J. RS. GEOINF. RES. 4(2): 251-278, Summer & Autumn 2026

Journal of Remote Sensing and Geoinformation Research
(JRSGR)
Homepage: jrsgr.sru.ac.ir

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Mapping Land-Use Change Intensity and Spatial Correlates Using Transition Analysis and Explainable Machine Learning in Ramsar, Iran

O. Ghaffari Aliabad

Department of Geomatics Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Received: 03 May 2026
Reviewed: 13 June 2026
Revised: 27 September 2026
Accepted: 29 September 2026

KEYWORDS:
Land-use Change
Intensity Analysis
Urban Expansion
Spatial Clustering
Logistic Regression
Explainable Machine Learning
Ramsar

* Corresponding author
ghaffari@znu.ac.ir
(+98912) 4262218

ABSTRACT

Background and Objectives: Coastal–mountain landscapes are shaped by the simultaneous pressures of settlement growth, agriculture, tourism, accessibility, ecological protection, and pronounced topographic constraints. Under these conditions, net change alone provides an incomplete account of land-use/land-cover dynamics: it cannot distinguish persistence from gross exchange, identify the source classes contributing to new built-up land, describe the spatial configuration of expansion, or determine whether statistical associations remain informative when observations are separated in space. This study quantified the amount, direction, intensity, spatial configuration, clustering, and conditional spatial associations of mapped land-use/land-cover transitions in Ramsar County, northern Iran, between 2016 and 2025. The analysis addressed five related questions within a single auditable framework: how much mapped change occurred; which classes experienced the greatest gains, losses, and exchanges and at what intensities; whether new built-up patches occurred as infill, edge-expansion, or outlying growth; where change formed statistically significant spatial clusters; and how effectively linear and nonlinear models discriminated four dominant mapped transitions.

Methods: Two co-registered land use/land cover rasters for 2016 and 2025, with a spatial resolution of 10 m, were analyzed over a common valid extent of 72,603.52 ha. Both maps comprised seven classes: water, built-up, cropland, orchard, forest, rangeland, and bare land. Cell-by-cell comparison of the two maps was used to construct a transition matrix and calculate persistence, gross gains, gross losses, net change, exchanges, and total change. Intensity analysis at the interval, category, and transition levels compared observed rates with a uniform annual reference rate. Newly built-up cells were converted into patches using eight-neighbor connectivity, and the Landscape Expansion Index with an original 10-m buffer was used to classify patches into edge-expansion, infilling, and outlying growth. Change rates were also calculated across gradients of elevation, slope, and Euclidean distance from the coast, roads, baseline built-up areas, and rivers. To examine spatial concentration, total change density was aggregated within an approximately 500-m grid, and the local Getis–Ord Gi* statistic was calculated to identify hot and cold spots at the 95% and 99% significance levels. Four transitions—rangeland to bare land, orchard to forest, forest to orchard, and orchard to rangeland—were selected for modeling based on mapped area and a minimum number of occurrences. For each transition, logistic regression with standardized variables and heteroskedasticity-consistent errors was used to estimate conditional odds ratios, and model transferability was assessed using five spatial folds based on 2-km blocks. Extreme Gradient Boosting was employed as a nonlinear complement, and SHAP values were used to summarize the contribution of variables to model predictions. Finally, accounting checks were performed to verify the common mask, class coverage, transition totals, model sample sizes, and consistency of tabulated outputs.

Findings: Of the common valid area of 72,603.52 ha, 53,450.72 ha remained on the diagonal of the transition matrix, while 19,152.80 ha underwent a class transition; thus, 73.62% of the landscape was stable in terms of mapped labels, whereas 26.38% experienced mapped change. The uniform annual change intensity was 2.931%. Bare land showed the largest net gain, with an increase of 6,935.97 ha, while the rangeland-to-bare-land mapped transition, covering 6,707.51 ha, represented the largest off-diagonal flow associated with this pattern. In contrast, rangeland recorded the largest net loss, amounting to 5,544.90 ha. Orchard and forest exhibited substantial two-way exchanges, with their gross flows considerably exceeding their net changes. The built-up class gained 2,299.71 ha and lost 907.36 ha, resulting in a net increase of 1,392.35 ha. Among the 29,968 newly built-up patches, edge expansion accounted for 67.19% of the added area, whereas outlying patches represented 31.62% of the total number of patches but only 14.93% of the added area. The change rate decreased continuously with increasing distance from baseline built-up areas, declining from 37.53% at 0–100 m to 8.05% at 2,000–5,000 m. Along the elevation gradient,

the highest change rate, 46.13%, was observed at 100–300 m. Of the 3,067 analytical grid cells, 18.75% were classified as hot spots and 20.22% as cold spots, and the correlation between change density and the standardized Gi* score was 0.838. The area under the receiver operating characteristic curve (AUC) for logistic regression under block cross-validation ranged from 0.722 to 0.774. For Extreme Gradient Boosting, AUC values obtained from a random holdout ranged from 0.826 to 0.893; however, because the evaluation designs were not equivalent, this difference cannot be attributed solely to the superiority of one algorithm over the other. Elevation had the highest mean absolute SHAP contribution across all four models, although the direction of its conditional odds ratio in logistic regression was not consistent across transitions.

Conclusions: The mapped land use/land cover change pattern in Ramsar cannot be explained solely by net changes, because a substantial proportion of the observed dynamics was associated with gross exchanges among classes. The major patterns included the mapped rangeland-to-bare-land transition, reciprocal flows between orchard and forest, net built-up expansion dominated in area by edge growth, a considerable number of outlying patches, and multi-centered clustering of change. The observed relationships with topography and accessibility also varied among transitions and were transition-specific. The accounting figures represent direct descriptions of differences between the paired maps, whereas the relationships derived from the models represent conditional, non-causal statistical associations. Furthermore, the absence of an independent accuracy assessment for the final 2025 raster means that the numerical accuracy of the reported areas should not be interpreted as equivalent to thematic certainty about the mapped changes at the parcel scale.

NUMBER OF REFERENCES	NUMBER OF FIGURES	NUMBER OF TABLES
87	10	11

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی شدت تغییر کاربری زمین و همبسته‌های مکانی با استفاده از تحلیل گذار و یادگیری ماشین تبیین‌پذیر در شهرستان رامسر

امید غفاری علی‌آباد

گروه نقشه برداری، دانشکده مهندسی ،دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: چشم‌اندازهای ساحلی–کوهستانی هم‌زمان تحت تأثیر گسترش سکونت، کشاورزی، گردشگری، دسترسی، حفاظت اکولوژیک و محدودیت‌های شدید توپوگرافی قرار دارند. در چنین محیطی، اتکا به تغییر خالص به‌تنهایی تصویر کاملی از پویایی کاربری/پوشش زمین ارائه نمی‌کند؛ زیرا ممکن است مبادلات ناخالص قابل توجه میان طبقات در مقدار خالص پنهان بماند. افزون بر این، تغییر خالص مشخص نمی‌کند زمین‌های ساخته‌شده جدید از کدام طبقات مبدأ تأمین شده‌اند، گسترش آنها چه پیکربندی مکانی داشته است و آیا روابط آماری مشاهده‌شده با متغیرهای مکانی، پس از جداسازی فضایی داده‌های آموزش و آزمون، همچنان حفظ می‌شوند. بر همین اساس، این پژوهش مقدار، جهت، شدت، پیکربندی مکانی، خوشه‌بندی و روابط مشروط مکانی گذارهای نقشه‌ای کاربری/پوشش زمین شهرستان رامسر در شمال ایران را طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵ بررسی کرد. چارچوب تحلیلی پژوهش پنج پرسش مرتبط را دنبال می‌کرد: چه مقدار تغییر نقشه‌ای رخ داده است؛ کدام طبقات بیشترین سود، زیان یا مبادله را داشته‌اند و شدت این تغییرات چگونه بوده است؛ لکه‌های ساخته‌شده جدید چه سهمی از گسترش میان‌افزا، لبه‌ای و برون‌افتاده را تشکیل داده‌اند؛ تغییرات در چه نواحی به‌صورت خوشه‌های معنادار آماری متمرکز شده‌اند؛ و مدل‌های خطی و غیرخطی چهار گذار غالب را با چه توان تفکیکی مدل‌سازی کرده‌اند.

روش‌ها: دو رستر هم‌ثبت‌شده کاربری/پوشش زمین مربوط به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۵، با تفکیک مکانی ۱۰ متر، در گستره معتبر مشترک ۷۲٬۶۰۳/۵۲ هکتار تحلیل شد. هر دو نقشه شامل هفت طبقه آب، ساخته‌شده، زراعت، باغ، جنگل، مرتع و بایر بود. مقایسه سلول‌به‌سلول دو نقشه برای تشکیل ماتریس انتقال و محاسبه پایداری، سود ناخالص، زیان ناخالص، تغییر خالص، مبادله و تغییر کل به‌کار رفت. تحلیل شدت در سطوح بازه، طبقه و گذار، نرخ‌های

تاریخ دریافت: ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ داوری: ۲۳ خرداد ۱۴۰۵
تاریخ اصلاح: ۰۵ مهر ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۰۷ مهر ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:
تغییر کاربری زمین
تحلیل شدت
گسترش شهری
خوشه بندی مکانی
رگرسیون لجستیک
یادگیری ماشین تبیین پذیر
رامسر

* نویسنده مسئول
ghaffari@znu.ac.ir
۰۹۱۲-۴۲۶۲۲۱۸

مشاهده‌شده را با نرخ مرجع یکنواخت سالانه مقایسه کرد. سلول‌های ساخته‌شده جدید با استفاده از همسایگی هشت‌جهته به لکه تبدیل شدند و شاخص گسترش منظر با بافر اصلی ۱۰ متر برای طبقه‌بندی لکه‌ها به گسترش لبه‌ای، میان‌افزا و برون‌افتاده به‌کار رفت. نرخ تغییر در بازه‌های ارتفاع، شیب و فاصله اقلیدسی از ساحل، راه، بافت ساخته‌شده مبنا و رودخانه نیز محاسبه شد. برای بررسی تمرکز مکانی، تراکم تغییر کل در شبکه‌ای با اندازه تقریبی ۵۰۰ متر تجمیع و آماره محلی گتیس–اُرد جی‌ستاره برای شناسایی لکه‌های داغ و سرد در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد محاسبه شد. چهار گذار مرتع به بایر، باغ به جنگل، جنگل به باغ و باغ به مرتع بر پایه مساحت نقشه‌ای و حداقل تعداد رخداد برای مدل‌سازی انتخاب شدند. برای هر گذار، رگرسیون لجستیک با متغیرهای استانداردشده و خطاهای سازگار با ناهمسانی واریانس، نسبت‌های شانس مشروط را برآورد کرد و انتقال‌پذیری مدل با پنج چین فضایی مبتنی بر بلوک‌های ۲ کیلومتر سنجیده شد. تقویت گرادیانی حدی به‌عنوان مکمل غیرخطی به‌کار رفت و مقادیر شاپلی سهم متغیرها را در پیش‌بینی مدل خلاصه کردند. در پایان، کنترل‌های حسابداری برای بررسی ماسک مشترک، دامنه طبقات، جمع گذارها، اندازه نمونه مدل‌ها و سازگاری خروجی‌های جدولی انجام شد.

یافته‌ها: از ۷۲٬۶۰۳/۵۲ هکتار گستره معتبر مشترک، ۵۳٬۴۵۰/۷۲ هکتار روی قطر ماتریس انتقال باقی ملند و ۱۹٬۱۵۲/۸۰ هکتار تغییر طبقه داد؛ به‌عبارت دیگر، ۷۳/۶۲ درصد چشم‌انداز از نظر برچسب نقشه‌ای پایدار بود و ۲۶/۳۸ درصد تغییر نقشه‌ای داشت. شدت یکنواخت تغییر سالانه ۲/۹۳۱ درصد به‌دست آمد. بایر با ۶٬۹۳۵/۹۷ هکتار بیشترین افزایش خالص را داشت و گذار نقشه‌ای مرتع به بایر با ۶٬۷۰۷/۵۱ هکتار، بزرگ‌ترین جریان خارج از قطر مرتبط با این الگو بود. در مقابل، مرتع با ۵٬۵۴۴/۹۰ هکتار بیشترین کاهش خالص را ثبت کرد. باغ و جنگل مبادله دوطرفه قابل توجهی داشتند، به‌طوری‌که جریان‌های ناخالص آنها بسیار بزرگ‌تر از تغییرات خالص بود. طبقه ساخته‌شده ۲٬۲۹۹/۷۱ هکتار سود و ۹۰۷/۳۶ هکتار زیان داشت و در نهایت ۱٬۳۹۲/۳۵ هکتار افزایش خالص نشان داد. در میان ۲۹٬۹۶۸ لکه ساخته‌شده جدید، گسترش لبه‌ای ۶۷/۱۹ درصد مساحت افزوده را دربر گرفت؛ درحالی‌که لکه‌های برون‌افتاده ۳۱/۶۲ درصد تعداد لکه‌ها، اما تنها ۱۴/۹۳ درصد مساحت افزوده را تشکیل دادند. نرخ تغییر با افزایش فاصله از بافت ساخته‌شده مبنا به‌طور پیوسته کاهش یافت؛ این نرخ از ۳۷/۵۳ درصد در فاصله صفر تا ۱۰۰ متر به ۸/۰۵ درصد در فاصله ۲٬۰۰۰ تا ۵٬۰۰۰ متر رسید. در گرادیان ارتفاعی نیز بیشترین نرخ تغییر، معادل ۴۶/۱۳ درصد، در بازه ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر مشاهده شد. از مجموع ۳٬۰۶۷ سلول شبکه تحلیلی، ۱۸/۷۵ درصد در گروه لکه‌های داغ و ۲۰/۲۲ درصد در گروه لکه‌های سرد قرار گرفتند و همبستگی میان تراکم تغییر و نمره استاندارد جی‌ستاره ۰/۸۳۸ بود. مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده رگرسیون لجستیک در اعتبارسنجی بلوکی بین ۰/۷۲۲ و ۰/۷۷۴ قرار داشت. برای تقویت گرادیانی حدی، این مقادیر در نگهداشت تصادفی بین ۰/۸۲۶ و ۰/۸۹۳ بود؛ بااین‌حال، به دلیل هم‌ارز نبودن طرح‌های ارزیابی، این تفاوت را نمی‌توان صرفاً به برتری یکی از الگوریتم‌ها نسبت داد. ارتفاع در هر چهار مدل بیشترین میانگین قدرمطلق سهم شاپلی را داشت، اما جهت نسبت شانس مشروط آن در رگرسیون لجستیک میان گذارها یکسان نبود.

نتیجه‌گیری: الگوی تغییر نقشه‌ای کاربری/پوشش زمین در رامسر را نمی‌توان تنها با تغییرات خالص توضیح داد، زیرا بخش قابل توجهی از پویایی مشاهده‌شده به مبادلات ناخالص میان طبقات مربوط بود. مهم‌ترین الگوها شامل گذار نقشه‌ای مرتع به بایر، جریان‌های متقابل باغ و جنگل، افزایش خالص ساخته‌شده با غلبه مساحتی گسترش لبه‌ای، تعداد قابل توجه لکه‌های برون‌افتاده و خوشه‌بندی چندکانونی تغییر بود. روابط مشاهده‌شده با توپوگرافی و دسترسی نیز میان گذارها یکسان نبود و ماهیتی گذارویژه داشت. ارقام حسابداری، توصیف مستقیم تفاوت میان دو نقشه جفت‌شده‌اند، درحالی‌که روابط حاصل از مدل‌ها، ارتباط‌های آماری مشروط و غیرعلّی را بیان می‌کنند. همچنین، نبود ارزیابی صحت مستقل برای رستر نهایی ۲۰۲۵ ایجاب می‌کند که دقت عددی مساحت‌ها با قطعیت موضوعی تغییر در مقیاس قطعه یکسان تلقی نشود.

مقدّمه

کاربری/ پوشش زمین در رامسر حاصل برهم‌کنش سکونت، کشاورزی، گردشگری، دسترسی، حفاظت و محدودیت‌های توپوگرافی در نوار باریک میان دریای خزر و دامنه‌های البرز است. در چنین محیطی، تغییر خالص هر طبقه فقط بخشی از پویایی را نشان می‌دهد و درباره مقدار مبادله میان طبقات، مبدأ زمین‌های واردشده، محل تمرکز تغییر یا ارتباط آن با ارتفاع، شیب و دسترسی اطلاعات کاملی نمی‌دهد. این پژوهش با تمرکز بر دو نقشه سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۵، تغییرات مشاهده‌شده را در چهار سطح مقدار، شدت، آرایش مکانی و ارتباط‌های آماری بررسی می‌کند و در سراسر متن میان «تغییر نقشه‌ای» و فرایند محیطی تمایز می‌گذارد.

گسترش داده‌های مشاهده زمین، نگاشت تکرارپذیر کاربری/پوشش زمین را در مقیاس‌های محلی تا جهانی ممکن کرده است. محصولات ۱۰ و ۳۰ متری، از جمله Dynamic World، Copernicus Global Land

Cover و GLC_FCS۳۰، ظرفیت پایش را افزایش داده‌اند [۱، ۲، ۳، ۴]؛ با این حال، تفاوت در تعریف طبقات، داده‌های آموزشی، فصل تصویربرداری و واحد مکانی می‌تواند در مناظر ناهمگن به ناهمخوانی منجر شود [۵]. Google Earth Engine پردازش آرشیوهای بزرگ را تسهیل می‌کند، اما اعتبار نقشه همچنان به طراحی نمونه، کنترل ابر، تعریف طبقات و ارزیابی صحت وابسته است [۶، ۷]. مرورهای طبقه‌بندی لندست و سنجش‌ازدور نیز نشان می‌دهند که انتخاب الگوریتم بدون داده مرجع و سنجش خطا، نقشه معتبر را تضمین نمی‌کند [۸، ۹، ۱۰، ۱۱]. این ملاحظه در آشکارسازی تغییر پس از طبقه‌بندی جدی‌تر است، زیرا خطای هر تاریخ مستقیماً وارد ماتریس انتقال می‌شود [۱۲، ۱۳].

مطالعات رشد شهری نشان داده‌اند که گسترش زمین به جمعیت، دسترسی، تقاضای اقتصادی و زیرساخت وابسته است و الگوی آن میان شهرها و دوره‌ها یکسان نیست [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰]. در نواحی ساحلی، عرض محدود جلگه و هم‌جواری با اکوسیستم‌های حساس، توسعه، گردشگری، آبزی‌پروری و حفاظت را در فضای مشترکی قرار می‌دهد. پژوهش‌های انجام‌شده در نیجریه، دالیان، بنگلادش، جنوب شرق آسیا و فیلیپین بر همین ناهمگنی تأکید کرده‌اند و ابزارهای پشتیبان تصمیم را برای سنجش هم‌زمان فشار توسعه و اقلیم ضروری دانسته‌اند [۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶].

در ایران، تغییرات کاربری/پوشش زمین با زنجیره مارکوف، خودکار سلولی، ژئومد، رگرسیون لجستیک و سنجه‌های منظر مطالعه شده است. مطالعات مشهد، ساری، تهران، زاهدان، مراغه، بابل، یزد و شبکه‌های سبز بر نقش نزدیکی به بافت و راه، دسترسی، قیمت زمین، فرم کالبدی و ذخیره کربن تأکید دارند [۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷]. در جنگل‌ها و مراتع نیز وضعیت ژئومورفولوژیک، مدیریت، هیدرولوژی، کیفیت آب و ویژگی‌های خاک برای تفسیر گذارها مهم گزارش شده است [۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷]. مطالعات دمای سطح، فضای سبز، توسعه ساحلی و اقلیم نیز نشان می‌دهند که پیامدهای تغییر زمین زمینه‌مندند و به مقیاس و ناهمگنی منظر وابسته‌اند [۴۸، ۴۹، ۵۰، ۵۱، ۵۲، ۵۳، ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷].

در رامسر، سه خلأ مشخص باقی می‌ماند: گزارش مساحت طبقات به‌تنهایی گردش ناخالص و مسیرهای مبدأ–مقصد را آشکار نمی‌کند؛ مساحت ساخته‌شده جدید فرم لبه‌ای، میان‌افزا و برون‌افتاده را از هم جدا نمی‌کند؛ و افراز تصادفی ممکن است عملکرد مدل را در داده‌های مکانی خوش‌بینانه نشان دهد. بنابراین، پژوهش حاضر پنج پرسش را دنبال می‌کند: ۱) چه مقدار تغییر نقشه‌ای رخ داده و کدام طبقات بیشترین سود، زیان و مبادله را داشته‌اند؟ ۲) شدت تغییر در سطح بازه، طبقه و گذار چگونه است؟ ۳) لکه‌های ساخته‌شده جدید چه آرایش هندسی دارند؟ ۴) تغییر در کدام گرادیان‌ها و خوشه‌های مکانی متمرکز است؟ و ۵) مدل‌های لجستیک و تقویت گرادیانی حدی، با توجه به طرح‌های ارزیابی متفاوت، چه ارتباط‌های مشروطی را برای چهار گذار منتخب نشان می‌دهند؟

ماتریس انتقال، پایه حسابداری تغییر در این چارچوب است. عناصر قطری، مساحت پایدار هر طبقه و عناصر خارج از قطر، مسیرهای ورود و خروج میان طبقات را نشان می‌دهند. برای طبقه j، سود ناخالص از مجموع ورودی سایر طبقات، زیان ناخالص از مجموع خروج به سایر طبقات، تغییر خالص از تفاضل سود و زیان و مبادله از دو برابر کمینه سود و زیان به‌دست می‌آید. اهمیت این تفکیک در آن است که دو طبقه می‌توانند تغییر خالص مشابهی داشته باشند، در حالی که مقدار گردش ناخالص آنها کاملاً متفاوت باشد. تحلیل شدت این حسابداری را با درنظرگرفتن فرصت موجود برای تغییر تکمیل می‌کند. در سطح بازه، نرخ سالانه کل تغییر محاسبه می‌شود؛ در سطح طبقه، شدت سود نسبت به سطحی که در پایان در اختیار طبقه مقصد نیست و شدت زیان نسبت به سطح اولیه همان طبقه سنجیده می‌شود؛ و در سطح گذار، مشخص می‌شود کدام مبدأها یا مقصدها بیش از انتظار یکنواخت وارد جریان انتقال شده‌اند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که این چارچوب تمایز میان اندازه مطلق تغییر و انتخاب‌گری نسبی را آشکار می‌کند [۵۸، ۵۹، ۶۰]، هرچند خود این تحلیل نیز به خطای طبقه‌بندی حساس است.

