

**ORIGINAL ARTICLE****Land Suitability Zoning of Natural Lands in Ahvaz for Infill Development Using a Fuzzy–Fuzzy Inference System and GIS****Ali Shojaeean¹, Majid Goodarzi²**

1. Agricultural Engineering
Research Institute, Agricultural
Research, Education and
Extension Organization
(AREEO), Karaj, Iran.
2. Associate Professor, Shahid
Chamran University of Ahvaz,
Ahvaz, Iran.

***Correspondence**

Ali Shojaeean
E-mail: Shojaian@scu.ac.ir

Receive Date: 12/May/2025

Revise Date: 23/Dec/2025

Accept Date: 15/Sep/2026

How to cite

Shojaeean, A., & Goodarzi, M.,
(202¹). Land Suitability Zoning of
Natural Lands in Ahvaz for Infill
Development Using a Fuzzy–Fuzzy
Inference System and GIS. *Urban
Ecology Researches*, -(-), -.

EXTENDED ABSTRACT**Introduction**

Rapid urbanization, particularly in developing countries, has placed immense strain on finite urban resources, manifesting in challenges such as agricultural land degradation, heightened urban heat island effects, and escalating infrastructure costs. As projections indicate that nearly 70% of the global population will reside in cities by 2050, contemporary urban planning has pivoted towards strategies that promote sustainable intensification. Infill development, which focuses on the optimal utilization of vacant, underused, or deteriorated parcels within existing urban fabrics, has emerged as a critical paradigm. This approach not only curbs urban sprawl and preserves natural hinterlands but also revitalizes distressed areas, potentially enhancing urban quality of life and mitigating spatial inequalities.

However, identifying land suitable for infill development is inherently complex, characterized by multi-criteria and multi-layered decision-making processes. Influential criteria span physical (e.g., building density, structural age, land-use compatibility), accessibility (e.g., proximity to transport networks, service centers), socio-economic (e.g., social cohesion, population density, deprivation levels), and urban regulatory dimensions (e.g., legal constraints, height restrictions). Compounding this complexity is the pervasive uncertainty embedded within urban data systems, arising from spatial inaccuracies, heterogeneity in stakeholder opinions, and ambiguity in defining qualitative concepts such as "social cohesion." Traditional Type-1 Fuzzy Inference Systems (T1FIS), while valuable, often struggle with these compounded, multi-layered uncertainties, especially when precise membership functions for linguistic variables are difficult to define from inconsistent or scarce data.

To address these limitations, advanced computational models like Type-2 Fuzzy Inference Systems (T2FIS) have been developed. Specifically, Interval Type-2 Fuzzy Sets (IT2FS) introduce an additional dimension of flexibility by using footprint-of-uncertainty (FOU) in membership functions, enabling the simultaneous modeling of ambiguity in data, model parameters, and interpretive rules. This capability is particularly transformative for urban planning in contexts like Iran, where data scarcity and inconsistency are common. Therefore, this research presents a novel, integrated framework combining Geographic Information Systems (GIS) and an Interval Type-2 Fuzzy Inference System to zone land suitability for infill development in Ahvaz, Iran. The primary objective is to enhance zoning accuracy under ambiguous conditions by systematically managing data, model, and interpretative uncertainties.

Methodology

This study employed a robust hybrid methodology integrating spatial analysis within ArcGIS 10.8 and fuzzy modeling in MATLAB R2018b. The study area encompassed the legal boundary of Ahvaz metropolis, covering approximately 18,006 hectares across eight urban districts.

Data Collection and Preparation: Four primary criteria clusters were established: 1) *Physical* (building density, structural age, land use), 2) *Accessibility* (distance from service centers, transport network density), 3) *Social* (social cohesion, population density), and 4) *Urban Regulatory* (legal constraints, height regulations). Data were sourced from municipal organizations, the Ahvaz comprehensive plan, and the Iranian Statistical Center. Qualitative data were transformed into quantitative measures using fuzzy scales. All spatial layers were integrated, normalized to a [0,1] interval, and rasterized to ensure compatibility with the fuzzy model.

Fuzzy System Design: An Interval Type-2 Fuzzy Inference System was designed to manage multi-layered uncertainties. Input variables were modeled using Gaussian and Triangular Interval Type-2 Membership Functions. For each variable, five linguistic values—Very Low, Low, Medium, High, Very High—were defined. The parameters of these membership functions were optimized using a fuzzy clustering algorithm. A knowledge-based rule repository of 81 IF-THEN rules was constructed, synthesizing expert opinion and prior literature. The Mamdani fuzzy inference mechanism was employed.

Inference and Defuzzification: The system processed the integrated criteria through its rule base. To generate a crisp output, a two-step process was implemented: first, *type-reduction* was performed using the Karnik-Mendel (KM) algorithm to convert the Interval Type-2 fuzzy output sets into Type-1 fuzzy sets; second, *defuzzification* was applied using the centroid method to produce a final suitability score between 0 and 100 for each raster pixel (10m x 10m).

Validation: The model's validity was assessed through a tripartite strategy: 1) *Sensitivity Analysis* to evaluate output stability against input parameter variations, 2) *Field Validation* to compare results with identified vacant/underused lands in approved urban plans, and 3) *Comparative Analysis* against classical methods (like standard AHP and Type-1 FIS) using quantitative error metrics such as Root Mean Square Error (RMSE) and the Kappa coefficient.

Findings

The application of the T2FIS model yielded a detailed suitability map for infill development across Ahvaz, classified into five potential classes.

Spatial Distribution of Potential: The analysis revealed a nuanced distribution of suitability. Only a combined 20% of Ahvaz's total area (3,639 hectares) exhibited Moderate potential for infill *development*. Higher suitability classes were more limited, with 13.7% (2,433 ha) classified as High and merely 6.3% (1,099 ha) as Very High potential. Consequently, the majority of the city's land (59% or 10,796 hectares) fell into the Low and Very Low suitability categories, indicating significant constraints for inward development under the defined criteria.

Identification of Priority Zones: The spatial analysis identified distinct geographic patterns. Districts 4, 6, and 8 emerged as the most *suitable* zones, concentrating the largest contiguous areas of High and Very High potential. This was attributed to a confluence of favorable factors: better access to public transportation networks (particularly in District 4), balanced population densities conducive to redevelopment (District 6), and the availability of legally developable land (District 8). In contrast, the northern and northeastern sectors of the city, along with the historical core (District 1), showed predominantly Low to Very Low potential, constrained by factors like regulatory limitations, physical deterioration, or poor accessibility.

Model Performance: A key finding was the enhanced performance of the proposed T2FIS model. Comparative evaluation demonstrated that the integrated framework, by managing compound uncertainties, improved zoning accuracy by

approximately 40% compared to classical Type-1 FIS and Analytic Hierarchy Process (AHP) methods under the same ambiguous data conditions. The model successfully handled heterogeneous data inputs (raster, vector, and qualitative survey data) and inconsistencies within the expert-derived rule base.

Discussion and Conclusion

This study demonstrates the significant efficacy of integrating Interval Type-2 Fuzzy Logic with GIS for complex urban land suitability analysis. The primary innovation lies not merely in the application of an advanced fuzzy system, but in its deliberate design to address the *multi-layered uncertainties* endemic to urban planning in data-scarce environments. By employing IT2FS, the model accommodated ambiguity in input data (e.g., measuring "social cohesion"), model parameters (e.g., defining membership function bounds), and rule interpretation, moving beyond the limitations of simpler deterministic or Type-1 fuzzy models.

KEYWORDS

Land Suitability Zoning, Infill Development, Type-2 Fuzzy Inference System, Multi-Criteria Urban Analysis, Ahvaz.



Copyright © 2026, by the author(s). Published by Payame Noor University, Tehran, Iran.

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://lib.journals.pnu.ac.ir/>

پهنه‌بندی استعداد اراضی طبیعی اهواز برای توسعه میان‌افزا با استفاده از سیستم استنتاج فازی - فازی و GIS

علی شجاعیان^{۱*}، مجید گودرزی^۲

چکیده

این پژوهش با هدف پهنه‌بندی استعداد اراضی برای توسعه میان‌افزا در شهر اهواز، با استفاده از سیستم استنتاج فازی-فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام گردید. جامعه مورد مطالعه، محدوده قانونی شهر اهواز با مساحت بیش از ۱۸۰۰۰ هکتار و مشتمل بر هشت منطقه شهری بوده است که داده‌های معیارهای چهارگانه کالبدی (تراکم ساختمانی، عمر بنا)، دسترسی (شبکه حمل‌ونقل، مراکز خدماتی)، اجتماعی (انسجام اجتماعی، تراکم جمعیت) و ضوابط شهری (محدودیت‌های قانونی) را دربرمی‌گرفت. روش نمونه‌گیری مبتنی بر داده‌های مکانی کامل (تمام‌شماری) و ترکیبی از تحلیل‌های فضایی در ArcGIS و مدل‌سازی فازی-فازی در MATLAB R2018b می‌باشد. در این پژوهش، از توابع عضویت بازه‌ای نوع-۲ برای مدیریت عدم قطعیت‌های چندلایه و ۸۱ قانون اگر-آنگاه مبتنی بر دانش خبرگان استفاده شد. خروجی مدل پس از کاهش نوع (KM) و دفازی‌سازی (مرکز ثقل)، به پنج کلاس پتانسیل توسعه (بسیار کم تا بسیار زیاد) طبقه‌بندی گردید. نتایج نشان داد ۲۰ درصد از مساحت اهواز (۳۶۳۹ هکتار) دارای پتانسیل متوسط، ۱۳/۷٪ (۲۴۳۳ هکتار) زیاد و ۶/۳٪ (۱۰۹۹ هکتار) بسیار زیاد برای توسعه میان‌افزا است. مناطق ۴، ۶ و ۸ به‌عنوان مستعدترین پهنه‌ها شناسایی شدند، درحالی‌که ۵۹٪ از اراضی (۱۰۷۹۶ هکتار) در کلاس‌های کم و بسیار کم قرار گرفتند. نوآوری این پژوهش در یکپارچه‌سازی عدم قطعیت‌های داده‌ای، مدلی و تفسیری، طراحی قوانین تطبیقی پویا و ترکیب داده‌های ناهمگن بود که دقت پهنه‌بندی را در شرایط ابهام تا ۴۰٪ نسبت به روش‌های کلاسیک بهبود بخشید. این چارچوب به برنامه‌ریزان شهری امکان تصمیم‌گیری کارآمد در محیط‌های با داده‌های ناقص را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی

پهنه‌بندی استعداد اراضی، توسعه میان‌افزا، سیستم استنتاج فازی-فازی، معیارهای چندلایه شهری، اهواز

۱. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۲. دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*نویسنده مسئول: علی شجاعیان
رایانامه: Shojaian@scu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۴

استناد به این مقاله:

شجاعیان، علی و گودرزی، مجید (۱۴۰۵). پهنه‌بندی استعداد اراضی طبیعی اهواز برای توسعه میان‌افزا با استفاده از سیستم استنتاج فازی-فازی و GIS. پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، سال (شماره)، صفحه.



