Integrated Watershed Management, Autumn, 2026, 6(3), 50-72 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2025.2067686.1244 **Online ISSN: 2783-4581**

Hydrological Ecosystem Services Modeling and Their Linkage to Landscape Metrics and Change Processes in the Talar Watershed

Mohsen Zabihi[1*], Hamidreza Moradi[1], Abdulvahed Khaledi Darvishan[1], Mehdi Gholamalifard[2]

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran
2. Department of the Environment, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

[*]**Corresponding author**: mohsen_zabihi69@yahoo.com

(Received: 03 August 2025 Revised: 11 October 2025 Accepted: 15 November 2025)

Extended Abstract

Introduction: Hydrological ecosystem services (HES), such as water yield and sediment retention, are fundamental to ecological balance and sustainable resource management. However, these critical functions are increasingly disrupted by rapid land use and landscape changes driven by human activities. These dynamics are effectively captured by landscape metrics, which quantify the spatial configuration, composition, and structure of land cover patches. This study aims to model and predict key HES in the Talar watershed, Mazandaran Province, Iran, and to quantitatively examine their relationships with landscape metrics and the processes of landscape change.

Materials and methods: The research employed a multi-step methodological framework. First, land use/land cover (LULC) maps for 1989, 2000, and 2014 were generated using the Support Vector Machine (SVM) classifier. A projected LULC map for 2030 was then created using a Markov chain integrated with the Land Change Modeler (LCM). A suite of landscape metrics—including Number of Patches (NP), Patch Density (PD), Largest Patch Index (LPI), and others—was calculated using FRAGSTATS software. Concurrently, specific landscape change processes (e.g., deformation, shift, creation) were quantified for each LULC class using TerrSet. The InVEST model was applied to simulate and project the HES of water yield and sediment retention for all study years, including the 2030 scenario based on current change trends. Finally, the relationships between the landscape metrics**,** change processes, and ecosystem service delivery were analyzed using Pearson correlation coefficients in SPSS.

Results and Discussion: The Land Change Modeler demonstrated excellent performance in predicting LULC changes (Klocation = 0.969, Kno = 0.964). Projections for 2014–2030 indicate significant shifts: a decline in forest (–14.86 km²) and rangeland (–19.85 km²) areas, contrasted with an expansion of rainfed agriculture (+21.01 km²) and residential areas (+13.60 km²). Pearson correlation analysis revealed that most spatial pattern indices, except for patch density and edge density, had significant correlations with both water yield and sediment retention. The Perimeter-Area Ratio (SHAPE_AM or a similar PA metric) exhibited the strongest correlation (0.699 for water yield; 0.782 for sediment retention). An inverse relationship was found between the Largest Patch Index (LPI) and these services, suggesting that the dominance of large, consolidated patches can negatively impact hydrological functions. Furthermore, the Landscape Shape Index (LSI) for forest and rangeland patches decreased over the 25-year period, a trend associated with reduced water yield and sediment retention. Analysis of change processes showed that the expansion of rainfed agriculture increased water yield but decreased sediment retention, while the decline in forest cover negatively impacted both services, highlighting the adverse consequences of deforestation.

Conclusion: The findings indicate that ongoing land use changes and landscape fragmentation are likely to degrade hydrological ecosystem services and reduce the ecological resilience of the Talar watershed. This study confirms the significant influence of landscape structure on water yield and sediment retention, with metrics like the Perimeter-Area Ratio serving as strong indicators. The negative correlation with the Largest Patch Index and the detrimental impact of forest loss underscore the need for integrated land use planning and targeted conservation strategies in northern Iran. The combined methodology of spatial modeling, landscape metric analysis, and change process assessment provides a robust and practical framework for evaluating and predicting ecosystem services at the watershed scale, offering valuable insights for sustainable environmental management.

Keywords: Change scenario, Environmental sustainability, InVEST model, Land change modeler, Spatial analysis

Citation: Zabihi, M., Moradi, H., Khaledi Darvishan, A. & Gholamalifard, M. (2026). Hydrological Ecosystem Services Modeling and Their Linkage to Landscape Metrics and Change Processes in the Talar Watershed. *Integrated Watershed Management*, 6(3), 50-72. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2067686.1244

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵، صفحات (۷۲-۵۰) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2025.2067686.1244

مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن‌ها با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار

محسن ذبیحی[1*]، حمیدرضا مرادی[1]، عبدالواحد خالدی درویشان[1]، مهدی غلامعلی‌فرد[2]

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

***نویسنده مسئول:** mohsen_zabihi69@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۷/۱۹ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۸/۲۴)

چکیده مبسوط

مقدمه: خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان، ازجمله تولید آب و نگهداشت رسوب، برای حفظ تعادل بوم‌شناختی و پایداری منابع طبیعی ضروری هستند. با این حال، تغییرات سریع کاربری اراضی و الگوهای سیمای سرزمین ناشی از فعالیت‌های انسانی، این کارکردها را به‌طور فزاینده‌ای مختل کرده‌اند. پویایی کاربری اراضی از طریق سنجه‌های سیمای سرزمین که ترکیب، ساختار و آرایش لکه‌های کاربری اراضی را توصیف می‌کنند، بازتاب می‌یابند. شاخص‌های پیکربندی فضایی ابزار مؤثری برای کمی‌سازی و تحلیل این الگوهای فضایی هستند. در همین راستا، این پژوهش با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و بررسی ارتباط آن‌ها با سنجه‌های و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار در استان مازندران انجام شده است.

مواد و روش‌ها: به‌منظور نیل به اهداف پژوهش، نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ با روش ماشین بردار پشتیبان و نقشه پیش‌بینی شده در سال ۱۴۰۹ با روش زنجیره مارکوف و مدلساز تغییر سرزمین در منطقه مطالعاتی تهیه شد. در ادامه، مجموعه‌ای از شاخص‌های ساختار سیمای سرزمین شامل تعداد لکه، تراکم لکه، شاخص بزرگترین لکه و غیره در محیط نرم‌افزار Fragstats و همچنین فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین شامل تغییر شکل، جابه‌جایی، ایجاد و غیره در هر یک از طبقات کاربری اراضی با نرم‌افزار TerrSet استخراج شد. خدمات هیدورلوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب نیز در سال‌های مطالعاتی و شرایط آتی با توجه به سناریوی تداوم روند فعلی تغییر کاربری اراضی در آبخیز تالار با بهره‌گیری از مدل InVEST مدل‌سازی و پیش‌بینی شد. در مرحله بعد، ارتباط سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با عملکرد خدمات مورد اشاره در محیط نرم‌افزار SPSS با استفاده از ضریب همبستگی Pearson مورد سنجش قرار گرفت.

نتایج و بحث: یافته‌های پژوهش حاکی از عملکرد بسیار خوب مدل مدلساز تغییر سرزمین در پیش‌بینی کاربری اراضی آبخیز تالار است ($K_{location}$=0.969 و K_{no}=0.964). نتایج نشان داد که از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۹، مقدار تغییر مساحت کاربرهای کشاورزی دیم، جنگل، کشاورزی آبی، باغ، مرتع و منطقه مسکونی به‌ترتیب ۲۱/۰۱، ۱۴/۸۶-، ۵/۶۶-، ۵/۷۶، ۱۹/۸۵- و ۱۳/۶۰ کیلومترمربع خواهد بود. علاه بر این، در بازه زمانی مذکور، مراتع و جنگل‌ها به‌ترتیب از ۱۱۰۰/۵ به ۱۰۸۰/۶ کیلومترمربع و از ۵۴۶/۱ به ۵۳۱/۲۴ کیلومترمربع کاهش می‌یابند، در حالی که کشاورزی دیم از ۴۵/۷۹ به ۶۶/۸ کیلومترمربع و مناطق مسکونی از ۲۷/۶۲ به ۴۱/۲۲ کیلومترمربع افزایش خواهند یافت. نتایج تحلیل همبستگی Pearson نشان داد که به‌جز تراکم لکه و تراکم لبه، سایر شاخص‌های الگوی مکانی با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب دارای ارتباط معنی‌دار بودند. در این میان، سنجه مساحت لکه بیشترین همبستگی را با هر دو خدمت داشته و ضرایب همبستگی به‌ترتیب برابر با ۰/۶۹۹ و ۰/۷۸۲ به‌دست آمد. ارتباط معکوس سنجه شاخص بزرگ‌ترین لکه با تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار به‌دست آمد که نشان‌دهنده تأثیر منفی افزایش یکپارچگی لکه‌های بزرگ کاربری بر ظرفیت بوم‌سازگان در ارائه این خدمات هیدرولوژیک است. شاخص شکل سیما در کاربری‌های جنگل و مرتع طی دوره ۲۵ ساله کاهش و در سایر کاربری‌ها افزایش یافته است. کاهش این شاخص با کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار همراه بوده است. یافته‌های حاصل از پژوهش در خصوص فرآیند تغییر ایجاد در کاربری اراضی کشاورزی دیم منجر به افزایش تولید آب و کاهش نگهداشت رسوب شده است. کاربری اراضی جنگل نیز طی دوره مطالعاتی با فرآیند تغییر تنزل منجر به کاهش خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار شده است. به‌بیان دیگر، کاهش پوشش گیاهی ناشی از تخریب جنگل منجر به کاهش نگهداشت رسوب در آبخیز تالار طی دوره پژوهش شده است. کاهش تولید آب نیز در کاربری جنگل به‌سبب کاهش مساحت ۷۱/۰۲ کیلومترمربعی آن از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ می‌باشد.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد تداوم تغییرات کاربری اراضی و خردشدگی سیمای سرزمین می‌تواند موجب تضعیف خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و کاهش تاب‌آوری بوم‌شناختی در آبخیز تالار شود. در این راستا، پژوهش حاضر نشان داد که تغییرات کاربری اراضی و ساختار سیمای سرزمین در آبخیز تالار تاثیر قابل توجهی بر خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب دارند. شاخص‌های سیمای سرزمین، به‌ویژه مساحت لکه، ارتباط معنی‌داری با این خدمات بوم‌سازگان داشتند و افزایش یکپارچگی لکه‌های بزرگ، تأثیر منفی بر عملکرد بوم‌سازگان داشت. کاهش پوشش جنگلی نیز به کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب منجر شده است. این یافته‌ها بر اهمیت برنامه‌ریزی یکپارچه کاربری اراضی و حفاظت از منابع در شمال ایران تأکید دارد. به‌کارگیری رویکردی تلفیقی بر پایه مدل‌سازی مکانی، سنجه‌های سیمای سرزمین و تحلیل فرآیندهای تغییر، چارچوبی کاربردی برای ارزیابی و پیش‌بینی وضعیت خدمات بوم‌سازگان در مقیاس آبخیز فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پایداری محیط زیستی، تحلیل مکانی، سناریوی تغییر، مدلسازی تغییر سرزمین، مدل InVEST

استناد: ذبیحی، م.، مرادی، ح.ر.، خالدی‌درویشان، ع.و.، و غلامعلی‌فرد، م. (۱۴۰۵). مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن‌ها با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در حوزه آبخیز تالار. *مدیریت جامع حوزه های آبخیز*، ۶(۳)، ۷۲-۵۰. https://doi.org/10.22034/iwm.2025.2067686.1244

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

بوم‌سازگان‌ها از طریق ارائه خدمات گوناگون، نقش مهمی در تأمین نیازهای انسانی ایفا می‌کنند. در این میان، خدمات هیدرولوژیک نظیر تولید آب و نگهداشت رسوب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خدمات تأمین‌شده توسط بوم‌سازگان‌های آبخیز، نقش کلیدی در پایداری منابع آب و حفاظت خاک ایفا می‌کنند (Amini Parsa *et al.*, 2024; Marchioni *et al.*, 2025). با این حال، عملکرد این خدمات به‌شدت تحت تأثیر تغییرات محیطی و به‌ویژه تغییرات کاربری اراضی و اقلیم قرار دارد (Fu *et al.*, 2017). از میان این دو عامل، تغییر کاربری اراضی به‌واسطه‌ی وابستگی مستقیم به فعالیت‌های انسانی، تأثیر ملموس‌تر و سریع‌تری بر ساختار بوم‌شناسی و فرآیندهای زیست‌محیطی دارد (Stephens *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2024). الگوی کاربری اراضی و تغییرات آن، از طریق سیمای سرزمین[1] بازتاب می‌یابد؛ مفهومی که ترکیب، ساختار و پویایی قطعات یا لکه‌های کاربری اراضی را در بر می‌گیرد (Seto & Fragkias, 2005). سنجه‌های سیمای سرزمین[2] در سه سطح لکه، طبقه و سیما، ابزاری برای کمی‌سازی و تحلیل الگوهای فضایی کاربری اراضی فراهم می‌سازند (Sertel *et al.*, 2018). سنجه‌های لکه ویژگی هر لکه، سنجه‌های طبقه الگوی هر نوع کاربری، و سنجه‌های سیما کل ساختار چشم‌انداز را توصیف می‌کنند. همچنین، تحلیل فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین[3]، امکان بررسی روندها و سازوکارهای دگرگونی سیمای سرزمین در طول زمان را فراهم می‌کند (Li *et al.*, 2015; Qiu *et al.*, 2025). این سنجه‌ها و فرآیندها، با ارائه تصویر واضح‌تری از تغییرات ساختاری، می‌توانند بینش عمیق‌تری نسبت به تأثیرات انسانی بر کاربری اراضی و پیامدهای آن بر عملکرد بوم‌سازگان فراهم کنند (Lausch *et al.*, 2015).

