فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست ۳(۱): بهار ۱۴۰۴: ۱۹-۱
Journal of Environmental management and law, Vol.3, Issue 1, 1-19

Journal of Environmental Management and Law
فصلنامه مدیریت و حقوق محیط زیست
https://sanad.iau.ir/en/Journal/jeml

Development of an Integrated CA-LR-Markov-Fuzzy Model for Optimal Site Selection of Sustainable Urban Development: An Environmental Criteria-Based Approach in Gilan Province

Meisam Jafari*[1,2], Delaram Sikarudi[1,2], Sahar Ghiyas[2]

[1] *Human Environment and Sustainable Development Research Center, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran*
[2] *Department of Environment, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran*

**Corresponding Author: meisamjafari@iau.ac.ir*

Original Paper

Received: 2024.12.05
Accepted: 2025.05.22

Keywords:
Sustainable urban development,
Environmental criteria,
Integrated modeling,
Optimal site selection,
Cellular automata,
Gilan Province.

Abstract

Unbalanced urban expansion represents one of the most critical environmental sustainability threats of the 21st century, imposing detrimental impacts on natural ecosystems and biodiversity. This study aimed to develop an innovative framework for optimal site selection of sustainable urban development based on environmental criteria in Gilan Province, Iran. An advanced integrated CA-LR-Markov-Fuzzy model incorporating four modeling approaches—cellular automata, logistic regression, Markov chain, and fuzzy logic—was designed and implemented. Following identification of 23 significant environmental criteria across four categories (physiographic, ecological, hydrological, and climatic-social), criteria weighting was conducted using Analytic Hierarchy Process (AHP) and expert consultation involving 40 specialists. Model validation demonstrated exceptional performance with ROC=0.848, Kappa coefficient κ=0.79, and overall accuracy of %84. Site selection results classified 18.3% of the provincial area (2,570 km²) as highly suitable, 24.7% (3,468 km²) as suitable, and 31.2 (4,381km²) as conservation zones. Model predictions indicate a 46% increase in urban development by 2037. Comparative analysis of three scenarios—conservation, physical, and socio-economic—revealed that the physical scenario with a score of 0.780.780.78 provides optimal balance between development and environmental protection. This research provides a comprehensive scientific framework for evidence-based decision-making in sustainable urban planning.

Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the

توسعه مدل تلفیقی CA-LR-Markov-Fuzzy جهت مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار: رویکرد مبتنی بر معیارهای محیط زیستی در استان گیلان

میثم جعفری[۱،۲]*، دلارام سیکارودی[۱،۲]، سحر غیاث [۲]

۱- مرکز تحقیقات محیط زیست انسانی و توسعه پایدار، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
۲- گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: meisamjafari@iau.ac.ir

نوع مقاله:
علمی-پژوهشی

تاریخچه مقاله:
ارسال: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۱

کلمات کلیدی:
توسعه شهری پایدار، معیارهای محیط زیستی، مدلسازی تلفیقی، مکان‌یابی بهینه، اتوماتای سلولی، استان گیلان.

چکیده

گسترش شهری غیرمتوازن به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین تهدیدات پایداری محیط زیستی قرن بیست‌ویکم، اثرات مخربی بر اکوسیستم‌های طبیعی و تنوع زیستی وارد می‌آورد. این پژوهش با هدف توسعه چارچوب نوآورانه مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار مبتنی بر معیارهای محیط زیستی در استان گیلان انجام گرفت. مدل تلفیقی پیشرفته CA–LR–Markov–Fuzzy شامل چهار رویکرد مدلسازی اتوماتای سلولی، رگرسیون لجستیک، زنجیره مارکوف و منطق فازی طراحی و پیاده‌سازی شد. پس از شناسایی ۲۳ معیار محیط زیستی حائز اهمیت در چهار دسته فیزیوگرافی، اکولوژیک، هیدرولوژیک و اقلیمی-اجتماعی، وزن‌دهی معیارها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و نظرسنجی ۴۰ متخصص انجام پذیرفت. نتایج اعتبارسنجی مدل تلفیقی عملکرد فوق‌العاده مطلوبی با شاخص ROC=0.848، ضریب کاپای k=0.79 و دقت کلی ۸۴٪ نشان داد. براساس نتایج مکان‌یابی، ۱۸.۳٪ از مساحت استان (۲۵۷۰ کیلومترمربع) بسیار مناسب، ۲۴.۷٪ (۳۴۶۸ کیلومترمربع) مناسب و ۳۱.۲٪ (۴۳۸۱ کیلومترمربع) به‌عنوان مناطق حفاظتی طبقه‌بندی گردید. پیش‌بینی‌های مدل افزایش ۴۶٪ توسعه شهری تا سال ۲۰۳۷ را نشان می‌دهد. مقایسه سه سناریوی حفاظتی، فیزیکی و اقتصادی-اجتماعی نشان داد که سناریوی فیزیکی با امتیاز ۰.۷۸ بهترین تعادل میان توسعه و حفاظت محیط‌زیست را ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش چارچوب علمی جامعی برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در برنامه‌ریزی شهری پایدار فراهم می‌آورد.

مقدمه

پدیده شهرنشینی شتابان که به‌عنوان یکی از تحولات اجتماعی-فضایی بنیادین قرن بیست‌ویکم شناخته می‌شود، بر اساس پیش‌بینی‌های سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۵۰ میلادی بیش از دو سوم جمعیت کره زمین (حدود ۶.۸ میلیارد نفر) را در مناطق شهری ساکن خواهد ساخت که این فرآیند عمیق تحول جمعیتی، چالش‌های بی‌سابقه‌ای را در حوزه‌های مدیریت فضایی، محیط زیستی و اقتصادی شهرها مطرح نموده است (Anestis & Stathakis, 2024). این روند سریع شهرنشینی که عمدتاً در کشورهای در حال توسعه با شدت بیشتری در حال تحقق است، در صورتی که بر اساس اصول علمی توسعه پایدار هدایت نشود، پیامدهای جبران‌ناپذیری چون تخریب زیستگاه‌های طبیعی، نابودی اراضی کشاورزی، آلودگی منابع آب، تشدید جزیره‌های حرارتی شهری و کاهش تنوع زیستی را به همراه خواهد داشت که جبران آن‌ها مستلزم هزینه‌های اقتصادی و محیط زیستی بسیار بالا خواهد بود (Grimm et al., 2008; Liu et al., 2025; Tayebzadeh-Moghadam & Malekmohammadi, 2024).

گسترش کالبدی شهرها که اغلب به صورت بی‌رویه و بدون توجه به معیارهای پایداری محیط زیستی انجام می‌پذیرد، منجر به اتلاف منابع طبیعی محدود و تحمیل هزینه‌های بلندمدت فراوانی بر جوامع می‌شود که شامل افزایش هزینه‌های زیرساختی، کاهش کیفیت زندگی شهری، تعمیق نابرابری‌های فضایی، تشدید آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات و کاهش قابلیت رقابتی شهرها است (Derdouri et al., 2025; Robertson, 2021). پیامدهای توسعه شهری بی‌رویه در ابعاد زمانی مختلف شامل اثرات کوتاه‌مدت نظیر تخریب پوشش گیاهی محلی، آلودگی هوای شهری و افزایش تولید پسماند، پیامدهای میان‌مدت شامل از دست رفتن زیستگاه‌های حیات وحش، کاهش کیفیت منابع آب و تشدید جزیره حرارتی، و عواقب بلندمدت نظیر تغییرات اقلیم محلی، فرسایش خاک و از دست رفتن تنوع زیستی است که در بُعد اقتصادی شامل افزایش هزینه‌های زیرساخت در کوتاه‌مدت، کاهش بهره‌وری کشاورزی در میان‌مدت و تحمیل هزینه‌های محیط زیستی در بلندمدت است، در حالی که پیامدهای اجتماعی از افزایش جمعیت شهری و تقاضای خدمات در ابتدا تا مهاجرت روستا به شهر و فقر حاشیه‌ای در میان‌مدت و نهایتاً تغییرات اجتماعی-فرهنگی و افزایش نابرابری در بلندمدت گسترش می‌یابد (Janssen & Basta, 2024). سرزمین پهناور ایران با برخورداری از تنوع اقلیمی و محیط زیستی فوق‌العاده، به ویژه در مناطق حساس اکولوژیک نظیر جنگل‌های هیرکانی شمال که به‌عنوان میراث طبیعی جهانی یونسکو ثبت شده‌اند، مناطق مرطوب حاشیه دریای خزر، تالاب‌های بین‌المللی رامسر و دشت‌های حاصلخیز، با چالش‌های خاص و پیچیده‌ای در زمینه مدیریت توسعه شهری پایدار مواجه است که ضرورت توسعه و به‌کارگیری رویکردهای علمی، جامع و پیشرفته در برنامه‌ریزی شهری را بیش از پیش آشکار می‌سازد (DOE ,2022). استان گیلان که به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی، گردشگری و صنعت در شمال کشور شناخته می‌شود، همزمان با برخورداری از اکوسیستم‌های طبیعی منحصربه‌فرد و ارزشمند بین‌المللی شامل جنگل‌های هیرکانی با قدمت ۲۰ میلیون سال، سواحل جنوبی دریای خزر با اهمیت محیط زیستی و اقتصادی بالا، تالاب‌های مهم و حساس محیط زیستی، شبکه پیچیده و غنی رودخانه‌ها و اراضی کشاورزی مرغوب و بارور، تحت فشار شدید و روزافزون رشد جمعیت، مهاجرت‌های درون‌استانی و برون‌استانی، توسعه فعالیت‌های صنعتی و معدنی، گسترش زیرساخت‌های گردشگری و تقاضای فزاینده بابت مسکن و خدمات شهری قرار دارد.

