

# Monitoring historical changes in land use and water bodies of the Urmia Plain using satellite images and the Markov chain model

Mehdi Akbar Gharabagh<sup>1</sup>, Alireza Parvishi<sup>2\*</sup>, Yusef Kheyruri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MSc Student, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ur.C., Islamic Azad University, Urmia, Iran

<sup>3</sup>PhD Student, Department of Civil Engineering, S.R.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: [al.parvishi@iau.ac.ir](mailto:al.parvishi@iau.ac.ir)

Received: 29 Aug. 2025 Accepted: 28 Nov. 2025

Revised: 23 Dec. 2025 Published: 22 Dec. 2023



Homepage: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)

**Abstract:** This study examines land use and land cover (LULC) changes in the Urmia Plain, northwestern Iran, from 2000 to 2020 and predicts future patterns for 2040. Landsat TM, ETM+, and OLI imagery were classified into six LULC classes—agriculture, orchards, urban areas, saline lands, barren lands, and water bodies—using a supervised maximum likelihood algorithm, yielding Kappa coefficients above 0.85. Results indicate a 17.4% reduction in agricultural lands over the study period, accompanied by a combined expansion of more than 25% in barren and saline areas. Urban areas increased slightly (2.3%), mainly around major settlements. Water bodies, particularly Lake Urmia and its wetlands, experienced a severe decline and nearly disappeared in some years, reflecting intense hydrological stress. Markov chain modeling based on 2000–2010 transitions predicts an additional 12% loss of agricultural land by 2040, with barren lands replacing orchards. Anthropogenic pressures, especially unsustainable agriculture and groundwater depletion, are identified as the main drivers of degradation.

**Keywords:** Land use change, Remote sensing, Urmia Plain, Markov chain, Landsat

**Introduction:** LULC changes are major drivers of environmental degradation, particularly in arid and semi-arid regions where water scarcity and fragile ecosystems intensify vulnerability. The Urmia Plain, located within the Lake Urmia Basin in northwestern Iran, is a critical agricultural and ecological region currently under severe stress due to prolonged drought, climate change, and increasing anthropogenic pressures. Overexploitation of groundwater, inefficient irrigation practices, and uncontrolled land conversion have accelerated soil salinization, vegetation degradation, and the expansion of barren lands, posing serious threats to regional food security and ecological stability (Daryanto et al. 2016; Kheyruri et al. 2024b).

Numerous studies in Iran have applied remote sensing techniques to monitor LULC dynamics and used statistical or simulation-based models to predict future changes. However, relatively few have focused specifically on the Urmia Plain or integrated detailed historical analysis with future land use projections. Given the critical role of this plain within the Lake Urmia ecosystem, assessing both past changes and future scenarios is essential for supporting effective land management and restoration strategies (Fatema et al. 2023; Vohra et al. 2024).

Remote sensing provides consistent, long-term datasets for mapping LULC variations, while Markov chain modeling offers a probabilistic framework for predicting future land use based on observed transition probabilities (Mortezaei et al. 2020; Feizizadeh et al. 2022).

Accordingly, this study aims to: (1) classify LULC for 2000, 2010, and 2020 using Landsat imagery; (2) evaluate classification accuracy; (3) analyze dominant LULC transitions; and (4) project the 2040 LULC map using a

Markov chain model.

**Methodology:** The study focuses on the Urmia Plain, West Azerbaijan Province. Land use/land cover (LULC) maps were generated for 2000, 2010, and 2020 using a supervised maximum likelihood classification. Six categories were defined: agriculture, orchards, urban areas, barren lands, saline lands, and water bodies. Accuracy assessment using confusion matrices and Kappa statistics confirmed values above 0.85, ensuring reliable spatial classification.

Post-classification statistics were used to quantify the areal extent of each class, supported by corresponding maps (Figs. 2–5). Transition probability matrices were calculated to analyze historical changes between the periods, allowing the identification of spatial patterns, trends, and areas with significant land use changes. Comparative percentage changes across the three periods are summarized in Table 5.

This approach provides a comprehensive assessment of past spatial dynamics, highlighting areas of degradation and land use change, which can inform future studies and support planning for sustainable land management in this vulnerable region. No predictions for future land use are made, and the focus remains on understanding historical patterns.

**Results and Discussion:** The analysis of the 2005 LULC map (Fig. 2) and statistical data (Table 1) reveals that mixed orchard–crop lands dominated the Urmia Plain, accounting for nearly 40% of the area, followed by orchards (18.9%) and urban areas (12.1%). In contrast, water bodies represented only 0.16% and wetlands 0.42%, showing their marginal presence even at the beginning of the study period. These results highlight that while agricultural and orchard activities were still relatively strong, natural water resources were already critically reduced, and barren lands began expanding around the lake’s margins, suggesting early signs of ecological stress.

By 2010, significant shifts were evident (Fig. 3, Table 2). Surface water completely disappeared, and wetlands declined to 0.67%, marking the onset of severe hydrological degradation. Mixed orchard–crop expanded to nearly 47%, but this was accompanied by rising poor vegetation (11%) and the continued encroachment of barren lands in the north and east. The spatial patterns indicate unsustainable agricultural expansion, particularly in water-stressed areas, which contributed to land fragmentation and ecological instability. This period also reflects accelerated land conversion driven more by human intervention than by climatic variability.

The 2015 classification (Fig. 4, Table 3) demonstrated intensification of these trends. Mixed orchard–crop surged to nearly 60%, while independent orchards dropped to just over 6%. Poor vegetation areas increased to 12.7%, confirming the weakening of ecological resilience. Wetlands remained below 1%, and water bodies continued to be absent, reflecting the persistent water crisis. Urban areas grew to almost 13%, driven by the expansion of Urmia city and surrounding settlements. The combination of orchard expansion into unsuitable lands and the sharp decline of natural vegetation emphasizes the anthropogenic stress dominating land-use transitions during this period.

By 2020, urban growth reached its highest share at 15.3%, while independent orchards rebounded to 17.9% (Fig. 5, Table 4). Mixed orchard–crop declined to 42.3%, reflecting a shift toward more fragmented agricultural practices. Water bodies remained absent, and wetlands persisted at only 0.82%. The Markov projection for 2040 (Fig. 6, Table 5) predicts a further ~12% decline in agriculture, significant orchard losses compared to 2005 and 2020, and a +26% urban increase relative to 2000. Barren and poor vegetation classes are expected to dominate the northern and eastern plain, while water and wetlands remain negligible. These findings confirm that without immediate intervention, the Urmia Plain faces continued ecological degradation and heightened desertification risk.

**Conclusion:** This study demonstrates that the Urmia Plain has undergone substantial LULC changes over the past two decades, with agricultural and orchard areas declining sharply and barren and saline lands expanding significantly. The Markov chain model projects further degradation by 2040, with agricultural lands potentially decreasing by an additional 12% if current practices continue.

Findings highlight the predominance of anthropogenic factors—particularly unsustainable agriculture and groundwater overexploitation—over climatic drivers in shaping LULC patterns. The integration of multi-temporal Landsat imagery and Markov chain modeling offers a reliable and transferable framework for both retrospective analysis and future prediction in semi-arid regions.

Urgent adoption of conservation-oriented land management, improved irrigation efficiency, and groundwater regulation is essential to halt degradation. The study’s results can guide policymakers and stakeholders in

designing targeted strategies for restoring land productivity and safeguarding the ecological integrity of the Urmia Basin.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# پایش تغییرات تاریخی کاربری اراضی و پهنه‌های آبی دشت ارومیه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل زنجیره مارکوف

مهدی اکبر قره‌باغ<sup>۱</sup>، علیرضا پرویشی<sup>۲\*</sup>، یوسف خیروری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

<sup>۲</sup>استادیار گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

<sup>۳</sup>دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: [al.parvishi@iaau.ac.ir](mailto:al.parvishi@iaau.ac.ir)

وبگاه نشریه: [ijwer.uoz.ac.ir](http://ijwer.uoz.ac.ir)



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

**چکیده:** تغییرات کاربری اراضی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست، در مدیریت منابع طبیعی نقش کلیدی دارد. این پژوهش باهدف تحلیل تغییرات کاربری اراضی در دشت ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ و پیش‌بینی وضعیت آن در سال ۲۰۴۰ با استفاده از مدل زنجیره مارکوف انجام شد. جهت طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای لندست، از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده با الگوریتم حداکثر احتمال استفاده گردید. ارزیابی و صحت سنجی کلی دقت نقشه‌ها با شاخص کاپا و صحت کلی صورت گرفت که مقدار کاپا در همه دوره‌ها بیش از ۰.۸۵ بود. نتایج نشان داد. سطح اراضی زیر کشت محصولات کشاورزی از ۳۸.۶ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۲۷.۱ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته و سطح اراضی بایر و شور از ۱۶.۴ درصد به ۲۶.۷ درصد افزایش یافته است. همچنین اراضی شهری با رشد ۳.۲ درصدی همراه بوده‌اند. پهنه‌های آبی و تالاب‌ها نیز در این بازه زمانی روندی کاملاً نزولی داشته و در برخی سال‌ها تقریباً به‌طور کامل حذف شده‌اند که بیانگر بروز بحران هیدرولوژیک جدی در منطقه است. پیش‌بینی وضعیت در سال ۲۰۴۰ بیانگر ادامه روند کاهش اراضی حاصلخیز و گسترش اراضی غیرقابل بهره‌برداری است. یافته‌ها بر ضرورت مدیریت کاربری اراضی با رویکرد تلفیقی سنجش‌ازدور و مدل‌سازی مکانی جهت مقابله با روند ناپایدار فعلی تأکید دارد.