در سال‌های اخیر، پیش‌بینی و مدل‌سازی کمی خدمات بوم‌سازگان، به‌ویژه خدمات هیدرولوژیک مانند تولید آب و نگهداشت رسوب، به یکی از محورهای اصلی در مطالعات مدیریت محیط زیست تبدیل شده است (Sahle *et al.*, 2019). در این راستا، بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی مانند مدل‌سازی تغییر سرزمین (LCM)[4] در کنار مدل‌های ارزیابی خدمات بوم‌سازگان همچون InVEST[5] امکان تحلیل جامع‌تری از پیامدهای زیست‌محیطی فعالیت‌های انسانی فراهم می‌سازد (Liang *et al.*, 2024). مدل LCM با شبیه‌سازی الگوهای مکانی-زمانی آینده، روندهای تغییر کاربری اراضی را پیش‌بینی کرده و نقشه‌های آینده‌نگر در اختیار قرار می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان ورودی مدل InVEST برای ارزیابی عملکرد آتی خدمات هیدرولوژیک استفاده شود. مدل InVEST با ورودی‌های نسبتاً محدود و انعطاف‌پذیری بالا، قادر است تغییرات مکانی-زمانی خدمات آبخیز را شبیه‌سازی کند و در نتیجه، بستر مناسبی برای تحلیل پیامدهای ناشی از تحولات سرزمینی و ارزیابی اثرات سناریوهای مدیریتی فراهم سازد (Liu *et al.*, 2023). این رویکرد تلفیقی، نه‌تنها در شناسایی مناطق بحرانی و تحلیل آثار زیست‌محیطی توسعه مؤثر است، بلکه زمینه‌ساز تدوین سیاست‌های کارآمد برای ارتقاء تاب‌آوری محیط‌زیست در برابر تغییرات پیش‌رو نیز به‌شمار می‌آید.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات مختلفی به بررسی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان و ارتباط آن با مؤلفه‌های کاربری اراضی پرداخته‌اند. در این راستا، مطالعه Salmoral و همکاران (۲۰۱۵) در آبخیز Turia اسپانیا با استفاده از مدل

[1] Landscape
[2] Landscape Metrics
[3] Landscape Change Processes
[4] Land Change Modeler, LCM
[5] Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST

SWAT نشان داد که تغییرات کاربری اراضی مؤثرترین عامل در بیلان آبی حوزه است و افزایش دما موجب کاهش جریان رودخانه شده است. در کشور رومانی، Bogdan و همکاران (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از مدل InVEST، تغییرات نگهداشت رسوب را تحت سناریوهای مختلف کاربری اراضی بررسی کرده و دریافتند که سناریوی توسعه و حفاظت به‌ترتیب بیشترین کاهش و افزایش را در نگهداشت رسوب به همراه دارد. Cabral و همکاران (۲۰۱۶) در منطقه شهری Bordeaux فرانسه اثر تغییرات کاربری اراضی بر خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب را بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶ با مدل InVEST تحلیل کرده و نشان دادند که تولید آب روند افزایشی و حفاظت خاک روند کاهشی داشته است. Lang و همکاران (۲۰۱۷) اثر سناریوهای توسعه سریع شهری و حفاظت بوم‌شناسی را بر نگهداشت رسوب برای دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۰ بررسی کرده و دریافتند که توسعه شهری منجر به کاهش شدید این خدمت و سناریوی حفاظت موجب بهبود آن می‌شود. Tavangar و همکاران (۲۰۱۹) در آبخیز نکارود استان مازندران با تلفیق مدل‌های CA-Markov و SWAT نشان دادند که در صورت ادامه روند جنگل‌زدایی، جریان رودخانه در آینده افزایش خواهد یافت. Chen و همکاران (۲۰۱۹) ارتباط مکانی تغییرات کاربری اراضی با شدت خدمات بوم‌سازگان از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ را بررسی و رابطه‌ای معکوس و معنی‌دار بین این دو متغیر گزارش دادند. Li و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل InVEST نشان دادند که ترکیب کاربری‌های اراضی تأثیر بیش‌تری بر تولید آب و حفاظت خاک نسبت به پیکربندی فضایی دارد و رابطه‌ای غیرخطی بین ناهمگنی سیمای سرزمین و خدمات هیدرولوژیک وجود دارد. Jahanishakib و همکاران (۲۰۲۱) در آبخیز قره‌سو با استفاده از نظریه‌های Graph و Circuit نشان دادند که توسعه‌های فضایی غیربهینه باعث کاهش اتصال هیدرولوژیکی خواهد شد. در پژوهش Guo و همکاران (۲۰۲۲) در نواحی بالادست و میان‌دست رودخانه زرد در کشور چین، تأثیر هم‌زمان عوامل اقلیمی، انسانی و الگوی سیمای سرزمین بر ارزش خدمات بوم‌سازگان بررسی شد. نتایج نشان داد که اثر این عوامل تابع آستانه است و عبور از حد مشخص آن آستانه باعث کاهش چشمگیر ارزش خدمات بوم‌سازگان می‌شود. Liu و همکاران (۲۰۲۴) در کشور چین با بهره‌گیری از هوش مصنوعی و شبیه‌سازی‌های چندمدلی نشان دادند که مناطق کلیدی بوم‌شناسی در تقویت خدمات بوم‌سازگان نقش کلیدی دارند و تغییرات گسترده کاربری اراضی تحت تأثیر اقلیم و مدیریت ناصحیح سرزمین، عامل اصلی تضعیف این خدمات است. Loc و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات خدمات بوم‌سازگان ازجمله کاهش سیلاب، تأمین آب و کنترل فرسایش را در حوضه Pasak تایلند با مدل LUCI[1] در دو بازه زمانی و دو سناریو بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کاهش پوشش جنگلی و گسترش اراضی کشاورزی و شهری منجر به افت چشمگیر در خدمات تنظیمی شده است. Tang و همکاران (۲۰۲۵) با بررسی روابط زمانی-مکانی میان الگوی سیمای سرزمین و نگهداشت آب طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نشان دادند که کاهش پوشش جنگل و مراتع پربازده موجب افت ظرفیت حفظ آب شده و شاخص‌هایی مانند تراکم لکه و تنوع شانون رابطه‌ای معنی‌دار با این خدمت بوم‌سازگان دارند.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و شرایط اقلیمی هستند، به‌طوری که افزایش فعالیت‌های توسعه‌ای و کاهش پوشش گیاهی، به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع، ظرفیت تولید آب و نگهداشت رسوب را کاهش می‌دهد. براساس نتایج مطالعات صورت گرفته، نقش کلیدی سیمای سرزمین در تعیین کیفیت

[1] Land utilization capability and indicator, LUCI

و کمیت خدمات هیدرولوژیک غیرقابل انکار است و رابطه غیرخطی و پیچیده‌ای میان ساختار و ترکیب کاربری اراضی با عملکرد این خدمات گزارش شده است. با این حال، بررسی‌های صورت‌گرفته غالباً به تحلیل‌های جداگانه یا دوره‌ای محدود شده‌اند و کمتر مطالعه‌ای به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه به مدل‌سازی خدمات هیدرولوژیک، شاخص‌های سیمای سرزمین و فرآیندهای تغییرات آن پرداخته است. علاوه بر این، ارتباط دقیق و چگونگی تأثیر تغییرات مکانی و زمانی سیمای سرزمین بر خدمات بوم‌سازگان هیدرولوژیک در مقیاس حوزه آبخیز نیازمند مطالعه‌ای جامع است. درک علّی بهتر از ارتباط فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آینده و تلفیق مدل‌های LCM و InVEST با تحلیل کمی فرآیندهای تغییر برای ارائه چارچوبی پیش‌بین و علّی در مدیریت حوزه‌های آبخیز موثر است. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب در سناریوی تداوم روند فعلی تغییر کاربری اراضی با کمک مدل‌های LCM و InVEST برنامه‌ریزی شده است. تحلیل ارتباط میان ساختار فضایی سیمای سرزمین از طریق سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با عملکرد خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان در حوزه آبخیز تالار در استان مازندران از دیگر اهداف پژوهش حاضر است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند در بهینه‌سازی سیاست‌های مدیریت سرزمین، ارتقاء راهبردهای حفاظت آب و خاک و پیش‌بینی پیامدهای بوم‌شناسی ناشی از تغییرات انسانی مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخیز تالار که در حد واسط ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۵۳ درجه و ۲۳ دقیقه ۳۴ ثانیه طول شرقی ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱ ثانیه عرض شمالی واقع شده است، یکی از زیرحوضه‌های مهم دریای خزر در استان مازندران، محدوده‌ای کوهستانی تا جلگه‌ای را از فیروزکوه تا شیرگاه در بر می‌گیرد. رودخانه تالار از ارتفاعات البرز سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از قائم‌شهر به دریای خزر می‌ریزد و نقش اساسی در تأمین آب و تنظیم جریان‌های سطحی در منطقه دارد. این حوضه با وسعتی حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع، دارای تنوع ارتفاعی از ۲۱۶ تا بیش از ۳۹۸۳ متر و میانگین بارش سالانه حدود ۵۰۰ میلی‌متر است (Mohammadi *et al.*, 2017). چنین ویژگی‌هایی موجب بروز فرآیندهای هیدرولوژیک پویا مانند نوسانات جریان آب، فرسایش خاک و تولید رسوب شده‌اند. پوشش اراضی آبخیز شامل جنگل‌های هیرکانی، مراتع، کشاورزی و سکونتگاه‌هاست که در سه دهه اخیر دستخوش تغییرات شدید شده‌اند (Rahmannejad *et al.*, 2024). این تغییرات خدمات بوم‌سازگان، ازجمله تولید آب، نگهداشت رسوب و کیفیت آب، را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده‌اند، در حالی که رودخانه تالار علاوه بر تأمین آب، نقش مهمی در تنظیم رسوبات ایفا می‌کند. وجود داده‌های هیدرومتری در ایستگاه‌هایی مانند شیرگاه، امکان تحلیل دقیق روندهای گذشته و مدل‌سازی آینده مؤلفه‌های هیدرولوژیک را فراهم کرده است. به‌دلیل تنوع طبیعی و تغییرات شدید انسانی، آبخیز تالار بستر مناسبی برای تحلیل ارتباط میان تغییر سیمای سرزمین و خدمات بوم‌سازگان به‌شمار می‌رود.

روش پژوهش

به‌منظور پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب، دوره آماری ۲۵ ساله پژوهش از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ مدنظر قرار گرفت. در ادامه، تهیه و پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی، محاسبه و استخراج سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین، مدل‌سازی و پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک مورد مطالعه و تعیین ارتباط خدمات پیش‌گفته با سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در آبخیز تالار شرح داده خواهد شد.