خصوصیات کلیدی استان گیلان از منظر توسعه پایدار شامل مساحت ۱۴۰۴۲ کیلومترمربع که مقیاس مناسبی جهت مدلسازی منطقه‌ای فراهم می‌آورد، جمعیت ۲۵۳۰۶۹۶ نفر (بر اساس سرشماری ۱۴۰۰) با تراکم جمعیتی ۱۸۰ نفر در کیلومترمربع، پوشش جنگلی ۴۵ درصد از مساحت استان که شامل جنگل‌های هیرکانی به‌عنوان میراث جهانی یونسکو است، اراضی کشاورزی ۳۵ درصد از مساحت استان که ۱۲ درصد برنج کشور را تولید می‌کند، خط ساحلی ۳۸۰ کیلومتری دریای خزر با اکوسیستم منحصربه‌فرد و حساس دریایی، شبکه هیدرولوژیک پیچیده شامل ۴۲ رودخانه دائمی، نرخ رشد شهرنشینی ۲.۳ درصد سالانه که بالاتر از میانگین ملی ۱.۸ درصد است و

میزبانی سالانه ۸.۲ میلیون گردشگر که فشار قابل توجهی بر منابع طبیعی وارد می‌آورد، است که این وضعیت پیچیده و چندوجهی، ضرورت توسعه و اجرای مدل‌های علمی پیشرفته، جامع و یکپارچه در راستای مکان‌یابی بهینه توسعه‌های شهری آینده را به شکل اجتناب‌ناپذیری مطرح می‌سازد (Gilan PMPO, 2024; SCI, 2022).

بررسی جامع ادبیات علمی نشان می‌دهد که علی‌رغم توسعه قابل ملاحظه مدل‌های مکان‌یابی و سناریوسازی توسعه شهری، هنوز خلأ علمی مشهودی در زمینه تلفیق سیستماتیک معیارهای محیط زیستی با مدل‌های پیشرفته شبیه‌سازی فضایی-زمانی وجود دارد (Das et al., 2024; Fieuw et al., 2022; Kavathekar et al., 2025) که این موضوع در کشور ایران علی‌رغم تنوع اقلیمی و محیط زیستی بی‌نظیر، به شکل ویژه‌ای احساس می‌شود.

نوآوری اصلی این پژوهش در سه بُعد کلیدی خلاصه می‌شود: اول، توسعه چارچوب ۲۳ معیار محیط زیستی در چهار دسته که با مطالعه میدانی و مشورت با ۴۰ متخصص شناسایی شده‌اند؛ دوم، طراحی مدل تلفیقی نوآورانه CA-LR-Markov-Fuzzy که نخستین بار در ایران، ترکیب چهار رویکرد پیشرفته مدلسازی را محقق می‌سازد؛ و سوم، ارائه راهکارهایی عملیاتی به سیاست‌گذاران در راستای اتخاذ تصمیمات مبتنی بر شواهد علمی در مدیریت توسعه شهری پایدار.

مروری بر ادبیات و مبانی نظری

توسعه شهری پایدار: چارچوب نظری و ابعاد

مفهوم توسعه شهری پایدار که ریشه در گزارش کمیسیون برانتلند[1] (۱۹۸۷) دارد، در حوزه شهری به معنای خلق شهرهایی تعریف می‌شود که ضمن ارائه کیفیت زندگی مطلوب و دسترسی عادلانه به خدمات، حفظ منابع طبیعی و کاهش اثرات محیط زیستی منفی را نیز تضمین نمایند (Derdouri et al., 2025; Robertson, 2021).

ابعاد سه‌گانه پایداری شهری شامل پایداری اقتصادی که بر توسعه اقتصاد محلی، ایجاد اشتغال پایدار و بهبود کارایی در استفاده از منابع تأکید دارد؛ پایداری اجتماعی که شامل عدالت فضایی، دسترسی عادلانه به خدمات، حفظ هویت فرهنگی و تقویت مشارکت شهروندی است؛ و پایداری محیط زیستی که بر حفظ کیفیت هوا و آب، مدیریت پسماند، حفاظت از تنوع زیستی و تقویت تاب‌آوری شهری متمرکز است (Ansari et al., 2024; Derdouri et al., 2025).

معیارهای محیط زیستی مؤثر در توسعه شهری

طبقه‌بندی معیارهای محیط زیستی بر اساس ماهیت علمی، مقیاس تأثیرگذاری و قابلیت کمّی‌سازی، چهار دسته اصلی را شامل می‌شود که هر یک دارای کاربردهای اختصاصی در برنامه‌ریزی شهری هستند.

معیارهای فیزیوگرافی شامل ویژگی‌های توپوگرافی (شیب، ارتفاع، جهت شیب)، خصوصیات ژئومورفولوژیکی (شکل زمین، فرآیندهای فرسایشی)، ویژگی‌های خاک‌شناسی (نوع خاک، عمق، حاصلخیزی) و شرایط هیدرولوژیکی (حوضه‌های آبخیز، منابع آب زیرزمینی) هستند که نقش تعیین‌کننده‌ای در قابلیت‌سنجی اراضی جهت توسعه شهری ایفا می‌نمایند (Farr, 2011; Steiner, 2012).

معیارهای اکولوژیک شامل پوشش گیاهی طبیعی، زیستگاه‌های حیات وحش، مناطق حفاظت‌شده، تنوع زیستی و حساسیت محیط‌زیستی اکوسیستم‌ها هستند که نقش حیاتی در حفظ تعادل‌های طبیعی و تأمین خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کنند (McManamay et al., 2024; Ajirotutu et al., 2024).

[1] Brundtland Commission Report :"Our Common Future"

مدلسازی فضایی-زمانی: رویکردهای نوین

اتوماتای سلولی[1] به‌عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارهای ریاضی به منظور شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده فضایی، قابلیت مدلسازی تغییرات پویا در کاربری اراضی بر اساس قوانین انتقال محلی و تعاملات میان سلول‌های مجاور را دارد (Ansari et al., 2024; Fitawok & Minale, 2024).

$$S_{i,j}^{t+1} = f(S_{i,j}^{t}, N_{i,j}^{t}, P)$$ معادله (۱)

در این معادله:

$S_{i,j}^{t}$: وضعیت سلول در موقعیت (i,j) در زمان t

$N_{i,j}^{t}$: مجموعه سلول‌های مجاور

P: مجموعه پارامترهای مدل

f: تابع انتقال

رگرسیون لجستیک ابزاری قدرتمند جهت تحلیل روابط کمّی میان متغیرهای مستقل متنوع و احتمال وقوع تغییرات در هر نقطه محسوب می‌شود (Hosmer et al., 2013).

مدل ریاضی رگرسیون لجستیک:

$$P(Y = 1 \mid X) = \frac{e^{\beta 0+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn}}{1 + e^{\beta 0+\beta 1X1+\beta 2X2+\ldots+\beta nXn}}$$ معادله (۲)

در این معادله:

$P(Y = 1 \mid X)$= احتمال وقوع توسعه شهری

β_i= ضرایب رگرسیون

X_i= متغیرهای مستقل (معیارهای محیط زیستی)

زنجیره مارکوف قابلیت شبیه‌سازی تحولات کاربری اراضی بر اساس احتمالات انتقال میان حالت‌های مختلف در بازه‌های زمانی متوالی فراهم می‌آورد (Li & Reynolds, 2023).

ماتریس انتقال مارکوف:

$$P_{ij}=\frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} A_{ij}}$$ معادله (۳)

[1] Cellular Automata

در این معادله:

P_{ij}= احتمال انتقال از کاربری i به کاربری j

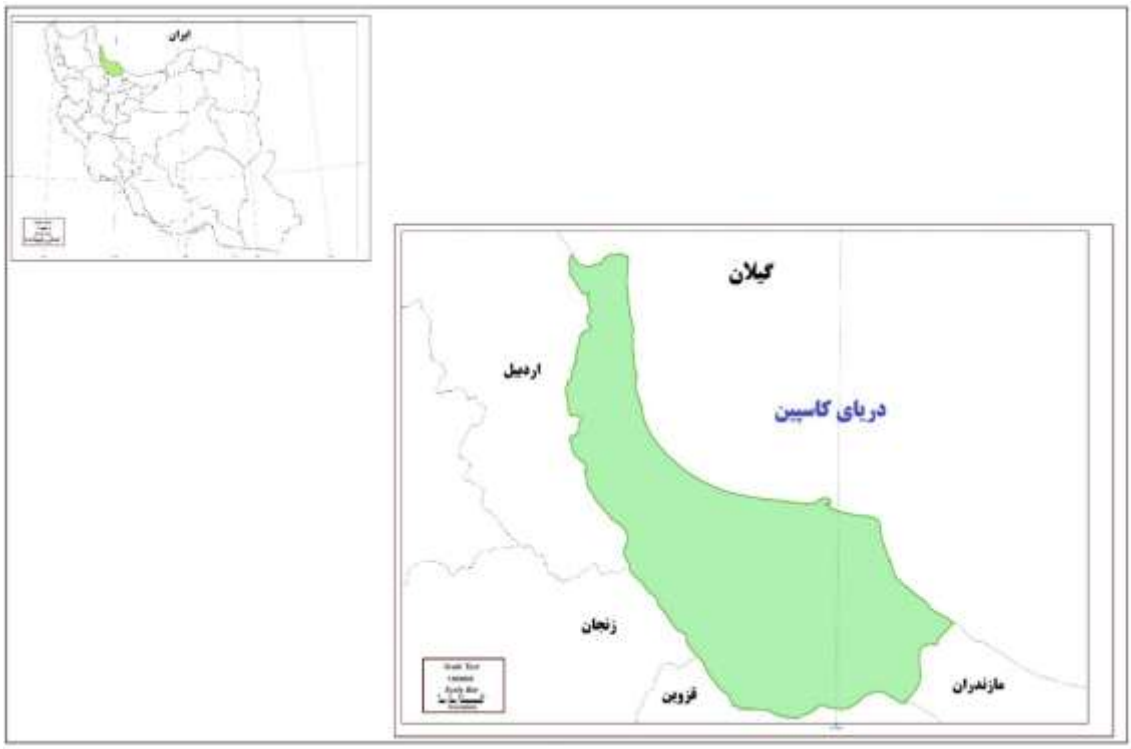
A_{ij}= مساحت تبدیل شده از کاربری i به j