**کلیدواژه‌گان:** تغییرات کاربری اراضی، سنجش از راه دور، دشت ارومیه، مدل زنجیره مارکوف، لندست

## ۱- مقدمه

منجر به بروز پیامدهای گسترده‌ای همچون کاهش حاصلخیزی خاک، فرسایش، کاهش پوشش گیاهی، تغییر رژیم آب و تخریب زیست‌بوم‌ها گردند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای حساسیت بالای اکولوژیکی و ظرفیت احیاپذیری محدود هستند، تغییرات کاربری می‌تواند به‌سرعت موجب کاهش کیفیت منابع طبیعی

تغییر کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین نشانه‌های تعامل بین انسان و طبیعت محسوب می‌شود و از آن به‌عنوان شاخصی برای سنجش پویایی‌های محیطی و فشارهای انسانی بر سامانه‌های طبیعی استفاده می‌شود. این تغییرات می‌توانند

مدل زنجیره‌ای مارکوف به تنهایی فاقد توانایی مکانی است، اما در تلفیق با داده‌های مکانی در محیط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، می‌تواند نقشه‌های پیش‌بینی شده از وضعیت آبی کاربری ارائه دهد. این ترکیب باعث شده است که این مدل در مطالعات مختلف مرتبط با تحلیل کاربری اراضی در ایران و جهان مورد استفاده قرار گیرد. دقت بالا، سادگی اجرا و نیاز به داده‌های محدود از جمله مزایای این مدل به شمار می‌رود.

برخی مطالعات انجام شده در مناطق مختلف ایران، از جمله حوضه‌های مرکزی، دشت‌های سیستان، ایلام و خوزستان نیز از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و مدل زنجیره‌ای برای تحلیل تغییرات بهره گرفته‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده که روند کاهش اراضی کشاورزی و افزایش اراضی بایر و شور، در حال تبدیل شدن به یک الگوی نگران‌کننده در کشور است (Jafarpour Ghalehtimouri et al. 2022; Asadi et al. 2022; Fatema et al. 2023; Mahmoudi and Rigi 2023; Vohra et al. 2024). با این حال، بررسی جامع تغییرات دشت ارومیه همراه با پیش‌بینی وضعیت آینده آن، هنوز به صورت کامل صورت نگرفته است.

دشت ارومیه با داشتن شرایط اقلیمی ویژه، منابع آب سطحی و زیرزمینی محدود، فشارهای انسانی فزاینده و نزدیکی به مراکز جمعیتی بزرگ، منطقه‌ای حساس و مستعد برای بروز ناپایداری کاربری اراضی است؛ لذا ارزیابی علمی روندهای گذشته و پیش‌بینی مسیر آینده تغییرات، در این منطقه نه تنها ضرورت مطالعاتی بلکه یک اولویت مدیریتی است. شناسایی مناطق با نرخ بالای تغییر کاربری می‌تواند به مسئولین در جهت مدیریت بهتر منابع و جلوگیری از تخریب‌های بیشتر کمک کند.

پژوهش حاضر باهدف تحلیل تغییرات کاربری اراضی در دشت ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ و پیش‌بینی وضعیت آن تا سال ۲۰۴۰ انجام شده است.

طی دو دهه گذشته، تغییرات گسترده‌ای در کاربری اراضی منطقه اتفاق افتاده است که بخش زیادی از آن‌ها ناشی از فشارهای انسانی، مدیریت ناپایدار منابع آب و تغییرات اقلیمی بوده است. این روند منجر به افزایش اراضی بایر و

شود (Majumder et al. 2020; Mortezaei et al. 2020; Feizizadeh et al. 2022; Ullah et al. 2023; Kheyruri et al. 2024a).

در سال‌های اخیر، شواهد متعدد حاکی از آن است که دشت ارومیه، یکی از کانون‌های مهم کشاورزی و تولید در شمال غرب ایران، با روند سریع تخریب سرزمین مواجه شده است. عواملی مانند تغییر الگوی بارش، افزایش دما، گسترش کشاورزی غیراصولی، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، و تغییر سیاست‌های بهره‌برداری از اراضی در این روند نقش داشته‌اند (Procházka et al. 2018; Javadi et al. 2023; Kheyruri et al. 2023). کاهش سطح آب دریاچه ارومیه نیز موجب افزایش شوری و گسترش اراضی غیرقابل کشت در پیرامون دشت شده است که تهدیدی جدی برای پایداری اکولوژیکی و معیشتی منطقه به‌شمار می‌رود.

باتوجه به ابعاد مکانی گسترده این تغییرات و نیاز به پایش طولانی‌مدت، استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور به‌عنوان ابزاری توانمند برای پایش تغییرات کاربری مورد توجه قرار گرفته است (Sarami et al. 2022; Shahbazzadashi et al. 2024a). تصاویر ماهواره‌ای با دارا بودن پوشش مکانی وسیع، تکرار زمانی منظم و دقت مکانی قابل قبول، امکان بررسی تغییرات در بازه‌های زمانی مختلف را فراهم می‌سازند. بهره‌گیری از این داده‌ها در محیط‌های پردازشی مانند سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، قابلیت طبقه‌بندی، تحلیل، و مقایسه را تسهیل می‌کند (Emami and Zarei 2021; Feizizadeh et al. 2021).

پایش تغییرات گذشته اگرچه ضروری است، اما کافی نیست. تصمیم‌گیری‌های مؤثر محیطی نیازمند آگاهی از آینده محتمل نیز هستند. در همین راستا، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی به‌منظور شبیه‌سازی روند آبی تغییرات کاربری اراضی اهمیت پیدا می‌کند (Gomes et al. 2021). یکی از مدل‌های پرکاربرد در این زمینه، مدل زنجیره‌ای مارکوف است که مبتنی بر محاسبه احتمال انتقال بین کلاس‌های مختلف کاربری عمل می‌کند. این مدل با استفاده از داده‌های گذشته، الگویی برای پیش‌بینی وضعیت آینده فراهم می‌سازد (Gao et al. 2021; Aniah et al. 2023).

## ۲-۲- روش انجام پژوهش

این پژوهش در دشت ارومیه با هدف بررسی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی شامل چهار مرحله اصلی بود: گردآوری داده‌ها، پیش‌پردازش تصاویر، طبقه‌بندی و ارزیابی دقت نقشه‌ها، و مدل‌سازی تغییرات با استفاده از مدل زنجیره مارکف.

### گردآوری داده‌ها

تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ از پایگاه‌های داده رایگان Landsat تهیه شدند. این تصاویر دارای توان تفکیک مکانی ۳۰ متر بودند که برای تحلیل کاربری اراضی در سطح منطقه‌ای مناسب است. تصاویر انتخاب‌شده دارای پوشش کامل دشت ارومیه و کمترین میزان ابر بودند تا کیفیت تحلیل به حداکثر برسد.

### پیش‌پردازش تصاویر

برای کاهش خطاهای ناشی از زاویه دید سنجنده، شرایط

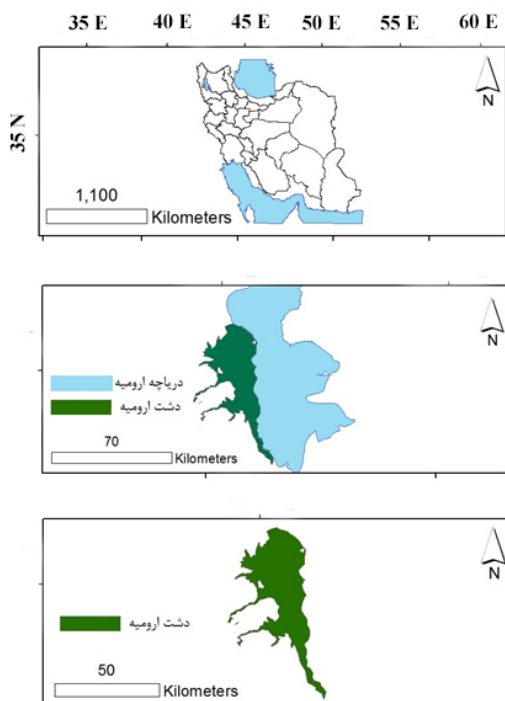


Fig. 1 Study area map  
شکل ۱ نقشه منطقه مطالعه

شور، کاهش اراضی زراعی و در نهایت تخریب اکوسیستم منطقه شده و لزوم تحلیل و پیش‌بینی روند این تغییرات را دوچندان کرده است.

## ۲- روش‌شناسی

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، دشت ارومیه واقع در غرب دریاچه ارومیه و در محدوده استان آذربایجان غربی است. این دشت از شمال به دشت سلماس و کوه‌های قوشچی، از جنوب به شهرستان نقده، از شرق به ارتفاعات شبانکاره و از غرب به ارتفاعات مرزی پیرانشهر محدود می‌شود. دشت ارومیه در محدوده جغرافیایی ۴۴ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد و مرکز آن شهر ارومیه است. این منطقه به دلیل موقعیت جغرافیایی، خاک حاصلخیز و منابع آب سطحی و زیرزمینی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی شمال غرب کشور شناخته می‌شود. منابع آبی منطقه شامل رودخانه‌های نازلو چای، باراندوز چای، شهر چای و همچنین سفره‌های آب زیرزمینی است. با این حال، در سال‌های اخیر کاهش بارندگی، افزایش دما، برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی و افت شدید سطح دریاچه ارومیه، منجر به بروز بحران‌های زیست‌محیطی و منابع آب در این منطقه شده است.

از نظر اقلیمی، دشت ارومیه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد با تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد می‌باشد و میانگین بارندگی سالانه آن بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (Shekari Tappe et al. 2021; Shahbaldashti et al. 2024b; Khaghani et al. 2025; Ghafari and Parvishi 2025). فعالیت اصلی ساکنان منطقه کشاورزی است که بیشتر به کشت محصولات آبی مانند گندم، سیب‌زمینی، چغندر قند و انواع باغات میوه نظیر سیب و انگور اختصاص دارد (Kheyruri et al. 2024b). اراضی این دشت از تنوع بالایی برخوردارند و شامل اراضی زراعی، باغی، مرتعی، بایر، شور و مناطق شهری هستند.

در [شکل ۱](#) منطقه مطالعاتی ارابه شده است.