مقدمه

رشد شتابان شهرنشینی در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع محدود شهری وارد کرده است. براساس گزارش برنامه اسکان بشر ملل متحد، تا سال ۲۰۵۰، نزدیک به ۷۰ درصد جمعیت جهان در شهرها ساکن خواهند شد (Citaristi, 2022). این در حالی است که همزمان، گسترش افقی شهرها به دلیل محدودیت‌های اکولوژیکی (مانند نابودی اراضی کشاورزی، تشدید جزایر گرمایی) و اقتصادی (هزینه‌های بالای توسعه زیرساخت‌های جدید)، با موانع جدی روبه‌رو شده است. در این زمینه، توسعه میان‌افزا به‌عنوان راهبردی کلیدی در برنامه‌ریزی شهری معاصر مطرح شده است که بر استفاده بهینه از فضاهای خالی، بایر یا کم‌بهره درون بافت‌های موجود شهری تأکید دارد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷). این رویکرد نه تنها از تخریب حریم طبیعی شهرها جلوگیری می‌کند، بلکه با احیای مناطق فرسوده، امکان ارتقای کیفیت زندگی شهری و کاهش نابرابری‌های فضایی را فراهم می‌سازد (Pehrson, 2025). با این حال، شناسایی پهنه‌های مستعد برای توسعه میان‌افزا به دلیل ماهیت چندمعیاره و چندلایه مسئله، همواره با چالش‌های پیچیده‌ای همراه بوده است (شفاعتی و همکاران، ۱۴۰۲). معیارهای اثرگذار بر این فرآیند، طیفی از عوامل کالبدی-فضایی (مانند تراکم ساختمانی، عمر بنا، سازگاری کاربری اراضی)، دسترسی (مجاورت با شبکه حمل‌ونقل عمومی، توزیع مراکز خدماتی)، اجتماعی-اقتصادی (سطح محرومیت محلات، مشارکت شهروندی) و ضوابط حقوقی (محدودیت‌های ارتفاعی، حریم آثار تاریخی) را در برمی‌گیرد (شجاعیان، ۱۴۰۲). افزون بر این، عدم قطعیت ذاتی در داده‌های شهری - اعم از خطاهای مکانی در نقشه‌برداری، ناهمگونی نظرات ذی‌نفعان، یا ابهام در تعریف مفاهیم کیفی مانند «انسجام اجتماعی» - مدل‌سازی این سیستم‌های پیچیده را به مسئله‌ای چالش‌برانگیز تبدیل کرده است (احمدی‌نژاد و مرجان قائمی، ۱۳۹۶).

در این راستا، سیستم‌های استنتاج فازی به دلیل توانایی ذاتی در مدیریت مفاهیم کیفی و پردازش داده‌های نادقیق، به‌طور گسترده در تحلیل‌های مکانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Salameh et al., 2025). با وجود این سیستم‌های فازی نوع (۱) با تکیه بر توابع عضویت قطعی، در مواجهه با عدم قطعیت‌های چندلایه - مانند ترکیب ابهام در داده‌های خام و ناسازگاری در قوانین استنتاج - با محدودیت‌های جدی روبه‌رو هستند. برای نمونه، تعیین تابع عضویت دقیق برای معیاری مانند «دسترسی مطلوب» در شرایطی که نظرات کارشناسان در مورد آستانه‌های کمی آن متفاوت است، می‌تواند به خطای

سیستماتیک در خروجی مدل منجر شود (Suman et al., 2025). این نقاط ضعف، محرکی برای توسعه سیستم‌های فازی-فازی (نوع ۲) بوده است که با معرفی توابع عضویت بازه‌ای، سطوح اضافی از انعطاف‌پذیری را به مدل‌سازی تزریق می‌کنند. در این سیستم‌ها، به‌جای تعریف یک مقدار قطعی برای درجه عضویت، بازه‌ای از مقادیر ممکن در نظر گرفته می‌شود که امکان نمایش همزمان ابهام در داده‌ها و عدم قطعیت در پارامترهای مدل را فراهم می‌سازد. برای مثال، در ارزیابی معیار «تراکم جمعیت»، یک سیستم فازی نوع ۲ می‌تواند بازه‌ای مانند $[0.6, 0.8]$ را به‌جای مقدار قطعی 0.7 برای درجه عضویت در کلاس «تراکم بالا» اختصاص دهد، که انعکاس‌دهنده اختلاف‌نظر بین کارشناسان یا نویز در داده‌های سرشماری است (Sussner, 2025). این ویژگی، به‌ویژه در بافت‌های شهری کشورهای در حال توسعه (مانند ایران) - که کمبود داده‌های دقیق و یکپارچه یکی از موانع اصلی برنامه‌ریزی است - به‌عنوان راهکاری تحول‌آفرین در نظر گرفته می‌شود (Song et al., 2024).

ازاین‌رو پژوهش حاضر، به طراحی چارچوبی نوین بر پایه سیستم استنتاج فازی-فازی برای پهنه‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزا در شهر اهواز می‌پردازد. اهمیت این روش، در توانایی آن در کاهش وابستگی به داده‌های کمی دقیق و انعطاف‌پذیری در مواجهه با عدم قطعیت‌های زبانی (مانند «دسترسی بالا» یا «تراکم متوسط») نهفته است. از نوآوری‌های این پژوهش می‌توان به ترکیب توابع عضویت فاصله‌ای غیرخطی، تعریف قوانین فازی سلسله‌مراتبی، و یکپارچه‌سازی داده‌های ناهمگون در محیط GIS اشاره نمود.

مبانی نظری

در راستای دستیابی به هدف تحقیق، این پژوهش با تلفیق دو رهیافت کلان شکل گرفت:

۱. نظریه توسعه میان‌افزا: بر استفاده از فضاهای بالقوه درون بافت‌های موجود شهری (مانند اراضی بایر، ساختمان‌های فرسوده) تأکید دارد (خزائی، ۱۴۰۰).

۲. نظریه سیستم‌های فازی-فازی: به‌عنوان ابزاری برای کمی‌سازی معیارهای کیفی این توسعه (مانند انسجام اجتماعی یا پیوستگی کالبدی). فازی یک روش تحلیلی است که برای مدل‌سازی مفاهیمی که نمی‌توان به صورت دقیق اندازه‌گیری شوند، استفاده می‌شود (مشکینی و همکاران، ۱۴۰۰). در این روش، متغیرها به صورت فازی مدل می‌شوند و برای هر متغیر، مقادیر عضویت تعیین می‌شوند. با استفاده از این مقادیر، می‌توان

و غیره استفاده می‌شود. این روش با توجه به اینکه می‌تواند با داده‌های پیوسته و فازی کار کند، برای مسائل پیچیده و شبه‌حقیقی، یک روش مؤثر و قدرتمند است (Mai et al., 2023).

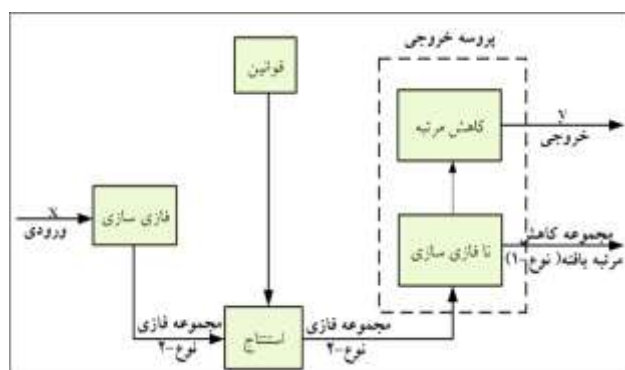
بدلایل مختلف از جمله استفاده از عبارات زبانی که دارای دامنه غیر قابل اندازه‌گیری می‌باشند (مختاری و همکاران، ۱۴۰۲)، مجموعه فازی نوع-۲ یا مجموعه فازی-فازی پیشنهاد گردید، که یک مجموعه فازی است که دارای درجه عضویت‌های فازی نیز می‌باشد. به عبارتی این سیستم مجموعه‌ای، در جایی که تعیین دقیق درجه‌ی عضویت برای یک مجموعه فازی مشکل‌تر است، مفید است (Jing, 2018 & Yimin). در واقع سیستم فازی نوع-۲ در برابر عدم قطعیت‌هایی که در قوانین فازی یا پارامترهای سیستم به وجود می‌آید، مقاوم است. پیش‌بینی سری‌های زمانی (Mai et al., 2023)، مدل‌سازی فواصل مبهم در پیاده‌سازی سیستم اطلاعات جغرافیایی (Du & Zhu, 2006)، مدل‌سازی ریاضی و تحلیل رفتار یک اکوسیستم پویا و پیچیده (Sun et al., 2021)، از زمینه‌های کاربردی سیستم استنتاج فازی-فازی می‌باشند (شکل ۱).

سیستم استنتاج فازی-فازی، به دلیل دقت بیشتری که در پردازش داده‌های ورودی و تولید خروجی فازی دارد، برای مسائل پیچیده و دشواری مانند پردازش تصویر، کنترل خودکار، تصمیم‌گیری و غیره بسیار مفید است. در کل اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر با استفاده از سیستم استنتاج فازی-فازی، شامل چندین مرحله است که در ادامه به شرح این مراحل پرداخته می‌شود:

به صورت فازی به سؤالات پاسخ داد و نتایج با دقت بیشتری را به دست آورد (Nirmal et al., 2024). به عبارت دیگر، این سیستم یکی از روش‌های هوش مصنوعی است که برای مدل‌سازی و حل مسائلی با تغییرات پیوسته مورد استفاده می‌گیرد. در این سیستم، متغیرهای ورودی و خروجی با استفاده از توابع عضویت فازی مدل می‌شوند. این توابع عضویت فازی، اطلاعات پیوسته را به صورت فازی و نه بولی (دو حالت) نمایش می‌دهند. در این سامانه، با استفاده از قوانین فازی، به صورت خودکار اقداماتی برای پردازش داده‌های ورودی و تولید داده‌های خروجی انجام می‌شود (مرادی فراهانی و همکاران، ۱۳۹۲).

سیستم استنتاج فازی نوع یک، شامل سه قسمت اصلی است: دانش عامل، مجموعه قوانین فازی و مرحله استنتاج. در دانش عامل، داده‌های ورودی به شکل متغیرهای فازی تعریف می‌گردند. از طرفی در مجموعه قوانین فازی، قوانین فازی به صورت IF-THEN تعریف می‌شوند که در این قوانین، شرایط مختلفی برای ورودی‌های فازی تعریف شده و برای هر شرط، عملیاتی برای تولید خروجی فازی مشخص خواهد گردید. در مرحله استنتاج نیز، با استفاده از قوانین فازی و داده‌های ورودی، خروجی فازی قابل محاسبه خواهند بود. این قوانین معمولاً به صورت «گر-آنگاه» تعریف شده و شامل عبارات فازی می‌باشند که با استفاده از عملگرهای منطقی فازی (مانند AND، OR و NOT) با یکدیگر ترکیب می‌شوند. با استفاده از سیستم استنتاج فازی، می‌توان به صورت دقیق‌تری با داده‌هایی که شامل عدم قطعیت هستند، کار کرده و برای مسئله موردنظر بهترین تصمیم را گرفت (Du & Zhu, 2006).

