



Evaluation and Analysis of the Degree of Ecological Security in the Integrated Spatial Framework of the Caspian Plain with an Emphasis on Urban Areas

Zahra Beyranvand¹ | Lobat Zebardast² | Mohammad Javad Amiri³ | Mahmoud Behrouzi⁴

1. Department of Environment, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.
2. Corresponding Author, Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: lzebardast@ut.ac.ir
3. Department of Disaster Engineering, Environmental Education and Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.
4. Department of Environmental Hazards, Marine Science Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran.

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 24 Jul 2025

Received in revised form:
13 Oct 2025

Accepted: 24 Oct 2025

Available online: 21 Mar 2026

Keywords:

Ecological security,
Caspian plain,
Urban sprawl,
Environmental factors,
Forest areas.

Ecological security—defined as maintaining the health, stability, and integrity of ecosystems—plays a critical role in achieving sustainable development. In the Caspian Plain, one of Iran’s key biodiversity hotspots, climate change and intensified human activities have increasingly threatened ecological stability. This study examined changes in ecological security across the Sari–Qaem Shahr–Babol–Amol urban corridor from 2001 to 2023. To assess these changes, several environmental indicators were derived from Landsat imagery, including impervious surface area (ISA), biotope area ratio (BAR), city density index (CDI), urban expansion intensity (UEI), proportion of vegetation (PV), normalized difference moisture index (NDMI), urban thermal field variance index (UTFVI), modified soil-adjusted vegetation index (MSAVI), normalized difference bare soil index (NDBSI), and road density. Principal component analysis (PCA) was then applied to calculate the eigenvalue contribution of each parameter and formulate the ecological security index for the study area. The results indicate that 72.7% of the region exhibited high ecological security, 15.9% moderate security, and 11.4% low security. Over the study period, 4% of areas with high ecological security declined, while areas with medium and low ecological security increased by 2.1% and 1.9%, respectively. Vegetation loss and rising urban density were identified as the primary drivers of reduced ecological security. These findings highlight the urgent need for comprehensive land-use planning and environmental management in the region. Priority should be given to protecting and enhancing areas with high ecological security—particularly natural vegetation cover—while regulating the expansion of built-up areas to prevent further ecological degradation.

Cite this article: Beyranvand, Z., Zebardast, L., Amiri, M. J., & Behrouzi, M. (2026). Evaluation and Analysis of the Degree of Ecological Security in the Integrated Spatial Framework of the Caspian Plain with an Emphasis on Urban Areas. *Geography and Environmental Sustainability*, 16(1), 143-163. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12493.2899>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12493.2899>

Publisher: Razi University

ارزیابی و تحلیل درجه امنیت اکولوژیکی در چارچوب یکپارچه فضایی جلگه خزری با تأکید بر مناطق شهری

زهرا بیرانوند^۱ | لعبت زبردست^۲ | محمد جواد امیری^۳ | محمود بهروزی^۴

۱. گروه محیط زیست، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران.
۲. نویسنده مسئول، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Lzebardast@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۴. گروه مخاطرات محیطی، پژوهشکده علوم دریایی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۰۲</p> <p>دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>امنیت اکولوژیکی، جلگه خزری، رشد شهری، عوامل محیطی، اراضی جنگلی</p>	<p>امنیت اکولوژیکی، شامل حفظ سلامت و یکپارچگی اکوسیستم، نقش کلیدی در دستیابی به توسعه پایدار دارد. در جلگه خزری، به‌عنوان یک کانون مهم تنوع زیستی در ایران، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی از عوامل تهدید امنیت اکولوژیکی هستند. این مطالعه باهدف بررسی تغییرات امنیت اکولوژیکی این جلگه در زنجیره شهری ساری - قائم‌شهر - بابل - آمل از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ انجام شد. به این منظور، مؤلفه‌های محیطی شامل وسعت سطوح نفوذناپذیر (ISA)، نسبت مساحت بیوتوپ (BAR)، شاخص تراکم شهری (CDI)، شدت گسترش شهری (UEI)، نسبت پوشش گیاهی (PV)، شاخص نرمال شده رطوبت زمین (NDMI)، شاخص تغییر در دمای اراضی شهری (UTFVI)، شاخص تعدیل‌یافته نرمال پوشش گیاهی و خاک (MSAVI)، شاخص نرمال‌شده خاک لخت و بایر (NDBSI) و تراکم جاده از روی تصاویر ماهواره‌ای لندست محاسبه شد. سپس درصد مقادیر ویژه با کاهش مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای هر یک از پارامترها محاسبه و معادله‌سازی درجه امنیت اکولوژیکی برای پهنه موردنظر انجام شد. یافته‌ها نشان داد که در ۷۲/۷ درصد از پهنه، امنیت اکولوژیکی بالا، ۱۵/۹ درصد امنیت متوسط و ۱۱/۴ درصد امنیت پایینی وجود داشت. همچنین، ۴ درصد از وسعت مناطق دارای امنیت اکولوژیکی بالا کاسته و ۲/۱ و ۱/۹ درصد بر مناطق با امنیت متوسط و پایین افزوده شده است. بر اساس نتایج، از بین رفتن پوشش گیاهی و تراکم شهری به طور قابل توجهی بر کاهش امنیت اکولوژیکی تأثیر گذاشته است که مستلزم برنامه‌ریزی و مدیریت دقیق کاربری اراضی در این منطقه با تمرکز ویژه بر حفاظت و تقویت مناطق با امنیت اکولوژیکی بالا، به‌ویژه پوشش طبیعی، و کنترل گسترش مناطق ساخته شده است.</p>

استناد: بیرانوند، زهرا؛ زبردست، لعبت؛ امیری، محمد جواد؛ بهروزی، محمود (۱۴۰۵). ارزیابی و تحلیل درجه امنیت اکولوژیکی در چارچوب یکپارچه فضایی جلگه خزری با تأکید بر مناطق شهری. *جغرافیا و مباداری محیط*، ۱۶(۱)، ۱۴۳-۱۶۳. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.12493.2899>



مقدمه

تغییرات در مقیاس جهانی، به نحوی فزاینده امنیت و پایداری اکوسیستم‌های خشکی را تهدید می‌کنند که از نمودهای آن می‌توان به تغییر کاربری و پوشش زمین، ترکیبات جو و شرایط اقلیمی، از بین رفتن تنوع زیستی، عقب‌نشینی یخچال‌ها، بالا آمدن سطح دریاها و افزایش رویدادهای آب‌وهوایی حدی اشاره کرد که اغلب به‌وسیله فشارهای جمعیتی، اقتصادی، فناورانه و اجتماعی ایجاد می‌شوند (Li et al., 2024). جلگه‌های پر بارش به دلیل تنوع زیستی غنی، خدمات محیط‌زیستی قابل‌توجهی ارائه می‌دهند. باین‌حال، محرکه‌های فشار اقلیمی و انسانی، با تغییر در رژیم بارندگی، دما و نیاز آبی از یک‌سو و تخریب منابع طبیعی از سوی دیگر منجر به کاهش امنیت اکولوژیکی در این مناطق شده‌اند. با احداث جاده‌های بین‌شهری، زیستگاه‌های طبیعی قطعه‌قطعه شده و در امنیت اکولوژیکی موجودات زنده اختلال ایجاد می‌شود (Ahmed et al., 2018). هرچه یک پهنه اکوسیستمی کوچک‌تر شود، رقابت برای زنده‌ماندن افزایش یافته و موجودات حساس و شکننده از بین می‌روند (Huang et al., 2020). نفوذ پهنه‌های شهری به زیستگاه‌های طبیعی که موجب انتشار آلودگی‌های هوا، ارتعاشات صوتی و آلودگی آب‌و‌خاک می‌شوند، منجر به مهاجرت حیوانات و پرندگان شده و گیاهان را نیز تحت تنش قرار می‌دهد؛ بنابراین با افزایش تنش‌های انسانی به‌ویژه تغییر در پوشش اراضی، ریسک‌های مرتبط با امنیت اکولوژیکی افزایش یافته و منجر به تغییر و تخریب شرایط اکولوژیکی منطقه می‌گردد (Liu & Li, 2025).

امنیت اکولوژیکی وضعیتی است که در آن یک اکوسیستم سلامت و یکپارچگی خود را حفظ کرده و بدین ترتیب، تضمین‌کننده پایداری و ثبات محیط‌زیست انسانی است (Wen & Hou, 2021). اگرچه تعریف دقیقی از درجه امنیت اکولوژیکی وجود ندارد، اما از لحاظ مفهومی، بیانگر رابطه پویا بین انسان و طبیعت است که در شرایط بهره‌وری انسان از منابع محیطی، ساختار، عملکرد و فرایندهای درونی اکوسیستم همچنان ایمن و پایدار باشد (Jie et al., 2024). هرچه یک اکوسیستم قوی‌تر باشد، در برابر فشارهای بیرونی مقاوم‌تر بوده و امنیت سیستم اکولوژیکی آن بهتر باقی می‌ماند. به بیان دیگر، اکوسیستم قوی دارای مؤلفه‌هایی است که امنیت اکولوژیکی آن را تضمین می‌کند که از جمله می‌توان به مواردی مانند یکپارچگی پهنه اکولوژیکی، عدم وجود محرکه‌های فشار همچون جاده، شبکه‌های ارتباطی زیرساختی و شهرک‌های صنعتی و مسکونی اشاره نمود (Kang et al., 2021). اگرچه تغییرات اقلیمی نیز در قرن بیست و یکم نمود بیشتری یافته است و به‌عنوان محرکه فشار، بر محیط‌زیست آسیب می‌رساند، اما اگر اجزای یک اکوسیستم قوی باشد و در برابر بحران مقاومت کرده و یا سازگار شود، می‌تواند امنیت اکولوژیکی سیستم را حفظ نماید. اما در صورتی که فعالیت‌های انسانی بر اکوسیستم منطقه‌ای غالب گردد، امنیت اکولوژیکی به مخاطره افتاده و ممکن است موجودات با تاب‌آوری کمتر و حساس‌تر، از بین بروند و یا از اکوسیستم خود مهاجرت کنند (Sun et al., 2020).

مدیریت محیط‌زیست و اکوسیستم منطقه‌ای، مستلزم شناخت درجه امنیت اکولوژیکی است تا بتوان با سنجش این مؤلفه و حساسیت آن به محرکه‌های فشار، دستورالعملی در زمینه مدیریت کاربری زمین تدوین نمود که اثرگذاری فعالیت‌های انسانی بر امنیت اکولوژیکی منطقه را کاهش داد. در واقع شناخت درجه امنیت اکولوژیکی، این امکان را به مدیران شهری می‌دهد که مسیر توسعه شهری را بر مبنای ظرفیت اکوسیستم اراضی اطراف شهر طرح‌ریزی کنند. پژوهشگران ابتدا به ظرفیت امنیت اکولوژیکی شهری و منطقه‌ای می‌پردازند و اکوسیستم‌هایی که امنیت اکولوژیکی قوی و ضعیف دارند را شناسایی کرده و موقعیت آن را در اختیار مدیران قرار می‌دهند (Gao et al., 2021).

