

Spatiotemporal variations analysis of water yield ecosystem service in the Hyrcanian region of northern Iran using the InVEST model

Mohesn Zabihi ^{1*}, Hamidreza Moradi ², Abdulvahed Khaledi Darvishan ³, Mehdi Gholamalifard ⁴

¹ PhD of Watershed Management Sciences and Engineering, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

² Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

³ Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

⁴ Associate Professor, Department of the Environment, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

Extended Abstract

Introduction

Ecosystems provide a wide range of benefits known as ecosystem services, which play a vital role in human livelihoods and environmental sustainability. Among these, hydrological services, particularly water yield, are essential for maintaining water security, supporting downstream ecosystems, and regulating hydrological processes. Understanding temporal and spatial variations in water yield is increasingly important in the context of land use change and climate variability. In this regard, modeling tools such as the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) have proven effective in quantifying and mapping ecosystem services, especially water yield, by integrating spatial data on land use, climate, topography, and soil properties. The rationale behind this study stems from the limited research conducted on the long-term and spatial dynamics of water yield ecosystem services in Iran, particularly in ecologically sensitive and hydrologically significant regions such as the Hyrcanian forests. Despite their rich biodiversity and critical ecological functions, these regions have received insufficient attention in ecosystem service assessments using robust modeling frameworks. Therefore, this research aims to evaluate the spatiotemporal variations in water yield services in the Talar Watershed, a representative region within the Hyrcanian forest, over a 25-year period using the InVEST model.

Materials and Methods

The Talar Watershed, located in Mazandaran Province in northern Iran, spans approximately 1,764 km² across the northern slopes of the Alborz Mountains. The elevation in the watershed ranges from 216 to nearly 3,980 meters, contributing to diverse microclimates and land uses. The region has a semi-humid, Mediterranean-like climate influenced by the Caspian Sea, with an average annual precipitation of 547 mm and an average annual evapotranspiration of 446 mm. The InVEST water yield model was employed to estimate annual water production based on biophysical and climatic variables for the years 1989, 2000, and 2014. The input data included climatic variables (precipitation, reference evapotranspiration), land use/land cover, digital elevation model (DEM), plant-available water content, root-restricting layer depth, biophysical factors (land cover condition, root depth, and evapotranspiration coefficient), seasonality parameter, watershed boundaries, and water demand for each land use class were prepared for the model in the selected years 1989, 2000, and 2014. In this regard, the annual average precipitation across the study area was estimated based on elevation gradients for the selected years. Reference evapotranspiration was calculated using the modified Hargreaves equation for the studied years. Land use/land cover data were derived from Landsat satellite imagery using a supervised classification approach based on the Support Vector Machine (SVM) method in the research years. Plant-available water content was determined using soil texture characteristics and calculated as the volumetric difference between field capacity and permanent wilting point. The depth of the root-restricting layer was assumed equal to soil depth in each land unit, as no significant root-limiting layers were present. Root depth was assigned based on dominant vegetation types in each area. Land cover status was defined as either covered (1) or not covered (0), with all land use types except urban areas classified as having vegetative cover. The evapotranspiration coefficient, used to adjust reference evapotranspiration based on alfalfa as the reference crop, was applied in the InVEST model for different land use classes. The seasonality parameter, reflecting the predominantly winter rainfall pattern of the study area's climate, was set to 10.

Results and Discussion

Results indicate that the northern and central parts of the Talār watershed, dominated by dense forests and rangelands, produced the highest water volumes, supported by higher annual precipitation. Findings show a 23% reduction in water provisioning service from 192.02 to 147.85 million m³ between 1989 and 2014. Validation with hydrometric data indicated a decreasing trend in the ratio of precipitation converted to water supply, likely caused by increased evapotranspiration and land use changes. Among land uses, rangelands produced the highest average annual water, while orchards produced the least. Per hectare, urban areas had the highest water production due to impervious surfaces increasing runoff, and forests had the lowest due to higher infiltration and evapotranspiration. The large extent of rangeland areas and their location in steep slope regions, leading to reduced infiltration and increased runoff, are considered the main reasons for the highest water yield observed in this land use

type. Overall, protecting natural vegetation, especially in sloped, high-precipitation areas, is vital for maintaining watershed water production. Ecological land use planning is essential for sustainable water and soil resource management in the region.

Conclusions

From a policy and planning perspective, this research underscores the utility of the InVEST model as a decision-support tool for watershed managers and land use planners. The ability to quantify and map water yield variations across time provides valuable insights for identifying priority areas for conservation, designing payment for ecosystem services schemes, and implementing adaptive land management strategies. The model's outputs can also be integrated into regional climate adaptation frameworks, particularly in semi-humid mountainous regions vulnerable to rainfall variability and water stress. Furthermore, the spatially explicit results facilitate cross-sectoral coordination among forestry, agriculture, and urban planning agencies by identifying synergies and tradeoffs in ecosystem service provision. Finally, this study contributes to the growing body of ecosystem service research in the Middle East and offers a replicable methodology for analyzing other hydrologically sensitive regions under environmental pressure. In conclusion, this research provides a comprehensive and long-term assessment of water yield ecosystem service dynamics in a critical ecological zone of Iran. The combination of empirical data, spatial analysis, and process-based modeling offers a robust foundation for evidence-based decision-making. As land use change and climate variability continue to reshape hydrological processes, integrating ecosystem service assessments into regional planning will be essential for achieving sustainable water resource management and ecological resilience in the Hyrcanian region and beyond.

Keywords: Water yield zoning, Deforestation, Ecosystem service, Hydrological modeling, Mazandaran Province

Article Type: Research Article

Acknowledgment

Hereby, the authors express their sincere gratitude for the logistic support provided by Tarbiat Modares University.

Conflicts of interest

The authors of this article declare no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

All data generated during the manuscript analysis are included in the article.

Authors' contribution

Mohsen Zabihi: Conceptualization, methodology, formal analysis and investigation, visualization, resources, writing-original draft preparation; **Hamidreza Moradi:** Conceptualization, supervision, formal analysis and investigation, manuscript editing; **Abdulvahed Khaledi Darvishan:** Conceptualization, methodology, formal analysis and investigation, resources, manuscript editing; **Mehdi Gholamalifard:** Conceptualization, methodology, formal analysis and investigation, manuscript editing

*Corresponding Author, E-mail: mohsen_zabihi69@yahoo.com

Citation: Zabihi, M., Moradi, H.R., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2025). Spatiotemporal Analysis of Water Yield Ecosystem Service in the Hyrcanian Region of Northern Iran Using the InVEST Model. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 296-308.

doi: 10.22098/mmws.2025.17580.1607

Received: 01 June 2025, Received in revised form: 28 June 2025, Accepted: 28 June 2025 Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 296-308.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تحلیل تغییرات زمانی-مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب در منطقه هیرکانی شمال ایران با بهره‌گیری از مدل InVEST

محسن ذبیحی^{۱*}، حمیدرضا مرادی^۲، عبدالواحد خالدی درویشان^۳، مهدی غلامعلی فرد^۴

^۱ دانش‌آموخته مقطع دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۲ استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۳ دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

^۴ دانشیار گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

چکیده

خدمات هیدرولوژیک اکوسیستم شامل فرایندهای طبیعی اکوسیستم است که تأمین و تنظیم منابع آب را برای انسان و محیط زیست ممکن می‌سازد. تولید آب به‌عنوان یکی از این خدمات، نقش حیاتی در تأمین نیازهای انسانی و پایداری محیط زیست دارد. در همین ارتباط، بررسی تغییرات زمانی و مکانی این خدمت به‌ویژه در شرایط تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی اهمیت فزاینده‌ای یافته است. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب در منطقه هیرکانی شمال ایران و در حوزه آبخیز تالار استان مازندران طی ۲۵ سال (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳) با استفاده از مدل InVEST برنامه‌ریزی شده است. این مدل به‌عنوان ابزاری کارآمد برای کمی‌سازی و تهیه نقشه خدمات اکوسیستم، امکان ارزیابی تولید آب را از طریق داده‌های مکانی اقلیم، کاربری اراضی و عوامل زیست‌فیزیکی فراهم می‌کند. در راستای دستیابی به اهداف، داده‌های ورودی شامل بارندگی سالانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع سالانه، کاربری اراضی، مدل رقمی ارتفاع، محتوای آب در دسترس گیاه، عمق لایه محدود کننده ریشه، وضعیت پوشش اراضی، عمق ریشه، ضریب تبخیر و تعرق، پارامتر فصلی بودن، مرز جغرافیایی آبخیز و نیاز آبی در هر طبقه از کاربری‌های اراضی برای سال‌های منتخب ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ تهیه و برای اجرا به مدل معرفی شد. نتایج نشان داد که خدمت اکوسیستمی تولید آب طی دوره ۲۵ ساله از ۱۹۲/۰۲ به ۱۴۷/۸۵ میلیون مترمکعب و معادل ۲۳ درصد کاهش یافته است. بیش‌ترین و کم‌ترین تولید آب سالانه به‌ترتیب مربوط به کاربری‌های مرتع و باغ با مقادیر ۹۴/۵۶ و ۱/۴۴ میلیون مترمکعب است؛ اما به‌ازای هر هکتار، مناطق مسکونی بیش‌ترین تولید آب را داشتند که ناشی از افزایش رواناب سطحی به‌دلیل افزایش سطح نفوذناپذیر است. کاربری‌های جنگل، منطقه مسکونی، کشاورزی دیم و آبی نیز با مقادیر به‌ترتیب ۲۸/۵۷، ۸/۵۰، ۸/۱۸ و ۶/۵۹ میلیون مترمکعب در رتبه‌های دوم تا پنجم تولید آب قرار گرفتند. این مطالعه اهمیت حفظ پوشش‌های طبیعی، به‌ویژه در مناطق شیب‌دار و پربارش را برای پایداری تولید آب و مدیریت منابع آب و خاک در منطقه برجسته می‌کند. نتایج، تأکیدی بر ضرورت برنامه‌ریزی کاربری اراضی با رویکرد اکولوژیکی دارد و می‌تواند راهنمایی ارزشمند برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب در ایران باشد.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی تولید آب، جنگل‌زدایی، خدمت بوم‌سازگان، مدل‌سازی هیدرولوژیک، استان مازندران