در پژوهش حاضر، شدت کل بازه به‌عنوان مرجع یکنواخت سالانه در نظر گرفته شد. اگر شدت زیان یک طبقه بالاتر از این مرجع باشد، آن طبقه «فعال از منظر زیان» و اگر پایین‌تر باشد «نسبتاً خفته» توصیف می‌شود؛ همین منطق برای شدت سود نیز به‌کار می‌رود. این اصطلاحات صرفاً توصیفی‌اند و نباید معنای ارزشی یا علّی به آنها نسبت داد. برای نمونه، شدت بالای سود بایر به‌تنهایی مشخص نمی‌کند که یک فرایند فیزیکی مشخص رخ داده است؛ تخریب پوشش، خاک آشکار فصلی یا آشفتگی طیفی می‌توانند از تفسیرهای ممکن باشند و تفکیک آنها به شواهد مکمل نیاز دارد. رتبه یک گذار برحسب مساحت نیز لزوماً با شدت هدف‌گیری آن یکسان نیست. گذار کم‌مساحتی که از طبقه مبدأ کوچکی رخ داده است ممکن است از نظر انتخاب‌گری نسبی شدت بالایی داشته باشد. از این منظر، مساحت و شدت دو نوع اطلاعات متفاوت برای پایش فراهم می‌کنند: یکی حجم مطلق تغییر را بیان می‌کند و دیگری میزان تمرکز نسبی آن را نسبت به فرصت موجود. در این مقاله، چهار گذار برای مدل‌سازی بر پایه مساحت و حداقل تعداد سلول انتخاب شدند تا انتخاب مدل‌ها بر جریان‌های اصلی و دارای رخداد کافی استوار باشد.

برای طبقه ساخته‌شده نیز مساحت افزوده تنها بخشی از الگوی تغییر را توصیف می‌کند. رابطه هندسی لکه‌های جدید با بافت ساخته‌شده پیشین می‌تواند نشان دهد که افزایش نقشه‌ای این طبقه عمدتاً در امتداد لبه‌های موجود رخ داده، فضای میان بافت‌های قبلی را پر کرده یا به شکل لکه‌های جداگانه ظاهر شده است. شاخص گسترش منظر، سهم حلقه پیرامون هر لکه جدید را که با ساخته‌شده موجود تماس دارد اندازه‌گیری می‌کند. مقدار صفر به لکه برون‌افتاده اختصاص می‌یابد؛ مقادیر بیش از صفر و کمتر از ۵۰ به‌عنوان گسترش لبه‌ای و مقادیر ۵۰ یا بیشتر به‌عنوان میان‌افزا طبقه‌بندی می‌شوند. این خانواده شاخص‌ها

برای توصیف فرایندهای رشد شهری و فراتر رفتن از معیارهای صرفاً فاصله‌ای معرفی شده‌اند [۶۱]. در سطحی گسترده‌تر، مطالعات مرتبط نشان داده‌اند که پیکربندی فضای سبز و فرم شهر با خدمات اکوسیستمی و ردپای عملکردی ارتباط دارد؛ از این رو، یک هکتار توسعه پیوسته در لبه و یک هکتار لکه جداگانه الزاماً ساختار فضایی یکسانی ایجاد نمی‌کنند [۶۲، ۶۳، ۶۴، ۶۵، ۶۶]. اصول برنامه‌ریزی زیرساخت سبز نیز بر حفظ پیوستگی، چندکارکردی بودن و اتصال میان مقیاس‌ها تأکید دارند [۶۷].

تحلیل گرادیان در این چارچوب برای توصیف سهم تغییر در طبقات ارتفاع، شیب و فاصله به‌کار می‌رود، بدون آنکه از ابتدا یک رابطه خطی بر داده تحمیل شود. چنین خلاصه‌ای می‌تواند آستانه‌ها یا ناهمگنی‌هایی را آشکار کند که یک ضریب واحد در مدل لجستیک قادر به نمایش کامل آنها نیست. مکمل این تحلیل، آماره محلی گتیس–اُرد جی‌ستاره است که مقدار هر سلول را در زمینه مقادیر همسایگی آن ارزیابی می‌کند. لکه داغ ۹۹ درصد با \(z≥۲/۵۸\) و لکه داغ ۹۵ درصد با \(z≥۱/۹۶\) در سطح معناداری تعیین‌شده مشخص می‌شود و لکه‌های سرد بر پایه مقادیر قرینه منفی تعریف می‌شوند. در اینجا «لکه داغ» به معنای خوشه مکانی مقادیر بالای تراکم تغییر است، نه ناحیه‌ای که علت تغییر یا شدیدترین تخریب در آن اثبات شده باشد. هم‌پوشانی چنین خوشه‌ای با حریم رودخانه، اراضی زراعی یا توسعه برون‌افتاده می‌تواند برای اولویت‌بندی بررسی‌های میدانی مفید باشد، اما به‌تنهایی مبنای نتیجه‌گیری حقوقی، مالکیتی یا علّی نیست. شواهد جهانی درباره تغییر زمین و خدمات اکوسیستمی نیز نشان می‌دهد که آثار مرتبط با کربن، زیستگاه و تنظیم آب زمینه‌مندند و برای اثبات هر یک باید اندازه‌گیری مستقلی انجام شود [۶۸، ۶۹].

در لایه مدل‌سازی، رگرسیون لجستیک ابزاری شفاف برای بررسی یک پاسخ دودویی فراهم می‌کند؛ به این معنا که لگاریتم نسبت شانس وقوع گذار با ترکیبی خطی از متغیرهای توضیحی مرتبط می‌شود. استانداردسازی متغیرها امکان مقایسه ضرایب را در مقیاسی مشترک فراهم می‌کند و نمایی هر ضریب، نسبت شانس متناظر با افزایش یک انحراف معیار در آن متغیر، مشروط به ثابت بودن سایر متغیرهای مدل، است. با این حال، روابط مکانی تغییر زمین لزوماً خطی نیستند و ممکن است شامل آستانه، انحنا و برهم‌کنش باشند. الگوریتم‌های تقویت گرادیانی درختی با ساخت متوالی درخت‌ها برای بازنمایی چنین الگوهایی مناسب‌اند [۷۰]. تقویت گرادیانی حدی در این پژوهش به‌عنوان مکمل غیرخطی رگرسیون لجستیک استفاده شد و مقادیر شاپلی برای خلاصه‌سازی سهم متغیرها در خروجی مدل به‌کار رفت. چارچوب شاپلی با اتکا به انتظارات شرطی/حاشیه‌ای، سهم محلی ویژگی‌ها را تجزیه و امکان خلاصه‌سازی آنها در سطح کلی مدل را فراهم می‌کند [۷۱]. این تبیین‌پذیری نباید با استنباط علّی یکسان تلقی شود؛ چارچوب‌های یادگیری ماشین تبیین‌پذیر نیز بر ضرورت تعریف روشن پرسش، واحد تحلیل و مخاطب تبیین تأکید دارند [۷۲].

یکی از چالش‌های اصلی مدل‌سازی سلولی، استقلال ناقص مشاهده‌های مکانی است. در افراز تصادفی، ممکن است سلول‌های مجاور با شرایط محیطی تقریباً مشابه هم‌زمان در مجموعه آموزش و آزمون قرار گیرند و در نتیجه ارزیابی عملکرد بیش از حد خوش‌بینانه شود. مطالعات مربوط به اعتبارسنجی داده‌های مکانی نشان داده‌اند که جداسازی واحدهای کامل فضا برای سنجش انتقال‌پذیری اهمیت دارد [۷۳، ۷۴]. تنظیم ابرپارامترها نیز باید درون یک طرح بازنمونه‌گیری مناسب انجام شود تا از نشت اطلاعات جلوگیری شود [۷۵]. پژوهش‌های نقشه‌سازی اکولوژیک نشان داده‌اند که اعتبارسنجی فضایی در برخی موارد افت عملکردی را آشکار می‌کند که در تقسیم تصادفی قابل مشاهده نیست [۷۶،۷۷]. مفهوم «ناحیه کاربردپذیری» نیز یادآور می‌شود که پیش‌بینی در نواحی جغرافیایی یا بخش‌هایی از فضای ویژگی که با داده آموزش متفاوت‌اند، تعمیم قطعی را تضمین نمی‌کند [۷۸]. با این حال، اعتبارسنجی بلوکی نیز هدفی متفاوت از ارزیابی صحت مستقل نقشه کاربری/پوشش زمین دارد. پژوهشی دیگر تأکید کرده است که این نوع اعتبارسنجی همواره جایگزین نمونه مرجع احتمالی برای برآورد دقت نقشه نهایی نیست [۷۹]. بر همین مبنا، در مقاله حاضر از اعتبارسنجی بلوکی برای سنجش انتقال‌پذیری مدل گذار استفاده شد، نه برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی کاربری/پوشش زمین.

نوع نمونه‌گیری مدل نیز در تفسیر معیارهای عملکرد اهمیت دارد. برای پاسخ‌های کم‌شیوع یا داده‌هایی که نسبت موارد و شاهدها در آنها به‌صورت طراحی‌شده تغییر کرده است، اتکا به مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده به‌تنهایی کافی نیست. منحنی ROC توان کلی مدل در رتبه‌بندی مثبت‌ها و منفی‌ها را ارزیابی می‌کند، اما فراوانی زیاد منفی‌ها می‌تواند برداشت خوش‌بینانه‌ای از عملکرد ایجاد کند؛ منحنی دقت–بازخوانی تمرکز بیشتری بر کیفیت پیش‌بینی موارد مثبت دارد [۸۰]. در داده حاضر، برای هر گذار حداکثر ۱۲ هزار مورد و ۱۲ هزار شاهد انتخاب شد و مجموعه مدل در نتیجه تقریباً متوازن بود. شیوع حاصل از چنین نمونه‌ای، با این حال، معادل شیوع واقعی گذار در منظر نیست؛ بنابراین احتمال خروجی مدل، بدون کالیبراسیون، نباید به‌عنوان ریسک مطلق تفسیر شود. معیارهای دقت، حساسیت، ویژگی، دقت مثبت و مساحت زیر منحنی با آستانه ۰/۵ گزارش شدند. مقایسه نتایج رگرسیون لجستیک و تقویت گرادیانی حدی نیز باید با توجه به طرح ارزیابی انجام شود: معیار اولیه لجستیک درون‌نمونه‌ای است، تقویت گرادیانی حدی با نگهداشت تصادفی ۲۰ درصد ارزیابی می‌شود و ارزیابی جداگانه لجستیک بر بلوک‌های فضایی استوار است. در نتیجه، بالاتر بودن عددی عملکرد تقویت گرادیانی حدی در نگهداشت تصادفی را نمی‌توان به‌تنهایی به برتری الگوریتم نسبت داد و این تفاوت فقط در چارچوب همان طراحی آزمون قابل تفسیر است.

چارچوب مفهومی پژوهش سه لایه مکمل دارد. لایه نخست، «حسابداری» است و مستقیماً به این پرسش پاسخ می‌دهد که چه مساحتی پایدار مانده و چه مساحتی میان طبقات تغییر برچسب داده

است. لایه دوم، «ساختار مکانی» است که پیکربندی لکه‌ها، گرادیان‌ها و خوشه‌های تغییر را بررسی می‌کند. لایه سوم، «ارتباط و پیش‌بینی» است و رابطه احتمال یک گذار مشخص را با متغیرهای محیطی و دسترسی مدل‌سازی می‌کند. ترتیب این سه لایه آگاهانه است؛ مدل نباید جای مشاهده را بگیرد و ضریب یک متغیر پیش از مشخص شدن جامعه در معرض خطر نباید به کل شهرستان تعمیم داده شود. برای مثال، فاصله از راه در مدل مرتع به بایر فقط میان سلول‌هایی مقایسه می‌شود که در سال ۲۰۱۶ در طبقه مرتع قرار داشته‌اند. ضریب حاصل، در نتیجه، درباره شانس مشروط گذار به بایر درون همین جامعه در معرض خطر است و نه درباره پراکنش کلی بایر در شهرستان. این تفکیک، احتمال اشتباه گرفتن «محل وجود یک طبقه» با «محل وقوع یک گذار» را کاهش می‌دهد.

بر مبنای این چارچوب، شش فرضیه برای جهت‌دهی به تحلیل تعریف شد. نخست، انتظار می‌رفت تغییر خالص مقدار گردش ناخالص را کمتر از واقعیت نشان دهد و باغ، جنگل و مرتع به‌طور هم‌زمان سود و زیان قابل توجهی داشته باشند. فرضیه دوم، تمرکز بیشتر تغییر و توسعه در مجاورت بافت ساخته‌شده و راه بود. در فرضیه سوم انتظار می‌رفت گسترش لبه‌ای از نظر مساحت بر ساخت‌وساز جدید غالب باشد، در حالی که تعداد قابل توجهی لکه برون‌افتاده نیز وجود داشته باشد. فرضیه چهارم به ناهمگنی توپوگرافی مربوط بود؛ یعنی انتظار نمی‌رفت ارتفاع و شیب برای همه گذارها جهت اثر یکسانی داشته باشند. فرضیه پنجم، کاهش عملکرد لجستیک در اعتبارسنجی فضایی نسبت به ارزیابی درون‌نمونه‌ای و عملکرد بالاتر تقویت گرادیانی حدی در آزمون تصادفی، با انتظار ثبت روابط غیرخطی، بود. فرضیه ششم نیز سهم بالای ارتفاع و فاصله‌های ساختاری در مقادیر شاپلی را پیش‌بینی می‌کرد. این فرضیه‌ها چارچوب تفسیر را مشخص می‌کنند، نه نتیجه را؛ بنابراین الگوهای خلاف انتظار، از جمله جریان‌های معکوس ساخته‌شده یا تبادل‌های بسیار بزرگ میان طبقات، در فرایند ممیزی حذف نمی‌شوند.

در نهایت، منطق استنباط پژوهش بر همگرایی و در عین حال امکان تعارض میان شواهد استوار است. هنگامی که گرادیان توصیفی، نسبت شانس مشروط و الگوی مقادیر شاپلی در یک جهت قرار گیرند و رابطه در بلوک‌های فضایی نیز ثبات نسبی داشته باشد، پشتوانه بیشتری برای وجود یک ارتباط آماری فراهم می‌شود؛ با این حال، چنین همگرایی‌ای همچنان اثبات رابطه علّی نیست. در مقابل، تعارض میان معیارها بخشی از نتیجه تحلیلی محسوب می‌شود و می‌تواند از تفاوت جامعه‌های در معرض خطر، شکل تابع، هم‌خطی، غیرخطی بودن رابطه، مقیاس تحلیل یا خطای برچسب ناشی شود. برای مثال، سهم بالای شاپلی همراه با نسبت شانس نزدیک به یک می‌تواند با رابطه‌ای غیرخطی مانند الگوی U- شکل سازگار باشد، در حالی که نسبت شانس قوی و سهم شاپلی متوسط ممکن است به رابطه‌ای نسبتاً یکنواخت اما با دامنه تغییر محدود مربوط باشد. به همین ترتیب، مساحت زیر منحنی بالا، بدون بررسی کالیبراسیون، صرفاً بیانگر توان رتبه‌بندی است. استفاده هم‌زمان از این شواهد مانع از آن می‌شود که یک شاخص منفرد به‌صورت گزینشی مبنای نتیجه‌گیری قرار گیرد و به خواننده اجازه می‌دهد سطح قوت هر ادعا را متناسب با نوع داده و روش ارزیابی کند.

روش تحقیق

○ *منطقه مطالعه*

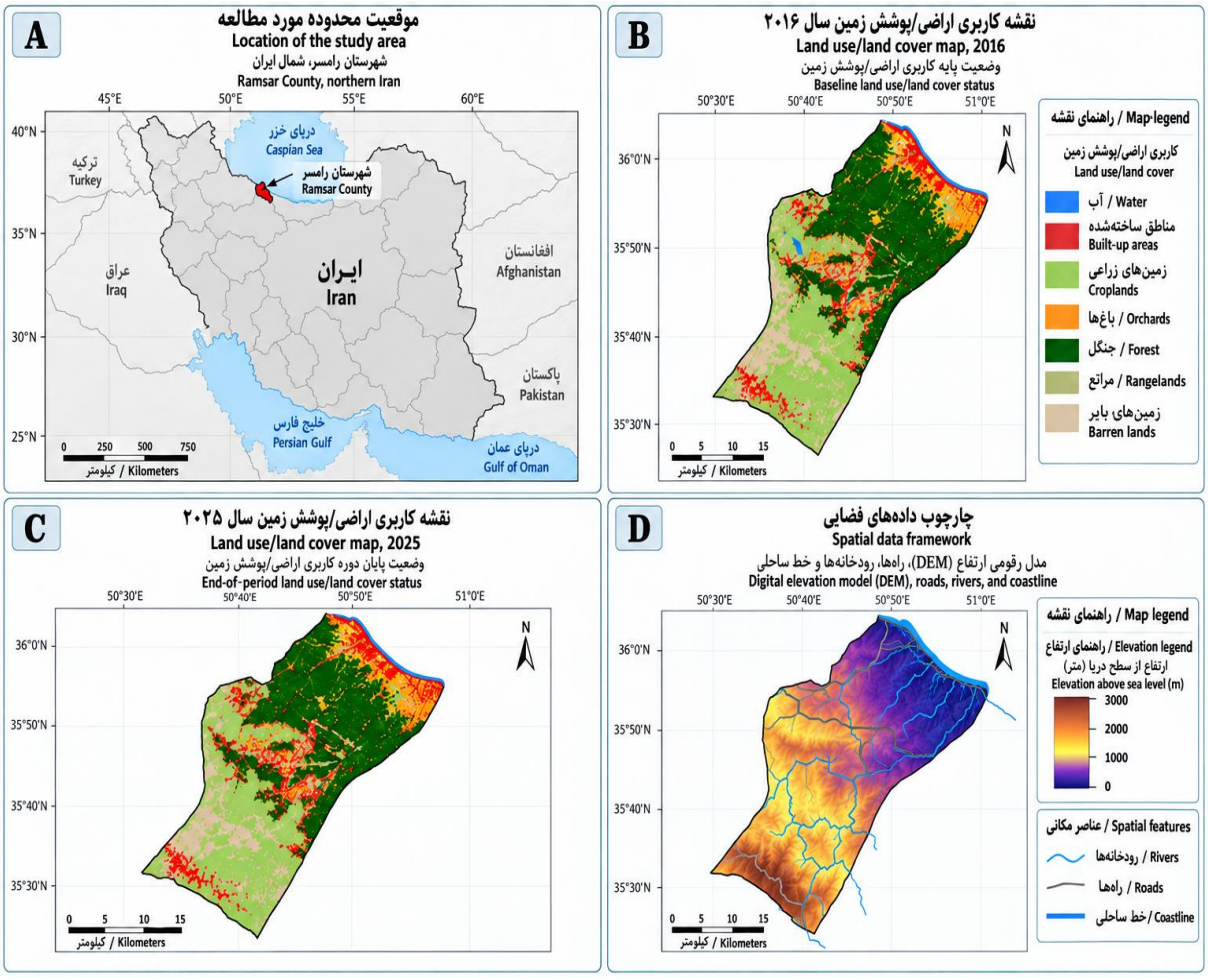
شهرستان رامسر در غرب استان مازندران، میان ساحل جنوبی دریای خزر و دامنه‌های شمالی البرز قرار گرفته است. ساختار طبیعی این شهرستان از جلگه ساحلی کم‌ارتفاع، تراس‌ها و دامنه‌های میانی و ارتفاعات جنوبی تشکیل می‌شود. افزایش سریع ارتفاع در فاصله‌ای کوتاه سبب شده است که الگوی شیب و دسترسی در منطقه همبستگی زیادی داشته باشد. آبراهه‌ها عمدتاً از ارتفاعات جنوبی به سوی ساحل امتداد می‌یابند، در حالی که محورهای راه و بافت‌های سکونتی بیشتر در بخش‌های قابل دسترس‌تر متمرکز شده‌اند. باغ‌ها و اراضی زراعی در پهنه‌های جلگه‌ای و دامنه‌ای حضور دارند، جنگل بخش گسترده‌ای از ارتفاعات میانی را پوشش می‌دهد و مرتع و اراضی بایر نیز در بخش‌های مختلف شهرستان پراکنده‌اند.