پژوهش‌های مختلفی در زمینه امنیت اکولوژیکی، شرایط و کیفیت اکولوژیکی مناطق و عوامل مؤثر بر آن صورت گرفته است که در آنها شاخص‌های مؤثر و عوامل دخیل در امنیت اکولوژیکی شناسایی شده و مناطق از لحاظ این شاخص‌ها ارزیابی شده‌اند. به‌عنوان مثال، کنعانی و شیخ‌زین‌الدین (۱۴۰۳) با استفاده از مفاهیم کلیدی ردپای اکولوژیکی و ظرفیت اکولوژیکی، سرانه این شاخص‌ها را برای استان فارس در دوره زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ محاسبه کردند. براساس نتایج بدست آمده، سرانه ردپای اکولوژیکی در این استان بیش از ۱۷ درصد افزایش یافته و ظرفیت اکولوژیکی استان ۱۰ درصد کاهش داشته است. همچنین، سرانه ظرفیت اکولوژیکی کمتر از یک چهارم سرانه ردپای اکولوژیکی بود که بیانگر افزایش فشار بر منابع طبیعی و

آسیب‌پذیری استان می‌باشد. محاسبه چهار شاخص امنیت اکولوژیکی نشان‌دهنده ناامنی اکولوژیکی و عدم هماهنگی بین توسعه و محیط‌زیست بوده که برای دستیابی به توسعه پایدار، توجه جدی به محیط‌زیست و اجرای پایش مستمر ضروری دانسته شده است.

چن و همکاران در پژوهشی چارچوبی فنی برای تعیین الگوهای امنیت اکولوژیکی در مقیاس کلان‌شهری خوشه‌های شهری جلگه گوانژونگ^۱ کشور چین با هدف محافظت و احیای مناطق طبیعی ارائه کردند. با ارزیابی اهمیت و حساسیت اکولوژیکی، ۲۳ منبع اکولوژیکی اصلی شناسایی شد که عمدتاً در جنوب این منطقه قرار دارند و ۸/۵۲ درصد از مساحت مطالعه را پوشش می‌دهند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده حساسیت اکولوژیکی بالاتر در مناطق کوهستانی بود و کریدورهای اکولوژیکی در جنوب منطقه پراکندگی بیشتری داشتند که بر اهمیت تقویت زیرساخت‌های سبز در شمال، حفاظت از عملکرد اکولوژیکی نواحی حساس و بهبود پیوستگی کریدورها تأکید دارد (Chen et al., 2022).

ژنگ و همکاران کیفیت اکولوژیکی و عوامل مؤثر بر آن را در شهر ووهان^۲ چین طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ بررسی کردند. در این تحقیق، از مدل آشکارساز جغرافیایی مبتنی بر پارامتر بهینه برای بررسی تأثیر عواملی مانند ارتفاع، شیب، جهت، تراکم جمعیت، سبزیگی، رطوبت، خشکی و گرما بر روی درجه کیفیت اکولوژیکی استفاده شد. نتایج نشان داد که سبزیگی و رطوبت بر کیفیت اکولوژیکی ووهان تأثیر مثبت، و خشکی و گرما تأثیرات منفی دارند. همچنین، از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱، کیفیت اکولوژیکی در ووهان روند کاهشی داشته است (Zhang et al., 2024).

کای و همکاران کیفیت اکولوژیکی شهری هانگژو^۳ در چین را با استفاده شاخص بهبودیافته اکولوژیکی سنجش‌ازدور (IRSEI) که ترکیبی از شاخص‌های رطوبت (WET)، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، دمای سطح زمین (LST)، شاخص نرمال شده خاک لخت و بایر (NDBSI)، عمق نوری هواویزها (AOD) و شاخص جامع شوری (CSI) است، بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تقریباً ۹۵ درصد از تغییرات در کیفیت اکولوژیکی مشاهده شده از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ شامل بهبودهای جزئی، کاهش یا ناچیز بوده است. همچنین، تغییر در IRSEI با تغییرات در دمای سطح و شبکه‌های حمل‌ونقل، همبستگی قوی نشان داد (Cai et al., 2024).

دیپ و همکاران با استفاده از شاخص‌های سنجش‌از دور شامل دمای سطح زمین (LST)، شاخص نرمال شده خاک لخت و بایر (NDBSI)، رطوبت (WET) و سبزیگی (NDVI) و روش‌های آماری، تغییر کیفیت اکولوژیکی شهر کان تو^۴ در ویتنام را در دوره زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد میانگین کیفیت اکولوژیکی در سال ۲۰۱۵ حدود ۳/۶۶ و در سال ۲۰۲۰ حدود ۳/۶۰ بود. در سال ۲۰۱۵، مناطق با کیفیت اکولوژیکی خوب و بسیار خوب ۸۸ درصد از کل مساحت طبیعی را به خود اختصاص دادند. مناطق با کیفیت پایین از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ افزایش یافته است که نشان‌دهنده روند کاهشی کیفیت اکولوژیکی در منطقه است (Diep et al., 2024).

ژائو و همکاران سلامت اکوسیستم و مناطق تخریب‌شده در شهر چونگدو^۵ کشور چین را با به‌کارگیری مدل VORS بررسی کردند. همچنین، مدل PLUS برای پیش‌بینی روند توسعه شهری تا سال ۲۰۳۵ و ارزیابی تغییرات روی داده در وضعیت امنیت اکولوژیکی استفاده شد و شبکه اکولوژیکی با استفاده از مدل مقاومت تجمعی حداقل و نظریه مدار طراحی گردید. وسعت مناطق منبع اکولوژیکی، منطقه احیا و منطقه حفاظت با توسعه محدود شناسایی و هفت کریدور پایدار و شش کریدور بالقوه نیازمند بازسازی تعیین شدند. تحلیل سناریوها در سال ۲۰۳۵ اهمیت برنامه‌ریزی علمی و محدودسازی گسترش شهر را برای حفظ امنیت اکولوژیکی برجسته ساخت (Zhao et al., 2024).

یانگ و همکاران در پژوهشی در منطقه شمال غرب چین، با استفاده از شبیه‌سازی توسعه شهری تا سال ۲۰۵۰ تحت سناریوهای SSP-RCP، اثرات گسترش شهری بر امنیت اکولوژیکی را مطالعه کردند. به این منظور، مدل ترکیبی شاخص

1. Guanzhong
2. Wuhan
3. Hangzhou
4. Can Tho
5. Chengdu

ریسک اکولوژیکی، سلامت اکوسیستم و خدمات اکوسیستمی برای تحلیل کمی تغییرات امنیت اکولوژیکی در مناطق مختلف به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مناطق شمال غرب و جنوب شرق دارای سطوح بالای امنیت اکولوژیکی بوده ولی در مناطق مرکزی کاهش تدریجی این شاخص‌ها مشاهده می‌شود. مدل توسعه با اولویت اقتصادی باعث افزایش انسجام اراضی شهری و کاهش مبادله در سرزمین شده و بیشترین میزان خسارت اکولوژیکی را در میان سناریوها به خود اختصاص داد (Yang et al., 2025).

در بیشتر مطالعات بررسی شده، نوعی روند کاهشی در شاخص‌های مرتبط با امنیت اکولوژیکی، به‌خصوص در مناطق شهری و پیرامونی آن‌ها مشاهده می‌شود که بیشتر در نتیجه فشارهای توسعه شهری نظیر افزایش دما (جزیره گرمایی شهری) و کاهش پوشش‌های طبیعی زمین است. همچنین، پوشش گیاهی و رطوبت به‌عنوان عوامل کلیدی در بهبود و حفظ سلامت اکولوژیکی شناسایی شده‌اند. در بیشتر مطالعات، از داده‌های سنجش‌ازدور و شاخص‌های ترکیبی استفاده شده که نشان‌دهنده یک پارادایم روش‌شناختی قدرتمند و روزآمد برای پایش فضایی - زمانی امنیت اکولوژیکی در مقیاس‌های کلان است. نتایج به‌دست‌آمده در اغلب این مطالعات، نشان می‌دهند که ادامه روند فعلی توسعه شهری منجر به تخریب بیشتر اکوسیستم و کاهش امنیت اکولوژیکی خواهد شد و بر لزوم برنامه‌ریزی و اعمال محدودیت برای توسعه شهری، حفاظت از منابع اکولوژیکی و طراحی شبکه‌های اکولوژیکی تأکید می‌کنند.

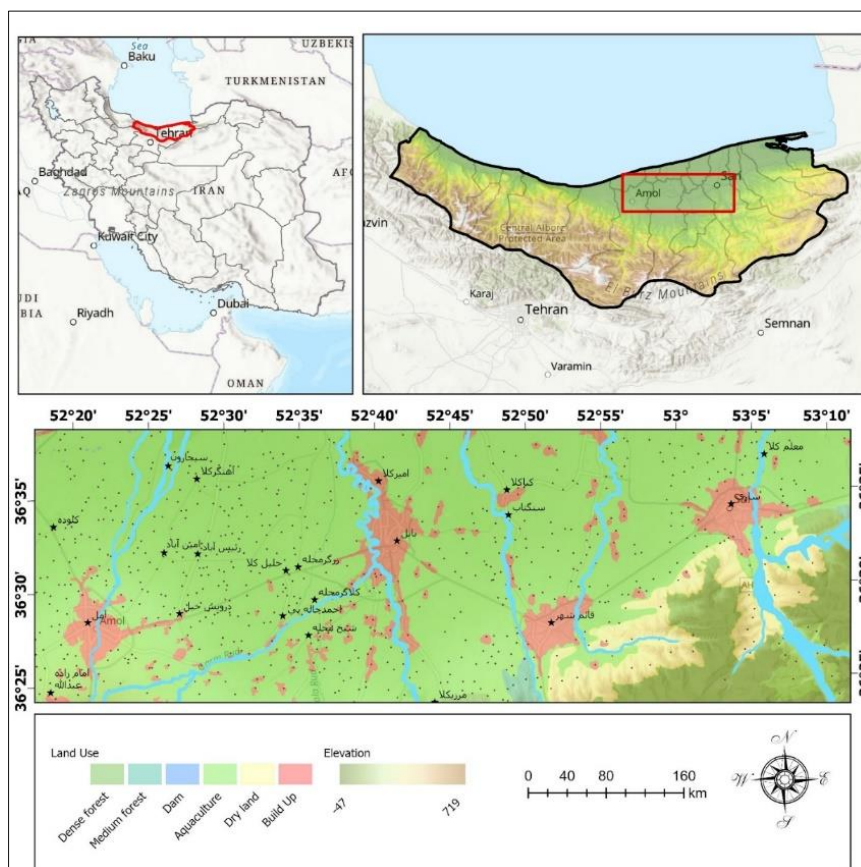
در جلگه خزری، به‌عنوان یکی از حاصلخیزترین مناطق جغرافیایی ایران با تنوع زیستی بسیار باارزش، عواملی مانند رشد بی‌رویه شهری و اراضی ساخته شده، گردشگری و صنایع مختلف باعث شده است که وضعیت اکوسیستم و خدمات حاصل از آن دچار تخریب شده و در نتیجه، امنیت اکولوژیکی در این منطقه نیز به‌شدت تحت‌تأثیر فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی، دچار نقصان شود. با ادامه‌یافتن این روندها، به‌خصوص رشد شهری و تغییر کاربری و پوشش اراضی در سال‌های آتی، شاهد تخریب تنوع زیستی بسیار باارزش این منطقه و ازبین‌رفتن و جایگزینی اراضی طبیعی با انسان‌ساخت خواهیم بود.