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohsen_zabihi69@yahoo.com

استناد: ذبیحی، محسن، مرادی، حمیدرضا، خالدی درویشان، عبدالواحد، و غلامعلی فرد، مهدی (۱۴۰۴). تحلیل تغییرات زمانی-مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب در منطقه هیرکانی شمال ایران با بهره‌گیری از مدل InVEST. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۳)، ۳۰۸-۳۹۶.

doi: 10.22098/mmws.2025.17580.1607

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۳۹۶ تا ۳۰۸.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

اکوسیستم‌ها، سیستم‌هایی پیچیده و پویا هستند که در تعامل میان مؤلفه‌های زیستی، فیزیکی و انسانی، طیف وسیعی از منافع و کارکردها را برای جوامع انسانی فراهم می‌آورند. این منافع که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در زندگی بشر تأثیرگذار هستند، تحت عنوان خدمات اکوسیستمی شناخته می‌شوند (MEA, 2005). در همین رابطه، خدمات اکوسیستمی را می‌توان به چهار دسته اصلی خدمات تأمین‌کننده، تنظیمی، فرهنگی و پشتیبان تقسیم نمود (Ghabelnezam et al., 2022). هر یک از این خدمات نقشی حیاتی در پایداری معیشت، سلامت و رفاه انسانی ایفا می‌کنند و کاهش یا تخریب آن‌ها می‌تواند تبعات محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای به دنبال داشته باشد (Costanza et al., 1997). در میان خدمات اکوسیستمی در حوضه‌های آبخیز، خدمات تنظیمی به‌ویژه خدمات هیدرولوژیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. خدمات هیدرولوژیک حوزه آبخیز به مجموعه‌ای از کارکردهای محیط زیستی گفته می‌شود که از طریق آن‌ها اکوسیستم‌های یک حوضه در تنظیم چرخه آب ایفای نقش می‌نمایند (El Jeitany et al., 2024). یکی از مهم‌ترین این خدمات، تولید آب یا تنظیم جریان آب است؛ خدمتی که از طریق آن اکوسیستم‌ها، به‌ویژه جنگل‌ها، مراتع، تالاب‌ها و اراضی کشاورزی، در تعدیل رواناب سطحی، تغذیه آب‌های زیرزمینی، کنترل سیلاب، کاهش تبخیر و افزایش نفوذ آب نقش دارند (Petsch et al., 2023). این خدمت نه تنها بر امنیت آبی جوامع انسانی تأثیرگذار است، بلکه در حمایت از اکوسیستم‌های آبی پایین دست و حفظ عملکرد اکوسیستم‌های خشکی نیز نقشی بنیادین دارد. امروزه در شرایطی که بسیاری از مناطق جهان با بحران کم‌آبی، نوسانات شدید بارندگی و تغییر اقلیم مواجه هستند، درک چگونگی تأثیر تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین بر تولید آب اهمیتی دوچندان یافته است (Foley et al., 2005; Güneralp et al., 2021).

تحلیل تغییرات زمانی و مکانی تولید آب در یک حوزه آبخیز به سبب چگونگی تأثیر بر فرآیندهای انسانی و طبیعی، نظیر تغییرات کاربری اراضی، نوسانات بارندگی و اقدامات مدیریتی از اهمیت بالایی برخوردار است (Fiener et al., 2011; Talebi Khiavi and Mostafazadeh, 2021). این تحلیل امکان شناسایی مناطق بحرانی، روندهای کاهشی یا افزایشی در تولید آب و تأثیرپذیری منابع آبی از فشارهای محیطی را فراهم می‌سازد. درک این تغییرات برای مدیریت پایدار منابع آب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است. علاوه بر این، نتایج آن می‌تواند سیاست‌گذاران را در اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و بهبود

بهره‌وری منابع آبی (Fan and Shibata, 2014) یاری رساند. در این میان، باید توجه داشت که تغییرات الگوهای سیمای سرزمین به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر خدمات اکوسیستم، از جمله تخریب پوشش جنگلی، گسترش اراضی کشاورزی یا شهرنشینی، می‌تواند تأثیرات عمده‌ای بر ظرفیت تولید آب اکوسیستم‌ها داشته باشد (Jahandari et al., 2022). بنابراین، بررسی پویایی زمانی و مکانی خدمات هیدرولوژیک می‌تواند ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران در مدیریت پایدار منابع آب و اراضی فراهم آورده و نقشی کلیدی در مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز ایفا نماید (Nelson et al., 2009). با درک دقیق این تغییرات، می‌توان راهبردهایی مبتنی بر حفاظت، احیاء و استفاده پایدار از اراضی طراحی نمود که هم به حفظ خدمات اکوسیستمی و هم به توسعه پایدار منجر شوند.

در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌های مکان‌محور مانند InVEST^۱ به عنوان ابزاری مناسب برای کمی‌سازی و تهیه نقشه خدمات اکوسیستمی در مقیاس‌های مختلف مطرح شده است (Chen et al., 2024). مدل InVEST به‌ویژه در سنجش تولید آب، از طریق ترکیب داده‌های مکانی اقلیمی، کاربری اراضی و خاک، قادر است الگوی فضایی خدمت هیدرولوژیک را در سطح چشم‌انداز شبیه‌سازی و تحلیل نماید (Sharp et al., 2018). ضمناً ارزیابی اثر سناریوهای مختلف کاربری اراضی یا تغییرات اقلیمی بر خدمات تولید آب با استفاده از مدل مورد اشاره امکان‌پذیر است.

مطالعات متعددی به منظور بررسی و تحلیل خدمات اکوسیستمی انجام شده است که ابعاد گوناگون این خدمات، به‌ویژه خدمات هیدرولوژیک و تولید آب، را مورد توجه قرار داده‌اند. در همین راستا، Van der Biest et al. (2015) به ارزیابی خدمات بوم‌سازگان مبتنی بر کاربری اراضی با جزئیات مختلف در شمال شرق بلژیک پرداختند. بر اساس نتایج ایشان، نقشه‌های طبقه‌بندی شده با جزئیات بیش‌تر افزایش معنی‌داری در ارزیابی صحت خدمات بوم‌سازگان ندارد. Haghdadi et al. (2018) به بررسی تولید آب با استفاده از مدل InVEST در آبخیز دلیچای استان تهران پرداخته و نشان دادند که بیشینه و کمینه تولید آب مربوط به کاربری‌های اراضی بایر و ذخیره‌گاه ارس به ترتیب با مقادیر ۲۹۲۳/۹۹۲ و ۴۵۹/۰۴ مترمکعب در هکتار است. علاوه بر این، ایشان به تأثیر بالای عوامل فیزیوگرافیک و اقلیمی بر تولید آب و همچنین به کارایی بالای مدل InVEST با وجود استفاده از داده‌های نسبتاً کم و قابل دسترس اشاره نمودند. Jafarzadeh et al. (2019) در پژوهشی با هدف تخمین تولید آب با استفاده از مدل InVEST در کاربری‌های اراضی مختلف آبخیز میس‌خاص در استان ایلام به این نتیجه

^۱ Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST

تولید آب زیست‌بوم مراتع حوزه آبخیز دریان سمنان از نرم‌افزار InVEST استفاده نموده و نشان دادند که سالانه ۸۲/۹۵ میلیون مترمکعب آب تولید می‌شود که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تولید آب، در زیرحوضه‌های C₂ و C₁₅ با ۷ و ۰/۴۸ میلیون مترمکعب در سال بوده است. براساس نتایج ایشان، حجم آب تولیدی در تمام زیر حوضه‌های مطالعاتی در سال ۱۴۱۰، ۵/۱۳ درصد نسبت به وضعیت فعلی کاهش خواهد یافت.