محدوده مورد استفاده در محاسبات، صرفاً بر مبنای مساحت ثبتی شهرستان تعیین نشد، بلکه از اشتراک ماسک معتبر دو رستر کاربری/پوشش زمین و مرز برداری شهرستان به‌دست آمد. بر این اساس، مساحت معتبر نهایی تحلیل ۷۲٬۶۰۳٫۵۲ هکتار است. شکل ۱ زمینه مکانی منطقه مطالعه را در قالب یک اطلس چندپنلی ارائه می‌کند و شامل موقعیت رامسر در مقیاس استان و کشور، نقشه‌های کاربری/پوشش زمین سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۵، مدل ارتفاعی و لایه‌های برداری راه‌ها، رودخانه‌ها و خط ساحلی است.

○ *داده‌های کاربری/پوشش زمین و ممیزی منشأ*

ورودی‌های تحلیل، رسترهای کاربری/پوشش زمین سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۵ با تفکیک ۱۰ متر، سیستم مختصات EPSG:۳۲۶۳۹ و هفت کد طبقه‌بندی بودند. ممیزی اولیه مسیر فایل، دامنه کدها، وضوح، گستره و انطباق شبکه دو رستر را کنترل کرد و هیچ بازنمونه‌گیری طبقه‌ای بر زوج نهایی انجام نشد.

مدل ارتفاعی رقومی، مرز محدوده مطالعه، شبکه راه‌ها، آبراهه‌ها و خط ساحلی پس از تطبیق با شبکه تحلیل فراخوانی شدند. منشأ داده‌ها با قفل‌کردن نسخه‌های ورودی کنترل شد. کدگذاری مبدأ–مقصد، تغییر دودویی و جمع‌های ردیفی و ستونی ماتریس نیز پیش از تحلیل نهایی ممیزی شد.



شکل ۱: موقعیت شهرستان رامسر و چارچوب داده‌های مکانی؛ پنل‌ها موقعیت ملی، نقشه‌های کاربری/پوشش زمین ۲۰۱۶ و ۲۰۲۵ و شبکه ارتفاع، راه، رودخانه و ساحل را نشان می‌دهند.

Fig. 1: Location of Ramsar County and spatial-data framework; panels show the national location, 2016 and 2025 land-use/land-cover maps, elevation, roads, rivers, and coastline.

منبع :پردازش پژوهش

Source: Research processing.

کدهای مستندساز فرایند تولید نقشه‌های کاربری/پوشش زمین نشان می‌دهند که ترکیب‌های میانه تصاویر Sentinel-۲ Harmonized برای هر سال، از ۲۷ ژوئن تا ۱ دسامبر، با استفاده از Cloud Score+ و آستانه cs_cdf = ۰.۵ تهیه شده‌اند. ده باند بازتابی، شاخص‌های طیفی NDVI، NDWI، MNDWI، NDMI، NDBI، NDRE و BSI، شاخص‌های فصلی مربوط به بخش‌های زودهنگام و دیرهنگام دوره زمانی، و همچنین متغیرهای توپوگرافی ارتفاع و شیب به‌عنوان متغیرهای پیش‌بین طبقه‌بندی استفاده شدند. نمونه‌های آموزشی به‌صورت متوازن و به‌طور مستقل در داخل چندضلعی‌های آموزشی هر طبقه تولید شدند و الگوریتم Random Forest با ۴۰۰ درخت، حداقل اندازه برگ برابر ۲، bag fraction = ۰.۷ و بذر تصادفی ۴۲ آموزش داده شد.

برای نقشه سال ۲۰۱۶، گزارش ارزیابی مستقل دقت کلی ۰٫۸۲۱۹ و ضریب کاپای ۰٫۷۹۲۲ را نشان داد. برای رستر سال ۲۰۲۵، نمونه مرجع مستقل یا ماتریس خطای قابل استناد در فایل‌های همراه این نسخه وجود نداشت؛ از این رو، هیچ دقتی از محصولات دیگر به آن تعمیم داده نشد و محاسبه عددی ماتریس خطا یا تحلیل حساسیت طبقه‌ای بدون داده مرجع انجام نشد. همه نتایج وابسته به این رستر به‌عنوان «گذار نقشه‌ای» گزارش می‌شوند و تفسیر فرایندی آنها مشروط به ارزیابی صحت مستقل است.

نبود داده مرجع مستقل برای سال ۲۰۲۵، مهم‌ترین محدودیت این مطالعه است. برای رفع آن در نسخه نهایی، باید نمونه‌گیری احتمالی از تصاویر با وضوح بالاتر یا داده مرجع معتبر انجام شود و ماتریس خطا، دقت کاربر و تولیدکننده، صحت کلی و کاپا گزارش گردد. تا زمان انجام این کار، ارقام مساحت و مدل‌های گذار برای شناسایی الگوهای مکانی و اولویت‌بندی ممیزی مناسب‌اند، نه برای ادعای تغییر محیطی قطعی.

جدول ۱:داده‌ها، مشخصات و نقش تحلیلی
Table 1: Data sources, specifications, and analytical roles

پردازش/منشأ Processing/source	مشخصات Specifications	کاربرد Use	داده/متغیر Data/variable
قفل منشأ؛ بدون بازنمونه‌گیری Source lock; no resampling	متر؛ ۷ طبقه ۱۰ 10 m; 7 classes	مبدأ و بافت مبنا Origin and baseline context	LULC ۲۰۱۶ V5 2016 LULC V5
شبکه دقیق مشترک Exact common grid	متر؛ ۷ طبقه ۱۰ 10 m; 7 classes	مقصد گذار Transition destination	LULC ۲۰۲۵ V4 2025 LULC V4
تطبیق پیوسته در صورت نیاز Continuous alignment if required	متر ۱۰ 10 m	ارتفاع Elevation	DEM DEM
DEM مشتق Derived from DEM	درجه Degrees	محدودیت توپوگرافی Topographic constraint	شیب Slope
فاصله اقلیدسی Euclidean distance	عارضه ۲۳۸ 238 features	دسترسی Accessibility	راه Roads
فاصله اقلیدسی Euclidean distance	عارضه ۸۷ 87 features	زمینه هیدروگرافی Hydrographic context	رودخانه Rivers
فاصله اقلیدسی Euclidean distance	عارضه ۱ 1 feature	گرادیان ساحلی Coastal gradient	خط ساحل Coastline
فاصله تا نزدیک‌ترین سلول Distance to nearest cell	کد ۱ Code ۱	تداوم/جهش توسعه Continuity/leapfrog growth	۲۰۱۶ ساخته‌شده 2016 built-up

○ *متغیرهای مکانی و گرادیان‌ها*

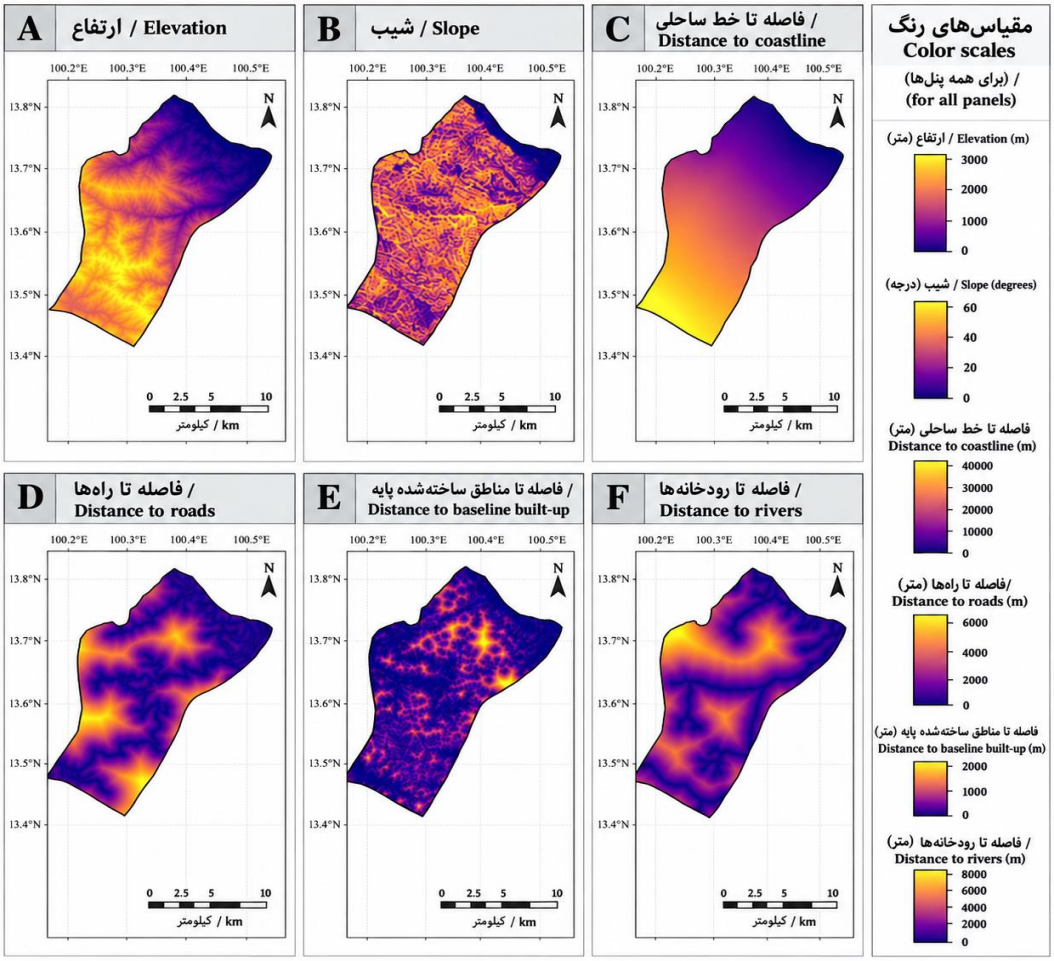
ارتفاع بر حسب متر، شیب بر حسب درجه، فاصله اقلیدسی تا ساحل، راه، ساخته‌شده مبنا و رودخانه بر حسب متر. ارتفاع از DEM با تابع terrain و شیب با استخراج شد. فاصله تا سه لایه برداری و فاصله تا نزدیک‌ترین سلول ساخته‌شده سال ۲۰۱۶ محاسبه و همه متغیرها با ماسک کاربری/پوشش زمین بریده شدند. برای تحلیل توصیفی، ارتفاع در بازه‌های کمتر از صفر، ۰–۱۰۰، ۱۰۰–۳۰۰، ۳۰۰–۶۰۰، ۶۰۰–۱۰۰۰، ۱۰۰۰–۱۶۰۰، ۱۶۰۰–۲۵۰۰ و ۲۵۰۰–۴۰۰۰ متر؛ شیب در ۰–۲، ۲–۵، ۵–۱۰، ۱۰–۲۰، ۲۰–۳۰، ۳۰–۴۵ و ۴۵–۹۰ درجه؛ فاصله ساحل در هفت و فاصله راه و رودخانه در هفت بازه از صفر تا ۲۰ کیلومتر طبقه‌بندی شد. برای هر بازه، تعداد سلول، مساحت معتبر، مساحت تغییر و درصد تغییر محاسبه شد. همین محاسبه برای هر یک از چهار گذار منتخب تکرار شد تا تفاوت میان الگوی کل تغییر و الگوی گذار ویژه آشکار شود.

○ *ماتریس انتقال و تحلیل شدت*

برای هر سلول معتبر، زوج مبدأ–مقصد تشکیل شد و فراوانی در ۰/۰۱ هکتار ضرب گردید. جمع سطرهای ماتریس با مساحت ۲۰۱۶ و جمع ستون‌ها با مساحت ۲۰۲۵ تطبیق داده شد. برای هر طبقه، پایداری، سود، زیان، تغییر خالص، مبادله و تغییر کل استخراج شد. مساحت تغییر کل از مجموع عناصر خارج قطر و درصد آن از تقسیم بر کل برابر بود با مساحت تغییر I سطح معتبر محاسبه شد. شدت سالانه بازه تقسیم بر حاصل‌ضرب کل مساحت و ۹ سال. در سطح طبقه، شدت تقسیم بر مساحت آغازین آن و شدت i برابر زیان سالانه طبقه L_i زیان تقسیم بر مساحت‌هایی بود که در j برابر سود سالانه مقصد G_j سود فعال یا خفته بودن نسبی را، با G_j و L_i نبودند. مقایسه j آغاز عضو نشان داد. نسبت‌های هدف‌گیری گذار نیز با مقایسه سهم مقصد مشاهده‌شده از خروج مبدأ با سهم فرصت مقصد در چشم‌انداز محاسبه شدند. همه محاسبات از رسترهای نهایی بازتولید شد و از جداول انتقال قدیمی استفاده نشد.

○ *شاخص گسترش منظر و تحلیل لکه‌ها*

ساخت‌وساز جدید به سلول‌هایی تعریف شد که در ۲۰۱۶ ساخته‌شده نبودند و در ۲۰۲۵ کد ساخته‌شده گرفتند. اتصال هشت‌جهته برای تعیین لکه‌ها به‌کار رفت. هر لکه به چندضلعی تبدیل و حلقه‌هایی با عرض ۱۰، ۲۰ و ۳۰ متر پیرامون آن ساخته شد. برای هر حلقه، سطح همپوشانی/مساحت حلقه = همپوشان با ساخته‌شده ۲۰۱۶ اندازه‌گیری و شاخص گسترش منظر = ۱۰۰×بافر به متر مربوط است و بافرهای ۲۰ و ۳۰ متر فقط آزمون حساسیت‌اند. بنابراین شمار ۲۹٬۹۶۸ لکه در سه فاصله تکرار نشد و هیچ جمع سه‌برابری صورت نگرفت. شاخص گسترش منظر=۰ برون‌افتاده، شاخص گسترش منظر>۵۰ گسترش لبه‌ای و شاخص گسترش منظر≥۵۰ میان‌افزا طبقه‌بندی شد. سهم نوع‌ها هم بر پایه تعداد لکه و هم مساحت گزارش شد، زیرا تعداد زیاد لکه خرد ممکن است سهم سطحی اندکی داشته باشد. این تفکیک امکان مقایسه پراکندگی شمارشی و اثر مساحتی توسعه را فراهم کرد.



شکل ۲: شش پیش‌بین مکانی مدل‌ها شامل ارتفاع، شیب و فاصله اقلیدسی تا ساحل، راه، ساخته‌شده ۲۰۱۶ و رودخانه

Fig. 2: Six spatial model predictors: elevation, slope, and Euclidean distance to the coastline, roads, 2016 built-up land, and rivers.

منبع :پردازش پژوهش

Source: Research processing.

جدول ۲: اجزای چارچوب تحلیلی و خروجی هر جزء

Table 2: Components of the analytical framework and their outputs

جزء Component	تنظیم اصلی Main setting	خروجی/معنا Output/meaning
ماتریس انتقال Transition matrix	کد=۱۰×مبدأ+مقصد Code = 10 × origin + destination	پایداری، سود، زیان، خالص، مبادله Persistence, gain, loss, net change, swap
تحلیل شدت Intensity analysis	سال ۹ 9 years	بازه، طبقه، هدف‌گیری گذار Interval, category, transition targeting
LEI Landscape Expansion Index	بافر اصلی ۱۰ متر Primary 10 m buffer	لبه‌ای، میان‌افزا، برون‌افتاده Edge-expansion, infill, outlying
گرادیان Gradient	متغیر؛ بازه‌های ثابت ۶ 6 variables; fixed bins	درصد تغییر در هر بازه Percentage change in each bin
Gi* Getis–Ord Gi*	شبکه ۵۰۰ متر؛ α=۰/۰۵ ۵۰۰ m grid; α = ۰.۰۵	٪لکه داغ/سرد ۹۵ و ۹۹ 95% and 99% hot/cold spots
داده مدل Model data	هزار مورد+۱۲هزار شاهد۱۲ 12,000 cases + 12,000 controls	چهار گذار اصلی Four dominant transitions
لجستیک Logistic regression	؛ آستانه HC۱۰/۵ HC1; threshold = 0.5	و معیارهای تفکیک OR Odds ratios and discrimination metrics
اعتبارسنجی فضایی Spatial validation	چین؛ بلوک ۲ کیلومتر ۵ 5 folds; 2 km blocks	تعمیم مکانی Spatial transferability
XGBoost/SHAP XGBoost/Shapley	η=۰/۰۵ دور؛ عمق ۴؛ ۳۰۰ 300 rounds; depth 4; η = 0.05	پیش‌بینی غیرخطی و تبیین Nonlinear prediction and explanation

یادداشت .همه مدل‌ها با بذر ۴۲ اجرا شد؛ آزمون تقویت گرادیانی حدی تصادفی و اعتبارسنجی لجستیک فضایی است

Note. All models used seed ۴۲; the Extreme Gradient Boosting test was random, whereas logistic validation was spatial.

- *لکه‌های داغ و سرد تغییر*

رستر تغییر دودویی با عامل متناسب با وضوح به سلول‌های تقریباً ۵۰۰ متر تجمیع و میانگین سلول به‌عنوان تراکم تغییر تعریف شد. ۳۰۶۷ سلول معتبر به دستگاه مختصات صفحه‌ای تبدیل شدند. همسایگی در فاصله صفر تا ۱/۵ برابر اندازه سلول و با احتساب خود سلول ساخته و وزن‌ها به سبک W سطری استاندارد شدند. آماره localG برای تراکم تغییر، مقدار z و p دوطرفه را تولید کرد. سلول‌های $z \geq 2.58$ لکه داغ ۹۹ درصد، $1.96 \leq z < 2.58$ لکه داغ ۹۵ درصد، $-2.58 \leq z$ لکه سرد ۹۹ درصد و $-2.58 < z \leq -1.96$ لکه سرد ۹۵ درصد نام گرفتند؛ سایر سلول‌ها نامعنا بودند. ضریب همبستگی تراکم تغییر و z نیز به‌عنوان کنترل سازگاری گزارش شد. این تحلیل برای تمام تغییرات کاربری/پوشش زمین است، نه فقط ساخت‌وساز جدید؛ در نتیجه تفسیر لکه داغ به‌صورت «تراکم بالای هر نوع گذار» انجام گرفت.

- *انتخاب گذارها و ساخت داده مدل*

تمام گذارهای خارج قطر بر اساس مساحت و حداقل رخداد مرتب شدند و چهار گذار مرتع به بایر، باغ به جنگل، جنگل به باغ و باغ به مرتع انتخاب شد. جامعه در معرض خطر برای هر گذار فقط سلول‌های طبقه مبدأ بود؛ از هر گروه حداکثر ۱۲ هزار مشاهده بدون جایگذاری انتخاب شد و نسبت مورد–شاهد ۱:۱ باقی ماند. این طراحی برای کنترل هزینه محاسباتی مناسب است، اما شیوع واقعی گذار را حفظ نمی‌کند؛ بنابراین خروجی مدل برای رتبه‌بندی و تبیین ارتباط استفاده می‌شود، نه برای برآورد احتمال مطلق کالیبره‌شده.

- *رگرسیون لجستیک، تقویت گرادیانی حدی، مقادیر شاپلی و اعتبارسنجی*

در هر گذار، شش پیش‌بین با میانگین و انحراف معیار کل مجموعه استاندارد و مدل دوجمله‌ای لوجیت برازش شد. برای اعتبارسنجی فضایی، مختصات به بلوک‌های ۲۰۰۰ متری تقسیم و بلوک‌ها به پنج چین تخصیص یافت. در این نسخه، استانداردسازی پیش از افراز چین‌ها انجام شده است؛ بنابراین احتمال نشت اطلاعات محدود اما واقعی وجود دارد و AUC بلوکی نباید برآورد نهایی انتقال‌پذیری تلقی شود. اجرای اصلاح‌شده باید میانگین و انحراف معیار را در هر چین فقط از داده آموزش محاسبه و مدل را دوباره برازش کند.

تقویت گرادیانی حدی با افراز تصادفی ۲۰/۸۰ و بذر ۴۲ آموزش یافت و مقادیر شاپلی برای خلاصه‌سازی سهم متغیرها محاسبه شد. اهمیت جهانی هر ویژگی میانگین قدرمطلق مقادیر شاپلی بود و جهت اثر از علامت و شکل توزیع آن بررسی شد. از آنجا که این مدل با نگهداشت تصادفی و لجستیک با چین‌های فضایی ارزیابی شده‌اند، ارقام عملکرد آنها فقط به‌صورت جداگانه گزارش می‌شود و برای رتبه‌بندی مستقیم الگوریتم‌ها به‌کار نمی‌رود.

- *کنترل بازتولیدپذیری و ملاحظات اخلاقی*

زنجیره تحلیل در ۱۵ مرحله اجرا شد و برای هر مرحله خروجی داده، رستر یا مدل و کنترل موفقیت ثبت شد. کنترل‌ها شامل دامنه طبقات، انطباق شبکه، منشأ داده، جمع‌های ماتریس انتقال، حداقل رخداد مدل، خروجی شاپلی و ساخت اطلس شکل‌ها بود. پژوهش از داده‌های مکانی محیطی استفاده می‌کند، نمونه انسانی یا حیوانی ندارد و هیچ داده شخصی یا مالکیتی منتشر نمی‌کند.

