

(OPEN ACCESS)

Prediction of Land Use Changes Using the Markov Chain and Cellular Automata Model (Case Study: Hyrcanian Region)

Sara Hedayati Kaliji¹ , Seyed Mohsen Hosseini² , Seyed Jalil Alavi³ ,
Mohadeseh Amiri^{*4} 

1. Ph.D. Graduate of Forest Biology, Dept. of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, I.R. Iran. E-mail: sara_hedayatikaliji@modares.ac.ir
2. Professor, Dept. of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, I.R. Iran. E-mail: hosseini@modares.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, I.R. Iran. E-mail: j.alavi@modares.ac.ir
4. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I.R. Iran. E-mail: amiri.m@uma.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 07.09.2025
Revised: 11.11.2025
Accepted: 12.06.2025

Keywords:
Change monitoring,
GEE,
Image classification,
Markov cellular automata
model,
Markov transition estimator,
Remote sensing

ABSTRACT

Background and Objectives: Modeling and predicting land use changes is essential for sustainable land use and awareness of potential future changes. Detection and modeling of such changes using satellite image processing serve as effective tools for understanding environmental transformations associated with human activities. The use of Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) provides systematic and accurate information about land surface phenomena. Monitoring the trend of these changes for sustainable land use can be successfully achieved using multi-temporal remote sensing data. Given the ecological significance of the Hyrcanian region- due to its genetic diversity and ecological and touristic functions- understanding the extent of land use changes and conversions is a key aspect of land use planning and sustainable development. Moreover, since land use change monitoring in the past and its future prediction have not yet been conducted across the entire Hyrcanian region, this study aims to simulate and predict land use/land cover (LULC) changes from past to future by integrating the Markov chain model with Cellular Automata (CA), known as the "Markov-CA" approach. Another novelty of this study lies in the implementation of image processing and modeling workflows within the cloud-based Google Earth Engine (GEE) environment.

Materials and Methods: To detect and model land use changes, Landsat 5 TM images from the 2000, 2005 and 2010, and Landsat 8 OLI images from 2015 and 2020 were analyzed and used. After applying spatial, temporal, and cloud filters (with cloud cover less than 5%), all time-series images were combined using a mean filter in the Google Earth Engine platform, and then classified into six classes (i.e. forest, rangeland, agriculture, built-up areas, bare land, and water bodies) using the supervised Random Forest machine learning algorithm. Classification accuracy was calculated

based on the Kappa index and overall accuracy. To simulate land use for the year 2020, land use maps from 2000 and 2010 were utilized in conjunction with a combined Cellular Automata model and logistic regression-based transition rules, implemented in MATLAB 2021a. Spatial variables including Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) indices, as well as elevation and slope, were used as influencing factors on changes in the Random Forest algorithm. To ensure the representativeness of the selected land use classes, efforts were made to achieve a homogeneous and well-distributed sampling across the study area. Seventy percent of the visually interpreted samples from satellite imagery were used for model implementation (training samples), while the remaining 30 percent were employed for accuracy assessment (test or validation samples). Additionally, the Markov-CA model was integrated to predict land use changes in the Hyrcanian region for the years 2070 and 2100.

Results: Based on the spatial accuracy assessment, for the period 2000 to 2020, the overall accuracy and Kappa coefficient were higher than 80%, indicating a high agreement between the model-predicted images and ground reality and also the efficiency of the Google Earth Engine platform in processing and classifying Landsat imagery. During the 2000-2010 period, a 3.8% decrease in forest cover was observed, primarily due to its conversion into rangelands and agriculture. In the subsequent period (2010–2020), the most significant land use conversion was from rangeland to agriculture, covering an area of 78,872 ha. Using the cellular automata model and logistic regression rules, the Kappa coefficient for land use predictions in 2070 and 2100 was estimated at 76% and 72%, respectively. The Kappa coefficient obtained from comparing these two maps was 87.31%, demonstrating the high capability of the Markov-CA model in simulating future land use changes. The predicted land use changes using the Markov transition estimator showed the degradation and reduction in forest, rangeland, and water bodies in 2070 and 2100. As a result of changes in land use/land cover between 2020 and 2070, forested areas are expected to decrease by 1,686,80 ha compared to the 2000-2020 period. Water bodies are also projected to decline by 2070, with approximately 8,667 ha expected to be converted into rangelands. By 2100, over a 30-year period, forest areas are projected to decrease by 8,900 ha, primarily transitioning into water bodies and barren lands. The most significant land-use changes in the study area include the conversion of forests to rangelands and agriculture, the transformation of rangelands into agriculture and built-up areas, and the conversion of water bodies into barren lands. In fact, if the current trend of land use changes and improper conversions continue, natural resource areas will be drastically reduced.

Conclusion: Overall, the accuracy assessment based on indices derived from the error matrix indicated that the Google Earth Engine platform, through processing multi-temporal Landsat data, proved to be an effective tool for evaluating and monitoring land use changes. The observed trend in the study area showed that agricultural lands, built-up areas, and bare lands had an increasing trend, primarily due to the conversion of other land use types into these classes. In contrast, among all land-cover types, water bodies experienced the most significant decline compared to forests and rangelands. The continuation of this degradation trend is expected to lead

to adverse environmental consequences. The increase in built-up areas and agricultural lands can be justified by population growth and urbanization to meet the food needs of this population, as well as proper management in agriculture. Since by examining land use changes, trends related to degradation, deforestation, desertification, and loss of biodiversity in a region are identified, awareness of these changes over time, it is possible future challenges and implement preventive measures for better management.

Cite this article: Hedayati Kaliji, Sara, Hosseini, Seyed Mohsen, Alavi, Seyed Jalil, Amiri, Mohadeseh. 2026. Prediction of Land Use Changes Using the Markov Chain and Cellular Automata Model (Case Study: Hyrcanian Region). *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (1), 175-198.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23849.3819

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با مدل زنجیره مارکوف و سلول خودکار (مطالعه موردی: منطقه هیرکانی)

سارا هدایتی کلیجی^۱، سید محسن حسینی^۲، سید جلیل علوی^۳، محدثه امیری^{۴*}

۱. دانش‌آموخته دکتری علوم زیستی جنگل، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: sara_hedayatikaliji@modares.ac.ir
۲. استاد گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: hosseini@modares.ac.ir
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. رایانامه: j.alavi@modares.ac.ir
۴. نویسنده مسئول، استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: amiri.m@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی جهت استفاده پایدار از زمین و آگاهی از میزان تغییرات احتمالی در آینده امری ضروری است. آشکارسازی و مدل‌سازی این تغییرات با پردازش تصاویر ماهواره‌ای ابزار سودمندی جهت درک تغییرات محیط زیستی مرتبط با فعالیت‌های انسانی به شمار می‌روند. استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور، اطلاعات به‌هنگامی را پیرامون پدیده‌های سطح زمین ارائه می‌دهد. نظارت بر روند این تغییرات به‌منظور استفاده پایدار از زمین می‌تواند با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور چند زمانی با موفقیت حاصل شود. با توجه به اهمیت زیست‌محیطی منطقه رویشی هیرکانی، تنوع ژنتیکی و کاربردهای اکولوژیکی و گردشگری آن، آگاهی از وسعت تغییرات و تبدیل کاربری‌های مختلف آن مهم‌ترین جنبه برنامه‌ریزی کاربری اراضی و توسعه پایدار است. هم‌چنین، از آن‌جایی‌که تاکنون پایش تغییرات کاربری اراضی در گذشته و پیش‌بینی آن در آینده در کل منطقه هیرکانی صورت نگرفته است، این پژوهش، با تلفیق مدل زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار تحت عنوان "مارکوف-CA" به شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی منطقه هیرکانی از گذشته تا آینده می‌پردازد.
تاریخ دریافت: ۰۴/۰۴/۱۸ تاریخ ویرایش: ۰۴/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۰۴/۰۹/۱۵	
واژه‌های کلیدی: پایش تغییرات، تخمین‌گر انتقال مارکوف، سنجش‌ازدور، طبقه‌بندی تصاویر، مدل سلول خودکار مارکوف، GEE	
مواد و روش‌ها: برای آشکارسازی و مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی، تصاویر لندست ۵ سنجنده TM سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰ و لندست ۸ سنجنده OLI سال‌های ۲۰۱۵ و	

۲۰۲۰ میلادی تجزیه و تحلیل و مورد استفاده قرار گرفتند. پس از اعمال فیلترهای مکانی، زمانی و ابری (ابرناسی کمیتر از ۵ درصد)، تصاویر تمام مقاطع زمانی با استفاده از فیلتر میانگین در پلتفرم گوگل ارث انجین (GEE) ترکیب شدند و سپس، با استفاده از الگوریتم یادگیری ماشین نظارت شده جنگل تصادفی در شش کلاس (جنگل، مرتع، کشاورزی، مناطق ساخته شده، اراضی بایر و پهناهای آبی) طبقه‌بندی شدند. دقت طبقه‌بندی بر اساس شاخص کاپا و دقت کلی محاسبه شد. شبیه‌سازی کاربری اراضی سال ۲۰۲۰ با استفاده از نقشه‌های کاربری سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ و به کمک مدل تلفیقی سلول‌های خودکار و قوانین انتقال رگرسیون لجستیک در نرم‌افزار MATLAB 2021a انجام گرفت. برای این منظور از متغیرهای مکانی شامل شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص تفاضلی نرمال شده آب (NDWI)، شاخص نرمال شده تفاوت مناطق ساخته شده (NDBI)، ارتفاع و شیب به‌عنوان عوامل مؤثر بر تغییرات در الگوریتم جنگل تصادفی استفاده شد. در راستای انتخاب نمونه‌ها برای کاربری‌های در نظر گرفته شده، سعی شد تا نمونه‌ها پراکنش همگن و مناسبی در سطح منطقه داشته باشند. از ۷۰ درصد نمونه‌های برداشت شده به‌صورت بصری از روی تصویر ماهواره‌ای، برای اجرای مدل (نمونه‌های تعلیمی یا آموزشی) و از ۳۰ درصد باقی‌مانده برای ارزیابی دقت مدل (نمونه‌های تست یا اعتبارسنجی) استفاده شد. هم‌چنین، مدل مارکوف-CA برای پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در منطقه هیرکانی برای سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ تلفیق شدند.