سیستم استنتاج فازی در بسیاری از حوزه‌های کاربردی مانند کنترل خودکار، تصمیم‌گیری، پردازش تصویر، سیستم‌های خبره



شکل ۱. ساختار سیستم فازی-فازی (کاستیو و ملین، ۲۰۱۴)

مرحله اول

تعریف متغیرها: در این مرحله، متغیرهای مختلفی که برای اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر اهمیت دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثلاً، متغیرهایی (معیارهایی) مانند دسترسی، کالبدی، اجتماعی و ضوابط در اینجا تعریف شوند.

مرحله دوم

در این روش، به‌جای استفاده از توابع عضویت فازی، از توابع عضویت غیرخطی که به صورت فازی تعریف شده‌اند، استفاده می‌شود. این توابع خروجی، عملیاتی برای تولید خروجی فازی از ورودی‌های فازی مشخص می‌کنند و با استفاده از قوانین فازی، خروجی فازی محاسبه می‌شود. بنابراین بجای تعریف توابع عضویت برای هر یک از متغیرها، رابطه‌ای فاصله‌ای تعریف می‌شود. این توابع نشان‌دهنده میزان عضویت در فاصله‌ای ممکن از محدوده مقادیر متغیر است. مثلاً، برای متغیر «کالبدی»، می‌توان یک تابع عضویت فاصله‌ای مانند: «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» تعریف نمود.

مرحله سوم

تعریف قواعد فازی: در این مرحله، قواعد فازی برای اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر تعریف می‌شوند. این قواعد شامل یک شرط، یک عملگر فازی و یک نتیجه است. برای مثال، یک قاعده ممکن است شامل شرطی مانند «اگر مقادیر پایداری (عمر) بنا زیاد و دسترسی به زیرساخت‌های شهری زیاد باشد، آنگاه اولویت محدوده بالاتر است»، باشد.

مرحله چهارم

استنتاج فازی-فازی: در این مرحله، با استفاده از قواعد فازی و توابع عضویت فاصله‌ای، استنتاج فازی انجام می‌شود. به این ترتیب، با دادن مقادیر مختلف ورودی متغیرها به سیستم، خروجی فازی محاسبه می‌شود، که نشان‌دهنده اهمیت هر منطقه برای توسعه خواهد بود.

مرحله پنجم

دفاعی‌سازی خروجی: در این مرحله، خروجی فازی به شکل دسته‌هایی با مقادیر عضویت دقیق تبدیل می‌شوند. به‌عنوان مثال، می‌توان برای هر منطقه، امتیازی بین ۰ تا ۱۰ تعیین نمود، که نشان‌دهنده اهمیت آن منطقه برای توسعه خواهد بود. این روش، با داشتن دو مجموعه قوانین فازی به صورت جداگانه برای ورودی‌ها و خروجی‌ها، به شکلی که هر یک از مجموعه‌های قوانین فازی، بهترین عملیات ممکن را برای محاسبه خروجی فازی مشخص می‌کند، به‌دقت بیشتری در پردازش داده‌های فازی و تولید خروجی

فازی می‌انجامد. به عبارت دیگر در سیستم استنتاج فازی-فازی، با استفاده از چندین سیستم استنتاج فازی، به ورودی‌های فازی، چند خروجی فازی تولید می‌شود. سپس، با استفاده از ترکیب این خروجی‌ها، خروجی نهایی تولید می‌شود. در این روش، به‌جای استفاده از یک سیستم استنتاج فازی برای تولید خروجی فازی، از چندین سیستم استنتاج فازی استفاده می‌شود.

مرحله ششم

در یک سیستم فازی نوع-۲ پروسه خروجی شامل دو مرحله می‌باشد. ابتدا نگاشت یک مجموعه فازی نوع-۲ به یک مجموعه فازی نوع-۱، که به این مرحله کاهش نوع یا کاهش مرتبه ۱ می‌گویند. سپس مرحله نافازی‌سازی مجموعه کاهش مرتبه یافته است (رونقی، ۱۴۰۰).

مرحله هفتم

اولویت‌بندی: در نهایت، با توجه به دسته‌بندی خروجی دفاعی‌سازی، مناطق با اولویت بالاتر برای توسعه میان‌افزای شهر مشخص می‌شوند. مثلاً، مناطقی که امتیاز بیشتری را در مقایسه با دیگر مناطق کسب کرده‌اند، به‌عنوان مناطق اولویت بالاتر برای توسعه در نظر گرفته می‌شوند. به عبارتی کل محدوده شهر امتیازاتی بین ۰ تا ۱ خواهد گرفت، می‌توان این مقادیر کمی را در مثلاً ۵ کلاس با امتیازهای: خیلی بالا، بالا، متوسط، اندک و خیلی اندک دسته‌بندی نمود (مختاری و همکاران، ۱۴۰۲).

در نهایت، سیستم استنتاج فازی-فازی برای اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر، قادر است به‌عنوان یک روش مفید در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی شهری مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این روش به دلیل داشتن ابزارهای ساده و قابل استفاده، برای شهرهای با داده‌های اندک نیز مناسب است (Sohrabi et al, 2013).

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های پیشین عمدتاً بر کاربرد سیستم‌های فازی نوع ۱ در تحلیل‌های مکانی متمرکز بوده‌اند (مرادی فراهانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ مای و همکاران^۱، ۲۰۲۳)، اما کمبود مطالعاتی در بهره‌گیری از سیستم‌های فازی-فازی برای پهنه‌بندی توسعه میان‌افزا به‌ویژه در بافت‌های شهری با داده‌های ناقص یا ناهمگون مشهود است. این شکاف تحقیقاتی اهمیت توسعه مدلی را برجسته می‌سازد که قادر است با تلفیق معیارهای چندگانه و مدیریت سطوح مختلف ابهام، اولویت‌بندی دقیق‌تری از مناطق مستعد توسعه ارائه دهد.

GIS (مطالعه: منطقه ۱۲ تهران) و در جامعه مطالعاتی ۴۲۰ هکتار بافت فرسوده مرکزی تهران دریافتند که با تعریف توابع عضویت گوسی برای معیارهای مالکیت، سازه، دسترسی و ارزش زمین، ۷۲ هکتار از پهنه‌های مورد مطالعه با اولویت‌سازی شناسایی خواهند شد. آنان همچنین سیستم فازی خطای برآورد را ۲۰ درصد نسبت به روش‌های قطعی کاهش دادند.

لفطی و همکاران (۱۴۰۲)، با طراحی سیستم استنتاج فازی نوع ۲ برای معیارهای تراکم جمعیت، فرسودگی بافت، دسترسی به خدمات و غیره برای شناسایی بافت‌های فرسوده انزلی پرداختند. آنان دریافتند که ۳۵۰۰ هکتار (۱۹/۴ درصد مساحت) از محدوده مورد مطالعه، در زمره‌ی پهنه‌های با استعداد «خیلی بالا» قرار گرفته‌اند. دقت مدل ۸۹ درصد برآورد شده و نشان داد، فازی-فازی ۲۵ درصد خطای کمتری نسبت به فازی نوع ۱ در مدیریت داده‌های ناهمگون دارد.

با توجه به خلأهای پژوهشی مانند: عدم توجه به سلسله‌مراتب عدم قطعیت در داده‌های شهری ایران (ابزار دقیق، قوانین ناهمگون، نظرات ذهنی ذی‌نفعان)؛ تمرکز اکثر پژوهش‌ها بر معیارهای کالبدی-زیست‌محیطی و غفلت از مؤلفه‌های اجتماعی-اقتصادی در توسعه میان‌افزا؛ نبود چارچوبی یکپارچه برای ترکیب داده‌های ناهمگون (نظیر لایه‌های رستری، برداری و نظرسنجی‌های کیفی) و همچنین محدودیت سیستم‌های فازی نوع ۱ در مدیریت عدم قطعیت مرکب (ترکیب ابهام در داده‌ها و قوانین)، این مطالعه با اتکا به سه نوآوری اصلی، خود را از پیشینه پژوهشی متمایز می‌سازد:

۱. استفاده از توابع عضویت بازه‌ای فازی-فازی برای معیارهای کیفی مانند «انسجام اجتماعی» که اندازه‌گیری دقیق آن‌ها دشوار است.

۲. طراحی پایگاه قوانین تطبیقی با قابلیت به‌روزرسانی پویا بر اساس بازخورد ذی‌نفعان محلی.

۳. یکپارچه‌سازی سطوح مختلف عدم قطعیت (داده‌ای، مدلی و تفسیری) در فرآیند پهنه‌بندی.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف پهنه‌بندی استعداد اراضی برای توسعه میان‌افزا در شهر اهواز، از چارچوب ترکیبی سیستم استنتاج فازی-فازی و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام شده است. طراحی روش‌شناسی تحقیق در گام‌های بوده است: شکل (۲)

داده‌های موردنیاز شامل لایه‌های مکانی (رستری و برداری) معیارهای چهارگانه کالبدی (تراکم ساختمانی، عمر بنا، کاربری اراضی)، دسترسی (فاصله از مراکز خدماتی، شبکه حمل‌ونقل)،

پژوهش‌های متعددی به بررسی کاربرد سیستم‌های فازی در تحلیل‌های مکانی و برنامه‌ریزی شهری پرداخته‌اند:

ژو و همکاران^۱ (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای در شهر گوانگژو (چین) به طراحی سیستم فازی-فازی برای مدیریت همزمان عدم قطعیت‌های اقلیمی (سیل) و اثر اجتماعی آن پرداختند. نتایج نشان داد ۳۰ درصد از اراضی مرکزی گوانگژو پتانسیل توسعه پایدار میان‌افزا برای جلوگیری از مهاجرت را دارند و مدل پیشنهادی ۴۰ درصد خطای کمتر از فازی نوع ۱ دارد.

ین و همکاران^۲ (۲۰۲۲)، نیز با بهره‌گیری از سیستم‌های فازی-فازی، مدلی پویا برای شبیه‌سازی توسعه شهری تحت سناریوهای تغییر اقلیم طراحی کردند که قادر به مدیریت همزمان عدم قطعیت‌های محیطی و اجتماعی بود.

مای و همکاران (۲۰۲۳)، با تلفیق منطق فازی نوع ۱ و سامانه اطلاعات جغرافیایی، مدلی برای شناسایی اراضی بایر شهری در شانگهای ارائه دادند که دقت ۸۷٪ در شناسایی پهنه‌های مستعد داشت.