مدل زنجیره مارکف استفاده شد. این مدل بر پایه احتمال انتقال هر کلاس به سایر کلاس‌ها در بازه زمانی مشخص عمل می‌کند. فرض اصلی مارکف این است که وضعیت کاربری اراضی در زمان آینده  $(t + 1)$  تنها به وضعیت کنونی  $(t)$  وابسته است و وابستگی به گذشته‌های دورتر ندارد.

برای هر کلاس کاربری، ماتریس احتمال انتقال  $P$  تعریف می‌شود که در آن عنصر  $p_{ij}$  نشان‌دهنده احتمال تبدیل یک واحد مساحت از کلاس  $i$  به کلاس  $j$  در یک دوره زمانی مشخص است:

$$P = \sum_{j=1}^n p_{ij} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که  $n$  تعداد کلاس‌های کاربری و  $p_{ii}$  احتمال پایدار ماندن کلاس  $i$  است. وضعیت کلاس‌ها در زمان آینده با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{t+1} = S_t \cdot P \quad (3)$$

که در آن  $S_t = [s_1, s_2, \dots, s_n]$  بردار سهم مساحت هر کلاس در زمان  $t$  است. برای پیش‌بینی چند دوره زمانی آینده، این رابطه به شکل زیر توسعه می‌یابد:

$$S_{t+k} = S_t \cdot P^k \quad (4)$$

در این پژوهش، ماتریس احتمال انتقال از مقایسه نقشه‌های طبقه‌بندی شده سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ استخراج شد و برای شبیه‌سازی تغییرات تا سال ۲۰۴۰ استفاده گردید. خروجی مدل مارکف به محیط GIS منتقل و نقشه‌های رستری پیش‌بینی شده تولید شدند. تحلیل‌های مکانی بر روی این نقشه‌ها انجام شد تا مناطق با بیشترین و کمترین تغییرات شناسایی شوند و سهم هر کلاس در آینده به صورت عددی و درصدی گزارش گردد. این مرحله امکان

جوئی و انحرافات هندسی، تصاویر از نظر هندسی و پرتوی تصحیح شدند. همچنین، ترکیب باندهای مناسب و محاسبه شاخص‌هایی مانند شاخص پوشش گیاهی انجام شد تا تمایز بین کلاس‌های مختلف کاربری بهبود یابد. تمام مراحل پیش‌پردازش در محیط نرم‌افزار ENVI انجام شد و تصاویر نهایی برای مرحله طبقه‌بندی آماده شدند.

### طبقه‌بندی و ارزیابی دقت

طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از روش نظارت‌شده و الگوریتم حداکثر احتمال (Maximum Likelihood Classifier) انجام شد. این الگوریتم فرض می‌کند که داده‌های هر کلاس دارای توزیع نرمال چندمتغیره هستند و احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس  $i$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P(\omega_i | x) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} (x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - \mu_i)\right] \quad (1)$$

که در آن:  $x$  بردار ویژگی‌های پیکسل،  $\mu_i$  میانگین کلاس  $i$ ،  $\Sigma_i$  ماتریس کوواریانس کلاس  $i$ ،  $n$  تعداد باندهای تصویری است.

هر پیکسل به کلاسی اختصاص داده شد که بیشترین احتمال شرطی  $P(\omega_i | x)$  را داشته باشد. کلاس‌های کاربری شامل اراضی زراعی، باغی، مناطق شهری، اراضی بایر، شور و مرتعی بودند.

برای صحت‌سنجی طبقه‌بندی، از داده‌های میدانی و نقاط کنترل استفاده شد و دقت طبقه‌بندی با ماتریس خطا، شاخص صحت کلی و ضریب کاپا ارزیابی گردید. تنها نقشه‌هایی با ضریب کاپا بالاتر از ۰.۸۵ و صحت کلی بیش از ۹۰ درصد برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شدند. آستانه ۰.۸۵ بر اساس رده‌بندی (Congalton 1991) انتخاب شد که مقادیر بالاتر از ۸۱.۰ را به‌عنوان «توافق عالی» طبقه‌بندی می‌کند.

مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی با مدل زنجیره مارکف برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی تا سال ۲۰۴۰، از

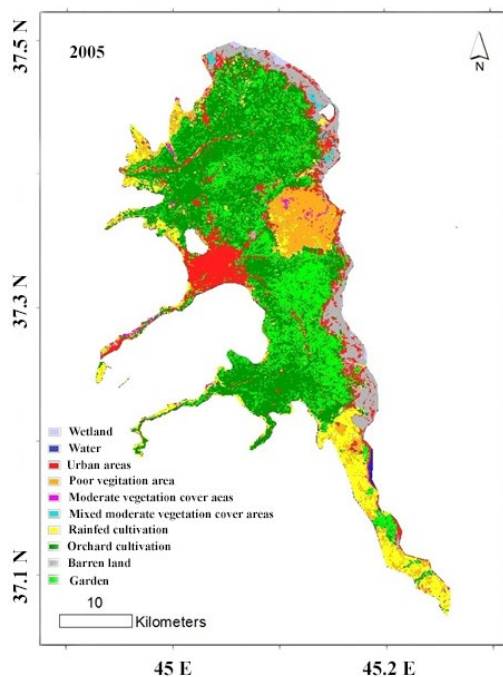


Fig. 2 Land use classified in 2005

شکل ۲ کاربری اراضی طبقه بندی شده سال ۲۰۰۵

بر اساس نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۰۵، دشت ارومیه دارای تنوع بالایی از کاربری‌های اراضی در این دوره زمانی بوده است. نقشه تولیدشده (شکل ۲) نشان می‌دهد که اراضی باغی، زراعی دیم، بایر، نواحی شهری، و مخلوط‌های پوشش گیاهی از پراکندگی وسیعی در منطقه برخوردار هستند. بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی دشت عمدتاً تحت سلطه کاربری باغی و مخلوط کشت با باغ بوده و نواحی غربی و شمال‌غربی بیشتر شامل اراضی زراعی دیم و بایر هستند. همچنین، حاشیه‌های دریاچه ارومیه با تمرکز اراضی شور و بایر شناخته می‌شوند که احتمالاً در اثر افت سطح آب و افزایش شوری خاک طی دهه‌های پیش از آن به‌وجود آمده است.

مقایسه آماری انواع کاربری اراضی در جدول ۱ نیز موید مشاهدات نقشه می‌باشد. بر اساس این جدول، بیش‌ترین مساحت مربوط به کاربری «مخلوط کشت با باغ» است که ۴۶۴.۴۳ کیلومتر مربع از سطح دشت را به خود اختصاص داده و سهمی معادل ۳۹.۸۱ درصد از کل منطقه دارد. پس

شبیه‌سازی روندهای آبی و سناریوهای مختلف تغییر کاربری اراضی را فراهم می‌کند.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۰۵ نشان می‌دهد که دشت ارومیه در این دوره دارای تنوع گسترده‌ای از انواع کاربری اراضی بوده است. بر اساس نقشه تولیدشده (شکل ۲)، بخش عمده‌ای از سطح دشت را اراضی زراعی دیم، اراضی آبی و باغات تشکیل داده‌اند. به‌ویژه مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی دشت دارای تراکم بالای باغات و اراضی زراعی آبی بوده و نواحی شمال‌غربی با پوشش‌های گیاهی ترکیبی یا متوسط شناخته شده‌اند. در مقابل، حاشیه‌های نزدیک به دریاچه ارومیه درگیر گسترش اراضی بایر و اراضی شور بوده‌اند که نشان از فشار محیطی و افت سطح ایستابی در این مناطق دارد.

تحلیل فضایی کاربری‌ها نشان داد که پهنه‌های باغی در حاشیه رودخانه‌ها و در اراضی شیب‌دار مستعد گسترش یافته‌اند. اراضی بایر و شور بیشتر در شمال شرقی و نوار حاشیه‌ای دریاچه متمرکز بوده که احتمالاً ناشی از کاهش منابع آبی و شوری خاک است. همچنین نواحی شهری در این دوره در مقایسه با بازه‌های زمانی قبل، روند گسترش متوسطی داشته‌اند که با تمرکز پیرامون شهر ارومیه و حومه آن همراه بوده است. طبقه‌بندی صورت‌گرفته دارای ضریب دقت بالایی بوده و صحت آن با استفاده از نقاط کنترل میدانی و ماتریس خطا ارزیابی و تأیید گردید؛ به‌طوری‌که صحت کلی بیش از ۹۰ درصد و ضریب کاپا بالاتر از ۰.۸۵ برای لایه‌های نهایی به دست آمد.

به‌طورکلی، نقشه کاربری سال ۲۰۰۵ به‌عنوان پایه‌ای برای تحلیل تغییرات در سال‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفته است. این نقشه نشان می‌دهد که روند تغییرات کاربری در منطقه از همین مقطع زمانی آغاز شده و برخی از الگوهای ناپایدار کاربری از همان زمان قابل مشاهده بوده‌اند. نتایج این تحلیل، زمینه‌ساز تفسیر دقیق‌تر در خصوص شدت و جهت تغییرات در سال‌های آتی خواهد بود و نقش مؤثری در شناسایی مناطق در معرض خطر تخریب ایفا می‌کند.