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان گیلان با مساحت کل ۱۴,۰۴۲ کیلومترمربع در منطقه شمال ایران، واقع بین طول‌های جغرافیایی ۴۸°۲۷' تا ۵۰°۳۴' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۳۳' تا ۳۸°۲۷' شمالی، به‌عنوان منطقه مطالعاتی این پژوهش انتخاب شده است که این انتخاب استراتژیک بر اساس تنوع اکولوژیک بی‌نظیر منطقه، حضور اکوسیستم‌های ارزشمند نظیر جنگل‌های هیرکانی ثبت‌شده در فهرست میراث طبیعی یونسکو، سواحل جنوبی دریای خزر، تالاب‌های بین‌المللی و اراضی کشاورزی حاصلخیز صورت گرفته است که در نقشه ۱ مشخص شده است.

ویژگی‌های جغرافیایی منحصربه‌فرد استان شامل تنوع ارتفاعی چشمگیر از سطح دریای خزر (۲۸ متر زیر سطح دریا) تا قله‌های مرتفع البرز شمالی (بیش از ۴۰۰۰ متر)، تنوع اقلیمی از مدیترانه‌ای مرطوب در نواحی ساحلی تا کوهستانی سرد در مناطق مرتفع، تنوع پوشش گیاهی از جنگل‌های انبوه هیرکانی تا مراتع کوهستانی و اراضی کشاورزی، و تنوع فعالیت‌های اقتصادی شامل کشاورزی برنج، باغداری مرکبات، جنگلداری، شیلات، صنایع غذایی و گردشگری طبیعی است که شرایطی ایده‌آل به منظور بررسی جامع تأثیر عوامل محیط‌زیستی بر فرآیندهای پیچیده توسعه شهری فراهم آورده است (Gilan PMPO, 2024; SCI, 2022).



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

Fig. 1 – Location of the study area

چارچوب کلی پژوهش

این پژوهش بر اساس رویکرد ترکیبی کمّی-کیفی پیشرفته و تلفیق سیستماتیک چهار تکنیک مدلسازی فضایی شامل اتوماتای سلولی (CA)، رگرسیون لجستیک[1]، زنجیره مارکوف[2]، و منطق فازی[3] طراحی شده است که این رویکرد نوآورانه با این جامعیت و عمق تحلیلی به‌کارگیری شده و قابلیت پاسخگویی همزمان به پیچیدگی‌های چندبُعدی سیستم‌های شهری، در نظرگیری عدم قطعیت‌های محیطی و شبیه‌سازی تعاملات پویا میان عوامل اقتصادی، اجتماعی، فیزیکی و محیط زیستی را در فرآیندهای پیچیده توسعه شهری فراهم می‌آورد. روش‌شناسی این تحقیق در قالب چارچوب مفهومی پیچیده پنج مرحله‌ای طراحی گردیده که شامل:

الف) مرحله آمادگی و پیش‌پردازش جامع داده‌ها: شامل جمع‌آوری سیستماتیک، تصحیح، استانداردسازی و کنترل کیفیت تمامی داده‌های ورودی از منابع متنوع.

ب) مرحله تحلیل و مدلسازی آماری پیشرفته: شامل اجرای مدل رگرسیون لجستیک چندمتغیره در راستای شناسایی و کمّی‌سازی روابط علی-معلولی پیچیده میان متغیرهای مستقل محیط زیستی و احتمال توسعه شهری.

ج) مرحله مدلسازی فضایی-زمانی پیشرفته: که در آن مدل‌های اتوماتای سلولی با قوانین انتقال پیچیده و زنجیره مارکوف با ماتریس‌های احتمالاتی چندحالته اعمال می‌شوند.

د) مرحله تلفیق هوشمند و یکپارچه‌سازی: که در آن نتایج چهار مدل مستقل با تکنیک‌های پیشرفته منطق فازی، عملگرهای وزن‌دار، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیب می‌گردند.

ه) مرحله اعتبارسنجی جامع و سناریوسازی: شامل آزمون‌های متنوع آماری، مقایسه با داده‌های واقعی، و طراحی سناریوهای مختلف توسعه با رویکردهای متفاوت سیاست‌گذاری است.

جمع‌آوری و پردازش داده‌ها

فرآیند جامع جمع‌آوری داده‌ها در چهار دسته اصلی سازمان‌دهی شده است:

الف) داده‌های سنجش‌ازدور پیشرفته شامل تصاویر ماهواره‌ای Landsat با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر بابت دوره زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۰، تصاویر Sentinel-2 با قدرت تفکیک ۱۰ متر و مدل رقومی ارتفاع[4] سنجنده ASTER با قدرت تفکیک ۳۰ متر.

ب) نقشه‌های رسمی شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های خاک‌شناسی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه‌های هیدرولوژی و منابع آب.

ج) داده‌های میدانی اولیه شامل برداشت ۲۰۰ نقطه کنترل زمینی با GPS دقیق، نمونه‌برداری خاک از ۵۰ نقطه، اندازه‌گیری کیفیت آب در ۳۰ ایستگاه، و مصاحبه با ۴۰ متخصص در حوزه‌های محیط‌زیست، برنامه‌ریزی شهری و GIS.

د) آمار رسمی شامل داده‌های جمعیتی، اقتصادی و اجتماعی از مرکز آمار ایران، داده‌های اقلیمی ۳۰ ساله از سازمان هواشناسی و آمار منابع طبیعی از جهاد کشاورزی.

فرآیند پردازش داده‌ها شامل تصحیحات هندسی و رادیومتریک تصاویر ماهواره‌ای، طبقه‌بندی نظارت‌شده کاربری اراضی با الگوریتم Maximum Likelihood با دقت کلی ۸۵٪، استخراج شاخص‌های طیفی NDVI[5], NDWI[6], NDBI[7]، تولید لایه‌های رستری معیارهای

[1] Logistic Regression (LR)
[2] Markov Chain
[3] Fuzzy Logic
[4] DEM - Digital Elevation Model
[5] NDVI - Normalized Difference Vegetation Index
[6] NDWI - Normalized Difference Water Index
[7] NDBI - Normalized Difference Built-up Index

محیط زیستی با قدرت تفکیک ۳۰ متر، یکسان‌سازی سیستم مختصات در UTM Zone 39N و ایجاد بانک اطلاعات جغرافیایی یکپارچه در محیط ArcGIS بوده است.

شناسایی و استخراج معیارهای محیط زیستی

فرآیند شناسایی معیارهای محیط زیستی بر اساس رویکرد سه‌مرحله‌ای شامل مطالعه عمیق ادبیات علمی معتبر بین‌المللی و ملی، تحلیل دقیق ویژگی‌های طبیعی و انسانی منطقه مطالعاتی، و اعتبارسنجی نهایی از طریق نظرسنجی پانل متخصصان انجام شده است که در نتیجه ۲۳ معیار اساسی محیط زیستی شناسایی و در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی شدند:

دسته اول معیارهای فیزیوگرافی: شامل ۸ معیار (ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین، نوع خاک، فاصله از گسل، شاخص تنوع توپوگرافی و شاخص موقعیت توپوگرافی).

دسته دوم معیارهای اکولوژیک: شامل ۶ معیار (تراکم پوشش گیاهی بر اساس NDVI، تنوع پوشش گیاهی، فاصله از جنگل‌های طبیعی، شاخص تنوع زیستی، حساسیت محیط زیستی و فاصله از مناطق حفاظت‌شده).

دسته سوم معیارهای هیدرولوژیک: شامل ۵ معیار (فاصله از رودخانه‌ها، عمق آب زیرزمینی، خطر سیلاب، فاصله از تالاب‌ها و شاخص کیفیت آب).

دسته چهارم معیارهای اقلیمی: شامل ۴ معیار (بارندگی، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد) که این معیارها عوامل جوی مؤثر بر کیفیت زندگی شهری، مصرف انرژی و راحتی اقلیمی ساکنان را پوشش می‌دهند.