یافته‌ها: بر اساس ارزیابی صحت داده‌های مکانی، برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا بالاتر از ۸۰ درصد به دست آمد که حاکی از انطباق زیاد تصاویر پیش‌بینی شده مدل با واقعیت زمینی و کارایی سامانه GEE در پردازش و طبقه‌بندی تصاویر لندست است. در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰، کاهش ۳/۸ درصدی در پوشش جنگل و تبدیل آن به اراضی مرتعی و کشاورزی رخ داد. در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ بیش‌ترین میزان تبدیل از کاربری مرتع به کشاورزی به وسعت ۸۷۲،۷۸ هکتار بود. با مدل سلول‌های خودکار و قوانین رگرسیون لجستیک، شاخص کاپا برای پیش‌بینی کاربری‌ها در سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ به ترتیب ۷۶ و ۷۲ درصد به‌دست آمد. ضریب کاپای حاصل از مقایسه این دو نقشه با مقدار ۸۷/۳۱ درصد نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل مارکوف-CA در شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی برای آینده بود. نتایج پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از تخمین‌گر انتقال مارکوف مبین تخریب و کاهش سطح کاربری‌های جنگل، مرتع و پهناهای آبی در سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ بود. با تغییر پوشش کاربری‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۷۰، سطح اراضی جنگلی نسبت به دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۰، ۱۶۸،۶۸۰ هکتار کاهش خواهد یافت. سطح پهناهای آبی نیز تا سال ۲۰۷۰ کاهش خواهد یافت و به میزان ۸،۶۶۷ هکتار به کاربری مرتع تبدیل خواهد شد. تا سال ۲۱۰۰ و طی یک دوره زمانی ۳۰ ساله، سطح اراضی جنگلی ۸،۹۰۰ هکتار کاهش خواهد یافت و به پهناهای آبی و اراضی بایر تبدیل خواهد شد. بیشترین تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه شامل تبدیل جنگل‌ها به مراتع و اراضی کشاورزی، تبدیل مراتع به کاربری کشاورزی و مناطق ساخته‌شده، و نیز تبدیل پهناهای آبی به اراضی بایر بوده است. در واقع، در صورت تداوم روند تغییر کاربری اراضی و تبدیل غیراصولی آن‌ها به یکدیگر، عرصه‌های منابع طبیعی به‌شدت کاهش خواهند یافت.

نتیجه‌گیری: در مجموع، صحت ارزیابی بر اساس شاخص‌های مستخرج از ماتریس خطا مبین این بود که سامانه GEE با پردازش داده‌های لندست در سری‌های مختلف زمانی توانست ابزار مهمی جهت ارزیابی و پایش تغییرات کاربری باشد. روند تغییرات در منطقه مورد مطالعه به گونه‌ای بود که کاربری‌های کشاورزی، ساخته شده و بایر روند افزایشی داشتند که دلیل این امر، تبدیل سایر کاربری‌ها به آن‌ها بود. در مقابل، در مقایسه با جنگل و مرتع، بیشترین روند کاهشی در منطقه مربوط به پهنه‌های آبی بود که ادامه این روند تخریب، پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی را به دنبال خواهد داشت. افزایش سطح کاربری‌های مناطق ساخته شده و کشاورزی را می‌توان به در توجیه افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی برای رفع نیازهای غذایی این جمعیت و هم‌چنین مدیریت صحیح در زمینه کشاورزی در نظر گرفت. از آنجایی‌که با بررسی تغییرات کاربری اراضی، روندهای مربوط به فرایندهای تخریب، جنگل‌زدایی، بیابان‌زایی و فقدان تنوع زیستی در یک منطقه مشخص می‌گردد، با آگاهی از این تغییرات در طول زمان، می‌توان چالش‌های آینده را پیش‌بینی کرد و با ارائه اقدامات پیشگیرانه، مدیریت بهتری را اعمال نمود.

استناد: هدایتی کلیجی، سارا، حسینی، سید محسن، علوی، سید جلیل، امیری، محدثه (۱۴۰۵). پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی با مدل زنجیره مارکوف و سلول خودکار (مطالعه موردی: منطقه هیرکانی). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۳ (۱)، ۱۹۸-۱۷۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23849.3819



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

کاربری اراضی به مجموعه فعالیت‌های انسانی در زمین اشاره دارد که منجر به تغییر در ساختار پوشش گیاهی، خاک، آب، سنگ‌ها و سایر منابع طبیعی منطقه می‌شود (۱). تشدید شهرنشینی و صنعتی‌شدن موجب ایجاد تغییراتی در پوشش و کاربری اراضی شده است که از محرک‌های اصلی مؤثر بر کشاورزی، اکولوژی، اقلیم، تنوع زیستی، زیستگاه‌ها و حیات‌وحش از مقیاس منطقه‌ای تا جهانی به شمار می‌روند (۲). در واقع، تغییر کاربری اراضی (LUC^۱) یک فرایند پویا است که با تأثیرات مستقیم انسان بر محیط پیرامون، فشارهایی بر محیط‌زیست طبیعی و تغییر در سیمای سرزمین ایجاد می‌کند و در صورت مدیریت نادرست، می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد (۳). درک این فرایندها به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌تری برای مدیریت پایدار اراضی اتخاذ کنند (۴).

مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات مکانی-زمانی، درک صحیحی از نیروهای محرک جهت پیش‌بینی تغییرات آتی، از جمله تغییرات پوشش-کاربری اراضی که شامل سناریوهای مختلف برای هر منطقه است، ارائه می‌کنند (۵). با استفاده از مدل‌سازی، چارچوب علمی آنالیز سیستم‌های تغییر کاربری از شکل توصیفی به حالت کمی تغییر می‌یابد (۶). باین‌حال، تکنیک‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور نیز در ترکیب با روش‌های مختلف مدل‌سازی، مانند مدل سلولی خودکار و زنجیره مارکوف، ابزاری ضروری در ذخیره‌سازی، نمایش و تحلیل تغییرات کاربری اراضی در گذشته، حال و آینده شناخته می‌شوند (۷). از جمله کاربردهای سنجش‌ازدور، بررسی شرایط محیطی در دوره‌های مختلف زمانی است. از طریق این فناوری می‌توان با

استفاده از مجموع تصاویر چندزمانه و پردازش آن‌ها نسبت به آشکارسازی تغییرات کاربری در منطقه اقدام نمود (۷). یکی از روش‌هایی که اخیراً به منظور پردازش و طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و تهیه نقشه کاربری اراضی موردتوجه پژوهش‌گران در نقاط مختلف جهان قرار گرفته است، استفاده از سامانه گوگل ارث انجین (GEE^۲) است. GEE، یک پلتفرم محاسباتی پردازش داده‌های مکانی و تصاویر ماهواره‌ای در فضای ابری است که امکان یکپارچه‌سازی داده‌های عظیمی مانند داده‌های لندست را فراهم می‌کند. این سامانه با زیرساخت محاسباتی با کارایی بالا و دسترسی به بیش از ۳۰ سال آرشیو داده‌های عمومی و رایگان، بسیاری از محدودیت‌های مربوط به دانلود، ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها را برطرف می‌سازد (۸).

باتوجه به این‌که تغییر کاربری اراضی و اثرات آن بر اکوسیستم به یکی از نگرانی‌های کارشناسان و برنامه‌ریزان محیط‌زیست تبدیل شده است، در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در سطح جهان با استفاده از مدل‌های زنجیره مارکوف و سلول خودکار (CA^۳) برای شبیه‌سازی رویدادهای مختلف مکانی، مانند تغییرات کاربری و پوشش اراضی، انجام شده است. به‌عنوان نمونه، میرزایی‌زاده و همکاران (۲۰۱۵) در شبیه‌سازی تغییرات پوشش جنگلی و تعیین میزان کاهش سطح جنگل‌های شهرستان ملکشاهی استان ایلام طی سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۹ از مدل تلفیقی زنجیره مارکوف استفاده کردند و نتایج حاصل از مدل بیانگر کاهش قابل‌توجه (۲۰/۰۹ درصد) مناطق جنگلی این شهرستان بود (۹). جهانی‌فر و همکاران (۲۰۲۰) محرک‌ها و متغیرهایی را که در تغییرات کاربری اراضی از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۶ در منطقه هیرکانی مؤثر بوده‌اند، شناسایی کردند. نتایج تغییر

2- Google Earth Engine

3- Cellular Automata

1- Land Use Change

(۱) استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تجزیه و تحلیل زنجیره مارکوف جهت تهیه نقشه‌های فعلی کاربری اراضی؛ (۲) برآورد ماتریس انتقال نقشه‌های بالقوه کاربری اراضی؛ و (۳) استفاده از مدل مارکوف-CA برای ماتریس‌های انتقال و نقشه‌های احتمال بالقوه به منظور پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه: منطقه رویشی هیرکانی در دامنه شمالی رشته‌کوه البرز (استان‌های گیلان، مازندران و گلستان) و در طول جغرافیایی ۴۸ تا ۵۶ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ تا ۳۸ درجه شمالی واقع شده است. دامنه میانگین دمای سالانه ۱۷/۵-۱۵ درجه سانتی‌گراد و بارندگی منطقه ۲۰۰۰-۵۳۰ میلی‌متر است که از شرق به سمت غرب افزایش می‌یابد (۱۳). جنگل‌های هیرکانی حدود ۱۳ درصد از سطح جنگل‌های کشور را در بر می‌گیرند و قریب ۵۰ گونه درختچه‌ای و ۸۰ گونه درختی، عمدتاً پهن‌برگ، در آن رویش دارند. مهم‌ترین تیپ‌های خاک منطقه شامل خاک‌های آبرفتی، قهوه‌ای جنگلی، رانکر، راندزین، کلویال و لیتوسل هستند (۱۴).