- *قواعد تفسیر و تحلیل حساسیت*

سه قاعده پیش از مشاهده نتایج تعیین شد: جریان‌های غیرمنتظره حذف نشوند؛ شاخص گسترش منظر فقط با بافر اصلی ۱۰ متر گزارش شود؛ و عملکرد مدل‌هایی که طرح آزمون متفاوت دارند مستقیماً رتبه‌بندی نشود. تحلیل حساسیت رسمی بر پایه ماتریس خطای نقشه ۲۰۲۵ و بازاستانداردسازی درون‌چین، به دلیل نبود داده مرجع و ریزداده آموزشی در فایل‌های همراه، در این نسخه اجرا نشد؛ از ارائه اعداد فرضی به‌جای برآورد تجربی خودداری شد.

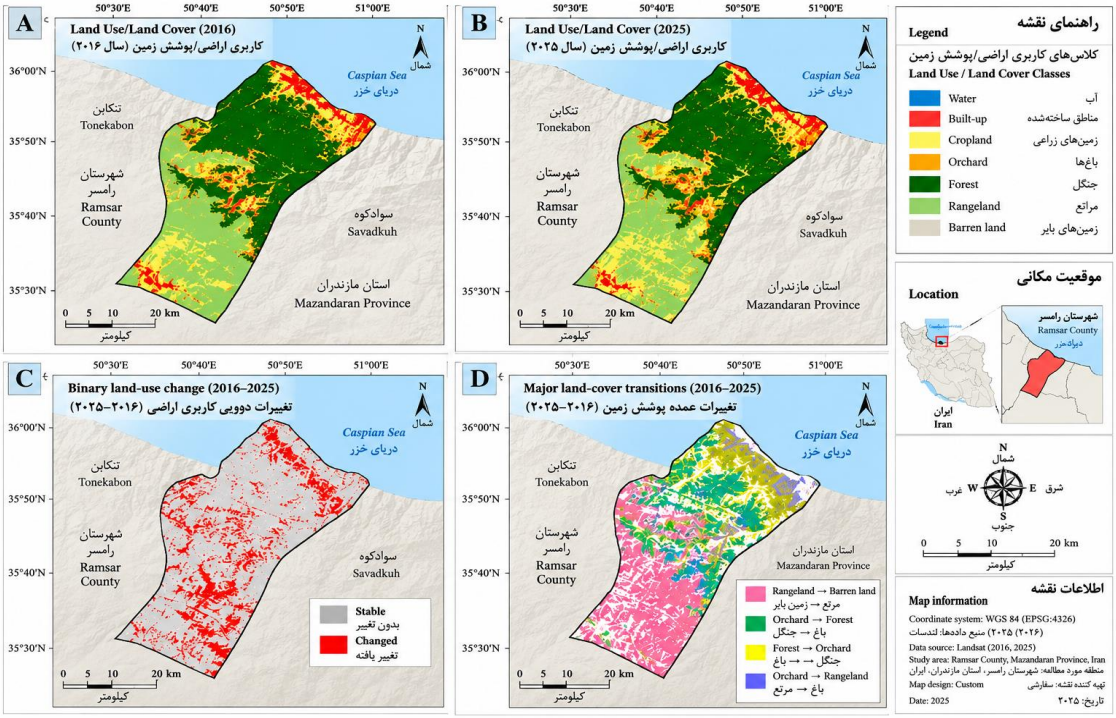
عدم‌قطعیت در سه سطح از هم تفکیک شد .عدم‌قطعیت مشاهده به صحت طبقه‌بندی دو سال مربوط است؛ عدم‌قطعیت نمونه به انتخاب حداکثر ۱۲ هزار مورد و شاهد و تخصیص بلوک‌ها مربوط می‌شود؛ و عدم‌قطعیت مدل به شکل تابع، متغیرهای حذف‌شده و ابرپارامترها وابسته است .گزارش حاضر برای سطح اول از زبان مشروط و پرچم ممیزی، برای سطح دوم از اعتبارسنجی فضایی و برای سطح سوم از مقایسه لجستیک و تقویت گرادیانی حدی بهره می‌برد .نبود فاصله اطمینان مساحت تصحیح‌شده به این معناست که ارقام هکتار دقت محاسباتی دارند، نه الزاماً دقت موضوعی هم‌ارز .دو رقم اعشار برای ردیابی حسابداری حفظ شده است، اما تصمیم مدیریتی باید با گرد کردن مناسب و دامنه عدم‌قطعیت همراه شود.

نتایج و بحث

- *سطح معتبر و الگوی کلی تغییر*

تحلیل تغییرات سلول‌به‌سلول نشان داد که سطح معتبر مشترک دو نقشه ۷۲٬۶۰۳/۵۲ هکتار است. از این مقدار، ۵۳٬۴۵۰/۷۲ هکتار روی قطر ماتریس انتقال باقی ماند و ۱۹٬۱۵۲/۸۰ هکتار از یک کد به کد دیگر تغییر برچسب داد. بر این اساس، ۷۳/۶۲ درصد از چشم‌انداز از نظر نقشه‌ای پایدار بود و ۲۶/۳۸ درصد تغییر نقشه‌ای داشت. شدت یکنواخت تغییر در بازه مطالعه نیز معادل ۲/۹۳۱ درصد از کل چشم‌انداز در سال به‌دست آمد. نقشه تغییر، تمرکزهای متعددی را در جلگه، دامنه‌های میانی و برخی پهنه‌های جنوبی نشان داد؛ بنابراین، تغییرات مشاهده‌شده به نوار ساخته‌شده محدود نبود. شکل ۳ با نمایش هم‌زمان نقشه تغییر دودویی، گذارهای خارج از قطر و چهار جریان بزرگ، الگوی کلی این تغییرات را نشان می‌دهد. از نظر مساحت، گذارهای مرتبط با جنگل–باغ و مرتع–بایر از افزایش طبقه ساخته‌شده گسترده‌تر بودند. در نتیجه، تمرکز صرف بر تغییرات طبقه ساخته‌شده نمی‌تواند بخش عمده گردش نقشه‌ای میان سایر طبقات منظر را بازنمایی کند.

کنترل سازگاری ماتریس انتقال نیز تطابق کامل جمع‌ها را تأیید کرد: مجموع ۴۹ خانه ماتریس با مساحت معتبر مشترک برابر بود، مجموع هر سطر با مساحت طبقه متناظر در سال ۲۰۱۶ تطابق داشت و مجموع هر ستون با مساحت همان طبقه در سال ۲۰۲۵ برابر شد. این کنترل به‌ویژه برای طبقات کم‌مساحت اهمیت دارد، زیرا اختلافی در حد چند سلول در مرزها یا نواحی بدون‌داده می‌تواند بر تغییر خالص چنین طبقاتی اثر محسوسی بگذارد. طبقه آب در سال مبنا تنها ۱۹۹/۴۷ هکتار مساحت داشت؛ از این رو، حتی خطای کوچک می‌توانست نسبت قابل توجهی از مساحت این طبقه را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، همه محاسبات بر یک ماسک ثابت انجام شدند. از مساحت اولیه آب، ۹۰/۰۶ هکتار در هر دو تاریخ با همین برچسب باقی ماند؛ یعنی کمتر از نیمی از سطحی که در سال مبنا آب طبقه‌بندی شده بود، در سال ۲۰۲۵ نیز در طبقه آب قرار داشت. این الگو می‌تواند هم با تغییر پهنه‌های آبی و هم با حساسیت طبقه آب در آبراهه‌های باریک، نواحی سایه‌دار یا محدوده ساحلی مرتبط باشد. تفکیک این تفسیرها به مقایسه با تصاویر هم‌فصل و داده مرجع هیدروگرافی نیاز دارد.



شکل ۳: الگوی مکانی تغییرات ۲۰۱۶–۲۰۲۵؛ نقشه تغییر دودویی، گذارهای خارج قطر و پراکنش چهار گذار منتخب را نشان می‌دهد

Fig. 3: Spatial pattern of change, 2016–2025; the binary change map, off-diagonal transitions, and four selected transitions are shown.

منبع :پردازش پژوهش

Source: Research processing.

جدول ۳: حسابداری تغییر طبقات کاربری/پوشش زمین، ۲۰۱۶–۲۰۲۵)هکتار(

Table 3: Land-use/land-cover change accounting, 2016–2025 (ha)

طبقه Class	۲۰۱۶ 2016	۲۰۲۵ 2025	پایداری Persistence	سود Gain	زیان Loss	خالص Net	مبادله Swap
آب Water	199.47	112.24	90.06	22.18	109.41	-87.23	44.36
ساخته‌شده Built-up	3,847.24	5,239.59	2,939.88	2,299.71	907.36	+1,392.35	1,814.72
زراعت Cropland	2,362.75	1,209.23	493.84	715.39	1,868.91	-1,153.52	1,430.78
باغ Orchard	10,519.38	8,357.10	5,412.54	2,944.56	5,106.84	-2,162.28	5,889.12
جنگل Forest	25,358.99	25,978.60	23,054.33	2,924.27	2,304.66	+619.61	4,609.32
مرتع Rangeland	25,526.35	19,981.45	17,099.06	2,882.39	8,427.29	-5,544.90	5,764.78
بایر Bare land	4,789.34	11,725.31	4,361.01	7,364.30	428.33	+6,935.97	856.66

یادداشت .مبادله برابر دو برابر کمینه سود و زیان است؛ تغییر کل برابر مجموع سود و زیان است

Note. Swap equals twice the smaller of gain and loss; total change equals gain plus loss.

- *سود، زیان، تغییر خالص و مبادله طبقات*

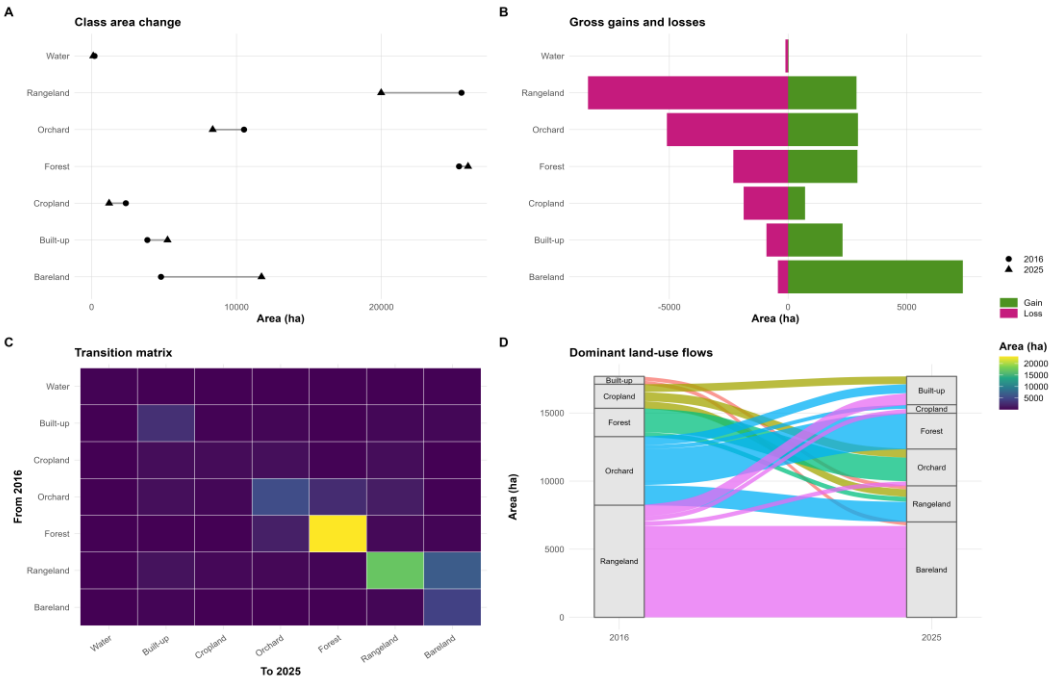
بایر بیشترین افزایش خالص را داشت :مساحت آن از ۴٬۷۸۹/۳۴ به هکتار رسید، سود ۷٬۳۶۴/۳۰ و زیان ۴۲۸/۳۳ هکتار بود ۱۱٬۷۲۵/۳۱ و تغییر خالص ۶٬۹۳۵/۹۷ هکتار ثبت شد .ساخته‌شده از ۳٬۸۴۷/۲۴ به ۵٬۲۳۹/۵۹ هکتار افزایش یافت؛ سود ناخالص ۲٬۲۹۹/۷۱، زیان خالص ۱٬۳۹۲/۳۵ و مبادله ۱٬۸۱۴/۷۲ هکتار بود .بنابراین، ۹۰۷/۳۶ افزایش خالص فقط ۶۰/۵ درصد سود ناخالص را بازنمایی می‌کند و درصد دیگر با خروج از ساخته‌شده خنثی شده است .جنگل نیز ۳۹/۵ هکتار افزایش خالص داشت، اما سود ۲٬۹۲۴/۲۷ و زیان ۶۱۹/۶۱ هکتار نشان می‌دهد پشت خالص مثبت، بیش از ۴٬۶۰۹ ۲٬۳۰۴/۶۶ هکتار مبادله وجود دارد .این نتیجه اهمیت گزارش هم‌زمان جریان‌های دوطرفه را تأیید می‌کند.

مرتع بیشترین کاهش خالص را تجربه کرد: از ۲۵٬۵۲۶/۳۵ به ۱۹٬۹۸۱/۴۵ هکتار رسید و ۵٬۵۴۴/۹۰ هکتار کم شد. زیان ۸٬۴۲۷/۲۹ هکتاری آن بیش از هر طبقه بود، در حالی که ۲٬۸۸۲/۳۹ هکتار سود نیز داشت؛ تغییر کل مرتع ۱۱٬۳۰۹/۶۸ هکتار و مبادله آن ۵٬۷۶۴/۷۸ هکتار بود. باغ با خالص ۲٬۱۶۲/۲۸− هکتار، زراعت با ۱٬۱۵۳/۵۲− هکتار و آب با ۸۷/۲۳− هکتار در رتبه‌های بعدی کاهش بودند. باغ ۵٬۱۰۶/۸۴ هکتار زیان و ۲٬۹۴۴/۵۶ هکتار سود داشت؛ در نتیجه تغییر کل آن ۸٬۰۵۱/۴۰ هکتار، بیش از سه برابر کاهش خالص بود. زراعت نیز با مساحت اولیه کوچک‌تر، ۱٬۸۶۸/۹۱ هکتار زیان در برابر ۷۱۵/۳۹ هکتار سود ثبت کرد. این گردش زیاد نشان می‌دهد برچسب‌های کشاورزی و طبیعی در دوره مطالعه ایستا نبوده‌اند.

جدول۴: ماتریس انتقال ۲۰۱۶ به ۲۰۲۵)هکتار(

Table 4: Transition matrix from 2016 to 2025 (ha)

بایر Bare land	مرتع Rangeland	جنگل Forest	باغ Orchard	زراعت Cropland	ساخته Built-up	آب Water	مبدأ\مقصد Origin/destination
62.86	0.56	19.73	2.18	2.65	21.43	90.06	آب Water
294.41	283.44	10.11	228.89	83.17	2,939.88	7.34	ساخته Built-up
21.43	551.61	81.56	647.85	493.84	565.70	0.76	زراعت Cropland
72.45	1,468.13	2,626.89	5,412.54	287.60	651.04	0.73	باغ Orchard
205.64	346.67	23,054.33	1,732.18	2.03	17.89	0.25	جنگل Forest
6,707.51	17,099.06	183.02	322.90	339.42	862.08	12.36	مرتع Rangeland
4,361.01	231.98	2.96	10.56	0.52	181.57	0.74	بایر Bare land



شکل ۴: کمّی‌سازی تغییر طبقات؛ مساحت آغاز و پایان، سود و زیان، ماتریس انتقال و جریان‌های اصلی نشان می‌دهد تغییر خالص فقط بخشی از گردش ناخالص منظر است

Fig. 4: Quantification of class change; initial and final areas, gains and losses, the transition matrix, and dominant flows show that net change captures only part of gross landscape turnover.

Source: Research processing. منبع :پردازش پژوهش

خانه‌های بزرگ خارج قطر منشأ این تغییرات را روشن می‌کنند .گذار مرتع به بایر با ۶٬۷۰۷/۵۱ هکتار، ۳۵/۰۲ درصد همه تغییرات را تشکیل داد .باغ به جنگل با ۲٬۶۲۶/۸۹ هکتار دوم، جنگل به باغ با هکتار سوم و باغ ۱٬۷۳۲/۱۸ به .مرتع با ۱٬۴۶۸/۱۳ هکتار چهارم بود جریان‌های مهم دیگر شامل مرتع به ساخته‌شده ۸۶۲/۰۸، باغ به ساخته‌شده ۶۵۱/۰۴، زراعت به ساخته‌شده ۵۶۵/۷۰، زراعت به باغ و زراعت ۶۴۷/۸۵ به مرتع ۵۵۱/۶۱ هکتار بود .از سوی دیگر، بایر به مرتع ۲۳۱/۹۸ هکتار و ساخته‌شده به .بایر ۲۹۴/۴۱ هکتار ثبت شد جریان‌های خروج از ساخته‌شده در مجموع ۹۰۷/۳۶ هکتارند و چون تغییر فیزیکی معکوس ساختمان معمولاً محدودتر از توسعه جدید است، این خانه‌ها برای ممیزی موضوعی و تصویر با وضوح بالا در اولویت .قرار می‌گیرند

- *شدت طبقه و گذار*

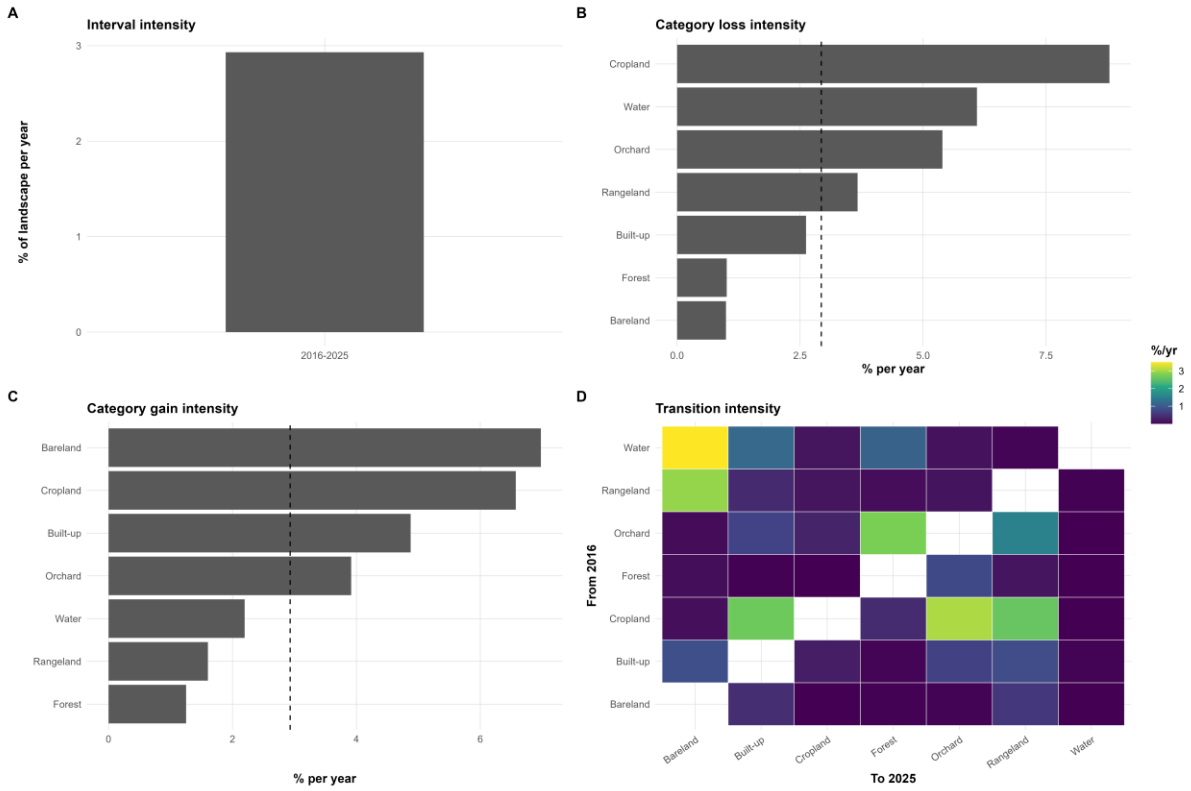
مقایسه شدت زیان سالانه طبقات با مرجع یکنواخت ۲/۹۳۱ درصد، تفاوت روشنی میان طبقات نشان داد. آب با شدت زیان ۶/۰۹۵ درصد و زراعت با ۸/۷۸۹ درصد بیشترین مقادیر را داشتند و از منظر زیان در گروه طبقات فعال قرار گرفتند. شدت زیان باغ ۵/۳۹۴ درصد و مرتع ۳/۶۶۸ درصد نیز بالاتر از مرجع بود. در مقابل، ساخته‌شده با ۲/۶۲۱ درصد، جنگل با ۱/۰۱۰ درصد و بایر با ۰/۹۹۴ درصد، شدت زیانی کمتر از مرجع داشتند و از این نظر نسبتاً خفته بودند. الگوی سود متفاوت بود: بایر با ۶/۹۷۹ درصد، زراعت با ۶/۵۷۳ درصد، ساخته‌شده با ۴/۸۷۷ درصد و باغ با ۳/۹۱۵ درصد بالاتر از مرجع قرار گرفتند، در حالی که شدت سود آب ۲/۱۹۶ درصد، مرتع ۱/۶۰۳ درصد و جنگل ۱/۲۵۱ درصد بود. بالا بودن هم‌زمان شدت سود و زیان در زراعت و باغ بیانگر گردش نقشه‌ای قابل توجه و جابه‌جایی مکانی برچسب این دو طبقه است؛ بنابراین، تغییر خالص به‌تنهایی نمی‌تواند پویایی آنها را به‌درستی بازنمایی کند. بایر الگوی متفاوتی داشت: شدت سود آن بالاتر و شدت زیان آن پایین‌تر از مرجع بود که با جهت‌گیری خالص به سوی افزایش این طبقه در دو نقشه سازگار است.