علاوه بر این، ازبین‌بردن پوشش‌های طبیعی به‌خصوص جنگل‌های باارزش این منطقه و ساخت‌وساز در حریم رودخانه‌ها، باعث افزایش آسیب‌پذیری به مخاطرات طبیعی به‌خصوص سیلاب خواهد گردید و قابلیت اکوسیستم‌های طبیعی در تولید خدمات اکوسیستمی به‌خصوص کنترل سیلاب، تعدیل اقلیم و تولید آب در حوضه‌های آبخیز و آبخوان‌ها را کاهش خواهد داد که همه این موارد باعث کاهش امنیت اکولوژیکی در این منطقه خواهد گردید. توقف این روندها و خسارت‌های ناشی از آنها، مستلزم برنامه‌ریزی مبتنی بر شناخت درجه امنیت اکولوژیکی در این جلگه است که بر مبنای آن، لازم است برنامه‌های توسعه شهری - روستائی در این منطقه مورد بازنگری جدی قرار گیرد. براین‌اساس، هدف پژوهش حاضر، شناخت، بررسی، ارزیابی و تحلیل درجه امنیت اکولوژیکی در چارچوب یکپارچه فضایی جلگه خزری با تأکید بر مناطق شهری است تا بتوان دیدی مناسب از میزان تخریب و در نتیجه تغییر امنیت اکولوژیکی در این ناحیه ارائه داد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، زنجیره شهری ساری - قائم‌شهر - آمل - بابل واقع در جلگه خزری در استان مازندران است. استان مازندران با مساحت ۲۳۷۵۶ کیلومترمربع، در سواحل جنوبی خزر در شمال ایران واقع گردیده است (شکل ۱). دلیل اصلی انتخاب این محدوده، تراکم شهری - جاده‌ای و شدت فعالیت‌های گردشگری در منطقه است که امکان به‌خطر افتادن اکوسیستم‌های طبیعی را تشدید کرده است. این زنجیره شهری در میان جلگه خزر، پیچیده‌ترین ارتباط شهری را تشکیل می‌دهند و پرجمعیت‌ترین ناحیه در شمال ایران است. بخش‌های جنوبی آنها رو به ارتفاعات البرز و نواحی شمالی آنها رو به جلگه و دریاچه خزر است. رودخانه‌های خروجی از کوهستان، در کوهپایه‌ها باعث تشکیل مخروط‌افکنه و جلگه شده‌اند که به‌دلیل وجود آب و خاک حاصلخیز، شهرها در مجاورت این رودخانه‌ها شکل گرفته‌اند. به‌گونه‌ای که شهرهای ساری - قائم‌شهر - آمل - بابل به‌ترتیب در مجاورت رودخانه‌های تجن، تالار، بابلرود و هراز گسترده شده‌اند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی جلگه خزر در استان مازندران - شمال ایران

روش مطالعه

داده‌های موردنیاز

برای استخراج شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۳ استفاده شده است که از سایت USGS تهیه گردید. این تصاویر، در نرم‌افزار ENVI، تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری شد و با به کارگیری تابع Pan sharpening، وضوح مکانی تصاویر از 30×30 متر به 15×15 متر افزایش داده شد.

تهیه نقشه پوشش اراضی

پس از پیش‌پردازش‌های لازم بر روی تصاویر، با استخراج نقاط آموزشی از روی تصویر و اجرای الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (Tzotsos & Argialas, 2008; Singh et al., 2022) نقشه پوشش اراضی با پنج طبقه مناطق جنگلی، کشاورزی، ساخته شده، پهنه‌های آبی و اراضی بایر برای سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۳ برای محدوده مورد مطالعه تهیه گردید. سپس با نرم‌افزار ArcGIS، مساحت پهنه‌ها و تغییرات آنها محاسبه شد.

محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین

در این پژوهش، از سنجه‌های سیمای سرزمین جهت تحلیل ابعاد و تغییرات لکه‌های سبز و ساختمانی استفاده شد. این تحلیل در نرم‌افزار Frag stats انجام شد (Grafius et al., 2018). برای نقشه‌سازی سنجه‌ها، با استفاده از روش پهنه‌بندی مربعی، محدوده به مربعاتی با ابعاد یکسان تقسیم شد. سنجه‌های محاسبه شده در محدوده مورد نظر برای سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۳ شامل مساحت لکه‌های هر طبقه (CA)، تعداد لکه‌ها (NP)، متوسط اندازه لکه (MPS)، شاخص تنوع شانون (SHDI)، میانگین نزدیک‌ترین همسایه (MNN)، نمایه وزن دار شده شکل لکه (AWMSI)، درصد مساحت هر طبقه (PLand)، تراکم لکه (Pd) و پیوستگی لکه‌ها (CONTAG) می‌باشد.

شاخص‌های پایداری زمین

شاخص‌های وسعت سطوح نفوذناپذیر^۱، نسبت وسعت بیوتوپ^۲، شاخص تراکم شهری^۳ و شاخص شدت گسترش شهری^۴ برای جلگه خزر در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ محاسبه شد که معادلات آنها به شرح ذیل می‌باشد.

$$ISA = \frac{A_b + A_i}{A_{AOI}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$BAR = \frac{\sum (\text{Land Cover type} \times \text{Weight})}{\text{Total area}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$CDI = \frac{D_i}{TA_i} \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$UEI_{i,t-t+n} = \left[\frac{UA_{i,t+n} - UA_{i,t}}{n} \right] \times \frac{100}{TA_i} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه ۱، A_b سطح زمین پوشیده از ساختمان در محدوده مورد مطالعه (A_{AOI})، A_i نیز دیگر سطوح نفوذناپذیر در محدوده است. اگر مقدار شاخص بزرگتر از ۰/۶ باشد، بیانگر نفوذناپذیر بودن منطقه است و احتمال رخداد سیلاب و خطرات افزایش بازتاب دما و عدم نفوذپذیری آب و تغذیه آبخوان و همچنین بحران آب بسیار زیاد است (Zhang et al., 2015).

در رابطه ۳، D_i نسبت منطقه ساخته شده شهری در بلوک نمونه i در طول یک بازه زمانی نظارتی تعیین شده؛ TA_i مخفف کل مساحت واحد مورد نظر است. برای محاسبه این شاخص، نقشه رستری کاربری اراضی به برداری تبدیل شد. کاربری ساخته شده از دیگر کاربری‌ها جدا شده و برای اجرای عملیات آماده گردید. سپس با تابع Fishnet در نرم‌افزار ArcGIS، بلوک‌های 1×1 کیلومتری به صورت شبکه توری بر روی فایل برداری اراضی ساختمانی در محدوده مورد مطالعه قرار داده شد. با توابع آماری، کاربری ساختمانی به شبکه توری تلفیق شد، به گونه‌ای که مشخص شد در هر بلوک یک کیلومتر مربعی، چه میزان کاربری ساخته شده وجود دارد. سپس این مقادیر وارد فرمول شد و درصد فراوانی ساختمانی هر بلوک به دست آمد و نقشه آن ترسیم گردید (Indrawati et al., 2020).

در رابطه ۴، $UEI_{i,t-t+n}$: شاخص شدت گسترش شهری بین سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۳ سال آینده (سال ۲۰۲۳) را نشان می‌دهد. در این رابطه، $UA_{i,t+n}$ مساحت پهنه شهری برای سال ۲۰۲۳؛ $UA_{i,t}$ مساحت پهنه شهری سال ۲۰۰۱؛ n تعداد سال‌ها در بازه زمانی، TA_i مساحت بلوک‌های مدل‌سازی (۱ کیلومتر مربع) می‌باشد. هر پیکسلی که عدد بالاتری داشته باشد، نشان می‌دهد که در طی ۲۳ سال مورد مطالعه، ساخت و ساز در آن بیشتر بوده است و شهر به آن سو گسترش یافته است.

درجه امنیت اکولوژیکی

به منظور محاسبه شاخص درجه امنیت اکولوژیکی در جلگه خزر، از شاخص‌های طیفی تصاویر لندست و نقشه کاربری اراضی به عنوان پارامترهای ورودی به مدل استفاده گردید. این پارامترها شامل شاخص نسبت پوشش گیاهی^۵، شاخص شدت گسترش شهری^۶، شاخص تعدیل یافته نرمال پوشش گیاهی و خاک^۷، شاخص نرمال شده اراضی ساخته شده^۸، شاخص نرمال شده رطوبت زمین^۹ (NDMI)، شاخص تغییر در دمای اراضی شهری^{۱۰} (UTFVI)، شاخص نرمال شده خاک لخت و

1. Impervious Surface Area (ISA)
2. Biotope Area Ratio (BAR)
3. City Density Index (CDI)
4. Urban Expansion Intensity (UEI)
5. Proportion of Vegetation (PV)
6. Urban Expansion Intensity Index (UEII)
7. Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI)
8. Normalized Difference Built-up Index (NDBI)
9. Normalized Difference Moisture Index
10. Urban Thermal Field Variance Index

بایر^۱ (NDBSI) و تراکم جاده می‌باشد. رابطه ۵ برای محاسبه شاخص UESI استفاده شد:

$$\text{UESI} = 1 - (r_1 \text{PC1} + r_2 \text{PC2} + r_3 \text{PC3} + r_4 \text{PC4} + r_5 \text{PC5} + r_6 \text{PC6} + r_7 \text{PC7} + \dots + r_i \text{PC}_i) \quad (\text{رابطه } ۵)$$

در این رابطه، PC بیانگر پارامترهای مؤثر در امنیت اکولوژیکی و r درصد مقادیر ویژه (وزن) هر یک از پارامترها است که تکنیک تحلیل عاملی (PCA) برای محاسبه درصد مقادیر ویژه هر یک از عامل‌ها (PC) مورد استفاده قرار گرفت. این تکنیک با الگوریتم تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۲ در نرم‌افزار ArcGIS بر روی لایه‌های رستری پارامترها اجرا شد که درصد مقدار ویژه^۳ برای هر پارامتر، به‌عنوان r آن PC در نظر گرفته شد. در جدول (۱)، روش تهیه لایه‌های رستری برای هر یک از پارامترهای ورودی به مدل (PC) ارائه شده است.

جدول ۱. معادله پارامترهای ورودی به مدل امنیت اکولوژیکی شهری

ردیف	پارامتر (PC)	معادله
۱	PV	$pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$
۲	UEII	$UEI_{i,t-t+n} = \left[\frac{UA_{i,t+n} - UA_{i,t}}{n} \right] \times \frac{100}{TA_i}$
۳	MSAVI	$MSAVI = \frac{\left(2 \times nir + 1 - \sqrt{(2 \times nir + 1)^2 - 8 \times \frac{(nir - red)}{2}} \right)}{2}$
۴	Road density	تابع کرنل در نرم‌افزار ArcGIS
۵	NDBI	$NDBI = \frac{swir - nir}{swir + nir}$
۶	NDMI	$NDMI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir1}}{\rho_{nir} + \rho_{swir1}}$
۷	UTFVI	$UTFVI = \frac{T_{LST} - T_{mean}}{T_{mean}}$
۸	NDBSI	$SI = \frac{(swir1 + red) - (nir + blue)}{(swir1 + red) + (b5 + b2)}$ $IBI = \frac{(2 * swir1) / (swir1 + nir) - [nir / (nir + red) + green(green + swir1)]}{(2 * swir1) / (swir1 + nir) + [nir / (nir + red) + green(green + swir1)]}$