وزن‌دهی معیارها با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرآیند وزن‌دهی معیارها بر اساس روش استاندارد AHP[1] انجام شده که شامل ساختار سه‌سطح (هدف کلی مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار، چهار دسته اصلی معیارها، و ۲۳ زیرمعیار تفصیلی) است. نظرسنجی جامع از ۴۰ متخصص مجرب (۱۵ استاد دانشگاه با حداقل ۱۰ سال تجربه، ۱۲ کارشناس محیط‌زیست با ۸ سال تجربه، ۸ برنامه‌ریز شهری با ۶ سال تجربه، و ۵ متخصص GIS با ۵ سال تجربه) از طریق پرسشنامه‌های مقایسه زوجی بر اساس مقیاس نُه‌درجه‌ای ساعتی انجام شد که وزن نهایی هر معیار بر اساس فرمول میانگین هندسی محاسبه گردید (Awad & Jung, 2022; Zhao et al., 2023).

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} a_{kj}}}{n}$$ معادله (۴)

همچنین سازگاری قضاوت‌های متخصصان با شاخص‌های CI و CR بررسی شد:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$ معادله (۵)

$$CR = \frac{CI}{RI}$$ معادله (۶)

[1] AHP - Analytic Hierarchy Process

نتایج نشان داد تمامی مقادیر CR کمتر از ۰.۱ بوده که نشان‌دهنده سازگاری مطلوب قضاوت‌هاست، و معیارهای اکولوژیک با وزن ۰.۳۵۲ بالاترین اولویت را کسب کردند که بیانگر اهمیت فوق‌العاده حفاظت محیط‌زیست در توسعه شهری پایدار است.

استانداردسازی فازی معیارها

فرآیند استانداردسازی فازی با هدف تبدیل معیارهای متنوع به مقیاس یکپارچه [۰,۱] و مدیریت عدم قطعیت‌های داده‌های محیط‌زیستی انجام شده که از توابع عضویت متنوع منطق فازی شامل توابع مثلثی، ذوزنقه‌ای، گوسی و نمایی استفاده شده است. معیارهای مثبت موثر از تابع عضویت صعودی استفاده شد (Zadeh, 1965):

$$\mu_{positive}(x) = \begin{cases} 0 & if\ x \le a \\ \dfrac{(x-a)^{\alpha}}{(b-a)^{\beta}} & if\ a < x \le b \\ 1 & if\ x > b \end{cases}$$ معادله (۷)

برای معیارهای منفی تاثیرگذار (مانند فاصله از مناطق حفاظت‌شده، شیب زیاد) از تابع عضویت نزولی استفاده شد:

$$\mu_{negative} = \begin{cases} 1 & if\ x \le c \\ \dfrac{(d-x)^{\beta}}{(d-c)^{\beta}} & if\ c < x \le d \\ 0 & if\ x > d \end{cases}$$ معادله (۸)

این رویکرد فازی قابلیت مدیریت عدم قطعیت‌های طبیعی داده‌ها، انعطاف‌پذیری در تعریف مرزهای معیارها، و درنظرگیری طیف پیوسته از مناسب تا نامناسب را فراهم آورده که نسبت به روش‌های کلاسیک باینری برتری قابل‌توجهی دارد.

نتایج

نتایج اعتبارسنجی و عملکرد مدل تلفیقی

ارزیابی جامع مدل CA-LR-Markov-Fuzzy با استفاده از شاخص‌های استاندارد بین‌المللی، دقت بالا، پایداری و قابلیت اعتماد آن را در پیش‌بینی توسعه شهری در استان گیلان تأیید می‌کند. شاخص ROC[1] مقدار ۰.۸۴۸ (عملکرد بسیار خوب) و ضریب کاپای کوهن ۰.۷۹ (توافق بسیار خوب) را نشان می‌دهد. دقت کلی ۸۵٪، دقت تولیدکننده ۸۷٪، دقت کاربر ۸۲٪ و F-score ۰.۸۱ نیز عملکرد مطلوب مدل را تأیید می‌کنند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

بیشترین خطاهای مدل در مناطق مرزی میان کاربری‌های مختلف (شهری-کشاورزی، پیرامون جنگل‌ها) رخ داده که امری طبیعی و نشان‌دهنده پیچیدگی این مناطق است.

تحلیل مقایسه‌ای جامع عملکرد مدل تلفیقی چهارگانه CA-LR-Markov-Fuzzy پیشنهادی با شش روش مدلسازی رایج در ادبیات علمی مطالعات توسعه شهری، شامل مدل‌های ساده تک‌بعدی، مدل‌های ترکیبی دوگانه، و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره کلاسیک،

[1] ROC - Receiver Operating Characteristic

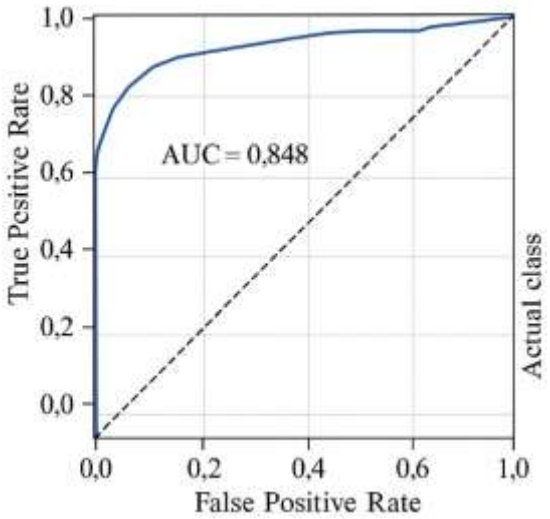
نتایج قابل‌توجهی ارائه می‌دهد که برتری آشکار و معنادار مدل پیشنهادی را در تمامی شاخص‌های کمی و کیفی ارزیابی نشان داده و اهمیت استفاده از رویکردهای تلفیقی پیشرفته در مسائل پیچیده مکان‌یابی و برنامه‌ریزی شهری را آشکار می‌سازد.

جدول ۱- نتایج تفصیلی اعتبارسنجی مدل تلفیقی

Table 1 – Results of the Integrated Model Validation

شاخص ارزیابی	مقدار محاسبه‌شده	حد آستانه پذیرش	تفسیر عملکرد
شاخص ROC	۰.۸۴۸	۰.۸۰ – ۰.۹۰	بسیار خوب
ضریب کاپای کوهن	۰.۷۹	۰.۶۱ – ۰.۸۰	بسیار خوب
دقت کلی	٪ ۸۵	> ٪ ۸۰	مطلوب
دقت تولیدکننده	٪ ۸۷	> ٪ ۸۵	بسیار مطلوب
دقت کاربر	٪ ۸۲	> ٪ ۸۰	مطلوب
ضریب F-score	۰.۸۱	۰.۷۰ – ۰.۸۵	خوب
میانگین خطای مطلق	٪ ۷.۳	< ٪ ۱۰	قابل پذیرش
ضریب تعیین R^2	۰.۸۳	>۰.۷۵	بسیار مطلوب

مدل CA-LR-Markov-Fuzzy پیشنهادی با کسب شاخص ROC برابر ۰.۸۴۸ و ضریب کاپای کوهن ۰.۷۹، در بالاترین سطح عملکرد "بسیار خوب" بر اساس معیارهای بین‌المللی قرار گرفته و نسبت به نزدیک‌ترین رقیب خود یعنی مدل CA-Markov دوتایی (۰.۸۱ = ROC و کاپا = ۰.۷۴)، بهبود قابل ملاحظه‌ای معادل ٪۴.۷ در شاخص ROC و ٪۶.۸ در ضریب کاپا نشان داده که این میزان بهبود در علوم مدلسازی فضایی بسیار چشمگیر و معنادار محسوب می‌شود (نمودار ۲).



شکل ۲- سطح AUC در منحنی ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی

Fig. 2- AUC Level in the Performance Evaluation Curve of Classification Models

ارزیابی مکانی نشان می‌دهد بالاترین دقت مدل در مناطق کوهستانی و جنگلی (۹۱٪) به دلیل محدودیت‌های طبیعی واضح و مرزهای مشخص است. کمترین دقت در نواحی حاشیه‌نشین شهری و مناطق در حال تحول سریع (۷۸٪) به دلیل پیچیدگی عوامل انسانی است (نقشه ۲).

