location along the Persian Gulf, rapid population growth, increasing economic activities, limited developable land, and various natural and human-induced physical constraints, the city has experienced substantial pressure for vertical urban expansion. However, the existence of shallow groundwater, soft coastal sediments, surrounding mountains, military zones, industrial complexes, and airport restrictions significantly limits horizontal urban growth. Consequently, identifying appropriate areas for vertical development requires a comprehensive evaluation of physical, infrastructural, socio-economic, and environmental conditions.

Accordingly, the present study aims to identify and prioritize suitable areas for high-rise building development in Bandar Abbas by integrating GIS-based spatial analysis with the Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Monte Carlo uncertainty analysis. Unlike previous studies that merely produce deterministic suitability maps, the proposed framework evaluates both the spatial suitability of development zones and the reliability of the obtained results under uncertain decision conditions. Therefore, the proposed methodology provides urban planners and decision-makers with a more robust scientific basis for sustainable vertical development and evidence-based urban planning.

Methodology

This research is an applied spatial planning study that aims to identify and prioritize suitable locations for high-rise building development in Bandar Abbas. A quantitative research approach was adopted, integrating Geographic Information Systems (GIS), Fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis (FMCD), and Monte Carlo Simulation to evaluate spatial suitability while addressing uncertainty in the decision-making process.

The methodological framework consisted of four sequential stages. First, the spatial database was established by integrating various geospatial datasets obtained from the Bandar Abbas Comprehensive Plan, Detailed Urban Development Plan, cadastral maps, demographic statistics, urban infrastructure databases, and land-use information. These datasets included transportation networks, water distribution systems, sewerage networks, electricity infrastructure, land ownership, building regulations, population density, urban facilities, and other spatial information relevant to high-rise development.

Second, the evaluation criteria and sub-criteria were identified through an extensive review of previous studies and refined using the Fuzzy Delphi technique based on expert judgments from specialists in urban planning, geotechnical engineering, and urban management. Following several rounds of expert consultation, four principal criteria were finalized, including physical characteristics, infrastructure accessibility, socio-economic conditions, and environmental—physical factors, comprising a total of thirty-nine sub-criteria representing the major determinants of high-rise development suitability in Bandar Abbas.

Third, the relative importance of each criterion and sub-criterion was calculated using the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP) based on Chang's Extent Analysis Method. Pairwise comparison matrices were developed using triangular fuzzy numbers to reduce the uncertainty associated with subjective expert evaluations. After calculating the fuzzy synthetic extent values, normalized weights were derived for all evaluation criteria. Subsequently, each spatial criterion was standardized using appropriate fuzzy membership functions within the GIS

environment. The standardized raster layers were then integrated using the Weighted Linear Combination (WLC) technique to generate the preliminary spatial suitability map.

Finally, to evaluate the robustness and reliability of the obtained suitability model, Monte Carlo Simulation was performed by introducing random perturbations into the criterion weights while preserving their relative importance. Hundreds of simulation iterations generated multiple suitability maps, from which statistical indicators including mean suitability, standard deviation, and coefficient of variation were calculated. These outputs enabled the assessment of spatial uncertainty and the identification of areas exhibiting stable or sensitive suitability patterns under varying weighting scenarios.

Results and Discussion

The Fuzzy AHP analysis revealed that physical characteristics and infrastructure accessibility were the most influential criteria affecting high-rise building development in Bandar Abbas, with fuzzy weights of 0.469 and 0.300, respectively. These findings demonstrate that successful vertical urban development depends primarily on physical urban structure and the availability of essential infrastructure rather than solely on economic considerations.

Among the infrastructure sub-criteria, proximity to the urban road network received the highest priority, emphasizing the critical importance of transportation accessibility for high-rise developments. Buildings with high residential or commercial densities require efficient transportation systems to accommodate increased traffic demand and ensure effective emergency access. Water supply infrastructure and connections to the main distribution network ranked second and third, highlighting the necessity of reliable utility services for sustainable high-rise development. Sewerage infrastructure, electricity distribution systems, and fiber-optic communication networks also received relatively high weights, indicating that urban infrastructure capacity represents a fundamental prerequisite for vertical expansion.

The spatial suitability analysis generated through GIS-based Weighted Linear Combination identified several highly suitable development zones located primarily in the northwestern districts, eastern neighborhoods, and selected coastal areas of Bandar Abbas. These areas possess favorable physical conditions, better accessibility to urban infrastructure, and relatively appropriate socio-economic characteristics that collectively support sustainable high-rise development.

To investigate the reliability of these findings, Monte Carlo Simulation was conducted to evaluate the influence of uncertainty in criterion weighting. The resulting mean suitability map exhibited strong consistency with the deterministic model, while both the standard deviation

and coefficient of variation remained relatively low throughout most suitable areas. These results indicate that the proposed decision-making framework is highly robust and that the identified development zones remain stable despite random variations in criterion weights.

Nevertheless, several localized areas displayed comparatively higher coefficients of variation, suggesting greater sensitivity to uncertainty. These locations require more detailed field investigations before implementing high-rise development projects. The findings confirm that incorporating uncertainty analysis substantially improves the credibility of GIS-based spatial decision-making and reduces the risk of overconfidence associated with deterministic suitability models.

Overall, the integration of Fuzzy AHP, GIS spatial analysis, and Monte Carlo Simulation provides a comprehensive framework capable of simultaneously evaluating spatial suitability and model uncertainty. Compared with conventional deterministic approaches, this methodology offers more reliable support for urban planning decisions by explicitly quantifying the stability of the final suitability patterns.

Conclusion

This study presented an integrated GIS-based spatial decision-support framework for identifying suitable areas for high-rise building development in Bandar Abbas while explicitly considering uncertainty in the decision-making process. By combining Fuzzy AHP, Weighted Linear Combination, and Monte Carlo Simulation, the proposed methodology successfully evaluated both the spatial suitability and the robustness of the obtained results.

The findings demonstrate that physical characteristics and infrastructure accessibility constitute the primary determinants of appropriate locations for vertical urban development. The final suitability map identified the northwestern, eastern, and selected coastal districts of Bandar Abbas as the most appropriate areas for future high-rise construction. Furthermore, uncertainty analysis confirmed that the majority of highly suitable areas exhibit considerable spatial stability, indicating a high level of confidence in the proposed planning framework.

Unlike conventional GIS-based suitability assessments, the incorporation of Monte Carlo Simulation enables planners to evaluate the reliability of spatial decisions by quantifying uncertainty and identifying sensitive locations requiring additional investigation. Consequently, this integrated methodology represents an effective decision-support tool for sustainable urban planning, land-use management, and vertical development strategies in rapidly growing cities.

Future studies are recommended to incorporate additional sources of uncertainty, including alternative urban growth scenarios, temporal changes in land-use patterns, and larger panels of experts for weight determination. Furthermore, integrating machine learning techniques with GIS-based multi-criteria decision analysis may further improve the predictive capability and reliability of urban suitability assessments under complex planning conditions.