Urmia University

Forest Research and Development

Vol. 12, Issue 1, 2026, 87-102

Research Paper

Assessment of forest ecosystem sustainability in the Malekshahi watershed with an emphasis on ecological and managerial indicators

Zeinab Akbari[1], Ali Talebi[*,2], Mohammad Reza Ekhtesasi[3] and Ehsan Fathi[4]

1- PhD student in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University Yazd, Yazd, I. R. Iran. (zeakbari25@gmail.com)
2,*- (Corresponding author) Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, I. R. Iran. (talebisf@iut.ac.ir)
3- Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Yazd, I. R. Iran. (mr_ekhtesasi@yazd.ac.ir)
4- PhD graduate in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University Yazd, Yazd, I. R. Iran. (ef.ehsan2012@gmail.com)

Received: 22 September 2025 Revised: 20 November 2025 Accepted: 29 November 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Forests represent one of the most vital natural resources, covering approximately 30% of the Earth's land surface. While forests are categorized as renewable resources, they are increasingly susceptible to disturbances such as land-use change and wildfires. Furthermore, over the past few decades, the presence of livestock breeders and forest dwellers has emerged as a significant driver of forest degradation. Consequently, assessing forest sustainability is imperative for their conservation, restoration, and optimal management. The Malekshahi watershed, located in Ilam Province, is a key forested region within the Zagros mountains that has recently experienced a decline in forest cover and biodiversity, alongside escalating degradation. This study aims to evaluate the forest sustainability of this watershed based on the framework established by the University and the Natural Resources and Watershed Management Organization of Iran to provide effective management strategies for its preservation and restoration.

Material and Methods: This guideline represents one of the most comprehensive national frameworks for assessing the sustainability of forest ecosystems, developed based on ecological and managerial principles. The methodology evaluates six primary criteria: the extent of forest resources, biodiversity, health, vitality and integrity, productive functions of forest resources, protective and environmental functions, and socio-economic functions. Each criterion comprises a set of sub-indicators, indicators, and measurement variables, totaling 22 indicators and 83 variables. Scoring was performed for each variable based on the current regional status; subsequently, through weighted averaging, the final score for each criterion and the overall sustainability level of the forest ecosystem were calculated and classified. Furthermore, to complement the analysis and achieve a more precise understanding of environmental trends, Landsat 7 satellite imagery from 2011 and Landsat 8 imagery from 2021 were utilized.

Results: According to the results of this study, the final sustainability score for the forest ecosystem in the Malekshahi watershed was calculated as 55, which classifies the region's sustainability as "moderate." Several factors have contributed to the decline of forest ecosystem stability in this area. Limited availability of agricultural land, particularly in mountainous regions, coupled with high

demand for arable land, has led to the expansion of farming activities into forested areas, resulting in significant deforestation. This degradation has further led to a reduction in biodiversity, soil quality deterioration, and environmental issues such as decreased water absorption capacity and increased dust storms (haze). Land-use change analysis between 2011 and 2021 indicates that forest cover decreased from 6,266 hectares to 5,364 hectares during this period. Conversely, agricultural land increased from 2,527 hectares in 2011 to 2,557 hectares in 2021. Additionally, rangelands experienced a 2% increase, reaching 1,331 hectares by 2021.

Conclusion: The findings of this research highlight a trend of forest degradation and unsustainable land-use changes within the region. To counter this trend and enhance sustainability levels, the adoption of integrated management strategies is essential. Recommended measures include increasing local community participation in the conservation and sustainable exploitation of forest resources, establishing a good governance system in natural resource management, and enhancing ecological resilience through revegetation and the control of destructive practices. Furthermore, implementing alternative livelihood programs—such as developing apiculture, cultivating medicinal plants, expanding handicrafts, and leveraging sustainable tourism capacities—can alleviate pressure on forest resources while improving the socio-economic status of residents and increasing the sustainability of forest ecosystems. Overall, the results of this study emphasize the necessity of integrating ecological and managerial approaches into natural resource planning and policymaking.

Keywords: Natural resource conservation, Ecosystem health, Land-use change, Biodiversity.

How to Cite This Article: Akbari, Z., Talebi, A., Ekhtesasi, M. R., Fathi, E., Behifar, M., and Karami. H. (2026). Assessment of forest ecosystem sustainability in the Malekshahi watershed with an emphasis on ecological and managerial indicators. Forest Research and Development, 12(1), 87-102. DOI: 10.30466/jfrd.2025.56388.1769

Copyright ©2024 Akbari et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

پژوهش و توسعه جنگل
جلد ۱۲، شماره ۱، صفحه ۱۰۲-۸۷، (۱۴۰۵)

https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56388.1769
https://dorl.net/dor/20.1001.1.24763551.1405.12.1.5.1

مقالهٔ پژوهشی

ارزیابی پایداری بوم‌سازگان جنگل حوزه آبخیز ملکشاهی با تأکید بر شاخص‌های بوم‌شناختی و مدیریتی

زینب اکبری[۱]، علی طالبی*[۲]، محمدرضا اختصاصی[۳] و احسان فتحی[٤]

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. (zeakbari25@gmail.com)
۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. (talebisf@iut.ac.ir)
۳- استاد، گروه مرتع وآبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. (mr_ekhtesasi@yazd.ac.ir)
٤- دانش آموخته دکتری آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد یزد، ایران. (ef.ehsan2012@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰٦/۳۱ تاریخ بازنگری: ۱٤۰٤/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۹/۰۸

چکیده

مقدمه و هدف: جنگل‌ها از مهم‌ترین منابع‌طبیعی به‌شمار می‌آیند که حدود ۳۰ درصد سطح زمین را می‌پوشانند. اگرچه جنگل‌ها جزء منابع تجدیدشونده به‌شمار می‌روند ولی تحت‌تاثیر آشفتگی‌هایی مانند تغییر کاربری، آتش‌سوزی و غیره قرار می‌گیرند. علاوه براین، در چند دهه گذشته، حضور دامداران و ساکنان جنگل از مهم‌ترین چالش‌ها برای تخریب جنگل بوده است. به‌همین دلیل بررسی پایداری جنگل‌ها برای حفظ، احیا و استفاده درست از آنها مهم است. حوزه آبخیز ملکشاهی در استان ایلام، یکی از مناطق جنگلی مهم در زاگرس است که در سال‌های اخیر با کاهش مساحت جنگل، کاهش تنوع زیستی و افزایش تخریب روبه‌رو بوده است. هدف این پژوهش، ارزیابی پایداری جنگل‌های این حوضه بر اساس روش سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری ایران است تا بتوان راهکارهای مدیریتی مناسب برای حفظ و احیای آن ارائه داد.

مواد و روش‌ها: این دستورالعمل یکی از جامع‌ترین روش‌های ملی برای سنجش وضعیت پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌شمار می‌رود که بر پایه اصول بوم‌شناسی و مدیریتی تدوین شده است. در این روش شش معیار اصلی شامل گستره منابع جنگلی، تنوع زیستی، سلامتی، شادابی و جامعیت، کارکردهای تولیدی منابع جنگلی، کارکردهای حفاظتی و محیط‌زیستی، و کارکردهای اجتماعی و اقتصادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر یک از این معیارها دارای مجموعه‌ای از زیرشاخص‌ها، شاخص‌ها و متغیرهای سنجش هستند که در مجموع ۲۲ شاخص و ۸۳ متغیر را شامل می‌شوند. برای هر متغیر، بر اساس وضعیت موجود منطقه امتیازدهی انجام شده و در نهایت با میانگین‌گیری وزنی، امتیاز نهایی هر معیار و سپس سطح کلی پایداری بوم‌سازگان جنگل محاسبه و طبقه‌بندی می‌شود. همچنین برای تکمیل تحلیل و درک دقیق‌تر روند

تغییرات محیطی، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ مربوط به سال‌های ۱۳۹۰ و لندست ۸ مربوط به سال ۱٤۰۰ نیز مورد استفاده قرار گرفت.