تحلیل در سطح گذار نیز نشان داد که بزرگی مساحت یک جریان الزاماً با شدت انتخاب‌گری آن یکسان نیست. گذار نقشه‌ای مرتع به بایر هم از نظر مساحت و هم از نظر سهم آن در خروج از مرتع غالب بود؛ نزدیک به ۷۹/۶ درصد زیان مرتع به بایر اختصاص داشت. در طبقه باغ، دو مسیر باغ به جنگل و باغ به مرتع در مجموع نزدیک به ۸۰ درصد زیان باغ را تشکیل دادند. در جنگل نیز حدود سه‌چهارم زیان به گذار نقشه‌ای جنگل به باغ مربوط بود. گذار زراعت به ساخته‌شده ۵۶۵/۷۰ هکتار مساحت داشت؛ با این حال، تفسیر آن صرفاً بر پایه این مقدار مطلق کافی نیست و باید اندازه طبقه مبدأ و فرصت موجود برای گذار نیز در نظر گرفته شود. مزیت تحلیل شدت در همین تمایز است: این تحلیل یک جریان بزرگ را به‌طور خودکار «مهم‌ترین علت» تلقی نمی‌کند، بلکه مشخص می‌سازد کدام مسیر نسبت به فرصت موجود با شدت بیشتری انتخاب شده است. از منظر پایش، این تمایز امکان توجه هم‌زمان به جریان‌های بزرگ از نظر حجم تغییر و مبدأهای کوچک‌تر اما دارای انتخاب‌گری نسبی بالاتر را فراهم می‌کند.

جدول ۵: شدت سالانه سود و زیان طبقات در مقایسه با مرجع بازه

Table 5: Annual category gain and loss intensities compared with the interval reference

طبقه Class	شدت زیان (٪/سال) Loss intensity (%/year)	وضعیت زیان Loss status	شدت سود (٪/سال) Gain intensity (%/year)	وضعیت سود Gain status
آب Water	6.095	فعال Active	2.196	خفته Dormant
ساخته‌شده Built-up	2.621	خفته Dormant	4.877	فعال Active
زراعت Cropland	8.789	فعال Active	6.573	فعال Active
باغ Orchard	5.394	فعال Active	3.915	فعال Active
جنگل Forest	1.010	خفته Dormant	1.251	خفته Dormant
مرتع Rangeland	3.668	فعال Active	1.603	خفته Dormant
بایر Bare land	0.994	خفته Dormant	6.979	فعال Active



شکل ۵: تحلیل شدت در سطح بازه، طبقه و گذار؛ خط مرجع، شدت یکنواخت سالانه ۲/۹۳۱ درصد را نشان می‌دهد

Fig. 5: Intensity analysis at interval, category, and transition levels; the reference line represents the uniform annual intensity of 2.931%.

منبع :پردازش پژوهش

Source: Research processing.

○ *فرم گسترش ساخته‌شده*

سود ناخالص ساخته‌شده ۲٬۲۹۹/۷۱ هکتار در ۲۹٬۹۶۸ لکه هشت‌جهته توزیع شد. در بافر اصلی ۱۰ متر، گسترش لبه‌ای با ۱۲٬۹۶۵ لکه، ۴۳/۲۶ درصد تعداد را شامل شد، اما ۱٬۵۴۵/۲۲ هکتار (۶۷/۱۹ درصد مساحت) را در اختیار داشت. میان‌افزا ۷٬۵۲۸ لکه (۲۵/۱۲ درصد تعداد) و ۴۱۱/۱۷ هکتار (۱۷/۸۸ درصد مساحت) داشت. برون‌افتاده با ۹٬۴۷۵ لکه، ۳۱/۶۲ درصد تعداد را تشکیل داد، ولی مساحت آن ۳۴۳/۳۲ هکتار (۱۴/۹۳ درصد) بود. بنابراین الگوی شمارشی نسبتاً پراکنده‌تر از الگوی مساحتی است: لکه‌های جدا فراوان اما کوچک‌اند و توده‌های لبه‌ای سهم اصلی زمین مصرف‌شده را می‌سازند. میانگین شاخص گسترش منظر در لکه‌های لبه‌ای ۲۹/۲۹ و میانه ۳۰/۲۳ بود؛ برای میان‌افزا، میانگین ۷۱/۰۲ و میانه ۶۵/۳۶ ثبت شد.

این ترکیب دو پیام برنامه‌ریزی دارد. نخست، غالب بودن مساحت لبه‌ای یعنی خط تماس بافت و پوشش‌های غیرشهری در حال جابه‌جایی است؛ اگر مرز رشد و ظرفیت خدمات روشن نباشد، توسعه پیوسته می‌تواند به بلع تدریجی باغ و زراعت بینجامد .دوم، یک‌سوم تعداد لکه‌ها برون‌افتاده است؛ هرچند سهم سطحی آنها کمتر است، می‌توانند هزینه شبکه، قطعه‌قطعه‌شدن و تقاضای توسعه بعدی پیرامون خود را افزایش دهند .سهم ۱۷/۸۸ درصدی میان افزا نشان می‌دهد بخشی از افزایش با تکمیل خلأهای بافت رخ داده است .سیاست بهینه لزوماً حذف همه توسعه لبه‌ای نیست؛ باید لکه‌های لبه‌ای در محدوده‌های دارای ظرفیت ،و لکه‌های جدا در پهنه‌های حساس تفکیک شوند .شکل ۶ نقشه لکه‌ها توزیع شاخص گسترش منظر، سهم تعداد و مساحت و شیب تغییر در فاصله از بافت مبنا را کنار هم قرار می‌دهد.

○ *گرادیان‌های مکانی تغییر*

قوی‌ترین گرادیان دسترسی به بافت ساخته‌شده مبنا مربوط بود. در فاصله ۰–۱۰۰ متر، ۳۷/۵۳ درصد سطح تغییر کرد؛ این مقدار در ۱۰۰–۲۵۰ متر ۲۸/۳۲، در ۲۵۰–۵۰۰ متر ۲۰/۱۶، در ۵۰۰–۱۰۰۰ متر ۱۴/۷۷، در ۱۰۰۰–۲۰۰۰ متر ۱۲/۷۹ و در ۲۰۰۰–۵۰۰۰ متر ۸/۰۵ درصد بود. کاهش تقریباً یکنواخت تا پنج کیلومتر، تداوم فضایی تغییر در مجاورت بافت را تأیید می‌کند، ولی چون همه گذارها در پاسخ کلی حضور دارند، این الگو فقط به توسعه شهری نسبت داده نمی‌شود. فاصله راه نیز الگوی مشابهی داشت: ۳۵/۶۱ درصد تغییر در ۰–۱۰۰ متر، ۳۳/۷۴ در ۱۰۰–۲۵۰، ۲۹/۷۴ در ۲۵۰–۵۰۰، ۲۵/۴۵ در ۵۰۰–۱۰۰۰ و ۲۰/۲۵ درصد در ۱–۲ کیلومتر. فراتر از دو کیلومتر، نرخ دوباره تا حدود ۲۴–۲۲ درصد افزایش یافت که ناهمگنی پوشش‌های جنوبی و پیوند راه با ارتفاع را نشان می‌دهد.

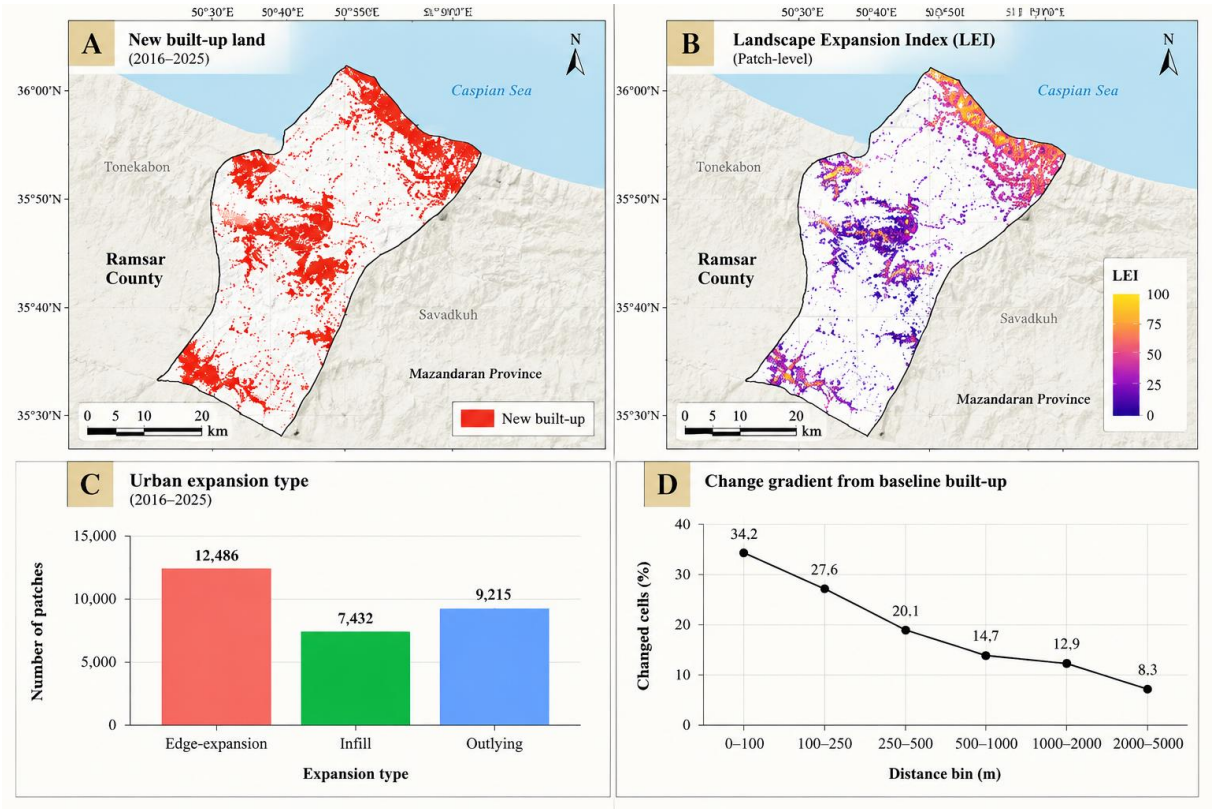
جدول ۶: ترکیب فرم گسترش ساخته‌شده بر پایه شاخص گسترش منظر در بافر ۱۰ متر

Table 6: Composition of built-up expansion forms based on the Landscape Expansion Index at a 10 m buffer

نوع Type	تعداد لکه Patch count	سهم تعداد (٪) Count share (%)	مساحت (ha) Area (ha)	سهم مساحت (٪) Area share (%)	LEI میانگین/میانه Mean/median index
گسترش لبه‌ای Edge-expansion	12,965	43.26	1,545.22	67.19	29.29 / 30.23
میان‌افزا Infill	7,528	25.12	411.17	17.88	71.02 / 65.36
برون‌افتاده Outlying	9,475	31.62	343.32	14.93	0 / 0

یادداشت .جمع برابر ۲۹٬۹۶۸ لکه و ۲٬۲۹۹/۷۱ هکتار است؛ اعداد فقط به بافر اصلی ۱۰ متر مربوط‌اند

Note. Totals are 29,968 patches and 2,299.71 ha; values refer only to the primary 10 m buffer.



شکل ۶: گسترش ساخته‌شده و شاخص گسترش منظر در بافر اصلی ۱۰ متر؛ نقشه لکه‌ها، توزیع شاخص، سهم سه نوع و گرادیان فاصله از بافت مبنا ارائه شده است

Fig. 6: Built-up expansion and the Landscape Expansion Index at the primary 10 m buffer; patch maps, index distribution, shares of three expansion types, and the gradient from baseline built-up land are shown.

منبع :پردازش پژوهش

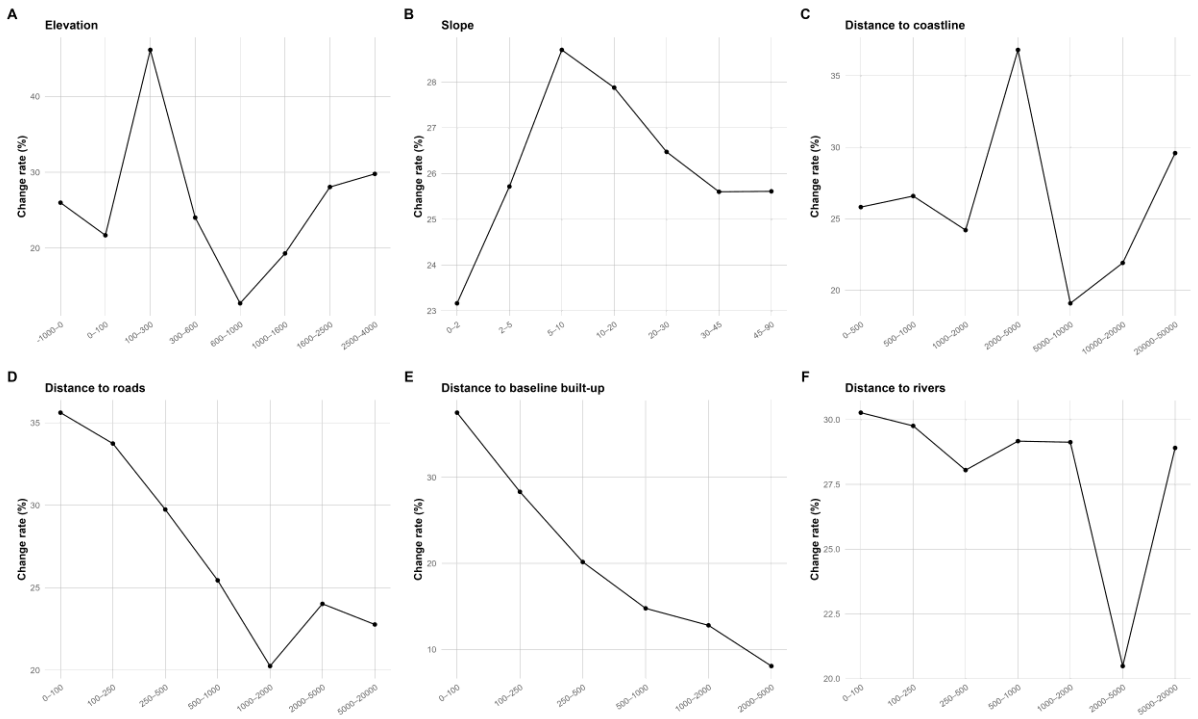
Source: Research processing.

در گرادیان ارتفاع، بیشترین نرخ تغییر ۴۶/۱۳ درصد در بازه ۱۰۰—۳۰۰ متر بود .این دامنه گذار جلگه به دامنه را پوشش می‌دهد و محل تماس باغ، جنگل، مرتع، راه‌های نفوذی و سکونتگاه‌های پراکنده است. نرخ‌های پایین‌تر در جلگه بسیار کم‌ارتفاع و تغییرات متفاوت در ارتفاعات نشان می‌دهد رابطه ارتفاع خطی نیست .فاصله ساحل نیز بیشینه ۳۶/۸۱ درصد را در بازه ۲—۵ کیلومتر داشت، نه در نزدیک‌ترین نوار ساحلی؛ فاصله بیش از ۲۰ کیلومتر نرخ ۲۹/۵۹ درصد داشت .در فاصله رودخانه، اغلب بازه‌های نزدیک ۲۸ تا ۳۰ درصد تغییر داشتند و بازه ۲—۵ کیلومتر به ۲۰/۴۸ درصد کاهش یافت .نتیجه کلیدی آن است که ساحل یا رودخانه به‌تنهایی محور یکنواخت تغییر نیستند؛ ترکیب ارتفاع، نوع پوشش، دسترسی و بافت، نرخ مشاهده‌شده را شکل می‌دهد.

جدول ۷: گرادیان‌های منتخب نرخ تغییر کل
Table 7: Selected gradients of the overall change rate

متغیر Variable	بازه Bin	نرخ تغییر (٪) Change rate (٪)	تفسیر Interpretation
فاصله بافت Distance to built-up	۰–۱۰۰ m 0–100 m	37.53	بیشترین مجاورت Highest proximity
فاصله بافت Distance to built-up	۱۰۰–۲۵۰ m 100–250 m	28.32	کاهش سریع Rapid decline
فاصله بافت Distance to built-up	۲۵۰–۵۰۰ m 250–500 m	20.16	تداوم کاهشی Continued decline
فاصله راه Distance to roads	۰–۱۰۰ m 0–100 m	35.61	تمرکز نزدیک راه Concentration near roads
فاصله راه Distance to roads	۱۰۰–۲۵۰ m 100–250 m	33.74	افت اندک Small decline
ارتفاع Elevation	۱۰۰–۳۰۰ m 100–300 m	46.13	بیشینه دامنه‌ای Elevational maximum
فاصله ساحل Distance to coastline	۲–۵ km 2–5 km	36.81	بیشینه پشتی ساحل Maximum behind coastline
فاصله رود Distance to rivers	۲–۵ km 2–5 km	20.48	کمینه میانی Intermediate minimum

یادداشت .نرخ برابر مساحت تغییر تقسیم بر سطح معتبر هر بازه است؛ جدول گزیده‌ای از همه بازه‌هاست
Note. Rate equals changed area divided by valid area within each bin; the table presents selected bins.



شکل ۷: گرادیان نرخ تغییر بر حسب ارتفاع، شیب و فاصله تا ساحل، راه، بافت ساخته‌شده و رودخانه
Fig. 7: Change-rate gradients by elevation, slope, and distance to the coastline, roads, baseline built-up land, and rivers.

منبع :پردازش پژوهش
Source: Research processing.

○ *خوشه‌های تغییر*

از ۳۰۶۷ سلول ۵۰۰ متر، ۱۸۷۲ سلول (۶۱/۰۴ درصد) نامعنا بودند. ۳۸۸ سلول (۱۲/۶۵ درصد) لکه داغ ۹۹ درصد و ۱۸۷ سلول (۶/۱۰ درصد) لکه داغ ۹۵ درصد بودند؛ در مجموع ۵۷۵ سلول (۱۸/۷۵ درصد) در خوشه‌های تغییر بالا قرار گرفتند. در سوی مقابل، ۲۶۶ سلول (۸/۶۷ درصد) لکه سرد ۹۹ درصد و ۳۵۴ سلول (۱۱/۵۴ درصد) لکه سرد ۹۵ درصد بودند؛ جمع لکه‌های سرد ۲۰/۲۲ درصد بود. آماره z جی‌ستاره از ۳/۷۳− تا ۷/۸۸ تغییر کرد. همبستگی ۰/۸۳۸ میان تراکم تغییر و z، سازگاری قوی رتبه مکانی را نشان داد، ولی کامل نبودن آن نتیجه وزن همسایگی و زمینه پیرامونی است: یک سلول با تراکم متوسط در میان سلول‌های زیاد می‌تواند z بالایی داشته باشد و یک سلول منفرد با مقدار زیاد الزاماً لکه داغ نشود.

نقشه شکل ۸ نشان می‌دهد لکه‌های داغ به چند پهنه گسسته تقسیم می‌شوند و یک کانون واحد شهری نیستند .برخی کانون‌ها با گرادیان دامنه‌ای و برخی با نوارهای دسترسی هم‌پوشانی دارند .لکه‌های سرد بخش‌هایی از پهنه‌های پایدار جنگل یا نواحی با تغییر کم را بازنمایی ،می‌کنند .این ساختار چندکانونی نشان داد بازدید صرفاً نزدیک شهر نماینده همه گذارهای طبیعی بزرگ نیست.