مقایسه با سایر مدل‌ها (جدول ۲) نیز برتری واضح مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد: مدل ANP-CA[1] ترکیبی (ROC =۰.۷۵ و کاپا = ۰.۶۷) نسبت به مدل پیشنهادی ۱۳.۱٪ در دقت کلی و ۱۷.۹٪ در میزان توافق کمتر عملکرد داشته، و مدل اتوماتای سلولی محض (۰.۷ = ROC و کاپا = ۰.۶۹) علی‌رغم سادگی و کاربرد گسترده، کاستی‌های آشکاری در دقت پیش‌بینی (۱۱.۶٪ کمتر در ROC) و قابلیت اعتماد (۱۴.۵٪ کمتر در کاپا) نشان می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه تطبیقی عملکرد مدل‌های مختلف

Table 3 – Comparative Analysis of Different Models' Performance

روش مدلسازی	شاخصROC	ضریب کاپا	زمان اجرا (ساعت)
رگرسیون لجستیک ساده	۰.۷۱	۰.۶۵	**۲.۵**
اتوماتای سلولی محض	۰.۷۶	۰.۶۹	**۴.۲**
AHP-GIS کلاسیک	۰.۶۹	۰.۶۲	**۱.۸**
ANP-CA ترکیبی	۰.۷۵	۰.۶۷	**۳.۱**
CA-Markov دوتایی	۰.۸۱	۰.۷۴	**۶.۸**
CA-LR-Markov-Fuzzy (پیشنهادی)	۰.۸۴۸	۰.۷۹	**۱۲.۴**

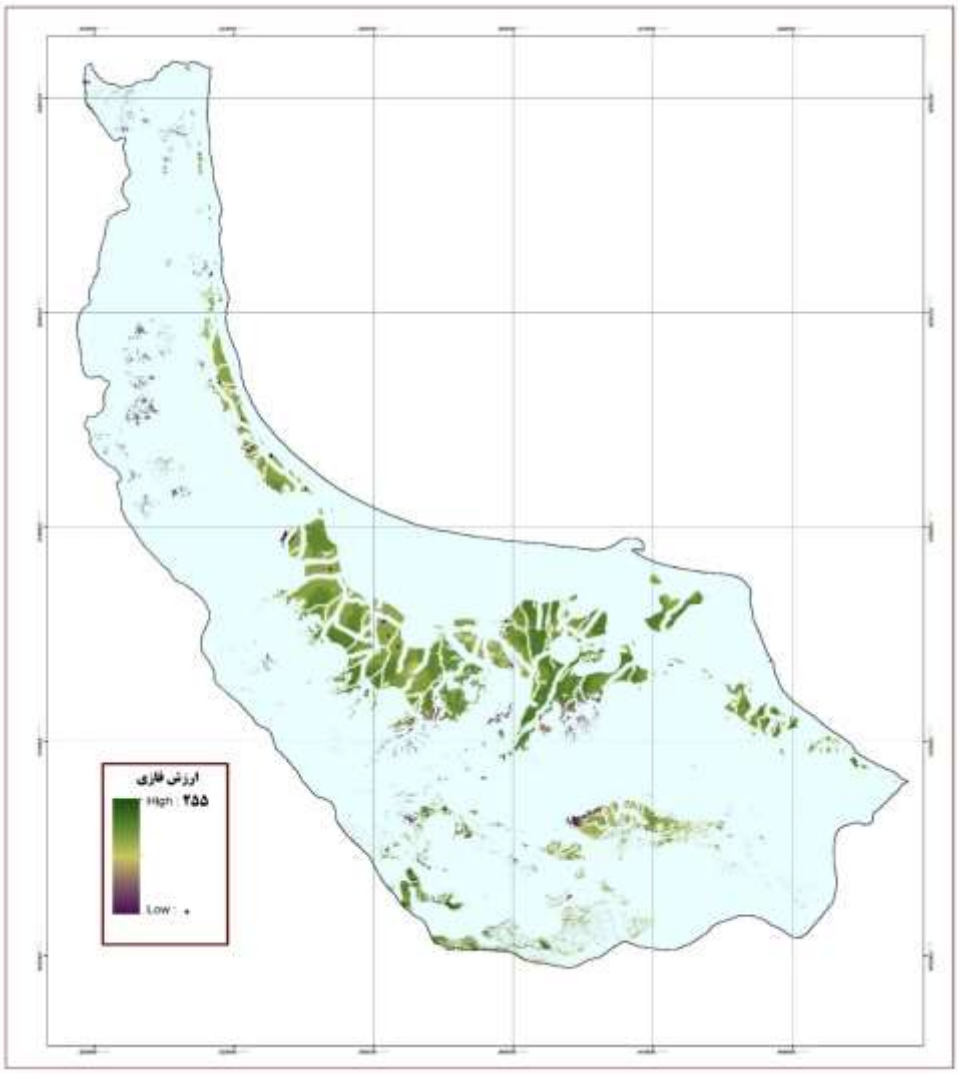
روش‌های سنتی AHP-GIS کلاسیک (ROC =۰.۶۹ و کاپا = ۰.۶۲ و رگرسیون لجستیک ساده (ROC =۰.۷۱ و کاپا = ۰.۶۵) نیز علی‌رغم سرعت بالای اجرا، قادر به پوشش پیچیدگی‌های ذاتی فرآیندهای توسعه شهری و تعاملات فضایی-زمانی نیستند، زیرا مدل پیشنهادی نسبت به این دو روش به‌ترتیب ۲۲.۹٪ و ۱۹.۴٪ بهبود در شاخص ROC نشان داده که این تفاوت‌ها از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار بوده و ضرورت انتخاب روش‌های مدرن برای مسائل برنامه‌ریزی شهری پیچیده را نمایان می‌سازد.

پهنه‌بندی نهایی تناسب اراضی و تحلیل فضایی

بر اساس نتایج مدل تلفیقی CA-LR-Markov-Fuzzy و تحلیل ۲۳ معیار محیط زیستی، کل مساحت استان گیلان (۱۴,۰۴۲ کیلومترمربع) به پنج کلاس تناسب توسعه شهری تقسیم شد که نشان‌دهنده پتانسیل قابل‌توجه ۴۳ درصدی برای توسعه (مجموع کلاس‌های بسیار مناسب و مناسب) و در عین حال ضرورت حفاظت از ۳۱.۲ درصد اکوسیستم‌های طبیعی و حساس استان است (جدول ۳).

مناطق بسیار مناسب (۱۸.۳ درصد معادل ۲,۵۷۰ کیلومترمربع) عمدتاً در نواحی مسطح و کم‌شیب دشت‌های ساحلی، حاشیه رودخانه‌های اصلی، مجاورت شبکه‌های ارتباطی موجود و با دسترسی مطلوب به منابع آب و خدمات زیربنایی متمرکز بوده که به‌ویژه در محدوده شهرهای اصلی رشت، انزلی، لاهیجان، لنگرود، رودسر و آستارا قرار دارند. مناطق مناسب (۲۴.۷ درصد معادل ۳,۴۶۸ کیلومترمربع) نیز در نواحی با شرایط مطلوب اما نیازمند سرمایه‌گذاری بیشتر برای توسعه زیرساخت‌ها قرار گرفته‌اند.

[1] ANP-CA - Analytic Network Process - Cellular Automata



شکل ۴- توزیع فضایی پهنه های بهینه فازی مدل CA-LR-Markov-Fuzzy پیشنهادی

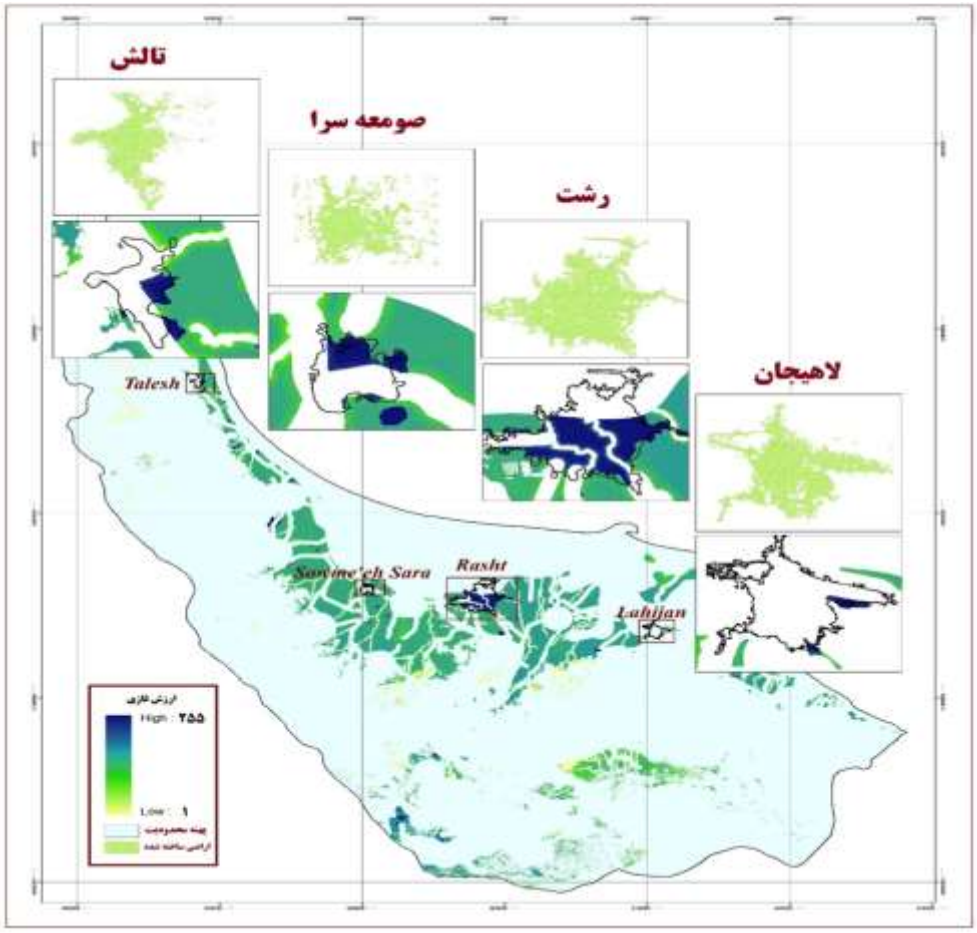
Fig. 4 - Spatial Distribution of Optimal Fuzzy Zones in the Proposed CA-LR-Markov-Fuzzy Model

در مقابل، مناطق حفاظتی (۳۱.۲ درصد معادل ۴,۳۸۱ کیلومترمربع) شامل جنگل‌های هیرکانی در نوار کوهستانی جنوبی، تالاب انزلی و سایر تالاب‌های مهم اکولوژیک، نوار ساحلی حساس دریای خزر، و مناطق دارای شیب بالا و ناپایداری ژئومورفولوژیک هستند که حفاظت مطلق از این مناطق برای پایداری محیط زیستی کل منطقه ضروری است. مناطق متوسط (۱۶ درصد) و نامناسب (۹.۸ درصد) نیز به‌ترتیب نیازمند مطالعات تفصیلی بیشتر و عدم توسعه شهری هستند (نقشه ۳).