- تهیه نقشه شرایط گذشته، فعلی و آتی کاربری اراضی

در این پژوهش، پس از پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat شامل تصحیح اتمسفری با استفاده از روش FLAASH[1] و رادیومتری[2]، نمونه‌های تعلیمی کاربری اراضی با حداقل ۵۰ نمونه برای هر طبقه از طریق پیمایش‌های میدانی و تصاویر رنگی کاذب جمع‌آوری شد. شش طبقه کاربری اراضی اصلی در منطقه شناسایی و با استفاده از طبقه‌بندی نظارت شده مبتنی بر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان[3] و کرنل تابع پایه شعاعی[4] طبقه‌بندی شدند (Eshghizadeh & Mohammadpoor, 2025). صحت طبقه‌بندی با ضریب کاپا و صحت کلی ارزیابی شد (Zabihi *et al.*, 2020). در این پژوهش، سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۹ به‌عنوان دوره واسنجی، ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ به‌عنوان دوره اعتبارسنجی و ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۹ به‌عنوان دوره پیش‌بینی انتخاب شدند. نقشه کاربری سال ۱۳۹۳ از روی داده‌های سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۹ پیش‌بینی و اعتبارسنجی شد و سپس پیش‌بینی کاربری سال ۱۴۰۹ با مدل LCM در نرم‌افزار TerrSet انجام گرفت. متغیرهای مؤثر بر تغییر کاربری شامل ارتفاع، فاصله‌ها از کاربری‌های مختلف و احتمال تجربی در این پژوهش مدنظر بوده که از طریق آزمون ضریب همبستگی کرامر[5] به‌عنوان یکی از پیش‌نیازهای لازم برای اجرای مدل LCM تعیین شدند (Shooshtari & Gholamalifard, 2015). در همین راستا، زیرمدل‌های تغییر براساس بیشینه سطح تغییر و روند گذشته تغییرات انتخاب شدند. در ادامه، سناریوی تداوم روند فعلی تغییر در مدل‌سازی توانایی انتقال مبتنی بر شبکه عصبی پرسپترون چندلایه[6] مدنظر قرار گرفت که براساس شاخص‌های خطا و میزان صحت ارزیابی شد. همچنین، پیش‌بینی تغییرات کاربری با روش زنجیره مارکوف انجام و با ضریب کاپا (K_{no} و $K_{location}$) صحت‌سنجی شد (Jafarpour Ghalehteimouri *et al.*, 2022). شاخص K_{no} بیانگر میزان توافق در کمیت یا مقدار هر طبقه است و نشان می‌دهد مساحت پیش‌بینی‌شده برای هر طبقه تا چه اندازه با مقدار واقعی آن هم‌خوانی دارد. در مقابل، شاخص $K_{location}$ نشان‌دهنده میزان توافق در مکان قرارگیری طبقات است و دقت مکانی طبقه‌بندی را ارزیابی می‌کند. جزئیات تهیه نقشه‌های کاربری اراضی در مطالعه Zabihi و همکاران (۲۰۲۰) ارائه شده است.

- محاسبه و استخراج سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین

به‌منظور بررسی پویایی و تغییرات سیمای سرزمین در آبخیز تالار از نرم‌افزار Fragstats و روش همسایگی هشت سلولی و استراتژی بدون نمونه‌برداری استفاده شد (McGarigal *et al.*, 2015). در این راستا، تعداد زیادی از سنجه‌های سیمای سرزمین برای سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹، ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹ در دو مقیاس آبخیز و زیرآبخیز و در دو سطح طبقه و سیما محاسبه شد (Abdolalizadeh *et al.*, 2019). در مرحله بعد، به‌منظور کاهش تعداد سنجه‌های دارای خودهمبستگی در مقیاس آبخیز و سطح سیما از روش OLS[7] و مقدار VIF[8] (Pratt & Chang, 2012) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی مجذور همبستگی[9] در نرم‌افزار SPSS (Alaei *et al.*, 2024) و نهایتاً براساس هدف پژوهش و مطالعات پیشین سنجه‌های تعداد لکه[10]، میانگین

[1] Fast line-of-sight atmospheric analysis of hypercubus, FLAASH
[2] Radiometric calibration
[3] Support vector machine, SVM
[4] Radial basis function, RBF
[5] Cramer
[6] Multilayer perceptron, MLP
[7] Ordinary least squares, OLS
[8] Variance inflation factor, VIF
[9] Hierarchical clustering based on squared correlation
[10] Number of patch, NP

مساحت لکه[1]، تراکم لکه[2]، شاخص بزرگترین لکه[3]، شاخص شکل[4]، تراکم لبه[5]، شاخص شکل سیما[6] و دایره محاط[7] برای بررسی‌ها و تحلیل‌های بیش‌تر مدنظر قرار گرفتند (Naseri & Mostafazadeh, 2023).

جدول ۱- تعاریف فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین
Tabel – Landscape change processes definition

فرآیند	تعریف
تغییر شکل	شکل در حال تغییر است
جابه‌جایی	موقعیت در حال تغییر است
کاهش سطح	تعداد لکه‌ها ثابت، اما مساحت در حال کاهش است
جمع‌شدگی	مساحت و محیط در حال کاهش، اما تعداد لکه‌ها ثابت است
افزایش سطح	تعداد لکه‌ها ثابت، اما مساحت در حال افزایش است
تنزل	تعداد لکه‌ها و مساحت در حال کاهش است
تجمع	تعداد لکه‌ها در حال کاهش، اما مساحت ثابت یا در حال افزایش است
ایجاد	تعداد لکه‌ها و مساحت در حال افزایش است
تفکیک	تعداد لکه‌ها در حال افزایش و مساحت در حال کاهش است
تکه‌تکه شدن	تعداد لکه‌ها در حال افزایش و مساحت به شدت در حال کاهش است

بررسی فرآیندهای تغییر یکی از رویکردهای شناسایی رفتار کاربری اراضی در مطالعات سیمای سرزمین است. فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین شامل تغییر شکل[8]، جابه‌جایی[9]، کاهش سطح[10]، افزایش سطح[11]، جمع‌شدگی[12]، تنزل[13]، تجمع[14]، ایجاد[15]، تفکیک[16] و تکه‌تکه شدن[17] هستند که تعریف هر یک از آن‌ها بر تغییرات سه سنجه تعداد لکه، مساحت لکه و محیط لکه استوار است (Bogaert *et al.*, 2004). در همین راستا، فرآیندهای تغییر طی یک دوره زمانی با استفاده از درخت تصمیم و بررسی دو نقشه کاربری اراضی در زمان‌های t_1 و t_2 و نحوه تغییرات سنجه‌های مدنظر در تعریف فرآیندها و برای کاربری‌های اراضی مختلف تعیین می‌شوند (Anagonou *et al.*, 2023). تعاریف هریک از فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین (Bogaert *et al.*, 2004) در جدول ۱ ارائه شده است.

استخراج فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در آبخیز تالار به‌سبب تهیه و وجود نقشه‌های کاربری اراضی در سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹، ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹ طی دوره‌های زمانی ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۹، ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ و ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۹ و در دو مقیاس مکانی آبخیز و زیرآبخیز با استفاده از نرم‌افزار TerrSet صورت پذیرفت.

- مدلســـازی خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند تولید آب در مدل InVEST، ابتدا نقشه مکانی بارش سالانه در سال‌های مطالعاتی با استفاده از روش گرادیان بارندگی و تابع نمایی تهیه گردید. برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع، رابطه اصلاح شده Hargreaves مطابق با دستورالعمل مدل InVEST به کار گرفته شد (Wei *et al.*, 2021). در این رابطه، تابش خورشیدی به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاه سینوپتیک قراخیل قائمشهر شامل طول و عرض جغرافیایی، دما و رطوبت نسبی محاسبه شد (Allen *et al.*, 1998). دمای متوسط با استفاده از روش گرادیان در آبخیز تالار استخراج و مقادیر حداقل و حداکثر دما از ایستگاه سنگده که در ارتفاع متوسط آبخیز واقع شده است، استفاده شد.

پارامترهای دیگر مدل مانند عمق لایه محدودکننده ریشه بر اساس مطالعات پیشین انجام شده در منطقه

[1] Patch area_Area weighted mean, PA
[2] Patch density, PD
[3] Largest patch index, LPI
[4] Shape index_Area weighted mean, AWMSI
[5] Edge density, ED
[6] Landscape shape index, LSI
[7] Circumscribing circle_Area weighted mean, AWMCC
[8] Deformation
[9] Shift
[10] Perforation
[11] Enlargement
[12] Shrinkage
[13] Attrition
[14] Aggregation
[15] Creation
[16] Dissection
[17] Fragmentation

(DNRWM Mazandaran, 2000) معادل عمق خاک پروفیل‌های نمونه‌برداری شده لحاظ گردید. میزان آب در دسترس گیاه نیز از تفاوت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی خاک براساس داده‌های بافت خاک محاسبه شد (Alizadeh, 2015). عمق ریشه گیاهان غالب هر کاربری اراضی نیز با توجه به پوشش گیاهی غالب و محدودیت عمق خاک تعیین شد. در مواردی که عمق ریشه نسبت به عمق خاک بیشتر بود، عمق خاک به‌عنوان معیار نهایی پذیرفته شد. وضعیت پوشش گیاهی هر کاربری به صورت دو حالته (وجود یا عدم وجود پوشش) تعریف شد، به طوری که تمامی کاربری‌ها به جز مناطق مسکونی، دارای پوشش در نظر گرفته شدند. برای اصلاح تبخیر و تعرق گیاه مرجع به تبخیر و تعرق پتانسیل، ضرایب اختصاصی هر کاربری بر اساس ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه یونجه مطابق با توصیه Sharp و همکاران (۲۰۱۸) اعمال گردید. با توجه به الگوی بارش غالب در منطقه (وقوع بارش در فصل زمستان)، پارامتر فصلی بودن مدل برابر با ۱۰ تعیین شد. مصرف آب در کاربری‌های کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و باغ‌ها با استفاده از نرم‌افزار OptiWAT و براساس کشت غالب هر دوره و در مناطق مسکونی با توجه به آمار جمعیتی شهرستان و سرانه مصرف آب (Hamdi Ahmadabad *et al.*, 2019) برآورد شد. سایر کاربری‌ها به‌دلیل محاسبه مصرف آب آن‌ها از طریق تبخیر و تعرق، مقدار مصرف صفر اختصاص یافت (Sharp *et al.*, 2018).

ماژول نسبت تحویل رسوب مدل InVEST قابلیت شبیه‌سازی الگوی مکانی و زمانی هدررفت خاک و همچنین تخمین سهمی از رسوب انتقال‌یافته از واحدهای مختلف سطح آبخیز به خروجی را فراهم می‌سازد. محاسبات این مدل مبتنی بر معادله جهانی هدررفت خاک[1] انجام می‌پذیرد که در آن فاکتورهای کلیدی ازجمله فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک (Rostami & Rabbani, 2023)، مدیریت پوشش گیاهی و کاربری اراضی، در کنار شاخص‌های توپوگرافی، تعیین‌کننده میزان فرسایش بالقوه هستند. در راستای اجرای مدل مذکور برای تحلیل و برآورد نگهداشت رسوب در سال‌های مورد پژوهش، عامل فرسایندگی باران بر پایه رابطه‌ای تجربی از بارندگی سالانه و با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی بارش، محاسبه شد. عامل فرسایش‌پذیری خاک نیز بر اساس خصوصیات فیزیکی–شیمیایی لایه‌های سطحی خاک در واحدهای اراضی استخراج و از رابطه Wischmeier و Smith استفاده شد (Qiao *et al.*, 2024). با توجه به پایداری نسبی ویژگی‌های خاک در دوره کوتاه‌مدت، این عامل در سال‌های مورد مطالعه یکسان لحاظ شد. برای استخراج عامل مدیریت زراعی (C)، به‌عنوان نمایه‌ای از میزان حفاظت زیستی خاک، شاخص پوشش گیاهی NDVI از تصاویر ماهواره‌ای پردازش‌شده در نرم‌افزار ENVI 5.3 و پس از انجام تصحیحات رادیومتری و اتمسفری محاسبه شد.