ژو و همکاران (۲۰۲۲)، در پژوهشی پیشگامانه، از سیستم استنتاج فازی برای تحلیل پیوستگی کالبدی در توسعه درون‌زا استفاده کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که عدم قطعیت در تعریف «تراکم بهینه» می‌تواند تا ۳۰ درصد بر نتایج پهنه‌بندی تأثیر بگذارد.

مای و همکاران (۲۰۲۴)، در پژوهشی اقدام به شناسایی زمین‌های خالی شهری با استفاده از منطق فازی و تصاویر ماهواره‌ای در شهر شانگهای با تلفیق فازی نوع ۱ و داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 نمودند. نتایج حاکی از طبقه‌بندی ۱۲ درصد اراضی شهری به‌عنوان پهنه‌های مستعد توسعه درون‌زا با دقت ۸۷ درصدی و تأکید بر نقش شاخص‌های NDVI و تراکم ساختمانی در محدوده مورد مطالعه بوده است.

عباس‌زاده و همکاران (۱۳۹۹)، در پژوهشی با عنوان «ارزیابی توان توسعه درون‌زا با منطق فازی در محیط GIS (نمونه: شهر مشهد»، به مطالعه محدوده ثبتی شهر مشهد (به وسعت تقریبی ۳۵۰ کیلومتر مربع) پرداختند. با سیستم استنتاج فازی نوع ۱ و ۸ معیار (شامل تراکم جمعیت، ظرفیت زیرساخت‌ها، و کاربری‌های ناکارآمد)، ۲۳٪ از اراضی مشهد برای توسعه میان‌افزا «مناسب» تشخیص داده شد. نتایج ابهام در داده‌های مالکیت را بزرگ‌ترین چالش مدل‌سازی دید.

امان‌پور و رضوی (۱۴۰۰)، در پژوهشی با عنوان: اولویت‌بندی بافت‌های فرسوده برای توسعه میان‌افزا با تلفیق AHP فازی و

1. Zhou et al

2. Yin et al

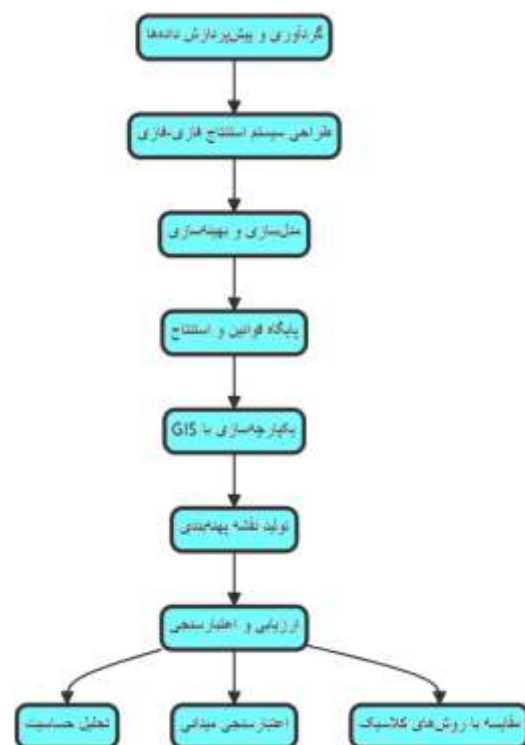
خروجی سیستم فازی-فازی به صورت امتیازی بین ۰ تا ۱۰۰ برای هر پیکسل (۱۰×۱۰ متر) محاسبه و در محیط ArcGIS به لایه مکانی تبدیل شد. نتایج در پنج کلاس بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی گردید. نقشه نهایی پهنه‌بندی با تحلیل الگوهای فضایی، مناطق مستعد توسعه میان‌افزا را در مناطق هشت‌گانه شهر اهواز شناسایی نمود. اعتبار مدل با سه روش سنجیده شد:

۱. تحلیل حساسیت: بررسی تأثیر نوسانات پارامترهای ورودی (مانند تغییر توابع عضویت) بر خروجی. ۲. اعتبارسنجی میدانی: تطابق نتایج با مناطق پیشنهادی در طرح‌های مصوب شهری (مثل اراضی بایر شناسایی شده در طرح تفصیلی). ۳. مقایسه با روش‌های کلاسیک: ارزیابی دقت مدل در مقایسه با سیستم‌های فازی نوع-۱ و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) از طریق شاخص‌های خطای مربعات میانگین^۴ و ضریب کاپا.

محدوده مورد مطالعه

کلان‌شهر اهواز به‌عنوان یکی از شهرهای بزرگ ایران و مرکز استان خوزستان از نظر جغرافیایی بین ۳۱ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۷ دقیقه طول شرقی (معروف‌نژاد، ۱۳۹۰) در بخش جلگه‌ای خوزستان قرار گرفته است و فاصله زمینی از تهران ۸۱۶ کیلومتر و فاصله هوایی ۵۵۱ کیلومتر است (شکل ۳). ارتفاع شهر اهواز از سطح ۱۸ متر است (اداره کل هواشناسی استان خوزستان، ۱۴۰۱). موقعیت جغرافیایی اهواز به‌گونه‌ای است که آن را در زمره مهم‌ترین شهرهای ایران قرار داده است. شهرستان اهواز کمی بیش از ۸۰۰۰ کیلومتر وسعت دارد. محدوده قانونی شهر اهواز ۱۹۴۹۴ هکتار و حریم شهر اهواز ۵۵۷۵۸۰۳۷ مترمربع می‌باشد (معاونت برنامه‌ریزی و توسعه سرمایه انسانی شهرداری اهواز، ۱۴۰۰). شهر اهواز با مساحت حدود ۲۲۰ کیلومتر به‌عنوان پنجمین شهر بزرگ ایران پس از تهران، مشهد، اصفهان و تبریز شناخته می‌شود. اهواز دارای ۸ منطقه و ۳۵ ناحیه است و به وسیله رودخانه کارون به دو بخشی شرقی و غربی تقسیم شده است (معاونت برنامه‌ریزی شهرداری اهواز، ۱۳۹۸).

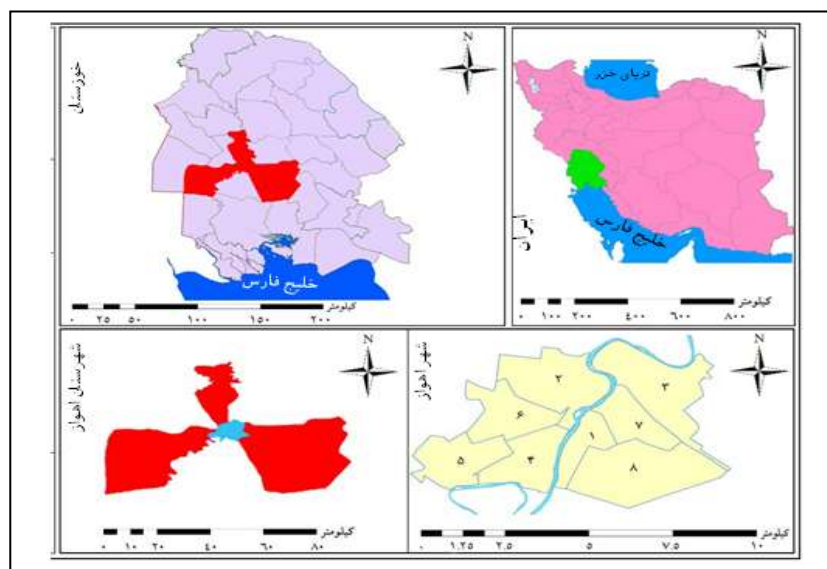
اجتماعی (انسجام اجتماعی، تراکم جمعیت) و ضوابط شهری (محدودیت‌های قانونی، پهنه‌بندی ارتفاعی) از منابعی مانند سازمان شهرداری، طرح جامع شهر اهواز و مرکز آمار ایران استخراج شدند. داده‌های کیفی با استفاده از مقیاس‌های فازی به کمی تبدیل و در محیط ArcGIS 10.8 یکپارچه‌سازی گردیدند. نرمال‌سازی داده‌ها در بازه [۰/۱] با روش‌های خطی و غیرخطی انجام گرفت تا سازگاری با توابع عضویت فازی تضمین شود. متغیرهای ورودی با توابع عضویت بازه‌ای نوع-۲ مدل‌سازی شدند تا عدم قطعیت‌های چندلایه (ابهام در داده‌ها، قوانین و تفسیرها) مدیریت شود. برای هر متغیر، پنج مقدار زبانی (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد) با توابع گوسی و مثلثی تعریف گردید. پارامترهای توابع عضویت با الگوریتم خوشه‌بندی فازی^۲ بهینه‌سازی شدند. پایگاه قوانین سیستم با ۸۱ قانون اگر-آنگاه مبتنی بر دانش خبرگان و مطالعات پیشین شکل گرفت. قوانین با عملگرهای فازی Mamdani ترکیب و امکان به‌روزرسانی پویا براساس بازخورد ذی‌نفعان محلی فراهم شد. در مرحله استنتاج، از الگوریتم (Karnik-Mendel) KM برای کاهش نوع (تبدیل خروجی‌های نوع-۲ به نوع-۱) و روش مرکز ثقل^۳ برای دفازی‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲. گام‌های انجام پژوهش

1. Interval Type-2 Fuzzy Sets
2. Fuzzy Clustering Algorithm
3. Centroid

4. Root Mean Square Error



شکل ۳. منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

در این پژوهش، برای اینکه انتخاب‌ها و اولویت‌ها تنها به بخش‌های خاص از شهر محدود نگردد و کل محدوده‌های شهری از نظر اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر گویا شوند، می‌توان از مدل‌سازی فاز-فازی استفاده نمود. با این هدف و از آنجا که تعداد قوانین در سیستم استنتاج فاز-فازی تابعی از ورودی‌های سیستم است، در اینجا، متغیرها و شاخص‌های مختلف، در قالب چهار معیار اصلی (کالبدی، دسترسی، ضوابط شهری و اجتماعی)، به‌عنوان ورودی‌های سامانه در نظر گرفته شدند. سپس برای هر متغیر، مقادیر عضویتی را تعیین گردید و با استفاده از این مقادیر، نمره‌ای برای هر محدوده در هریک از متغیرها، به دست آمد. در ادامه با استفاده از روش‌های مدل‌سازی فاز-فازی، این نمرات برای هریک از متغیرها در هر بخش، با یکدیگر ترکیب شده و به نتیجه‌ای برای هر بخش، در مجموع متغیرها منجر شد. در نهایت می‌توان به صورت فاز-فازی به اولویت‌بندی مناطق مختلف پرداخت و با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌سازی فاز-فازی، امکان تصمیم‌گیری در خصوص اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر را فراهم نمود. به‌عنوان مثال مناطقی که در مجموع متغیرها نمره بالاتری را کسب کرده‌اند، به‌عنوان مناطق اولویت بالاتر برای توسعه در نظر گرفته می‌شوند. اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر با استفاده از سیستم استنتاج فاز-فازی، شامل چندین مرحله است:

✓ تعریف متغیرها:

✓ استفاده از توابع عضویت فاز-فازی؛

✓ تعریف قواعد فاز-فازی؛

✓ دفازی‌سازی خروجی؛

✓ پروسه خروجی شامل دو مرحله: ابتدا نگاشت یک مجموعه فاز-فازی نوع-۲ به یک مجموعه فاز-فازی نوع-۱، که به این مرحله کاهش نوع یا کاهش مرتبه ۱ می‌گویند. سپس مرحله نافازی‌سازی مجموعه کاهش مرتبه یافته است (نیکنام، ۱۳۹۲).