این مطالعات ضرورت استفاده همزمان از داده‌های مکانی، اقلیمی و مدیریتی را در تحلیل خدمات اکوسیستمی به‌ویژه تولید آب برجسته می‌سازند (Zhang et al., 2021). جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که هرچند مطالعات داخلی و خارجی اهمیت و تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر خدمات تولید آب را تأیید کرده‌اند، اما در ایران به‌ویژه در مناطق حساس و استراتژیک، تحلیل جامع و بلندمدت این خدمت اکوسیستمی با استفاده از مدل InVEST کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در همین رابطه می‌توان اظهار داشت بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها در کشور به ارزیابی خدمات اکوسیستم در بازه‌های زمانی کوتاه پرداخته‌اند و مطالعه‌ای منسجم و جامع در خصوص تغییرات زمانی و مکانی انجام نشده است. علاوه بر این، مناطق حساس و کلیدی شمال ایران به‌خصوص جنگل‌های هیرکانی با پوشش گیاهی غنی که از نظر محیط زیستی و هیدرولوژیکی اهمیت بالایی دارند، می‌تواند بیش از این در کانون توجه مطالعات قرار گیرد. در این میان، حوزه آبخیز تالار در استان مازندران، یکی از زیرحوضه‌های کلیدی در منطقه هیرکانی شمال ایران است که با وجود داشتن تنوع اقلیمی، توپوگرافی پیچیده، پوشش گیاهی متراکم و کاربری‌های متنوع، تاکنون به‌صورت نظام‌مند از منظر خدمات اکوسیستم آب مورد بررسی قرار نگرفته است. این حوضه که بخشی از آن در مناطق حفاظت‌شده قرار دارد و بخشی دیگر تحت فشار توسعه کشاورزی و شهری است، نمونه‌ای بارز از یک چشم‌انداز دینامیک است که تحلیل الگوهای زمانی و مکانی خدمات آن، می‌تواند دیدگاه ارزشمندی برای سیاست‌گذاری در مقیاس منطقه‌ای و ملی فراهم آورد. در همین ارتباط، هدف این پژوهش تحلیل تغییرات زمانی و مکانی خدمات اکوسیستمی تولید آب در حوزه آبخیز تالار طی یک دوره ۲۵ ساله با بهره‌گیری از مدل خدمات اکوسیستمی InVEST است. بررسی تغییرات زمانی و مکانی خدمات اکوسیستمی، به‌ویژه خدمات اکوسیستمی تولید آب، می‌تواند مبنای ارزشمندی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی بلندمدت در حوزه‌های آبخیز فراهم آورد؛ چراکه این تحلیل‌ها، علاوه بر نمایان ساختن روندهای گذشته و آثار ناشی از تغییرات کاربری اراضی و شرایط اقلیمی به‌صورت کمی، امکان

رسیدند که کاربری‌های کشاورزی، جنگل، باغ و مرتع به‌ترتیب بیش‌ترین تولید آب در واحد سطح آبخیز مطالعاتی با مجموع تولید آب ۳۰/۲ میلیون مترمکعب را دارند. (Bai et al. (2019) با بررسی اثر تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر خدمت بوم‌سازگان تولید آب طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۱ با استفاده از مدل InVEST در منطقه کنتوچ^۱ ایالات متحده آمریکا نشان دادند که تغییر اقلیم بر خدمت تولید آب در مقیاس ایالت اثر بیش‌تری می‌گذارد. Belete et al., (2020) به بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی و تغییرپذیری اقلیم بر تأمین آب طی دوره ۱۴ ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷) با استفاده از مدل خدمات بوم‌سازگان InVEST در آبخیز Blue Nile پرداختند. نتایج ایشان حاکی از مشارکت ۹۴ درصدی عوامل اقلیمی در برابر اثر ۶ درصدی کاربری اراضی طی دوره پژوهش ایشان است. Erfani et al., (2023) با استفاده از مدل InVEST، گرادیان مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب در زیرحوضه‌های شمالی استان کرمان مدل‌سازی نموده و نشان دادند که سالانه حدود ۴۳/۵۱۲ میلیون مترمکعب آب در این منطقه تولید می‌شود. بیش‌ترین تولید آب مربوط به زیرحوضه ابرقو-سیرجان و کم‌ترین آن به زیرحوضه کویرلوت شمالی اختصاص دارد. هم‌چنین، تغییرات مکانی کاربری اراضی تأثیر قابل‌توجهی بر سطح تولید آب دارد، به‌طوری‌که اراضی مرتعی پرتراکم و جنگل‌های متراکم به‌ترتیب سالانه ۲۷۶۳۰ و ۱۱۰۴ مترمکعب آب در هر هکتار تولید می‌کنند، که اهمیت پوشش گیاهی در نفوذ آب و تغذیه سفره‌های زیرزمینی مناطق مرتفع را نشان می‌دهد. (Asadolahi and Keshtkar (2024) در ارزیابی تعادل مکانی عرضه و تقاضای خدمات هیدرولوژیکی اکوسیستم در حوزه آبخیز کرخه به این نتیجه دست یافتند که در مقابل تقاضای سالانه ۷۴۶ میلیون مترمکعب آب، عرضه سالانه آب معادل ۱۶۵۵ میلیون مترمکعب آب برآورد شد. (Wang et al. (2024) با استفاده از مدل InVEST و داده‌های سنجش از دور، تغییرات زمانی-مکانی تولید آب را در استان هنان^۲ طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ بررسی کردند. نتایج نشان داد که بازده آب ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته و بیش‌ترین مقدار آن در جنوب و جنوب‌شرق منطقه مطالعاتی بوده است. (Gao et al. (2025) با بهره‌گیری از مدل InVEST و تحلیل سناریوهای اقلیمی و کاربری اراضی، تغییرات زمانی و مکانی تولید آب را در حوضه رودخانه زرد طی دوره ۱۹۸۲ تا ۲۰۲۰ بررسی کردند. نتایج نشان داد که بازده آب سالانه نوسانات زیادی داشته و عوامل طبیعی در بخش‌های بالادست و میانی، و تغییرات کاربری در پایین‌دست بیش‌ترین تأثیر را داشته‌اند. پیش‌بینی‌ها برای سال ۲۰۳۰ کاهش نسبی تولید آب را در اکثر سناریوها نشان دادند. (Taheri Mohammad Abadi et al. (2025) در مدل‌سازی