مقدار عامل C برای هر سال با استفاده از میانگین مقادیر فصلی NDVI و رابطه تجربی مربوطه (Khademalrasoul & Amerikhah, 2021) برآورد گردید. عامل مدیریت اراضی (P) نیز متناسب با نوع کاربری و بر اساس مقادیر پیشنهادی در منابع علمی (Khorsand *et al.*, 2016) برای هر کلاس کاربری تعیین شد. پارامترهای توپوگرافی مدل ازجمله مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر از سازمان نقشه‌برداری کشور اخذ شد. آستانه تجمع جریان، که بیانگر تعداد سلول‌های لازم برای تشکیل یک آبراهه است، با تحلیل نقشه آبراهه‌های طبیعی و براساس دستورالعمل مدل InVEST برابر با ۱۰۰ سلول در نظر گرفته شد. در بخش مربوط به شاخص اتصال رسوبی که نقش کلیدی در برآورد نسبت تحویل رسوب دارد، با توجه به عدم انطباق خروجی مدل SedInConnect با

[1] Universal soil loss equation, USLE

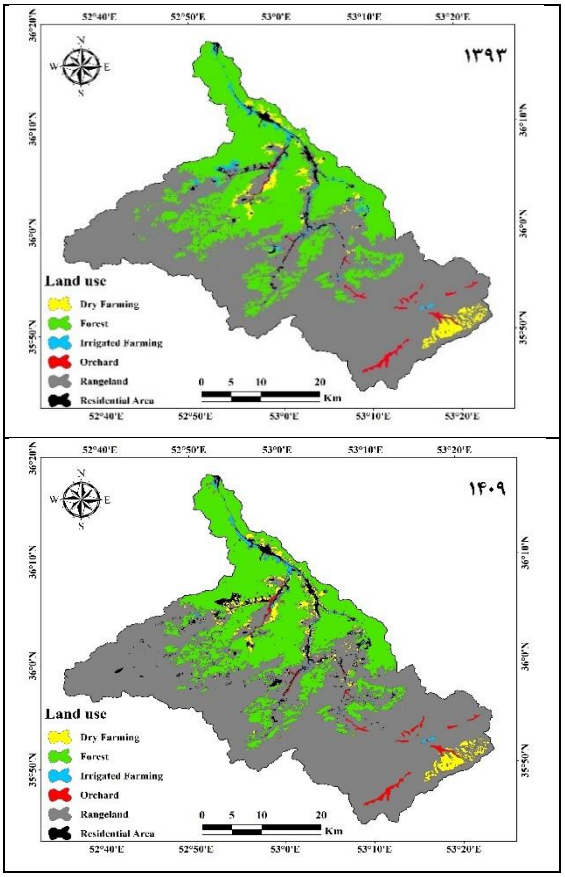
واقعیت‌های منطقه، از مقادیر پیش‌فرض توصیه‌شده مدل مذکور برای شاخص اتصال رسوبی و پارامتر شکل منحنی به‌ترتیب برابر با ۰/۵ و ۲ استفاده شد. در نهایت در این تحقیق، حداکثر مقدار نسبت تحویل رسوب با توجه به اقلیم و الگوی کاربری منطقه برابر با ۰/۸ منظور گردید.

- تعیین ارتباط سنجه‌ها و فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان

به‌منظور تعیین ارتباط سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز از آزمون همبستگی پیرسون (Zhang *et al.*, 2019) در هر یک از سال‌های مورد بررسی به‌سبب وجود پیش‌نیازهای لازم آزمون یادشده استفاده شد. در راستای تعیین میزان همبستگی پیرسون بین سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز، از مقدار سنجه‌های موردنظر در زیرآبخیزهای مختلف و در سال‌های مطالعاتی با مقادیر تولید آب و نگهداشت رسوب در زیرآبخیزها و سال‌های مطالعاتی مربوطه در محیط نرم‌افزار SPSS استفاده شد. در ادامه و با هدف تعیین ارتباط بین فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک مورد پژوهش، مقایسه تغییرات تولید آب و نگهداشت رسوب در انواع کاربری‌های اراضی طی سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ بررسی و ارتباط آن با فرآیند تغییر سیمای سرزمین به‌وقوع پیوسته در آن کاربری تعیین شد.

نتایج

نتایج تهیه نقشه کاربری اراضی در سال ۱۳۹۳ و نیز پیش‌بینی سال ۱۴۰۹ با استفاده از مدل LCM در آبخیز تالار در شکل ۱ ارائه شده است. براساس نتایج، عملکرد بسیار خوب مدل مورد استفاده در پیش‌بینی تغییرات کاربری با مقادیر K_{no} و $K_{location}$ به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶۴ و ۰/۹۶۹ تأیید شد. مقدار ضریب کاپا برای نقشه تهیه شده سال ۱۳۹۳ نیز برابر با ۰/۸۲ محاسبه شد. سطح تحت پوشش انواع کاربری‌های اراضی در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹ در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی آبخیز تالار در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۴۰۹

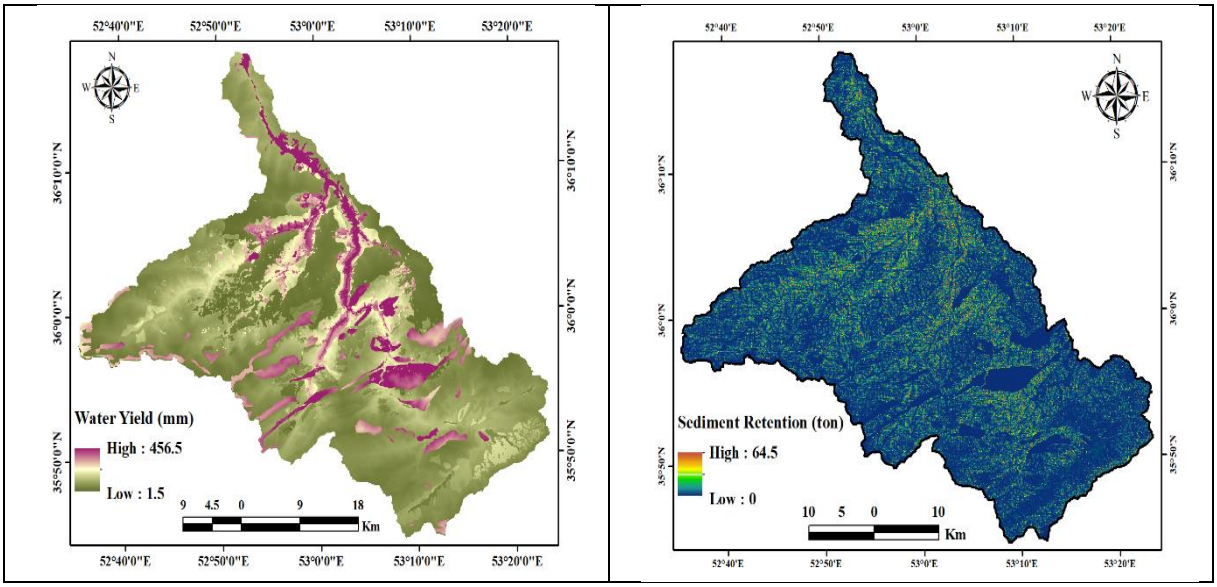
Figure 1– Land use maps of the Talar watershed in 2014 and 2030

جدول ۲- مساحت کاربری‌های اراضی آبخیز تالار در شرایط فعلی و آتی

Table 2- Land use areas in the talar watershed under current and future conditions

کاربری اراضی	2014		2030	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد
کشاورزی دیم	45.79	2.60	81.66	3.79
جنگل	546.10	30.96	523.23	30.11
کشاورزی آبی	26.90	1.52	21.24	1.20
باغ	17.18	0.97	22.93	1.30
مرتع	1100.5	62.38	1080.6	61.26
منطقه مسکونی	27.63	1.57	41.23	2.34

نتایج پیش‌بینی تولید آب و نگهداشت رسوب به‌عنوان خدمات هیدرلوژیک بوم‌سازگان در آبخیز تالار در شکل ۲ نشان داده شده است. یافته‌های حاصل از محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح سیما در مقیاس‌های آبخیز و زیرآبخیز در جدول ۳ ارائه شده است. فرآیندهای تغییر به وقوع پیوسته در انواع کاربری‌های اراضی طی دوره‌های مطالعاتی در مقیاس آبخیز و زیرآبخیز تالار در جدول ۴ آمده است. نتایج به‌دست آمده از بررسی همبستگی سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز در منطقه مورد پژوهش نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۲- نقشه خدمات بوم‌سازگان تولید آب (چپ) و نگهداشت رسوب (راست) در آبخیز تالار برای سال ۱۴۰۹

Figure 2- Map of water yield (left) and sediment retention (right) ecosystem services in the Talar watershed for 2030

جدول ۳- نتایج محاسبه سنجه‌های سیمای سرزمین در سطح سیما در مقیاس‌های آبخیز و زیرآبخیز

Table 3- Results of landscape metrics calculation at the landscape level across watershed and sub-watershed scales

زیرآبخیز	سال	NP	PD	LPI	ED	LSI	PA	AWMSI	AWMCC
فلورد	1989	82	1.1	86.79	13.9	4.76	5654.4	4.08	0.72
	2000	114	1.52	82.95	18.47	5.75	5173.1	4.3	0.73
	2014	151	2.02	82.96	20.12	6.1	5168	4.33	0.73
	2030	206	2.76	82.81	21.12	6.31	5145.5	4.21	0.73
آریم	1989	78	1.06	71.65	21.25	6.09	4030.4	5.96	0.64
	2000	76	1.03	74.1	21.16	6.07	4235.2	5.89	0.63
	2014	62	0.84	74.84	20.5	5.93	4308.5	5.78	0.63
	2030	133	1.81	74.71	22.42	6.33	4217.9	5.5	0.64
نیزوا	1989	6	0.1	99.11	0.99	1.71	6193.7	1.69	0.45
	2000	9	0.14	99.35	1.48	1.8	6222.6	1.8	0.44
	2014	5	0.08	96.91	2.57	2.02	5923.3	2.01	0.47
	2030	5	0.08	96.9	2.63	2.03	5919.5	2.02	0.47
آسران	1989	36	0.73	77.55	14.44	3.93	3119.7	3.61	0.58

	0.62	5.14	2503.8	5.64	24.13	68.49	1.11	55	2000
	0.68	5.15	1668.5	6.97	31.71	54.69	1.33	66	2014
	0.68	5.06	1586.4	7.86	36.86	53.16	4.99	247	2030
دشت سفید	0.61	3	9396.1	2.96	4.88	94.1	0.09	10	1989
	0.62	3.29	9220.4	3.28	6.1	93.2	0.21	22	2000
	0.63	3.34	8874.6	3.35	6.37	91.4	0.14	15	2014
	0.63	3.37	8834.8	3.55	7.16	91.2	0.61	65	2030
قدمگاه	0.57	1.55	10424.3	1.55	0	100	0.01	1	1989
	0.57	1.55	10424.3	1.55	0	100	0.01	1	2000
	0.57	1.55	10424.3	1.55	0	100	0.01	1	2014
	0.58	1.56	10415.8	1.56	0	100	0.01	1	2030
ورسک	0.63	5.29	5854	5.66	17.32	80.29	0.88	79	1989
	0.62	5.1	6136.2	5.57	16.92	82.35	0.79	71	2000
	0.62	4.66	6295.8	5.04	14.72	83.42	0.57	51	2014
	0.61	4.56	6450.9	5.02	14.66	84.64	0.81	73	2030
اوریم	0.54	3.09	3153.4	3.58	11.41	73.49	0.67	36	1989
	0.55	3.3	3154.8	3.95	13.43	74.15	0.73	39	2000
	0.55	3.18	3184.5	3.84	12.83	74.53	0.73	39	2014
	0.55	3.24	3176.4	3.9	13.13	74.45	0.84	45	2030
پالند	0.77	6.58	7351.9	8.71	19.76	44.92	1.23	250	1989
	0.78	6.53	6636.2	9.55	22.12	40.13	1.29	262	2000
	0.78	6.29	6569.1	9.8	22.83	40.75	1.48	302	2014
	0.76	6.33	6595.9	10.3	24.22	41.84	2.02	411	2030
آلاشت	0.79	7.17	15148.4	9.53	17.75	68.35	1.5	458	1989
	0.75	6.8	16140.5	9.33	17.29	70.74	1.25	381	2000
	0.76	5.98	15903.1	9.19	16.96	71.23	1.21	370	2014
	0.73	5.15	15283.8	9.86	18.49	69.84	1.71	521	2030
ناحیه داخلی	0.75	8.27	17615.8	14.43	18.29	44.13	1.35	867	1989
	0.75	7.94	18050.4	14.56	18.5	46.06	1.12	718	2000
	0.76	6.81	16597.1	14.68	18.69	43.59	1.06	679	2014
	0.77	7.22	15758.5	16.72	21.93	42.13	1.75	1122	2030
آبخیز تالار	0.76	12.19	69519.1	18.3	15.45	59.44	1.03	1817	1989
	0.74	13.1	76195.8	19.21	16.32	60.6	0.93	1637	2000
	0.75	11.95	73119.67	19.51	16.6	59.23	0.92	1625	2014
	0.75	11.78	71862.01	20.99	18.06	58.81	1.52	2686	2030