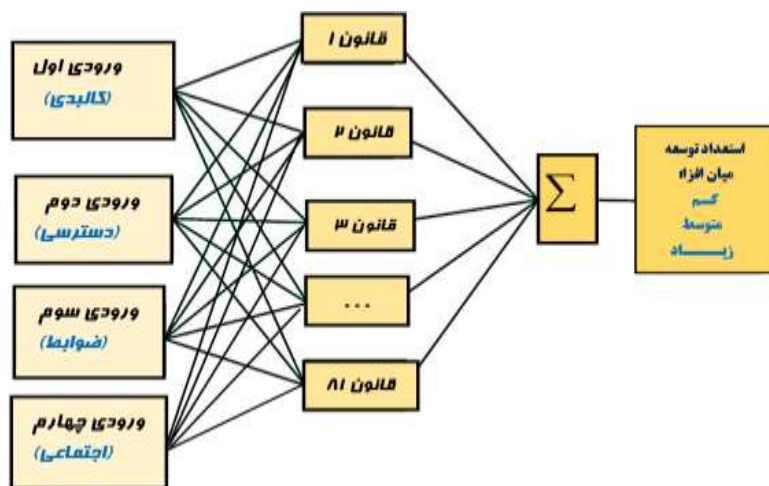
اولویت‌بندی

در کل، سیستم استنتاج فاز-فازی برای اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌افزای شهر قادر است به‌عنوان یک روش مفید در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی شهری مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این روش به دلیل داشتن ابزارهای ساده و قابل استفاده، برای شهرهای با داده‌های اندک نیز مناسب است. به عبارت دیگر در شهرهایی که احتمالاً داده‌های مکانی مربوط به ارزیابی مناطق مستعد توسعه کمتر و یا به صورت محدودتر در دسترس است، سیستم استنتاج فاز-فازی نوع ۲ قادر است با استفاده از همین اطلاعات اندک و حتی ناهمگون و نامتقارن نیز، به تصمیم‌گیری مناسب برای اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه میان‌بافتی برسد.

بنابراین می‌توان از این روش به‌عنوان یک روش مفید در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی شهری استفاده کرد. به همین دلیل، استفاده از سیستم استنتاج فاز-فازی در ArcGIS برای اولویت‌بندی مناطق مستعد توسعه در شهرهای کوچک‌تر (با

عضویت گوسی و فازی گسسته استفاده گردید. تابع فازی گسسته برای معیارهایی (مانند اسکلت سازه‌های ساختمانی و کاربری اراضی) مورد استفاده قرار گرفت که ارزش ورودی آنها غیر پیوسته می‌باشد (شکل ۴).

داده‌هایی کمتر نیز)، به‌عنوان یک ابزار مهم در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی شهری، توصیه می‌شود. در این تحقیق با توجه به حجم محاسبات، نوع معیارها و تعداد بازه‌های موردنیاز برای هر معیار، جهت پهنه‌بندی پتانسیل توسعه میان‌افزا، دو نوع تابع

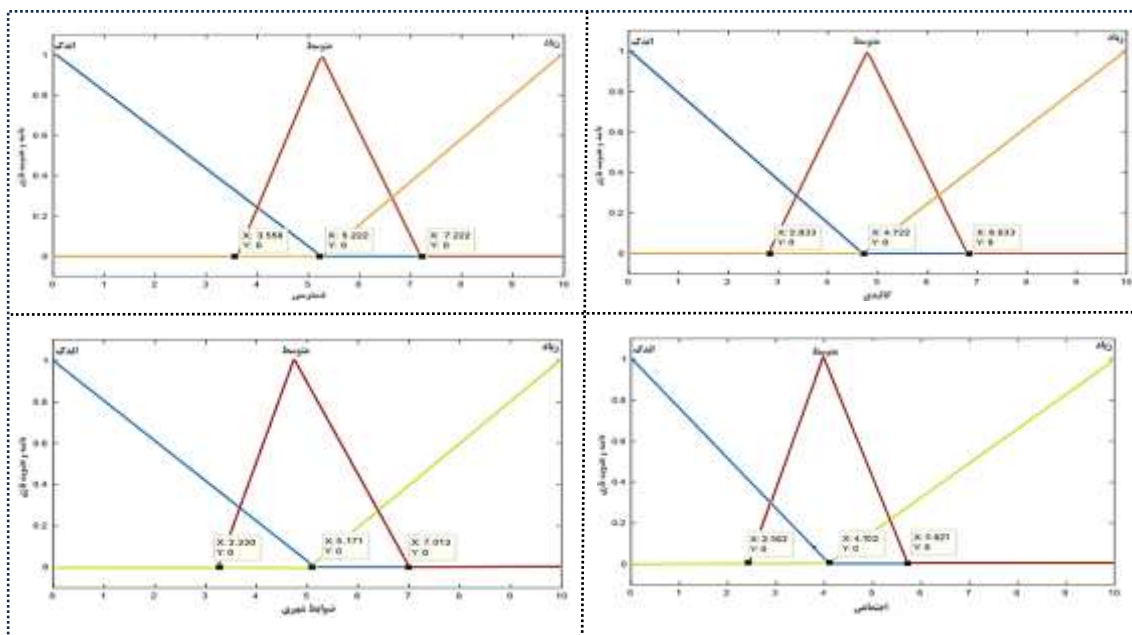


شکل ۴. ورودی، قوانین و خروجی‌های در سیستم استنتاج فازی ۲

(نواحی قابل پیشنهاد برای توسعه) مجموعه‌های فازی با توابع عضویت به صورت خیلی پایین، پایین، متوسط، بالا و خیلی بالا تعریف گردید.

در مرحله سوم (ساخت پایگاه قانون)، که مهم‌ترین بخش در روش استنتاج فازی است قوانینی را از سطح شاخص‌های پایه تا بالاترین سطح به دست می‌دهد. این قوانین بیانگر وابستگی‌های متقابل بین شاخص‌ها، مؤلفه‌ها و نحوه تعامل و تأثیر آنها بر یکدیگر است (امان‌پور، ۱۳۹۷). همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر قانون از دو بخش مقدم (اگر) و تالی (آنگاه) تشکیل شده است. که بخش تالی همواره یک عبارت اسمی، ولی بخش مقدم معمولاً شامل چندین عبارت (یا شرط) است که با رابطه «و» منطقی با هم مرتبط می‌شوند. تعداد این قوانین به تعداد ورودی‌ها، تعداد طبقات بین ورودی‌ها و همچنین نوع مجموعه‌های فازی تعریف شده در پایگاه داده (تعداد ارزش‌های زبانی هر کدام از مؤلفه‌های اولیه، ثانویه و شاخص‌ها) بستگی دارد. به‌منظور به دست آوردن آستانه توابع مثلی هر یک از سطوح فوق ابتدا یک خوشه‌بندی فازی روی اطلاعات ورودی چهارگانه (معیارهای کلی) به‌طور مستقل انجام گرفت (شکل ۵).

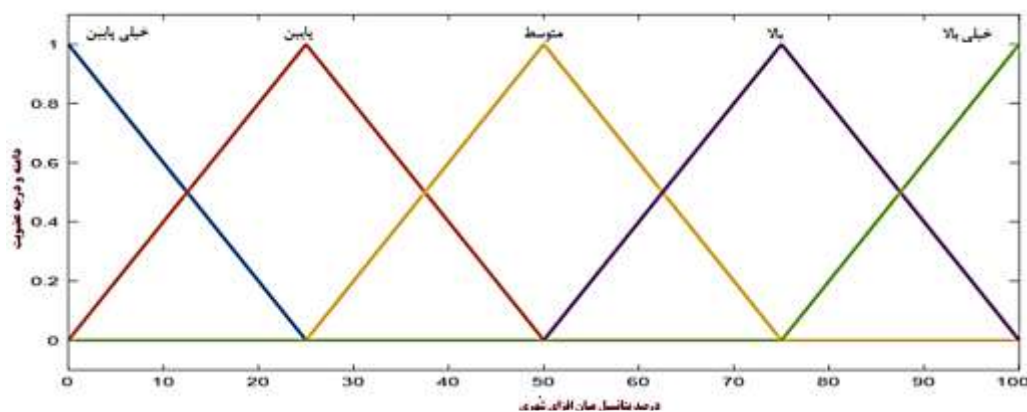
همچنین برای سایر معیارها که دارای ارزش پیکسلی پیوسته می‌باشند، از تابع عضویت گوسی استفاده شد. برای استفاده از سیستم استنتاج فازی-فازی، نرم‌افزار متلب به کار گرفته شد. مراحل استنتاج فازی برای رسیدن به اهداف پژوهش شامل: پایگاه دانش، تشکیل پایگاه داده (مجموعه‌های فازی و دامنه و توابع عضویت) و تشکیل پایگاه قانون (قواعد منطقی فازی) است. به‌منظور تشکیل پایگاه دانش، داده‌های واقعی تنها در اولین سطح مدل یعنی در رابطه با شاخص‌های پایه وجود دارند. بنابراین هر کدام از شاخص‌ها متغیرهای زبان-شناختی هستند که با به‌کارگیری منطق فازی و استدلال تقریبی از داده‌های پایه استنتاج می‌شوند. ازاین‌رو، ضرورت اصلی در طراحی یک سیستم خبره فازی، نخست انتخاب توابع عضویتی با کارایی بالا برای متغیرهای زبان‌شناختی و تعریف مجموعه‌های فازی ورودی و خروجی هر مرحله (تشکیل پایگاه داده) و سپس جمع‌آوری دانش درباره مسئله مورد بررسی و کد دادن دانش جمع‌آوری شده در قالب قوانین منطقی اگر-آنگاه فازی (تشکیل پایگاه قانون) خواهد بود (ایمانی و همکاران، ۱۳۹۹). در مرحله بعد برای هر کدام شاخص‌های کلان، مجموعه‌های فازی با ۵ ارزش یا مقدار زبانی: خیلی اندک، اندک، متوسط، زیاد و خیلی زیاد برای اثرگذاری بر خروجی



شکل ۵. دامنه و عضویت توابع معیارهای چهارگانه پژوهش

دست آوردن آستانه توابع مثلی هر یک از سطوح فوق ابتدا یک خوشه‌بندی فازی روی اطلاعات ورودی چهارگانه (معیارهای کلی) به‌طور مستقل انجام گرفت (شکل ۶).