یافته‌ها: بر اساس نتایج این پژوهش امتیاز نهایی بوم‌سازگان جنگل در حوزه آبخیز ملکشاهی ۵۵ به‌دست آمد که طبق ارزیابی‌های انجام‌شده، پایداری منطقه در طبقه متوسط قرار می‌گیرد. عوامل مختلفی در کاهش پایداری بوم‌سازگان جنگلی در این منطقه نقش داشتند. محدودیت اراضی کشاورزی به‌ویژه در مناطق کوهستانی و تقاضای زیاد برای زمین‌های زراعی، منجر به گسترش فعالیت‌های کشاورزی در مناطق جنگلی و در نتیجه تخریب جنگل‌ها شده است. این تخریب جنگل‌ها به کاهش تنوع زیستی، کاهش کیفیت خاک و مشکلات زیست‌محیطی مانند کاهش ظرفیت جذب آب و افزایش ریزگردها منجر شده است. نتایج تحلیل تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱٤۰۰ نیز نشان می‌دهد که در این مدت، سطح جنگل‌ها از ٦۲٦٦ هکتار در سال ۱۳۹۰ به ۵۳٦٤ هکتار در سال ۱٤۰۰ کاهش یافته است در مقابل، اراضی کشاورزی از ۲۵۲۷ هکتار در سال ۱۳۹۰ به ۲۵۵۷ هکتار در سال ۱٤۰۰ افزایش یافته است، همچنین، اراضی مرتعی نیز با افزایش دو درصدی به ۱۳۳۱ هکتار در سال ۱٤۰۰ رسیده‌اند.

نتیجه‌گیری: یافته های این پژوهش بیانگر روند تخریب جنگل‌ها و تغییرات ناپایدار در کاربری اراضی منطقه می‌باشد. برای مقابله با این روند و ارتقای سطح پایداری، اتخاذ راهبردهای مدیریتی تلفیقی ضروری است. از راهکارهای پیشنهادی می‌توان به افزایش مشارکت جوامع محلی در حفاظت و بهره‌برداری پایدار از منابع جنگلی، استقرار نظام حکمرانی مطلوب در مدیریت منابع طبیعی و ارتقای تاب‌آوری بوم‌شناسی از طریق احیای پوشش گیاهی و کنترل بهره‌برداری‌های مخرب اشاره کرد. همچنین، اجرای برنامه‌های معیشتی جایگزین مانند توسعه زنبورداری، کشت گیاهان دارویی، گسترش صنایع دستی و استفاده از ظرفیت‌های گردشگری پایدار، می‌تواند ضمن کاهش فشار بر منابع جنگلی، به بهبود وضعیت اقتصادی–اجتماعی ساکنان و افزایش پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی منجر شود. در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر ضرورت تلفیق رویکردهای بوم‌شناسی و مدیریتی در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری منابع طبیعی تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: حفاظت از منابع طبیعی، سلامت بوم‌سازگان، تغییر کاربری اراضی، تنوع زیستی.

* نویسنده مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۳٤۱۳۷۰۱۰

مقدمه

جنگل‌ها از مهم‌ترین و ارزشمندترین بوم‌سازگان‌های طبیعی به‌شمار می‌آیند. جنگل، موهبتی الهی است که موجودیت آن منبع و منشاء خیر و برکات بی‌شمار و بسیار پرارزش برای انسان است (Amiri, 2019). جنگل‌ها از مهم‌ترین منبع منابع‌طبیعی به‌شمار می‌آیند که حدود ۳۰ درصد سطح زمین را پوشانده‌اند (Moharramnezhad, 2009). جنگل‌ها کارکردهای مهمی مانند تصفیه آب، تثبیت خاک، چرخهٔ عناصر غذایی، تعادل آب و هوایی و ذخیره کربن در طبیعت دارند و همچنین زیستگاه‌های حیات وحش را فراهم و محیط‌های طبیعی را در تنوع زیستی غنی می‌کنند. از نظر اقتصادی، محصولات صنعتی جنگل‌ها از صدها هزار شغل پشتیبانی و میلیاردها دلار به ثروت اقتصادی کشورها کمک می‌کنند (Yuan et al., 2015). جنگل‌ها به‌عنوان یکی از ارکان اصلی پایداری زیست‌محیطی، نقش مهمی در تنظیم چرخه‌های بوم‌شناسی ایفا می‌کنند؛ زیرا با جذب آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، به پاکسازی هوا و بهبود کیفیت محیط‌زیست کمک کرده و از سوی دیگر، از طریق تولید زیست‌توده و ذخیره کربن، موجب تقویت تعادل بوم‌شناسی و پایداری بوم‌سازگان می‌شوند (Tillaguango et al., 2025). در بوم‌سازگان‌های جنگلی، تمرکز بر افزایش بازده و بیشینه‌سازی سود بوده است که منجر به تخریب کمی تنوع زیستی و عملکرد بوم‌سازگان می‌شود (Triviño et al., 2015; Díaz et al., 2019). اگرچه جنگل‌ها جزء منابع تجدیدشونده به‌شمار می‌روند ولی تحت‌تاثیر آشفتگی‌هایی مانند تغییر کاربری، آتش‌سوزی و غیره قرار می‌گیرند.

علاوه بر این، در چند دهه گذشته، حضور دامداران و ساکنان جنگل از مهم‌ترین چالش‌ها برای تخریب جنگل بوده است (Navroodi, 2015). به همین دلیل بررسی پایداری جنگل‌ها برای حفظ، احیا و استفاده درست از آنها مهم می‌باشد. روش‌ها و شاخص‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان با استفاده از آنها به بررسی سطح پایداری، توسعه‌یافتگی منابع طبیعی در مناطق مختلف پرداخت. از این روش‌ها می‌توان به روش پایداری بوم‌سازگان جنگل در حوزه‌های آبخیز با استفاده از رویکرد بوم‌سازگانی دستورالعمل پایش و ارزشیابی طرح‌های مدیریت منابع طبیعی کشور اشاره کرد. این روش برای ارزیابی پایداری جنگل از شش معیار گستره منابع جنگلی، تنوع زیستی، سلامتی، شادابی و جامعیت، کارکردهای تولیدی منابع جنگلی، کارکردهای حفاظتی و محیط‌زیستی و معیار کارکردهای اجتماعی و اقتصادی که هرکدام دارای زیرشاخص‌هایی هستند؛ استفاده می‌کند (Sadeghi et al.,2020). شاخص‌ها نقش مهمی در هر راهبرد گزارش‌دهی و نظارت بر اجرا بازی می‌کنند. شاخص‌های توسعه پایدار درجه اجرای اهداف را به خوبی اندازه‌گیری می‌کنند (Pourasghar Sangachin et al., 2010). در دهه‌ی گذشته، شاخص‌های توسعه در سطح منطقه‌ای، ملی، محلی یا میدانی به‌عنوان یک رهیافت عمومی و به‌عنوان ابزارهای ارزیابی در سطح وسیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Khairandish et al., 2020). پیچیدگی روش‌شناسی‌های مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی و مشکلات مربوط به هزینه و زمان در مدل‌های شبیه‌سازی، استفاده بیشتر از شاخص‌ها را به‌عنوان نماگرهای اندازه‌گیری در بیشتر برنامه‌های نظارت و ارزیابی موجب شده است (Bockstaller and Girardin, 2003). شاخص‌ها ابزار ایده‌آلی برای پیگیری تغییرات در شرایط حوزهٔ آبخیز به‌حساب می‌آیند و در نتیجه، اطلاعات برای تصمیم‌گیری را فراهم می‌کنند (Walmsley et al., 2001). در زمینه

پایداری بوم‌سازگان‌ها بررسی‌های متعددی انجام شده است که به ذکر چند مورد پرداخته می‌شود.