اخذ تصاویر و انتخاب نمونه‌های آموزشی و اعتبارسنجی در سامانه GEE: به منظور مدل‌سازی و تهیه نقشه تغییرات کاربری منطقه هیرکانی در بازه زمانی ۲۰ ساله، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، در ۵ دوره، تصاویر سنجنده TM لندست ۵ (برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۰) و OLI لندست ۸ (برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰) مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا، با استفاده از کدنویسی در سامانه مبتنی بر ابر GEE، مرز منطقه مطالعاتی با فیلتر مکانی تعریف و سپس فیلتر زمانی بر اساس دوره حداکثر رشد پوشش گیاهی تعیین شد. با توجه با قدرت تفکیک زمانی

کاربری نشان داد که مساحت جنگل در سال ۲۰۱۷ نسبت به سال ۱۹۹۷ کاهش یافته است (۱۰). در مطالعه‌ای دیگر، الابی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص‌های گیاهی و مدل زنجیره مارکوف، کاربری اراضی منطقه مطالعاتی را شناسایی کردند. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که دقت پیش‌بینی پوشش جنگلی بیش از ۷۵ درصد بوده است (۱۱). همچنین، در صورت بروز فعالیت‌های انسانی مانند جنگل‌زدایی، پوشش جنگلی منطقه در معرض خطر انقراض قرار می‌گیرد. جهدی (۲۰۲۳) نیز روندهای مکانی-زمانی پویایی کاربری اراضی را طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ در حوزه آبخیز ۲۵ شنرود سیاهکل با استفاده از داده‌های سنجنش‌ازدور مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در این مطالعه، از تکنیک شبکه عصبی مصنوعی-اتوماتای سلولی (CA-ANN) برای پیش‌بینی تغییرات کاربری در دوره زمانی ۱۴۰۱ تا ۱۴۲۲ استفاده شد. نقشه‌های پیش‌بینی‌شده روند افزایشی مناطق انسان‌ساخت به میزان ۷/۴ درصد و روند کاهش جنگل و سایر مناطق طبیعی را به ترتیب به میزان ۳/۴ درصد و ۴ درصد نشان دادند (۱). در مطالعه بهرا و همکاران (۲۰۲۵) در منطقه تالچر، با بهره‌گیری از مدل مارکوف-اتوماتای سلولی (CA-Markov) و تصاویر لندست، تغییرات کاربری زمین طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ تحلیل و تغییرات آتی تا سال ۲۰۲۵ پیش‌بینی شد (۱۲).

باتوجه به اهمیت زیست‌محیطی منطقه رویشی هیرکانی، تنوع ژنتیکی و کاربردهای اکولوژیکی و گردشگری آن، و نیز اهمیت آگاهی از وسعت تغییرات و تبدیل کاربری‌های مختلف در طول زمان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جنبه‌های برنامه‌ریزی کاربری اراضی و توسعه پایدار، این مطالعه برای نخستین‌بار باهدف مدل‌سازی تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی و پیش‌بینی تغییرات آینده آن در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از سامانه GEE در سه مرحله انجام شد:

تفاوت پوشش گیاهی ($NDVI^1$)، شاخص تفاضلی نرمال شده آب ($NDWI^2$) و شاخص نرمال شده تفاوت مناطق ساخته شده ($NDBI^3$) به ترتیب به صورت روابط (۱) تا (۳)، و همچنین ارتفاع و میزان شیب بودند (۱۵). لایه‌های شیب و ارتفاع از مدل رقومی ارتفاع (DEM^4) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر مأموریت توپوگرافی شاتل رادار ($SRTM^5$) استخراج شدند.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR} \quad (2)$$

$$NDBI = \frac{SWIR-NIR}{SWIR+NIR} \quad (3)$$

در روابط فوق، NIR بیانگر باند مادون قرمز نزدیک، RED باند قرمز و SWIR باند مادون قرمز با طول موج کوتاه است.

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و ارزیابی دقت طبقه‌بندی: از آنجایی که روش‌های طبقه‌بندی از قدرتمندترین روش‌ها برای تولید نقشه‌های کاربری اراضی محسوب می‌شوند، پس از انتخاب تصاویر و افزودن شاخص‌ها به آن‌ها، طبقه‌بندی تصاویر انجام شد. باتوجه به سوابق پژوهشی (۱۶، ۱۷ و ۱۸)، الگوریتم جنگل تصادفی به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری ماشین نظارتی، در بسیاری از مطالعات دقت و پایداری بالاتری در طبقه‌بندی کاربری اراضی نشان داده است. بنابراین، این الگوریتم با ۵۰۰ درخت (۱۹ و ۲۰) برای طبقه‌بندی تصویر انتخاب شد.

ماهواره لندست، سعی شد تصاویر با کم‌ترین درصد ابرناکی (کم‌تر از ۵٪) مورد استفاده قرار گیرند. پس از انتخاب تصاویر بدون ابر برای هر دوره، جمع تصاویر سری‌های زمانی در بستر GEE با اعمال فیلتر میانگین انجام شد. در سامانه GEE، امکان تجزیه و تحلیل تمام تصاویر سنجنش‌ازدور موجود با استفاده از ویرایشگر کد محیط توسعه یکپارچه مبتنی بر وب (IDE) بدون نیاز به دانلود داده‌ها فراهم است (۸). در این مطالعه، از مجموعه تصاویر سطح Tier 1 که تصحیحات اتمسفری و رادیومتری آن‌ها انجام شده و به صورت رایگان در سامانه GEE موجود هستند، استفاده شد.

برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۵ که تصاویر گوگل ارث برای منطقه مطالعاتی در دسترس نبودند، نمونه‌ها برای کلاس‌های کاربری در نظر گرفته شده (جنگل، مرتع، کشاورزی، مناطق ساخته شده، اراضی بایر و پهنه‌های آبی) به صورت بصری از روی تصویر ماهواره‌ای برداشت شدند. برای سایر سال‌ها، تصاویر گوگل ارث با قدرت تفکیک مکانی بالا برای این منظور به کار گرفته شدند. در انتخاب نمونه‌ها تلاش شد تا پراکنش همگن و مناسبی در سطح منطقه حفظ شود. از ۷۰٪ نمونه‌ها برای اجرای مدل (نمونه‌های تعلیمی یا آموزشی) و از ۳۰٪ باقی‌مانده برای ارزیابی دقت مدل (نمونه‌های تست یا اعتبارسنجی) استفاده شد.

محاسبه شاخص‌های طیفی: باتوجه به این‌که پردازش‌ها در محیط ابری پلتفرم GEE انجام می‌شوند و سرعت پردازش بسیار بالاست، به‌منظور بهبود دقت طبقه‌بندی، تعدادی شاخص و داده جانبی محاسبه و به صورت باند اضافی به باندهای تصاویر ماهواره‌ای اضافه شدند. این شاخص‌ها شامل شاخص نرمال شده

- 1- Normalized Difference Vegetation Index
- 2- Normalized Difference Water Index
- 3- Normalized Difference Built-up Index
- 4- Digital Elevation Model
- 5- Shuttle Radar Topography Mission

شبیه‌سازی کاربری اراضی: زنجیره مارکوف بر اساس تحلیل‌های چندمعیاره به پیش‌بینی روند تغییرات می‌پردازد. در این مدل، احتمال تغییر یک کاربری یا پوشش اراضی در جدولی تحت عنوان "ماتریس احتمال انتقال" محاسبه می‌شود. سپس، بر اساس این ماتریس و باتوجه به فاصله زمانی مدنظر، مساحت پوشش اراضی در آینده پیش‌بینی خواهد شد. خروجی مدل شامل احتمال تبدیل وضعیت، ماتریس مساحت تبدیل شده هر طبقه و در نهایت تصاویر احتمالات شرطی برای تبدیل کاربری‌های مختلف به یکدیگر است (۶). به دلیل این‌که مدل زنجیره مارکوف به‌تنهایی نمی‌تواند کمیت حالت‌های تبدیل بین انواع کاربری‌ها را شرح دهد (۲۳)، مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار با اضافه کردن مشخصه مجاورت مکانی به مدل تصادفی زنجیره مارکوف تحت عنوان مدل مارکوف-CA، کاربری اراضی را برای سال‌های آینده شبیه‌سازی می‌کند. در مدل سلول‌های خودکار مارکوف، ماتریس نقشه مربوط به دو دوره زمانی با یکدیگر مقایسه شده و ماتریس انتقال کاربری‌ها به‌عنوان شاخصی برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی ایجاد می‌شود، به‌طوری‌که براساس حداکثر احتمال، پیش‌بینی می‌شود هر پیکسل در هر طبقه با چه احتمالی در همان طبقه باقی‌مانده یا به طبقه دیگر تبدیل می‌شود (۲۴). در این مدل، وضعیت کاربری اراضی در آینده (t+1)، به‌عنوان تابعی از کاربری حال حاضر (t) فرض و در قالب رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$X(t+1) = f(xt) \quad (6)$$

در رابطه فوق، X(t+1) کاربری در زمان t+1 و xt کاربری در زمان t را نشان می‌دهد (۲۵).

جهت ارزیابی دقت طبقه‌بندی، معمولاً از ماتریس خطا^۱ و محاسبه دقت کلی^۲ و ضریب کاپا^۳ به‌صورت هم‌زمان استفاده می‌شود. ماتریس خطا از مقایسه تصویر طبقه‌بندی شده با تصویر واقعیت زمینی محاسبه می‌گردد. پیکسل‌های به‌درستی طبقه‌بندی شده، درایه‌های قطر اصلی و پیکسل‌های نادرست طبقه‌بندی شده، درایه‌های خارج از قطر اصلی ماتریس را تشکیل می‌دهند. دقت کلی (OA) مطابق رابطه (۴) از جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها به دست می‌آید:

$$OA = \sum pi / N \quad (4)$$

در این رابطه، $\sum pi$ جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا و N تعداد کل پیکسل‌های آزمایشی است.

به دلیل تأثیر شانس در دقت کلی، این شاخص از نظر تئوری احتمالات، معیار مناسبی برای ارزیابی نتایج طبقه‌بندی نیست. به همین دلیل، در اغلب کارهای اجرایی که مقایسه دقت طبقه‌بندی اهمیت دارد، از شاخص کاپا که پیکسل‌های نادرست طبقه‌بندی شده را نیز در نظر می‌گیرد، استفاده می‌شود. در واقع، ضریب کاپا با کسر سهم برآورد شده توافق شانس، درصد دقت کلی را تعدیل می‌کند. کاپا با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Kappa = \frac{p_0 - p_c}{1 - p_c} \times 100 \quad (5)$$

در رابطه فوق، p_0 نشان‌دهنده درستی مشاهده شده و p_c توافق موردانتظار است. مقدار کاپا بین صفر و یک متغیر است و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد، نقشه طبقه‌بندی شده به واقعیت نزدیک‌تر است (۲۱ و ۲۲).

- 1- Error Matrix
- 2- Overall accuracy
- 3- Kappa coefficient

پیش‌بینی سال ۲۰۲۰ و نقشه واقعی همان سال انجام شد.