² Henan¹ Kentuck

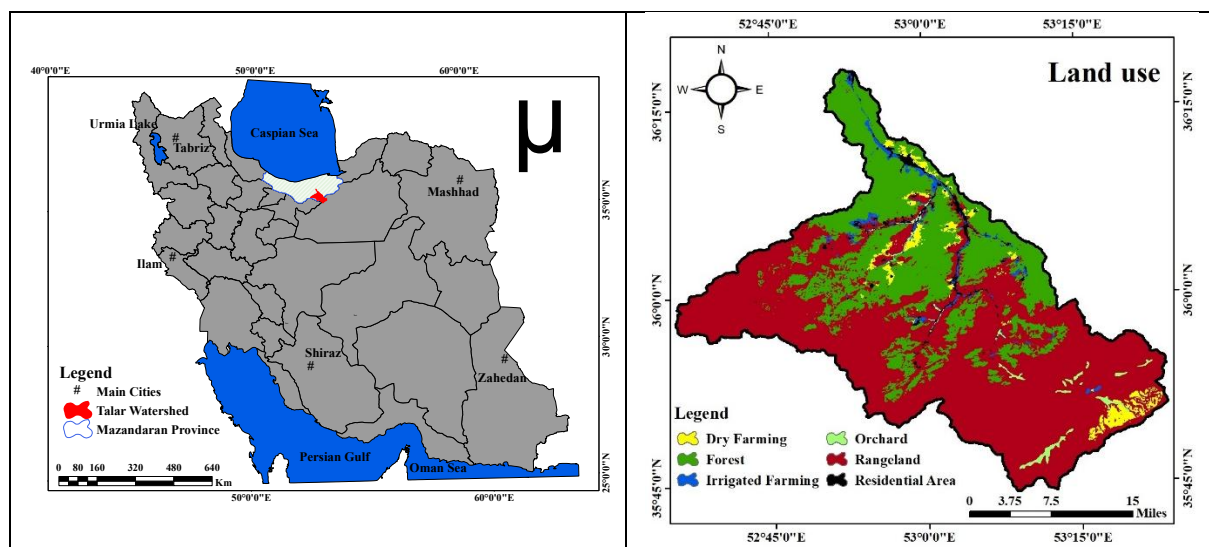
منطقه تحت تأثیر موقعیت کوهستانی و جریان های رطوبتی ورودی از دریای خزر، از نوع نیمه مرطوب با ویژگی های اقلیم شبه مدیترانه ای طبقه بندی می شود (Golshan et al., 2018). متوسط بارندگی سالانه در این آبخیز در حدود ۵۴۷ میلی متر و میانگین تبخیر سالانه حدود ۴۴۶ میلی متر گزارش شده است. داده های دمایی نشان دهنده نوساناتی بین ۶/۶ تا ۱۸/۳ درجه سانتی گراد هستند که میانگین آن حدود ۱۲/۴ درجه سانتی گراد است. از نظر زمین شناسی، منطقه عمدتاً از نهشته های رسوبی متعلق به دوره های مختلف زمین شناسی، به ویژه دوران دوم و پرکامبرین تشکیل شده است. ساختارهای تکنیکی حاکم همچون گسل ها و تاقدیس ها، عمدتاً با روند جنوب شرقی به شمال غربی مشاهده می شوند. خاک های منطقه به طور عمده از جنس ماسه سنگ، شیل و مارن با بافتی متوسط و نفوذپذیری قابل قبول تشکیل شده اند و مطالعات خاک شناسی انجام شده نیز حاکی از تنوع زیاد واحدهای اراضی در این حوضه است (DNRWM Mazandaran, 2001). موقعیت حوزه آبخیز تالار در کشور ایران و استان مازندران به همراه نقشه کاربری اراضی در شکل ۱ نشان داده شده است.

شناسایی و اولویت بندی مناطق بحرانی را نیز مهیا ساخته و زمینه تدوین سیاست های حفاظتی و بهره برداری پایدار از منابع طبیعی را فراهم می سازد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد پژوهش

آبخیز تالار در استان مازندران، با مساحتی در حدود ۱۷۶۴ کیلومتر مربع، یکی از زیرحوضه های مهم واقع در دامنه های شمالی رشته کوه البرز و مشرف به دریای مازندران است 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. این آبخیز به دلیل گستره قابل توجه، تنوع کاربری اراضی، کیفیت مطلوب داده های هیدرولوژیکی و اقلیمی، و موقعیت جغرافیایی خاص، به عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شده است. ارتفاع در این حوضه از حدود ۲۱۶ تا نزدیک به ۳۹۸۰ متر از سطح دریا متغیر بوده و میانگین ارتفاع منطقه حدود ۱۹۸۰ متر برآورد شده است. اقلیم



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش در ایران و استان مازندران

Figure 1. The location of the study area in Iran and Mazandaran Province

منحنی Budyko یک رابطه نظری در هیدرولوژی است که تعادل بلندمدت بین تبخیر و تعرق واقعی (AET) و بارندگی (P) را با توجه به پتانسیل تبخیر و تعرق (PET) در یک حوزه آبخیز نشان می دهد (Mostafazadeh et al., 2024). در این راستا، داده های ورودی مدل شامل متغیرهای اقلیمی (بارندگی، تبخیر و تعرق گیاه مرجع)، کاربری اراضی، مدل رقومی ارتفاع، محتوای آب در دسترس گیاه، عمق لایه محدود کننده ریشه، عوامل بیوفیزیکی (وضعیت پوشش اراضی، عمق ریشه و ضریب تبخیر و تعرق)، پارامتر فصلی بودن،

۲-۲- روش پژوهش

به منظور تحلیل تغییرات زمانی و مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب از مدل InVEST استفاده شد. بخش تولید آب در این مدل به تخمین میزان مشارکت نسبی آب از قسمت های مختلف آبخیز و یا زیرحوضه های آبخیز مربوطه با استفاده از بیلان آب و با تأکید بر چگونگی تأثیر الگوهای کاربری اراضی بر تولید آب سالانه می پردازد (Sharp et al., 2018). این بخش از مدل InVEST بر منحنی ارائه شده توسط Budyko و میانگین بارندگی سالانه استوار است.

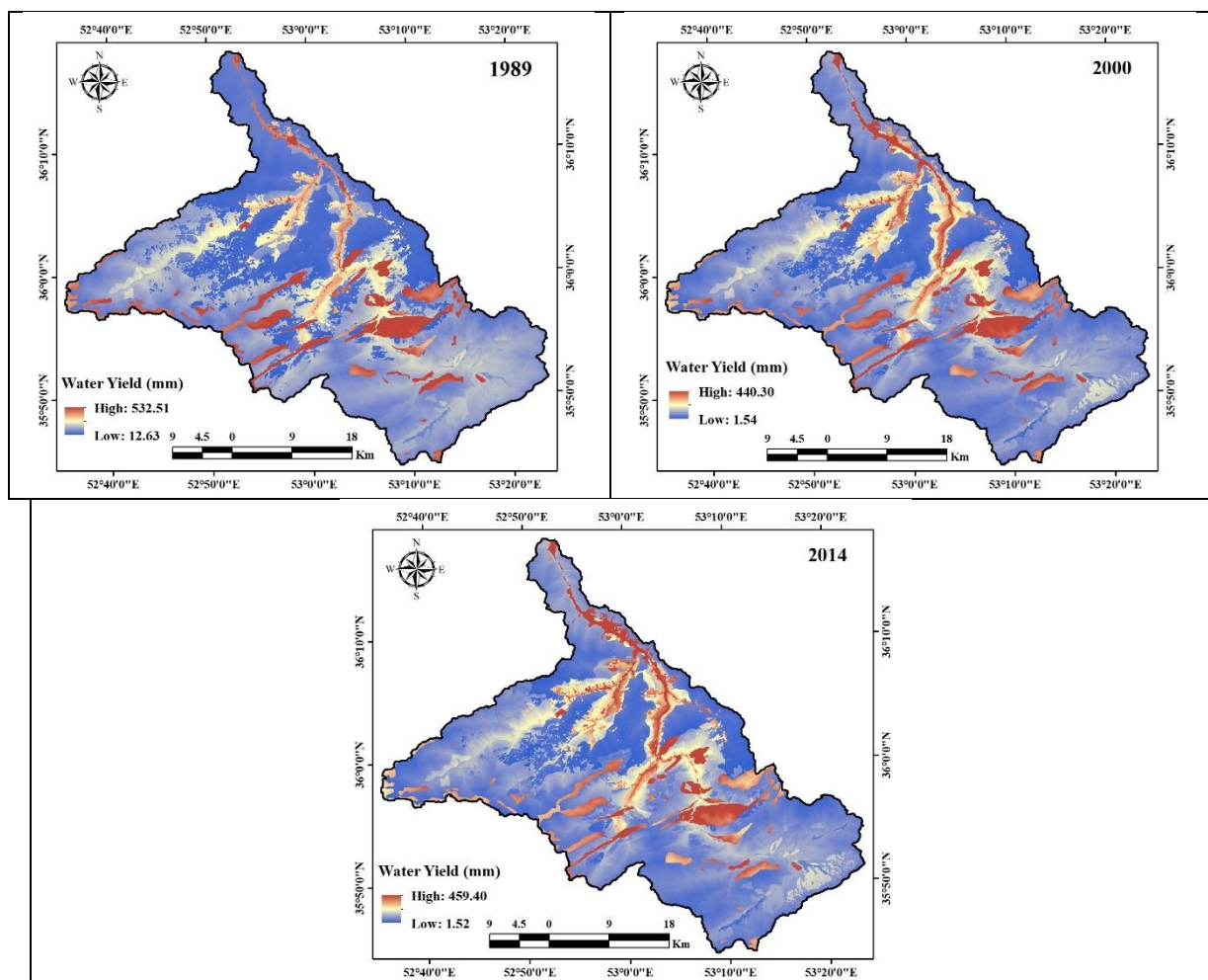
مرز جغرافیایی آبخیز و نیاز آبی در هر طبقه از کاربری‌های اراضی برای سال‌های منتخب ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ تهیه شد. به‌منظور تهیه عوامل موردنیاز برای اجرای مدل خدمات اکوسیستمی InVEST، میانگین بارندگی سالانه در منطقه مطالعاتی با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و خارج حوضه و براساس گرادیان ارتفاعی برای سال‌های مطالعاتی محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت. تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادله اصلاح‌شده هارگریوز (Yarahmadi and Rahimikhoob, 2015) به‌دست آمد. با توجه به نیاز مدل به نقشه مکانی، نقشه دمای میانگین براساس گرادیان دمایی تولید و بر اساس آن نقشه تبخیر و تعرق گیاه مرجع تولید شد (Khoshkhou and Nikmehr, 2021). کاربری اراضی نیز با استفاده از تصاویر ماهواره لندست^۱ (Talebi Khiavi et al., 2022) و روش نظارت شده ماشین بردار پشتیبان در سال‌های مورد پژوهش در محیط نرم‌افزار ENVI و با شش طبقه کاربری اراضی کشاورزی دیم، جنگل، کشاورزی آبی، باغ، مرتع و مناطق مسکونی تهیه شد (Zabihi et al., 2020). مدل رقومی ارتفاع از سازمان نقشه‌برداری کشور اخذ شد. محتوای آب در دسترس گیاه به‌صورت اختلاف نسبت حجمی ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائمی تعریف می‌شود که براساس مشخصات بافت خاک در هر یک از واحدهای اراضی آبخیز مطالعاتی و موجود در مطالعه تفصیلی-اجرایی آبخیزداری در منطقه مطالعاتی محاسبه شد. عمق لایه محدود کننده ریشه به‌دلیل عدم وجود لایه محدود کننده خاص و براساس پژوهش‌های صورت گرفته در منطقه مطالعاتی (DNRWM Mazandaran, 2001) برابر با عمق خاک در پروفیل‌های برداشت شده در هر واحد اراضی مدنظر قرار گرفت. عمق ریشه گیاهان با توجه به گیاهان غالب در منطقه مورد مطالعه، نتایج مطالعات پوشش گیاهی آبخیز تالار (DNRWM Mazandaran, 2001) و با در نظر داشتن عمق خاک به‌عنوان یک عامل محدود کننده در هر نوع از کاربری اراضی تعیین شد. در برخی موارد عمق ریشه گیاهان غالب در انواع مختلف پوشش گیاهی با توجه به منابع علمی مرتبط بیش از عمق خاک بود که در این صورت عمق خاک به‌عنوان عمق ریشه در مدل قرار داده شد. لازم به ذکر است که عوامل عمق لایه محدود کننده ریشه و محتوای آب در دسترس در سال‌های مورد پژوهش یکسان در نظر گرفته شد. وضعیت پوشش اراضی از نظر وجود (یک) یا عدم وجود (صفر) پوشش در کاربری‌های اراضی مختلف تعیین و مقدار مربوط به آن اختصاص یافت. در همین ارتباط، تمامی کاربری‌های