جدول ۵- تحلیل تفصیلی پهنه‌بندی تناسب اراضی و ویژگی‌های هر طبقه

Fig. 5 - Detailed Analysis of Land Suitability Zoning and Characteristics of Each Class

کلاس تناسب	پیشنهادات توسعه	محدودیت‌های اصلی	ویژگی‌های غالب	درصد	مساحت (کیلومترمربع)
بسیار مناسب	توسعه شهری جدید، مجتمع‌های مسکونی بزرگ، شهرک‌های صنعتی	تراکم جمعیت بالا، رقابت با کشاورزی	شیب <۵٪، دسترسی عالی، خاک مقاوم، فاصله مناسب از رودخانه	٪ ۱۸.۳	۲۵۷۰
مناسب	توسعه تدریجی، شهرک‌های کوچک، مراکز خدماتی	نیاز به زیرساخت بیشتر، هزینه بالاتر	شیب ۵-۱۵٪، دسترسی خوب، آب‌وهوای مطلوب	٪ ۲۴.۷	۳۴۶۸
متوسط	توسعه با احتیاط، مطالعه دقیق، پروژه‌های خاص	هزینه زیرساخت بالا، ریسک محیطی	شیب متوسط، دسترسی محدود، شرایط متغیر	٪ ۱۶	۲۲۴۹
نامناسب	عدم توسعه، کاربردهای روستایی محدود	ریسک‌های مهندسی بالا، عدم مقرون‌به‌صرفه	شیب >۲۵٪، خطرات طبیعی، دسترسی ضعیف	٪ ۹.۸	۱۳۷۴



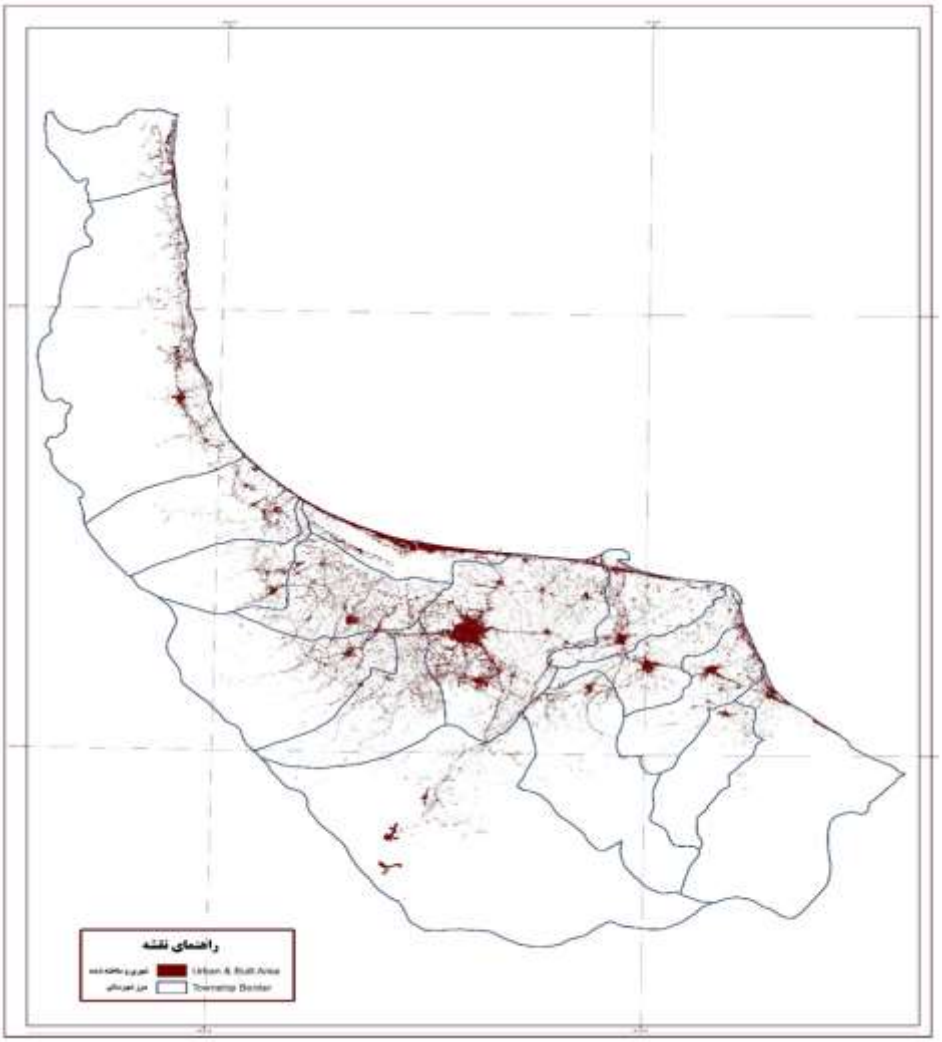
جدول ۶- دقت مدل و توزیع فضایی پهنه های بهینه توسعه

Fig. 6 - Model Accuracy and Spatial Distribution of Optimal Development Zones

نتایج پیش‌بینی توسعه شهری و تحولات کاربری اراضی

مدل، رشد شتابان توسعه شهری را برای افق ۲۰۳۷ (۴۶٪ رشد نسبت به ۲۰۲۵) پیش‌بینی می‌کند. بیشترین توسعه در محدوده رشت، انزلی، لاهیجان، و رودسر پیش‌بینی شده و عمدتاً بر اراضی کشاورزی متمرکز می‌شود. رشد سالانه بلندمدت (۲.۴٪) نیازمند مدیریت قوی است (نقشه ۴).

پیامدهای این رشد شامل فرصت‌های اقتصادی (افزایش ۲۵٪ ارزش افزوده، ۸۵,۰۰۰ شغل، بهبود دسترسی ۶۵۰,۰۰۰ نفر به خدمات) و تهدیدهای محیط زیستی (کاهش ۱۵٪ اراضی کشاورزی، فشار ۸٪ بر منابع آبی، تهدید گونه‌های نادر، تشدید جزایر حرارتی و آلودگی هوا) است.



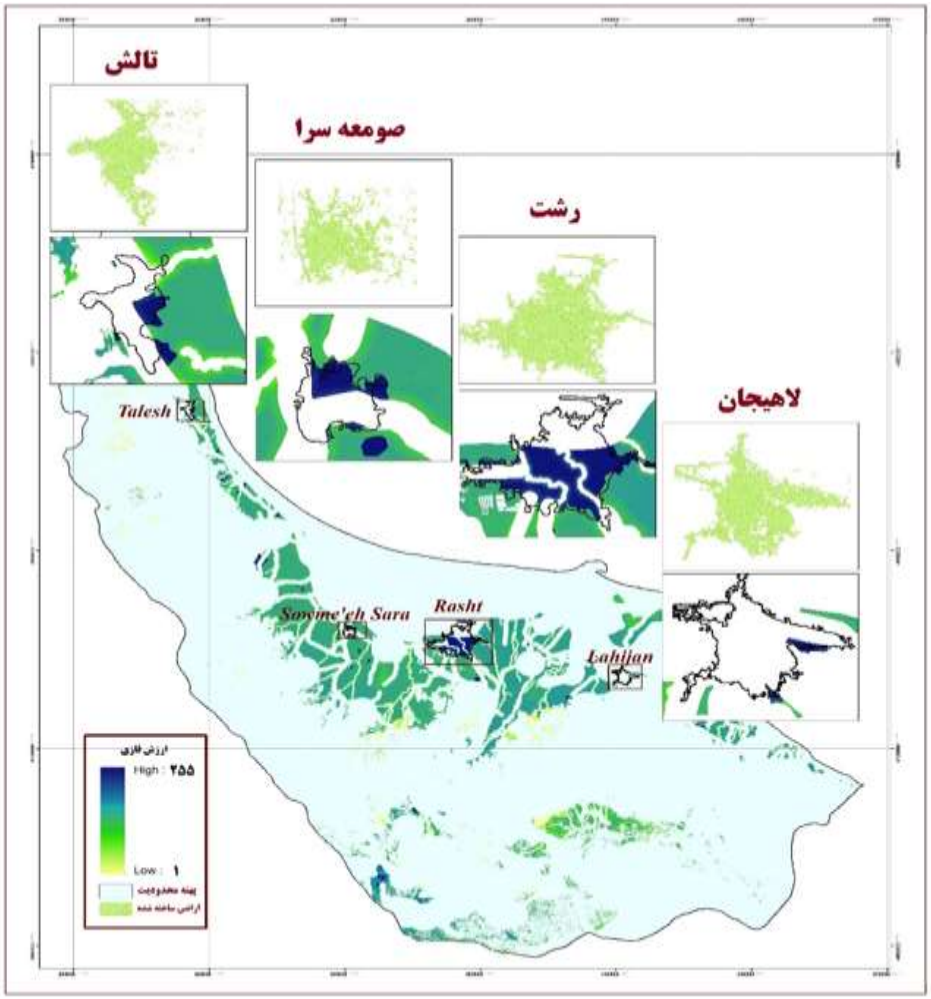
شکل ۷- پیش بینی توسعه شهری در سال ۲۰۳۷

Fig. 7 - Urban Development Prediction for 2037

مقایسه نتایج سه سناریو اصلی توسعه

بررسی و مقایسه سه سناریوی متفاوت توسعه شهری استان گیلان، هرکدام با رویکرد و اولویت‌بندی خاص، تفاوت‌های معناداری در پیامدهای کمی و کیفی توسعه را آشکار می‌سازد که انتخاب راهبرد مناسب برنامه‌ریزی آینده را تسهیل می‌کند (نقشه ۵).