مدل‌سازی تغییرات کاربری در سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ با استفاده از سلول‌های خودکار و رگرسیون لجستیک: هدف استفاده از رگرسیون لجستیک برای تهیه نقشه احتمال تغییر کاربری اراضی، یافتن بهترین مدل برای بیان روابط میان حضور یا عدم حضور متغیر وابسته و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل است. رگرسیون لجستیک از روش برآورد حداکثر احتمال برای یافتن مجموعه پارامترهایی که مدل را بهتر برازش می‌دهند، استفاده می‌کند. خروجی مدل، ضرایبی بین ۰ و ۱ خواهد داشت که از طریق تئوری فازی به احتمالات بالاتر از ۰/۵ ارزش ۱ (تخریب) و به احتمالات کم‌تر از ۰/۵ ارزش صفر (بدون تخریب) اختصاص داده می‌شود. رگرسیون لجستیک با این فرض به کار می‌رود که احتمال یک بودن متغیر وابسته از منحنی لگاریتمی پیروی می‌کند و مقدار آن از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$P(Y = 1|X) = \exp(nBX) / 1 + \exp(nB(X)) \quad (8)$$

$$\log_e \left(\frac{p}{1+p} \right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \text{error term} \quad (9)$$

اجرا شد و نقشه‌های پیش‌بینی مربوط به سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ به دست آمدند.

نتایج و بحث

به منظور بررسی روند تغییرات کاربری اراضی در منطقه، از یک بازه ۲۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۰۰) با توالی ۵ سال استفاده شد و نقشه‌های کاربری مربوط به سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ با روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی استخراج گردیدند. با مقایسه نقشه‌های به دست آمده، مساحت (جدول ۱) و

ساختار مدل زنجیره مارکوف شامل یک بردار (N) با ابعاد $M \times 1$ است (که M تعداد کلاس‌های کاربری را نشان می‌دهد) و یک ماتریس $M \times M$ احتمالات انتقال (P) بین جفت کلاس کاربری i و j را توصیف می‌کند. احتمال انتقال طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود: (۲۶):

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1; \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (7)$$

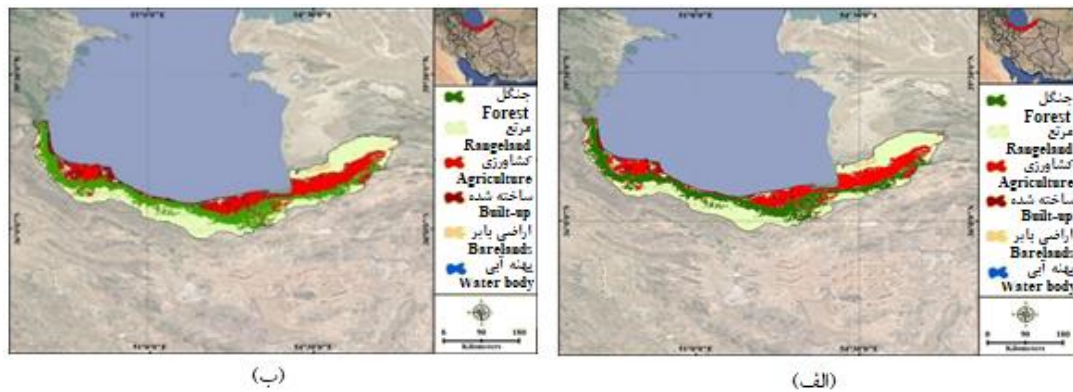
مدل تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار برای کالیبراسیون مدل زنجیره مارکوف بر اساس دو نقشه کاربری مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ ایجاد شد و ماتریس احتمال انتقال بین این دو دوره به دست آمد. در این راستا، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۰ به عنوان نقشه پایه انتخاب شد و در نهایت شبیه‌سازی برای سال ۲۰۲۰ انجام گرفت. در واقع، تلفیق نتایج به دست آمده با مدل رگرسیون لجستیک و مدل سلول‌های خودکار برای شبیه‌سازی سال ۲۰۲۰ به کار گرفته شد و صحت‌سنجی مدل با مقایسه نقشه

در این رابطه، P احتمال یک بودن متغیر وابسته، Y متغیر وابسته، X متغیر مستقل و B پارامتر برآورد شده را نشان می‌دهد. با تغییر لگاریتمی در رابطه (۸)، رابطه (۹) به دست می‌آید. این تغییر لگاریتمی باعث می‌شود که احتمال پیش‌بینی شده در دامنه صفر تا یک پیوسته باشد و خروجی مدل به صورت یک نقشه پیش‌بینی مکانی احتمال تخریب ارائه شود (۲۷).

پس از بررسی نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل، نقشه کاربری اراضی با استفاده از مدل سلول‌های خودکار و قوانین رگرسیون در نرم‌افزار MATLAB 2021a

لندیس و کخ (۱۹۷۷)، نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل در شبیه‌سازی تغییرات کاربری برای آینده بود (۲۸). البته به دلیل این‌که در مراحل مدل‌سازی با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، منبع داده عامل بسیار مهمی برای دقت و صحت مدل است، مدل‌سازی می‌تواند تحت تأثیر خطاهای تفسیر تصاویر سنجش‌ازدور قرار گیرد. در مجموع، صحت داده‌های مکانی نشان می‌دهد که سامانه گوگل ارث انجین با پردازش داده‌های لندست در سری‌های مختلف زمانی توانست ابزار مهمی برای ارزیابی و پایش تغییرات کاربری باشد که با یافته‌های سلطانی و محمدنژاد (۲۰۲۱) و اصغری سراسکانرود و شریفی طولارود (۲۰۲۳) مطابقت دارد (۲۹ و ۳۰).

درصد تغییرات (جدول ۲) هر کاربری مشخص و محاسبه شد. با کمک مدل سلول‌های خودکار و قوانین رگرسیون لجستیک، نقشه پیش‌بینی کاربری‌ها در آینده به صورت شکل ۱ به دست آمد. این مدل با به‌کارگیری ماتریس تغییرات کاربری‌ها که از زنجیره مارکوف حاصل شده و سلول‌های همسایگی با استفاده از نقشه پایه، پیش‌بینی کاربری‌ها را به شکل گرافیکی برای سال‌های موردنظر ارائه داد. برای سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰، شاخص کاپا به ترتیب ۷۶ و ۷۲ درصد به دست آمد. نقشه پیش‌بینی شده کاربری/پوشش اراضی در حالت تداوم روند فعلی کاربری‌ها در شکل نشان داده شده است. ضریب کاپای حاصل از مقایسه این دو نقشه با مقدار ۸۷/۳۱ درصد، بر اساس طبقه‌بندی



شکل ۱- پوشش کاربری‌های پیش‌بینی شده منطقه هیرکانی در سال‌های (الف) ۲۰۷۰ و (ب) ۲۱۰۰.

Figure 1. Projected land use coverage of the Hyrcanian region in the years (a) 2070 and (b) 2100.

(۲۰۱۷) و جهانبخشی و اختصاصی (۲۰۱۹) نیز عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی را نسبت به روش‌های ماشین بردار پشتیبان بهتر دانسته و آن را برای استخراج نقشه کاربری اراضی کارآمد تشخیص دادند (۳۱ و ۳۲). همچنین، کارایی مدل زنجیره مارکوف در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی در مطالعات عزیزی قلاتی و همکاران (۲۰۱۶)، فرزین و خزائی (۲۰۲۱) و کیانپور کل خواجه و همکاران

علاوه بر نتایج آشکارسازی تغییرات در هر دوره، نتایج ارزیابی صحت مبتنی بر شاخص کاپا و دقت کلی برای نقشه‌های کاربری سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در جدول ۱ ارائه شده است. این معیارها که از ماتریس خطا استخراج شده‌اند، در تمامی سال‌ها بالاتر از ۸۰ درصد به دست آمدند، که بیانگر توافق خوب بین طبقه‌بندی و انواع طبقات کاربری موجود در سطح زمین و قابل قبول بودن مدل است. باسوکلا و همکاران

می‌دهند، به‌طوری‌که سطح مراتع در ابتدای دوره ۲,۶۶۶,۲۳۵ هکتار و در انتهای دوره مطالعاتی به ۲,۵۰۵,۵۸۷ هکتار رسیده است. کاهش سطح مراتع در طول زمان، یافته‌های اصغری سراسکانرد و شریفی طولارود (۲۰۲۳) را تأیید می‌کند (۳۰). کاربری‌های کشاورزی و ساخته‌شده در سال ۲۰۰۰ به ترتیب حدود ۱,۴۰۵,۶۲۴ و ۱۵۶,۲۳۰ هکتار و در سال ۲۰۲۰ نیز ۱,۴۷۳,۴۵۲ و ۱۶۶,۵۰۵ هکتار را دربرگرفته‌اند.

(۲۰۲۲) تأیید شد (۲۵، ۲۴، ۵). باتوجه‌به مقادیر جدول، سطح اراضی جنگلی در سال ۲۰۰۰ حدود ۱,۶۸۴,۷۰۰ هکتار بوده و در سال ۲۰۲۰ به ۱,۶۱۵,۷۴۸ هکتار کاهش یافته است. کاهش سطح جنگل‌های کرانه خزری در مطالعات فرج‌الهی و همکاران (۲۰۱۶)، صالحی و همکاران (۲۰۱۹) و جهدی (۲۰۲۳) نیز اثبات شد (۲۱، ۷، ۱). در طول دوره مطالعه، مراتع پوشش غالب منطقه را تشکیل

جدول ۱- مساحت (هکتار) هر کاربری از سال ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ و ارزیابی نقشه کاربری‌های تهیه شده.

Table 1. Area (ha) of each land use from 2000 to 2100 and evaluation of the prepared land use map.