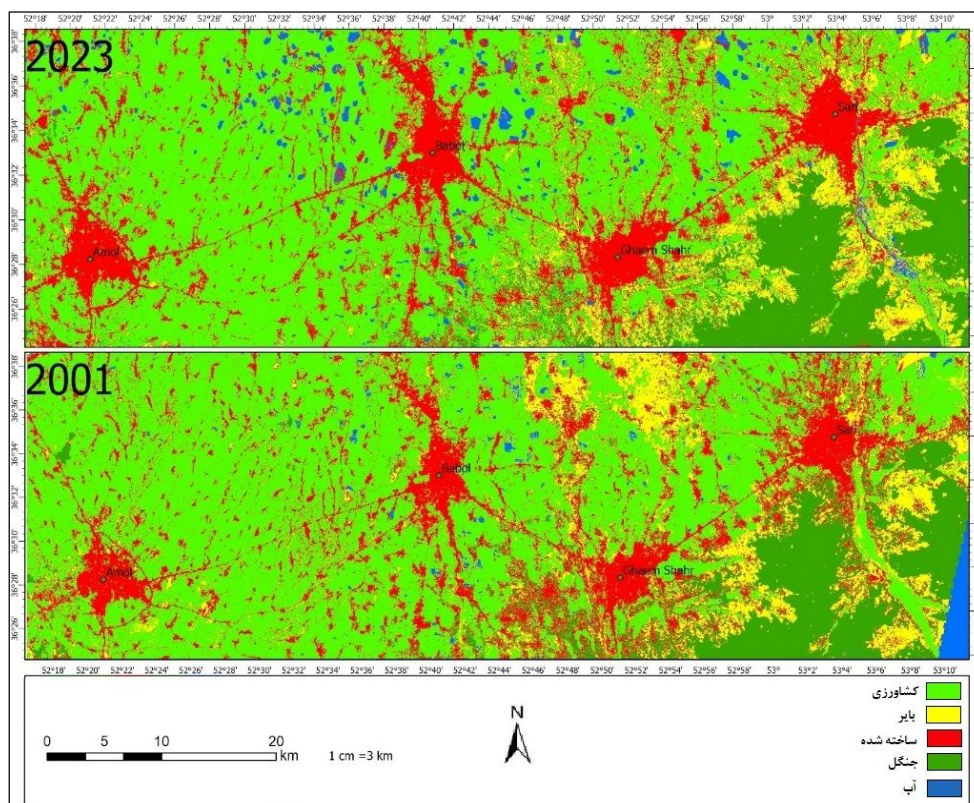
نتایج

محدوده مورد مطالعه، بخش مهمی از جلگه خزری است که زنجیره شهری ساری - قائم‌شهر - بابل - آمل را در بر می‌گیرد و مساحت آن حدود ۲۲۰۰ کیلومتر مربع است که در سال ۲۰۰۱ حدود ۵۷/۶ درصد از آن مربوط به اراضی کشاورزی بود و در سال ۲۰۲۳ حدود ۳ درصد از مقدار این اراضی کشاورزی کاهش یافت و عمدتاً به زمین‌های شهری - روستایی تبدیل شد. زمین‌های کشاورزی در جلگه هموار خزری قرار دارد، اما جنگل‌ها در ارتفاعات البرز و شهرها نیز در کوهپایه‌ها و خروجی رودخانه‌ها از کوهستان و ورود آن به جلگه‌ها گسترده شده‌اند. روستاها نیز به صورت متراکم و نزدیک بهم در جلگه هموار قرار دارند. طی ۲۳ سال گذشته، ۱۱۷ کیلومتر مربع بر وسعت سکونتگاه‌های انسانی افزوده شده است، اما وسعت زمین‌های کشاورزی، جنگل‌ها و اراضی بایر که عمدتاً مربوط به زمین‌های آیش کشاورزی هستند، کاهش یافته‌اند (جدول ۲ و شکل ۲).

1. Normalized Difference Bare Soil Index
 2. Principal Component Analysis
 3. Eigen Value Percent

جدول ۲. مساحت پوشش اراضی جلگه خزر در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۳ (کیلومتر مربع)

ردیف	نوع کاربری زمین	سال ۲۰۰۱	سال ۲۰۲۳	میزان تغییرات
۱	اراضی بایر و آیش	۱۹۰	۱۵۶	-۳۴
۲	زمین‌های کشاورزی	۱۲۶۹	۱۲۰۲	-۶۷
۳	ساخته شده	۲۶۹	۳۸۶	+۱۱۷
۴	جنگل	۴۳۱	۴۱۵	-۱۶
۵	پهنه‌های آبی	۴۱	۴۱	۰



شکل ۲. نقشه‌های کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۳

پایداری اراضی شهری

در این بخش از پژوهش، شاخص‌های نفوذناپذیری و نسبت وسعت بیوتوپ برای چهار شهر اصلی در محدوده مورد مطالعه محاسبه شد. در صورتی که ضریب ISA بیشتر از ۶۰ درصد باشد، بیانگر نفوذناپذیری بالای منطقه است که احتمال رخداد سیلاب در آن بسیار زیاد است. در این شرایط، انعکاس دما شدید بوده و امنیت اکولوژیکی به خطر می‌افتد و ریسک محیط‌زیست شهری در این مناطق بالا خواهد بود. نتایج نشان داد که در هر چهار شهر ساری، قائم‌شهر، بابل و آمل، ضریب نفوذناپذیری کمتر از ۶۰ درصد است که بیانگر کم‌بودن سطوح نفوذناپذیری و شرایط نفوذپذیری و اسفنجی در این مناطق از استان مازندران است و علاوه بر امنیت بالای اکولوژیکی، نقش مهمی در مدیریت سیلاب و تعدیل دمای هوا دارند. در طی ۲۳ سال گذشته به دلیل افزایش ساخت‌وسازها به‌ویژه در شهرهای آمل و بابل، ضریب نفوذناپذیری نسبت به سال پایه (سال ۲۰۰۱) افزایش زیادی داشته است؛ به‌گونه‌ای که ضریب نفوذناپذیری آمل و بابل ۰/۰۷ افزایش یافته است که این ضریب، در آمل ۴۳ و در بابل ۳۸ بوده و این روند می‌تواند در سال‌های آینده چالش‌برانگیز باشد.

نسبت وسعت بیوتوپ شهری بیانگر سطح اکولوژیکی در محیط‌زیست شهری است و هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشد، سطح اکولوژیکی آن منطقه بالاتر است و نقش زیادی در مدیریت رواناب‌های شهری، تنوع زیستی قوی و تغذیهٔ آبخوان‌ها دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که شهرهای بابل و آمل به ترتیب بیشترین نسبت وسعت بیوتوپ شهری را به خود

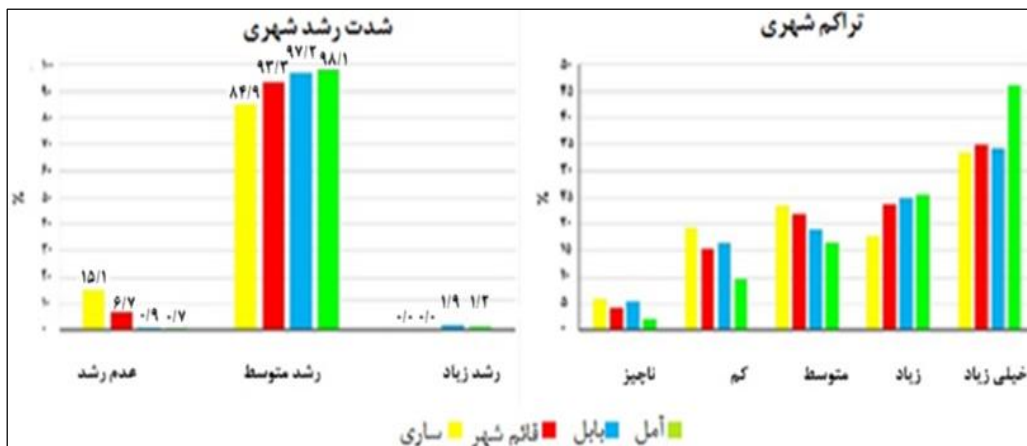
اختصاص داده‌اند. هرچه فضای سبز بیشتر و فضای متراکم مسکونی کمتر باشد، نسبت وسعت بیوتوپ که بیانگر سطح اکولوژیکی شهر است، بالاتر است. کمترین نسبت وسعت بیوتوپ شهری در قائمشهر و سپس ساری مشاهده گردید. اما نکته قابل تأمل این است که سطح اکولوژیکی این شهرها در حال کاهش است که بیشترین روند این کاهش (به میزان ۸ درصد) در طی ۲۳ سال اخیر در شهر بابل رخ داده است. در دیگر شهرهای مورد مطالعه نیز این روند کاهشی، اما با نرخ کندتر رخ داده است؛ بنابراین تبدیل اراضی کشاورزی و یا جنگلی به زمین‌های شهری با تراکم مسکونی بالا، نسبت وسعت بیوتوپ و سطح اکولوژیک شهر را کاهش داده و منجر به افزایش ریسک‌های محیط‌زیست شهری می‌گردد (جدول ۳).

جدول ۳. تغییرات شاخص‌های پایداری محیط‌زیست شهری در جلگه خزر طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

ردیف	شهر	سال	نفوذناپذیری (ISA) (درصد)	اختلاف ISA در ۲۳ سال	نسبت وسعت بیوتوپ (BAR) (درصد)	اختلاف BAR در ۲۳ سال
۱	ساری	۲۰۰۱	۲۹	-۳	۵۶	-۳
		۲۰۲۳	۲۶		۵۳	
۲	قائم‌شهر	۲۰۰۱	۴۱	+۱	۴۹	-۴
		۲۰۲۳	۴۲		۴۵	
۳	بابل	۲۰۰۱	۳۱	+۷	۶۴	-۸
		۲۰۲۳	۳۸		۵۶	
۴	آمل	۲۰۰۱	۳۶	+۷	۵۸	-۵
		۲۰۲۳	۴۳		۵۳	

در مرحله بعد، شاخص تراکم شهری (CDI) در مقیاس شهری محاسبه شد که بیانگر درصد ساخته شده در هر بلوک 1×1 کیلومترمربعی می‌باشد. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، بیان‌گر متراکم‌بودن زمین شهری و کاهش امنیت اکولوژیکی است. نتایج این پژوهش نشان داد که تراکم خیلی زیاد (حالتی که بیش از ۷۶ درصد بلوک به ساختمان‌ها اختصاص دارد) در محدوده شهری آمل بوده و ۴۶ درصد از محدوده این شهر، دارای تراکم خیلی زیاد است. می‌توان گفت اگرچه شهر آمل وسعت کمتری از شهر ساری دارد، اما شدت تراکم ساختمان‌های شهری آن بیشتر از سایر شهرهای جلگه خزر است.

از لحاظ شاخص شدت رشد کالبد شهری (UEI)، زنجیره شهری ساری - قائمشهر - بابل - آمل در طی ۲۳ سال گذشته دارای رشد متوسط و کمی بوده‌اند. رشد خیلی زیاد، کمتر از یک درصد از فضای منطقه را در بر می‌گیرد که آنهم مربوط به رشد شهری در نواحی جنوبی شهرهای آمل و بابل است. به طور کلی نتایج این شاخص نشان می‌دهد که حدود ۲۳۴ کیلومترمربع از فضای جغرافیایی محدوده مورد مطالعه رشد متوسط و کم داشته‌اند. در شهرهای ساری و قائمشهر، رشد زیاد مشاهده نشد و در بابل و آمل به ترتیب ۱/۹ و ۱/۲ درصد از رشد شهری، شدت زیادی داشته است (شکل ۳).



شکل ۳. نمودارهای ستونی شاخص‌های شدت رشد شهری (UEI) و شاخص تراکم شهری (CDI) در سال ۲۰۲۳ (یافته‌های پژوهش)

تغییرات سیمای سرزمینی جلگه خزر

در جدول ۴ نتایج محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین مربوط به کاربری‌های اراضی در جلگه خزر ارائه شده است. شاخص AWMSI نمایه وزن دار شده شکل لکه‌های کاربری اراضی است و هر چه این شاخص به عدد یک نزدیک باشد، لکه شکل مربعی داشته و با افزایش عددی این شاخص، شکل لکه نامنظم‌تر و مدیریت زیستگاه نیز سخت‌تر می‌شود. در محدوده مورد مطالعه، فضاهای سبز دارای بیشترین شاخص AWMSI بوده و نشان می‌دهد فضای سبز شهری-زراعی نظم کمتری نسبت به دیگر کاربری‌ها دارند. اراضی ساختمانی نسبت به زمین‌های کشاورزی و جنگل فرم یکنواخت‌تری دارد و مقدار عددی شاخص AWMSI آن کمتر از کاربری‌های سبز است و که نشان دهند نظم بیشتر است و طی ۲۳ سال گذشته نیز روند کاهشی این شاخص برای این کاربری نشان‌دهنده رشد بلوک‌های ساختمانی و شکل منظم‌تر نسبت به قبل است.