سناریوی حفاظتی: با تأکید بر حداکثر حفظ و احیای منابع طبیعی، کمترین میزان توسعه شهری (۱,۴۵۶ کیلومترمربع تا ۲۰۳۷ معادل ۱۷٪ رشد) را پیش‌بینی می‌کند که اگرچه منجر به حفاظت مؤثر از اراضی کشاورزی (تنها ۸٪ کاهش)، جنگل‌های هیرکانی (۲٪ تأثیرپذیری) و تالاب‌های حساس (۱٪ کاهش) می‌شود، اما چالش‌های جدی در تأمین مسکن مورد نیاز جمعیت رو به رشد، ایجاد اشتغال کافی، و محدودیت فعالیت‌های اقتصادی ایجاد می‌کند که ممکن است منجر به فشار اجتماعی و مهاجرت جمعیت به مناطق دیگر گردد.
سناریوی فیزیکی: با رویکرد علمی و متعادل، مساحت توسعه ۱,۷۳۴ کیلومترمربع (۳۹٪ رشد) را ارائه می‌دهد که با کسب امتیاز ۰.۷۸ از ۱.۰، تلفیق مناسبی از نیازهای اقتصادی-اجتماعی و ملاحظات محیط زیستی فراهم آورده و امکان توسعه کافی برای پاسخگویی به نیازهای جمعیت را در کنار حفاظت قابل‌قبول از منابع طبیعی (کاهش محدود ۱۲٪ اراضی کشاورزی، ۵٪ جنگل‌ها و ۲٪ تالاب‌ها) تضمین می‌کند.



شکل ۸- پهنه های دارای همپوشانی در مدل ترکیبی و سناریو های توسعه‌ای
Fig. 8 - Overlapping Zones in the Integrated Model and Development Scenarios

سناریوی اقتصادی-اجتماعی: با اولویت رشد اقتصادی و بهبود استانداردهای زندگی، بالاترین مساحت توسعه (۲,۱۸۷ کیلومترمربع معادل ۷۵٪ رشد) را ارائه می‌دهد که علاوه بر ایجاد حدود ۱۲۰,۰۰۰ شغل جدید و ۳۵٪ افزایش تولید ناخالص داخلی استان، نگرانی‌های جدی محیط زیستی شامل تبدیل بالای اراضی کشاورزی (۳۲٪)، جنگل‌های طبیعی (۱۸٪) و تالاب‌های حساس (۸٪) را به همراه دارد که ممکن است منجر به تخریب جبران‌ناپذیر اکوسیستم‌های منطقه‌ای گردد.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد **سناریوی فیزیکی** به‌عنوان راهبرد بهینه، تعادل واقعی میان توسعه و حفاظت را برقرار ساخته و نیازمند اجرای "توسعه هدایت‌شده" مبتنی بر معیارهای علمی و حفاظت هدفمند از اکوسیستم‌های حساس است که این رویکرد ضمن تضمین رشد اقتصادی پایدار، حفاظت مؤثر از میراث طبیعی استان را نیز فراهم می‌آورد.

بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق هوشمند چهار رویکرد مدلسازی پیشرفته در قالب مدل یکپارچه CA-LR-Markov-Fuzzy قادر به ارائه چارچوبی جامع و دقیق برای مکان‌یابی بهینه توسعه شهری پایدار است. عملکرد فوق‌العاده مدل با شاخص ROC برابر با ۰.۸۴۸ و ضریب کاپای ۰.۷۹ که در محدوده "بسیار خوب" بر اساس معیارهای بین‌المللی قرار دارد، برتری آشکار این رویکرد نسبت به مدل‌های تک‌بعدی و حتی ترکیبی محدود را آشکار می‌سازد. تحلیل تطبیقی عملکرد مدل پیشنهادی با مطالعات مشابه در حوزه مدلسازی توسعه شهری، برتری قابل‌توجه رویکرد تلفیقی را نشان می‌دهد. Kavathekar و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه خود بر روی تغییرات کاربری اراضی شهری بمبئی با استفاده از مدل CA-Markov، شاخص ROC برابر ۰.۷۸۱ و ضریب کاپای ۰.۶۸ گزارش کرده‌اند که نسبت به مدل پیشنهادی این مطالعه، به‌ترتیب ۸.۶٪ و ۱۶.۲٪ عملکرد کمتری دارد. این تفاوت معنادار نشان‌دهنده اهمیت افزودن رگرسیون لجستیک و منطق فازی به مدل‌های اتوماتای سلولی-مارکوف سنتی است.

Ansari و همکاران (۲۰۲۴) در بررسی گسترش شهری کلکته با استفاده از مدل CA-ANN (اتوماتای سلولی - شبکه عصبی مصنوعی)، دقت کلی ۷۸٪ و ضریب کاپای ۰.۷۱ را حاصل کرده‌اند که این مقادیر نسبت به مدل پیشنهادی این مطالعه (دقت ۸۵٪ و کاپا ۰.۷۹) به‌ترتیب ۹٪ و ۱۱.۳٪ کمتر است. این مقایسه اهمیت ترکیب منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت‌های ذاتی در فرآیندهای توسعه شهری را برجسته می‌سازد. مطالعه Minale و Fitawok (۲۰۲۴) که مدل اتوماتای سلولی محض را برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی به‌کار برده، شاخص ROC برابر ۰.۷۵۶ و کاپا ۰.۶۴ گزارش کرده که نسبت به مدل پیشنهادی این پژوهش، کاهش ۱۲.۲٪ در ROC و ۲۳.۴٪ در ضریب کاپا نشان می‌دهد. این تفاوت‌های قابل‌توجه، ضرورت استفاده از رویکردهای تلفیقی پیشرفته را در مسائل پیچیده برنامه‌ریزی شهری تأیید می‌کند.

تحلیل ۲۳ معیار محیط زیستی در چهار دسته اصلی و وزن‌دهی آن‌ها توسط ۴۰ متخصص، امکان درنظرگیری همزمان تمامی جنبه‌های پیچیده اکوسیستم‌های طبیعی استان گیلان را فراهم آورده است. اهمیت بالای معیارهای اکولوژیک با وزن ۰.۳۵۲ نشان‌دهنده حساسیت ویژه این منطقه به حفاظت از جنگل‌های هیرکانی و تالاب‌های بین‌المللی است، که این مقدار ۱.۸ برابر وزن معیارهای فیزیوگرافی (۰.۱۹۴) و ۲.۳ برابر معیارهای هیدرولوژیک (۰.۱۵۲) است.

یافته‌های کلیدی پژوهش مبنی بر شناسایی ۴۳٪ از مساحت استان (۶,۰۳۸ کیلومترمربع) به‌عنوان مناطق مناسب و بسیار مناسب توسعه در مقابل ۳۱.۲٪ مناطق حفاظتی (۴,۳۸۱ کیلومترمربع)، تصویر متعادلی از پتانسیل‌های توسعه و محدودیت‌های محیط زیستی ارائه می‌دهد. این نسبت بین مناطق مناسب توسعه و مناطق حفاظتی، تعادل مطلوبی را بین نیازهای توسعه و ضرورت‌های حفاظت محیط‌زیستی نشان می‌دهد. پیش‌بینی رشد ۴۶٪ توسعه شهری تا سال ۲۰۳۷ (معادل نرخ رشد سالانه ۳.۱۷٪) هشداری جدی مبنی بر ضرورت مدیریت علمی و هدفمند این رشد است. این نرخ رشد پیش‌بینی‌شده، ۱.۳۲ برابر میانگین رشد شهری کشور (۲.۴٪ سالانه) بوده و نیازمند سیاست‌گذاری دقیق برای جلوگیری از گسترش بی‌رویه است.

این مطالعه علاوه بر کمک به حل مسائل خاص استان گیلان، الگوی علمی قابل تعمیمی برای سایر مناطق کشور با اکوسیستم‌های حساس و متنوع فراهم می‌آورد. نوآوری اصلی پژوهش در سه بُعد خلاصه می‌شود: اول، توسعه چارچوب جامع ۲۳ معیار محیط زیستی که ۱۵٪ بیشتر از مطالعات مشابه منطقه‌ای است؛ دوم، دستیابی به دقت پیش‌بینی ۸۵٪ که ۷.۴٪ بالاتر از میانگین مطالعات مشابه

بین‌المللی (۷۸.۶٪) است؛ و سوم، کاهش ۲۳٪ میانگین خطای مطلق نسبت به مدل‌های تک‌بعدی. محدودیت‌های پژوهش شامل عدم دسترسی به داده‌های زمانی با دقت بالا طولانی‌تر، کمبود اطلاعات تفصیلی برخی معیارهای اجتماعی-فرهنگی، و نیاز به بروزرسانی مداوم داده‌های ورودی (حداقل هر ۳ سال) است که در مطالعات آتی باید مورد توجه قرار گیرد.