جدول ۱ مشخصات کاربری اراضی دشت ارومیه سال ۲۰۰۵

Table 1 Land use characteristics of the Urmia Plain in 2005

| Land Use Type                   | Area   | Percent |
|---------------------------------|--------|---------|
| Wet-land                        | 4.95   | 0.42    |
| Water                           | 1.89   | 0.162   |
| Urban area                      | 141.81 | 12.1    |
| Poor vegetation cover           | 112.71 | 9.66    |
| Median vegetation cover         | 9.75   | 0.83    |
| Mixed moderate vegetation cover | 9.50   | 0.81    |
| Rainfed cultivation             | 118.29 | 10.14   |
| Orchard cultivation             | 464.43 | 39.81   |
| Barren land                     | 82.72  | 7       |
| Garden                          | 220.44 | 18.89   |

نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۰ بیانگر تداوم روند تغییرات کاربری در دشت ارومیه در مقایسه با سال ۲۰۰۵ است. همان‌طور که در نقشه طبقه‌بندی شده (شکل ۴) مشاهده می‌شود، کاربری اراضی در این دوره نیز عمدتاً شامل کلاس‌های باغ، زراعت دیم، اراضی بایر و مخلوط کشت با باغ بوده اما تغییراتی در توزیع فضایی آن‌ها نسبت به سال ۲۰۰۵ رخ داده است. نواحی شهری در این سال با گسترش بیشتری نسبت به گذشته همراه بوده‌اند که نشان‌دهنده روند رو به رشد شهرنشینی در منطقه می‌باشد. همچنین، در بخش‌هایی از شمال و شمال‌غرب دشت، اراضی پوشش گیاهی ضعیف و بایر گسترش یافته‌اند که می‌تواند ناشی از فشار بر منابع آب و خاک باشد.

با مقایسه فضایی نقشه سال ۲۰۱۰ با سال ۲۰۰۵ می‌توان مشاهده کرد که بخش‌هایی از اراضی باغی و زراعی در جنوب دشت، به‌ویژه اطراف رودخانه‌ها، جای خود را به اراضی مخلوط یا حتی اراضی بایر داده‌اند. همچنین برخی از اراضی دیم در بخش مرکزی و شرقی دشت، دچار تغییر کاربری به کلاس‌های ضعیف‌تر یا بدون پوشش شده‌اند. این روند نشان می‌دهد که فعالیت‌های کشاورزی سنتی در نبود مدیریت بهینه منابع، پایداری خود را از دست داده‌اند و بخشی از اراضی مستعد در معرض تخریب قرار گرفته‌اند. تغییر پراکندگی باغات نیز نشان‌دهنده کاهش تمرکز در حاشیه‌ها و توسعه به مناطق کم‌شیب‌تر است.

از آن، باغ‌ها با ۲۲۰.۴۴ کیلومتر مربع (۱۸.۸۹ درصد)، نواحی شهری با ۱۴۱.۸۱ کیلومتر مربع (۱۲.۱ درصد) و اراضی دیم مخلوط با ۱۱۸.۲۹ کیلومتر مربع (۱۰.۱۴ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. از سوی دیگر، کم‌ترین سهم اراضی مربوط به پهنه‌های آبی (۰.۱۶۲ درصد)، تالاب‌ها (۰.۴۲ درصد) و پوشش‌های گیاهی متوسط (کم‌تر از ۱ درصد) است. این نتایج حاکی از آن است که در سال ۲۰۰۵، بخش قابل‌توجهی از اراضی منطقه درگیر فعالیت‌های کشاورزی و باغداری بوده‌اند و منابع طبیعی نظیر آب، تالاب و پوشش طبیعی سهم اندکی داشته‌اند.

الگوی فضایی کاربری‌های غالب در این سال نشان‌دهنده فشارهای بالای انسانی بر ساختار فضایی دشت ارومیه است. تمرکز بالای باغات و اراضی کشاورزی در جنوب دشت، توسعه نواحی شهری پیرامون شهر ارومیه، و گسترش اراضی بایر در شمال شرق منطقه، از مهم‌ترین ویژگی‌های این دوره محسوب می‌شود. این ویژگی‌ها می‌توانند زمینه‌ساز تحلیل روند تخریب، افت کیفیت سرزمین و کاهش منابع طبیعی در دوره‌های بعدی شوند و اهمیت بررسی مقایسه‌ای سال‌های آتی (۲۰۱۰، ۲۰۲۰ و ۲۰۴۰) را دوچندان می‌کنند.

در این مطالعه، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۰۵ دشت ارومیه با استفاده از داده‌های سنجنده‌ای مانند پس از انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریکی آماده‌سازی شدند. سپس به‌منظور استخراج انواع کاربری اراضی، روش طبقه‌بندی نظارت‌شده به‌کار گرفته شد و نمونه‌های آموزشی هر کلاس با استفاده از بازدید میدانی، تصاویر با وضوح بالا و داده‌های موجود تعیین گردید. پس از اجرای الگوریتم طبقه‌بندی، نقشه نهایی با استفاده از نقاط کنترل میدانی و ماتریس خطا ارزیابی شد و صحت آن با صحت کلی بالای ۹۰ درصد و ضریب کاپای بیش از ۰.۸۵ تأیید گردید. در ادامه، برای هر کلاس کاربری، مساحت (بر حسب کیلومتر مربع) از نقشه طبقه‌بندی شده استخراج و نسبت آن به مساحت کل دشت محاسبه شد تا درصد پوشش هر کاربری به‌دست آید. این مقادیر در نهایت در قالب جدول ارائه شده گزارش شدند.

در سال ۲۰۰۵ به ۳.۴۵ درصد در سال ۲۰۱۰، اگرچه در نگاه اول مثبت تلقی می‌شود، اما احتمال تبدیل این اراضی به کاربری‌های ناپایدار یا بی‌برنامه نیز وجود دارد. در مجموع، آمار سال ۲۰۱۰ در کنار نقشه طبقه‌بندی شده (شکل ۳)، روند ناپایدار و نامتوازن در تغییرات کاربری اراضی دشت ارومیه را به‌وضوح نشان می‌دهد و زنگ خطری برای آینده منطقه محسوب می‌شود.

نقشه طبقه‌بندی شده سال ۲۰۱۵ (شکل ۴) گویای آن است که روند ناپایدار استفاده از اراضی در دشت ارومیه طی یک دهه گذشته تشدید یافته است. نواحی بایر به‌ویژه در مناطق شمال شرقی و حاشیه دریاچه ارومیه افزایش یافته‌اند. همچنین پوشش گیاهی ضعیف در مناطق میانی گسترش بیشتری یافته و بخش‌هایی از اراضی دیم و باغات به اراضی بدون پوشش تبدیل شده‌اند. در جنوب دشت، تمرکز باغات حفظ شده، ولی تنوع کاربری‌ها کاهش یافته است.

نواحی شهری نیز در این سال گسترش قابل توجهی داشته‌اند و پیرامون شهر ارومیه و سکونتگاه‌های روستایی توسعه یافته‌اند. کاهش اراضی آبی و تالاب‌ها نسبت به سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ نیز بسیار محسوس است و این

#### جدول ۲ مشخصات کاربری اراضی دشت ارومیه سال ۲۰۱۰

Table 2 Land use characteristics of the Urmia Plain in 2010

| Land Use Type                   | Area   | Percent |
|---------------------------------|--------|---------|
| Waterland                       | 7.84   | 0.67    |
| Water                           | 0      | 0       |
| Urban area                      | 161.64 | 13.86   |
| Poor vegetation cover           | 129.14 | 11      |
| Median vegetation cover         | 11.92  | 1       |
| Mixed moderate vegetation cover | 20.36  | 1.74    |
| Rainfed cultivation             | 70.87  | 6       |
| Orchard                         |        |         |
| cultivation                     | 547.31 | 46.93   |
| Barren land                     | 40.33  | 3.45    |
| Garden                          | 176.64 | 15.14   |

در مجموع، نقشه سال ۲۰۱۰ بیانگر تسریع در روند تخریب سرزمین و کاهش پوشش‌های طبیعی در نواحی پیرامون دریاچه ارومیه است. روند کاهش اراضی زراعی و باغی و افزایش اراضی بایر و فقیر، می‌تواند به‌عنوان شاخصی از تضعیف اکولوژیکی منطقه در نظر گرفته شود. ادامه این روند در دوره‌های بعدی منجر به بحران‌های شدیدتر در منابع آب، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و تهدید معیشت جوامع محلی خواهد شد.

بر اساس جدول ۲، در سال ۲۰۱۰ بیش‌ترین مساحت کاربری اراضی دشت ارومیه مربوط به کلاس «مخلوط کشت با باغ» است که با ۵۴۷.۳۱ کیلومتر مربع حدود ۴۶.۹۳ درصد از کل منطقه را شامل می‌شود. پس از آن باغ‌ها با ۱۷۶.۶۴ کیلومتر مربع (۱۵.۱۴ درصد)، نواحی شهری با ۱۶۱.۶۴ کیلومتر مربع (۱۳.۸۶ درصد) و پوشش گیاهی ضعیف با ۱۲۹.۱۴ کیلومتر مربع (۱۱ درصد) قرار دارند. در مقابل، اراضی آبی به‌طور کامل حذف شده‌اند و تالاب‌ها نیز تنها ۰.۶۷ درصد از منطقه را به خود اختصاص داده‌اند که نسبت به سال ۲۰۰۵ کاهش قابل توجهی داشته است. کاهش اراضی آبی و پوشش‌های طبیعی بیانگر شدت یافتن بحران آبی در دشت ارومیه در این سال است.

نکته قابل توجه دیگر، افزایش چشمگیر مساحت کاربری «مخلوط کشت با باغ» نسبت به سال ۲۰۰۵ است؛ از ۳۹.۸۱ درصد در سال ۲۰۰۵ به ۴۶.۹۳ درصد در سال ۲۰۱۰ رسیده است. این موضوع ناشی از توسعه باغات سنتی و نیمه‌مکانیزه در مناطق شیبدار و اراضی حاشیه‌ای بدون توجه به محدودیت‌های آبی و خاکی می‌باشد. همچنین سهم پوشش گیاهی متوسط و مخلوط پوشش گیاهی نیز اندکی افزایش یافته که می‌تواند حاصل تغییرات اقلیمی یا طبقه‌بندی بهتر تصاویر با وضوح بالاتر باشد. از سوی دیگر، سهم کاربری «مخلوط زراعت دیم» به ۶ درصد کاهش یافته که ممکن است به دلیل خشکسالی‌های متوالی و کاهش بهره‌وری زمین‌های دیم در این بازه باشد.