Hazbavi et al. (2018) به ارزیابی سلامت آبخیز مبتنی بر پوشش گیاهی با استفاده از اطلاعات استخراج‌شده از شاخص NDVI پرداختند. نتایج نشان داد که حوزه آبخیز شازند واقع در استان مرکزی با داشتن شاخص سلامت ۰/۳٤ از لحاظ پتانسیل پوشش گیاهی دارای وضعیت به‌نسبت ناسالمی است. Shekofti et al. (2015) پایداری بوم‌سازگان جنگل با رویکرد بوم‌سازگانی در حوزه آبخیز زیارت را بررسی کردند، آنها شش معیار و ۳۰ شاخص را محاسبه کردند. نتایج نشان داد که پایداری بوم‌سازگان جنگل حوزه آبخیز زیارت با امتیاز ۷٤ در رده متوسط پایداری است. Islam et al. (2010) برای بررسی معیارها و شاخص‌های بوم‌سازگان جنگلی در کشور مالزی هفت معیار و ٦٤ شاخص را برای سطح ملی و هفت معیار و ۵۳ شاخص را برای سطح محلی برای مدیریت پایدار جنگل در معرفی کردند. Goleij et al. (2016) در پژوهشی معیارها و شاخص‌های مدیریت پایدار جنگل در منطقه ناو اسالم استان گیلان را بررسی کردند. برای این منظور ۱۱ معیار مربوط به رویکردهای بوم‌شناسی، اقتصادی- اجتماعی و مدیریتی که در مجموع شامل ٦۵ شاخص بودند را بررسی کردند. نتایج مربوط به وزن نهایی و اولویت‌های شاخص‌های منتخب نشان داد که شاخص‌های جنگل‌های طبیعی با زادآوری مطلوب، نشانه‌گذاری اصولی درختان محصول و بذری و موازنه بین رویش و برداشت چوب، مهم‌ترین شاخص‌های توسعه پایدار جنگل در منطقهٔ اسالم بودند. Jahdi and Hazbavi (2024) با استفاده از سنجش از دور و روش پایش سلامت جنگل به ارزیابی سلامت بوم‌سازگان جنگل در حوزه آبخیز شنرود سیاهکل پرداختند. نتایج نشان داد که وضعیت فعلی بوم‌سازگان در منطقه مورد بررسی به‌طور عمده در سلامت متوسط است که نتیجهٔ جنگل‌زدایی بلندمدت، فرسایش خاک و بهره‌برداری نامناسب انسان است. Barkey and Nursaputra (2019) در پژوهشی با استفاده از تصاویر لندست ۸ در سال ۲۰۱۳ سطح سلامت جنگل‌های حوزه آبخیز ماروس را بررسی کردند. نتایج تجزیه و تحلیل سلامت جنگل نشان داد که جنگل‌های این حوضه در وضعیت‌های بسیار سالم، سالم، ناسالم و بسیارناسالم قرار دارند. آنها پیشنهاد دادند که اراضی جنگلی از طریق احیای جنگل و جنگلکاری بهینه‌سازی شود. در یک پژوهش جامع درباره ارزیابی پتانسیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از طریق اجرای استراتژی REDD در جنگل‌های هیرکانی، از داده‌های سری زمانی تصاویر لندست و الگوریتم جنگل تصادفی برای طبقه‌بندی و تحلیل تغییرات پوشش جنگلی در بازه‌ی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. برای پیش‌بینی تغییرات آینده، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و مدل زنجیره مارکوف به‌کار گرفته شدند. نتایج تحلیل تغییرات نشان داد که پوشش جنگلی در فاصله سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۰ کاهش چشمگیری داشته، اما از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ روندی افزایشی و بهبودیافته را تجربه کرده است. مدلسازی سناریوی آینده نشان داد که در صورت عدم اجرای برنامه REDD، تا سال ۲۰۵۰ حدود ۱۹۹۵٦۹ هکتار از اراضی جنگلی تخریب شده و منجر به انتشار حدود ۱۹۹۵٦۹۵ تن معادل دی‌اکسیدکربن خواهد شد. در مقابل، اجرای طرح REDD می‌تواند مقدار انتشار را به ٤۰۵۵۱۲ تن کاهش داده و از انتشار ۱۵۹۰۱۸۳ تن معادل دی‌اکسیدکربن جلوگیری کند (Niknam et al., 2024). با وجود تلاش‌های انجام‌شده در زمینهٔ حفاظت از منابع جنگلی، نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که جنگل‌ها در بسیاری از مناطق کشور همچنان تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی مانند تغییر کاربری اراضی،

بهره‌برداری بی‌رویه و تغییرات اقلیمی، با روندی فزاینده از تخریب و کاهش مساحت مواجه‌اند. این فرآیند موجب کاهش خدمات بوم‌سازگانی، تشدید فرسایش خاک، کاهش منابع آب و تضعیف توان بازسازی طبیعی بوم‌سازگان‌های جنگلی شده است. از این‌رو، ضرورت اتخاذ راهکارهای مدیریتی پایدار، برنامه‌های حفاظتی و اقدامات احیایی برای جلوگیری از تداوم این روند بیش از پیش احساس می‌شود.

در این راستا، در این پژوهش از دستورالعمل پایش و ارزیابی طرح‌های مدیریت منابع طبیعی و آبخیزداری کشور استفاده شده است تا ارزیابی دقیقی از وضعیت بوم‌سازگان جنگلی با تأکید بر شاخص‌های بوم‌شناسی و مدیریتی به‌دست آید. نتایج حاصل می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی حفاظت، بازسازی بوم-شناسی و مدیریت پایدار منابع جنگلی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، یافته‌ها با شناسایی نقاط قوت و ضعف بوم‌سازگان جنگلی، می‌توانند زمینه‌ساز تدوین سیاست‌های کارآمد، تقویت تعامل میان نهادهای مدیریتی و جوامع محلی و توسعه راهبردهای مشارکتی در راستای حفظ و احیای جنگل‌های این حوزهٔ آبخیز باشند. اهمیت مدیریت پایدار جنگل به‌قدری است که پژوهشگران آن را مهم‌ترین راهکار برای حفظ ذخایر جنگلی بیان می‌کنند (Shami et al., 2018). بر این اساس، در راستای تحقق اهداف یادشده، این پژوهش به دنبال آن است که سطح کنونی پایداری بوم‌سازگان جنگلی در حوزهٔ آبخیز ملکشاهی را مشخص کرده و نقش معیارها و شاخص‌های بوم‌شناسی و مدیریتی را در تعیین وضعیت آن مورد بررسی قرار دهد. همچنین، تغییرات کاربری اراضی به‌ویژه در گستره پوشش جنگلی طی بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ بررسی شده تا روند تغییرات مکانی و زمانی مشخص شود. افزون بر این، این پژوهش می‌کوشد عوامل انسانی و محیطی مؤثر بر کاهش پایداری بوم‌سازگان جنگلی را شناسایی کرده و در نهایت، راهکارهای مدیریتی و بوم‌شناسی مناسبی را برای ارتقای سطح پایداری و افزایش تاب‌آوری این بوم‌سازگان ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقهٔ مورد بررسی