اراضی موجود به‌جز منطقه مسکونی دارای پوشش تشخیص داده شدند. ضریب تبخیر و تعرق برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از طریق خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه به‌منظور اصلاح تبخیر و تعرق مرجع بر اساس گیاه یونجه در مدل InVEST مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ضریب براساس پیشنهاد (Sharp et al., 2018) برای کاربری‌های اراضی مختلف مدنظر قرار گرفت. پارامتر فصلی بودن با توجه به اقلیم و وضعیت بارندگی منطقه مطالعاتی و وقوع بیش‌تر بارش‌ها در فصل زمستان برابر با ۱۰ در نظر گرفته شد (Lang et al., 2017). میزان مصرف آب بیان‌گر بخشی از تولید آبخیز است که صرف تولید محصولات کشاورزی و استفاده‌های انسانی می‌شود. در همین ارتباط، میزان مصرف آب در کاربری‌های کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و باغ بر اساس کشت غالب و با استفاده از نرم‌افزار OptiWAT و در کاربری منطقه مسکونی با توجه به اطلاعات جمعیتی در مقیاس شهرستان (Statistical Center of Iran, 2016) و سرانه مصرف آب (Hamdi Ahmadabad et al., 2019) در سال‌های مورد مطالعه محاسبه شد. سایر کاربری‌های اراضی هم به‌دلیل لحاظ مصرف آب آن‌ها از طریق محاسبه تبخیر و تعرق و مطابق با دستورالعمل استفاده از مدل InVEST برابر صفر در نظر گرفته شد (Sharp et al., 2018). لازم به توضیح است که به‌دلیل تطابق ابعاد سلول‌های نقشه‌های ورودی مورد استفاده در مدل InVEST برای انجام محاسبات مربوطه، اندازه سلول برای کلیه ورودی‌های مدل مطابق با دقت مکانی تصاویر ماهواره‌ای لندست و برابر با ۳۰ متر در نظر گرفته شد. واسنجی مدل تولید آب InVEST با تغییر مقدار پارامتر فصلی بودن (Sharp et al., 2018) و بر اساس مقایسه و کاهش اختلاف مقدار مشاهده‌ای و اندازه‌گیری شده دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری شیرگاه با مقدار برآوردی تأمین آب در آبخیز تالار صورت پذیرفت. واسنجی مدل مورد استفاده در این پژوهش نیز براساس آمار ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی آبخیز مورد مطالعه (شیرگاه) انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

نتایج محاسبه میزان تولید آب به‌عنوان یک خدمت اکوسیستمی در حوزه آبخیز تالار با استفاده از مدل خدمات اکوسیستمی InVEST در سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است.

¹ Landsat



شکل ۲- نقشه توزیعی تولید آب (میلی‌متر) آبخیز تالار طی سال‌های مطالعاتی

Figure 2. Distributed map of water yield (mm) in the Talar Watershed during the study years

شده با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده SVM در سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ به‌ترتیب برابر با ۷۴۹۴، ۹۴/۵۷ و ۹۳/۹۹ درصد محاسبه شد. ضریب کاپای به‌دست آمده برای نقشه‌های مذکور در سال‌های مطالعاتی نیز به‌ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۰/۸۶ و ۰/۸۵ بوده است (Zabihi et al., 2020). تحلیل نقشه خدمت اکوسیستمی تولید آب در سال ۱۳۷۹ نشان می‌دهد که تغییرات قابل‌توجهی در الگوی کاربری اراضی آبخیز دیده می‌شود. براساس یافته‌های پژوهش در این منطقه، پوشش اراضی جنگلی کاهش یافته و در مقابل، کاربری‌های اراضی مسکونی، کشاورزی دیم و آبی به‌ویژه در بخش‌های جنوبی و مرکزی حوضه گسترش یافته‌اند. این تغییرات باعث کاهش کارایی سیستم طبیعی در ذخیره و هدایت آب‌های سطحی شده است. با کاهش میزان بارندگی و افزایش میزان تبخیر و تعرق از سال ۱۳۶۸ تا ۱۳۷۹، نقشه تولید آب نشانگر کاهش مناطق با تولید بالا است. این کاهش می‌تواند به از بین رفتن پوشش حفاظتی خاک و افزایش تبخیر و رواناب سطحی نسبت داده شود. به بیان دیگر، تغییرات کاربری اثر منفی بر عملکرد اکوسیستم

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲، نواحی شمالی و مرکزی آبخیز تالار که دارای پوشش جنگلی و مرتعی متراکم هستند، بالاترین میزان تولید آب را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق همچنین از بارندگی سالانه بیش‌تری برخوردار بودند که نقش مهمی در تغذیه منابع آب دارد. براساس محاسبات صورت گرفته، میانگین بارندگی در سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ در حوزه آبخیز تالار به‌ترتیب برابر با ۵۵۲/۶، ۴۷۹/۸ و ۴۷۲/۸ میلی‌متر است که روندی کاهشی طی دوره مطالعاتی داشته است. بررسی نقشه کاربری اراضی نشان می‌دهد که پوشش‌های طبیعی سهم قابل‌توجهی از سطح آبخیز را تشکیل داده‌اند. این وضعیت منجر به افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب سطحی شده است. نقشه تولید آب حاصل از مدل InVEST نیز نشان می‌دهد که مناطقی با تولید آب بالا بیش‌تر در مناطق مرتفع قرار دارند. به‌طور کلی، ترکیب بارش بالا، دمای هوای کم، شیب مناسب و کاربری اراضی مطلوب در این سال منجر به تولید بیش‌تر آب شده است. لازم به یادآوری است که میزان صحت کلی برای نقشه‌های کاربری اراضی تولید

آن است که ۱۹/۷۲ درصد از مقدار کل بارندگی در آبخیز تالار در سال ۱۳۶۸ به تأمین آب منجر شده است. این مقدار در سال‌های پس از آن نسبت به سال ۱۳۶۸ روند کاهشی داشته و برای سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ به ترتیب برابر با ۱۶/۸۵ و ۱۷/۷۴ درصد محاسبه شده است. دلیل اصلی کاهش این نسبت طی دوره پژوهش را می‌توان افزایش تبخیر و تعرق ناشی از افزایش دمای میانگین سالانه و تغییر کاربری اراضی و مطابق با یافته‌های Van Den Bergh et al., (2019) نسبت داد. تحلیل نتایج پژوهش حاضر نشان داد که به‌طور میانگین تأمین آب حدود ۸۰ درصد از میزان تولید آب آبخیز تالار را به خود اختصاص داده است. مقدار باقی‌مانده صرف نفوذ در خاک و مصرف در کاربری‌های مختلف اراضی شده است. روند کاهشی نسبتی از تولید آب که برای تأمین آب اختصاص یافته است طی دوره زمانی پژوهش را شاید بتوان به افزایش میزان مصرف آب در کاربری‌های مختلف اراضی به سبب افزایش جمعیت و همچنین افزایش سطح کاربری‌های با مقدار آب مصرفی بالا مانند کشاورزی آبی و مناطق مسکونی ارتباط داد.