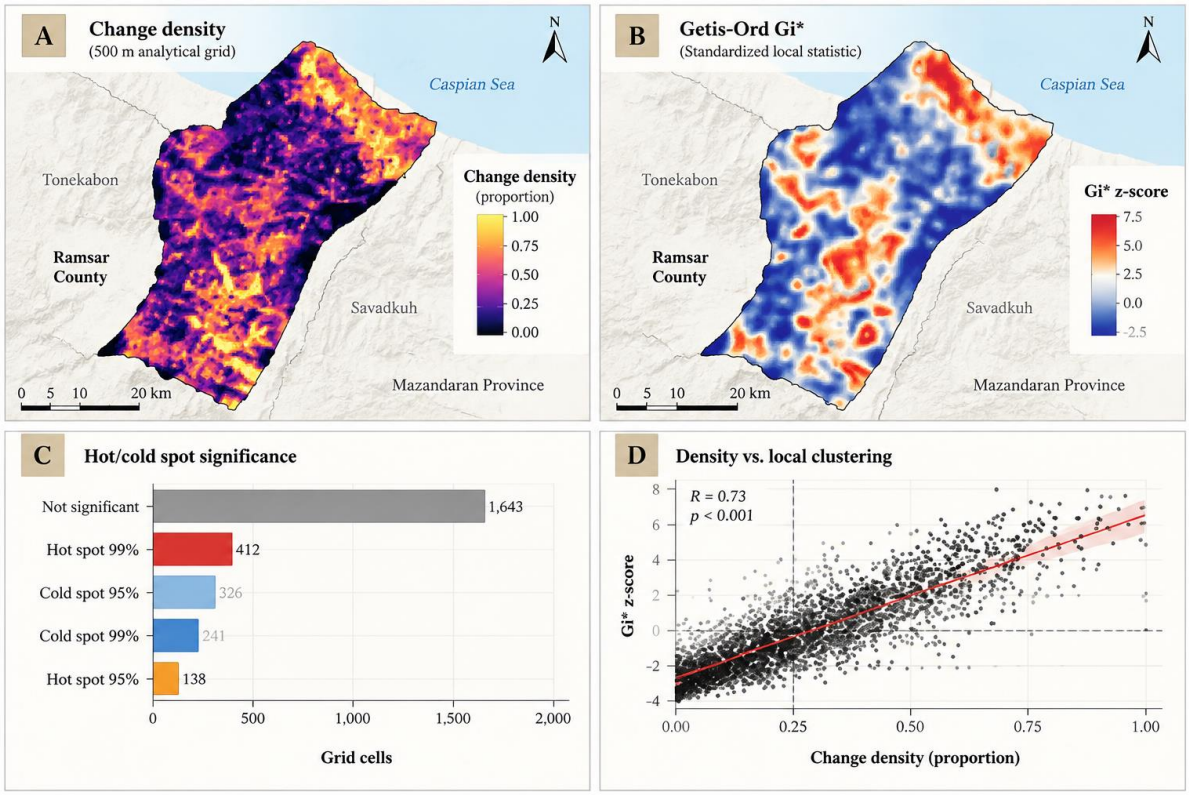
جدول ۸: ترکیب سلول‌های گتیس–اُرد جی‌ستاره در شبکه ۵۰۰ متر

Table 8: Composition of Getis–Ord Gi* cells on the 500 m grid

کلاس Class	تعداد Count	سهم (٪) Share (%)	معنا Meaning
٪لکه داغ ۹۹ 99% hot spot	388	12.65	z≥۲٫۵۸ z ≥ 2.58
٪لکه داغ ۹۵ 95% hot spot	187	6.10	۱٫۹۶≤z<۲٫۵۸ 1.96 ≤ z < 2.58
نامعنا Not significant	1,872	61.04	p≥۰٫۰۵ یا |z|<۱٫۹۶ p ≥ 0.05 or |z| < 1.96
٪لکه سرد ۹۵ 95% cold spot	354	11.54	−۲٫۵۸<z≤−۱٫۹۶ -2.58 < z ≤ -1.96
٪لکه سرد ۹۹ 99% cold spot	266	8.67	z≤−۲٫۵۸ z ≤ -2.58

یادداشت .تعداد سلول‌ها ۳٬۰۶۷، دامنه نمره استاندارد از ۳/۷۳− تا ۷/۸۸ و همبستگی تراکم تغییر و نمره برابر ۰/۸۳۸ است

Note. N = 3,067; the z-score ranged from -3.73 to 7.88; the correlation between change density and z-score was 0.838.



شکل ۸: تراکم تغییر روی شبکه ۵۰۰ متر و خوشه‌های محلی گتیس–اُرد جی‌ستاره؛ لکه‌های داغ و سرد ۹۵ و ۹۹ درصد تمرکز نسبی تغییرات کل را نشان می‌دهند

Fig. 8: Change density on the 500 m grid and local Getis–Ord Gi* clusters; 95% and 99% hot and cold spots show the relative concentration of overall change.

Source: Research processing. منبع :پردازش پژوهش

○ *رگرسیون لجستیک و اعتبارسنجی فضایی*

مساحت زیر منحنی درون‌نمونه‌ای لجستیک برای مرتع به بایر ۰/۷۵۴، باغ به جنگل ۰/۷۸۹، جنگل به باغ ۰/۷۴۰ و باغ به مرتع ۰/۷۳۸ بود. دقت متناظر ۰/۶۸۹، ۰/۷۲۱، ۰/۶۷۲ و ۰/۶۸۴ به‌دست آمد. در اعتبارسنجی بلوکی، مساحت زیر منحنی به‌ترتیب ۰/۷۴۷، ۰/۷۷۴، ۰/۷۲۹ و ۰/۷۲۲ بود و دقت میانگین ۰/۶۸۴، ۰/۷۰۸، ۰/۶۵۹ و ۰/۶۷۰ شد. افت مساحت زیر منحنی بین ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۱۵ نسبتاً محدود بود و نشان می‌دهد الگوی ارتباطی در بلوک‌های جدا نیز تا اندازه‌ای حفظ شده است. با این حال مساحت زیر منحنی‌های حدود ۰/۷۲–۰/۷۷ برای غربالگری متوسط‌اند و قطعیت سلولی ایجاد نمی‌کنند. بهترین مدل فضایی باغ به جنگل و ضعیف‌ترین باغ به مرتع بود. حساسیت و ویژگی در بیشتر مدل‌ها متوازن بودند، ولی تفاوت میان گذارها نشان داد آستانه ۰/۵ برای همه کاربردها بهینه نیست.

نسبت شانس استانداردشده جهت اثرهای مشروط را آشکار کرد. در مرتع به بایر، ارتفاع نسبت شانس=۴.۱۸ قوی‌ترین ارتباط مثبت بود؛ شیب نسبت شانس=۱.۳۸ نیز مثبت و فاصله ساحل، راه، بافت و رودخانه همگی کمتر از یک بودند. در باغ به جنگل، ارتفاع نسبت شانس=۰.۳۲ اثر منفی، شیب نسبت شانس=۲.۲۲، فاصله ساحل نسبت شانس=۱.۶۳، فاصله از بافت نسبت شانس=۲.۸۰ و فاصله رودخانه نسبت شانس=۱.۳۳ اثر مثبت داشتند. در جنگل به باغ، ارتفاع نسبت شانس=۲.۱۰ مثبت و شیب نسبت شانس=۰.۵۳ منفی بود؛ فاصله راه نسبت شانس=۱.۲۰ و فاصله ساحل، بافت و رودخانه نزدیک یک قرار گرفتند. در باغ به مرتع، شیب نسبت شانس=۲.۶۵ مثبت و ارتفاع نسبت شانس=۰.۷۷، فاصله ساحل نسبت شانس=۰.۷۹، راه نسبت شانس=۰.۸۶، بافت نسبت شانس=۰.۸۲ و رودخانه نسبت شانس=۰.۹۵ منفی بودند. این علامت‌های متفاوت، نادرستی فرض یک اثر واحد برای همه تغییرات را نشان می‌دهد.

جدول ۹: عملکرد مدل‌های چهار گذار منتخب

Table 9: Model performance for the four selected transitions

گذار Transition	لجستیک AUC Logistic AUC	بلوکی AUC Block AUC	AUC XGB Random holdout	دقت لجستیک Logistic accuracy	دقت بلوکی Block accuracy	دقت XGB XGB accuracy
مرتع به بایر Rangeland به bare land	0.754	0.747	0.826	0.689	0.684	0.743
باغ به جنگل Orchard به forest	0.789	0.774	0.893	0.721	0.708	0.802
جنگل به باغ Forest به orchard	0.740	0.729	0.845	0.672	0.659	0.758
باغ به مرتع Orchard به rangeland	0.738	0.722	0.864	0.684	0.670	0.799

یادداشت: مقدار AUC تقویت گرادیانی حدی از نگه‌داشت تصادفی شامل ٪۲۰ داده‌ها به‌دست آمد، درحالی‌که AUC اعتبارسنجی بلوکی فقط برای رگرسیون لجستیک محاسبه شد؛ بنابراین، مقایسه مستقیم عملکرد این دو الگوریتم معتبر نیست.

Note. Extreme Gradient Boosting AUC was obtained from a random 20% holdout, whereas block AUC was calculated only for logistic regression; direct algorithmic comparison is not valid.

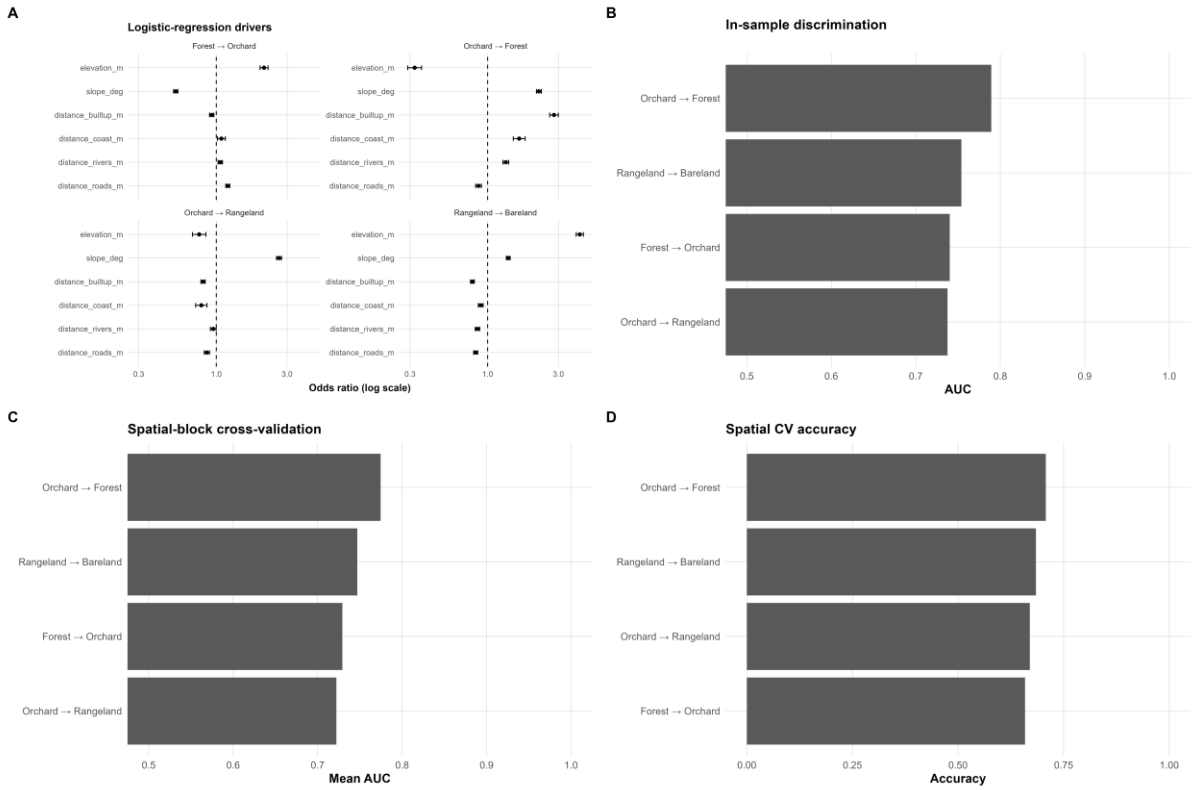
جدول ۱۰: نسبت شانس استانداردشده رگرسیون لجستیک

Table 10: Standardized odds ratios from logistic regression

گذار Transition	ارتفاع Elevation	شیب Slope	ساحل Coastline	راه Roads	بافت Built-up	رودخانه Rivers
مرتع به بایر Rangeland به bare land	4.178	1.377	0.898	0.831	0.789	0.854
باغ به جنگل Orchard به forest	0.322	2.215	1.632	0.868	2.801	1.326
جنگل به باغ Forest به orchard	2.098	0.533	1.083	1.195	0.931	1.064
باغ به مرتع Orchard به rangeland	0.767	2.647	0.793	0.864	0.815	0.954

یادداشت .هر نسبت شانس مربوط به افزایش یک انحراف معیار و مشروط به سایر متغیرهاست

Note. Each odds ratio represents a one-standard-deviation increase conditional on the other variables.



شکل ۹: رگرسیون لجستیک و اعتبارسنجی فضایی؛ نسبت‌های شانس استاندارد، مساحت زیر منحنی درون‌نمونه‌ای و میانگین بلوک‌های ۲ کیلومتر برای چهار گذار مقایسه شده است.

Fig. 9: Logistic regression and spatial validation; standardized odds ratios, in-sample AUC, and mean AUC for 2 km spatial blocks are compared across four transitions.

منبع :پردازش پژوهش

Source: Research processing.

○ *تقویت گرادیانی حدی و تبیین شاپلی*

در نگهداشت تصادفی ۲۰ درصد، تقویت گرادیانی حدی برای چهار گذار AUCهای ۰/۸۲۶ تا ۰/۸۹۳ به‌دست آورد. این ارقام از نظر عددی با AUC لجستیک درون‌نمونه‌ای یا بلوکی بالاترند، اما طرح‌های ارزیابی یکسان نیستند و مقایسه مستقیم آنها معتبر نیست. برای آزمون برتری تعمیم فضایی، XGBoost باید با همان بلوک‌های ۲ کیلومتری و تنظیم ابرپارامتر درون چین آموزش و ارزیابی شود؛ این بازاجرا در فایل‌های همراه این نسخه انجام نشده است.

ارتفاع در هر چهار گذار بالاترین میانگین قدرمطلق مقادیر شاپلی را داشت: ۰/۸۴۰ در مرتع به بایر، ۱/۲۴۶ در باغ به جنگل، ۰/۶۲۴ در جنگل به باغ و ۱/۱۶۲ در باغ به مرتع. در مرتع به بایر، فاصله ساحل ۰/۳۵۳ و شیب ۰/۲۷۵ دوم و سوم بودند. در باغ به جنگل، فاصله ساحل ۰/۴۴۳ و شیب ۰/۴۴۱ تقریباً برابر بودند و فاصله بافت ۰/۴۲۹ نیز نقش بزرگی داشت. در جنگل به باغ، شیب ۰/۴۳۴ و ساحل ۰/۳۲۷ پس از ارتفاع قرار گرفتند؛ فاصله بافت ۰/۳۰۵ نیز مهم بود. در باغ به مرتع، شیب ۰/۴۹۹ و ساحل ۰/۳۱۶ رتبه دوم و سوم را داشتند. نتیجه مشترک، سلطه توپوگرافی بر مقدار سهم پیش‌بینی و تفاوت رتبه متغیرهای دسترسی میان گذارهاست. شکل ۱۰ معیار تقویت گرادیانی حدی، نمودارهای اهمیت و توزیع‌های مقادیر شاپلی را یکجا نشان می‌دهد.

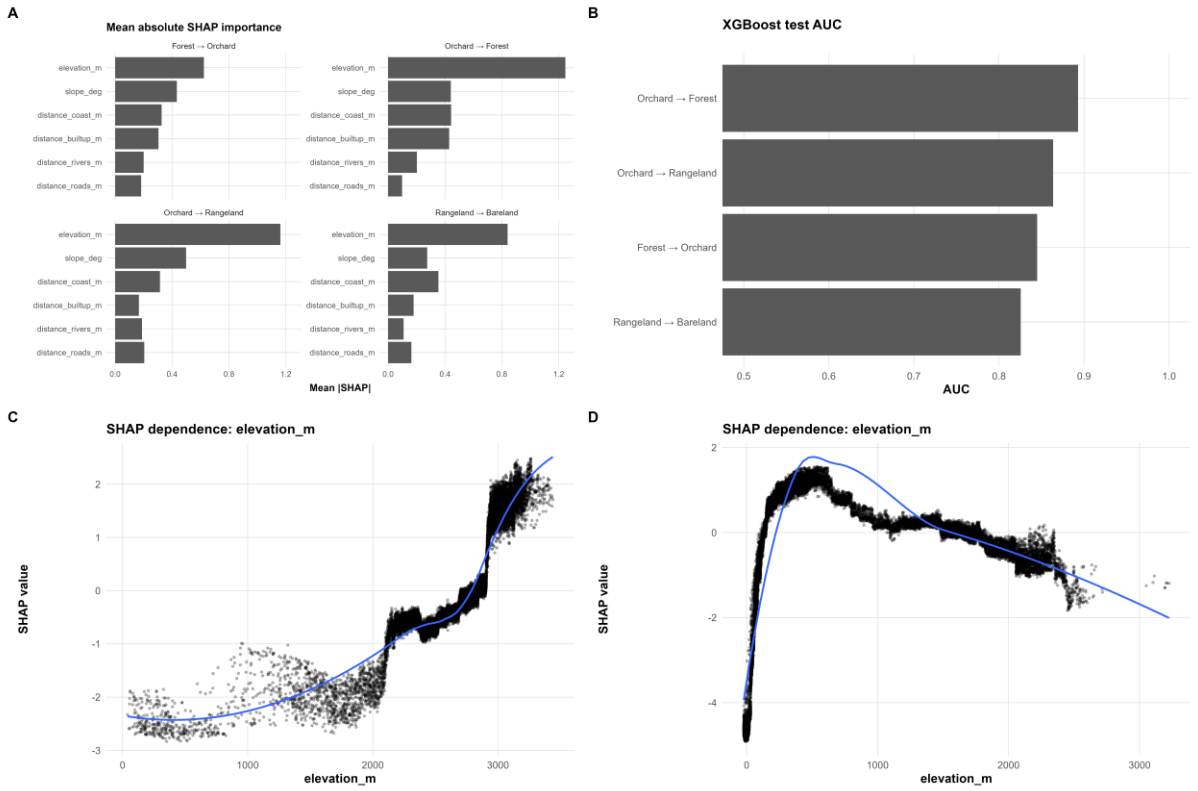
○ *بحث یکپارچه یافته‌ها، مقایسه و محدودیت‌ها*

ترکیب نتایج در سطوح مختلف تحلیل، سه الگوی همگرا را آشکار کرد. نخست، تمرکز بیشتر تغییر در مجاورت بافت ساخته‌شده و راه با غلبه مساحتی گسترش لبه‌ای سازگار بود. دوم، بیشینه نرخ تغییر در بازه ارتفاعی ۱۰۰–۳۰۰ متر با قرار گرفتن ارتفاع در رتبه نخست میانگین قدرمطلق مقادیر شاپلی در چهار مدل همخوانی داشت. سوم، گردش گسترده میان باغ، جنگل و مرتع هم در ماتریس انتقال و تحلیل شدت دیده شد و هم در انتخاب چهار گذار اصلی برای مدل‌سازی بازتاب یافت. هم‌جهتی این شواهد، وجود ساختار مکانی در تغییرات مشاهده‌شده را تقویت می‌کند، هرچند تفسیر موضوعی هر گذار همچنان به صحت طبقه‌بندی نقشه‌ها وابسته است. الگوی لکه‌های داغ نیز نشان داد که تمرکز تغییر صرفاً حاصل یک یا دو لکه منفرد با مقدار بالا نیست، بلکه در قالب خوشه‌هایی از مقادیر بالای تراکم تغییر در همسایگی‌های گسترده‌تر ظاهر شده است.

جدول ۱۱: سه متغیر نخست بر اساس میانگین قدرمطلق سهم شاپلی
Table 11: Top three variables by mean absolute Shapley contribution

گذار Transition	رتبه ۱ Rank 1	رتبه ۲ Rank 2	رتبه ۳ Rank 3
مرتع به بایر Rangeland به bare land	ارتفاع ۰/۸۴۰ Elevation 0.840	ساحل ۰/۳۵۳ Coastline 0.353	شیب ۰/۲۷۵ Slope 0.275
باغ به جنگل Orchard به forest	ارتفاع ۱/۲۴۶ Elevation 1.246	ساحل ۰/۴۴۳ Coastline 0.443	شیب ۰/۴۴۱ Slope 0.441
جنگل به باغ Forest به orchard	ارتفاع ۰/۶۲۴ Elevation 0.624	شیب ۰/۴۳۴ Slope 0.434	ساحل ۰/۳۲۷ Coastline 0.327
باغ به مرتع Orchard به rangeland	ارتفاع ۱/۱۶۲ Elevation 1.162	شیب ۰/۴۹۹ Slope 0.499	ساحل ۰/۳۱۶ Coastline 0.316

یادداشت .مقادیر، میانگین قدرمطلق سهم شاپلی و نشان‌دهنده بزرگی سهم هستند، نه جهت یا علیت
Note. Values are mean absolute Shapley contributions and indicate contribution magnitude, not direction or causality.



شکل ۱۰: عملکرد تقویت گرادیانی حدی و تبیین شاپلی؛ مساحت زیر منحنی آزمون تصادفی، اهمیت جهانی و توزیع سهم متغیرها نشان می‌دهد ارتفاع در هر چهار گذار بیشترین میانگین قدرمطلق سهم را دارد.
Fig. 10: Extreme Gradient Boosting performance and Shapley explanation; random-test AUC, global importance, and contribution distributions show that elevation has the largest mean absolute contribution in all four transitions.
منبع :پردازش پژوهش
Source: Research processing.