حوزه آبخیز ملکشاهی با مساحت ۱۲۰۷۹ هکتار در استان ایلام قرارگرفته و از نظر موقعیت جغرافیایی بین″۳۸٬۳۰°۴۶ تا ″۲۳٬۴۰°۴۶ طول‌شرقی و ″۴۹٬۱۹°۳۳ تا ″۵۲٬۲۶°۳۳ عرض شمالی واقع شده است. بیشینه ارتفاع حوضه ۲۷۴۰ متر و کمینه ارتفاع در خروجی حوضه برابر ۱۲۲۸ متر از سطح دریا می‌باشد. متوسط بارش سالانه در این حوضه در دوره آماری سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ حدود ۵۹۰ میلی‌متر و میانگین دمای بیشینه و کمینه نیز به ترتیب ۲۳/۲۵ و ۱۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد است. منطقه مورد بررسی در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده و واحدهای سنگی و آبرفتی آن متعلق به دوره‌های زمین‌شناسی مختلف هستند. در میان این واحدها، سازند ایلام گسترده‌ترین واحد زمین‌شناسی در حوزهٔ آبخیز ملکشاهی است. شکل ۱ موقعیت حوزهٔ آبخیز ملکشاهی را در کشور و استان ایلام نشان می‌دهد.

روش پژوهش

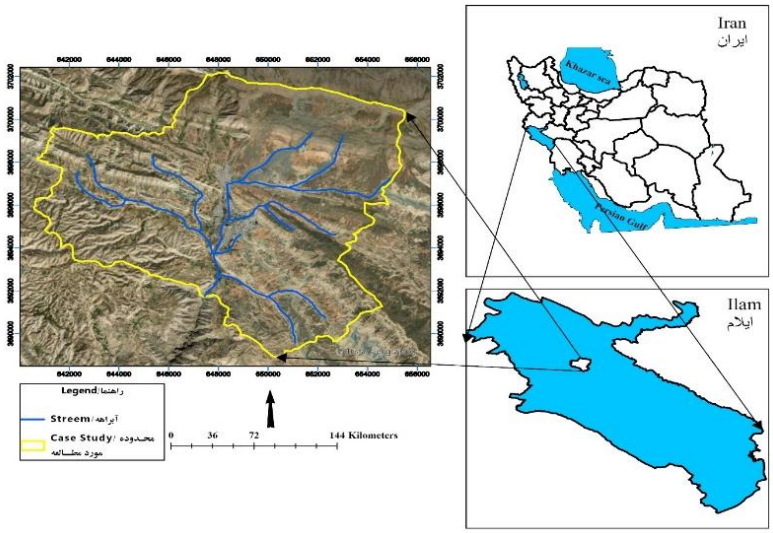
روش مورد استفاده در این بررسی برای اندازه-گیری پایداری حوزهٔ آبخیز برگرفته از دستورالعمل پایش و ارزشیابی طرح‌های مدیریت منابع طبیعی و آبخیزداری است که توسط معاونت برنامه‌ریزی نظارت راهبردی رئیس جمهور در دفتر نظام فنی و اجرایی و سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری برای ایران تهیه و تنظیم شده است. در این روش، ابتدا معیارها، شاخص‌ها و متغیرهای مؤثر بر پایداری بوم‌سازگان جنگل تعیین

شدند. سپس هر متغیر بر اساس وضعیت موجود در منطقهٔ مورد بررسی، به چند طبقهٔ عددی تقسیم شد و برای هر طبقه، بر اساس مقدار انطباق با شرایط مطلوب اکولوژیکی، امتیازی در بازه‌ای از «عالی» تا «ضعیف» اختصاص داده شد.

در مرحلهٔ بعد، امتیازات مربوط به هر شاخص محاسبه و با توجه به اهمیت نسبی هر معیار، وزن‌دهی انجام شد. وزن‌دهی معیارها بر پایه قضاوت کارشناسی و همچنین براساس نتایج بررسی‌ها این حوزهٔ آبخیز و با در نظر گرفتن نقش هر معیار در حفظ عملکرد و پایداری بوم‌سازگان انجام شد. در نهایت، مجموع امتیازات حاصل از شاخص‌ها و معیارها با یکدیگر تجمیع و عدد نهایی به‌عنوان شاخص پایداری بوم‌سازگان جنگلی در حوزه آبخیز محاسبه شد.

بوم‌سازگان جنگل

تنوع اقلیمی و ساختار زمین‌شناسی در ایران تنوع رویش‌ها را موجب شده است، به‌طوری‌که بوم‌سازگان‌های متنوع جنگلی مانند بوم‌سازگان جنگل‌های خزری یا جنگل‌های مرطوب (پهن‌برگ)، بوم‌سازگان جنگل‌های ارسبارانی یا جنگل‌های نیمه‌مرطوب (پهن‌برگ)، بوم‌سازگان جنگل‌های زاگرسی یا جنگل‌های نیمه‌خشک (پهن‌برگ) مانند جنگل‌های حوزه آبخیز ملکشاهی، بوم‌سازگان جنگل‌های ارس ایران و تورانی یا جنگل‌های خشک (سوزنی‌برگ)، بوم‌سازگان جنگل‌های بنه و بادام ایران و تورانی یا جنگل‌های خشک (پهن‌برگ) و بوم‌سازگان جنگل‌های گرمسیری خلیج و عمانی یا جنگل‌های خشک نیمه‌گرمسیری (پهن‌برگ) پدید آورده است. کمی‌کردن شاخص‌ها، معیارها و متغیرهای مورد بررسی در هر یک از بوم‌سازگان‌های جنگلی مزبور با توجه به اقلیم منطقه متفاوت است. پایداری بوم‌سازگان جنگلی زاگرس با شش معیار و ۲۲ شاخص و ۸۳ کمیت مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد. جدول ۱، معیارها و شاخص‌های مورد استفاده طبق روش دستورالعمل پایش و ارزشیابی طرح‌های مدیریت منابع طبیعی و آبخیزداری که برای پایداری بوم‌سازگان جنگل ارائه شده است را نشان می‌دهد. بعد از تلفیق معیارها، شاخص‌ها و متغیرها ارزیابی نهایی بوم‌سازگان جنگل‌های زاگرس بر اساس جدول ۲ است.