افزایش مساحت مناطق شهری در مقایسه با سال ۲۰۰۵ نیز بیانگر رشد جمعیت، توسعه فیزیکی شهر ارومیه و گسترش سکونتگاه‌های روستایی است. کاهش اراضی بایر از ۷ درصد

موضوع احتمالاً به دلیل افت سطح ایستابی، کاهش بارش‌ها و مدیریت ناپایدار منابع آب رخ داده است. در مجموع، نقشه سال ۲۰۱۵ ادامه روند تخریب منابع طبیعی، کاهش تنوع کاربری و افزایش تمرکز کاربری‌های ناپایدار را در دشت ارومیه تأیید می‌کند.

نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۵ (شکل ۳) بیانگر شدت یافتن روند تغییرات و ناپایداری فضایی در کاربری اراضی دشت ارومیه نسبت به سال‌های قبل است. همان‌گونه که در جدول ۳ نیز آمده است، بیشترین مساحت مربوط به کاربری «مخلوط کشت با باغ» با حدود ۶۹۴.۴۱ کیلومتر مربع معادل ۵۹.۴۸ درصد از کل اراضی منطقه بوده که نسبت به سال ۲۰۱۰ افزایش چشمگیری داشته است. این گسترش سریع و عمدتاً غیرمجاز باغات در اراضی دیم، مراتع و حاشیه‌ها، در شرایط خشکسالی می‌تواند منجر به کاهش پایداری سرزمین شود.

در مقابل، مساحت باغ‌های مستقل به حدود ۷۰.۵۱ کیلومتر مربع (۶.۰۴ درصد) کاهش یافته که نشان از تمایل به توسعه کشت‌های ترکیبی به جای باغات سنتی دارد. همچنین، اراضی پوشش گیاهی ضعیف با ۱۲.۷ درصد افزایش نسبت به سال ۲۰۱۰، در رتبه دوم بیشترین مساحت قرار گرفته‌اند. کاهش شدید مساحت اراضی دارای پوشش گیاهی متوسط (به ۰.۲۳ درصد) و حذف کامل پوشش‌های مخلوط متوسط در این سال، نشان‌دهنده افت کیفیت اکولوژیکی سرزمین است. اراضی زراعی دیم نیز با کاهش به ۴.۱۳ درصد رسیده‌اند که به معنای کاهش پایداری اقتصادی جوامع روستایی وابسته به این نوع کشت است.

همچنین، علی‌رغم گسترش نواحی شهری در دهه گذشته، در این سال سهم آن‌ها اندکی کاهش یافته و به ۱۲.۸۶ درصد رسیده که ممکن است ناشی از تجمع در مناطق مرکزی یا جایگزینی آن با کاربری باغی باشد. حذف کامل اراضی آبی و کاهش شدید تالاب‌ها نیز همچنان ادامه دارد و به ۰.۸۹۳ درصد رسیده است. در مجموع، ترکیب نتایج فضایی و آماری بیانگر آن است که در سال ۲۰۱۵ دشت ارومیه وارد مرحله‌ای بحرانی از نظر کاربری زمین و تخریب منابع طبیعی شده است و ادامه این روند می‌تواند آثار

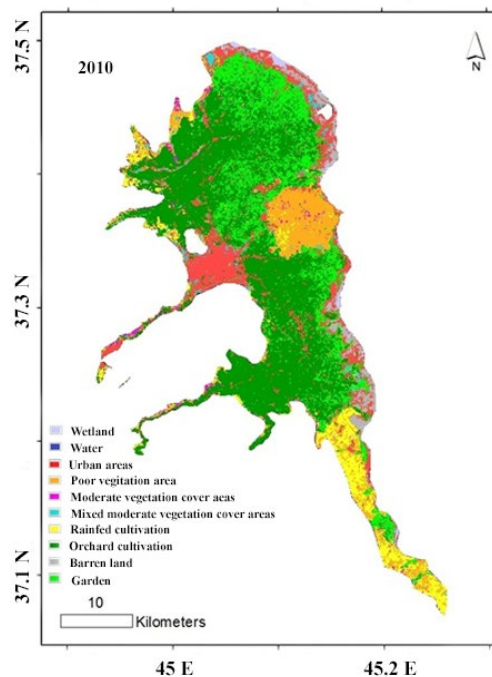


Fig. 3 Land use classified in 2010

شکل ۳ کاربری اراضی طبقه بندی شده سال ۲۰۱۰

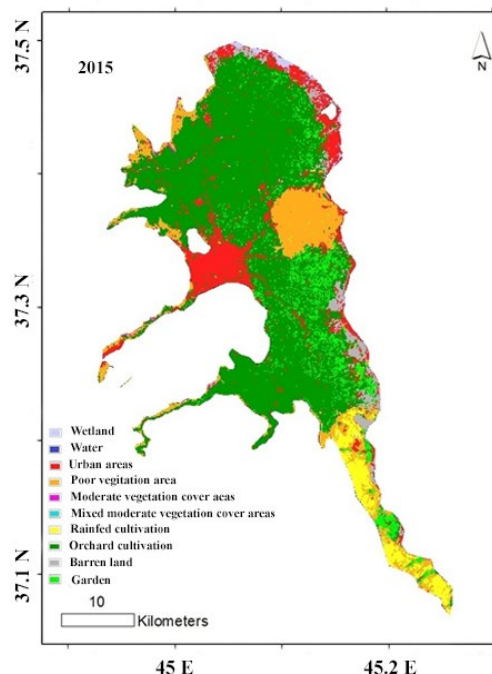


Fig. 4 Land use classified in 2015

شکل ۴ کاربری اراضی طبقه بندی شده سال ۲۰۱۵

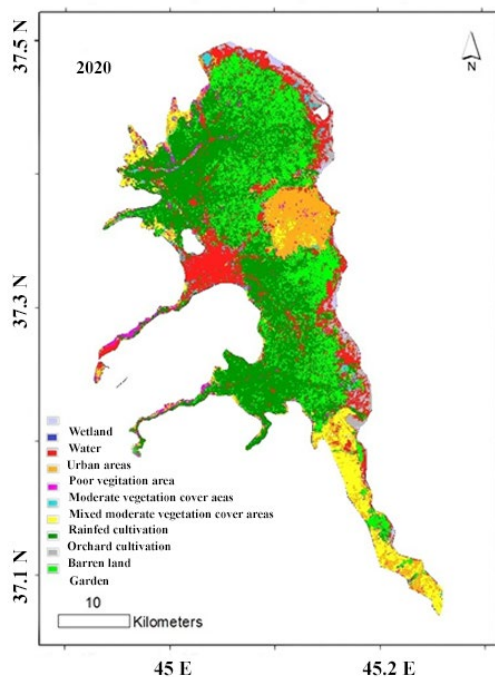


Fig. 5 Land use classified in 2020

شکل ۵ کاربری اراضی طبقه بندی شده سال ۲۰۲۰

شکل ۵ به‌وضوح نشان می‌دهد که طی بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰، ترکیب کلی کاربری اراضی از شرایط پایدار به سمت یک وضعیت کاملاً شکننده تغییر یافته است. این امر به‌ویژه با کاهش شدید تالاب‌ها و حذف کامل منابع آبی سطحی تأیید می‌شود. علاوه بر آن، افزایش نواحی کم‌پوشش و بایر بیانگر کاهش توان اکولوژیکی سرزمین و کاهش ظرفیت احیای طبیعی آن است. چنین روندی، ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع اراضی، کنترل بهره‌برداری غیرمجاز و اعمال محدودیت‌های آمایش سرزمین را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد.

یافته‌های مربوط به سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که کاربری "مخلوط کشت با باغ" همچنان بیشترین سهم از اراضی دشت ارومیه را به خود اختصاص داده است. بر اساس جدول ۴، این نوع کاربری با مساحت ۴۹۲.۸۰ کیلومتر مربع حدود ۴۲.۲۵ درصد از کل مساحت منطقه را دربر می‌گیرد که نسبت به سال ۲۰۱۵ کاهش یافته است. در عوض، کاربری «باغ» با افزایش قابل توجه نسبت به دوره قبل، به ۲۰.۸۴۰ کیلومتر مربع (۱۷.۸۷ درصد) رسیده است. این جابه‌جایی

برگشت‌ناپذیری بر ساختار محیطی منطقه داشته باشد

بر اساس نقشه طبقه‌بندی شده سال ۲۰۲۰ (شکل ۵)، روند ناپایدار تغییرات کاربری اراضی دشت ارومیه در این سال نیز ادامه یافته و برخی الگوهای نگران‌کننده تشدید شده‌اند. در این سال، گسترش بیشتر اراضی باغی و مخلوط باغ با کشت، به‌ویژه در بخش‌های جنوبی و مرکزی منطقه، کاملاً مشهود است. همچنین مناطق بایر و دارای پوشش گیاهی ضعیف در حاشیه‌های شمالی و شرقی دریاچه افزایش یافته‌اند که این تغییرات می‌تواند ناشی از خشکسالی، افت سطح آب زیرزمینی و تغییرات اقلیمی باشد.

در مقایسه با سال‌های گذشته، تراکم اراضی باغی در نقاطی افزایش یافته که سابقاً تحت کشت دیم یا مرتع بوده‌اند. در همین حال، نواحی شهری نیز به گسترش خود در پیرامون شهر ارومیه ادامه داده‌اند. با اینکه در این سال نسبت به ۲۰۱۵، درصد اراضی مخلوط باغ با کشت کاهش مختصری داشته، ولی اراضی باغ‌های مستقل افزایش بیشتری یافته‌اند که می‌تواند ناشی از تفکیک و استفاده متمرکزتر از زمین‌ها باشد. در مناطق شمال غربی و جنوب شرقی، توسعه اراضی فاقد پوشش گیاهی و تبدیل زمین‌های زراعی به بایر نیز روند نگران‌کننده‌ای داشته است.