در کنار این همگرایی‌ها، دو تعارض ظاهری نیز برای تفسیر نتایج اهمیت داشت. نخست، گرادیان کلی فاصله از بافت ساخته‌شده رابطه‌ای کاهشی با نرخ تغییر داشت، اما در مدل باغ به جنگل، نسبت شانس فاصله از بافت مثبت بود. این دو نتیجه لزوماً متناقض نیستند، زیرا گرادیان همه طبقات مبدأ و مقصد را دربر می‌گیرد، در حالی که مدل باغ به جنگل فقط سلول‌هایی را مقایسه می‌کند که در سال ۲۰۱۶ باغ بوده‌اند و اثر سایر متغیرهای مدل را نیز به‌صورت مشروط در نظر می‌گیرد. دوم، جنگل افزایش خالص داشت، اما مهم‌ترین جریان خروج آن به باغ و

مهم‌ترین جریان ورودی آن نیز از باغ بود. بنابراین، افزایش خالص جنگل را نمی‌توان معادل پایداری کامل یا بهبود قطعی این طبقه دانست. این موارد نشان می‌دهد که سطح تحلیل باید همواره همراه با مقدار گزارش‌شده تفسیر شود: یک شاخص کل نمی‌تواند جای تحلیل گذارویژه را بگیرد و نتیجه یک مدل گذارویژه نیز قابل تعمیم مستقیم به کل چشم‌انداز نیست.

یکی از یافته‌های اصلی پژوهش، فاصله میان تغییر خالص و گردش ناخالص طبقات بود. اگر فقط تغییر خالص در نظر گرفته شود، تصویر غالب به کاهش مرتع و افزایش بایر محدود می‌شود؛ در حالی که ماتریس انتقال نشان داد باغ و جنگل نیز جریان‌های دوسویه چند هزار هکتاری داشته‌اند و طبقه ساخته‌شده، با وجود افزایش خالص، ۹۰۷ هکتار زیان نقشه‌ای ثبت کرده است. تحلیل شدت همین تفاوت را از زاویه‌ای دیگر نشان داد: بایر از نظر سود فعال و از نظر زیان خفته بود؛ مرتع الگوی معکوس داشت؛ و باغ و زراعت در هر دو سوی سود و زیان شدت بالاتری از مرجع نشان دادند. بر این اساس، «افزایش بایر» را باید حاصل مجموعه‌ای از جریان‌های نقشه‌ای دانست، نه بازتاب یک فرایند یکنواخت. بخشی از گذار مرتع به بایر می‌تواند با کاهش پوشش، چرای شدید، خاک آشکار یا تغییرات فصلی سازگار باشد و بخشی نیز ممکن است از مرز طیفی میان این دو طبقه ناشی شده باشد. مطالعات ادراک محلی در اتیوپی و چارچوب‌های مثلث‌سازی در اندونزی نیز بر ضرورت ترکیب شواهد تصویری، مشاهده‌ای و دانش ذی‌نفعان برای تفسیر معنای گذارها تأکید کرده‌اند [۸۱، ۸۲].

مقایسه با مطالعات مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نشان می‌دهد گذار مرتع–بایر در آن محیط‌ها اغلب در ارتباط با بیابان‌زایی، بهره‌برداری و نوسان پوشش بررسی شده است؛ با این حال، شرایط اقلیمی و توپوگرافی رامسر با آن نواحی تفاوت دارد. از این رو، نسبت دادن مستقیم ۶٬۷۰۷ هکتار گذار نقشه‌ای مرتع به بایر به بیابان‌زایی قابل دفاع نیست. جریان‌های بزرگ و متقابل باغ به جنگل و جنگل به باغ نیز احتمال حساسیت مرز میان این دو طبقه را مطرح می‌کنند، زیرا باغ‌های متراکم و جنگل‌های حاشیه‌ای ممکن است در تصاویر چندطیفی و در فصل‌های مختلف شباهت طیفی بیشتری پیدا کنند. این احتمال، جایگزین تفسیر فرایندی نیست، بلکه محدودیتی است که باید در ارزیابی این گذارها در نظر گرفته شود.

مدل‌های تغییر کاربری مانند FLUS و CA–Markov نشان داده‌اند که ترکیب تقاضای کل و تخصیص مکانی در سناریوسازی تغییر اهمیت دارد [۸۳، ۸۴]. پژوهش حاضر وارد پیش‌بینی سال‌های آینده نشد، زیرا وجود تنها دو تاریخ و عدم‌قطعیت طبقه‌بندی، مبنای کافی برای کالیبراسیون یک سناریوی قابل دفاع فراهم نمی‌کند. نقش ماتریس انتقال و تحلیل شدت در این مطالعه، پیش‌بینی آینده نیست؛ بلکه مشخص کردن مقدار، جهت و محل‌هایی است که تفسیر آنها به بررسی دقیق‌تر یا شواهد مکمل نیاز دارد.

طبقه ساخته‌شده ۱٬۳۹۲ هکتار افزایش خالص داشت، در حالی که سود ناخالص آن حدود ۲٬۳۰۰ هکتار بود. تفاوت این دو مقدار نشان می‌دهد که هم ورود به طبقه ساخته‌شده و هم خروج نقشه‌ای از آن در فاصله دو تاریخ رخ داده است. تحلیل شاخص گسترش منظر نیز نشان داد که ۶۷ درصد مساحت افزوده در قالب گسترش لبه‌ای قرار می‌گیرد. این نتیجه بیانگر آن است که بخش عمده افزایش مساحتی طبقه ساخته‌شده در تماس با بافت موجود شکل گرفته است. چنین الگویی ممکن است از نظر اتصال به زیرساخت موجود با توسعه‌های دورافتاده تفاوت داشته باشد؛ با این حال، در جلگه باریک رامسر، لبه بافت ساخته‌شده در بسیاری از نقاط در مجاورت باغ و زراعت قرار دارد. بنابراین، غلبه گسترش لبه‌ای به‌تنهایی نمی‌تواند به‌عنوان نشانه مطلوب بودن فرم توسعه تفسیر شود و ممکن است با کاهش تدریجی پیوستگی اراضی سبز و کشاورزی همراه باشد.

در سوی دیگر، لکه‌های برون‌افتاده ۱۴/۹ درصد از مساحت افزوده اما ۳۱/۶ درصد از تعداد لکه‌ها را تشکیل دادند. این تفاوت میان سهم مساحت و سهم تعداد نشان می‌دهد که برون‌افتاده‌ها عمدتاً لکه‌های کوچک‌تری بوده‌اند و هم‌زمان با رشد لبه‌ای، نوعی پراکندگی خرد نیز در منظر وجود داشته است. مطالعات انجام‌شده در ساری، مراغه و تهران نیز آسیب‌پذیری اراضی پیرامونی و ارتباط دسترسی با گسترش شهری را گزارش کرده‌اند و شواهد جهانی بر تنوع فرم رشد و تفاوت کارایی مصرف زمین میان شهرها تأکید دارد [۲۸، ۳۱، ۸۵، ۲۰]. با این حال، سود ناخالص طبقه ساخته‌شده در این پژوهش یک تغییر برچسب نقشه‌ای است و نباید بدون شواهد مستقل با توسعه فیزیکی قطعی یکسان در نظر گرفته شود.

قرار گرفتن ارتفاع در رتبه نخست میانگین قدرمطلق مقادیر شاپلی در همه مدل‌ها به این معنا نیست که افزایش ارتفاع در همه گذارها جهت اثر یکسانی دارد. رگرسیون لجستیک نشان داد ارتباط مشروط ارتفاع برای مرتع به بایر و جنگل به باغ مثبت، اما برای باغ به جنگل و باغ به مرتع منفی بود. مقادیر شاپلی بزرگی سهم یک متغیر را در پیش‌بینی مدل خلاصه می‌کنند و جهت اثر را به‌تنهایی مشخص نمی‌سازند؛ از این رو، یک متغیر می‌تواند سهم شاپلی بالایی داشته باشد و در گذارهای مختلف روابط متفاوت یا حتی غیرخطی نشان دهد. بیشینه نرخ تغییر در بازه ارتفاعی ۱۰۰–۳۰۰ متر، برابر با ۴۶ درصد، نیز با وجود یک الگوی توپوگرافی ناهمگن سازگار است و نشان می‌دهد رابطه تغییر با ارتفاع را نمی‌توان به یک روند خطی ساده فروکاست. در رامسر، ارتفاع می‌تواند هم‌زمان نماینده تفاوت در نوع پوشش، اقلیم محلی، دسترسی، فاصله از ساحل، شیب و سایر ویژگی‌های مکانی باشد؛ بنابراین، نباید آن را یک علت مستقل و منفرد برای تغییر زمین تلقی کرد.

اثر فاصله از راه و بافت ساخته‌شده نیز میان گذارها یکسان نبود. نرخ کلی تغییر با افزایش فاصله از بافت ساخته‌شده تا پنج کیلومتر کاهش یافت، اما نسبت شانس فاصله از بافت در مدل باغ به جنگل بزرگ‌تر از یک و در مدل باغ به مرتع کمتر از یک بود. این تفاوت بار دیگر نشان

می‌دهد که گرادیان کلی و مدل گذارویژه، جمعیت‌های متفاوتی را توصیف می‌کنند. فاصله از بافت نیز الزاماً فقط نماینده اثر شهر نیست و می‌تواند با تفاوت در مدیریت، آبیاری، تراکم باغ‌ها یا سایر ویژگی‌های مکانی هم‌بسته باشد. در مدل مرتع به بایر، نسبت شانس فاصله از راه کمتر از یک بود؛ یعنی با افزایش فاصله، شانس مشروط این گذار کاهش یافت و در نتیجه وقوع آن در فاصله‌های کمتر از راه بیشتر بود. در مقابل، این نسبت در مدل جنگل به باغ اندکی بیش از یک به‌دست آمد. با توجه به اینکه راه‌های ثبت‌شده از نظر رده و کیفیت یکسان نیستند و فاصله اقلیدسی تا نزدیک‌ترین خط، زمان سفر یا دسترسی واقعی را اندازه نمی‌گیرد، این روابط باید به‌عنوان ارتباط‌های مکانی مشروط تفسیر شوند.

در گرادیان ساحلی، بیشترین تغییر در فاصله ۲–۵ کیلومتر از ساحل مشاهده شد و برای فاصله از رودخانه نیز روند ساده و یکنواختی به‌دست نیامد. این الگو با تمرکز انحصاری تغییر در مجاورت مستقیم خط ساحلی سازگار نیست. نوار ۲–۵ کیلومتر می‌تواند بخش قابل توجهی از جلگه پشتی و آغاز دامنه‌ها را دربر گیرد؛ جایی که تماس میان طبقات مختلف کاربری/پوشش زمین بیشتر است. در مقابل، نزدیک‌ترین نوار ساحلی ترکیبی از آب، شن، بافت‌های تثبیت‌شده و پهنه‌های دارای محدودیت‌های قانونی است. مطالعات انجام‌شده در شهرهای ساحلی نیز بر ناهمگنی الگوی دریا–خشکی و وابستگی آن به ساختار اقتصادی و زیرساختی تأکید کرده‌اند [۲۲، ۲۳].

تقویت گرادیانی حدی در نگهداشت تصادفی AUC بیشتری از لجستیک به‌دست آورد، اما این دو عدد از طرح‌های آزمون متفاوت حاصل شده‌اند. اعتبارسنجی فضایی در این نسخه فقط برای لجستیک انجام شد و استانداردسازی پیش از افراز چین‌ها صورت گرفت. بنابراین، هیچ رتبه‌بندی قطعی میان الگوریتم‌ها ارائه نمی‌شود و اختلاف عددی صرفاً به‌عنوان نتیجه‌ای وابسته به طراحی آزمون گزارش می‌گردد.

افت محدود AUC لجستیک از ارزیابی درون‌نمونه‌ای به بلوک‌های فضایی نشانه‌ای مقدماتی از انتقال‌پذیری است، اما به دلیل استانداردسازی پیش از افراز، اندازه انتخابی بلوک و نبود برآورد خودهمبستگی برای هر گذار، نتیجه نهایی محسوب نمی‌شود. ارزیابی اصلاح‌شده باید استانداردسازی را درون هر چین انجام دهد و سپس میانگین و دامنه عملکرد را گزارش کند.

عدم‌قطعیت طبقه‌بندی می‌تواند بر ماتریس انتقال، تحلیل شدت و مدل‌های گذار اثر بگذارد. اگر مرز مرتع–بایر یا باغ–جنگل با پیش‌بین‌های مکانی هم‌بسته باشد، عملکرد ظاهراً مناسب مدل ممکن است بخشی از ساختار خطا را یاد بگیرد. از این رو، خروجی‌های این مقاله برای شناسایی الگوها و اولویت‌بندی ممیزی مناسب‌اند و بدون ارزیابی مستقل نقشه ۲۰۲۵ یا تحلیل حساسیت مبتنی بر داده مرجع، سند علّی تغییر زمین نیستند.

کاهش نقشه‌ای مرتع، باغ، زراعت و آب می‌تولند از منظر فرایندهای هیدرولوژیک، خاک، زیستگاه و اقتصاد محلی اهمیت داشته باشد، اما هیچ‌یک از این پیامدها در پژوهش حاضر به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده‌اند. مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که تغییر پوشش زمین می‌تواند با کاهش یا جابه‌جایی خدمات اکوسیستمی همراه باشد و اندازه و جهت این اثر به نوع گذار و موقعیت مکانی وابسته است [۶۸، ۶۹]. در رامسر، تغییر نقشه‌ای زراعت یا باغ در مجاورت بافت ساخته‌شده می‌تواند فرضیه‌هایی درباره فشار بر تولید، نفوذ آب یا منظر گردشگری ایجاد کند؛ گذار مرتع به بایر نیز می‌تواند از منظر فرسایش نیازمند بررسی بیشتر باشد و تغییر میان باغ و جنگل ممکن است پیامدهای متفاوتی برای کربن و تنوع زیستی داشته باشد. این موارد در داده‌های پژوهش حاضر آزمون نشده‌اند و باید صرفاً به‌عنوان دلالت‌ها یا فرضیه‌هایی برای مطالعات بعدی در نظر گرفته شوند.

از منظر اجتماعی نیز نمی‌توان تغییر زمین را به یک تصمیم یا عامل منفرد نسبت داد. مالکیت، خردشدگی قطعات، مجوزها، بازار زمین، گردشگری، کشاورزی و دسترسی می‌توانند به‌صورت هم‌زمان با الگوی تغییر مرتبط باشند، اما این متغیرها در مدل حاضر اندازه‌گیری نشده‌اند. فاصله‌های مکانی استفاده‌شده در مدل تنها نماینده‌هایی از موقعیت فضایی‌اند و جایگزین مستقیم این سازوکارهای اجتماعی نیستند. بنابراین، از داده‌های موجود نمی‌توان درباره سازوکار اجتماعی شکل‌گیری جبهه‌های فعال یا پایدار تغییر، استنباط علّی انجام داد.

یافته‌های رامسر از برخی جهات با ادبیات رشد شهری هم‌راستا است. تمرکز بیشتر تغییر در مجاورت بافت ساخته‌شده و شبکه دسترسی با نتایج بسیاری از مطالعات پیشین سازگار بود و تحلیل شاخص گسترش منظر نیز هم‌زیستی میان‌افزا، گسترش لبه‌ای و لکه‌های برون‌افتاده را نشان داد. با این حال، تفاوت مهم رامسر در این است که بزرگ‌ترین جریان‌های نقشه‌ای مشاهده‌شده مربوط به توسعه ساخته‌شده نبودند، بلکه میان طبقات طبیعی و کشاورزی رخ دادند. این وضعیت می‌تواند با ساختار ساحلی–کوهستانی منطقه، سهم گسترده جنگل و مرتع و حساسیت موضوعی مرزهای باغ–جنگل و مرتع–بایر مرتبط باشد. بر همین اساس، تعمیم مستقیم الگوهای حاصل از کلان‌شهرها یا شهرهای ساحلی کم‌شیب به رامسر باید با احتیاط انجام شود. یکی از وجوه اصلی پژوهش حاضر این است که رشد ساخته‌شده را درون کل گردش نقشه‌ای منظر قرار می‌دهد، نه اینکه آن را جدا از سایر تغییرات بررسی کند.

از نظر روش‌شناختی، ترکیب تحلیل شدت، شاخص گسترش منظر، آماره محلی گتیس–اُرد جی‌ستاره و مدل‌های گذار امکان بررسی ابعاد متفاوت تغییر را در یک چارچوب واحد فراهم کرد. تحلیل شدت میان بزرگی مطلق جریان و انتخاب‌گری نسبی تمایز گذاشت؛ شاخص گسترش منظر نشان داد که سهم تعداد و سهم مساحت فرم‌های توسعه می‌توانند روایت‌های متفاوتی ارائه کنند؛ جی‌ستاره تمرکز مکانی مقادیر بالای تراکم تغییر را در زمینه همسایگی مشخص کرد؛ و مدل‌های گذار نشان دادند که جهت ارتباط توپوگرافی و دسترسی برای همه مبدأها و مقصدها یکسان نیست. اعتبارسنجی فضایی نیز ارزیابی عملکرد

لجستیک را به مسئله انتقال‌پذیری مکانی پیوند داد. این چارچوب برای سازمان‌دهی و مقایسه شواهد حاصل از دو تاریخ مفید است، اما جایگزین سری زمانی بلندمدت یا ارزیابی مستقل صحت طبقه‌بندی نمی‌شود. سهم اصلی آن در کنار هم قرار دادن سطوح مختلف شواهد و روشن کردن مرز میان مشاهده نقشه‌ای، ارتباط آماری و تفسیر فرایندی است.

نتیجه‌گیری

- مقدار و جهت تغییر نقشه‌ای: از ۷۲٬۶۰۳/۵۲ هکتار سطح معتبر، ۱۹٬۱۵۲/۸۰ هکتار، معادل ۲۶/۳۸ درصد، میان دو نقشه تغییر برچسب داشت. بایر بیشترین افزایش خالص و مرتع بیشترین کاهش خالص را نشان دادند؛ با این حال، این ارقام به تفاوت برچسب‌ها مربوط‌اند و به‌تنهایی تغییر محیطی قطعی را ثابت نمی‌کنند.

- شدت و گردش طبقات: شدت یکنواخت سالانه ۲/۹۳۱ درصد بود. گذار مرتع به بایر بزرگ‌ترین جریان خارج قطر بود و باغ و جنگل مبادله دوسویه بزرگی داشتند؛ بنابراین تغییر خالص، حجم واقعی گردش نقشه‌ای را کم‌برآورد می‌کند.

- فرم گسترش ساخته‌شده: گسترش لبه‌ای ۶۷/۱۹ درصد مساحت افزوده را دربر گرفت، در حالی که لکه‌های برون‌افتاده ۳۱/۶۲ درصد تعداد لکه‌ها اما ۱۴/۹۳ درصد مساحت را تشکیل دادند. این دو نسبت نشان می‌دهند که شمار لکه‌ها و سهم مساحتی آنها یک پیام فضایی واحد ندارند.

- گرادیان‌ها و خوشه‌ها: بیشترین نرخ تغییر در ارتفاع ۱۰۰–۳۰۰ متر و نزدیک‌ترین فاصله به بافت ساخته‌شده مشاهده شد و خوشه‌های داغ و سرد در چند کانون جداگانه قرار داشتند. ارتفاع در مدل‌های غیرخطی سهم شاپلی بیشتری داشت، اما جهت نسبت شانس آن میان گذارها یکسان نبود؛ این متغیرها همبسته‌های مکانی‌اند، نه علت‌های مستقل و اثبات‌شده.

- عملکرد مدل و حدود استنباط: AUC لجستیک در چین‌های فضایی ۰/۷۲۲ تا ۰/۷۷۴ و AUC تقویت گرادیانی حدی در نگهداشت تصادفی ۰/۸۲۶ تا ۰/۸۹۳ بود. به دلیل تفاوت طرح آزمون، این ارقام قابل مقایسه مستقیم نیستند. نبود ماتریس خطای مستقل برای نقشه ۲۰۲۵، استانداردسازی پیش از افراز چین‌ها و نبود متغیرهای اقتصادی و اجتماعی، تعمیم و تفسیر علّی نتایج را محدود می‌کند.