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد بررسی (منبع، نگارنده)

Figure 1. Location of the study area (source: the author)

جدول ۱- معیارها و شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی پایداری بوم‌سازگان جنگل

Table 1. Criteria and indicators used for evaluating forest ecosystem sustainability

معیار Criterion	شاخص‌ها، متغیرها و محدوده امتیازهای هر شاخص و متغیر Indicators, variables, and range of scores for each indicator and variable
گستره منابع جنگلی (F1) Forest resources extent (F1)	شاخص‌های وسعت (امتیاز ٤- ١)، انبوهی (٤-١) و مدیریت(٣-١). Indicators: Area (Score 1-4), Density (1-4), and Management (1-3)
تنوع زیستی (F2) Biodiversity (F2)	شاخص‌های آمیختگی (٤-١)، ، پیوستگی (٤-١)، زادآوری طبیعی (٤-١) و تعداد گونه (٣-١). Indicators: Mixing (1-4), Continuity (1-4), Natural regeneration (1-4), and -species Count (1-3)
سلامتی، شادابی و جامعیت (F3) Health, vitality, and integrity (F3)	شاخص‌های شامل زادآوری طبیعی سالم (١-٤)، چرای دام (١-٤)، تغییر کاربری (١-٤)، آفات و امراض (٣-١)، آتش‌سوزی (٣-١) و مصرف سرانه چوب هیزمی و مصارف روستایی (١-٤). Indicators: Healthy natural regeneration (1-4), Grazing (1-4), Land use change (1-4), Pests and diseases (1-3), Fire (1-3), and Per capita firewood and rural consumption (1-4)
کارکردهای تولیدی منابع جنگلی (F4) Productive functions of forest resources (F4)	شاخص‌های شامل تولید چوب (٤-١)، تولید محصولات فرعی (٣-١)، خدمات تولیدی بوم‌سازگان جنگل (٤-١). Indicators: Timber production (1-4), Non-timber product production (1-3), Ecosystem services of forest ecosystems (1-4)
کارکردهای حفاظتی و محیط‌زیستی (F5) Protective and environmental functions (F5)	شاخص‌های حفاظت از آب و خاک (٤-١)، وسعت جنگل حفاظت‌شده (٤-١). Indicators: Water and soil protection (1-4), Area of protected forest (1-4)
کارکردهای اجتماعی و اقتصادی (F6) Social and economic functions (F6)	شامل ارزش تولید محصولات فرعی (٤-١)، ارزش خدمات تولیدی بوم‌سازگان جنگلی (٤-١)، مشارکت جنگلنشینان در مدیریت جنگل‌ها (٤-١)، سهم درآمد خانوارهای جنگلی (٤-١). Indicators: Value of non-timber products (1-4), Value of ecosystem services (1-4), Participation of forest dwellers in forest management (1-4), Share of household income from forestry (1-4)

جدول ۲- تعیین درجهٔ پایداری در بوم‌سازگان جنگلی زاگرس

Table 2. Determining the sustainability degree in zagros forest ecosystems

امتیاز Score	خوب Good	متوسط Moderate	ضعیف Weak
طبقه Range	67-83	45-66	22-44

همچنین در این پژوهش برای بررسی تغییرات کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای لندست۷ سال ۲۰۱۱ (۱۳۹۰ شمسی) و لندست۸ برای سال ۲۰۲۱ میلادی (۱٤۰۰ شمسی) استفاده شد (جدول ۳). در این بررسی از طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده شد و با کمک الگوریتم بیشترین شباهت نقشهٔ کاربری اراضی حاصل با هر یک از تصاویر مورد بررسی جداگانه استخراج شد. تصاویر به‌گونه‌ای انتخاب شد که بیشترین وضوح و کمترین ابرناکی در منطقه مشاهده شود. برای کنترل کیفیت داده‌ها و آگاهی از وجود خطای اتمسفری،

هندسی و رادیومتری، داده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند و افزایش دقت طبقه‌بندی، هر یک از نقشه‌های به‌دست آمده به کمک نقاط کنترلی برداشت‌شده کنترل شد و در نهایت دقت طبقه‌بندی تصاویر با دو شاخص کاپا و صحت کلی ارزیابی شد (Saraskanrood et al., 2019).

جدول ۳- تصاویر مورد استفاده برای استخراج نقشه کاربری اراضی

Table 3. Images used for land use map extraction

ماهواره Satellite	قدرت تفکیک Resolution (m)	تاریخ تصویر Image date	دقت سنجی با شاخص کاپا Kappa index accuracy	دقت سنجی با شاخص دقت کلی Overall accuracy index
Land sat 7	30	2011	0.82	0.87
Land sat 8	30	2021	0.82	0.88

نتایج

نتایج ارزیابی پایداری بوم‌سازگان جنگل نشان می‌دهد که این بوم‌سازگان در سطح متوسط پایداری قرار دارد. امتیاز کلی ۵۵ برای بوم‌سازگان جنگل به‌دست آمده است که مطابق جدول ۲ در طبقه‌بندی متوسط قرار می‌گیرد. همچنین، جدول ٤ جزئیات امتیازات مربوط به هر یک از معیارهای بوم‌سازگان جنگل را ارائه می‌دهد. شکل ۲ نیز با مقایسه امتیازات معیارهای مختلف ارزیابی، تصویر گویا و جامعی از وضعیت بوم‌سازگان جنگل از جنبه‌های بوم‌شناسی و کیفیت مدیریت را ارائه می‌دهد.

برای بررسی پویایی و اهمیت نسبی معیارها، تحلیل آماری و حساسیت شاخص‌ها انجام شد. نتایج نشان داد میانگین درصد تحقق معیارها ٦٩/٨ درصد و ضریب تغییرات ۷/۷ درصد است که بیانگر نوسان کم و پایداری نسبی بوم‌سازگان جنگلی است. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که معیار سلامتی، شادابی و جامعیت بیشترین تأثیر را بر امتیاز نهایی دارد (حساسیت نسبی چهار درصد) و پس از آن معیار کارکردهای اجتماعی و اقتصادی قرار دارد (۳/٦ درصد). بنابراین، بهبود وضعیت سلامت بوم‌شناسی جنگل و تقویت مشارکت اقتصادی–اجتماعی می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای پایداری کلی بوم‌سازگان ایفا کند.

جدول ٤- امتیاز معیارهای بوم‌سازگان جنگل در حوزهٔ آبخیز ملکشاهی

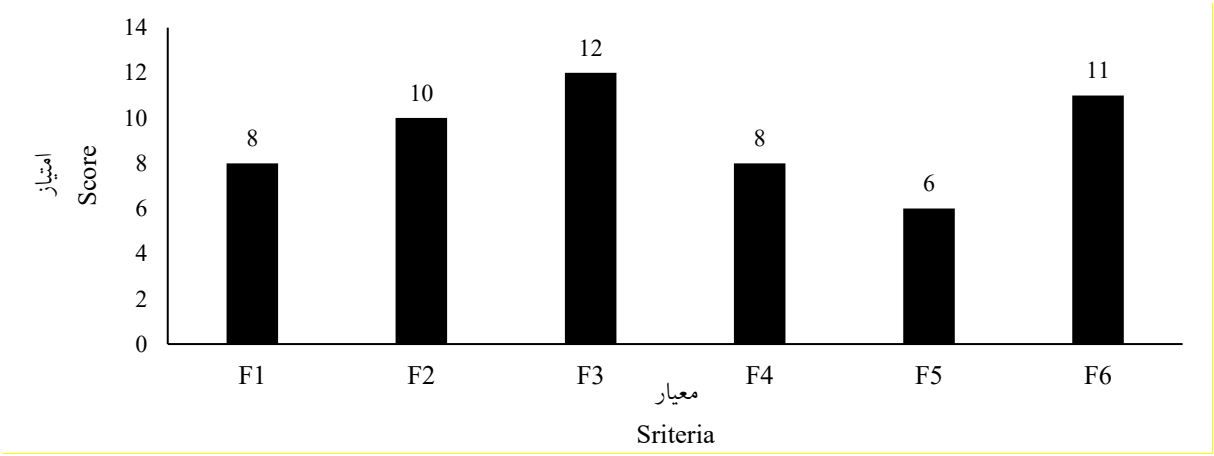
Table 4. Ecosystem criteria scores of forests in the malekshahi watershed

معیار Criteria	کمینه و بیشینه امتیاز معیار Minimum and maximum score	امتیاز معیار در حوزهٔ آبخیز Criterion score in the watershed	حساسیت نسبی (درصد) Relative sensitivity (%)
گستره منابع جنگلی Forest resources extent	3-11	8	2.6
تنوع زیستی Biodiversity	4-15	10	3.3
سلامتی، شادابی و جامعیت Health, vitality, and integrity	6-22	12	4

ادامهٔ جدول ٤.