شاخص میانگین اندازه لکه‌ها (MPS) از تعداد لکه‌های هر کلاس و مساحت آن لکه در کلاس به دست می‌آید و کاهش آن بیانگر خردشدگی و تخریب زیستگاه است. در منطقه مورد مطالعه، اندازه لکه‌های ساختمانی و زمین‌های کشاورزی در طی ۲۳ سال مورد بررسی، افزایش یافته است که نشان‌دهنده رشد و یکپارچه شدن اراضی مسکونی است. این در حالی است که این شاخص برای جنگل‌های منطقه کاهش اندکی داشته است که دلیل اصلی آن تبدیل جنگل به اراضی کشاورزی و سکونتگاهی می‌باشد که باعث شده تا زیستگاه‌های جنگلی قطعه قطعه شده و با خطر کاهش کیفیت زیستگاه مواجه شوند.

سنجه تراکم لکه‌ها (Pd) بیانگر تعداد لکه‌ها در هر ۱۰۰ هکتار است و افزایش آن بیانگر قطع قطع شدن زیستگاه است. این سنجه برای فضای شهری-روستایی و اراضی کشاورزی روند کاهشی داشته است که نشان از یکپارچگی این کاربری دارد. نتایج شاخص NP که همان تعداد لکه‌های (قطعه) اراضی را نشان می‌دهد، بیانگر این است که تعداد لکه‌های ساختمانی طی ۲۳ سال گذشته افزایش یافته است، به این معنی که قطعات ساختمانی جدا از هم بوده و شهرها و روستاهای منطقه به صورت پراکنده رشد کرده‌اند؛ این سنجه برای فضاهای سبز کاهشی بوده و نشان‌دهنده یکپارچه شدن و توسعه فضاهای سبز شهری-کشاورزی در اطراف شهرها است. به‌طور کلی، هرچه تعداد لکه‌ها زیاد باشد، نشان‌دهنده تکه تکه شدن زیستگاه است که این سنجه برای فضاهای سبز شهری-زراعی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ حدود ۶۶۵ قطعه کاهش یافته، اما قطعات ساختمانی حدود ۱۰۹۶ قطعه افزایش یافته و مساحت لکه و قطعات بیشتر شده است که مبین رشد و تبدیل اراضی بایر و کشاورزی به سکونتگاه‌های شهری و روستایی در جلگه خزر است.

سنجه درصد مساحت (PLAND) و مساحت هر طبقه (CA) بیانگر نسبت فراوانی مساحت لکه‌های اراضی است. در منطقه مورد مطالعه، این متریک برای فضاهای شهری روند افزایشی داشته است. این دو شاخص نشان می‌دهند که در چشم‌انداز محدوده مطالعاتی در جلگه خزر، اراضی انسان‌ساخت گسترش یافته و اراضی بایر و کشاورزی کاهش داشته‌اند که به اراضی انسانی تبدیل شده‌اند.

سنجه تنوع شانون (SHDI) نشان‌دهنده میزان تنوع نسبی لکه‌ها در سطح سیمای سرزمین است و هرچه عدد آن بیشتر باشد، بیانگر تنوع نسبی لکه‌ها است. این شاخص برای محدوده مورد مطالعه از ۱/۲۸ به ۱/۲۱ کاهش یافته است. یکپارچگی کشاورزی بیشترین سهم را در یکپارچگی کل محدوده مورد مطالعه در جلگه خزر داشته‌اند. اما بررسی شاخص CONTAG نشان می‌دهد که لکه‌های سیمای سرزمین در محدوده مورد مطالعه در طی ۲۳ سال مورد مطالعه، ناپیوسته و تکه تکه شده‌اند که البته مقدار آن ناچیز است. این تکه تکه شدن مربوط به افزایش و رشد بلوک‌های ساختمانی و قطعه شدگی زمین‌های بایر و کشاورزی است (جدول ۴).

جدول ۴. تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

پوشش اراضی	سال	AWSMI	MPS	CA	PLAND	NP	PD
		-	هکتار	هکتار	درصد	تعداد	لکه در ۱۰۰ هکتار
اراضی بایر	۲۰۰۱	۵/۲۶	۰/۶۹	۲۱۶۵۵	۹/۳۲	۲۶۹۵۲	۱۱/۳۲
	۲۰۲۳	۵/۲	۰/۷۲	۱۹۷۷۹	۸/۷۲	۲۷۳۵۸	۱۲/۰۶
کشاورزی	۲۰۰۱	۴۰/۸۹	۳/۹۹	۱۳۲۶۹۹	۲۵۹/۳۲	۳۱۲۲۱	۱۳/۹۶
	۲۰۲۳	۲۳/۱	۴/۱۵	۱۲۶۹۰۷	۵۵/۹۸	۳۰۵۵۶	۱۳/۴۸

ادامه جدول ۴.

پوشش اراضی	سال	AWSMI	MPS	CA	PLAND	NP	PD
		-	هکتار	هکتار	درصد	تعداد	لکه در ۱۰۰ هکتار
سکونتگاه	۲۰۰۱	۱۲/۲	۰/۹۳	۲۲۹۸۵	۱۱/۲۱	۲۸۷۵۵	۱۴/۲
	۲۰۲۳	۹/۹	۱/۰۱	۳۰۲۲۵	۱۳/۳۳	۲۹۸۵۱	۱۳/۱۶
جنگل	۲۰۰۱	۱۹/۴۴	۰/۹۳	۴۳۵۱۲	۱۸/۲۲	۵۵۵۶۹	۲۳/۱۲
	۲۰۲۳	۳۷/۲	۰/۸۱	۴۴۸۲۲	۱۹/۷۷	۵۵۵۱۶	۲۴/۴۹
پهنه آبی	۲۰۰۱	۲/۰۸	۱/۲۱	۴۹۳۲	۱/۹۷	۳۳۵۹	۱/۵
	۲۰۲۳	۱/۷	۱/۴۱	۴۹۳۲	۲/۱۴	۳۴۹۱	۱/۵۴

امنیت اکولوژیکی در جلگه خزر

در پژوهش حاضر، برای مدل سازی و شناخت درجه امنیت اکولوژیکی جلگه خزر، از روش نوینی بهره گرفته شد. در این راستا، برای هشت مؤلفه اصلی لایه رستری تهیه شد که در شکل ۴، نقشه‌های مکانی آنها نمایش داده شده است. در ادامه با تحلیل PCA، درصد مقادیر ویژه هر عامل به عنوان r وارد مدل شد و با ضرب آن در لایه رستری، درجه امنیت اکولوژیکی جلگه خزر محاسبه شد.

براین اساس، شاخص نسبت پوشش گیاهی (PV) که از تفاضل شاخص NDVI به دست آمد، یکی از مهم‌ترین پارامترها در درجه امنیت اکولوژیکی شهری محسوب می‌شود. این شاخص با تبیین ۶۶ درصد واریانس، وزنی معادل با ۰/۶۶۱ به خود گرفت و به عنوان عامل اول و اصلی، مهم‌ترین پارامتر در ارزیابی درجه امنیت اکولوژیکی شهری محسوب شد. هرچه میزان عددی این شاخص بیشتر باشد، درجه امنیت اکولوژیکی نیز افزایش می‌یابد، چرا که افزایش عدد این شاخص بیانگر وجود پوشش گیاهی قوی در منطقه است و پوشش‌های گیاهی نیز، به علت نقش مهم اکولوژیکی، عامل مهمی در شرایط مناسب یک زیست بوم محسوب می‌شود.

شاخص شدت گسترش شهری (UEII) یکی از شاخص‌های تأثیرگذار در ارزیابی درجه امنیت اکولوژیکی شهری است که در این پژوهش توانسته است با تبیین ۱۷ درصد از واریانس عامل‌ها، وزن ۰/۱۷۶ را به خود اختصاص دهد و به عنوان عامل دوم در درجه امنیت اکولوژیکی شهری معرفی گردد. این شاخص بیانگر شدت توسعه مناطق ساخته شده در نواحی شهری است که نقشه مربوطه بین صفر و یک فازی شده و نشان می‌دهد که بیشترین مقدار UEII مربوط به اراضی انسان‌ساخت شهری و روستایی و کمترین مقدار نیز مربوط به روستاهای پراکنده در جلگه خزر است. اراضی کشاورزی، جنگل و اراضی بایر نیز عدد صفر بدست آمده است.

هرچه میزان عددی این شاخص بیشتر باشد، بیانگر نقش منفی آن در امنیت اکولوژیکی شهری است، چرا که اراضی مانند جنگل و کشاورزی به دلیل وجود پوشش گیاهی و خاک مناسب، شرایط بهتری را برای موجودات زنده فراهم می‌نمایند؛ اما اراضی متراکم شهری و زمین‌های ساختمانی به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی و نفوذناپذیری، شرایط مناسبی برای موجودات زنده ندارد و درجه امنیت اکولوژیکی آن نیز کمتر است. شاخص MSAVI نقش مهمی در تفکیک پوشش گیاهی از سایر کاربری‌ها و همچنین تفکیک اراضی کشاورزی از جنگل و یا مراتع دارد. هرچه مقدار عددی این شاخص بیشتر باشد، نشان دهنده وجود پوشش گیاهی متراکم مانند جنگل است و درجه امنیت اکولوژیکی آن بیشتر از سایر کاربری‌ها است. این شاخص توانسته است ۸ درصد از تغییرات را تبیین کند و با وزن ۰/۰۸۲ به عنوان عامل سوم در این پژوهش شناخته شد.

در ادامه، با استفاده از تابع کرنل خطی، درجه تراکم جاده‌های مهم بین شهری در بخش پرتراکم جلگه خزر در سیستم اطلاعات جغرافیایی ترسیم شد. این شاخص توانسته است ۵/۲ درصد از تغییرات کل را تبیین کند و با وزن ۰/۰۵۲ به عنوان عامل چهارم در مدل شناخته شد. هر چه تراکم جاده‌ای در منطقه بیشتر باشد، خطر و ریسک اکولوژیکی افزایش می‌یابد. بیشترین تراکم جاده‌ای به اطراف شهرهای چهارگانه ساری، قائم شهر، بابل و آمل اختصاص دارد و با فاصله از این زنجیره شهری، تراکم جاده‌ها نیز کاهش می‌یابد.

چهار شاخص مزبور (PV، UEII، MSAVI و تراکم جاده) توانسته‌اند ۹۶ درصد از تغییرات کل را تبیین کنند و امکان

محاسبه امنیت اکولوژیکی با استفاده از این چهار شاخص با تنها ۴ درصد خطا وجود دارد. اما در این پژوهش از همه پارامترها برای دقت ۱۰۰ درصدی استفاده شد و نقش تمام آنها در امنیت اکولوژیکی در نظر گرفته شد.

شاخص نرمال شده اراضی ساخته شده (NDBI) برای تفکیک اراضی ساخته شده از دیگر کاربری‌ها استفاده می‌شود. در واقع، نقش این پارامتر در نشان دادن کمترین امنیت اکولوژیکی است، چراکه اراضی ساخته شده امنیت اکولوژیکی بسیار پایینی دارند و این شاخص به صورت دقیق با شناسایی قطعات انسان‌ساخت، در آشکارسازی حداقل درجه امنیت اکولوژیکی نقش حائز اهمیتی ایفا می‌نماید. شاخص NDBSI یکی دیگر از شاخص‌های طیفی است که از تفاضل باندهای چندزمانه تصویر لندست محاسبه گردید و نقش مهمی در تفکیک اراضی بایر از اراضی ساختمانی دارد. در این پژوهش، درجه امنیت اکولوژیکی برای اراضی بایر و ساخته شده، از طریق این عامل تفکیک گردید.