مشارکت نویسندگان

این تحقیق حاصـــل تلاش یک نفر بوده و کلیه مراحل را انجام داده است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی کسانی که بنده را در انجام این تحقیق یاری نموده اند تشکر و قدردانی می کنم.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

منابع و مآخذ

[1] Brown CF, Brumby SP, Guzder-Williams B, Birch T, Hyde SB, Mazzariello J, Czerwinski W, Pasquarella VJ, Haertel R, Ilyushchenko S, Schwehr K, Weisse M, Stolle F, Hanson C, Guinan O, Moore R, Tait AM. Dynamic World, near real-time global 10 m land use land cover mapping. Scientific Data. 2022;9:251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4

[2] Buchhorn M, Lesiv M, Tsendbazar N-E, Herold M, Bertels L, Smets B. Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2. Remote Sensing. 2020;12(6):1044. DOI: 10.3390/rs12061044

[3] Gong P, Li X, Wang J, Bai Y, Chen B, Hu T, Liu X, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. Remote Sensing of Environment. 2020;236:111510. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111510

[4] Zhang X, Liu L, Chen X, Gao Y, Xie S, Mi J. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. Earth System Science Data. 2021;13:2753–2776. DOI: 10.5194/essd-13-2753-2021

[5] Venter ZS, Barton DN, Chakraborty T, Simensen T, Singh G. Global 10 m land use land cover datasets: A comparison of Dynamic World, World Cover and Esri Land Cover. Remote Sensing. 2022;14(16):4101. DOI: 10.3390/rs14164101

[6] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017;202:18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031

[7] Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush L, Adeli S, Brisco B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020;164:152–170. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001

[8] Phiri D, Morgenroth J. Developments in Landsat land cover classification methods: A review. Remote Sensing. 2017;9(9):967. DOI: 10.3390/rs9090967

[9] Belgiu M, Drăguţ L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016;114:24–31. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011

[10] Maxwell AE, Warner TA, Fang F. Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An

UN 2030 Agenda for Sustainable Development. Habitat International. 2021;115:102403.
DOI: 10.1016/j.habitatint.2021.102403

[21] Dada OA, Agbaje AO, Adesina RB, Asiwaju-Bello YA. Effect of coastal land use change on coastline dynamics along the Nigerian Mahin coast. Ocean & Coastal Management. 2019;168:251–264.
DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.11.014

[22] Han Y, Zhu J, Wei D, Wang F. Spatial-temporal evolution of land use and landscape pattern from the perspective of a sea–land gradient: A case study of Dalian City. Land. 2022;11(8):1302. DOI: 10.3390/land11081302

[23] Hoque MZ, Islam I, Ahmed M, Hasan SS, Prodhan FA. Spatio-temporal changes of land use/land cover and ecosystem service values in coastal Bangladesh. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. 2022;25(1):173–180. DOI: 10.1016/j.ejrs.2022.01.008

[24] Richards DR, Friess DA. Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000–2012. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016;113(2):344–349.
DOI: 10.1073/pnas.1510272113

[25] Quevedo JMD, Uchiyama Y, Kohsaka R. Linking blue carbon ecosystems with sustainable tourism: Dichotomy of urban–rural local perspectives from the Philippines. Regional Studies in Marine Science. 2021;45:101820.
DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101820

[26] Gargiulo C, Battarra R, Tremiterra MR. Coastal areas and climate change: A decision support tool for implementing adaptation measures. Land Use Policy. 2020;91:104413.
DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.104413

[27] Akbari A, Zandi R, Kalateh-Meymari R. Analysis and prediction of Mashhad urban expansion using multi-temporal satellite imagery and a Markov chain, 2000–2025. Geography and Environmental Hazards. 2019;8(2):149–166. [In Persian] DOI: 10.22067/geo.v0i0.78082

[28] Dadashpoor H, Salarian F. Analysis of the effects of urban sprawl on land-use change in the Sari urban region. Geographical Research on Urban Planning. 2015;3(2):145–163. [In Persian] Google Scholar link

[29] Panahi H, Shamsodini A, Dadashpoor H. Analysis of driving factors and prediction of land-use change in the Tehran metropolitan region using an integrated regional model. Regional Planning. 2019;9(35):39–56. [In Persian] Google Scholar link

[30] Rahnama MR, Shahbazi AH, Sargazi Z. Simulation of land-use changes in the peri-urban area of Zahedan. applied review. International Journal of Remote Sensing. 2018;39(9):2784–2817.
DOI: 10.1080/01431161.2018.1433343

[11] Talukdar S, Singha P, Mahato S, Shahfahad, Pal S, Liou Y-A, Rahman A. Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations—A review. Remote Sensing. 2020;12(7):1135.
DOI: 10.3390/rs12071135

[12] Tewkesbury AP, Comber AJ, Tate NJ, Lamb A, Fisher PF. A critical synthesis of remotely sensed optical image change detection techniques. Remote Sensing of Environment. 2015;160:1–14. DOI: 10.1016/j.rse.2015.01.006

[13] Stehman SV, Foody GM. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. Remote Sensing of Environment. 2019;231:111199.
DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.018

[14] Aburas MM, Ho YM, Ramli MF, Ash'aari ZH. Monitoring and assessment of urban growth patterns using spatio-temporal built-up area analysis. Environmental Monitoring and Assessment. 2018;190:156.
DOI: 10.1007/s10661-018-6522-9

[15] Gao J, O'Neill BC. Mapping global urban land for the 21st century with data-driven simulations and Shared Socioeconomic Pathways. Nature Communications. 2020; 11:2302. DOI: 10.1038/s41467-020-15788-7

[16] Güneralp B, Reba M, Hales BU, Wentz EA, Seto KC. Trends in urban land expansion, density, and land transitions from 1970 to 2010: A global synthesis. Environmental Research Letters. 2020;15(4):044015.
DOI: 10.1088/1748-9326/ab6669

[17] Liu X, Huang Y, Xu X, Li X, Li X, Ciais P, Lin P, Gong K, Ziegler AD, Chen A, Gong P, Chen J, Hu G, Chen Y, Wang S, Wu Q, Huang K, Estes L, Zeng Z. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015. Nature Sustainability. 2020;3:564–570.
DOI: 10.1038/s41893-020-0521-x

[18] Sun L, Chen J, Li Q, Huang D. Dramatic uneven urbanization of large cities throughout the world in recent decades. Nature Communications. 2020;11:5366.
DOI: 10.1038/s41467-020-19158-1

[19] Zhou Y, Varquez ACG, Kanda M. High-resolution global urban growth projection based on multiple applications of the SLEUTH urban growth model. Scientific Data. 2019;6:34.
DOI: 10.1038/s41597-019-0048-z

[20] Estoque RC, Ooba M, Togawa T, Hijioka Y, Murayama Y. Monitoring global land-use efficiency in the context of the

DOI: 10.22069/jwfst.2019.14944.1744

[41] Karam A, Raeyati Shavazi M, Ghaffarian Malmiri HR, Sepehr A. Relationship between geomorphological units and land-use changes in the Yazd–Ardakan region. Geography and Environmental Hazards. 2018;7(1):17–36. [In Persian] Google Scholar link

[42] Haleh-Bian AH, Soltanian M. Assessment and prediction of desertification changes in eastern and southern Isfahan using the CA–Markov model. Spatial Analysis of Environmental Hazards. 2016;3(4):71–88. [In Persian] Google Scholar link

[43] Sarbazi M, Onagh M, Mohammadian Behbahani A, Akbari M. Assessment and spatiotemporal modelling of land-use change in the intensification of desertification in northeastern Iran: Sarakhs. Geography and Environmental Hazards. 2020;9(2):1–18. [In Persian] Google Scholar link

[44] Mahmoudi M, Honarmand M, Naseri F, Mohammadi S. Effects of land-use change on the Kashafrud River flood hydrograph using SCS-CN results. Water and Soil. 2020;34(1):43–54. [In Persian] DOI: 10.22067/jsw.v34i2.84342

[45] Hassanzadeh R, Esfandiari Darabad F, Asghari Sarascanrud S, Miri Z. Assessment of land-use-change effects on Darreh-Rud River discharge over 30 years using SWAT. Hydrogeomorphology. 2022; 9(31):51–69. [In Persian] DOI: 10.22034/hyd.2022.49417.1616

[46] Rathi-Nezami SS, Izadifard H, Khavarian H, Mostafazadeh R. Land-use/land-cover changes in the Samian watershed and their relationship with surface-water quality. Environment and Water Engineering. 2023; 9(3):413–426. [In Persian] DOI: 10.22034/jewe.2022.341548.1783

[47] Zandi L, Jafarian Z, Kavian A, Kooch Y. Changes in soil microbial properties following changes in land-use type and duration in Chahardangeh rangelands, Kiasar, Mazandaran. Water and Soil Conservation Research. 2021;28(2):103–121. [In Persian] DOI: 10.22069/jwsc.2021.18970.3444

[48] Bazmi NS, Hejazizadeh Z, Ziaian Firouzabadi P, Janbaz Ghobadi G. Detection of temperature differences caused by urban and suburban land-use changes in Urmia County. Geography and Environmental Hazards. 2024;13(1):217–242. [In Persian] DOI: 10.22067/geoeh.2022.76651.1224

[49] Daz BS, Ghaffari Gilandeh A, Azizi A. Analysis of green-space changes in Gorgan using landscape metrics. Environmental Science and Technology. 2020;22(5):169–181. [In Persian] Google Scholar link

Development of Peri-Urban Spaces. 2023;5(1):1–16. [In Persian] DOI: 10.22034/jpusd.2023.351180.1215

[31] Ghorbani R, Roustaei S, Karbasi P. Urban creep in Maragheh and peri-urban land-use changes. Development of Peri-Urban Spaces. 2021;3(1):1–18. [In Persian] Google Scholar link

[32] Karimi Firouzjaei M, Kiavarz M, Kalantari M. Analysis and prediction of land-use development in Babol County. Physical Development Planning. 2018;3(7):32–57. [In Persian] Google Scholar link

[33] Fotouhi A, Bargh-Jolveh S. Analysis of Tehran's urban ecological networks. Environmental Sciences. 2018;44(2):277–295. [In Persian] Google Scholar link

[34] Mohammad-Hagh M, Mobarghaei-Dinar N, Vafaeinejad A, Sobhan-Ardakani S, Monavari SM. Assessment of ecosystem change, landscape structure, and carbon storage in Tehran. Environmental Sciences. 2020;46(1):1–18. [In Persian] Google Scholar link

[35] Mehrabi M, Rafieian M. Quantitative analysis of the physical-development pattern of Yazd. Iranian Architecture and Urbanism. 2023;14(2):233–246. [In Persian] DOI: 10.30475/isau.2023.346590.1932

[36] Narouei B, Bargh-Jolveh S, Esmaeilzadeh H, Zebardast L. Assessment of spatiotemporal changes in urban green infrastructure using a landscape-pattern algorithm. Sepehr Geographic Information. 2022;31(122):167–188. [In Persian] DOI: 10.22131/sepehr.2022.254788

[37] Yazdanpanah M, Yavari AR, Zebardast L, Al-Mohammad S. Green-infrastructure planning in the Tehran metropolis. Environmental Sciences. 2015;41(3):613–625. [In Persian] Google Scholar link

[38] Joorabian Shooshtari S, Gholamalifard K, Azari M, Lopez-Moreno JI. Role of landscape metrics and spatial change processes in evaluating the performance of the GEOMOD model: Nekaroud watershed. Geography and Environmental Sustainability. 2017;24:63–80. [In Persian] Google Scholar link

[39] Ostadhashimi R, Mirakhorloo K, Yarahmadi J, Najibzadeh MR. Mapping the distribution and density of forests and other land uses in Arasbaran using Sentinel-2 satellite data. Sepehr Geographic Information. 2023; 32(125):67–80. [In Persian] DOI: 10.22131/sepehr.2023.557078.2888

[40] Nasiri V, Darvishsefat AA. Analysis of land-use changes using landscape-ecology metrics in Arasbaran, 1990–2014. Journal of Wood and Forest Science and Technology. 2019;25(4):1–18. [In Persian]

[50] Soleimani K. Spatiotemporal analysis of land-use changes in Sari. Urban Structure and Function Studies. 2020;7(24):57–72. [In Persian] Google Scholar link

[51] Soleimani K, Rouhani Ghadi Kalayi F, Shabani M, Rouhani Ghadi Kalayi M. Application of the single-channel algorithm to urban heat-island analysis. Geographic Information System. 2021;12(3):87–102. [In Persian] DOI: 10.52547/gisj.12.3.87

[52] Farmahini Farahani M, Javid AH, Azizi Z, Ghaffarzadeh HR, Nahibi S. Monitoring the advance of urban and anthropogenic land uses toward the coastline in Bandar Khamir, Hormozgan Province. Iranian Journal of Animal Environment. 2023;15(1):303–308. [In Persian] DOI: 10.22034/AEJ.2022.333813.2775

[53] Sattari MH, Sarvar R, Mahdavi M. Analysis and assessment of environmental effects of urban land-use changes in the Tehran metropolitan region. Geographical Studies of Arid Regions. 2023;14(51):60–81. [In Persian] DOI: 10.22034/jargs.2023.376032.1001

[54] Salehi A, Yavari AR, Vakili F, Parivar P. Assessment of high-rise development effects on wind patterns in Tehran District 22. Urban Ecology. 2016;7(1):67–80. [In Persian] Google Scholar link

[55] Sheikh Rabiei MR, Peyravan HR, Daneshkar Arasteh P, Akbari M, Motamedvaziri B. Effects of climate change based on the IPCC Sixth Assessment Report on runoff and sediment production. Watershed Engineering and Management. 2024;16(4):550–570. [In Persian] DOI: 10.22092/ijwmse.2024.365664.2062

[56] Abedini M, Ghaleh A. Detection of land-use changes using object-based and pixel-based techniques in the Mordagh-Chay watershed. Hydrogeomorphology. 2021; 8(27):163–184. [In Persian] Google Scholar link

[57] Kaviani A, Farhoudi R, Rajabi A. Analysis of Tehran urban growth using a landscape-ecology approach. Geographical Research on Urban Planning. 2015;3:407–429. [In Persian] Google Scholar link

[58] Enaruvbe GO, Pontius RG Jr. Influence of classification errors on Intensity Analysis of land changes in southern Nigeria. International Journal of Remote Sensing. 2015;36(1):244–261. DOI: 10.1080/01431161.2014.994721

[59] Huang BQ, Huang JL, Pontius RG Jr, Tu ZS. Comparison of Intensity Analysis and the land use dynamic degrees to measure land changes outside versus inside the coastal zone of Longhai, China. Ecological Indicators. 2018;89:336–347. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.12.057

[60] Quan B, Pontius RG Jr, Song H. Intensity Analysis to communicate land change during three time intervals in two regions of Quanzhou City, China. GIScience & Remote Sensing. 2020;57(1):21–36. DOI: 10.1080/15481603.2019.1658420

[61] Jiao L, Liu J, Xu G, Dong T, Gu Y, Zhang B, Liu Y, Liu X. Proximity Expansion Index: An improved approach to characterize evolution process of urban expansion. Computers, Environment and Urban Systems. 2018;70:102–112. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.02.005

[62] Andersson E, Haase D, Scheuer S, Wellmann T. Neighbourhood character affects the spatial extent and magnitude of the functional footprint of urban green infrastructure. Landscape Ecology. 2020;35:1605–1618. DOI: 10.1007/s10980-020-01039-z

[63] Arnold J, Kleemann J, Fürst C. A differentiated spatial assessment of urban ecosystem services based on land use data in Halle, Germany. Land. 2018;7(3):101. DOI: 10.3390/land7030101

[64] Grafius DR, Corstanje R, Harris JA. Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. Landscape Ecology. 2018;33:557–573. DOI: 10.1007/s10980-018-0618-z

[65] Huang C, Yang J, Jiang P. Assessing impacts of urban form on landscape structure of urban green spaces in China using Landsat images based on Google Earth Engine. Remote Sensing. 2018;10(10):1569. DOI: 10.3390/rs10101569

[66] Park Y, Guldmann J-M. Measuring continuous landscape patterns with Gray-Level Co-Occurrence Matrix texture metrics. Ecological Indicators. 2020;109:105802. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105802

[67] Monteiro R, Ferreira JC, Antunes P. Green infrastructure planning principles: An integrated literature review. Land. 2020;9(12):525. DOI: 10.3390/land9120525

[68] Hasan SS, Shi W, Zhu X. Impact of land use land cover changes on ecosystem service value: A case study of Guangdong, Hong Kong, and Macao. PLOS ONE. 2020; 15:e0231259. DOI: 10.1371/journal.pone.0231259

[69] Yi H, Güneralp B, Filippi AM, Kreuter UP, Güneralp İ. Impacts of land change on ecosystem services in the San Antonio River Basin, Texas, from 1984 to 2010. Ecological Economics. 2017;135:125–135. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.11.019

[70] Bentéjac CCsörgA, Martínez-Muñoz G. A comparative analysis of gradient boosting algorithms. Artificial Intelligence Review. 2021;54(3):1937–1967. DOI: 10.1007/s10462-020-09896-5

classifiers on imbalanced datasets. PLOS ONE. 2015; 10(3):e0118432. DOI: 10.1371/journal.pone.0118432

[81] Ariti AT, van Vliet J, Verburg PH. Land-use and land-cover changes in the Central Rift Valley of Ethiopia: Assessment of perception and adaptation of stakeholders. Applied Geography. 2015;65:28–37. DOI: 10.1016/j.apgeog.2015.10.002

[82] Lukman KM, Uchiyama Y, Quevedo JMD, Harding D, Kohsaka R. Land use changes assessment using a triangulated framework: Perception interviews, land-use/land-cover observation, and spatial planning analysis in Indonesia. Human Ecology. 2021;49:551–564. DOI: 10.1007/s10745-021-00253-w

[83] Liu X, Liang X, Li X, Xu X, Ou J, Chen Y, Li S, Wang S, Pei F. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning. 2017;168:94–116. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2017.09.019

[84] Munthali MG, Mustak S, Adeola A, Botai J, Singh SK, Davis N. Modelling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid cellular automata and Markov model. Sustainability. 2019;11:832. DOI: 10.3390/su11030832

[85] Dadashpoor H, Azizi P, Moghadasi M. Land use change, urbanization, and change in landscape pattern in a metropolitan area. Science of the Total Environment. 2019; 655:707–719. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.267

[86] Ma L, Liu Y, Zhang X, Ye Y, Yin G, Johnson BA. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019;152:166–177. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015

[87] Ai J, Zhang C, Chen L, Li D. Mapping annual land use and land cover changes in the Yangtze Estuary region using an object-based classification framework. Sustainability. 2020; 12(2):659. DOI: 10.3390/su12020659

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



امید غفاری علی‌آباد استادیار گروه نقشه‌برداری در دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان می‌باشند. ایشان مدرک کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی نقشه برداری – فتوگرامتری و دکتری خود را در رشته مهندسی نقشه‌برداری-سنجش از دور بترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۶ از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی دریافت نمودند. فعالیت‌های

[71] Lundberg SM, Erion G, Chen H, DeGrave A, Prutkin JM, Nair B, Katz R, Himmelfarb J, Bansal N, Lee S-I. From local explanations to global understanding with explainable AI for trees. Nature Machine Intelligence. 2020;2:56–67. DOI: 10.1038/s42256-019-0138-9

[72] Murdoch WJ, Singh C, Kumbier K, Abbasi-Asl R, Yu B. Definitions, methods, and applications in interpretable machine learning. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2019;116(44):22071–22080. DOI: 10.1073/pnas.1900654116

[73] Roberts DR, Bahn V, Ciuti S, Boyce MS, Elith J, Guillera-Arroita G, Hauenstein S, Lahoz-Monfort JJ, Schröder B, Thuiller W, Warton DI, Wintle BA, Hartig F, Dormann CF. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. Ecography. 2017; 40(8):913–929. DOI: 10.1111/ecog.02881

[74] Valavi R, Elith J, Lahoz-Monfort JJ, Guillera-Arroita G. blockCV: An R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. Methods in Ecology and Evolution. 2019;10(2):225–232. DOI: 10.1111/2041-210X.13107

[75] Schratz P, Muenchow J, Iturritxa E, Richter J, Brenning A. Hyperparameter tuning and performance assessment of statistical and machine-learning algorithms using spatial data. Ecological Modelling. 2019;406:109–120. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.06.002

[76] Meyer H, Reudenbach C, Hengl T, Katurji M, Nauss T. Improving performance of spatio-temporal machine learning models using forward feature selection and target-oriented validation. Environmental Modelling & Software. 2018;101:1–9. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.12.001

[77] Ploton P, Mortier F, Réjou-Méchain M, Barbier N, Picard N, Rossi V, Dormann C, Cornu G, Viennois G, Bayol N, Lyapustin A, Gourlet-Fleury S, Pélissier R. Spatial validation reveals poor predictive performance of large-scale ecological mapping models. Nature Communications. 2020; 11:4540. DOI: 10.1038/s41467-020-18321-y

[78] Meyer H, Pebesma E. Predicting into unknown space? Estimating the area of applicability of spatial prediction models. Methods in Ecology and Evolution. 2021;12:1620–1633. DOI: 10.1111/2041-210X.13650

[79] Wadoux AMJ-C, Heuvelink GBM, de Bruin S, Brus DJ. Spatial cross-validation is not the right way to evaluate map accuracy. Ecological Modelling. 2021;457:109692. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2021.109692

[80] Saito T, Rehmsmeier M. The precision–recall plot is more informative than the ROC plot when evaluating binary

پژوهشی ایشان در حوزه پردازش تصویر ابرطیفی و همچنین کاربردهای سنجش از دور در تغییرات کاربری و پوشش اراضی با استفاده از کلان داده‌های سنجش از دور می‌باشد. زمینه‌های تخصصی ایشان عبارتند از: پردازش تصاویر ابرطیفی، توسعه کاربردهای سنجش از دور و پردازش داده های پهپادی می باشد.

Ghaffari Aliabad, O. Assistant Professor at the Department of Geomatics, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

ghaffari @znu.ac.ir

Citation (Vancouver): Ghaffari Aliabad O. [Mapping Land-Use Change Intensity and Spatial Correlates Using Transition Analysis and Explainable Machine Learning in Ramsar, Iran]. *J. RS. GEOINF. RES. 2026; 4(2): 251-278*

https://doi.org/10.22061/jrsgr.2026.113569.1142

COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)