Continued Table 4.

حساسیت نسبی (درصد) Relative sensitivity (%)	امتیاز معیار در حوزهٔ آبخیز Criterion score in the watershed	کمینه و بیشینه امتیاز معیار Minimum and maximum score	معیار Criteria
2.6	8	3-11	کارکردهای تولیدی منابع جنگلی Productive functions of forest resources
2	6	2-8	کارکردهای حفاظتی و محیط‌زیستی Protective and environmental functions
3.6	11	4-16	کارکردهای اجتماعی و اقتصادی Social and economic functions
-	55	-	امتیاز نهایی بوم‌سازگان جنگل در حوزه آبخیز ملکشاهی Final Ecosystem Score of the Forest in the Malekshahi Watershed



شکل ۲- امتیاز معیارهای بوم‌سازگان جنگل در حوزهٔ آبخیز ملکشاهی

Fig 2. Ecosystem criteria scores of forests in the Malekshahi watershed

بحث

طبق نتایج این پژوهش، پایداری حوزه آبخیز مورد بررسی از نظر بوم‌سازگان جنگلی در سطح متوسط قرار دارد. اقتصاد محلی این منطقه عمدتاً وابسته به کشاورزی به‌ویژه زراعت و باغداری است. با توجه به ماهیت کوهستانی منطقه، اراضی کشاورزی سطح محدودی دارند که قادر به تأمین منابع درآمد کافی برای تمامی نیازهای ساکنان، به‌ویژه جمعیت روستایی، نیست. این محدودیت اقتصادی، همراه با افزایش تقاضا برای زمین‌های زراعی، موجب گسترش فعالیت‌های کشاورزی در مناطق جنگلی و درنتیجه تخریب جنگل‌ها شده است که به کاهش پایداری بوم‌سازگان می‌انجامد. علاوه بر تغییر کاربری اراضی جنگلی به کشاورزی، عوامل دیگری نیز در تخریب و کاهش پایداری جنگل‌های این حوزهٔ آبخیز نقش دارند که مانند آنها می‌توان به تغییرات اقلیمی، خشکسالی، افزایش وقوع ریزگردها، شیوع آفات، آگاهی کم مردم و دامداران، توسعه جاده‌ها و فعالیت‌های عمرانی، مشارکت اندک

جوامع محلی در حفاظت از جنگل‌ها، ضعف فرهنگی گردشگران، افزایش قیمت علوفه، کاهش زادآوری طبیعی به دلیل زراعت زیر درختان، اشاره کرد. (2017) Farrokhzade et al. در بررسی خود بیان کردند که زادآوری طبیعی تداوم زندگی جنگل را تضمین خواهد کرد.

پژوهش‌های پیشین نیز بر نقش عوامل اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی در پایداری جنگل‌ها تأکید دارند. Raizada et al. (2008) مهم‌ترین چالش‌های مربوط به بهره‌برداری از منابع جنگلی در حوزهٔ آبخیز هیمالیا را شامل استفاده نادرست از زمین، کمبود اراضی زراعی، چرای بیش‌ازحد، کاهش فرصت‌های شغلی ناشی از کاهش اراضی زراعی و ناامنی غذایی برای انسان و دام معرفی کرده است. همچنین، Teimoori et al. (2018) با بررسی پایداری انسانی و بوم‌سازگانی در دو زیرحوضه از حوزه آبخیز دروک، نشان دادند که این حوزه از نظر پایداری در سطح متوسط قرار دارد و امتیاز نهایی آن (۵۲) در طبقه ضعیف ارزیابی شده است. در این پژوهش، معیارهایی مانند ویژگی‌های جمعیتی، فقر، امنیت غذایی، بهداشت، تغییر کاربری اراضی، تنوع زیستی، کارکردهای حفاظتی و اقتصادی–اجتماعی مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌های دیگر نیز نشان داده‌اند که هر نوع مدیریت، ظرفیت بوم‌سازگان را برای تولید خدمات بوم‌سازگانی تغییر داده و سبب ایجاد مبادلات و هم‌افزایی‌های متفاوت می‌شود (Nelson et al., 2007; Costanza et al., 2017; Rehman et al., 2021).

نتایج تحلیل تغییرات کاربری اراضی طی بازهٔ زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ (جدول ۵، شکل ۳) نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۰، جنگل‌ها بیشترین مساحت را در منطقه به خود اختصاص داده‌اند و پس از آن، اراضی کشاورزی دومین کاربری غالب بوده‌اند. همچنین، اراضی مرتعی در رتبه سوم پس از مناطق صخره‌ای و فاقد پوشش گیاهی قرار داشته‌اند (شکل ۳). این تغییرات نشان‌دهنده تحولاتی در نحوه بهره‌برداری از منابع طبیعی و توزیع اراضی در منطقه است که می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و مدیریتی قابل‌توجهی داشته باشد.