جدول ۴- فرآیندهای تغییر در انواع کاربری‌های اراضی طی دوره‌های مطالعاتی در مقیاس آبخیز و زیرآبخیز تالار

Table 4 – Landscpe change processes in different land use types during the study periods at the watershed and sub-watershed scales of Talar

ردیف	زیرآبخیز	کاربری اراضی	1989-2000	2000-2014	1989-2014	2014-2030
3	نیزوا	کشاورزی آبی	تجمع	ایجاد	افزایش سطح	افزایش سطح
		باغ	ایجاد	تجمع	تجمع	افزایش سطح
		مرتع	افزایش سطح	کاهش سطح	کاهش سطح	کاهش سطح
4	آسران	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	تجمع
		باغ	افزایش سطح	تجمع	تجمع	ایجاد
		مرتع	کاهش سطح	تفکیک	تفکیک	جمع‌شدگی
5	دشت سفید	کشاورزی دیم	ایجاد	تجمع	ایجاد	جابه‌جایی
		باغ	ایجاد	تجمع	تجمع	ایجاد
		مرتع	تفکیک	تنزل	تفکیک	تفکیک
6	قدمگاه	مرتع	-	-	-	-
7	ورسک	کشاورزی دیم	-	-	-	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تفکیک
		کشاورزی آبی	ایجاد	تنزل	ایجاد	جمع‌شدگی
		مرتع	ایجاد	تجمع	ایجاد	تجمع
		منطقه مسکونی	افزایش سطح	افزایش سطح	افزایش سطح	ایجاد
8	اوریم	جنگل	تفکیک	تنزل	تفکیک	تجمع
		مرتع	افزایش سطح	ایجاد	ایجاد	تفکیک
		منطقه مسکونی	تجمع	ایجاد	تجمع	ایجاد
9	پالند	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	تفکیک
		جنگل	تنزل	تجمع	تنزل	تنزل
		کشاورزی آبی	تجمع	تفکیک	تفکیک	تنزل
		باغ	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	تفکیک	تفکیک	ایجاد
		منطقه مسکونی	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
10	آلاشت	کشاورزی دیم	-	-	-	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تنزل
		کشاورزی آبی	تجمع	ایجاد	تجمع	تفکیک
		باغ	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	ایجاد	تجمع	تنزل
		منطقه مسکونی	تجمع	ایجاد	ایجاد	ایجاد
11	ناحیه داخلی	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تفکیک
		کشاورزی آبی	تجمع	تفکیک	ایجاد	تفکیک
		باغ	ایجاد	تجمع	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	تفکیک	تجمع	تفکیک
		منطقه مسکونی	تجمع	تجمع	تجمع	ایجاد
12	آبخیز تالار	کشاورزی دیم	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد
		جنگل	تنزل	تنزل	تنزل	تنزل
		کشاورزی آبی	تجمع	ایجاد	ایجاد	تفکیک

ردیف	زیرآبخیز	کاربری اراضی	1989-2000	2000-2014	1989-2014	2014-2030
		باغ	ایجاد	تجمع	ایجاد	ایجاد
		مرتع	تجمع	تفکیک	تجمع	تنزل
		منطقه مسکونی	ایجاد	ایجاد	ایجاد	ایجاد

جدول ۵- نتایج همبستگی پیرسون بین سنجه‌های سیمای سرزمین با خدمات هیدرولوژیک آبخیز تالار

Table 5 – Pearson correlation results between landscape metrics and hydrological services in the Talar watershed

خدمات آبخیز	آماره	NP	PD	LPI	ED	LSI	PA	AWMSI	AWMCC
تولید آب	ضریب همبستگی	0.625**	0.310	-0.558**	0.282	0.621**	0.699	0.660	0.634**
	معنی‌داری	0.000	0.079	0.001	0.112	0.000	0.000	0.000	0.000
نگهداشت رسوب	ضریب همبستگی	0.604**	0.310	-0.387*	0.163	0.539**	0.782**	0.592**	0.654**
	معنی‌داری	0.000	0.079	0.026	0.364	0.001	0.000	0.000	0.000

*معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد، **معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد

بحث

بیشترین مقدار ضریب همبستگی کرامر برای متغیر فاصله از منطقه مسکونی در دوره واسنجی (۰/۳۴) و اعتبارسنجی (۰/۳۶)، نقش انسان در تغییر کاربری اراضی و توسعه مناطق مسکونی را تأیید می‌کند (Nor *et al.*, 2017; Krajewski *et al.*, 2018). فاصله از مرتع نیز با مقدار ۰/۳۵ ضریب کرامر بالایی به خود اختصاص داد که می‌تواند به‌دلیل وسعت مراتع (حدود ۶۲ درصد سطح آبخیز مطالعاتی) و تأثیر آن بر تغییرات کاربری اراضی باشد. کمترین مقدار ضریب مذکور نیز به فاصله از رودخانه با مقدار ۰/۱۷ اختصاص یافت که با نتایج Shooshtari و Gholamalifard (۲۰۱۵)، Kumar و همکاران (۲۰۱۴) و Abuelaish و Olmedo (۲۰۱۶) هم‌خوانی دارد. دلیل این امر را می‌توان به ویژگی‌های منطقه مطالعاتی ازجمله شیب بالای آن نسبت داد. طبیعتاً در فواصل بیش‌تر از رودخانه و مناطق پرشیب پتانسیل تغییر کاربری اراضی کاهش می‌یابد. ارتفاع از سطح دریا با مقدار ضریب کرامر برابر با ۰/۳۳ از اهمیت زیادی در مدل‌سازی انتقال کاربری اراضی برخوردار بود که در مطالعه Kavian و همکاران (۲۰۱۷) نیز بر آن تأکید شده است. افزایش ویلاسازی و توسعه باغات در مناطق کوهستانی شمال البرز، نقش ارتفاع را در تغییرات کاربری توجیه می‌کند.

یافته‌های حاصل از ارزیابی مدل‌سازی توانایی انتقال بیان‌گر عملکرد نسبتاً خوب مدل با میزان صحت ۷۴/۵۳ و ۷۶/۷۱ درصد به‌ترتیب برای دوره‌های زمانی ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ می‌باشد. در همین راستا، میزان صحت در مطالعه Shooshtari و Gholamalifard (۲۰۱۵) در آبخیز نکارود حدود ۸۰ درصد به‌دست آمد. دلیل این اختلاف را شاید بتوان به تفاوت در مساحت آبخیزهای مطالعاتی و در نتیجه نیروهای مؤثر بر تغییر کاربری اراضی در دو آبخیز نسبت داد. لازم به توضیح است که عملکرد بسیار خوب مدل مورد استفاده در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی آبخیز تالار براساس ارزیابی آماری نقشه پیش‌بینی شده کاربری اراضی برای سال ۱۳۹۳ با مقادیر K_{no} و $K_{location}$ به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶۴ و ۰/۹۶۹ مشخص شد. مقادیر به‌دست آمده از مقادیر محاسباتی شاخص‌های مذکور در پژوهش‌های Nadoushan و همکاران (۲۰۱۲) در منطقه اراک و Megahed و همکاران (۲۰۱۵) در منطقه Greater Cairo کشور مصر بالاتر است.

براساس نقشه پیش‌بینی شده کاربری اراضی برای سال ۱۴۰۹، مساحت کاربرهای کشاورزی دیم، جنگل، کشاورزی آبی، باغ، مرتع و منطقه مسکونی به‌ترتیب با تغییر ۲۱/۰۱، ۱۴/۸۶-، ۵/۶۶-، ۵/۷۶، ۱۹/۸۵-، ۱۳/۶۰ کیلومترمربع به ۶۶/۸۱، ۵۳۱/۲۳، ۲۱/۲۴،

۲۲/۹۳، ۱۰۸۰/۶۶ و ۴۱/۲۳ کیلومترمربع خواهد رسید. در همین ارتباط، کاهش مساحت اراضی جنگلی، کشاورزی آبی و مرتعی و افزایش مساحت اراضی کشاورزی دیم، باغ و منطقه مسکونی بیان‌گر آن است که عامل انسانی در تغییر کاربری اراضی آبخیز تالار نقش به‌سزایی خواهد داشت که لازم است تا تصمیمات لازم در خصوص مدیریت کاربری اراضی با اقدامات مختلف ازجمله حفظ جنگل مانند جنگل‌کاری، حفظ اراضی آبی و همچنین اراضی مرتعی و یا محدود نمودن توسعه کشاورزی دیم در اراضی شیب‌دار و یا ایجاد باغ در اراضی مرتعی بالادست و در نتیجه مدیریت پایدار آبخیز اتخاذ گردد. ساختار سیمای سرزمین تعیین کننده جریان انرژی شامل تشعشع خورشیدی، دما، تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، هدررفت خاک و تولید رسوب می‌باشد (Shi *et al.*, 2013). براساس نتایج تحلیل همبستگی پیرسون (جدول ۴) و به‌منظور تبیین اثر الگوی سیمای سرزمین بر خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب، کلیه سنجه‌های منتخب در پژوهش حاضر به‌جز تراکم لکه و تراکم لبه با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب ارتباط معنی‌دار دارند. در همین ارتباط، سنجه مساحت لکه حداکثر همبستگی با هر دو خدمت هیدرولوژیک مورد مطالعه را نشان داد. این ضریب برای تولید آب و نگهداشت رسوب به‌ترتیب برابر با ۰/۶۹۹ و ۰/۷۸۲ به‌دست آمد. تحلیل بیش‌تر یافته‌ها حاکی از ارتباط مستقیم کلیه سنجه‌های مطالعاتی به‌جز شاخص بزرگ‌ترین لکه (دارای ارتباط معکوس) با خدمات هیدرولوژیک مورد پژوهش دارد. Shi و همکاران (۲۰۱۳) نیز در مطالعه خویش بر ارتباط مستقیم تراکم و مساحت لکه با هدررفت خاک و تولید رسوب اشاره نمودند. وجود ارتباط معکوس سنجه LPI با هدررفت خاک در مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۱۷) نیز به‌دست آمد.