2100	2070	2020	2015	2010	2005	2000	طبقات کاربری Land use classes
1397243	1406138	1574816	1591892	1620661	1649248	1684780	جنگل Forest
2505587	2551212	2574078	2558059	2535728	2650520	2666235	مرتع Rangeland
1599794	1510304	1473452	1473165	1473144	1472969	1405624	کشاورزی Agriculture
174642	172013	166505	166233	160209	159670	156230	ساخته شده Built-up
90945	89812	8735	85933	84410	82766	79265	بایر Bare land
13966	14038	17959	19463	20593	24505	27635	پهنه‌های آبی Water bodies
		0.90	0.88	0.86	0.84	0.84	دقت کلی Overall accuracy
		0.91	0.90	0.88	0.86	0.87	ضریب کاپا Kappa coefficient

همواره در حال افزایش بوده و ۶۷,۸۲۰ هکتار نسبت به سال ۲۰۰۰ رشد داشته است. مساحت کاربری ساخته شده نیز نرخ رشد قابل توجهی داشته و در سال ۲۰۲۰، حدود ۶/۵ درصد افزایش نشان داد. افزایش سطح اراضی کشاورزی و مناطق ساخته شده در منطقه هیرکانی با مطالعات فرج‌الهی و همکاران (۲۰۱۶) و صالحی (۲۰۱۹) همخوانی دارد (۲۱ و ۷). مساحت پهنه‌های آبی نیز روند کاهشی داشته و در سال ۲۰۲۰، ۹,۶۷۰ هکتار با نرخ ۳۵ درصد کاهش یافت. دلیل کاهش سطح پهنه‌های آبی را می‌توان عدم مدیریت صحیح منابع آب و تغییر اقلیم برشمرد. ذبیحی و همکاران (۲۰۲۵) نیز کاهش خدمات هیدرولوژیک اکوسیستم را در اثر تغییر کاربری و تغییر اقلیم در

تغییر مساحت کاربری‌های مختلف در دوره‌های مورد بررسی و درصد تغییرات آن نسبت به سال ۲۰۰۰ در جدول ۲ آورده شده است. باتوجه‌به نتایج، مساحت کاربری جنگل طی همه دوره‌ها کاهش یافت؛ به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۰۰، ۱۰۹,۹۶۰ هکتار کم‌تر شده است. نرخ تغییرات سطح کاربری مرتع نیز روندی کاهشی داشته و در سال ۲۰۲۰، سطح آن ۹۲,۱۵۷ هکتار کم‌تر از سال پایه شده است. عموماً، مراتع با شیب زیاد پس از تغییر کاربری به زراعت دیم، متعاقب یک یا دو دوره کشت، به دلیل یک‌ساله بودن پوشش، بدون حفاظت باقی‌مانده و به‌صورت دیم‌زارهای کم‌بازده رها می‌شوند (۳۳). مساحت کاربری کشاورزی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰

۱۰/۱ و ۱۳/۳ درصد (۱۱۵،۰۲۰، ۱۰۴،۶۸۰، ۱۵،۷۸۰ و ۱۰،۵۴۰ هکتار) نسبت به سال ۲۰۰۰ افزایش خواهند یافت. احتمال می‌رود تا سال ۲۱۰۰، سطح اراضی جنگلی، مراتع و پهنه‌های آبی به ترتیب ۱۷/۱، ۶/۰۳ و ۶۰/۳۲ درصد کاهش و مساحت کاربری‌های کشاورزی، ساخته شده و اراضی بایر به ترتیب ۱۳/۸۱، ۱۱/۷۹ و ۱۴/۷۳ درصد افزایش یابند.

منطقه هیرکانی تأیید کرده و افزایش مناطق مسکونی را دلیل افزایش سطوح نفوذناپذیر و در نتیجه ایجاد رواناب سطحی ذکر نمودند (۳۴). مطابق جدول ۲، پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۷۰، سطح اراضی جنگلی ۱۶/۵ درصد به میزان ۲۷۸،۶۴۰، مراتع ۴/۳۱ درصد به میزان ۱۱۵،۰۲۰ پهنه‌های آبی ۴۹/۲ درصد به میزان ۱۳،۵۹۰ هکتار کاهش یابد، درحالی‌که اراضی کشاورزی، ساخته شده و بایر به ترتیب ۷/۴۴، ۴/۳۱، ۷/۴۴

جدول ۲- میزان (هکتار) و نرخ (درصد) تغییرات مساحت هر کاربری در دوره‌های مورد بررسی نسبت به سال پایه.

Table 2. Area (ha) and rate (%) of changes of each land use in the periods under review compared to the base year.

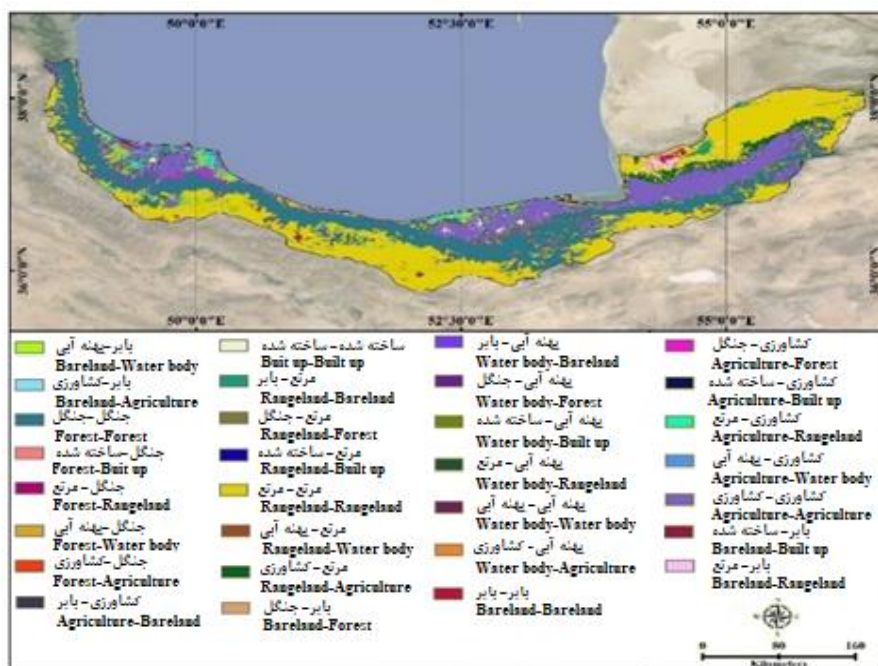
2000-2100		2000-2070		2000-2020		2000-2015		2000-2010		2000-2005		کاربری Use
نرخ تغییرات	تغییرات مساحت	نرخ تغییرات	تغییرات مساحت	نرخ تغییرات	تغییرات مساحت	نرخ تغییرات	تغییرات مساحت	نرخ تغییرات	تغییرات مساحت	نرخ تغییرات	تغییرات مساحت	
Rate of change	Changes in area	Rate of change	Changes in area	Rate of change	Changes in area	Rate of change	Changes in area	Rate of change	Changes in area	Rate of change	Changes in area	
-17.1	-287530	-16.5	-278640	-6.5	-109960	-5.5	-92890	-3.8	-64120	-2.1	-35530	جنگل Forest
-6.03	-160650	-4.31	-115020	-3.45	-92157	-4.06	-108170	-4.9	-130510	-0.59	-15715	مرتع Rangeland
13.81	194170	7.44	104680	4.82	67830	4.80	67541	4.80	67520	4.79	67340	کشاورزی Agriculture
11.79	18412	10.10	15783	6.58	10275	6.40	10003	2.55	3979	2.20	3440	ساخته شده Built-up
14.73	11680	13.30	10547	10.94	8670	8.41	6668	6.49	5145	4.41	3501	بایر Bare land
-60.32	-16669	-49.20	-13597	-35.01	-9676	-29.57	-8172	-25.48	-7042	-11.32	-3130	پهنه آبی Water bodies

تبدیل آن به سایر کاربری‌ها، که مهم‌ترین تهدید برای تنوع زیستی به شمار می‌رود، در مطالعه میرآخورلو و اخوان (۲۰۱۷) نیز اثبات شده است (۳۵). بر اساس مطالعه شریفی و عطارچی (۲۰۲۴)، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای آلوس پالسا و مادیس نیز کاهش سطح جنگل‌های هیرکانی بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ مشاهده شد (۳۶). کاربری مرتع نیز ۱۵،۴۸۰ هکتار (۰/۶ درصد سال ۲۰۰۰) کاهش یافت؛ انتقال آن به کاربری کشاورزی به میزان ۱۷۶،۴۳۲ هکتار بیش‌ترین مقدار را در این دوره داشت. در واقع، افزایش جمعیت و نیاز به مواد غذایی بیش‌تر، شخم

تغییر پوشش کاربری‌های مختلف به یکدیگر بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ در شکل ۲ و میزان مساحت انطباق بین نقشه‌های این سال‌ها که مقادیر تغییر از یک کلاس کاربری به کلاس دیگر را با تجزیه و تحلیل زنجیره مارکوف نشان می‌دهد، در جدول ۳ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل جدول ۲ نشان داد که کاهشی به میزان ۶۴،۱۲۰ هکتار (۳/۸ درصد) در سطح پوشش جنگل طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است. در طول این دوره، جنگل به ترتیب به میزان ۴۱،۲۷۰ و ۳۵،۵۱۶ هکتار به اراضی مرتعی و کشاورزی تبدیل شد. واقعیت انکارناپذیر تخریب جنگل‌های هیرکانی و

به اراضی بایر و مناطق ساخته شده به ترتیب ۳۸۵۰ و ۲۸۰۰ هکتار بود و در نهایت ۱۰،۷۱۰ هکتار به صورت پهنه آبی باقی ماند. مطالعه جهانی فر و همکاران (۲۰۲۰) در منطقه هیرکانی نیز کاهش سطح جنگل، توسعه اراضی کشاورزی و رشد چشمگیر مناطق مسکونی و شهری در دوره مطالعاتی را نشان داد (۳۷).

مراعات و تغییر کاربری آن‌ها به اراضی کشاورزی را به‌دنبال داشته است. بیش‌ترین میزان تبدیل اراضی کشاورزی نیز به مرتع، به میزان ۱۲۷،۹۳۶ هکتار بود. کاربری مناطق ساخته شده در کل دوره دستخوش تغییر قابل‌توجهی نشد. تبدیل اراضی بایر به اراضی مرتعی به میزان ۴۸،۷۲۴ هکتار بیش‌ترین مقدار را به خود اختصاص داد. کاربری پهنه آبی نیز ۲۵/۴۸ درصد کاهش نشان داد که بیش‌ترین میزان تبدیل آن



شکل ۲- تغییرات پوشش کاربری اراضی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰.

Figure 2. Land use cover changes from 2000 to 2010.

جدول ۳- مساحت تغییرات پوشش کاربری (هکتار) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰.