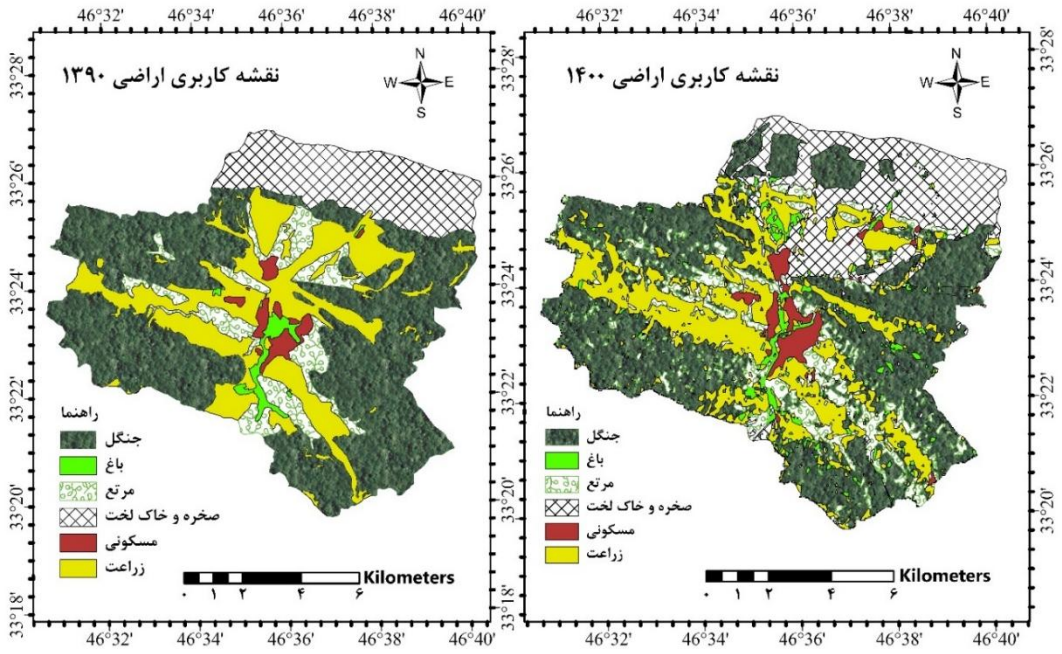
تحلیل روند تغییر کاربری اراضی طی دوره‌ی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که سطح جنگل‌ها با کاهش قابل‌توجهی مواجه بوده، درحالی‌که اراضی کشاورزی، مرتعی، باغی و مناطق سکونتگاهی گسترش یافته‌اند (شکل ۳). نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که این تغییرات با افت شاخص‌های بوم‌شناسی مانند سلامت خاک، تنوع زیستی و تراکم پوشش گیاهی همراه بوده و در نتیجه سبب کاهش سطح کلی پایداری بوم‌سازگان جنگلی شده است. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که کاهش سطح جنگل‌ها هم ناشی از فشارهای انسانی و هم عاملی مؤثر در افت شاخص‌های پایداری است. این دگرگونی‌ها که در پژوهش‌های اخیر نیز گزارش شده‌اند، به‌طور مستقیم موجب افزایش فرسایش خاک و تولید رسوب (Borrelli et al., 2017)، کاهش ظرفیت ذخیره و چرخهٔ کربن در بوم‌سازگان‌ها و افت کیفیت فیزیکی و زیستی خاک (Nave et al., 2024) می‌شوند. افزون بر این، افزایش نفوذناپذیری سطح زمین و تخریب پوشش گیاهی، خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی و بروز ناپایداری‌های هیدرولوژیکی را تشدید می‌کند (Pham and Alila, 2024). Kooch et al. (2025) در پژوهشی اثر تخریب جنگل بر شاخص‌های بافت خاک، رسوب و حاصلخیزی زیستی خاک در بوم‌سازگان‌های کوهستانی نیمه‌خشک در بخش ییلاقی روستای میخساز کجور از توابع شهرستان نوشهر در استان مازندران را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که جنگل‌زدایی و تغییر کاربری اراضی با تغییر شاخص‌های

بافت خاک و افزایش رسوب، موجب کاهش حاصلخیزی زیستی خاک می‌شود. به‌جز کاربری جنگل در عمق اول، در دیگر کاربری‌ها و عمق‌ها، شاخص حاصلخیزی در وضعیت هشدار یا پیش از استرس قرار دارد. در مجموع، چنین تغییراتی نه‌تنها تعادل اکولوژیکی و عملکرد طبیعی بوم‌سازگان‌های جنگلی را برهم می‌زند، بلکه با کاهش تنوع زیستی و ازدست‌رفتن زیستگاه‌ها، فرآیند بازسازی طبیعی را نیز مختل می‌سازد. بنابراین، تحلیل حاضر نشان می‌دهد که ارتباط مستقیم و دوطرفه‌ای میان تغییرات کاربری اراضی و شاخص‌های پایداری وجود دارد و هرگونه برنامهٔ مدیریتی باید همزمان بر کنترل عوامل انسانی و تقویت شاخص‌های بوم‌شناسی و مدیریتی تمرکز کند.

جدول ۵- مقدار تغییرات کاربری اراضی در حوزهٔ آبخیز ملکشاهی برای دورهٔ زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۰

Table 5. Land use change in the Malekshahi watershed for the period 2011-2021

2021				2011				
دقت استفاده‌کننده User's Accuracy	دقت تولیدکننده Producer's accuracy	درصد Percentage	مساحت (هکتار) Area (ha)	دقت استفاده‌کننده User's Accuracy	دقت تولیدکننده Producer's accuracy	درصد Percentage	مساحت (هکتار) Area (ha)	نوع کاربری Land use
93	96	11.02	1331.6	88	91	9.25	1114.12	مرتع Rangeland
91	97	3.20	387.4	89	80	1.4	169.78	باغ Garden
95	91	2.74	329.40	99	97	1.92	232.52	مناطق مسکونی Residential Areas
97	97	21.19	2557.2	95	96	20.92	2527.35	کشاورزی Agriculture
86	99	44.40	5364.38	95	91	51.87	6266.03	جنگل Forest
98	96	17.45	2109.3	93	89	14.64	1769.47	صخره و فاقد پوشش Rock and bare land
	0.87				0.82			دقت کل Overall accuracy
	0.88				0.82			ضریب کاپا Kappa coefficient



شکل ۳- نقشهٔ کاربری اراضی حوزهٔ آبخیز ملکشاهی در بازهٔ زمانی ۱۴۰۰-۱۳۹۰

Figure 3. Land use map of the Malekshahi watershed for the period 2011-2021

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پایداری بوم‌سازگان جنگل در حوزهٔ آبخیز ملکشاهی با استفاده از روش سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری ایران و بر اساس شش معیار اصلی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شاخص پایداری جنگل با امتیاز ۵۵ در سطح متوسط قرار دارد که بیانگر وجود فشارهای بوم‌شناختی و مدیریتی بر ساختار بوم-سازگان است. همچنین، تحلیل تغییرات کاربری اراضی طی دههٔ اخیر نشان داد که از سال ۱۳۹۰ تاکنون، مساحت جنگل‌ها حدود هفت درصد کاهش و مراتع حدود دو درصد افزایش یافته است؛ روندی که نشان‌دهنده تخریب و تغییرات ناپایدار در کاربری اراضی است.

با توجه به این یافته‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که پایداری بوم‌سازگان بیش از هر چیز تحت تأثیر گسترش فعالیت‌های کشاورزی در اراضی جنگلی، چرای مفرط دام، و ضعف در شاخص‌های اجتماعی و مدیریتی قرار دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود احیای عرصه‌های تخریب‌شده با استفاده از گونه‌های بومی مقاوم به خشکی، تقویت کمربندهای حفاظتی در مناطق پرخطر و محدودسازی تغییر کاربری اراضی به‌طور جدی در اولویت برنامه‌های اجرایی قرار گیرد. همچنین، توسعه برنامه‌های معیشتی جایگزین مانند زنبورداری، کشت گیاهان دارویی و گردشگری بوم‌محور در مناطق دارای پایداری پایین می‌تواند ضمن کاهش فشار بهره‌برداری، به بهبود شرایط اجتماعی و اقتصادی جوامع محلی منجر شود. استقرار نظام پایش مستمر پایداری جنگل‌ها با بهره‌گیری از شاخص‌های بوم‌شناسی و مدیریتی نیز برای رصد تغییرات و تصمیم‌گیری‌های به‌موقع ضروری است. در مجموع، یافته‌های این پژوهش بیانگر آن است که به‌کارگیری شاخص‌های ارزیابی پایداری در مدیریت حوزه‌های آبخیز، علاوه بر فراهم‌سازی امکان تحلیل دقیق وضعیت بوم‌سازگان‌های جنگلی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در سیاست‌گذاری‌های کلان و برنامه‌ریزی‌های محلی برای حفاظت و بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد.

References

Amiri, P. The effect of livestock on forest regeneration: A case study of the Kheyrood Kenar Forest. *Shabak Specialized Journal of Environmental Studies, Natural Resources and Sustainable Development* **2019**, *5* (12), 69–76. (In Persian)

Borrelli, P.; Robinson, D. A.; Fleischer, L. R.; Lugato, E.; Ballabio, C.; Alewell, C.; Meusburger, K.; Modugno, S.; Schütt, B.; Ferro, V.; Bagarello, V. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications* **2017**, *8* (1), 2013.