براساس یافته‌های مندرج در جدول ۴، سنجه تعداد لکه با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد ارتباط مستقیم معنی‌دار دارد. شایان ذکر است که طی دوره ۲۵ ساله پژوهش، سنجه تعداد لکه‌ها در راستای کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب از ۱۸۱۷ به ۱۶۲۵ کاهش یافته است. در تحلیل نتیجه به‌دست آمده می‌توان گفت که کاهش تعداد لکه‌های جنگل و مرتع سهم بیش‌تری نسبت به افزایش تعداد لکه‌های سایر کاربری اراضی در کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب را داشته است. کاهش نگهداشت رسوب را نیز می‌توان به کاهش میزان پوشش گیاهی ناشی از تخریب جنگل و مرتع در آبخیز مطالعاتی نسبت داد. نتایج سنجه تراکم لکه نیز همانند تعداد لکه حاکی از وجود رابطه مستقیم با خدمات مذکور و مطابق با یافته‌های Shi و همکاران (۲۰۱۳) است. در این راستا، سنجه مورد اشاره با ضریب همبستگی ۰/۳۱۰ و سطح معنی‌داری ۰/۰۷۹ از میزان ارتباط کم‌تری با خدمات هیدرولوژیک مورد مطالعه نسبت به سنجه تعداد لکه برخوردار است. بایستی اضافه کرد که اگرچه تعداد لکه ارتباط معنی‌داری با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب نشان داد، اما این امر در بررسی تعداد لکه در واحد سطح با خدمات بوم‌سازگان پیش‌گفته غیرمعنی‌دار بود. دلیل این امر را شاید بتوان به نوع رابطه محاسباتی سنجه تراکم لکه (تعداد لکه در واحد سطح) نسبت داد. یافته‌های پژوهش نشان داد که سنجه بزرگ‌ترین لکه با تولید آب و نگهداشت رسوب به‌ترتیب در سطح اطمینان ۹۹ و ۹۵ درصد ارتباط معکوس معنی‌دار دارد. Shi و همکاران (۲۰۱۳) هم در مطالعه خود از شاخص بزرگترین لکه به‌عنوان یکی از سنجه‌های مهم کنترل‌کننده هدررفت خاک و تولید رسوب یاد کردند که با هدررفت خاک و تولید رسوب ارتباط معکوس دارد. بایستی یادآوری شود که بالا بودن شاخص LPI نشان‌دهنده بالا بودن سطح پوشاننده کاربری اراضی خاص در منطقه مطالعاتی می‌باشد. در همین ارتباط، افزایش مقدار نفوذ به‌سبب افزایش زمان تمرکز ناشی از افزایش سنجه LPI در کاربری جنگل منجر به کاهش تولید آب در کاربری مورد اشاره می‌شود. کاهش میزان نگهداشت رسوب در کاربری‌های غالب شامل جنگل،

مرتع و کشاورزی آبی نیز به سبب تخریب و کاهش سطح پوشش گیاهی در منطقه مطالعاتی باعث کاهش میزان نگهداشت رسوب شده است. وجود ارتباط معکوس سنجه LPI با هدررفت خاک در مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۱۷) نیز به‌دست آمد. علاوه بر این، Boongaling و همکاران (۲۰۱۸) به کاهش میزان رواناب سطحی و تولید رسوب با افزایش شاخص بزرگ‌ترین لکه دست یافتند. رابطه میان LPI و خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان در این پژوهش از نوع همبستگی آماری است و بیانگر رابطه علّی مستقیم نیست. با این حال، تفسیر نتایج بر پایه منطق بوم‌شناسی و شواهد پژوهش‌های پیشین انجام شده است که نشان می‌دهند تغییر در اندازه و پیوستگی لکه‌های کاربری اراضی می‌تواند از طریق اثرگذاری بر فرآیندهای فیزیکی مانند نفوذ، رواناب، فرسایش خاک، بر میزان تولید آب و نگهداشت رسوب تأثیر بگذارد. ازاین‌رو، به‌نظر می‌رسد همبستگی مشاهده‌شده بازتابی از سازوکارهای اکوهیدرولوژیکی حاکم بر سیمای سرزمین باشد. میزان طول لبه‌های کاربری‌های اراضی مختلف در واحد سطح نشان دهنده سنجه تراکم لبه می‌باشد (Sertel *et al.*, 2018) که در این پژوهش کمینه میزان ارتباط با خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار را دارد. یافته‌های پژوهش حاکی از عدم وجود ارتباط معنی‌دار تراکم لبه با خدمات هیدرولوژیک تولید آب و نگهداشت رسوب است. در همین راستا بایستی اشاره شود که با افزایش میزان تراکم لبه در یک منطقه، مقدار نسبت محیط به مساحت افزایش و در نتیجه میزان نسبی مساحت کاهش می‌یابد. لذا با توجه به رابطه مستقیم مساحت با خدمات هیدرولوژیک مورد پژوهش (جدول ۵) و همچنین مساحت با سنجه تراکم لبه، ارتباط مستقیم تراکم لبه با خدمات هیدرولوژیک مورد اشاره هرچند به‌صورت اندک توجیه می‌شود. به‌نظر می‌رسد برآیند کاهش سنجه تراکم لبه در کاربری‌های جنگل و مرتع و افزایش آن در سایر کاربری‌های اراضی اثر یکدیگر را خنثی کرده و سبب عدم وجود ارتباط معنی‌دار آن با تولید آب و نگهداشت رسوب در آبخیز تالار شده است. رابطه بین سنجه شاخص شکل سیما و خدمات هیدرولوژیک مطالعاتی به‌صورت مستقیم بوده و در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. بررسی شاخص شکل سیما در کاربری‌های مختلف اراضی حاکی از روند کاهشی در کاربری‌های جنگل و مرتع و روند افزایشی در سایر کاربری‌های اراضی در منطقه مطالعاتی طی دوره ۲۵ ساله است. در همین ارتباط، به‌نظر می‌رسد تغییرات شاخص شکل سیما در کاربری‌های انسان‌ساخت تأثیر کم‌تری بر وضعیت خدمات هیدرولوژیک نسبت به کاربری‌های جنگل و مرتع در آبخیز مطالعاتی دارد. با توجه به روند کاهشی شاخص شکل سیما در کاربری‌های جنگل و مرتع طی دوره پژوهش و نظر به ارتباط مستقیم شاخص شکل سیما با خدمات هیدرولوژیک پیش‌گفته، میزان تولید آب و نگهداشت رسوب کاهش یافته است. از طرفی، با افزایش میزان شاخص شکل سیما به‌سبب افزایش لبه‌های کاربری‌های اراضی، نسبت محیط به مساحت افزایش می‌یابد. در همین مورد، افزایش شاخص LSI و کاهش مساحت در شرایط یکسان سبب کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب می‌شود. سنجه مساحت لکه بیان‌گر میانگین مساحت لکه‌های موجود در سیمای سرزمین می‌باشد که براساس نتایج پژوهش فعلی بیشینه میزان همبستگی با خدمات تولید آب و نگهداشت رسوب به‌ترتیب با ضرایب ۰/۶۹۹ و ۰/۷۸۲ را در آبخیز تالار دارد. با توجه به ارتباط مستقیم میانگین مساحت لکه با خدمات مذکور و در راستای یافته‌های Shi و همکاران (۲۰۱۳)، مقدار میانگین مساحت لکه در آبخیز تالار در کاربری‌های کشاورزی دیم، کشاورزی آبی، باغ و مرتع روند کاهشی داشته است که موجب کاهش خدمات هیدرولوژیک پیش‌گفته شده است. علاوه بر این، روند تغییر میانگین مساحت لکه در کاربری‌های منطقه مسکونی و جنگل افزایشی بوده است. افزایش سطوح غیرقابل نفوذ در کاربری

منطقه مسکونی منجر به افزایش میزان تولید آب و کاهش میزان نگهداشت رسوب در کاربری مورد اشاره شده است. در کاربری جنگل کاهش تولید آب و نگهداشت رسوب به سبب کاهش سطح اراضی جنگلی به وقوع پیوسته است. در مجموع و براساس یافته‌های پژوهش فعلی، ارتباط سنجه میانگین مساحت لکه با خدمات هیدرولوژیک مورد مطالعه در سطح سیما مستقیم و معنی‌دار می‌باشد. سنجه دایره محاط که بر اساس رابطه Baker و Cai (۱۹۹۲) محاسبه می‌شود از اندازه لکه تأثیر نمی‌پذیرد. بالا بودن مقدار سنجه AWMCC نشان‌دهنده حالت خطی بودن لکه کاربری اراضی است و حداقل مقدار این سنجه بیان‌گر دایره‌ای بودن آن لکه می‌باشد. بررسی‌های انجام گرفته در خصوص ارتباط سنجه دایره محاط با خدمات هیدرولوژیک مطالعاتی حاکی از ارتباط مستقیم و معنی‌دار آن‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد می‌باشد. در همین ارتباط، ضریب همبستگی ۰/۶۳۴ و ۰/۶۵۴ به‌ترتیب برای تولید آب و نگهداشت رسوب با سنجه مورد اشاره در آبخیز تالار به‌دست آمد. در تشریح دلایل ارتباط سنجه دایره محاط با خدمات هیدرولوژیک مطالعاتی می‌توان اظهار داشت که ارتباط آن‌ها به‌سبب استفاده از عامل مساحت در رابطه محاسباتی این سنجه معنی‌دار شده است. بر همین اساس و با توجه به ارتباط مستقیم سنجه AWMCC با خدمات هیدرولوژیک و همچنین روند کاهشی نگهداشت رسوب و تولید آب آبخیز تالار احتمالاً لکه‌های خطی نسبت به لکه‌های دایره‌ای تأثیر بیش‌تری در تأمین خدمات بوم‌سازگان دارند.

بررسی فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین در آبخیز تالار نشان می‌دهد که طی دوره مطالعاتی فرآیند ایجاد در کاربری کشاورزی دیم به‌وقوع پیوسته است. در همین راستا، میزان تولید آب در کشاورزی دیم در آبخیز تالار طی دوره مورد پژوهش (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳) افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به افزایش تعداد و مساحت لکه‌های کشاورزی دیم ناشی از تخریب جنگل و مرتع در آبخیز تالار مرتبط دانست. افزایش میزان رواناب و رسوب ناشی از تبدیل اراضی جنگل به کشاورزی در سایر مطالعات نیز مورد تایید قرار گرفته است (Abbasi *et al.*, 2017؛ Esmali *et al.*, 2015). بالا بودن میزان تولید رواناب و رسوب در کاربری کشاورزی دیم نسبت به مرتع توسط Ahmadi Iikhchi و همکاران (۲۰۰۳) در منطقه دوراهان استان چهارمحال و بختیاری گزارش شد. بایستی ذکر شود که تبدیل جنگل و مرتع به کشاورزی دیم منجر به کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه افزایش تولید آب می‌شود. از طرف دیگر به‌دلیل حذف تاج پوشش گیاهی، اثر ریشه درختان و گیاهان جنگلی و مرتعی و همچنین عملیات‌های خاک‌ورزی و شخم در جهت شیب میزان نفوذ آب کاهش یافته و بر میزان رواناب افزوده می‌شود (Claggett *et al.*, 2013)؛ بنابراین، فرآیند ایجاد در کاربری کشاورزی دیم همراه با افزایش تولید آب در منطقه مطالعاتی مشاهده شده است. در خصوص نگهداشت رسوب نیز اشاره می‌شود که فرآیند ایجاد و در نتیجه افزایش تعداد و مساحت لکه‌های کاربری کشاورزی دیم باعث کاهش نگهداشت رسوب طی دوره پژوهش شده است. دلیل این امر را می‌توان به شخم و عملیات‌های خاک‌ورزی در جهت شیب دامنه نسبت داد که باعث افزایش پتانسیل انتقال رسوب و در نتیجه کاهش نگهداشت رسوب می‌شود. اگرچه بنا بر گزارش Ferreira و همکاران (۲۰۲۰)، شناخت پویایی رسوب بعد از وقوع تغییرات کاربری اراضی به‌دلیل پیچیدگی و تغییرپذیری مکانی پیچیده است. کاهش تعداد و مساحت لکه‌های جنگلی از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ از دیگر یافته‌های این پژوهش است که منجر به فرآیند تنزل در منطقه شده است. فرآیند تنزل در کاربری جنگل منجر به افزایش سطح کاربری‌های مرتع، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و منطقه مسکونی در آبخیز تالار شده است؛ بنابراین، کاهش پوشش گیاهی ناشی از تخریب جنگل منجر به کاهش نگهداشت رسوب در آبخیز تالار طی دوره پژوهش شده است. کاهش تولید آب نیز در کاربری جنگل به‌سبب کاهش مساحت برابر با ۷۱/۰۲ کیلومترمربعی آن از سال ۱۳۶۸