شاخص UTFVI که از تفاضل دمای سطح زمین (LST) محاسبه می‌شود، اختلاف دما در بین هر نوع کاربری زمین را با دقت بسیار زیاد نشان می‌دهد. اصولاً زمین‌های ساخته شده از زمین‌های بایر، آیش، کشاورزی و جنگل و آب دمای سطحی بیشتری دارند که دلیل اصلی آن استفاده از مصالح ساختمانی و عدم وجود رطوبت در مواد بازتاب‌دهنده دما است. این پارامتر نقش هر نوع کاربری را با جزئیات زیاد در تفاوت دما و امنیت اکولوژیکی نشان می‌دهد و به عنوان عامل هفتم وارد مدل‌سازی شد. شاخص NDMI که بازتاب طیفی باندهای چندزمانه تصویر لندست است، بیانگر وجود رطوبت در کاربری‌های زمین است. وجود رطوبت بیانگر وجود آب در محل است و نقش مثبتی در افزایش امنیت اکولوژیکی دارد. اراضی ساختمانی و زمین‌های بایر رطوبت بسیار پایینی دارند، اما اراضی جنگلی و کشاورزی رطوبت بیشتری داشته و برای موجودات زنده بهتر از سایر کاربری‌ها هستند. اختصاص‌دهی متغیرهای مستقل به عامل‌ها بر اساس مقادیر و درصد ویژه آنها و همبستگی آنها با هر عامل به دست آمد و نتایج اختصاص‌دهی عامل به متغیر در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. درصد مقادیر ویژه عوامل موثر در امنیت اکولوژی در منطقه مورد مطالعه

عامل	فراوانی تجمعی	r	درصد مقادیر ویژه	متغیرهای مستقل (عامل)	
PC ₁	۶۶/۱	۰/۶۶۱	۶۶	شاخص نسبت پوشش گیاهی	PV
PC ₂	۸۳/۵	۰/۱۷۳	۱۷	شاخص شدت گسترش شهری	UEII
PC ₃	۹۱/۷	۰/۰۸۲	۸	شاخص نرمال شده پوشش گیاهی و خاک	MSAVI
PC ₄	۹۶/۹	۰/۰۵۲	۵/۲	تراکم جاده	Road density
PC ₅	۹۸/۸	۰/۰۱۸	۱/۸	شاخص اراضی ساخته شده	NDBI
PC ₆	۹۹/۹	۰/۰۱۱	۱/۱	شاخص رطوبت زمین	NDMI
PC ₇	۱۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۲	شاخص دمای سطح زمین	UTFVI
PC ₈	۱۰۰	۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۴	شاخص خشکی ناشی از ساخت‌وساز	NDBSI

در نهایت رابطه اصلی محاسبه درجه امنیت اکولوژیکی شهری در محدوده مورد مطالعه به شرح زیر به دست آمد:

$$UESI = 1 - (0.661PC_1 + 0.173 PC_2 + 0.082PC_3 + 0.052PC_4 + 0.018PC_5 + 0.011PC_6 + 0.002PC_7 + 0.0004PC_8) \quad \text{رابطه (۶)}$$

شکل ۵ نشان دهنده نقشه نهایی درجه امنیت اکولوژیکی محدوده مورد مطالعه در جلگه خزر است. نقشه رستری به صورت فازی بین صفر و یک به دست آمد و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی به سه دسته امنیت بالا، امنیت متوسط و امنیت پایین طبقه‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد که ۷۲/۷ درصد از جلگه خزر دارای امنیت اکولوژیکی بالا است که مربوط به پوشش جنگلی و اراضی کشاورزی است. ۱۵/۹ درصد نیز امنیت اکولوژیکی متوسط دارد که مربوط به اراضی اطراف شهرها و زمین‌های بایر است. این بخش‌ها، نه مانند زمین‌های سبز شرایط مطلوبی برای موجودات زنده دارند و نه مانند مراکز شهری شرایط بسیار حادی دارند؛ در واقع از لحاظ امنیت اکولوژیکی در محدوده متوسط قرار دارند. مراکز شهری، جاده‌ها و روستاها امنیت اکولوژیکی پایینی دارند و حدود ۱۱/۴ درصد از منطقه را پوشش می‌دهد.

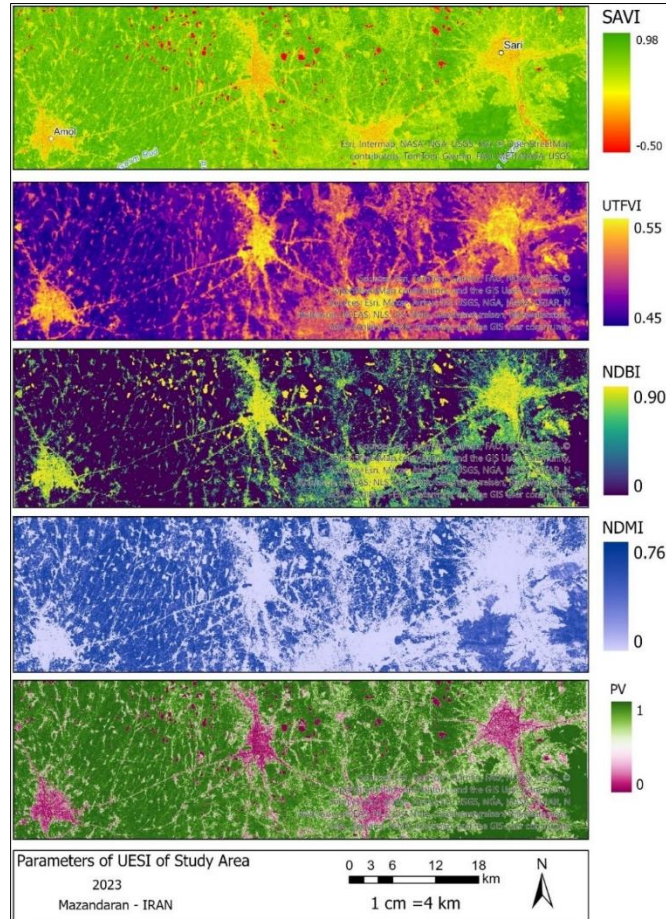
جنگل هیرکانی در بالادست جلگه خزر به دلیل داشتن پوشش گیاهی متنوع، توانایی و ظرفیت بُرد زیستگاهی بیشتری نسبت به سایر کاربری‌ها داشته و تنوع زیستی در آن زیاد است. اراضی کشاورزی نسبت به جنگل امنیت اکولوژیکی کمتری دارند، اما باز هم به دلیل وجود پوشش گیاهی، دمای معتدل، وجود رطوبت در خاک و سطح زمین، عدم وجود خطرات

جاده‌ای و انسانی و همچنین عدم وجود آلودگی صوتی و آلودگی هوا و نوری، امنیت اکولوژیکی مناسبی برای موجودات زنده دارند که همراه با اراضی جنگلی در رتبه امنیت بالا قرار گرفتند.

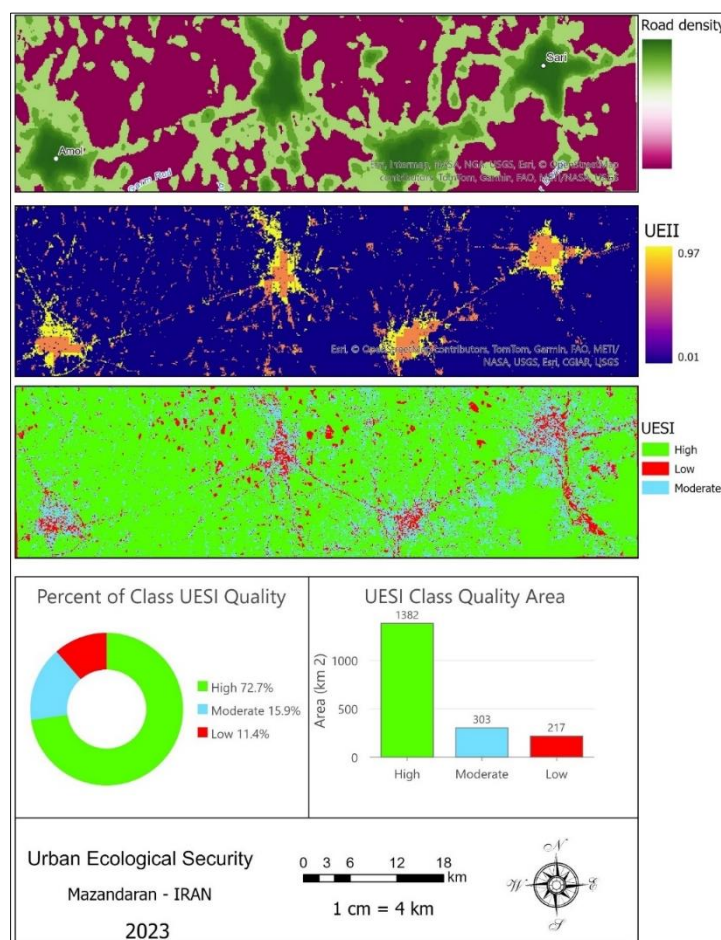
اراضی بایر و مخلوط زمین‌های شهری - کشاورزی، امنیت کمتری نسبت به زمین‌های کشاورزی و اراضی جنگلی دارند، چرا که آلودگی محیط و دمای هوا نسبت به زمین‌های کشاورزی و جنگلی بیشتر بوده و پوشش گیاهی ضعیف‌تر است. رطوبت و آب در خاک و سطح زمین کم است و تراکم جاده‌ای نیز در آنها زیاد است. این عوامل باعث شده تا درجه امنیت اکولوژیکی این اراضی که عمدتاً مربوط به زمین‌های اطراف شهرها است، کمتر از اراضی جنگلی و کشاورزی باشد.

ضعیف‌ترین درجه امنیت اکولوژیکی مربوط به هسته مرکزی شهرها است. وجود انواع آلودگی‌ها، دمای بالا و عدم وجود رطوبت و آب در خاک و سطح زمین، شلوغی و تراکم بالای جاده‌ای و عدم وجود پوشش گیاهی قوی، منجر به کاهش امنیت اکولوژیکی می‌شود. موجودات زنده از محیط‌های شهری فرار کرده و به سمت اراضی جنگلی و کشاورزی می‌روند که دارای امنیت محیطی و جانی برای موجودات زنده است. بسیاری از پرندگان و حیوانات در سیر غذا و آب هستند، درحالی‌که در شهرها علاوه بر عدم وجود غذا و آب، شکارچیان این حیوانات و پرندگان را شکار می‌کنند؛ بنابراین موجودات زنده در هسته‌های شهری امنیت اکولوژیکی نداشته و به سمت جنگل و یا اراضی کشاورزی مهاجرت می‌کنند.

بنابراین، می‌توان گفت که بیشترین درصد امنیت بالای اکولوژیکی به ترتیب در بابل، آمل، قائم‌شهر و ساری مشاهده شد. امنیت متوسط و کم نیز به ترتیب در ساری، قائم‌شهر، آمل و بابل بود. کل منطقه مورد مطالعه دارای ۷۲/۷ درصد امنیت اکولوژیکی بالا، ۱۵/۹ درصد امنیت متوسط و ۱۱/۴ درصد امنیت اکولوژیکی پایین است. امنیت بالا مربوط به زمین‌های جنگلی و کشاورزی، امنیت متوسط مربوط به زمین‌های بایر و مخلوط زمین شهری-کشاورزی که در حومه شهرها و روستاها وجود دارد و امنیت پایین نیز مربوط به هسته مرکزی شهرها می‌باشد.