Barkey, R. A.; Nursaputra, M. The detection of forest health level as an effort to protect the main ecosystem in terms of watershed management in the Maros Watershed, South Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **2019**, *270* (1), 012006.

Bockstaller, C.; Girardin, P. How to validate environmental indicators. *Agricultural Systems* **2003**, *76*, 639–653.

Costanza, R.; de Groot, R.; Braat, L.; Kubiszewski, I.; Fioramonti, L.; Sutton, P.; Farber, S.; Grasso, M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services* **2017**, *28*, 1–16.

Díaz, S.; Settele, J.; Brondízio, E. S.; Ngo, H. T.; Guèze, M.; Agard, J.; Arneth, A.; Balvanera, P.; et al. *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*; Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES): Bonn, Germany, 2019.

Farrokhzade, N.; Ravanbakhsh, H.; Moshki, A.; Mollashahi, M. Natural regeneration establishment and diversity in different 50-year-old plantation types in Sorkhe-Hesar Forest Park. *Forest Research and Development* **2017**, *4* (1), 43–57. (In Persian)

Goleij, A.; Hasanzad Navroodi, I.; Mohammadi Limaei, S. Determining the criteria and indicators for sustainable forest management (Case study: Nav-e Asalem, Guilan Province). *Iranian Journal of Forest & Poplar Research* **2016**, *24* (1), 167–187. (In Persian)

Hazbavi, Z.; Sadeghi, S. H. R.; Gholamalifard, M. Land cover-based watershed health assessment. *AGROFOR International Journal* **2018**, *3*, 47–55.

Islam, R.; Siwar, C.; Ismail, S. M.; Chamhuri, N. H. Criteria and indicators for sustainable forest management in Malaysia. *American Journal of Environmental Sciences* **2010**, *6* (3), 212–218.

Jahdi, R.; Hazbavi, Z. Evaluation of watershed-scale forest ecosystem health using remote sensing and the Forest Health Monitoring (FHM) method. *Journal of Environmental Science Studies* **2024**, *8* (4), 7612–7627. (In Persian)

Khairandish, H.; Sadeghipour, A.; Mohammadi Kangarani, H. Comparison of HELP and forest, rangeland and watershed management methods in watershed sustainability assessment: A case study of the Bakhtegan watershed, Fars Province. *Desert Ecosystem Engineering Journal* **2020**, *9* (28), 103–117. (In Persian)

Kooch, Y.; Mohmedi Kartalaei, Z.; Amiri, M.; Zarafshar, M.; Shabani, S.; Mohammady, M. The effect of forest degradation on soil texture, sediment, and biological fertility indicators in semi-arid mountain ecosystems. *Forest Research and Development* **2025**, *11* (1), 87–108. (In Persian)

Moharamnejad, N.; Mafi, A. A. A study on the strengths, weaknesses, opportunities, and threats of implementing forest principles in northern Iran's forests (Rio to Johannesburg). *Journal of Environmental Science and Technology* **2009**, *11* (4), 149–172. (In Persian)

Nave, L. E.; DeLyser, K.; Domke, G. M.; Holub, S. M.; Janowiak, M. K.; Keller, A. B.; Peters, M. P.; Solarik, K. A.; Walters, B. F.; Swanston, C. W. Land use change and forest management effects on soil carbon stocks in the northeastern United States. *Carbon Balance and Management* **2024**, *19* (1), 5.

Navroodi, I. Effects of livestock exclusion on forest tree regeneration: A case study of Ramsar District 1, Iran. *Journal of Forest Science* **2015**, *61* (1), 1–6.

Nelson, D. R.; Adger, W. N.; Brown, K. Adaptation to environmental change: Contributions of a resilience framework. *Annual Review of Environment and Resources* **2007**, *32* (1), 395–419.

Niknam, A.; Sarli, R.; Taherizadeh, M.; Attarroshan, S.; Pourmansouri, F. REDD implementation for greenhouse gas reduction and climate change mitigation in Hyrcanian forests: A case study of the Kojoor Watershed, northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* **2024**, *196* (5), 474.

Pham, H. C.; Alila, Y. Science of forests and floods: The quantum leap forward needed, literally and metaphorically. *Science of the Total Environment* **2024**, *912*, 169646.

Pourasghar Sangachin, F.; Salehi, A.; Masnavi, M. R. Comparative analytical evaluation of sustainable development assessment methods. *Environmental Research* **2010**, *1*, 67–82. (In Persian)

Raizada, A.; Dogra, P.; Dhyani, B. L. Assessment of a multi-objective decision support system-generated land use plan on forest fodder dependency in a Himalayan watershed. *Environmental Modelling & Software* **2008**, *23*, 1171–1181.

Rehman, A.; Ma, H.; Ahmad, M.; Irfan, M.; Traore, O.; Chandio, A. A. Towards environmental sustainability: Devolving the influence of carbon dioxide emissions to population growth, climate change, forestry, livestock, and crop production in Pakistan. *Ecological Indicators* **2021**, *125*, 107460.

Sadeghi, H.; Saadeddin, E.; Asadi-Nelivan, E.; Hazbavi, Z.; Zare-Karizi, A.; Moieri, M. *Watershed Health and Sustainability: Concepts, Approaches, and Evaluation Methods*; Tarbiat Modares University Press: Tehran, Iran, 2020. (In Persian)

Saraskanrood, S. A.; Khodabandelo, B.; Naseri, A.; Moradi, A. Extracting land-use maps based on a comparison between pixel-based and object-oriented classification methods: A case study of Zanjan City. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data* **2019**, *28* (110), 195–208. (In Persian)

Shami, J.; Banj Shafiei, A.; Hoseinzadeh, O. Recognition of effective institutional criteria for sustainable management of Zagros forests, West Azerbaijan Province, Iran. *Forest Research and Development* **2018**, *4* (2), 161–177.

Shekofti, S.; Heshmatpour, A.; Mohammadi Ostadkalaye, E.; Asadi-Nelivan, E. Ecosystem sustainability assessment using an ecosystem approach in the Ziarat Watershed. In *Proceedings of the First National Conference on Civil Defense in Agriculture, Natural Resources, and Environment for Sustainable Development*; Tehran, Iran, 2015. (In Persian)

Teimoori, A.; Seyedian, S. M.; Rouhani, H.; Ahmadi, R. Ecosystem sustainability assessment using IUCN criteria: A case study of the Dorook Basin. *Geography and Environmental Sustainability* **2018**, *7* (4), 81–93. (In Persian)

Triviño, M.; Juutinen, A.; Mazziotta, A.; Miettinen, K.; Podkopaev, D.; Reunanen, P.; Mönkkönen, M. Managing a boreal forest landscape for providing timber, storing and sequestering carbon. *Ecosystem Services* **2015**, *14*, 179–189.

Tillaguango, B.; Alvarado, R.; Ahmad, M.; Murshed, M.; Işık, C. Applying the forest load capacity factor to assess environmental sustainability in the Global South. *Forest Policy and Economics* **2025**, *180*, 103631.

Walmsley, J.; Carden, M.; Revenga, C.; Sagona, F.; Smith, M. Indicators of sustainable development for catchment management in South Africa: Review of indicators from around the world. *Water SA* **2001**, *27*, 539–550.

Yuan, C.; Zhang, Y. M.; Liu, Z. X. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Canadian Journal of Forest Research* **2015**, *45* (7), 783–792.