تا ۱۳۹۳ می‌باشد. شایان ذکر است که به‌منظور بررسی و تحلیل جامع‌تر نتایج بایستی سهم اثر عوامل مؤثر بر کاهش تولید آب و کاهش نگهداشت رسوب را مدنظر داشت و به عبارت دیگر نمی‌توان تغییرات خدمات هیدرولوژیک آبخیز را تنها به یک عامل خاص ارتباط داد. بلکه بایستی مجموعه‌ای از عوامل دخیل را مرتبط دانست. قابل ذکر است که در ارزیابی مقدار نگهداشت رسوب تأثیر عوامل اقلیمی و خاک و نیز برآیند آن‌ها بیش از اثر کاربری اراضی بوده است. در همین ارتباط، سهم اندک کاربری اراضی در ارزیابی رفتار تولید آب و در نتیجه نگهداشت و تولید رسوب در مطالعات دیگر نیز به‌دست آمده است (Belete *et al.*, 2020). کاربری کشاورزی آبی به‌سبب افزایش تعداد و مساحت لکه‌ها طی دوره پژوهش تحت تأثیر فرآیند ایجاد بوده است. افزایش سطح و تعداد لکه‌های کاربری کشاورزی آبی ناشی از تخریب جنگل و مرتع تولید آب را به‌سبب کاهش پوشش گیاهی و همچنین اجرای عملیات‌های خاک‌ورزی طی دوره پژوهش افزایش داده است. با این توضیحات، فرآیند ایجاد در کاربری کشاورزی آبی سبب افزایش میزان آبدهی شده است. افزایش مقدار خدمت نگهداشت رسوب در کاربری کشاورزی آبی طی دوره پژوهش را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با توجه به کشت غالب برنج و نوع آبیاری غرقابی و همچنین شیب اندک در کاربری اراضی مذکور از پتانسیل انتقال رسوب کاسته شده و میزان نگهداشت رسوب افزایش می‌یابد. علاوه بر این رشد گونه‌های زراعی خود سبب افزایش میزان نگهداشت رسوب در اراضی کشاورزی آبی می‌شود. تخریب کاربری‌های مرتع، کشاورزی آبی و جنگل منجر به فرآیند ایجاد و در نتیجه افزایش تعداد و مساحت لکه‌ها در کاربری باغ طی دوره پژوهش (۱۳۶۸-۱۳۹۳) در آبخیز مطالعاتی شده است. در همین ارتباط، فرآیند ایجاد در کاربری باغ سبب افزایش میزان آبدهی در آبخیز تالار شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش نفوذ و نهایتاً افزایش آبدهی در خلال تغییرات کاربری اراضی به وقوع پیوسته در آبخیز مطالعاتی نسبت داد. در این نوع از کاربری اراضی به‌دلیل افزایش سطح و همچنین رشد درختان باغی و نیز استفاده از گیاهان پوششی هم‌چون یونجه در کف اراضی باغی منجر به بیش‌تر شدن تراکم پوشش و در نتیجه افزایش میزان نگهداشت رسوب شده است. علی‌رغم کم‌تر بودن سطح باغ نسبت به کشاورزی آبی در منطقه، میزان نگهداشت رسوب در باغ بیش‌تر از کاربری کشاورزی آبی می‌باشد که دلیل این امر را شاید بتوان به بالا بودن تراکم پوشش گیاهی و نقش آن در کاهش اثر عامل فرسایندگی باران و همچنین دست‌خوردگی‌های نسبی کم‌تر در کاربری اراضی مذکور نسبت داد. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه مساحت کاربری مرتع طی دوره ۲۵ ساله پژوهش افزایش اندکی داشته است (حدود دو کیلومترمربع)، لکن کاربری مرتع بیشینه مقدار تبادلات و تغییرات بین کاربری‌های اراضی مختلف را به خود اختصاص داده است. در همین ارتباط، بیشینه تغییر سطح کاربری مرتع ناشی از کاهش سطح کاربری جنگل و افزایش سطح سایر کاربری‌های اراضی در آبخیز تالار طی دوره پژوهش می‌باشد. در مجموع، کاربری مرتع طی دوره مطالعاتی به سبب کاهش تعداد لکه و افزایش اندک مساحت لکه تحت پوشش فرآیند تجمع بوده است. بایستی اشاره شود که فرآیند تجمع در کاربری مرتع منجر به کاهش میزان تولید آب و نگهداشت رسوب در کاربری مذکور شده است. دلیل این امر با توجه تغییر ثبات تقریبی مساحت و افزایش تعداد لکه را می‌توان به نقش آرایش مکانی لکه‌های کاربری مرتع در آبخیز تالار مرتبط دانست. کاربری منطقه مسکونی در آبخیز تالار تحت تأثیر فرآیند ایجاد طی دوره پژوهش بوده است. در همین ارتباط، تخریب کاربری‌های مرتع، کشاورزی دیم و جنگل در منطقه پژوهش منجر به افزایش تعداد و مساحت لکه‌های کاربری منطقه مسکونی شده است. بایستی ذکر شود که افزایش سطوح با نفوذپذیری کم و یا غیرقابل نفوذ در کاربری موردنظر و مطابق با

یافته‌های Zare و همکاران (۲۰۱۶) باعث افزایش خدمت هیدرولوژیک تولید آب در آبخیز تالار از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ شده است. در خصوص نگهداشت رسوب در این نوع از کاربری اراضی نیز بایستی ذکر شود که افزایش سطوح با نفوذپذیری کم و یا غیرقابل نفوذ از طریق احداث واحدهای مسکونی و همچنین اجرای عملیات‌های زیرسازی، احداث جوی و شبکه فاضلاب منجر به افزایش میزان نگهداشت رسوب در کاربری منطقه مسکونی علی‌رغم افزایش میزان تولید آب می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی خدمات هیدرولوژیک بوم‌سازگان در آبخیز تالار، شامل تولید آب و نگهداشت رسوب، در شرایط تداوم روند فعلی تغییرات کاربری اراضی انجام شده است. در این راستا، با استفاده از مدل‌های LCM و InVEST و تحلیل سیمای سرزمین، ارتباط میان تغییرات کاربری و خدمات بوم‌سازگان به‌صورت آماری و مکانی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت ادامه روند کنونی، جنگل‌ها کاهش و کاربری‌های کشاورزی و مسکونی افزایش یافته که این تغییرات منجر به کاهش عملکرد خدمات هیدرولوژیک می‌شود. شاخص‌هایی مانند مساحت لکه، تعداد لکه و شاخص بزرگترین لکه بیش‌ترین همبستگی را با تغییرات تولید آب و نگهداشت رسوب دارند. بررسی فرآیندهای تغییر سیمای سرزمین به‌عنوان عاملی کلیدی در تحلیل کاربری اراضی و عملکرد بوم‌سازگان‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا ساختار و توزیع لکه‌های کاربری تأثیر مستقیم بر خدمات هیدرولوژیکی دارند (Lei *et al.*, 2021). شناخت دقیق این فرآیندها به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد مدیریت پایدار و مبتنی بر شواهد علمی را به‌ویژه در مناطق حساس بهبود بخشند. کاربردهای عملی پژوهش شامل اولویت‌بندی مناطق بحرانی برای حفاظت منابع آب و خاک، برنامه‌ریزی کاهش فرسایش، طراحی کمربندهای حفاظتی و اصلاح الگوهای کاربری است. در سطح سیاست‌گذاری، پیشنهاد می‌شود مناطق با بیشترین خطر کاهش خدمات بوم‌سازگان به‌عنوان اولویت حفاظتی تعیین شوند و نتایج در طرح‌های مدیریت جامع آبخیز و توسعه کاربری اراضی با رویکرد بوم‌شناسی ادغام گردد. همچنین، آموزش جوامع محلی درباره اهمیت پوشش گیاهی طبیعی و پیامدهای تغییر کاربری می‌تواند مشارکت آنها را افزایش دهد. از منظر پژوهشی، انجام مطالعات مقایسه‌ای در آبخیزهای مجاور، بررسی همزمان تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری، و ترکیب مدل‌های یادگیری ماشین با داده‌های سنجش از دور و مدل‌های هیدرولوژیک، به افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و توسعه ابزارهای تصمیم‌سازی کمک می‌کند. با توجه به نتایج، تداوم روند فعلی تغییر کاربری به کاهش تولید آب، نگهداشت رسوب و تاب‌آوری حوزه آبخیز تالار منجر خواهد شد. این امر لزوم بازنگری در سیاست‌های توسعه کشاورزی و توقف تخریب جنگل‌ها را آشکار می‌سازد. از محدودیت‌های پژوهش، عدم بررسی جامع تأثیرات تغییرات اقلیمی و استفاده از پارامترهای پیش‌فرض بود. برای مطالعات آینده، بررسی اثرات ترکیبی تغییرات اقلیم و کاربری اراضی با مدل‌های دقیق‌تر پیشنهاد می‌گردد. در نهایت، این مطالعه تصویری جامع از وضعیت گذشته، حال و آینده خدمات هیدرولوژیک آبخیز تالار ارائه می‌دهد و تأکید می‌کند که تداوم روند فعلی توسعه نامتوازن، عملکرد طبیعی بوم‌سازگان را تضعیف می‌کند. این پژوهش، گامی مؤثر در درک بهتر تعامل انسان و محیط‌زیست و ارتقای مدیریت پایدار منابع طبیعی به شمار می‌رود.

References

Abbasi, M., Najafinejad, A., Sheikh, V.B., & Azim Mohseni, M. (2017). Investigating Land Use and Slope Effects on Soil Properties, Runoff and Sediment Using Rainfall Simulator Case Study of Kechik Watershed in Golestan Province.

Environmental Erosion Research, 6 (4), 104-124. (In Persian)

Abdolalizadeh, Z., Ebrahimi, A., & Mostafazadeh, R. (2019). Landscape pattern change in Marakan protected area, Iran. *Regional Environmental Change*, 19(6), 1683-1699. https://doi.org/10.1007/s10113-019-01504-9

Abuelaish, B., & Olmedo, M. T. C. (2016). Scenario of land use and land cover change in the Gaza Strip using remote sensing and GIS models. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 274. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2292-7

Ahmadi Iikhchi, A., Hajabbassi, M.A., & Jalalian, A. (2003). Effects of Converting Range to Dry-farming Land on Runoff and Soil Loss and Quality in Dorahan, Chaharmahal & Bakhtiari Province. *Journal of Crop Production and Processing*; 6(4):103-115. (In Persian)

Alaei, N., Mohammadzadeh, F., Mostafazadeh, R., & Talebi Khiavi, H. (2024). Assessing spatiotemporal urban green space per capita and its connectivity in a small size city in Northwest Iran. *GeoJournal*, 89(4), 148. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11159-7

Alizadeh, A. (2015). *Principles of applied hydrology* (40th ed.). Mashhad: Imam Reza University Press. (In Persian)

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and drainage* paper No. 56. Rome: food and agriculture organization of the United Nations, 56(97), e156. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm

Amini Parsa, V., Istanbuly, M. N., Kronenberg, J., Russo, A., & Jabbarian Amiri, B. (2024). Urban trees and hydrological ecosystem service: a novel approach to analyzing the relationship between landscape structure and runoff reduction. *Environmental Management*, 73(1), 243-258. https://doi.org/10.1007/s00267-023-01868-z

Anagonou, S. P. G., Ewemoje, T. A., Toyi, S. S. M., & Olubode, O. S. (2023). Landscape ecological risk assessment and transformation processes in the Guinean-Congolese climate zone in Benin Republic. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 31, 100985. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100985

Baker, W.L., & Cai, Y. (1992). The r. le programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. *Landscape ecology*, 7(4), 291-302. https://doi.org/10.1007/BF00131258

Belete, M., Deng, J., Abubakar, G. A., Teshome, M., Wang, K., Woldetsadik, M., Zhu, E., Comber, A., & Gudo, A. (2020). Partitioning the impacts of land use/land cover change and climate variability on water supply over the source region of the Blue Nile Basin. *Land Degradation & Development*, 31(15), 2168-2184. https://doi.org/10.1002/ldr.3589

Bogaert, J., Ceulemans, R., & Salvador-Van Eysenrode, D. (2004). Decision tree algorithm for detection of spatial processes in landscape transformation. *Environmental management*, 33(1), 62-73. https://doi.org/10.1007/s00267-003-0027-0

Bogdan, S. M., Pătru-Stupariu, I., & Zaharia, L. (2016). The assessment of regulatory ecosystem services: the case of the sediment retention service in a mountain landscape in the Southern Romanian Carpathians. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 12-27. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.008

Boongaling, C.G.K., Faustino-Eslava, D.V., & Lansigan, F. P. (2018). Modeling land use change impacts on hydrology and the use of landscape metrics as tools for watershed management: The case of an ungauged catchment in the Philippines. *Land use policy*, 72, 116-128. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.042