شکل ۴. نقشه مولفه‌های ورودی به مدل جهت تهیه درجه امنیت اکولوژیکی جلگه خزر در سال ۲۰۲۳

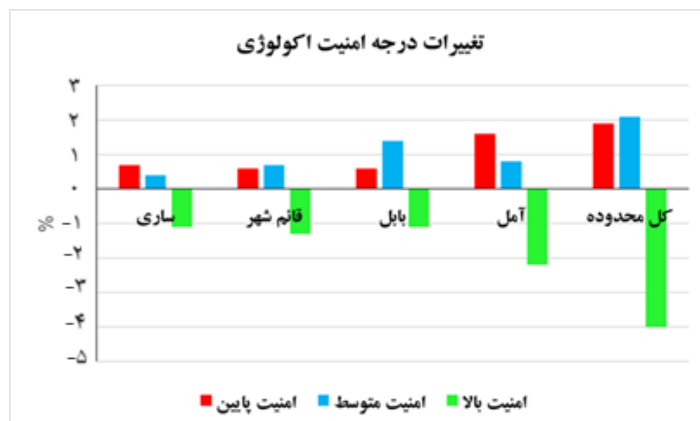


شکل ۵. نقشه نهایی درجه امنیت اکولوژیکی جلگه خزر در سال ۲۰۲۳

در ادامه، درجه امنیت اکولوژیکی سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۰۱ مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در کل محدوده مورد مطالعه حدود ۴ درصد از درجه امنیت اکولوژیکی زیاد کاهش یافته و ۲/۱ و ۱/۹ درصد بر امنیت متوسط و پایین افزوده شده است. در بین شهرهای مورد مطالعه، بیشترین کاهش در مناطق با امنیت بالای اکولوژیکی در شهر آمل و بیشترین افزایش در نواحی با امنیت پایین اکولوژیکی نیز در شهر آمل مشاهده گردید. بنابراین می‌توان گفت که بیشترین خطر برای امنیت اکولوژیکی محدوده شهری آمل در بخش غربی این زنجیره شهری در جلگه خزر رخ داده است (جدول ۶ و شکل ۶).

جدول ۶. تغییرات درجه امنیت اکولوژیکی شهری جلگه خزر در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۰۱

منطقه شهری	سال	امنیت بالا	امنیت متوسط	امنیت پایین
ساری	۲۰۰۱	۹۱/۳	۴/۵	۴/۲
	۲۰۲۳	۹۰/۲	۴/۹	۴/۹
قائم‌شهر	۲۰۰۱	۹۴/۶	۲/۱	۳/۳
	۲۰۲۳	۹۳/۳	۲/۸	۳/۹
بابل	۲۰۰۱	۹۶/۳	۱/۵	۱/۲
	۲۰۲۳	۹۵/۲	۲/۹	۱/۸
آمل	۲۰۰۱	۹۶/۵	۱/۱	۲/۴
	۲۰۲۳	۹۴/۳	۱/۹	۳/۸
کل محدوده	۲۰۰۱	۷۶/۷	۱۳/۸	۹/۵
	۲۰۲۳	۷۲/۷	۱۵/۹	۱۱/۴



شکل ۶. تغییرات درجه امنیت اکولوژیکی شهرهای جلگه خزر طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

بحث

امنیت اکولوژیکی به‌عنوان یک عامل مهم در تضمین امنیت و بقای انسان شناخته می‌شود و ارتباط نزدیکی با توسعه پایدار دارد. این مفهوم نشان‌دهنده حفظ سلامت و پایداری اکوسیستم‌ها به گونه‌ای است که بتواند نیازهای زیستی انسان‌ها را در کنار حفظ تعادل زیست‌محیطی فراهم کند (Liu et al., 2024). رشد شهری یک محرکه فشار قابل توجه است که ساختارها و عملکردهای اکولوژیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مطالعات قبلی، نشان داده شده است که شرایط محیطی مانند سلامت اکوسیستم (Cui et al., 2019) و کیفیت اکولوژیکی (Hang et al., 2020) و همچنین امنیت اکولوژیکی (Yang et al., 2025) و الگوی آن (Zhao et al., 2024) تا حد زیادی تحت تأثیر رشد شهری قرار می‌گیرند. علاوه بر فضاهای اکولوژیکی، شهرنشینی بر رشد جمعیت، توسعه اجتماعی - اقتصادی و توسعه زیرساخت‌ها نیز تأثیر می‌گذارد و این عوامل به شدت مسئول تغییر فضاهای اکولوژیکی در محیط شهری هستند (Peng et al., 2015). یکی از تأثیرات معمول شهرنشینی بر فضاهای اکولوژیکی، ساخت‌وساز بی‌رویه است که مناظر و امنیت اکولوژیکی را تخریب می‌کند (Hua et al., 2017). از جمله راه‌حل‌های تقویت امنیت اکولوژیکی در مناطقی که با توسعه شهری روبرو هستند، ایجاد و تقویت پیوستگی و شبکه مناطق شهری - روستایی است (Zhang et al., 2025). همچنین حفظ و بهبود سبزی‌نگی و مدیریت توسعه شهری پایدار، به‌ویژه در مناطقی با جذابیت گردشگری، از عوامل دیگر ارتقای امنیت اکولوژیکی محسوب می‌شود که می‌تواند توسط شاخص‌های ارزیابی اکولوژیکی همچون شاخص ارائه شده در این مطالعه، به شکلی علمی و کاربردی پشتیبانی شود.

نتایج این پژوهش نشان داد که در طی ۲۳ سال در جلگه خزر افزایش قابل توجهی در مناطق ساخته شده روی داده و کاهش قابل توجهی نیز در پوشش گیاهی به‌ویژه مناطق جنگلی ثبت شده است. از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳، مناطق ساخته شده بیش از ۳۱ درصد افزایش یافته و پوشش گیاهی حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است. بنابراین، گسترش شهری و از بین رفتن پوشش گیاهی را می‌توان به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب محیط‌زیست طبیعی در جلگه خزر نسبت داد. از جمله تأثیرات منفی ساخت و ساز و فعالیت‌های انسانی در نواحی شهری می‌توان به ایجاد جزایر حرارتی شهری (UHI) (Chakraborty & Lee, 2019)، از دست رفتن خدمات اکوسیستمی (Das & Das, 2019)، تخریب سلامت اکوسیستم و امنیت اکولوژیکی اشاره داشت.

در جلگه خزر، مطالعاتی در مورد تغییرات سطح زمین انجام شد و این مطالعات وخامت چشمگیر فضاهای اکولوژیکی (مانند مناطق تالابی، پوشش گیاهی و آبراه‌ها) و افزایش سریع سطح غیرقابل نفوذ را گزارش کردند (سادات و همکاران، ۱۴۰۳). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که عامل انسانی به‌طور معناداری پوشش گیاهی استان، به‌ویژه در مناطق توریستی، اطراف کلان‌شهرها، و ارتفاعات نزدیک جاده‌های اصلی را کاهش داده است. افزایش ترافیک، تغییر کاربری اراضی و ساخت و سازهای تفریحی از دلایل اصلی تخریب پوشش گیاهی بوده و ادامه این روند تهدید جدی برای منابع آب‌و‌خاک و بوم‌سامانه‌های خزری ایجاد خواهد کرد (دستی گردی و همکاران، ۱۴۰۳). کاهش وسعت فضاهای اکولوژیکی به دلیل گسترش شهرها و

تبدیل این بخش‌ها به سایر مناظر نیمه طبیعی و مصنوعی، تأثیر زیادی بر کیفیت اکولوژیکی محیط شهری داشته است. مطالعه‌ای که توسط چن و همکاران در مورد تراکم شهری دلتای رودخانه مروارید در چین انجام شد، کاهش کلی کیفیت اکولوژیکی را نشان داد (Chen et al., 2020). همچنین، هو و شو، مطالعه‌ای را در شهر فوژو (چین) برای ارزیابی کیفیت اکولوژیکی شهری انجام دادند و زوال چشمگیر کیفیت اکولوژیکی را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ محاسبه کردند (Hu & Xu, 2018). در این مطالعه نیز به خوبی مشخص شد که امنیت اکولوژیکی شهری در جلگه خزر متعاقباً از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ کاهش یافته است؛ به گونه‌ای که حدود ۴ درصد از امنیت بالای اکولوژیکی کاسته شده و ۲/۱ درصد به امنیت متوسط و ۱/۹ درصد نیز به امنیت پایین اکولوژیکی افزوده شده است.

در این مطالعه، از شاخص‌های طیفی مبتنی بر سنجش‌ازدور برای توسعه مدل UESI در جلگه خزر از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. به طور خاص، سبزیگی، خشکی، گرما و رطوبت خاک در کارهای مدل‌سازی اکولوژیکی با تمرکز بر سلامت اکوسیستم (Das et al., 2019)، آسیب‌پذیری اکولوژیکی (Boori et al., 2021)، تنش اکولوژیکی (Liu & Li., 2025)، کیفیت اکولوژیکی (Hu & Xu, 2018) در نظر گرفته شدند. در چین، این پارامترهای مبتنی بر سنجش از دور به طور گسترده برای تجزیه و تحلیل اکولوژیکی مورد استفاده قرار گرفتند. به عنوان مثال، سو و همکاران (۲۰۱۹) مطالعه‌ای را بر روی ۱۴ شهر چین انجام دادند که در آن مدل کیفیت اکولوژیکی توسعه داده شد (Su et al., 2019). به طور مشابه، چن و همکاران و منگ و همکاران از شاخص‌های بیوفیزیکی مبتنی بر سنجش از دور برای بررسی کیفیت اکولوژیکی شهرهای چین استفاده کردند (Chen et al., 2020; Meng et al., 2021). بنابراین، براساس مطالعات پیشین می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای بیوفیزیکی مبتنی بر سنجش از دور مانند NDSI، NDVI، LST و رطوبت، شاخص‌های مناسبی برای انعکاس وضعیت‌های اکولوژیکی مانند آسیب‌پذیری اکولوژیکی، تنش، کارایی و کیفیت هستند. پارامترهای بیوفیزیکی مبتنی بر سنجش از دور همچنین می‌توانند برای توسعه یک چارچوب UESI خاص هر منطقه مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش با مطالعات دیگر در زمینه امنیت اکولوژیکی هم‌راستا است. در سایر مطالعات نیز، نسبت اراضی ساخته شده به‌عنوان یکی از شاخص‌های مؤثر در کاهش امنیت اکولوژیکی در مجموعه‌های شهری معرفی شده (Peng et al., 2021) و بر نقش مهم زیرساخت‌های سبز و خدمات اکوسیستمی در ارتقای امنیت اکولوژیکی مجموعه‌های شهری تأکید شده است (Chen et al., 2022). همچنین، محدودسازی گسترش شهر (Zhao et al., 2024) یکی از راهکارهای بهبود وضعیت امنیت اکولوژیکی دانسته شده است که همه این موارد مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تلاشی برای توسعه مدل‌سازی درجه امنیت اکولوژیکی برای زنجیره شهری در جلگه خزر در استان مازندران، انجام شده است که در این راستا، امنیت اکولوژیکی در یک محدوده زمانی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ ارزیابی شد. از نتایج بدست‌آمده در این تحقیق، می‌توان به چند مورد قابل توجه اشاره کرد: امنیت اکولوژیکی در جلگه خزر در ۲۳ سال گذشته رو به وخامت بوده است. مساحت نواحی دارای امنیت اکولوژیکی ضعیف در سال ۲۰۰۱، ۹/۵ درصد بود که در سال ۲۰۲۳ به ۱۱/۴ درصد افزایش یافت. مناطقی با امنیت اکولوژیکی خوب از ۷۶/۷ درصد (سال ۲۰۰۱) به ۷۲/۷ درصد (سال ۲۰۲۳) کاهش یافت. عمده‌ترین افزایش در وسعت مناطق با امنیت اکولوژیکی ضعیف در نواحی شهری رخ داده است. به دلیل تأثیر چشمگیر عوامل سبزیگی و تراکم ساختمان‌های شهری بر شاخص امنیت اکولوژیکی، ضروری است اولاً در مقیاس کلان، از گسترش بی‌رویه نواحی شهری و تغییر کاربری زمین‌های با پوشش طبیعی، مزارع و باغات به اراضی ساخته شده، شهرک‌ها و شهرها جلوگیری شود و با توجه به وجود نیاز فزاینده به ساخت و ساز در منطقه به علت جذابیت‌های گردشگری، برای این مسئله برنامه ریزی دقیق صورت گیرد. در مقیاس‌های کوچکتر لازم است در مدیریت شهری به بهبود پوشش گیاهی و کنترل توسعه ساخت‌وساز توجه ویژه‌ای وجود باشد. بنابراین، توصیه می‌شود شاخص امنیت اکولوژیکی توسعه‌یافته در این مطالعه به‌عنوان ابزاری مؤثر در برنامه‌ریزی و مدیریت شهری پایدار در جلگه خزر به کار گرفته شود تا ضمن کاهش مخاطرات محیط‌زیستی، پایه‌ای علمی برای اتخاذ سیاست‌های حفاظت از اکوسیستم‌های شهری ایجاد گردد.

نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌تواند به عنوان مرجع نظری برای مدیریت جامع امنیت اکولوژیکی شهری در جلگه خزر به کار رود. چرا که این مطالعه نمونه‌ای منحصربه‌فردی از چگونگی توسعه شاخص امنیت اکولوژیکی برای مناطق شهری در منطقه مورد مطالعه ارائه داده است که در شرایط اخیر که گسترش سریع شهرها، مجموعه‌ای از مشکلات محیط‌زیستی مانند آلودگی آب‌های سطحی، تخریب سلامت و خدمات اکوسیستمی را به همراه داشته است می‌تواند برای توسعه پایدار شهری مورد استفاده برنامه‌ریزان قرار گیرد؛ بنابراین، این مطالعه پیشنهاد می‌کند که شاخص امنیت اکولوژیکی ارائه شده، در برنامه‌ریزی چشم‌انداز و چارچوب تصمیم‌گیری در آینده در مناطق شهری جلگه خزری ادغام و پیاده‌سازی شود.

منابع

- دستی گردی، مرتضی؛ نادى، مهدى؛ شامگانى، مشهدى، بهاره؛ حاتمی پور، محدثه؛ مهدوی امرئی، امید (۱۴۰۳). تحلیل روند پوشش گیاهی در استان مازندران با تأکید بر تغییرات کاربری اراضی با استفاده از سری زمانی NDVI سنجنده مودیس. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۵ (۲)، ۱۰۵-۱۱۸. <https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.105>
- سادات، مهدیس؛ ذوقی، محمود؛ امیری، محمدجواد (۱۴۰۳). بررسی اثرهای برخی از شاخص‌های اکولوژیکی لکه‌های جنگلی بر روی عرضه خدمات اکوسیستمی منتخب (منطقه مورد مطالعه: بخش شرقی استان گیلان). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۵ (۱)، ۸۹-۱۱۰. <https://doi.org/10.22108/GEP.2023.138399.1595>
- کنعانی، مریم؛ شیخ زین الدین، آذر (۱۴۰۳). ارزیابی امنیت اکولوژیکی استان فارس بر مبنای ردپای اکولوژیکی. محیط‌شناسی، ۵۰ (۴)، ۵۳۹-۵۶۱. <https://doi.org/10.22059/JES.2025.384447.1008546>

References

- Ahmed, N., Khan, T. I., & Augustine, A. (2018). Climate change and environmental degradation: a serious threat to global security. *European Journal of Social Sciences Studies*, 3 (1), 161-172. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1307227>.
- Boori, M. S., Choudhary, K., Paringer, R., & Kupriyanov, A. (2021). Spatiotemporal ecological vulnerability analysis with statistical correlation based on satellite remote sensing in Samara, Russia. *Journal of Environmental Management*, 285, 112138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112138>.
- Cai, C., Li, J., & Wang, Z. (2024). Long-Term Ecological and Environmental Quality Assessment Using an Improved Remote-Sensing Ecological Index (IRSEI): A Case Study of Hangzhou City, China. *Land*, 13(8), 1152. <https://doi.org/10.3390/land13081152>.
- Chakraborty, T., & Lee, X. (2019). A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.015>.
- Chen, J., Wang, S., & Zou, Y. (2022). Construction of an ecological security pattern based on ecosystem sensitivity and the importance of ecological services: A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 136, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108688>.
- Chen, X., Li, F., Li, X., Hu, Y., & Wang, Y. (2020). Mapping ecological space quality changes for ecological management: A case study in the Pearl River Delta urban agglomeration, China. *Journal of environmental management*, 267, 110658. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110658>.
- Cui, N., Feng, C. C., Han, R., & Guo, L. (2019). Impact of urbanization on ecosystem health: A case study in Zhuhai, China. *International journal of environmental research and public health*, 16(23), 4717. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234717>.
- Das, M., & Das, A. (2019). Dynamics of Urbanization and its impact on Urban Ecosystem Services (UESs): A study of a medium size town of West Bengal, Eastern India. *Journal of Urban Management*, 8(3), 420-434. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.03.002>.
- Dastigerdi, M., Nadi, M., Shamgani Mashhadi, B., Hatamipour, M., & Mahdavi Amrei, O. (2024). Analysis of vegetation trend in mazandaran province with an emphasis on land use changes

- using MODIS NDVI Time Series. *J Watershed Manage Res.* 15(2), 105-118. <https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.105> (In Persian).
- Diep, N. T. H., Nguyen, N. T., Hieu, D. C., Huong, N. T. T., & Trang, D. H. (2024, May). Environmental Quality Monitoring Using Remote Sensing Ecological Index (RSEI) in Can Tho City, Vietnam. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1345, No. 1, p. 012018). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1345/1/012018>.
- Gao, X., Wang, G., Innes, J. L., Zhao, Y., Zhang, X., Zhang, D., & Mi, F. (2021). Forest ecological security in China: A quantitative analysis of twenty five years. *Global Ecology and Conservation*, 32, e01821. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01821>.
- Grafius, D. R., Corstanje, R., & Harris, J. A. (2018). Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. *Landscape ecology*, 33(4), 557-573. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0618-z>.
- Hang, X., Li, Y., Luo, X., Xu, M., & Han, X. (2020). Assessing the ecological quality of Nanjing during its urbanization process by using satellite, meteorological, and socioeconomic data. *Journal of Meteorological research*, 34(2), 280-293. <https://doi.org/10.1007/s13351-020-9150-6>.
- Hu, X., & Xu, H. (2018). A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China. *Ecological Indicators*, 89, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.006>.
- Hua, L., Shao, G., & Zhao, J. (2017). A concise review of ecological risk assessment for urban ecosystem application associated with rapid urbanization processes. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 24(3), 248-261. <https://doi.org/10.1080/13504509.2016.1225269>.
- Huang, J., Yu, H., Han, D., Zhang, G., Wei, Y., Huang, J., ... & Ren, Y. (2020). Declines in global ecological security under climate change. *Ecological Indicators*, 117, 106651. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106651>.
- Indrawati, L., Murti, B. S. H., Rachmawati, R., & Aji, D. S. (2020, March). Effect of urban expansion intensity on urban ecological status utilizing remote sensing and GIS: A study of Semarang-Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 451, No. 1, p. 012018). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/451/1/012018>.
- Jie, Y., Shiyong, W., Jie, Z., Jing, Z., & Wenliu, Z. (2024). Optimisation of ecological security patterns in ecologically transition areas under the perspective of ecological resilience— a case of Taohe River. *Ecological Indicators*, 166, 112315. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112315>.
- Kanani, M., & Sheikhzeinoddin, A. (2025). Assessment of ecological security of fars province based on ecological footprint. *Journal of Environmental Studies*, 50(4), 539-561. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.384447.1008546> (In Persian)
- Kang, J., Zhang, X., Zhu, X., & Zhang, B. (2021). Ecological security pattern: A new idea for balancing regional development and ecological protection. A case study of the Jiaodong Peninsula, China. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01472. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01472>.
- Li, L., Fu, M., Zhu, Y., Kang, H., & Wen, H. (2024). The current situation and trend of land ecological security evaluation from the perspective of global change. *Ecological Indicators*, 167, 112608. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112608>.
- Liu, C., Li, W., Xu, J., Zhou, H., Wang, W., & Wang, H. (2024). Temporal and spatial variations of ecological security on the northeastern Tibetan Plateau integrating ecosystem health-risk-services framework. *Ecological Indicators*, 158, 111365. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111365>.
- Liu, Q., & Li, Y. (2025). Examining the Spatiotemporal Evolution of Land Use Conflicts from an Ecological Security Perspective: A Case Study of Tianshui City, China. *Sustainability*, 17(5), 2253. <https://doi.org/10.3390/su17052253>.
- Meng, F., Guo, J., Guo, Z., Lee, J. C., Liu, G., & Wang, N. (2021). Urban ecological transition: The

- practice of ecological civilization construction in China. *Science of the Total Environment*, 755, 142633. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142633>.
- Peng, C., Li, B., & Nan, B. (2021). An analysis framework for the ecological security of urban agglomeration: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128111>.
- Peng, J., Liu, Y., Wu, J., Lv, H., & Hu, X. (2015). Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China. *Landscape and Urban Planning*, 143, 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.007>.
- Sadat, M., Zoghi, M., & Amiri, M. J. (2024). Investigating the effects of some ecological indicators of forest patches on the supply of selected ecosystem services (Study Area: Eastern Part of Gilan Province). *Geography and Environmental Planning*, 35(1), 89-110. <https://doi.org/10.22108/gep.2023.138399.1595> (In Persian).
- Singh, M. P., Gayathri, V., & Chaudhuri, D. (2022). A simple data preprocessing and postprocessing techniques for SVM classifier of remote sensing multispectral image classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 7248-7262. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3201273>.
- Su, M., Xie, H., Yue, W., Zhang, L., Yang, Z., & Chen, S. (2019). Urban ecosystem health evaluation for typical Chinese cities along the Belt and Road. *Ecological Indicators*, 101, 572-582. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.070>.
- Sun, M., Li, X., Yang, R., Zhang, Y., Zhang, L., Song, Z., ... & Zhao, D. (2020). Comprehensive partitions and different strategies based on ecological security and economic development in Guizhou Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122794. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122794>.
- Tzotsos, A., & Argyalas, D. (2008). Support vector machine classification for object-based image analysis. In *Object-based image analysis: Spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications* (pp. 663-677). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_36.
- Wen, J., & Hou, K. (2021). Research on the progress of regional ecological security evaluation and optimization of its common limitations. *Ecological Indicators*, 127, 107797. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107797>.
- Yang, J., Zheng, J., Lu, B., Han, C., Li, C., Wu, J., ... & Harris, P. (2025). How to quantify the impact of urban expansion on ecological security in Northwest China. *Journal of Cleaner Production*, 526, 146622. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146622>.
- Zhang, L., Wan, Y., Sun, Y., He, G., Lei, X., Wei, X., & Jin, G. (2025). Optimizing ecological security patterns in a megacity by enhancing urban-rural connectivity: Insights from Wuhan, China. *Applied Geography*, 176, 103535. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2025.103535>.
- Zhang, W., Zhang, W., Ji, J., & Chen, C. (2024). Urban Ecological Quality Assessment Based on Google Earth Engine and Driving Factors Analysis: A Case Study of Wuhan City, China. *Sustainability*, 16(9), 3598. <https://doi.org/10.3390/su16093598>.
- Zhang, Y., Balzter, H., Zou, C., Xu, H., & Tang, F. (2015). Characterizing bi-temporal patterns of land surface temperature using landscape metrics based on sub-pixel classifications from Landsat TM/ETM+. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 42, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.007>.
- Zhao, Y., He, L., Bai, W., He, Z., Luo, F., & Wang, Z. (2024). Prediction of ecological security patterns based on urban expansion: A case study of Chengdu. *Ecological Indicators*, 158, 111467. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111467>.