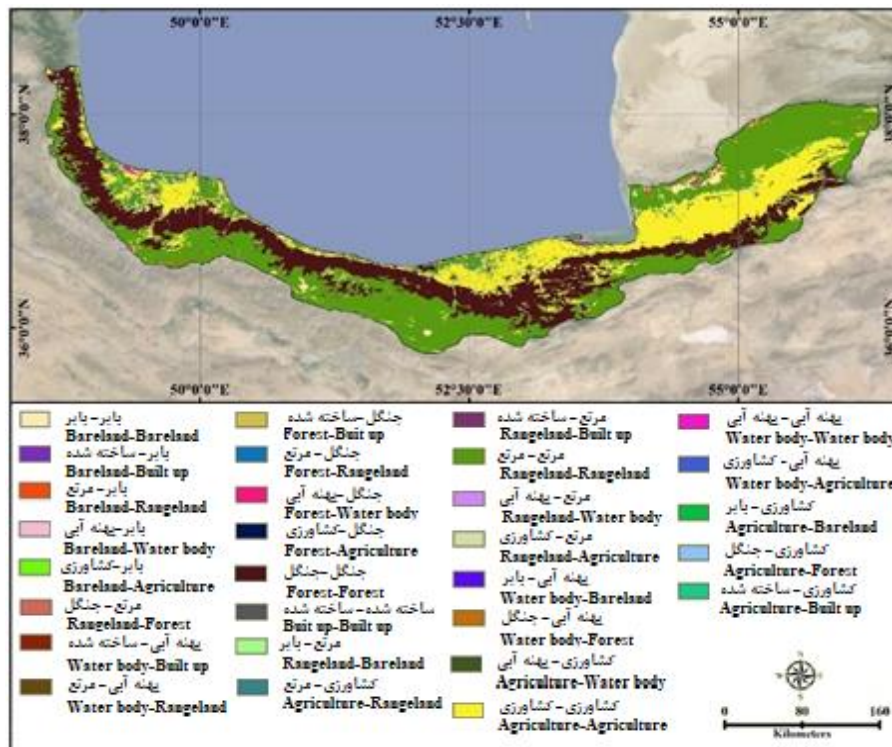
Table 3. Area of land use changes (ha) from 2000 to 2010.

پهنه‌های آبی	بایر	ساخته شده	کشاورزی	مرتع	جنگل	کاربری
Water bodies	Bare land	Built-up	Agriculture	Rangeland	Forest	Use
14	-	19872	35516	41270	926743	جنگل Forest
467	30247	650	176432	1382820	9427	مرتع Rangeland
835	180	4448	695945	127936	44199	کشاورزی Agriculture
-	-	34475	-	-	-	ساخته شده Built-up
479	20222	27	928	47824	3	بایر Bare land
10717	3850	2800	845	435	2	پهنه‌های آبی Water bodies

(-) نشانه عدم تبدیل کاربری‌ها به یکدیگر است.

سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ به میزان ۳۶،۴۸۹ هکتار بیش‌تر مشاهده شد. بیش‌ترین میزان تبدیل از کاربری مرتع به کشاورزی ۷۸،۸۷۲ هکتار بود و بیش‌ترین تبدیل از کاربری کشاورزی به مرتع نیز ۷۵،۵۶۲ هکتار رخ داد. سطح اراضی ساخته شده نسبت به دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۰ با کمی افزایش به ۳۷،۴۲۶ هکتار رسید. حدود ۱۶،۱۸۴ هکتار از اراضی بایر به اراضی مرتعی تبدیل شدند. همچنین، ۱۲،۵۰۵ هکتار از سطح پهنه‌های آبی به صورت پهنه آبی باقی ماند و به ترتیب ۱۵ و ۵ درصد آن به کاربری‌های بایر و ساخته شده تغییر یافت. افزایش اراضی بایر خود نشانه تبدیل عرصه‌های طبیعی به عرصه‌های انسان‌ساخت به‌منظور ساخت و ساز خواهد بود.

نحوه تبدیل کاربری‌ها به یکدیگر بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در شکل ۳ قابل مشاهده است. در جدول ۴ نیز این تغییرات به صورت کمی ارائه شده‌اند. طی این دوره، بیش‌ترین میزان تبدیل از کاربری جنگل به کاربری‌های کشاورزی و مرتع به ترتیب ۱۱،۲۳۰ و ۹،۵۸۶ هکتار بود. به‌طور منطقی، بیش‌ترین جنگل‌زدایی در اطراف اراضی کشاورزی به دلیل دسترسی آسان به آن‌ها رخ می‌دهد. در مطالعه بادآهنگ گله‌بچه و همکاران (۲۰۱۹) نیز مشخص شد که کشاورزان و دامداران برای افزایش سطح زیر کشت و تأمین علوفه موردنیاز دام‌ها، جنگل‌ها را به‌عنوان منبع زمین و درآمد در نظر گرفته و نسبت به سایر افراد تمایل بیش‌تری به تصرف و تغییر کاربری آن دارند (۳۷). تداوم و عدم تغییر جنگل نسبت به



شکل ۳- تغییرات پوشش کاربری اراضی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰.

(کاربری‌هایی که در ستون سمت راست در راهنمای نقشه نشان داده شده‌اند، به کاربری‌های ستون سمت چپ تبدیل خواهند شد).

Figure 3. Land use cover changes from 2010 to 2020.

(Uses shown in the right column in the legend will be transformed to uses in the left column).

جدول ۴- مساحت تغییرات پوشش کاربری (هکتار) از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰.

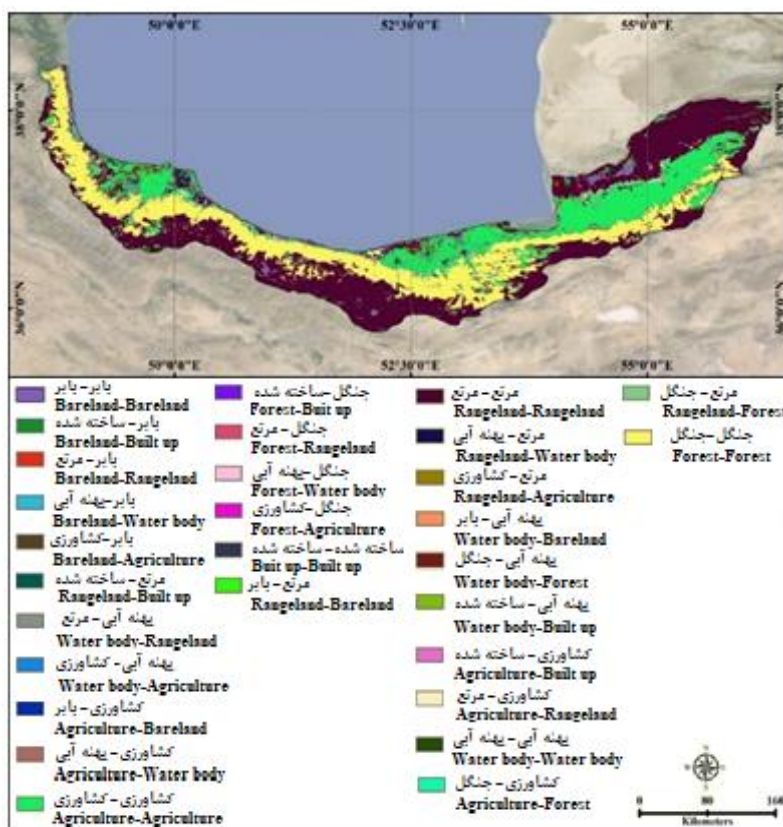
Table 4. Area of land use changes (ha) from 2010 to 2020.

پهنه‌های آبی Water bodies	بایر Bare land	ساخته شده Built-up	کشاورزی Agriculture	مرتع Rangeland	جنگل Forest	کاربری Use
-	-	120	11230	9586	963232	جنگل Forest
5300	6269	1687	78872	1497575	20125	مرتع Rangeland
9000	5500	8573	814808	75562	22330	کشاورزی Agriculture
-	-	37426	-	-	-	ساخته شده Built-up
179	3456	24	305	16184	-	بایر Bare land
12505	1500	500	141	109	-	پهنه‌های آبی Water bodies

(-) نشانه عدم تبدیل کاربری‌ها به یکدیگر است

در منطقه مطالعاتی می‌باشند (۳۸). سطح اراضی کشاورزی نسبت به دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به میزان ۳۶۸۵۰ هکتار افزایش خواهد یافت. بیش‌ترین میزان تبدیل کشاورزی به اراضی مرتعی ۶۶،۵۸۳ هکتار پیش‌بینی شد. هم‌چنین، ۷۲،۱۲۸ هکتار از سطح مراتع به کشاورزی تبدیل خواهد شد. نسبت به سال ۲۰۰۰، پیش‌بینی شده است که ۱۵،۷۸۳ هکتار به وسعت مناطق ساخته شده افزوده شود و بخش دیگری بدون تغییر باقی بماند. در آینده، ۶،۷۸۶ هکتار از اراضی بایر به جنگل و ۳،۴۷۴ هکتار به مرتع تبدیل خواهد شد. طبق پیش‌بینی، سطح پهنه‌های آبی نیز به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و ۸،۶۶۷ هکتار از آن‌ها به کاربری مرتع تغییر خواهد یافت.

تغییر پوشش کاربری‌های مختلف بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۷۰ در شکل ۴ و مقادیر تغییرات در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. بر اساس جداول ۱ و ۲، پیش‌بینی شد که پس از طی یک دوره زمانی ۵۰ ساله، در سال ۲۰۷۰، سطح اراضی جنگلی به‌طور قابل توجهی نسبت به دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۰، ۱۶۸،۶۸۰ هکتار کاهش خواهد یافت که بیش‌ترین تبدیل آن به ترتیب به میزان ۲۷،۱۹۶ و ۲۵،۳۶۷ هکتار به کشاورزی و مرتع خواهد بود. علاوه‌بر دلایل ذکر شده قبلی، برداشت چوب به‌عنوان سوخت، آتش‌سوزی‌های عمدی و سهوی، قاچاق چوب، ذغال‌گیری، بهره‌برداری غیراصولی از محصولات فرعی، استفاده‌های تفریحی، فعالیت‌های عمرانی و عملکرد ضعیف در زمینه ترویج، از جمله عوامل انسانی مؤثر بر تخریب جنگل



شکل ۴- تغییرات پوشش کاربری اراضی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۷۰.

Figure 4. Land use cover changes from 2020 to 2070.

جدول ۵- مساحت تغییرات پیش‌بینی شده پوشش کاربری (هکتار) از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۷۰.