Cabral, P., Feger, C., Levrel, H., Chambolle, M., & Basque, D. (2016). Assessing the impact of land-cover changes on ecosystem services: A first step toward integrative planning in Bordeaux, France. *Ecosystem Services*, 22, 318-327. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.08.005

Chen, W., Chi, G., & Li, J. (2019). The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995–2015. *Science of the Total Environment*, 669, 459-470.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.139

Claggett, P. R., Irani, F. M., & Thompson, R. L. (2013). Estimating the extent of impervious surfaces and turf grass across large regions. *Journal of the American Water Resources Association*, 49(5), 1057-1077. https://doi.org/10.1111/jawr.12110

DNRWM Mazandaran. (2001). Comprehensive detailed-executive study of the Talar watershed. Department of Natural Resources and Watershed Management of Mazandaran Province (In Persian)

Eshghizadeh, M., & Mohammadpoor, M. (2025). An intelligent method to identify land use changes in an urban watershed in Iran. *GeoJournal*, 90(1), 32. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11254-9

Esmali, A., Kavian, A., Jafarian, Z., & Kavianpoor, A.H. (2015). Effect of vegetation covers on decreasing runoff and soil loss using rainfall simulation in Nesho rangeland, Mazandaran province. *Geography and Environmental Planning*, 26(2), 179-190. (In Persian)

Ferreira, C.S.S., Walsh, R.P.D., Kalantari, Z., & Ferreira, A. J. D. (2020). Impact of land-use changes on spatiotemporal suspended sediment dynamics within a peri-urban catchment. *Water*, 12(3), 665. https://doi.org/10.3390/w12030665

Fu, Q., Li, B., Hou, Y., Bi, X., & Zhang, X. (2017). Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: a case study in Altay Prefecture, China. *Science of the Total Environment*, 607, 633-646. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.241

Guo, S., Wu, C., Wang, Y., Qiu, G., Zhu, D., Niu, Q., & Qin, L. (2022). Threshold effect of ecosystem services in response to climate change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China. *Ecological Indicators*, 136, 108603. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108603

Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Rasoulzadeh, A., & Ghaderpour, R. (2019). Investigation of in the Capita Water Consumption Variation in Iran Based on the Past Two-Deca Diet. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1), 77-87. https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.246084.667795 (In Persian)

Jafarpour Ghalehteimouri, K., Shamsoddini, A., Mousavi, M.N., Ros, F.B.C., & Khedmatzadeh, A. (2022). Predicting spatial and decadal of land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model based scenarios (2019–2049) Zarriné-Rūd River Basin in Iran. *Environmental Challenges*, 6, 100399. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100399

Jahanishakib, F., Salmanmahiny, A., Mirkarimi, S.H., & Poodat, F. (2021). Hydrological connectivity assessment of landscape ecological network to mitigate development impacts. *Journal of Environmental Management*, 296, 113169. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113169

Kavian, A., Golshan, M., & Abdollahi, Z. (2017). Flow discharge simulation based on land use change predictions. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 588. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6906-0

Khademalrasoul, A., & Amerikhah, H. (2021). Assessment of soil erosion patterns using RUSLE model and GIS tools (case study: the border of Khuzestan and Chaharmahal Province, Iran). *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 885-895. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00931-6

Khorsand, M., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2016). Comparison between estimated annual soil lossusing RUSLE model with data from the erosion pins and plots in Khamsan representative watershed. *Journal of Ecohydrology*, 3(4), 669-680. https://doi.org/10.22059/ije.2016.60376 (In Persian)

Krajewski, P., Solecka, I., & Mrozik, K. (2018). Forest landscape change and preliminary study on its driving forces in Ślęża Landscape Park (Southwestern Poland) in 1883–2013. *Sustainability*, 10(12), 4526. https://doi.org/10.3390/su10124526

Kumar, S., Radhakrishnan, N., & Mathew, S. (2014). Land use change modelling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5(2), 145-156.

https://doi.org/10.1080/19475705.2013.795502

Lang, Y., Song, W., & Zhang, Y. (2017). Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 101, 102-111. https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.003

Lausch, A., Blaschke, T., Haase, D., Herzog, F., Syrbe, R. U., Tischendorf, L., & Walz, U. (2015). Understanding and quantifying landscape structure–A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics. *Ecological Modelling*, 295, 31-41. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.018

Lei, J. C., Wang, S., Wu, J., Wang, J. W., & Xiong, X. (2021). Land-use configuration has significant impacts on water-related ecosystem services. *Ecological Engineering*, 160, 106133. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106133

Li, S., & Yang, B. (2015). Introducing a new method for assessing spatially explicit processes of landscape fragmentation. *Ecological Indicators*, 56, 116-124. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.031

Li, J., Zhou, K., Xie, B., & Xiao, J. (2021). Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: Comprehensive analysis based on heterogeneity perspective. *Ecological Indicators*, 133, 108372. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108372

Liang, Y., He, Y., & Liu, L. (2024). Integrated assessment of land-use management effects on ecosystem services under climate-adaptive scenarios in the Loess Plateau region of China. *GeoJournal*, 89(5), 195. https://doi.org/10.1007/s10708-024-11201-8

Liu, J., Zhou, Y., Wang, L., Zuo, Q., Li, Q., & He, N. (2023). Spatiotemporal Analysis and Multi-Scenario Prediction of Ecosystem Services Based on Land Use/Cover Change in a Mountain-Watershed Region, China. *Remote Sensing*, 15(11), 2759. https://doi.org/10.3390/rs15112759

Liu, Y., Huang, X., & Liu, Y. (2024). Detection of long-term land use and ecosystem services dynamics in the Loess Hilly-Gully region based on artificial intelligence and multiple models. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141560. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141560

Loc, H. H., Thanavanh, T., Nguyet, D. A., Upadhyay, S., Maung, T. M., Shrestha, S., Park, E., & Hamel, P. (2024). Understanding the impacts of land use changes on the sustainability of hydrological ecosystem services: the case of Pasak River Basin, Thailand. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24. https://doi.org/10.1007/s10668-024-05824-7

Marchioni, M., Raimondi, F., Becciu, G., & Dresti, C. (2025). Nature-based solutions for watershed management: An investigation on water-related ecosystem services delivery at multiple spatial scales. *Ecosystem Services*, 73, 101718. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101718

McGarigal, K. (2015). *FRAGSTATS help*. University of Massachusetts: Amherst, MA, USA, 182.

Megahed, Y., Cabral, P., Silva, J., & Caetano, M. (2015). Land cover mapping analysis and urban growth modelling using remote sensing techniques in Greater Cairo Region—Egypt. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(3), 1750-1769. https://doi.org/10.3390/ijgi4031750

Mohammadi, M., Kavian, A., & Gholami, L. (2017). Simulation of discharge and nitrate in Tallar Basin using SWAT model. *Jorunal of Watershed Management Researc*h, 8(15), 45-60. http://doi.org/10.29252/jwmr.8.15.45 (In Persian)

Nadoushan, M.A., Soffianian, A., & Alebrahim, A. (2012). Predicting urban expansion in Arak Metropolitan Area using two land change models. *World Applied Sciences Journal*, 18, 1124-1132. http://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.08.1217

Naseri, N., & Mostafazadeh, R. (2023). Spatial relationship of Remote Sensing Ecological Indicator (RSEI) and landscape metrics under urban development intensification.

Earth Science Informatics, 16(4), 3797-3810. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01119-z

Nor, A. N. M., Corstanje, R., Harris, J. A., & Brewer, T. (2017). Impact of rapid urban expansion on green space structure. *Ecological Indicators*, 81, 274-284. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.031

Pratt, B., & Chang, H. (2012). Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales. *Journal of hazardous materials*, 209, 48-58. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.12.068

Qiao, X., Li, Z., Lin, J., Wang, H., Zheng, S., & Yang, S. (2024). Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China. *International Soil and Water Conservation Research*, 12(2), 298-312. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001

Qiu, L., Chang, Z., Luo, X., Chen, S., Jiang, J., & Lei, L. (2025). Monitoring Forest Disturbances and Associated Driving Forces in Guangdong Province Using Long-Term Landsat Time Series Images. *Forests*, 16(1), 189. https://doi.org/10.3390/f16010189

Rahmannejad, F., Amiri, M.J., Nohegar, A., & Nabi Bidhendi, G. (2024). Evaluation and analysis of land use changes and their impacts on habitat quality (Case study: Talar Watershed, Mazandaran Province). *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 2(2), 1-17. (In Persian)

Rostami, N., & Rabbani, M. (2023). Zoning of soil erodibility and determination of affecting factors (Case study: Golan watershed, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 3(3), 1-15. https://doi.org/10.22034/iwm.2023.2004738.1084 (In Persian)

Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2019). Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data–sparse catchment. *Science of the Total Environment*, 646, 573-586. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.347

Salmoral, G., Willaarts, B.A., Troch, P.A., & Garrido, A. (2015). Drivers influencing streamflow changes in the Upper Turia basin, Spain. *Science of the total environment*, 503, 258-268. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.041

Sertel, E., Topaloğlu, R. H., Şallı, B., Yay Algan, I., & Aksu, G.A. (2018). Comparison of landscape metrics for three different level land cover/land use maps. ISPRS International *Journal of Geo-Information*, 7(10), 408. https://doi.org/10.3390/ijgi7100408

Seto, K. C., & Fragkias, M. (2005). Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. *Landscape ecology*, 20(7), 871-888. https://doi.org/10.1007/s10980-005-5238-8

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D and Douglass, J. (2018). *InVEST 3.5.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota*. The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

Shi, Z. H., Ai, L., Li, X., Huang, X. D., Wu, G. L., & Liao, W. (2013). Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. *Journal of Hydrology*, 498, 165-176. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.031

Shooshtari, S.J., & Gholamalifard, M. (2015). Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 1, 1-19. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2015.05.001

Stephens, C. M., Lall, U., Johnson, F. M., & Marshall, L. A. (2021). Landscape changes

and their hydrologic effects: Interactions and feedbacks across scales. *Earth-Science Reviews*, 212, 103466. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103466

Tang, X., Zhuo, M., Zhou, M., Guo, S., Gong, C., Wang, J., & Yang, H. (2025). Spatiotemporal Response Relationships Between Changes in Water Conservation Service and Landscape Pattern in Zoige Plateau, China. *Land Degradation & Development*, 36(5), 1641-1655. https://doi.org/10.1002/ldr.5453

Tavangar, S., Moradi, H., Massah Bavani, A., & Gholamalifard, M. (2021). A futuristic survey of the effects of LU/LC change on stream flow by CA–Markov model: A case of the Nekarood watershed, Iran. *Geocarto International*, 36(10), 1100-1116. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1633419

Wei, P., Chen, S., Wu, M., Deng, Y., Xu, H., Jia, Y., & Liu, F. (2021). Using the InVEST model to assess the impacts of climate and land use changes on water yield in the upstream regions of the Shule River Basin. *Water*, 13(9), 1250. https://doi.org/10.3390/w13091250

Zabihi, M., Moradi, H., Gholamalifard, M., Khaledi Darvishan, A., & Fürst, C. (2020). Landscape management through change processes monitoring in Iran. *Sustainability*, 12(5), 1753. https://doi.org/10.3390/su12051753

Zare, M., Samani, A. A.N., & Mohammady, M. (2016). The impact of land use change on runoff generation in an urbanizing watershed in the north of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(18), 1279. https://doi.org/10.1007/s12665-016-6058-7

Zhang, M., Chen, E., Zhang, C., Liu, C., & Li, J. (2024). Multi-scenario simulation of land use change and ecosystem service value based on the markov–FLUS model in Ezhou city, China. *Sustainability*, 16(14), 6237. https://doi.org/10.3390/su16146237

Zhang, S., Fan, W., Li, Y., & Yi, Y. (2017). The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Science of the Total Environment*, 574, 34-45. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.024

Zhang, Y., Bi, Z., Zhang, X., & Yu, Y. (2019). Influence of landscape pattern changes on runoff and sediment in the Dali River watershed on the Loess Plateau of China. *Land*, 8(12), 180. https://doi.org/10.3390/land8120180