بررسی میزان تولید آب سالانه در کاربری‌های مختلف اراضی در آبخیز تالار نشان داد که کاربری‌های مرتع و باغ به ترتیب بیشینه و کمینه مقدار تولید آب را طی سال‌های مطالعاتی با میانگین ۹۴/۵۶ و ۱/۴۴ میلیون مترمکعب در سال به خود اختصاص دادند. Bosch and Hewlett (2019) و Jafarzadeh et al. (1982) نیز به وقوع بیش‌ترین مقدار تولید آب در کاربری مرتع اشاره کردند. وسعت زیاد و قرارگیری کاربری مرتع در مناطق با شیب زیاد و تبعاً کاهش نفوذ و افزایش تولید رواناب را می‌توان به عنوان مهم‌ترین دلیل وقوع بیشینه تولید آب در این نوع از کاربری اراضی نام برد. کاربری‌های جنگل، منطقه مسکونی، کشاورزی دیم و کشاورزی آبی نیز با مقادیر به ترتیب ۲۸/۵۷، ۸/۵۰، ۸/۱۸ و ۶/۵۹ میلیون مترمکعب در رتبه‌های دوم تا پنجم تولید آب در آبخیز تالار قرار گرفتند. اگرچه بر اساس مقدار تولید آب در واحد سطح و به منظور ارزیابی‌های مقایسه‌ای وضعیت تولید آب کاربری‌های منطقه مسکونی، کشاورزی آبی، کشاورزی دیم، مرتع، باغ و جنگل با مقادیر به ترتیب ۳۰۷۷/۷۶، ۲۴۴۸/۴۹، ۱۷۸۷/۶۴، ۸۵۹/۰۰، ۸۳۷/۴۶ و ۵۲۳/۵۵ مترمکعب در هکتار در رتبه‌های اول تا ششم خدمت هیدرولوژیک تولید آب در آبخیز مطالعاتی جای گرفتند. در همین ارتباط، وقوع کمینه تولید آب در واحد سطح در کاربری جنگل را می‌توان به هدررفت بیش‌تر آب نسبت به سایر کاربری‌های اراضی از طریق نفوذ و تبخیر و تعرق به سبب پوشش گیاهی غنی نسبت داد. Zare et al., (2016) نیز با استفاده از مدل L-THIA در آبخیز کسلیان نشان دادند که کاربری جنگل کمینه میزان تولید آب را داشته است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر حاکی از وقوع بیشینه تولید آب در واحد سطح در کاربری مسکونی است که این امر به دلیل وجود

در تولید آب گذاشته است. در مقایسه سه دوره زمانی ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳، مشاهده می‌شود که مناطق مرتفع آبخیز همواره سهم عمده‌ای در تولید آب داشته‌اند. این نواحی به دلیل شیب زیاد، تغییر نوع بارش از باران به برف، کاهش دما و در نتیجه تبخیر و تعرق و پوشش گیاهی مناسب، مکان‌هایی با پتانسیل بالای تولید هستند. نقشه‌های مدل InVEST به خوبی این الگو را تأیید می‌کنند و تطابق زیادی با نقشه‌های کاربری اراضی و بارندگی دارند. مجموع تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تغییرات کاربری اراضی، از جمله جنگل‌زدایی و افزایش اراضی کشاورزی و مسکونی، در کاهش تولید آب در سطح حوضه نقش کلیدی داشته‌اند. اگرچه الگوی بارندگی تغییر چندانی نداشته، اما ظرفیت پوشش‌های طبیعی در ذخیره و انتقال آب دچار افت شده است. مدل InVEST به وضوح تأثیر توأمان تغییرات طبیعی و انسانی را در سیمای سرزمین نشان می‌دهد. اهمیت حفاظت از مناطق با پوشش طبیعی به ویژه در نواحی شیب‌دار و پر بارش، در راستای پایداری تولید آب، بسیار برجسته است. نتایج بر ضرورت برنامه‌ریزی کاربری اراضی با رویکرد اکولوژیکی تأکید داشته که این مسئله می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های حفاظت منابع آب و خاک منطقه مؤثر باشد.

جدول ۱- مقدار تولید آب (میلیون مترمکعب) کاربری‌های

اراضی آبخیز تالار طی سال‌های مطالعاتی

Table 1. Water yield (million cubic meters) by land use types in the Talar Watershed during the study years

Land Use Type	1989	2000	2014
Dry Farming	13.1	90.3	18.8
Forest	81.33	98.27	57.28
Irrigated Agriculture	82.4	25.6	59.6
Orchard	0.65	0.60	1.44
Rangeland	146.59	99.13	94.56
Residential Area	5.02	4.67	8.50
Total	192.02	142.52	147.85

براساس یافته‌های پژوهش حاضر و مندرج در جدول ۱، در حوزه آبخیز تالار میزان خدمت اکوسیستمی تولید آب از ۱۹۲/۰۲ به ۱۴۷/۸۵ میلیون مترمکعب و برابر با ۲۳ درصد طی سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ کاهش یافته است. کاهش ۱۴/۴۴ درصدی بارندگی و افزایش ۱۸/۸۳ درصدی دمای متوسط سالانه از جمله دلایل اصلی کاهش تولید آب طی دوره ۲۵ ساله پژوهش در آبخیز مطالعاتی هستند. Lian et al., (2020) نیز بر ارتباط بالای بارندگی سالانه با تولید آب (ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۵) تأکید کردند و نشان دادند که افزایش تولید آب در آبخیز دریاچه Qinghai چین ناشی از افزایش بارندگی سالانه است. بررسی نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر و مطابق با واسنجی مدل مورد استفاده با داده‌های ایستگاه هیدرومتری شیرگاه در خروجی حوضه مطالعاتی حاکی از

سطوح نفوذناپذیر و تبعاً نفوذ کمتر و تولید رواناب بیش‌تر (Tang et al., 2005; Perry and Nawaz, 2008) در این کاربری است. میزان نسبتاً زیاد تولید آب ویژه در کاربری‌های کشاورزی آبی و کشاورزی دیم نسبت به سایر کاربری‌ها به‌جز منطقه مسکونی را می‌توان به نفوذ کم آب در این کاربری‌ها مرتبط دانست.

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل الگوهای زمانی و مکانی خدمات اکوسیستمی تولید آب در حوزه آبخیز تالار واقع در منطقه هیرکانی شمال ایران طی یک دوره ۲۵ ساله با بهره‌گیری از مدل InVEST است. با توجه به اهمیت حیاتی این خدمت در حفظ پایداری منابع آبی، سلامت اکوسیستم‌های پایین‌دست و معیشت جوامع انسانی، بررسی تغییرات آن می‌تواند ابزاری مؤثر برای مدیریت پایدار منابع طبیعی به‌شمار رود. این مطالعه با تلفیق داده‌های کاربری اراضی، اقلیم و توپوگرافی، به تحلیل پویایی فضایی-زمانی خدمات اکوسیستمی تولید آب پرداخته است. براساس یافته‌های پژوهش، در حوزه آبخیز تالار میزان خدمات اکوسیستمی تولید آب از ۱۹۲/۰۲ به ۱۳۶/۸۵ میلیون مترمکعب و برابر با ۲۳ درصد طی سال‌های ۱۳۶۸ تا ۱۳۹۳ کاهش یافته است. نوسانات بارندگی و دمای هوای سالانه در کنار وضعیت توپوگرافی و نیز ویژگی‌های خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوهای مکانی تولید آب در منطقه مورد پژوهش ایفا کرده‌اند. تحلیل مکانی با مدل InVEST نشان داد که تولید آب در مناطق بالادست کوهستانی با پوشش طبیعی بیش‌تر بوده و در مناطق دشت پایین‌دست به‌واسطه تغییرات کاربری و فشار انسانی، کاهش یافته است. بررسی تولید سالانه آب در انواع کاربری اراضی آبخیز تالار نشان داد که کاربری مرتع بیش‌ترین و کاربری باغ کم‌ترین میانگین تولید آب را در دوره مورد مطالعه داشته‌اند، به‌طوری‌که میانگین سالانه تولید آب در این کاربری‌ها به‌ترتیب برابر با ۹۴/۵۶ و ۱/۴۴ میلیون مترمکعب بوده است. بهره‌گیری از مدل InVEST به‌عنوان ابزاری علمی و معتبر برای ارزیابی خدمات اکوسیستمی، استفاده از داده‌های مکانی و زمانی معتبر، و تحلیل بلندمدت ۲۵ ساله را می‌توان از نقاط قوت این پژوهش برشمرد. تمرکز بر منطقه‌ای حساس و محیط زیستی مانند جنگل‌های هیرکانی، ارزش افزوده مهمی برای این پژوهش محسوب می‌شود. با این حال، پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه بود که از جمله آن‌ها می‌توان به‌دسترسی محدود به داده‌های دقیق و با صحت بالای اقلیمی در برخی سال‌ها، عدم وجود ایستگاه‌های باران‌سنجی کافی در ارتفاعات و فقدان داده‌های بلندمدت مدیریت اراضی در منطقه اشاره کرد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای

تدوین سیاست‌های حفاظت منابع آب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی، احیای پوشش گیاهی مناطق کوهستانی و ارتقاء بهره‌وری اکوسیستم‌ها مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، بهره‌گیری از یافته‌های این پژوهش توسط سازمان‌ها و نهادهای اجرایی مرتبط مانند سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، سازمان حفاظت محیط زیست کشور و وزارت نیرو در راستای برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم، کاهش خطر سیلاب و ارتقاء امنیت آبی سودمند خواهد بود. استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی مانند SWAT^۱ برای تحلیل دقیق‌تر از فرآیندهای هیدرولوژیکی و مقایسه با نتایج پژوهش فعلی توصیه می‌شود. تلفیق داده‌های سنجش از دور با سنجنده‌های راداری و اپتیکی برای پایش دقیق‌تر کاربری/پوشش اراضی و رطوبت خاک از دیگر پیشنهادها پژوهش حاضر است. در نهایت، مشارکت جوامع محلی در حفاظت از منابع طبیعی و بهره‌گیری از نتایج این پژوهش در سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای، گامی مؤثر برای تحقق مدیریت پایدار منابع آب در منطقه مطالعاتی خواهد بود.

سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های معنوی دانشگاه تربیت مدرس سپاسگزاری به‌عمل می‌آید.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش وجود ندارند.

دسترسی به داده‌ها

تمام داده‌های تولید شده در متن مقاله حاضر ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

محسن ذبیحی: مفهوم‌سازی، روش کار، تجزیه و تحلیل و بررسی، تهیه نقشه‌ها، منابع، نگارش پیش‌نویس اصلی؛ حمیدرضا مرادی: مفهوم‌سازی، راهنمایی، تجزیه و تحلیل و بررسی، ویرایش و بازبینی مقاله؛ عبدالواحد خالدی‌درویشان: مفهوم‌سازی، روش کار، تجزیه و تحلیل و بررسی، منابع، ویرایش و بازبینی مقاله؛ مهدی غلامعلی‌فرد: مفهوم‌سازی، روش کار، تجزیه و تحلیل و بررسی، ویرایش و بازبینی مقاله

¹ Soil and Water Assessment Tool, SWAT

منابع

- طاهری محمدآبادی، نیکو، زارع چاهوکی، محمدعلی، آذرینوند، حسین (۱۴۰۴). مدل سازی تولید آب زیست بوم مراتع حوزه آبخیز دریاں سمنان با استفاده از نرم افزار InVEST. مرتع، ۱۹ (۱)، ۳۱-۱۴. doi: 10.1001.1.20080891.1404.19.1.2.5
- عرفانی، ملیحه، جورابیان شوشتری، شریف، اردکانی، طاهره و جهانی شکیب، فاطمه (۱۴۰۲). مدل سازی گرادیان مکانی خدمت اکوسیستمی تولید آب با InVEST در زیرحوزه های شمالی استان کرمان. مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۱): ۸۱-۶۳. doi: 10.22059/jwim.2023.349742.1024
- قابل نظام، اثنانز، مصطفی زاده، رئوف، اسمعیل عوری، ابادز و حزباوی، زینب (۱۴۰۱). اهمیت خدمات اکوسیستم آبخیز با تاکید بر نقش تولید رواناب و کاهش فرسایش. انسان و محیط زیست، ۳ (۲۰): ۱۵۵-۱۳۷.
- گلشن، محمد، اسمعیل عوری، ابادز و خسروی، خهبات (۱۳۹۷). ارزیابی حساسیت به سیل حوزه آبخیز تالار با استفاده از مدل نسبت فراوانی احتمالاتی. مخاطرات محیط طبیعی، ۷ (۱۵): ۱۶-۱. doi: 10.22111/jneh.2017.3120
- مصطفی زاده، رئوف، علائی، نازیلا و کاتب، فاطمه (۱۴۰۳). تعیین تغییرات بیلان آب و انرژی در مقیاس های مختلف زمانی با استفاده از منحنی بودیکو در آبخیز نیر، اردبیل. پژوهش های آبخیزداری، ۳۷ (۲)، ۳۹-۵۴. doi: 10.22092/wmrj.2023.362093.1538
- یار احمدی، جلال و رحیمی خوب، علی (۱۳۹۳). اصلاح معادله هارگریز با جایگزینی دمای سطح زمین بجای دمای هوا برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع. پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۱ (۶): ۲۴۵-۲۰۱. doi: 10.1001.1.23222069.1393.21.6.13.8.۲۳۹
- اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری مازندران. ۱۳۸۰. مطالعه جامع تفصیلی-اجرایی آبخیزداری حوزه آبخیز تالار. اداره کل منابع طبیعی و مدیریت حوزه آبخیز استان مازندران.
- اسدالهی، زهرا و کشتکار، مصطفی (۱۴۰۳). ارزیابی تعادل مکانی عرضه و تقاضای خدمات هیدرولوژیکی اکوسیستم در حوزه های آبخیز نیمه خشک ایران (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کرخه). تحقیقات منابع آب ایران، ۳۰ (۳): ۱۷-۱۱. doi: 10.22034/iwrr.2024.459671.2760.۱۱-۱۷
- جهاندار، جاوید، حجازی، رخشاد، جوزی، سید علی و مرادی، عباس (۱۴۰۱). اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی، زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم افزار InVEST. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۲ (۴): ۹۱-۱۰۶. doi: 10.22098/mmws.2022.11069.1097
- حقدادی، مهرناز، حشمتی، غلامعلی و عظیمی، مژگان سادات (۱۳۹۷). بررسی خدمت اکوسیستم تولید آب با استفاده از نرم افزار InVEST (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دلیچای). پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۵ (۴): ۲۹۰-۲۷۵. doi: 10.22069/jwsc.2018.13352.2800
- حمدی احمدآباد، یاسر، لیاقت، عبدالمجید، رسول زاده، علی و قادریور، رسول (۱۳۹۸). بررسی روند سرانه مصرف آب در ایران براساس رژیم غذایی دو دهه گذشت. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۱): ۸۷-۷۷. doi: 10.22059/ijswr.2018.246084.667795
- خوشخو، یونس، و نیک مهر، سامان (۱۴۰۰). به کارگیری دمای سطح زمین مستخرج از تصاویر ماهواره ای به منظور پهنه بندی تبخیر و تعرق مرجع محیط زیست و مهندسی آب، ۷ (۴): ۷۰۸-۷۲۲. doi: 10.22034/jewe.2021.293156.1591
- yield service flow based on the InVEST-Geoda-Gephi network: A case study on Wuyi Mountains, China. *Ecological Indicators*, 159, 111694. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.111694
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Faber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, Sh., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Van Den Belt, M., Sutton, P., 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. doi: 10.1038/387253a0
- El Jeitany, J., Pacetti, T., & Caporali, E. (2024). Evaluating climate change effects on hydrological functionality and water-related ecosystem services. *Ecohydrology*, 17(4), e2557. doi: 10.1002/eco.2557
- Erfani, M., Joorabian shooshtari, S., Ardakani, T. and Jahanishakib, F. (2023). Spatial gradient modeling of water yield service using InVEST in northern sub-basins of Kerman province. *Water and Irrigation Management*, 13(1), 63-81. doi: 10.22059/jwim.2023.349742.1024 [In Persian]
- Fan, M., & Shibata, H. (2014). Spatial and temporal analysis of hydrological provision ecosystem services for watershed conservation planning of