تعداد این قوانین به تعداد ورودی‌ها، تعداد طبقات بین ورودی‌ها و همچنین نوع مجموعه‌های فازی تعریف شده در پایگاه داده (تعداد ارزش‌های زبانی هر کدام از مؤلفه‌های اولیه، ثانویه و شاخص‌ها) بستگی دارد (امان‌پور، ۱۳۹۷). به‌منظور به



شکل ۶. دامنه و درجه عضویت خروجی سیستم استنتاج فازی-فازی

زیاد و خیلی زیاد استفاده گردید، در نخستین پایگاه قانون استنتاج عوامل ورودی مستلزم تنظیم ۸۱ قانون می‌باشد. همچنین ظرفیت توسعه میان‌افزای شهر اهواز به‌عنوان خروجی، با پنج متغیر زبانی خیلی بالا، بالا، متوسط، پایین و خیلی پایین می‌باشند (جدول ۱). دستیابی به نتایج نهایی مقادیر خروجی سیستم استنتاج فازی-فازی، مستلزم لحاظ مقادیر پیکسلی همه شاخص‌های هر یک از معیارهای مورد استفاده در تحلیل است. بدین منظور در این مرحله همه شاخص‌های خروجی به رسترهایی با مقادیر پیکسلی تبدیل شدند.

مراکز دسته‌های چهارگانه کالبدی، دسترسی، اجتماعی و ضوابط شهری به ترتیب ۴/۷۲، ۵/۲۲، ۴/۱۰ و ۵/۱۷ می‌باشد. با تعیین مراکز دسته‌ها، داده‌ها نسبت خود را با این مراکز پیدا کرده، و با تعیین میزان عددی یا کمی خود، به تبیین موقعیت خود دست پیدا می‌کنند.

از آنجا که معیارهای اصلی برای توسعه میان‌افزا در این پژوهش چهار معیار: کالبدی، دسترسی، ضوابط شهری و اجتماعی بوده و برای کیفی‌سازی ورودی‌ها از پنج سطح کیفی خیلی اندک، اندک، متوسط،

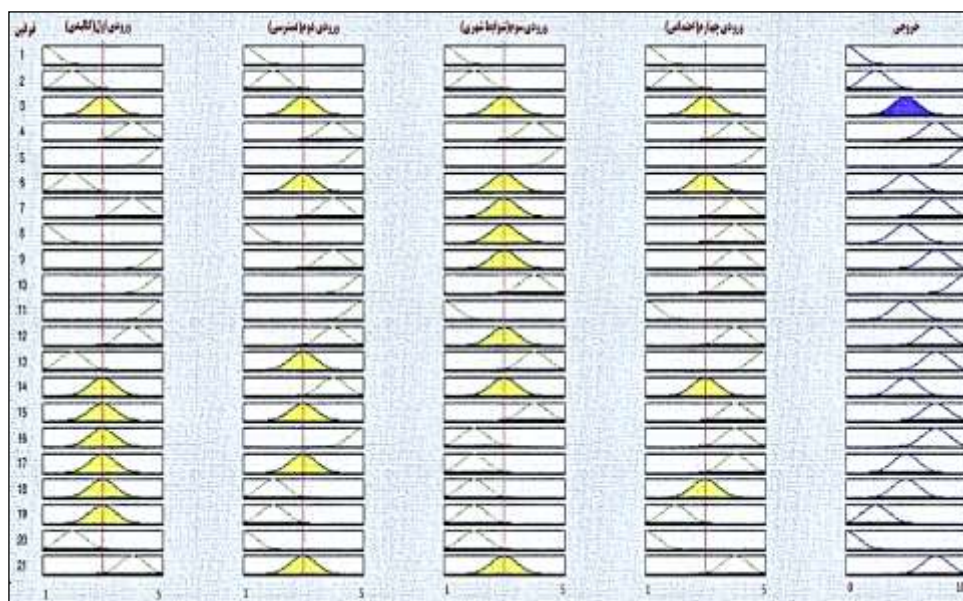
طبقه‌بندی گردیده است. همان‌گونه که از شکل مورد اشاره برمی‌آید، بیشترین مساحت با پتانسیل متوسط به بالا در مناطق شهری ۸، ۴، ۵ و ۶ قابل مشاهده است. چنانچه اهواز را در چهار بخش شمال غربی، شمال شرقی، جنوب غربی و جنوب شرقی در نظر بگیریم، کمترین و بیشترین پتانسیل توسعه میان‌افزای شهر به ترتیب مربوط به بخش‌های شمال شرقی و شمال غربی آن می‌باشد.

به صورت کلی و علی‌رغم اینکه بیشترین اراضی بایر و خالی در منتهی‌الیه محدوده قانونی شهر قرار گرفته‌اند، به جهت اثرگذاری عواملی مانند دسترسی و ضوابط شهری، محدوده‌های با پتانسیل متوسط به بالا، بیشتر به قسمت‌های داخلی شهر متمرکز شده است. از سوی دیگر داده‌های خروجی تحقیق در نقشه (شکل ۸)، از نظر توزیع پتانسیل توسعه درون‌زا در مناطق هشت‌گانه شهر اهواز، بیانگر این واقعیت است که منطقه ۸ دارای بیشترین محدوده‌های با استعداد متوسط به بالا برای این مدل از توسعه است. پس از منطقه ۸، مناطق ۴ و ۶ در رتبه‌های بعدی با پتانسیل بالا قرار می‌گیرند. در جهت مقابل مناطق ۱، ۳ و ۷ به ترتیب حائز اراضی با کمترین پتانسیل توسعه میان‌افزا در شهر اهواز شده‌اند (جدول ۲).

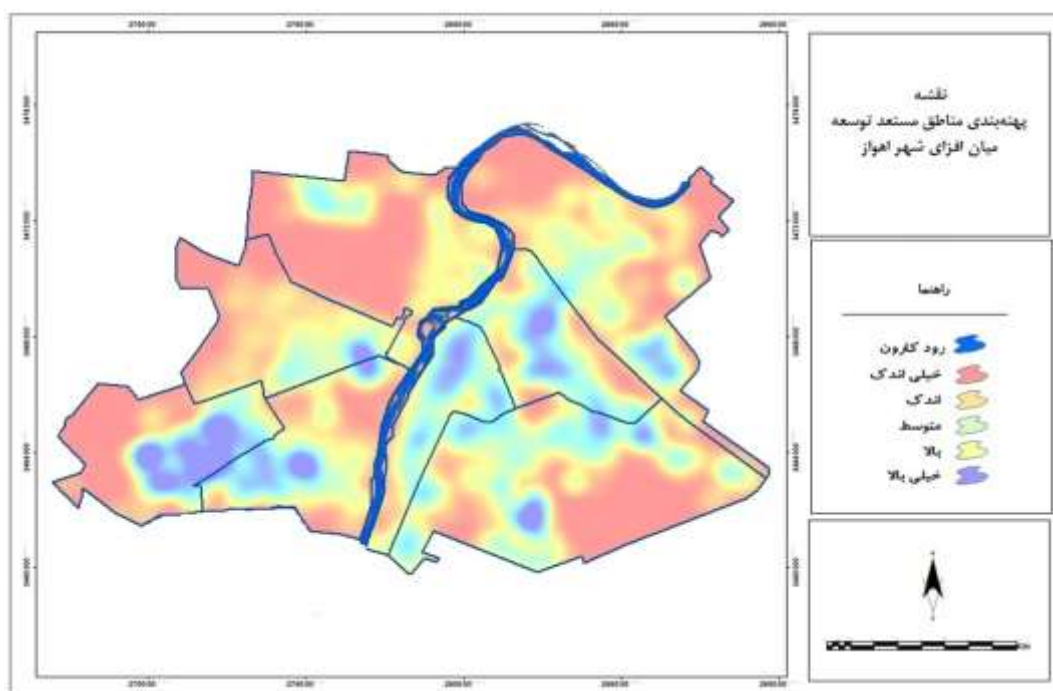
مقادیر پیکسلی هر معیار، میانگین مقادیر پیکسلی شاخص‌های آن بوده است. مقادیر خروجی نهایی سیستم استنتاج فازی-فازی مقادیری بین ۱۰۰-۰ برای تمام نقاط شهر است. این مقادیر برآیند متغیرهای زبانی (خیلی اندک، اندک، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) ورودی‌های چهارگانه براساس قوانین ۸۱ گانه بین آن‌ها می‌باشد. برای نمونه چنانچه پتانسیل معیار کالبدی (که خود برآیند شاخص‌های مختلف است) برای یک پیکسل در محدوده شهر، خیلی زیاد و پتانسیل معیار دسترسی، زیاد و همچنین پتانسیل معیارهای ضوابط شهری و اجتماعی به ترتیب متوسط و زیاد باشند، پتانسیل نهایی آن پیکسل برای توسعه میان‌افزای شهر، بالا خواهد بود (قانون ۹). شکل (۷) بخشی از قوانین همراه با متغیرهای زبانی ورودی و خروجی سیستم استنتاج فازی نوع ۲ را به شکل گرافیکی نشان می‌دهد. پس از اجرای مدل و اعمال غیرفازی ساز بر روی آن نقشه، خروجی با فرمت متنی وارد نرم‌افزار ArcGIS10.8 گردیده و به رستر تبدیل شد. شکل (۸) نقشه خروجی استنتاج فازی-فازی برای پهنه‌بندی اراضی شهر اهواز به‌منظور توسعه میان‌افزا را نشان می‌دهد، که در ۵ کلاس پتانسیل بسیار اندک تا بسیار بالا

جدول ۱. قواعد زبانی معیارهای ورودی توسعه میان‌افزای شهر اهواز

خروجی شامل:	اگر				ردیف
	ورودی شامل:				
امتیاز استعداد به‌کارگیری برای توسعه میان افزا	و اثرات اجتماعی، ... باشد	و اثرات ضوابط شهری...	و اثرات دسترسی...	اثرات کالبدی...	
خیلی پایین	خیلی اندک	خیلی اندک	خیلی اندک	خیلی اندک	۱
پایین	اندک	اندک	اندک	اندک	۲
متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	۳
بالا	زیاد	زیاد	زیاد	زیاد	۴
خیلی بالا	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۵
متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	اندک	۶
بالا	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	۷
متوسط	زیاد	متوسط	خیلی اندک	خیلی اندک	۸
بالا	زیاد	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	۹
خیلی بالا	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۱۰
متوسط	خیلی اندک	خیلی اندک	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۱۱
بالا	زیاد	متوسط	زیاد	زیاد	۱۲
بالا	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	اندک	۱۳
متوسط	متوسط	متوسط	زیاد	متوسط	۱۴
بالا	زیاد	زیاد	متوسط	متوسط	۱۵
بالا	زیاد	اندک	زیاد	متوسط	۱۶
متوسط	زیاد	اندک	متوسط	متوسط	۱۷
متوسط	متوسط	اندک	اندک	متوسط	۱۸
اندک	اندک	اندک	اندک	متوسط	۱۹
خیلی اندک	خیلی اندک	اندک	خیلی اندک	اندک	۲۰
بالا	زیاد	متوسط	متوسط	زیاد	۲۱
...	...	...	...	...	...
خیلی بالا	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	خیلی زیاد	۸۱