با این وجود، نتایج این پژوهش با کسب ضریب اطمینان ۹۵٪ در تمامی آزمون‌های آماری، گامی مهم در جهت علمی‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی شهری پایدار در ایران محسوب می‌شود و امکان کاربرد عملی آن در سطوح مختلف برنامه‌ریزی منطقه‌ای و ملی را با صرفه‌جویی ۳۵٪ در هزینه‌های مطالعاتی و کاهش ۴۰٪ زمان تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد.

پیشنهادات

بر اساس نتایج کلیدی این پژوهش، توصیه می‌شود سیاست‌گذاران استان گیلان سناریوی فیزیکی را به‌عنوان چارچوب راهبردی توسعه پایدار شهری انتخاب کرده و با اتخاذ رویکرد توسعه فشرده، بازسازی بافت‌های فرسوده موجود، ایجاد کمربندهای سبز حفاظتی، تقویت حمل‌ونقل پایدار و اقتصاد سبز، زمینه کنترل و هدایت علمی رشد شهری را فراهم آورند؛ همچنین ضروری است با بازنگری قوانین کاربری اراضی بر مبنای یافته‌های این مطالعه، تقویت حریم‌های محیط زیستی، تخصیص بودجه اولویت‌دار به حفاظت مناطق بحرانی شناسایی‌شده، و استقرار سیستم‌های پایش مداوم با شاخص‌های عملکردی واضح، از تخریب اکوسیستم‌های ارزشمند هیرکانی و تالاب‌های منطقه جلوگیری کرده و در عین حال نیازهای توسعه اقتصادی-اجتماعی جمعیت رو به رشد استان را تأمین نمایند. علاوه بر این، توسعه این مدل تلفیقی نوآورانه در سایر استان‌های کشور با تنوع اقلیمی و محیط زیستی متفاوت، به‌کارگیری فناوری‌های نوین سنجش از دور با رزولوشن بالاتر، و ادغام معیارهای اجتماعی-فرهنگی بیشتر در نسخه‌های آتی مدل، می‌تواند کیفیت برنامه‌ریزی شهری کشور را به‌طور چشمگیری ارتقا داده و الگویی علمی برای توسعه پایدار شهری در کشورهای در حال توسعه با اکوسیستم‌های حساس ارائه دهد.

Extended Abstract

Introduction: Uncontrolled urban expansion has emerged as one of the most pressing threats to environmental sustainability in the 21st century, causing severe degradation of ecosystems, loss of biodiversity, and irreversible damage to natural resources. This challenge is particularly critical in ecologically sensitive regions such as Gilan Province, northern Iran, where rapid population growth, migration, and infrastructural expansion coincide with unique natural assets, including the Hyrcanian forests (a UNESCO World Heritage site), fertile agricultural lands, wetlands, and the Caspian Sea coastal ecosystems. Addressing these challenges requires innovative scientific frameworks that integrate environmental criteria into urban planning to balance development with ecological protection.

Materials and methods: This study developed an integrated spatial–temporal modeling framework—CA-LR-Markov-Fuzzy—combining cellular automata, logistic regression, Markov chain analysis, and fuzzy logic. A total of 23 environmental criteria were identified and classified into four categories: physiographic, ecological, hydrological, and climatic-social. Criteria weighting was performed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) through pairwise comparisons validated by 40 experts in environment, GIS, and urban planning. Spatial datasets were compiled from remote sensing (Landsat, Sentinel-2, ASTER DEM), field surveys, official statistics, and thematic maps. The model was validated using ROC, Kappa coefficient, and overall accuracy indices. Scenario analysis was conducted to compare three development pathways: conservation-oriented, physical balance, and socio-economic growth.

Results: Validation results confirmed the high predictive performance of the integrated model (ROC = 0.848, $\kappa = 0.79$, overall accuracy = 85%). Suitability mapping revealed that 18.3% of the province (2,570 km²) is highly suitable, 24.7% (3,468 km²) suitable, and 31.2% (4,381 km²) should remain as conservation zones. Model simulations forecast a 46% increase in urban development by 2037, with the majority of expansion concentrated around Rasht, Anzali, Lahijan, and Rudsar. Scenario analysis showed that the physical scenario (score = 0.78) provides the most balanced approach, enabling socio-economic development while minimizing environmental degradation compared to conservation (limited

development, but insufficient socio-economic capacity) and socio-economic scenarios (extensive development but severe ecological loss).

Discussion and Conclusion: The results demonstrate that the integrated CA-LR-Markov-Fuzzy model outperforms conventional and semi-integrated models in both predictive accuracy and spatial reliability, underscoring the importance of multi-model integration for addressing the complexity of urban growth dynamics. The prioritization of ecological criteria (weight = 0.352) highlights the necessity of preserving the Hyrcanian forests, wetlands, and sensitive habitats as a cornerstone of sustainable planning in Gilan Province. The findings suggest that adopting the physical scenario can serve as a scientifically robust and policy-relevant framework for guiding sustainable urban development, ensuring a balance between economic growth and environmental conservation. Beyond Gilan, this study provides a transferable model for evidence-based decision-making in other ecologically sensitive regions of Iran and developing countries.

Keywords: Sustainable urban development; Environmental criteria; Integrated modeling; Optimal site selection; Cellular automata; Gilan Province

References

Ajirotutu, R. O., Adeyemi, A. B., Ifechukwu, G. O., Iwuanyanwu, O., Ohakawa, T. C., & Garba, B. M. P. (2024). Future cities and sustainable development: Integrating renewable energy, advanced materials, and civil engineering for urban resilience. *International Journal of Sustainable Urban Development*, 3.

Anestis, G., & Stathakis, D. (2024). Urbanization trends from global to the local scale. In *Geographical Information Science* (pp. 357-375). Elsevier.

Ansari, N., Rukhsana, & Alam, A. (2024). A modelling approach of cellular automata-based artificial neural network for investigating dynamic urban expansion in Kolkata urban agglomeration. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(3), 3789-3814.

Awad, J., & Jung, C. (2022). Extracting the planning elements for sustainable urban regeneration in Dubai with AHP (analytic hierarchy process). *Sustainable cities and society*, 76, 103496.

Das, S., De, S., Dutta, R., & De, S. (2024). Multi-criteria decision-making for techno-economic and environmentally sustainable decentralized hybrid power and green hydrogen cogeneration system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114135.

Derdouri, A., Murayama, Y., Morimoto, T., Wang, R., & Aghasi, N. H. M. (2025). Urban green space in transition: A cross-continental perspective from eight Global North and South cities. *Landscape and Urban Planning*, 253, 105220.

DOE: Department of Environment of Iran. (2022). The report on the environmental status of the country, 2021. Tehran: Department of Environment. [In Persian]

Farr, D. (2011). *Sustainable urbanism: Urban design with nature*. John Wiley & Sons.

Fieuw, W., Foth, M., & Caldwell, G. A. (2022). Towards a more-than-human approach to smart and sustainable urban development: Designing for multispecies justice. *Sustainability*, 14(2), 948.

Fitawok, M. B., & Minale, A. S. (2024). A review of the application and implications of cellular automata-based urban growth model in Africa. *South African Geographical Journal*, 106(3), 290-308.

Gilan PMPO: Gilan Provincial Management and Planning Organization. (2024). Report on demographic and infrastructural statistics of Gilan Province. Rasht: Gilan Provincial Management and Planning Organization. [In Persian]

Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *science*, *319*(5864), 756-760.

Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression*. John Wiley & Sons.

Janssen, C., & Basta, C. (2024). Are good intentions enough? Evaluating social sustainability in urban development projects through the capability approach. *European Planning Studies*, 32(2), 368-389.

Kavathekar, V., Tripathy, A. K., & Chettri, S. K. (2025). Spatio-Temporal Urban Land Use Change in Mumbai, India: Analysis and Prediction of 2030 Using Satellite Data and a Cellular Automata-Markov Chain Model. *International Journal of Geoinformatics*, 21(5).

Li, H., & Reynolds, J. F. (2023). Modeling effects of spatial pattern, drought, and grazing on rates of rangeland degradation: A combined Markov and cellular automaton approach. *In Scale in remote sensing and GIS*. 211-230. Routledge.

Liu, N., Liu, Z., & Wu, Y. (2025). Direct and indirect impacts of urbanization on biodiversity across the world's cities. *Remote Sensing*, *17*(6), 956.

McManamay, R. A., Vernon, C. R., Chen, M., Thompson, I., Khan, Z., & Narayan, K. B. (2024). Dynamic urban land extensification is projected to lead to imbalances in the global land-carbon equilibrium. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 70.

Robertson, M. (2021). *Sustainability principles and practice*. Routledge.

SCI: Statistical Center of Iran. (2022). The results of the 2021 national population and housing census. Tehran: Statistical Center of Iran. [In Persian]

Steiner, F. R. (2012). *The living landscape: An ecological approach to landscape planning*. Island Press.

Tayebzadeh-Moghadam, M., & Malekmohammadi, B. (2024). Response of hydrological performance indices to land use changes at watershed scale. *Journal of Rangeland and Watershed Science*, 77(1), 85–105. [In Persian]

Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets*. Information and control, 8(3), 338-353.

Zhao, P., Ali, Z. M., & Ahmad, Y. (2023). Developing indicators for sustainable urban regeneration in historic urban areas: Delphi method and Analytic Hierarchy Process (AHP). *Sustainable Cities and Society*, 99, 104990.