References

- Asadolahi, Z. and Keshtkar, M. (2024). Assessing the Spatial Supply-Demand Balance of Hydrological Ecosystem Services in Iran's Semi-Arid Watersheds (Case Study: Karkheh Watershed). *Iran-Water Resources Research*, 20(3), 1-17. doi:10.22034/iwrr.2024.459671.2760 [In Persian]
- Bai, Y., Ochudho, T.O., Yang, J. 2019. Impact of Land Use and Climate Change On Water-Related Ecosystem Services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 102: 51-64. doi:10.1016/j.ecolind.2019.01.079
- Belete, M., Deng, J., Wang, K., Zhou, M., Zhu, E., Shifaw, E., & Bayissa, Y. (2020). Evaluation of satellite rainfall products for modeling water yield over the source region of Blue Nile Basin. *Science of the total environment*, 708, 134834.
- Bosch, J.M., Hewlett, J.D. 1982. A Review of Catchment Experiments to Determine the Effect of Vegetation Changes On Water Yield and Evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 3-23. doi:10.1016/0022-1694(82)90117-2
- Chen, X., Lin, S., Tian, J., Wang, Y., Ye, Y., Dong, S., ... & Zhu, L. (2024). Simulation study on water

- water resources. *Water resources management*, 28, 3619-3636. doi: 10.1007/s11269-014-0691-2
- Fiener, P., Auerswald, K., & Van Oost, K. (2011). Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments- A review. *Earth-Science Reviews*, 106(1-2), 92-104. Doi:10.1016/j.earscirev.2011.01.004
- Foley, J. A., Asner, G. P., Costa, M. H., Coe, M. T., DeFries, R., Gibbs, H. K., ... & Snyder, P. (2007). Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(1), 25-32. doi: 10.1890/1540-9295(2007)5[25:ARFDAL]2.0.CO;2
- Gao, Z., Ju, X., Ding, J., Wang, Y., Shen, N., Zhang, X., & Li, M. (2025). Understanding water yield dynamics and drivers in the yellow river basin past trends, mechanisms, and future projections. *Journal of Cleaner Production*, 505, 145441 doi:10.1016/j.jclepro.2025.145441
- Ghabelnezhad, E., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., & Hazbavi, Z. (2022). The importance of watershed ecosystem services with emphasis on runoff yield and erosion control. *Human and Environment*, 62, 137-155. [In Persian]
- Golshan, M., Esmali Ouri, A. and Khosravi, K. (2018). Flood Susceptibility assessments Using Frequency Ratio model in Talar Watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(15), 1-16. doi: 10.22111/jneh.2017.3120 [In Persian]
- Güneralp, B., Xu, X., & Lin, W. (2021). Infrastructure development with (out) ecological conservation: the Northern Forests in İstanbul. *Regional Environmental Change*, 21(3), 86. doi:10.1007/s10113-021-01807-w
- Haghdadi, M., Heshmati, G. A. and Azimi, M. S. (2018). Assessment of Water yield service on the basis of InVEST tool (case study: Delichai watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(4), 275-290. doi: 10.22069/jwsc.2018.13352.2800 [In Persian]
- Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Rasoulzadeh, A. and 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. doi: 10.22059/ijswr.2018.246084.667795 [In Persian]
- Jafarzadeh, A.A., Mahdavi, A., FallahShamsi, R., Yousefpour, R., 2019. Annual Water Yield Estimation for Different Land Uses by GIS-Based InVEST Model (Case Study: Mish-khas Catchment, Ilam Province, Iran). *Journal of Rangeland Science*, 9(1), 1-12.
- Jahandari, J., Hejazi, R., Jozi, S. A. and Moradi, A. (2022). Impacts of urban expansion on spatio-temporal patterns of carbon storage ecosystem service in Bandar Abbas Watershed using InVEST software. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(4), 91-106. doi: 10.22098/mmws.2022.11069.1097
- Khoshkhoo, Y. and Nikmehr, S. (2021). Application of Land Surface Temperature Extracted from Satellite Images for Zoning Reference Evapotranspiration. *Environment and Water Engineering*, 7(4), 708-722. doi: 10.22034/jewe.2021.293156.1591 [In Persian]
- 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. doi:10.1016/j.pce.2017.06.003
- Lian, X.H., Qi, Y., Wang, H.W., Zhang, J.L., Yang, R., 2020. Assessing Changes of Water Yield in Qinghai Lake Watershed of China. *Water*, 12 (1), 11. doi: 10.3390/w12010011
- Millennium Ecosystem Assessment., Ecosystems and Human Well-being: Synthesis, 2005. Island Press, Washington, DC.
- Mostafazadeh, R., Alaei, N. and Kateb, F. (2024). Determining Changes in Water and Energy Balance in Different Time Scales Using Budyko Curve in the Nir Watershed, Ardabil. *Watershed Management Research*, 37(2), 39-54. doi: 10.22092/wmrj.2023.362093.1538
- DNRWM Mazandaran. 2001. Comprehensive detailed-executive study of watershed management in the Talar watershed. Department of Natural Resources and Watershed Management of Mazandaran Province [In Persian].
- Nelson, E., Mendoza, G., Regetz, J., Polasky, S., Tallis, H., Cameron, D., ... & Shaw, M. (2009). Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 4-11. doi:10.1890/080023
- Perry, T., Nawaz, R., 2008. An Investigation into The Extent and Impacts of Hard Surfacing of Domestic Gardens in an Area of Leeds, United Kingdom. *Landscape and Urban Planning*, 86 (1), 1-13. doi: 10.1016/j.landurbplan.2007.12.004
- Petsch, D. K., Cioneck, V. D. M., Thomaz, S. M., & Dos Santos, N. C. L. (2023). Ecosystem services provided by river-floodplain ecosystems. *Hydrobiologia*, 850(12), 2563-2584. doi: 10.1007/s10750-022-04916-7
- 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., Douglass, J., InVEST 3.5.0 User's Guide, 2018. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Taheri Mohammad Abadi N, Zare Chahouki M, Azarnivand H. (2025). Ecosystem Water Production Modeling of Rangeland in the Daryan Watershed, Semnan, Using InVEST Software. *Journal of Rangeland*, 19(1):14-31. doi: 20.1001.1.20080891.1404.19.1.2.5 [In Persian]
- Talebi Khiavi, H., & Mostafazadeh, R. (2021). Land use change dynamics assessment in the Khiavchai region, the hillside of Sabalan mountainous area. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-15. doi: 10.1007/s12517-021-08690-z
- Talebi Khiavi, H., Mostafazadeh, R., Asaadi, M. A., & Asbaghian Namini, S. K. (2022). Temporal land use change and its economic values under competing driving forces in a diverse land use configuration. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(20), 1597. doi: 10.1007/s12517-022-10890-0
- Tang, Z., Engel, B.A., Pijanowski, B.C., Lim, K.J., 2005. Forecasting Land Use Change and Its Environmental Impact at A Watershed Scale. *Journal of Environmental Management*, 76 (1), 35-45. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.01.006
- Van Den Bergh, T., Körner, C., Hiltbrunner, E., 2018. Alnus Shrub Expansion Increases Evapotranspiration in The Swiss Alps. *Regional Environmental Change*, 18 (5), 1375-1385. doi: 10.1007/s10113-017-1246-x
- Van der Biest, K., Vrebos, D., Staes, J., Boerema, A., Bodí, M.B., Fransen, E., Meire, P., 2015. Evaluation of the Accuracy of Land-Use Based Ecosystem Service Assessments for Different Thematic Resolutions. *Journal of environmental management*, 156, 41-51. doi: 10.1016/j.jenvman.2015.03.018
- Wang, S., Cai, T., Wen, Q., Yin, C., Han, J., & Zhang, Z. (2024). Spatiotemporal Dynamics of Ecosystem Water Yield Services and Responses to Future Land Use Scenarios in Henan Province, China. *Water*, 16(17), 2544. doi: 10.3390/w16172544
- Yarahmadi, J. and Rahimikhoob, A. (2015). Adjustment of Hargreaves equation by replacing land surface temperature instead of air temperature for estimating reference crop evapotranspiration. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(6), 239-254. doi: 20.1001.1.23222069.1393.21.6.13.8 [In Persian]
- Zabihi, M., Moradi, H., Gholamalifard, M., Khaledi Darvishan, A., & Fürst, C. (2020). Landscape management through change processes monitoring in Iran. *Sustainability*, 12(5), 1753. doi: 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. doi: 10.1007/s12665-016-6058-7.
- Zhang, X., Zhang, G., Long, X., Zhang, Q., Liu, D., Wu, H., & Li, S. (2021). Identifying the drivers of water yield ecosystem service: A case study in the Yangtze River Basin, China. *Ecological Indicators*, 132, 108304. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108304