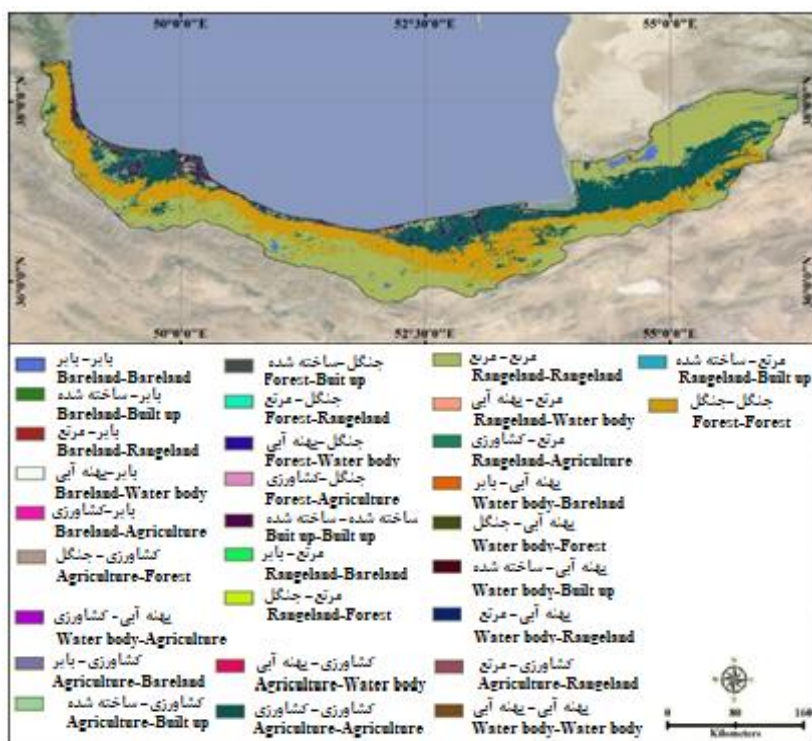
Table 5. Area of predicted land use changes (ha) from 2020 to 2070.

پهنه‌های آبی Water bodies	بایر Bare land	ساخته شده Built-up	کشاورزی Agriculture	مرتع Rangeland	جنگل Forest	کاربری Use
-	-	3646	27196	25367	947738	جنگل Forest
260	16880	51297	72128	1439878	18909	مرتع Rangeland
999	355	48061	785081	65583	15103	کشاورزی Agriculture
-	-	39384	-	-	-	ساخته شده Built-up
6400	33157	120	7200	7434	8667	بایر Bare land
10865	310	388	706	8667	400	پهنه‌های آبی Water bodies

(-) نشانه عدم تبدیل کاربری‌ها به یکدیگر است

سطح اراضی مرتعی نسبت به سال ۲۰۷۰ به میزان ۱۵،۷۰۰ هکتار افزایش خواهد یافت و ۴۹،۷۴۳ هکتار از آن به مناطق ساخته شده تبدیل خواهد شد. پیش‌بینی می‌شود در این بازه زمانی، بیش‌ترین تبدیل اراضی کشاورزی به کاربری‌های جنگل و مرتع به‌ترتیب معادل ۶،۶۵۱ و ۶،۱۵۶ هکتار خواهد بود. ساخت و ساز در اراضی کشاورزی نیز تقریباً به همان میزان سال ۲۰۷۰ خواهد بود. مناطق ساخته شده با وسعت ۱۲۷،۶۸۳ هکتار رشد قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به سال‌های قبل دارند. هم‌چنین، ۷،۱۰۰ هکتار از اراضی بایر به اراضی کشاورزی تبدیل خواهند شد. پیش‌بینی می‌شود پهنه‌های آبی نیز به میزان چشمگیری کاهش یابند و ۸،۱۰۰ هکتار از آن‌ها تا سال ۲۱۰۰ به اراضی بایر تغییر کاربری دهند.

نتایج حاصل از پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی تا سال ۲۱۰۰ میلادی توسط مدل مارکوف-CA در شکل ۵ و مقادیر این تغییرات در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. مطابق پیش‌بینی‌های قبلی (جدول ۱ و ۲)، طی دوه زمانی ۳۰ ساله، سطح اراضی جنگلی در مقایسه با دوره ۲۰۷۰-۲۰۲۰، حدود ۸،۹۰۰ هکتار کاهش خواهد یافت. بیش‌ترین تبدیل از کاربری جنگل به مرتع به میزان ۱۸،۵۶۳ هکتار پیش‌بینی شد. در بسیاری دیگر از مناطق جهان نیز این تغییرات مشاهده شده‌اند. به‌عنوان مثال، کاروالهو و همکاران (۲۰۱۷) تبدیل جنگل‌ها و بوته‌زارها به کشاورزی را مشکل عمده تغییر کاربری منطقه‌ای در برزیل گزارش کردند (۳۹) و جونینتی و همکاران (۲۰۲۳) نیز تخریب جنگل و تبدیل آن به اراضی کشاورزی را مهم‌ترین نوع تغییر کاربری در بخش‌هایی از ریائو دانستند (۴۰).



شکل ۵- تغییرات پوشش کاربری اراضی از سال ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰.

Figure 5. Land use cover changes from 2070 to 2100.

جدول ۶- مساحت تغییرات پیش‌بینی شده پوشش کاربری (هکتار) از سال ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰.

Table 6. Area of predicted land use changes (ha) from 2070 to 2100.

پهنه‌های آبی Water bodies	بایر Bare land	ساخته شده Built-up	کشاورزی Agriculture	مرتع Rangeland	جنگل Forest	کاربری Use
1	-	3896	5199	18563	963427	جنگل Forest
6200	2735	49743	6164	1476108	6754	مرتع Rangeland
216	38	43470	831835	6156	6651	کشاورزی Agriculture
-	-	127683	-	-	-	ساخته شده Built-up
103	47290	771	7100	2479	-	بایر Bare land
10946	8100	908	269	5200	-	پهنه‌های آبی Water bodies

(-) نشانه عدم تبدیل کاربری‌ها به یکدیگر است

نتیجه‌گیری کلی

روندهای فعلی بدون توجه به توسعه پایدار ادامه یابد، عرصه‌های منابع طبیعی به شدت کاهش خواهند یافت. نتایج مطالعه می‌تواند به مقامات محلی در درک بهتر وضعیت موجود و شرایط احتمالی آینده و اتخاذ استراتژی‌های مناسب برای مدیریت پوشش زمین کمک کند. لازم است با آمایش سرزمین و ارزیابی توان اکولوژیک منطقه هیرکانی برای کاربری‌های مختلف، هر گونه برنامه‌ریزی، مدیریت و تغییر کاربری‌ها در جهت استفاده بهینه از منابع منطقه انجام گیرد. سپس، با برنامه‌ریزی، نسبت به حفاظت از این عرصه‌ها اقدام شود تا از ادامه روند کاهش سطح و تخریب منابع طبیعی جلوگیری شود. اگرچه شناخت شرایط کاربری‌های مختلف طی دوره‌های آتی، برنامه‌ریزی برای آینده را از نظر الگوی پراکنش مکانی تسهیل می‌کند، ولی حفظ و ایجاد شرایط پایدار برای آینده هم از نظر آماری و هم اکولوژیکی محدودیت‌هایی دارد. بنابراین، ایجاد شرایط پایدار در منطقه و مدل‌سازی آن به منظور استفاده منظم و پایدار از منابع طبیعی، پیش‌شرط رسیدن به چشم‌اندازها و اسناد بالادستی از جمله طرح‌های توسعه پایدار است.

داشتن آمار و اطلاعات به‌هنگام از کاربری‌های موجود، یکی از مبانی مدیریت منابع طبیعی و پیش‌نیاز مدیریت پایدار عرصه‌های طبیعی است. تغییرات کاربری اراضی در منطقه هیرکانی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و توان پیش‌بینی وضعیت طبقات کاربری بر اساس رویکرد مدل‌سازی تلفیقی زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار تعیین شد. ارزیابی نقشه‌های حاصل بر اساس شاخص‌های مستخرج از ماتریس خطا، دقت الگوریتم جنگل تصادفی در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و کارایی بالای مدل‌سازی زنجیره مارکوف-CA را در سامانه GEE نشان داد. روند تغییرات در منطقه مورد مطالعه به گونه‌ای بود که کاربری‌های کشاورزی، ساخته شده و بایر تغییرات افزایشی داشتند که ناشی از تبدیل سایر کاربری‌ها به آن‌ها بود. در مقابل، در مقایسه با جنگل و مرتع، بیش‌ترین کاهش مربوط به پهنه‌های آبی بود که ادامه روند تخریب پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی را به همراه خواهد داشت. تکه‌تکه شدن اکوسیستم در اثر تغییر کاربری موجب اختلال و کاهش خدمات اکوسیستمی، کاهش ظرفیت تولید فعلی یا آینده و زوال گونه‌های موجود در منطقه می‌شود. چنانچه

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه تربیت‌مدرس که موجبات انجام این پژوهش را فراهم آورده‌اند تشکر می‌نمایند. از زحمات سردبیر محترم و داوران گرامی این مقاله نیز که با بررسی دقیق و ارائه نظرات خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند، قدردانی می‌شود.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش مربوط به رساله دکتری نویسنده اول تحت عنوان "مدل‌سازی پراکنش مکانی گونه‌های راش (*Fagus orientalis* Lipsky) و بلوط (*Quercus castaneifolia* C. A. Mey) در ناحیه خزری مبتنی بر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی" است. نویسندگان حداقل سطح دسترسی که بررسی داده‌ها و اطلاعات توسط سردبیر و داوران نشریه است را پذیرفته‌اند که از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول، داده‌ها قابل دسترسی خواهند بود.

تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منابعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به صورت زیر است:

نویسنده اول: آماده‌سازی داده‌ها، انجام آنالیز محاسبات، مشارکت در نگارش مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل خطا.

نویسنده سوم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش و نظارت بر پژوهش.

نویسنده چهارم: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش و نظارت بر آن، نگارش مقاله، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت‌مدرس از نویسنده اول صورت گرفته است.