شکل ۷. نشانگر گرافیکی مکانیسم استدلال فازی-فازی برای بخشی از قوانین مورد استفاده



شکل ۸. نقشه پهنه‌بندی اراضی شهر اهواز برای توسعه میان‌افزا

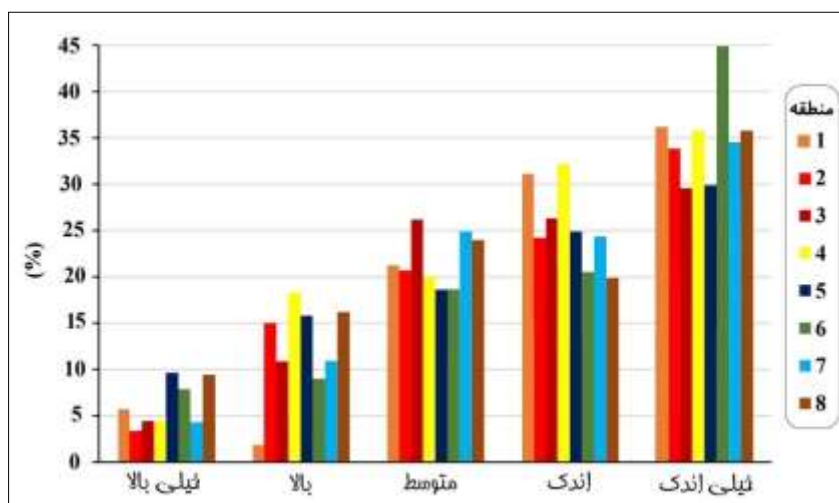
می‌دهد، ۳۴ درصد از کل مساحت مناطق اهواز قابلیت خیلی پایینی را در توسعه درون‌زای شهری دارد. از سویی محدوده‌های با قابلیت این مدل از توسعه، تنها کمی بیش از ۶ درصد از پهنه اهواز را در برمی‌گیرد. در طبقه خیلی بالا، برتری با مناطق ۶ و هشت است، در حالی که منطقه ۲ کمترین درصد در این کلاس را به خود اختصاص داده است. از میان طبقات متوسط به بالا (متوسط، بالا و خیلی بالا)

مطابق داده‌های جدول (۲)، که مساحت ۵ کلاس توسعه میان‌افزای مناطق اهواز با پتانسیل بسیار اندک تا بسیار بالا را نشان می‌دهد، از مجموع ۱۸۸۰۶/۴ هکتار مساحت اهواز در محدوده قانونی آن (شامل ۸ منطقه شهری)، ۴۵۱۴/۵۵ هکتار آن در طبقه خیلی اندک برای توسعه میان‌افزا قرار گرفته است. این در حالی است که بیشترین مساحت با مقدار ۷۶۱۸/۱ هکتار، به کلاس متوسط تعلق گرفته است. جدول (۳) نشان

پیشنهادی برای توسعه‌ی میان‌افزا، منطقه چهار شهری اهواز کمترین جایگاه به منطقه یک که خاستگاه اولیه اهواز بوده بیشترین مساحت و درصد را کسب نموده است. در این بخش

جدول ۲. مساحت پتانسیل توسعه میان‌افزای اهواز در ۵ کلاس

منطقه	مساحت کل (هکتار)	خیلی بالا (هکتار)	بالا (هکتار)	متوسط (هکتار)	اندک (هکتار)	خیلی اندک (هکتار)
یک	۱۱۰۲/۶	۷۲/۱	۴۱	۲۴۴/۳	۳۴۵/۹۵	۳۹۹/۰۵
دو	۲۱۱۳/۰۸	۷۰/۶	۳۲۷/۴	۴۴۵/۷	۳۶۶/۸	۷۳۳/۸۲
سه	۳۱۸۱/۳۶	۱۳۹/۴۶	۳۶۶/۷	۸۷۲	۸۷۸/۱	۹۲۴/۹۵
چهار	۲۵۳۷/۰۹	۱۰۴/۸۴	۴۷۴/۱	۲۸۹/۱	۸۹۵/۴	۸۹۵/۴
پنج	۲۱۵۴/۷۴	۱۹۹/۲	۳۴۸/۳	۴۰۶/۹	۵۴۴/۷	۶۶۵/۴
شش	۲۱۱۰/۵۳	۱۵۲/۷	۱۸۴/۱	۳۹۱/۴	۴۲۲/۱	۹۵۱/۸
هفت	۱۷۱۸/۷۱	۷۶/۳	۱۹۱/۳	۴۴۲/۱	۴۱۶/۳	۵۹۲/۵
هشت	۳۰۹۸/۱۱	۲۸۴/۲	۵۰۰/۸	۵۴۷/۷	۶۴۵/۲	۱۱۱۹/۹
مجموع	۱۸۰۰۶/۲۲	۱۰۹۹/۴	۲۴۳۳/۷	۳۶۳۹/۲	۴۵۱۴/۵۵	۶۲۸۲/۸



شکل ۹. نمودار نسبت کلاس‌های پنجگانه توسعه میان‌افزا

جدول ۳. درصد پتانسیل توسعه میان‌افزای اهواز در ۵ کلاس

منطقه	مساحت کل (هکتار)	کلاس خیلی بالا	کلاس بالا	کلاس متوسط	کلاس اندک	کلاس خیلی اندک	مجموع
۱	۱۱۰۲/۶	۶	۳	۲۲	۳۱	۳۶	-
۲	۲۱۱۳/۰۸	۳	۱۵	۲۱	۲۴	۳۴	-
۳	۳۱۸۱/۳۶	۴	۱۱	۲۷	۲۷	۲۹	-
۴	۲۵۳۷/۰۹	۴	۱۸	۲۰	۳۴	۳۵	-
۵	۲۱۵۴/۰۷	۹	۱۶	۱۸	۲۵	۳۰	-
۶	۲۱۱۰/۵۳	۷	۸	۱۸	۲۰	۴۵	-
۷	۱۷۱۸/۸۱	۴	۱۱	۲۵	۲۴	۳۴	-
۸	۳۰۹۸/۱۱	۹	۱۶	۱۷	۲۰	۳۶	-
مجموع	۱۸۰۰۶/۲۲	۰/۰۶/۳	۰/۱۳/۷	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۴	۱۰۰

خیلی زیاد به ترتیب، (۱۳/۷٪) و (۶/۳٪) و در مجموع ۲۰٪ از پهنه اهواز را شامل می‌شوند.

در مجموع اراضی با پتانسیل کم و خیلی کم برای هدف پژوهش، نزدیک به ۶۰ درصد (۵۹٪) از کل اراضی اهواز را اشغال کرده‌اند. در سوی مقابل زمین‌های با استعداد زیاد و

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق پهنه‌بندی اراضی شهر مناطق هشت‌گانه شهر اهواز به‌منظور توسعه میان‌افزا با استفاده از سیستم استنتاج فازی-فازی (فازی نوع ۲) و با نظر داشت معیارهای چهارگانه کالبدی (تراکم ساختمانی، عمر بنا)، دسترسی (شبکه حمل‌ونقل، مراکز خدماتی)، اجتماعی (انسجام اجتماعی، تراکم جمعیت) و ضوابط شهری (محدودیت‌های قانونی) بوده است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که تنها ۲۰ درصد از مساحت اهواز (۳۶۳۹ هکتار) پتانسیل متوسط تا بسیار زیاد برای توسعه میان‌افزا دارد، در حالی که ۵۹ درصد از اراضی شهر در کلاس‌های کم و بسیار کم قرار گرفته‌اند. این نتایج با مطالعات پیشین مانند مای و همکاران (۲۰۲۳) در شانگهای و سینگ و همکاران (۲۰۲۵) در مدیریت عدم قطعیت‌های شهری همسو است، اما نوآوری اصلی این تحقیق در یکپارچه‌سازی سطوح مختلف عدم قطعیت (داده‌ای، مدلی و تفسیری) نهفته است که دقت پهنه‌بندی را نسبت به روش‌های کلاسیک ۴۰ درصد بهبود بخشید. تمرکز بالای پتانسیل توسعه در مناطق ۴، ۶ و ۸ را می‌توان به عوامل زیر نسبت داد:

- دسترسی به شبکه حمل‌ونقل عمومی در منطقه ۴ که با یافته‌های دوو و ژو (۲۰۲۳) در مورد نقش پیوستگی کالبدی همخوانی دارد.
- تراکم جمعیت متعادل در منطقه ۶ که از نظر اجتماعی-اقتصادی شرایط بهینه برای نوسازی فراهم می‌کند.
- وجود اراضی بایر قانونی در منطقه ۸ که با مطالعات محمدی ده چشمه و حاجی‌پور (۱۴۰۳) در مدیریت ریسک سیلاب شهری مقایسه‌پذیر است.

استفاده از سیستم فازی-فازی نوع ۲ در این پژوهش، امکان مدیریت همزمان ابهام در داده‌های ناهمگن (مانند نظرسنجی‌های کیفی و لایه‌های رستری) و ناسازگاری در قوانین استنتاج را فراهم کرد. این مزیت به‌ویژه در محیط‌های با داده‌های ناقص، همانند بافت شهری اهواز، به‌عنوان نقطه قوت اصلی مدل شناخته می‌شود. با این حال، برخی محدودیت‌ها نیز قابل ذکر است:

- وابستگی به کیفیت داده‌های ورودی: خطاهای مکانی در نقشه‌های پایه می‌تواند بر دقت خروجی تأثیر بگذارد.
- پیچیدگی محاسباتی: اجرای ۸۱ قانون فازی در محیط MATLAB نیازمند سخت‌افزارهای قدرتمند است.
- ذهنیت در تعیین توابع عضویت: اگرچه از خوشه‌بندی فازی برای کاهش این مسئله استفاده شد، اما همچنان وابستگی به نظر خبرگان وجود دارد.

نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان چارچوبی عملیاتی در برنامه‌ریزی شهری اهواز به کار گرفته شود:

۱. اولویت‌بندی پروژه‌های نوسازی: تمرکز بر مناطق ۴، ۶ و ۸ با در نظر گرفتن معیارهای اجتماعی-اقتصادی.
۲. بهینه‌سازی ضوابط شهری: بازنگری در قوانین ارتفاعی و کاربری اراضی برای مناطق با پتانسیل بالا.
۳. گسترش مشارکت شهروندی: استفاده از پلتفرم‌های دیجیتال برای جمع‌آوری داده‌های کیفی ذی‌نفعان محلی.