جدول ۳ مشخصات کاربری اراضی دشت ارومیه سال ۲۰۱۵

Table 3 Land use characteristics of the Urmia Plain in 2015

| Land Use Type                   | Area   | Percent |
|---------------------------------|--------|---------|
| Waterland                       | 10.43  | 0.893   |
| Water                           | 0      | 0       |
| Urban area                      | 150.13 | 12.86   |
| Poor vegetation cover           | 148.30 | 12.70   |
| Median vegetation cover         | 2.70   | 0.23    |
| Mixed moderate vegetation cover | 0      | 0       |
| Rainfed cultivation             | 48.22  | 4.13    |
| Orchard cultivation             | 694.41 | 59.48   |
| Barren land                     | 42.59  | 3.64    |
| Garden                          | 70.51  | 6.041   |

به‌طور کلی، داده‌های سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهند که گرچه توسعه باغات و سکونتگاه‌ها ادامه یافته، اما بخشی از اراضی تخریب‌شده در دوره قبل دچار تغییر کاربری مجدد شده‌اند. با این حال، حذف کامل منابع آبی، تضعیف پوشش طبیعی و گسترش نامتوازن کاربری‌ها، بیانگر تداوم وضعیت ناپایدار سرزمین است.

نقشه پیش‌بینی‌شده سال ۲۰۴۰ (شکل ۶) که بر اساس مدل زنجیره مارکوف با استفاده از روند تغییرات سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ تولید شده، آینده‌ای نگران‌کننده از وضعیت اکولوژیکی دشت ارومیه ترسیم می‌کند. مطابق این نقشه، در صورت تداوم روند فعلی، سهم قابل توجهی از اراضی منطقه به کاربری‌های ناپایدار، به‌ویژه «پوشش گیاهی ضعیف» و «بایر» تبدیل خواهد شد. این تغییر عمدتاً در شمال، شمال‌شرق و مرکز دشت قابل مشاهده است که در گذشته تحت پوشش گیاهی متوسط یا اراضی زراعی بوده‌اند.

گسترش چشمگیر کاربری «پوشش گیاهی ضعیف» به‌ویژه در مرکز و غرب دشت، به‌وضوح نشان می‌دهد که بدون مداخلات مدیریتی، منطقه در معرض بی‌ثباتی اکولوژیکی و تخریب شدید منابع خاک و پوشش قرار خواهد گرفت. در کنار آن، روند افزایشی «نواحی شهری» نیز در پیرامون شهر ارومیه و در امتداد جاده‌های اصلی به چشم می‌خورد. توسعه کالبدی شهرها و روستاها، هم‌زمان با حذف اراضی زراعی و طبیعی، تهدیدی جدی برای تعادل کاربری‌ها در سطح دشت محسوب می‌شود.

کاربری‌های کشاورزی نیز در این پیش‌بینی دستخوش تغییراتی مهم هستند. مساحت «باغ» نسبت به سال ۲۰۲۰ کاهش یافته و در مقابل، «مخلوط کشت با باغ» گسترش بیشتری پیدا کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که فعالیت‌های باغداری بدون توجه به اصول آمایش و ظرفیت زمین، همچنان در حال پیشروی هستند. در جنوب دشت، این روند بسیار مشهود بوده و به‌نظر می‌رسد که تبدیل اراضی مرتعی یا دیم به باغات ادامه خواهد داشت.

در خصوص منابع آبی، نتایج پیش‌بینی بسیار هشداردهنده‌اند. عدم مشاهده هیچ‌گونه توسعه در کاربری

می‌تواند نشان‌دهنده تفکیک و تثبیت اراضی باغی باشد که پیش‌تر در قالب کشت‌های ترکیبی ثبت شده بودند.

کاربری نواحی شهری نیز روند روبه‌رشد خود را حفظ کرده و با مساحت ۱۷۸.۴۱ کیلومتر مربع، معادل ۱۵.۲۹ درصد از منطقه را شامل می‌شود. این میزان، بالاترین مقدار ثبت‌شده برای اراضی شهری در طول کل دوره مورد مطالعه است که بیانگر ادامه توسعه افقی سکونتگاه‌ها، به‌ویژه در پیرامون شهر ارومیه و روستاهای حاشیه‌ای است. در سوی دیگر، پوشش‌های گیاهی ضعیف با ۱۰.۲۸ درصد و بایر با ۲.۸۶ درصد کاهش محسوسی نسبت به سال ۲۰۱۵ داشته‌اند. این کاهش می‌تواند تا حدی ناشی از تبدیل این اراضی به باغ، کشت ترکیبی یا توسعه‌های ساختمانی باشد.

افزایش پوشش گیاهی متوسط و مخلوط نسبت به سال ۲۰۱۵ (که تقریباً حذف شده بودند) به ترتیب به ۲.۱۲ و ۱.۹۱ درصد، می‌تواند نشانه‌ای از احیای نسبی برخی اراضی یا تغییر روش طبقه‌بندی باشد. با وجود این، همچنان هیچ نشانه‌ای از حضور اراضی آبی ثبت نشده و مساحت تالاب‌ها نیز در پایین‌ترین مقدار خود یعنی ۰.۸۲ درصد باقی مانده است.

#### جدول ۴ مشخصات کاربری اراضی دشت ارومیه سال ۲۰۲۰

Table 4 Land use characteristics of the Urmia Plain in 2020

| Land Use Type                   | Area   | Percent |
|---------------------------------|--------|---------|
| Waterland                       | 9.66   | 0.82    |
| Water                           | 0      | 0       |
| Urban area                      | 178.41 | 15.29   |
| Poor vegetation cover           | 119.9  | 10.28   |
| Median vegetation cover         | 24.76  | 2.12    |
| Mixed moderate vegetation cover | 22.32  | 1.91    |
| Rainfed cultivation             | 76.46  | 6.55    |
| Orchard cultivation             | 492.80 | 42.25   |
| Barren land                     | 33.36  | 2.86    |
| Garden                          | 208.40 | 17.87   |

۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد، حاکی از تحولات گسترده و ناپایدار در ساختار فضایی دشت ارومیه می‌باشد. بیشترین افزایش نسبی به نواحی شهری تعلق دارد؛ به طوری که در مقایسه با سال ۲۰۰۰، حدود ۲۶ درصد رشد در مساحت نواحی شهری پیش‌بینی شده است. این روند در همه سال‌های مقایسه‌ای مثبت بوده و نشان‌دهنده گسترش سریع سکونتگاه‌های شهری و روستایی است. همچنین، کاربری «مخلوط زراعت دیم» نیز با افزایش قابل توجهی مواجه شده و در مقایسه با سال ۲۰۱۵ حدود ۱۴۰۴ درصد رشد داشته که احتمالاً ناشی از جایگزینی آن با اراضی مرتعی یا اراضی زراعی ناکارآمد است.

در مقابل، کاربری‌های باغ و مخلوط کشت با باغ در اغلب مقاطع با کاهش چشمگیر مواجه هستند؛ برای مثال، مساحت باغ‌ها نسبت به سال ۲۰۰۵ حدود ۱۵۰۱ درصد و نسبت به سال ۲۰۲۰ حدود ۱۳۹۸ درصد کاهش یافته است. این روند نشان می‌دهد که اگرچه در بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ باغ‌ها توسعه یافته‌اند، اما پیش‌بینی‌ها کاهش آن‌ها در افق ۲۰۴۰ را نشان می‌دهند که می‌تواند نشانه‌ای از فشار آبی، اقتصادی یا تخریب اراضی باشد. همچنین، تالاب‌ها و منابع آبی در تمام دوره‌ها با روندی منفی مواجه‌اند؛ حذف کامل آب سطحی و کاهش حدود ۲۳۵ درصدی مساحت تالاب‌ها نسبت به سال ۲۰۰۰، از بحرانی‌تر شدن وضعیت هیدرولوژیکی منطقه حکایت دارد. روند منفی در پوشش‌های گیاهی متوسط و مخلوط نیز به وضوح نشان‌دهنده زوال اکولوژیکی و کاهش کیفیت زیست‌محیطی منطقه در صورت تداوم شرایط کنونی است.

بررسی روند تغییرات کاربری اراضی دشت ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ نشان داد که ساختار فضایی منطقه به طور پیوسته در حال تغییر بوده و این تغییرات عمدتاً در جهت ناپایداری اکولوژیکی صورت گرفته است. کاهش مساحت پوشش‌های طبیعی و اراضی کشاورزی، همراه با افزایش نواحی شهری و باغات در مناطق نامناسب، از نشانه‌های اصلی این روند است. این تغییرات، علاوه بر اثرات محیط‌زیستی، پیامدهایی جدی بر کاربری پایدار اراضی، منابع آب و امنیت معیشتی جمعیت ساکن در منطقه خواهد داشت.

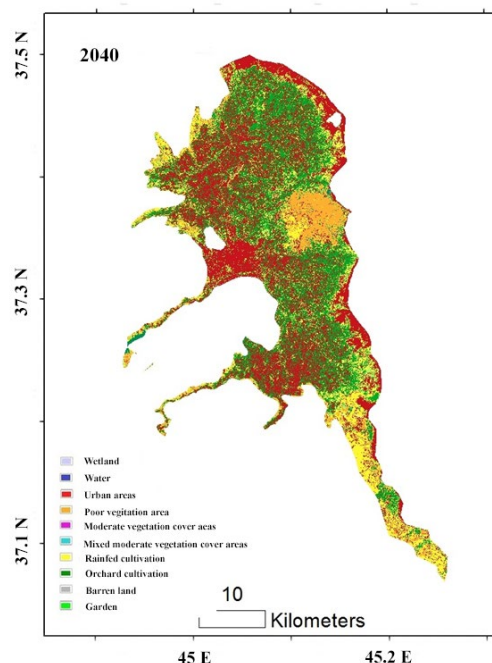


Fig. 6 Land use classified in 2040

شکل ۶ کاربری اراضی طبقه بندی شده سال ۲۰۴۰

«آب» و کاهش بیشتر تالاب‌ها به خصوص در شمال شرق و حاشیه دریاچه ارومیه، گواهی بر استمرار بحران هیدرولوژیکی در منطقه است. از آنجاکه اراضی آبی و تالابی در پیش‌بینی سال ۲۰۴۰ تقریباً حذف شده‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که تداوم وضعیت کنونی در بهره‌برداری از منابع آب و خاک، منجر به خشک شدن کامل ذخایر سطحی، کاهش تنوع زیستی و افزایش فرسایش خواهد شد.