منابع

- Jahdi, R. (2023). Land use changes modeling and future predictions using CA-ANN simulation in the watershed of 25 (Shenroud, Siahkal). *Geography and Environmental Studies*, 12(46), 164-179. **Dor: 20.1001.1.20087845.1402.12.46.10.4.** [In Persian]
- Gupta, R., & Sharma, L. K. (2020). Efficacy of spatial land change modeler as a forecasting indicator for anthropogenic change dynamics over five decades: A case study of Shoolpaneshwar wildlife sanctuary, Gujarat, India. *Ecological Indicators*, 112, 106-117. **Doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106171.**
- Cao, C., Dragičević, S., & Li, S. (2019). Short-term forecasting of land use change using recurrent neural network models. *Sustainability*, 11(19), 5376. **Doi: 10.3390/su11195376.**
- Lukas, P., Melesse, A. M., & Kenea, T. T. (2023). Prediction of future land use/land cover changes using a coupled CA-ANN model in the upper Omo-Gibe River basin, Ethiopia. *Remote Sensing*, 15(4), 1148. **Doi: 10.3390/rs15041148.**
- Kyanpoor Kal Khajeh, M., Pjoohesh, M., & Emamgolizadeh, S. (2022). Evaluation of Markov chain and automated cell integrated model in simulation of land use

- change and land cover of Gotvand dam. *Water and Sustainable Development*, 9(2), 47-56. **Doi: 10.22067/jwsd.v9i2.2112.1106.** [In Persian]
6. Arabi Aliabad, F., Zare, M., & Ghafarian Malamiri, H. R. (2021). Land use change prediction using Markov chain compilation model and automated cells (Case study: Shirkuh). *Geography and Development*, 19(62), 251-270. **Doi: 10.22111/J10.22111.2021.6022.** [In Persian]
 7. Salehi, N., Ekhtesasi, M. R., & Talebi, A. (2019). Predicting locational trend of land use changes using CA-Markov model (Case study: Safarod Ramsar watershed). *RS & GIS for Natural Resources*, 10(1), 106-120 [In Persian]
 8. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. **Doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.**
 9. Mirzaeizadeh, V., mahdavi, A., Karmshahi, A., & Jaefarzadeh, A. A. (2015). Application of an integrated CA-Markov model in simulating spatiotemporal changes in forest cover: A case study of Malekshahi county forests, Ilam province. *Ecology of Iranian Forest*, 3(5), 42-52. **Doi: 20.1001.1.24237140.1394.3.5.5.3.** [In Persian]
 10. Jahanifar, K., Amirnejad, H., Mojaverian, S. M., & Azadi, H. (2020). Land use change drivers in the Hyrcanian vegetation area: Dynamic simultaneous equations system with panel data approach. *Land Use Policy*, 99, 104954. **Doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104954.**
 11. Alabi, A., Tobore, A., Oyerinde, G., & Senjobi B. (2021). Forest cover change in Oni Gambari reserve, Ibadan, Nigeria: Application of vegetation index and Markov chain techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 24(3), 983-990. **Doi: 10.1016/j.ejrs.2021.08.004.**
 12. Behera, A., Rawat, K. S., Kumar, S., Almuflih, A. S., Almakayeel, N., & Qureshi, M. R. N. (2025). Simulation and projection of land use and land cover using remote sensing data and CA-Markov model case study. *Geocarto International*, 40(1), 2450441. **Doi: 10.1080/10106049.2025.2450441.**
 13. Hosseini, S. M. (2019). Inscription dossier of the Hyrcanian forests in the UNESCO's world heritage list. UNESCO press. 492p.
 14. Sagheb Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future. Springer, 160p. **Doi: 10.1007/978-94-007-7371-4.**
 15. Zheng, Y., Tang, L., & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Cleaner Production*, 328, 129488. **Doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129488.**
 16. Tian, S., Zhang, X., Tian, J., & Sun, Q. (2016). Random forest classification of wetland landcovers from multi-sensor data in the arid region of Xinjiang, China. *Remote Sensing*, 8(11), 954. **Doi: 10.3390/rs8110954.**
 17. Wingate, V. R., Phinn, S. R., Kuhn, N., Bloemertz, L., & Dhanjal-Adams, K. L. (2016). Mapping decadal land cover Changes in the woodlands of north eastern Namibia from 1975 to 2014 using the Landsat satellite archived data. *Remote Sensing*, 8, 681. **Doi: 10.3390/rs8080681.**
 18. Zurqani, H. A., Post, C. J., Mikhailova, E. A., Schlautman, M. A., & Sharp, J. L. (2018). Geospatial analysis of land use change in the Savannah River basin using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 69, 175-185. **Doi: 10.1016/j.jag.2017.12.006.**
 19. Guo, L., Ma, Y., Cukic, B., & Singh, H. (2004). Robust prediction of fault-proneness by random forests. In Proceedings of the 15th International Symposium on Software Reliability

- Engineering, Saint-Malo, France, 2–5 November pp. 417-428. **Doi: 10.1109/ISSRE.2004.35.**
20. Zhang, D. D., & Zhang, L. (2020). Land cover change in the central region of the lower Yangtze River based on Landsat imagery and the Google Earth Engine: A case study in Nanjing, China. *Sensors*, 20, 2091. **Doi: 10.3390/s20072091.**
21. Farajollahi, A., Asgari, H. R., Ownagh, M., Mahboubi, M. R., & Salman Mahin, A. R. (2016). Monitoring and prediction of spatial and temporal changes of landuse/ cover (Case study: Marave Tappeh region, Golestan). *RS & GIS for Natural Resources*, 6(4), 1-14. [In Persian]
22. Nateghi, S., Nohegar, A., Ehsani, A. H., & Bazrafshan, O. (2017). Evaluating the vegetation changes upon vegetation index by using remote sensing. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(4), 778-790. **Doi: 10.22092/ijrdr.2017.114889.** [In Persian]
23. Sang, L., Zhang, C., Yang, J., Zhu, D., & Yun, W. (2011). Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA–Markov model. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3-4), 938-943. **Doi: 10.1016/j.mcm.2010.11.019.**
24. Farzin, M., & Khazaei, M. (2021). Monitoring, forecasting and analyzing the trend of 40 years of land cover/land use change around Yasuoj city. *Iranian Journal of Forest*, 12(4), 525-539. [In Persian]
25. Azizi Ghalaty, S., Rangzan, K., Sadidy, J., Heydarian, P., & Taghizadeh, A. (2016). Predicting locational trend of land use changes using CA-Markov model (Case study: Kohmare Sorkhi, Fars province). *RS & GIS Techniques for Natural Resources*, 7(1), 59-71. [In Persian]
26. Yusefiroobiat, E., & Jahanishakib, F. (2019). Scenario-based validation and prediction of land use changes in Birjand watershed in 1404. *Environmental Sciences*, 17(2), 229-246. **Doi: 10.29252/envs.17.2.229.** [In Persian]
27. Vakialroaya, M. A., Malmasi, S., Zayeem Dar, M., & Mirza Ebrahime Tehrani, M. (2022). Fire risk zoning in urban areas using logistic regression method (Case study: Kashan city). *RS & GIS for Natural Resources*, 13(4), 49-67. **Doi: 10.30495/girs.2022.685583** [In Persian]
28. Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
29. Soltani, N., & Mohammadnejad, V. (2021). Efficiency of Google Earth Engine (GEE) system in land use change assessment and predicting it using CA-Markov model (Case study of Urmia plain). *RS and GIS for Natural Resources*, 12(3), 23-26. [In Persian]
30. Asghari Sareskanroud, S., & Sharifi Tularoud, H. (2024). Remote sensing used to detect changes in land use and forest cover (A case study of Astar city). *land Management (Soil and Water sciences)*, 11(2), 195-208. **Doi: 10.22092/lmj.2023.362257.332.** [In Persian]
31. Basukala, A. K., Oldenburg, C., Schellberg, J., Sultanov, M., & Dubovyk, O. (2017). Towards improved land use mapping of irrigated croplands: performance assessment of different image classification algorithms and approaches. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 187-201. **Doi: 10.1080/22797254.2017.1308235.**
32. Jahanbakhshi, F., & Ekhtesasi, M. R. (2019). Performance evaluation of three image classification methods (random forest, support vector machine and the maximum likelihood) in land use mapping. *Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 22(4), 235-247. **Doi: 10.29252/jstnar.22.4.235.** [In Persian]
33. Rahmani, A., Sefidkon, F., Fayyaz, M., Ashraf Jafari, A., & Motamedi, J. (2022). The Research institute of forests and rangelands' approach towards the country's wetlands to preserve the basic resources. *Iran Nature*, 7(4), 87-102.

- Doi: 10.22092/ IRN. 2022. 127537.**
[In Persian]
34. Zabihi, M., Moradi, H., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2025). Spatiotemporal variations analysis of water yield ecosystem service in the Hyrcanian region of northern Iran using the InVEST model. *Water and Soil Management*, Online Press. **Doi: 10.22098/MMWS.2025.17679.1614.** [In Persian]
35. Mirakhorlou, Kh., & Akhavan, R. (2017). Area changes of Hyrcanian forests during 2004 to 2016. *Iran Nature*, 2(3), 40-45. **Doi: 10.22092/irn.2017.112967.** [In Persian]
36. Sharif, M., & Attarchi, S. (2024). Estimation of Hyrcanian forests coverage using ALOS PALSAR and MODIS satellite data (2007-2017). *Advances in Space Research*, 73(1), 426-439. **Doi: 10.1016/j.asr.2023.08.021.**
37. Baadahang Galeh-Bacheh, A., Abedi Sarvestani, A., & Mahboobi, M. R. (2019). Survey of attitudes among forest neighboring rural communities toward forest land use change: A case study of Golestan province. *land Management (Soil and Water sciences)*, 6(2), 143-151. **Doi: 10.22092/lmj.2019.122695.141.** [In Persian]
38. Hajjarian, M., Hosseinzadeh, O., & Khaledi, F. (2016). Using combined MADM approach for Hyrcanian forests management. *Environmental Sciences*, 14(3), 1-12. [In Persian]
39. Carvalho, T. S., Domingues, E. P., & Horridge, J. M. (2017). Controlling deforestation in the Brazilian Amazon: Regional economic impacts and land-use change. *Land Use Policy*, 64, 327-341. **Doi: 10.1016/j.landusepol.2017.03.001.**
40. Juniyan, L., Odorlina, R., & Situmorang, P. (2023). What causes deforestation and land cover change in Riau province, Indonesia. *Forest Policy and Economics*, 153, 102999. **Doi: 10.1016/j.forpol.2023.102999.**