راهکارها

برخی از راهکارهای (علمی-پژوهشی، اجرایی و مدیریتی) منتج از پژوهش، شامل موارد ذیل است:

- توسعه سیستم‌های هیبرید: تلفیق فازی-فازی با الگوریتم‌های یادگیری عمیق برای پردازش داده‌های بلادرنگ.
- تحلیل حساسیت پیشرفته: بررسی تأثیر غیرخطی معیارهای کیفی مانند «انسجام اجتماعی» بر خروجی مدل.
- کاربرد بین‌رشته‌ای: استفاده از این چارچوب در حوزه‌هایی مانند مدیریت بحران و تاب‌آوری شهری.
- طراحی سامانه پشتیبان تصمیم (DSS): توسعه یک پلتفرم GIS-Based با قابلیت به‌روزرسانی پویای قوانین فازی.
- ظرفیت‌سازی نیروی انسانی: برگزاری کارگاه‌های آموزشی برای برنامه‌ریزان شهری در زمینه فازی-فازی.
- اصلاح فرآیندهای صدور مجوز: ادغام نقشه‌های پهنه‌بندی این پژوهش در سامانه‌های یکپارچه شهرداری.
- تدوین سند راهبردی توسعه میان‌افزا: اختصاص ۳۰ درصد از بودجه نوسازی به مناطق با پتانسیل بسیار زیاد.
- تشویق سرمایه‌گذاری خصوصی: اعطای معافیت‌های مالیاتی به پروژه‌های واقع در پهنه‌های مستعد.
- حفظ تعادل اکولوژیک: الزام به تخصیص ۲۰ درصد از فضای پروژه‌ها به زیرساخت‌های سبز در مناطق با پتانسیل بالا.
- در جمع‌بندی نهایی می‌توان گفت این پژوهش با ارائه یک روش‌شناسی نوین مبتنی بر سیستم فازی-فازی، گامی در جهت کاهش شکاف بین نظریه و عمل در برنامه‌ریزی شهری برداشته است. یافته‌ها نه تنها الگویی برای شهرهای با شرایط مشابه (مانند خرم‌آباد و کرمانشاه) ارائه می‌دهد، بلکه پایه‌ای برای بازتعریف مفاهیم کلیدی مانند «تراکم بهینه» و «دسترسی عادلانه» در ادبیات شهری نیز می‌باشد. با این حال، تحقق کامل پتانسیل‌های شناسایی‌شده، مستلزم همکاری نهادهای حاکمیتی، بخش خصوصی و جامعه محلی در قالب یک حکمرانی یکپارچه شهری است.

References

- Abedini, M., Pirouzi, E., Amini, Z., & Parastaar, S. (2021). Optimal location of green spaces in the city of Ardabil using the Analytic Network Process (ANP) model and Geographic Information System. *Urban Ecology Researches*, 12(3), 1-20. (In Persian). Doi: [10.30473/grup.2021.8615](https://doi.org/10.30473/grup.2021.8615)
- Ahmadinejad, Sh., & Marjan Ghaemi, R. (2017). Urban evolution analysis from the perspective of fuzzy clustering and sensitivity analysis among input data and results of the proposed model. In *International Conference on Architecture, Urbanism, Civil Engineering, Art, and Environment; Future Horizons, Looking Back*, Tehran, Esfand 2017. (In Persian)
- Amanpour, S. (2018). Identifying and Prioritizing the Factors Affecting the Formation of Rural Recursive Immigration (Case Study: Central Section of Dezful County). *Geography and Territorial Spatial Arrangement (GTSA)*, 8(29), 37-60. (In Persian) DOI: [10.22111/gaij.2018.4257](https://doi.org/10.22111/gaij.2018.4257).
- Castillo, O., & Melin, P. (2014). A review on interval type-2 fuzzy logic applications in intelligent control. *Information Sciences*, 279, 615–631. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.015>
- Citaristi, I. (2022). United Nations Human Settlements Programme— UN-Habitat. The Europa Directory of International Organizations 2022, 240–243. <https://doi.org/10.4324/9781003292548-51>
- Du, G.-n., & Zhu, Z.-y. (2006). Modelling spatial vagueness based on type-2 fuzzy set. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 7(2), 250–256. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.a0250>
- Imani, B., Pashazadeh, A., & Karimi, S. H. (2020). The Analysis of Environmental Sustainability for Rural Housing Using Fuzzy Interference Systems (Case Study: Rural Areas in Marivan County). *Journal of Rural Research and Planning*, 8(1), 79-93. (In Persian) DOI: [10.22067/jrrp.v8i1.70319](https://doi.org/10.22067/jrrp.v8i1.70319)
- Karimi, B., Pivastegar, Y., & Taghvaei, M. (2018). Explanation and presentation of an optimal allocation model for intermediate development capacities using GIS (Case study: Shiraz metropolis). *New Perspectives in Human Geography*, 10(2), 217-230. (In Persian) DOR: [20.1001.1.66972251.1397.10.2.24.4](https://doi.org/10.1001.1.66972251.1397.10.2.24.4)
- Khazaei, Z. (2021). *Intermediate development: A strategy for urban growth*. Entekhab Publications, First Edition, Tehran, pp. 69. (In Persian)
- Khuzestan Meteorological Organization. (2022). *Statistics and climatic indices of Khuzestan*. (In Persian)
- Mai, D.S., Bui, K.T.T., Van Doan, C. (2023). Application of Interval Type-2 Fuzzy Logic System and Ant Colony Optimization for Hydropower Dams Displacement Forecasting. *Int. J. Fuzzy Syst.* 25(1), 2052–2066. <https://doi.org/10.1007/s40815-022-01452-3>
- Mendel, J. M. (2009). On answering the question “Where do I start in order to solve a new problem involving interval type-2 fuzzy sets?”. *Information Sciences*, 179(19), 3418–3431. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.05.008>
- Mendel, J. M. (2017). *Type-1 Fuzzy Sets and Fuzzy Logic*. Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems, 25–99. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51370-6_2
- Miri, Rezaei, Zarei, Abedi, & Tala. (2024). Modeling the physical development of Rasht city with methods based on soft computing. *Studies in Human Settlement Planning*, 500(1). (In Persian)
- Mohammadidehcheshme, M., & Hajipour, N. (2024). Future Studies of the Urban Governance Challenges in the Face of Climate Change with Emphasis on the Flood Crisis (The Case study: Ahvaz Metropolis), *Journal of Regional Planning*, 14(53), 61-80
- Mokhtari, M., Mikaeel, B., & Mohammad Hassan. (2023). Proposing a new regression model with interval type-2 fuzzy goal programming approach. *Modern Research in Mathematics*, 8(40), 183-208. (In Persian) DOI: [10.30495/jnrm.2022.59358.2065](https://doi.org/10.30495/jnrm.2022.59358.2065)
- Moradi Farahani, H., Asgari, J., & Zakeri, M. (2013). A review of type-2 fuzzy logic: From theory to application. *Journal of Soft Computing Accounting*, 2(1), 22-43. (In Persian)
- Moshkini, A., Rostam Meydan, A., Ahadnejad, M., & Mahmoudzadeh, H. (2021). Explaining the livable eco-city model of Tabriz metropolis using fuzzy logic. *Urban Ecology Researches*, 12(3), 69–88. (In Persian) <https://doi.org/10.30473/grup.2021.8245>
- Nirmal, D. D., Nageswara Reddy, K., & Singh, S. K. (2023). Application of fuzzy methods in green and sustainable supply chains: critical insights from a systematic review and

- bibliometric analysis. *Benchmarking: An International Journal*, 31(5), 1700–1748. <https://doi.org/10.1108/bij-09-2022-0563>
- Pehrson, J. (2025). Densification through Infill Development in Contemporary Urban Planning: An Autoethnographic Case Study.
- Planning and Human Capital Development Deputy of Ahvaz Municipality. (2021). *Statistical yearbook of Ahvaz metropolis*. 13, 18, 29, 71. (In Persian)
- Planning Deputy of Ahvaz Municipality. (2019). *Summary of information on regions, zones, and neighborhoods of Ahvaz city*. (3rd ed., pp. 71, 39). (In Persian)
- Ronaghi, M. (2021). Evaluation of knowledge management maturity using type-2 fuzzy sets. *Library and Information Science*, 24(1), 156–173. (In Persian) DOI: [10.30481/lis.2020.225056.1696](https://doi.org/10.30481/lis.2020.225056.1696)
- Salameh, T., Farag, M. M., Hamid, A.-K., & Hussein, M. (2025). Adaptive neuro-fuzzy inference system for accurate power forecasting for on-grid photovoltaic systems: A case study in Sharjah, UAE. *Energy Conversion and Management: X*, 26, 100958. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100958>
- Shafati, Arezou, Valizadeh, Reza, Rahimi, Akbar, & Pahani, Ali. (2023). An analysis of the impact of smart city factors on the development of intermediate urban fabric (Case study: Old texture of Tabriz). *Quarterly Scientific Journal of Urban Ecology Research*, 14(3), 77–96. (In Persian) <https://doi.org/10.30473/grup.2021.50446.2478>
- Shojaeean, A., Nikpour, A., Aligholizadeh Firouz Jayi, N., & Soleimani, M. (2022). Identification of areas suitable for intermediate development using remote sensing. *Urban Studies*, 12(45), 83–96. (In Persian) DOI: [10.34785/J011.2023.009](https://doi.org/10.34785/J011.2023.009)
- Singh, B., Kaunert, C., Lal, S., & Arora, M. K. (2025). Versatility of Fuzzy Logic in Urban Transportation and Sustainable Planning in Smart Cities. *Fuzzy Logic in Smart Sustainable Cities*, 175–200. <https://doi.org/10.1201/9781003636724-7>
- Song, C., Deng, Z., Zhao, W., Yuan, Y., Liu, M., Xu, S., & Chen, Y. (2024). Developing urban building energy models for shanghai city with multi-source open data. *Sustainable Cities and Society*, 106, 105425. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105425>
- Suman, S., Pacharaney, U., & Gote, P. M. (2025). A Type-1 Fuzzy Logic Framework for Early Risk Assessment of Gestational Diabetes Mellitus Using Clinical Risk Factors. *2025 International Conference on Machine Learning and Autonomous Systems (ICMLAS)*, 1180–1185. <https://doi.org/10.1109/icmlas64557.2025.10967700>
- Sun, G.-Q., Zhang, H.-T., Wang, J.-S., Li, J., Wang, Y., Li, L., Wu, Y.-P., Feng, G.-L., & Jin, Z. (2021). Mathematical modeling and mechanisms of pattern formation in ecological systems: a review. *Nonlinear Dynamics*, 104(2), 1677–1696. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06314-5>
- Sussner, P. (2025). Complete Lattices as Frameworks for Interval and General Type-2 Fuzzy Inference Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 33(9), 2972–2986. <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2025.3545295>
- Wu, D., & Mendel, J. M. (2019). Recommendations on designing practical interval type-2 fuzzy systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.06.012>
- Yan, X. et al. (2022). *Type-2 Fuzzy Modeling for Urban Sustainability Assessment
- Yimin, L., & Jing, H. (2008). Type-2 fuzzy mathematical modeling and analysis of the dynamical behaviors of complex ecosystems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(9), 1379–1391. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.07.006>