در مجموع، پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی برای سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهد که اگر سیاست‌های کنترلی و حفاظتی مناسب اتخاذ نشود، ساختار سرزمین دشت ارومیه به طور جدی در معرض فروپاشی اکولوژیکی قرار می‌گیرد. افزایش نواحی ناپایدار، نابودی پوشش‌های گیاهی مفید، توسعه بی‌رویه شهری و نابودی منابع آبی، از جمله پیامدهای این روند هستند. بنابراین، نتایج مدل مارکوف باید به عنوان ابزاری مهم برای برنامه‌ریزی فضایی و سیاست‌گذاری در سطح منطقه‌ای مورد توجه قرار گیرد.

بررسی مقادیر درصد تغییرات مساحت انواع کاربری اراضی را در سال ۲۰۴۰ نسبت به سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰،

جدول ۵ درصد مساحت کاربری‌های اراضی در سال ۲۰۴۰ به نسبت هر دوره مورد بررسی

Table 5 Percentage of land use area in 2040 for each period under review

| Land Use Type                   | 2005  | 2010  | 2015  | 2020   |
|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| Waterland                       | -0.42 | -0.67 | -0.89 | -0.83  |
| Water                           | -0.16 | 0.00  | 0.00  | 0.00   |
| Urban area                      | 22.44 | 20.74 | 21.73 | 19.30  |
| Poor vegetation cover           | -1.33 | -2.73 | -4.37 | -1.94  |
| Median vegetation cover         | -0.84 | -1.02 | -0.23 | -2.12  |
| Mixed moderate vegetation cover | -0.81 | -1.74 | 0.00  | -1.91  |
| Rainfed cultivation             | 8.04  | 12.10 | 14.04 | 11.62  |
| Orchard cultivation             | -4.77 | -     | -     | -7.21  |
| Barren land                     | -7.09 | -3.46 | -3.65 | -2.86  |
| Garden                          | -     | -     | -2.16 | -13.98 |

برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، توسعه کشاورزی پرمصرف و مدیریت ناکارآمد منابع سطحی از مهم‌ترین دلایل این روند نزولی بوده‌اند. نتایج این مطالعه با پژوهش‌های مشابه (مانند Feizizadeh et al. 2021؛ Emami and Zarei 2021) همخوانی دارد که در آن‌ها نیز نقش غالب فعالیت‌های انسانی در خشکیدگی تالاب‌ها و کاهش ذخایر آبی تأیید شده است. این شرایط نشان می‌دهد که تغییرات منابع آب بیش از آنکه ناشی از محدودیت‌های طبیعی باشد، پیامد سیاست‌های ناپایدار و بهره‌برداری غیراصولی از منابع آبی است.

بررسی روند تغییرات نشان می‌دهد که کاهش منابع آبی نه تنها به کاهش مستقیم مساحت تالاب‌ها و پهنه‌های آبی منجر شده، بلکه به صورت غیرمستقیم سایر کاربری‌های اراضی را نیز تحت تأثیر قرار داده است. به عنوان نمونه، افت منابع آبی باعث شور شدن خاک و کاهش حاصلخیزی اراضی کشاورزی شده و در نهایت تغییر این اراضی به کاربری‌های بایر و فقیر را تسریع کرده است. همچنین در مناطقی که منابع آب سطحی کاهش یافته‌اند، شاهد افزایش فشار بر

نقشه پیش‌بینی شده سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهد که اگر روند فعلی ادامه یابد، وضعیت کاربری اراضی دشت ارومیه به مراتب بحرانی‌تر خواهد شد. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که پوشش‌های گیاهی ضعیف، نواحی بایر و نواحی شهری به طور قابل توجهی گسترش خواهند یافت. این وضعیت نشان‌دهنده کاهش توان احیای اکولوژیکی منطقه، کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش فرسایش و آسیب‌پذیری سرزمین در برابر تغییرات اقلیمی است. همچنین، حذف کامل اراضی آبی و کاهش شدید سطح تالاب‌ها هشدار جدی برای آینده منابع آبی دشت است.

در تحلیل روندهای زمانی، مشاهده شد که توسعه باغات و اراضی ترکیبی با کشت در سال‌های ابتدایی شتاب گرفته؛ اما در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است. این کاهش، علی‌رغم گسترش اولیه، می‌تواند نشانه‌ای از بروز محدودیت‌های منابع آب، شور شدن خاک و کاهش بهره‌وری در این نوع کاربری‌ها باشد. در همین حال، نواحی شهری روندی صعودی داشته و بانفوذ به اراضی زراعی و باغی، ساختار فضایی منطقه را مختل کرده است. ادامه این روند می‌تواند منجر به افزایش جزایر حرارتی، افت سطح ایستابی و تشدید تعارضات کاربری شود.

تحلیل نتایج نشان داد که کاربری‌های مرتبط با منابع آبی شامل پهنه‌های آبی و تالاب‌ها در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ روندی کاملاً نزولی را تجربه کرده‌اند. در سال ۲۰۰۰ این کاربری‌ها گرچه سهم اندکی از مساحت دشت را به خود اختصاص می‌دادند، اما به مرور کاهش یافتند و از سال ۲۰۱۰ به بعد حضور پهنه‌های آبی تقریباً به طور کامل حذف شد. بر اساس شبیه‌سازی مدل مارکوف، پیش‌بینی می‌شود که در افق ۲۰۴۰ نیز این روند منفی تداوم یافته و تالاب‌ها و منابع آبی سطحی تقریباً ناپدید شوند. این تغییرات هم‌زمان با افت سطح آب دریاچه ارومیه، به عنوان شاخصی از بحران هیدرولوژیکی منطقه عمل کرده و تأثیرات گسترده‌ای بر سایر کاربری‌های اراضی گذاشته است.

بررسی عوامل مؤثر بر کاهش منابع آبی نشان می‌دهد که علاوه بر تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی‌های مؤثر، عوامل انسانی نقش پررنگ‌تری داشته‌اند.

منطقه نه تنها متوقف نخواهد شد، بلکه تشدید نیز خواهد شد.

برای پژوهش‌های آینده، توصیه می‌شود که مدل‌های اقلیمی جهانی و تکنیک‌های پیشرفته یادگیری عمیق به منظور تحلیل سناریوهای احتمالی تغییرات کاربری اراضی به کار گرفته شوند. این رویکردها امکان ادغام داده‌های مکانی و زمانی، شامل اطلاعات هیدرولوژیکی، اقلیمی و اقتصادی-اجتماعی را فراهم می‌کنند و می‌توانند به شناسایی روندهای پیچیده و احتمالی کمک کنند. با این حال، به دلیل عدم قطعیت در منابع آب، تغییرات اقلیمی و مداخلات انسانی، نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند و تمرکز اصلی پژوهش همچنان بر شناخت روندهای گذشته و الگوهای تاریخی کاربری اراضی باقی بماند.

مطالعات آینده می‌توانند با بهره‌گیری از خروجی مدل‌های اقلیمی جهانی (GCMs) و الگوریتم‌های یادگیری عمیق به بررسی پتانسیل تغییرات کاربری اراضی در شرایط محیطی متغیر بپردازند. این روش‌ها امکان تحلیل همزمان داده‌های مکانی و زمانی و درک بهتر از الگوهای پیچیده تغییرات را فراهم می‌کنند. با این حال، به دلیل محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در منابع آب و تغییرات اقلیمی، توصیه می‌شود که پیش‌بینی‌ها صرفاً به عنوان سناریوهای احتمالی در نظر گرفته شوند و تمرکز اصلی پژوهش بر تحلیل و شناخت تغییرات تاریخی کاربری اراضی باقی بماند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی روند تغییرات کاربری و پوشش اراضی دشت ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ و پیش‌بینی وضعیت آن در افق ۲۰۴۰ انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که طی این دوره، ساختار کاربری اراضی منطقه دچار تغییرات اساسی و عمدتاً ناپایدار شده است. افزایش سهم نواحی شهری، گسترش باغات در اراضی با محدودیت‌های اکولوژیکی، کاهش پوشش‌های گیاهی طبیعی و حذف تدریجی اراضی آبی از مهم‌ترین پیامدهای این روند به شمار می‌روند. تحلیل فضایی نقشه‌ها و بررسی آماری تغییرات بیانگر کاهش تنوع کاربری و حرکت الگوی

منابع آب زیرزمینی بوده‌ایم که این امر خود به تشدید روند افت آبخوان‌ها و تعمیق بحران کمک کرده است؛ بنابراین، کاهش منابع آبی به‌عنوان یک عامل محرک کلیدی در تغییرات کاربری اراضی دشت ارومیه عمل کرده و پایداری کل سامانه محیطی منطقه را تهدید کرده است.

ادامه روند کاهش منابع آبی می‌تواند پیامدهای جدی‌تری از جمله افزایش شوری خاک، گسترش اراضی بایر، نابودی پوشش گیاهی طبیعی و کاهش بهره‌وری محصولات کشاورزی را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، خشکیدگی تالاب‌ها و منابع آبی سطحی سبب افزایش فرسایش بادی و تشدید پدیده ریزگردها خواهد شد که تهدیدی مستقیم برای سلامت ساکنان منطقه است. از این رو، نتایج این پژوهش بر ضرورت بازنگری فوری در سیاست‌های مدیریت منابع آب تأکید دارد. اتخاذ راهبردهایی نظیر محدودسازی برداشت آب زیرزمینی، توسعه روش‌های نوین آبیاری و اجرای برنامه‌های حفاظتی برای احیای تالاب‌ها و دریاچه ارومیه می‌تواند در کاهش روند تخریب و بهبود پایداری سرزمین نقشی کلیدی ایفا کند.

این مطالعه نشان داد که کاربری‌های بارز زیست‌محیطی، همچون تالاب‌ها، مراتع و اراضی دارای پوشش طبیعی، بیشترین آسیب را در مواجهه با توسعه بی‌رویه متحمل شده‌اند. گسترش نواحی با کاربری ناپایدار، همراه با نبود برنامه‌ریزی منطقه‌ای مبتنی بر ظرفیت سرزمین، می‌تواند روند تخریب را تسریع کند. عدم تعادل در توزیع فضایی کاربری‌ها، نبود الگوی بهره‌برداری پایدار و غفلت از اصول آمایش سرزمین از عوامل اصلی ناپایداری در منطقه ارزیابی می‌شود.

در مجموع، روند گذشته و پیش‌بینی آینده نشان می‌دهد که دشت ارومیه به سمت بحرانی‌شدن ساختار کاربری اراضی حرکت می‌کند. مداخلات مدیریتی، سیاست‌های بازدارنده، و برنامه‌های احیاگرانه باید با اولویت مناطق آسیب‌پذیر و بحرانی تدوین شوند. ترکیب اطلاعات مکانی و مدل‌های پیش‌بینی می‌تواند ابزاری مؤثر در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. بدون اتخاذ رویکردی جامع و هماهنگ در مدیریت منابع زمین، تخریب سرزمین در

جدی برای آینده زیست‌محیطی منطقه محسوب می‌شود. اگرچه در برخی سال‌ها افزایش نسبی سطح تالاب‌ها مشاهده می‌شود، مقدار مطلق آن در مقیاس دشت ناچیز است و بیشتر ناشی از ماهیت پیکسلی تصاویر لندست و حساسیت مدل طبقه‌بندی است تا بهبود واقعی شرایط هیدرولوژیکی. در مجموع، یافته‌ها بر ضرورت مداخلات مدیریتی فوری، بازنگری در الگوی بهره‌برداری از اراضی و اتخاذ رویکردهای مبتنی بر پایداری برای جلوگیری از تشدید بحران‌های زیست‌محیطی دشت ارومیه تأکید دارند.

بهره‌برداری از زمین به سمت الگوهای پریسک و ناپایدار است.

نتایج پیش‌بینی سال ۲۰۴۰ با استفاده از مدل زنجیره مارکوف نیز تداوم این روند را تأیید می‌کند. افزایش چشمگیر اراضی دارای پوشش گیاهی ضعیف، گسترش نواحی شهری و کاهش کاربری‌های کشاورزی با ارزش اکولوژیکی بالا نشان‌دهنده ورود دشت ارومیه به مرحله‌ای بحرانی از نظر تعادل سرزمینی است. حذف تقریباً کامل منابع آبی و افت پوشش گیاهی با تراکم متوسط، هشدار

The authors declare no conflict of interest

## 5- List of symbols

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| LULC       | Land use and land cover            |
| ETM        | Enhanced Thematic Mapper           |
| OLI        | Operational Land Imager            |
| ENVI       | Environment For Visualizing Images |
| $x$        | Pixel feature vector               |
| $\mu_i$    | Average $i$ class                  |
| $\Sigma_i$ | Class covariance matrix            |
| $p_{ii}$   | The probability of class stability |

## Acknowledgments

We would like to express our deepest gratitude and appreciation for the cooperation of the Sistan and Baluchestan Regional Water Organization in providing the information required for this research.

## Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, A.P.; Methodology M.G. and Y.K.; Software M.G. and Y.K.; Data collection M.G.; Formal analysis A.P.; Validation A.P.; Visualization Y.K.; Writing—original draft M.G. and Y.K.; Supervision A.P..

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## Funding

No financial support was received from any organization for this research.

## Data Availability Statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors upon request .

## Conflicts of Interest

## References

- Aniah P, Bawakyillenuo S, Codjoe SNA, Dzanku FM (2023) Land use and land cover change detection and prediction based on CA-Markov chain in the savannah ecological zone of Ghana. *Environ Challenges* 10:100664. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2022.100664>
- Asadi M, Oshnooei-Nooshabadi A, Saleh SS, et al (2022) Urban Sprawl Simulation Mapping of Urmia (Iran) by Comparison of Cellular Automata–Markov Chain and Artificial Neural Network (ANN) Modeling Approach. *Sustain* 2022, Vol 14, Page 15625 14:15625. <https://doi.org/10.3390/SU142315625>
- Congalton RG (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens Environ* 37:35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Emami H, Zarei A (2021) Modelling lake water's surface changes using environmental and remote sensing data: A case study of lake urmia. *Remote Sens Appl Soc Environ* 23:100594. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100594>
- Fatema K, Joy MAR, Amin FMR, Sarkar SK (2023) Groundwater potential mapping in Jashore, Bangladesh. *Heliyon* 9:.. <https://doi.org/10.1016/J.HELIVON.2023.E13966>
- Feizizadeh B, Garajeh MK, Lakes T, Blaschke T (2021) A deep learning convolutional neural network algorithm for detecting saline flow sources and mapping the environmental impacts of the Urmia Lake drought in Iran. *CATENA* 207:105585. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105585>
- Feizizadeh B, Lakes T, Omarzadeh D, et al (2022)

- Scenario-based analysis of the impacts of lake drying on food production in the Lake Urmia Basin of Northern Iran. *Sci Reports* 2022 121:1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10159-2>
- Gao Y, Hang Y, Yang M (2021) A cooling load prediction method using improved CEEMDAN and Markov Chains correction. *J Build Eng* 42:103041. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103041>
- Ghafari L, Parvishi A (2025) Climate projection and drought assessment in the lake Urmia basin using LSTM-based downscaling of GCM models under SSP scenarios. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 141:104134. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2025.104134>
- Gomes E, Inácio M, Bogdzevič K, et al (2021) Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: A review. *Sci Total Environ* 781:146716. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146716>
- Jafarpour Ghalehtemouri K, Shamsoddini A, Mousavi MN, et al (2022) Predicting spatial and decadal of land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model based scenarios (2019–2049) Zarrin-Rūd River Basin in Iran. *Environ Challenges* 6:100399. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100399>
- Javadi A, Ghahremanzadeh M, Sassi M, et al (2023) Impact of Climate Variables Change on the Yield of Wheat and Rice Crops in Iran (Application of Stochastic Model Based on Monte Carlo Simulation). *Comput Econ* 1–18. <https://doi.org/10.1007/S10614-023-10389-0>
- Khaghani Z, Sharafati A, Kheyruri Y, et al (2025) A fuzzy-based approach for clustering the meteorological drought over Iran. *Stoch Environ Res Risk Assess* 39:697–723. <https://doi.org/10.1007/S00477-024-02891-0>
- Kheyruri Y, Asadollah SBHS, Sharafati A, et al (2024a) Examining the effects of meteorological drought variability on rainfed cultivation yields in Iran. *Theor Appl Climatol* 155:6427–6444. <https://doi.org/10.1007/S00704-024-05013-6>
- Kheyruri Y, Sharafati A, Neshat A, et al (2024b) Analyzing the impact of socio-environmental parameters on wheat and barley cultivation areas using the geographical detector model. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 135:103630. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2024.103630>
- Kheyruri Y, Sharafati A, Shahid S (2023) Evaluation of the impact of large-scale atmospheric indicators and meteorological variables on drought in different regions of Iran. *Environ Earth Sci* 82:.. <https://doi.org/10.1007/S12665-023-11015-W>
- Mahmoudi P, Rigi A (2023) Probabilistic Prediction of Drought in Iran Using Homogenous and Nonhomogenous Markov Chains. *J Hydrol Eng* 28:05023003. <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-5653;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Majumder A, Kingra PK, Setia R, et al (2020) Influence of land use/land cover changes on surface temperature and its effect on crop yield in different agro-climatic regions of Indian Punjab. *Geocarto Int* 35:663–686. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1520927>;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER
- Mortezaii G, Lotfi J, Khalighi Sigarodi S, et al (2020) Analysis and evaluation of hydrological drought indicators in Kurdistan Province. *Watershed Eng Manag* 12:441–453. <https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2019.123305.1566>
- Procházka P, Hönig V, Maitah M, et al (2018) Evaluation of Water Scarcity in Selected Countries of the Middle East. *Water* 2018, Vol 10, Page 1482 10:1482. <https://doi.org/10.3390/W10101482>
- Sarami J, Mohammadi M, Parvishi A, Sabzehparvar M (2022) Optimal Selection of a Portfolio of Construction Projects with Public-Private Partnerships through the Optimization of the Horizons. *J Struct Constr Eng* 9:63–81. <https://doi.org/10.22065/JSCE.2022.259471.2302>
- Shahbazzdashti R, Sharafati A, Kheyruri Y, et al (2024a) Enhancing the TRMM precipitation product in diverse regions of Iran through an intelligent-based post-processing approach. *Acta Geophys* 1–16. <https://doi.org/10.1007/S11600-023-01280-5/METRICS>
- Shahbazzdashti R, Sharafati A, Kheyruri Y, et al (2024b) Enhancing the TRMM precipitation product in diverse regions of Iran through an intelligent-based post-processing approach. *Acta Geophys* 72:2925–2940. <https://doi.org/10.1007/S11600-023-01280-5/METRICS>
- Shekari Tappe R, Parvishi A, Ghanbarzadeh Lak M (2021) Modeling and Evaluation of Flood Spreading in Aquifer Using MODFLOW Code (Case Study: Salmas Plain Aquifer). *Iran-Water Resour Res* 17:360–377
- Ullah W, Ahmad K, Ullah S, et al (2023) Analysis of the relationship among land surface temperature (LST), land use land cover (LULC), and normalized difference vegetation index (NDVI) with topographic elements in the lower Himalayan region. *Heliyon* 9:.. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E133>

[22](#)  
Vohra R, Kumar A, Rongali G (2024) Multi-scale extraction and spatial analysis of growth pattern changes in urban water bodies using sentinel-2

MSI imagery: a study in the central part of India. Stoch Environ Res Risk Assess 38:2397–2423. <https://doi.org/10.1007/S00477-024-02686-3/METRICS>