

Spatial assessment and analysis of hydrological ecosystem services in the Neyshabur Watershed using InVEST software

Asma Badameh¹, Mahmood Azari^{2*} and Ali Golkarian³

¹ M.Sc. Graduation, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

² Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

³ Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 09 January 2025

Accepted: 26 May 2025

Extended abstract

Introduction

Natural ecosystems play a vital role in maintaining environmental processes and life-support systems, but due to land-use changes and improper management, essential ecosystem services for human well-being have declined. This reduction has led to problems in areas such as energy, climate, and ecosystem services. With increasing population and human needs, greater pressure has been placed on ecosystems, highlighting the global importance of ecosystem services worldwide. The InVEST model, developed by the Natural Capital Project, serves as a tool for assessing and mapping these services. The objective of this research is to spatially analyze the hydrological ecosystem services using the InVEST model in the Neyshabur Watershed.

Materials and methods

In this study, two sub-models—the Seasonal Water Yield and Sediment Delivery Ratio (SDR) models in InVEST—were used to assess water yield and estimate soil erosion in the study watershed. To run the model, inputs including Digital Elevation Model (DEM) maps, watershed and sub-watershed maps, precipitation, reference evapotranspiration, soil hydrological groups, land use, soil erodibility, rainfall erosivity, a biophysical data table, and the number of precipitation events were required. For calibration and validation of the model in the study area, data from three hydrometric stations in the watershed for the period 1982 to 1993 were used. Then, by adjusting the model's sensitive parameters, including β (local topographic and soil parameter), γ (parameter related to infiltration rate in cells), Z (number of rainfall events), CN values, k_b , and IC_0 (parameters for the relationship between hydrological connectivity and sediment delivery ratio), the model was calibrated within the allowed range. Calibration was performed using the discharge and sediment data recorded at the Bar, Taghun, and Zarandeh stations for the period 1982 to 1989, and validation was carried out for the period 1990 to 1993. To determine the hydrological ecosystem services, monthly temperature and precipitation maps from WorldClim for the period 1970 to 2000 with an appropriate resolution were used, and the model was run based on these data.

Results and discussion

Among the parameters α , β , γ , CN , Z , k_b , and IC_0 , the model showed the highest sensitivity to the parameters Z (number of rainfall events), CN values, k_b , and IC_0 . The spatial variation pattern of quickflow in the Neyshabur watershed indicates that quickflow is primarily influenced by precipitation. The northern, northeastern, and eastern parts of the watershed, due to steep slopes and intense rainfall, experience higher quickflow, while the southwestern, southern, and central areas of the watershed have lower quickflow. A strong correlation of 0.83 between precipitation and quickflow confirms the significant impact of precipitation on surface runoff. The average annual quickflow in the Neyshabur watershed is 34.3 mm. The highest quickflow occurs in sub-watershed 1, and the lowest in sub-watershed 4. Soils with low permeability in sub-watershed 1 lead to increased quickflow, while more permeable soils in sub-watershed 4 reduce it. Regarding water yield, the annual average water yield of the watershed is 43.4 mm. The highest water yield is reported in sub-watershed 1, while the lowest is in sub-watershed 5. These differences are

* Corresponding author: m.azari@um.ac.ir

mainly attributed to the climatic conditions and land-use types. The average erosion rate in the Neyshabur watershed is $0.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. The highest erosion occurs in sub-watershed 3, and the lowest in sub-watershed 4. Areas with steep slopes and intense rainfall are more prone to erosion. The most important finding regarding soil retention is that the soil retention rate in all sub-watersheds exceeds the erosion rate. Sub-watershed 3 has the highest soil retention, while sub-watershed 4, with the lowest soil retention, requires more protection. Forest, shrubland, and scrubland land uses have the greatest capacity to retain soil, while saline and marshy lands and residential areas play the least role in soil retention.

Conclusions

Determining the hydrological ecosystem services of watersheds is crucial for better and more targeted watershed management. This study was conducted to spatially analyze these services in the Neyshabur watershed in Razavi Khorasan Province. In the northern and northeastern parts of the watershed, higher water yield is observed, which could be considered for water resource exploitation and flood control measures in these areas. Regarding soil retention, the results indicate that sub-watershed 3, with the highest soil retention, has high potential for preventing erosion. In contrast, sub-watershed 4, with the lowest soil retention, has limited potential to prevent erosion. Overall, the findings highlight the importance of evaluating the spatial pattern of hydrological ecosystem services in watershed management.

Keywords: Quickflow, Soil erosion, Soil retention, Watershed management, Water yield

Cite this article: Badameh, A., Azari, M., Golkarian, A., 2026. Spatial assessment and analysis of hydrological ecosystem services in the Neyshabur Watershed using InVEST software. *Water. Eng. Manag.* 17(4), 514-533.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



ارزیابی و تحلیل مکانی خدمات بوم‌سازگان هیدرولوژیکی حوزه آبخیز نیشابور با استفاده از نرم‌افزار InVEST

اسما بادامه^۱، محمود آذری^{۲*} و علی گلکاریان^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰

چکیده مبسوط

مقدمه

بوم‌سازگان‌های طبیعی نقش حیاتی در حفظ فرایندهای محیطی و سامانه‌های حیاتی دارند، اما به دلیل تغییرات در استفاده از زمین و مدیریت نادرست، خدمات بوم‌سازگانی که برای حیات انسان ضروری هستند، کاهش یافته است. این کاهش باعث بروز مشکلاتی در زمینه‌های انرژی، آب و هوا و خدمات بوم‌سازگان شده است. با افزایش جمعیت و نیازهای انسانی، فشارها بر بوم‌سازگان‌ها بیشتر شده و این مسائل اهمیت خدمات بوم‌سازگانی را در سطح جهانی برجسته کرده است. نرم‌افزار InVEST به عنوان ابزاری برای ارزیابی و نقشه‌برداری از این خدمات، در پروژه سرمایه طبیعی توسعه یافته است. هدف این پژوهش کاربرد نرم‌افزار InVEST به منظور تحلیل مکانی خدمات بوم‌سازگان هیدرولوژیکی حوزه آبخیز نیشابور است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از دو زیرمدل تولید آب فصلی و مدل نسبت تحویل رسوب در InVEST برای ارزیابی میزان آبدهی و تعیین فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه استفاده شد. برای اجرای این مدل به نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع، حوضه و زیرحوضه‌ها، بارش، تبخیر و تعرق مرجع، گروه هیدرولوژیکی خاک، کاربری اراضی، فرسایش‌پذیری خاک، فرسایش‌پذیری باران و همچنین جدول اطلاعات بیوفیزیک و تعداد رویداد بارش نیاز است. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در حوضه مطالعاتی، از آمار سه ایستگاه هیدرومتری حوضه برای دوره ۱۹۸۲ تا ۱۹۹۳ استفاده شد. سپس با تنظیم پارامترهای حساس مدل، شامل پارامتر β (پارامتر توپوگرافی محلی و خاک)، γ (پارامتر میزان نفوذ در سلول)، Z (تعداد وقایع باران)، IC_0 و K_b (پارامترهای ارتباط بین اتصال هیدرولوژیکی و نسبت تحویل رسوب) در محدوده مجاز واسنجی شد. این واسنجی با استفاده از مقادیر دبی و رسوب ثبت‌شده در ایستگاه‌های بار اریه، طاعون و زرنده برای دوره ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۹ انجام و برای دوره ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳ اعتبارسنجی شد. برای تعیین خدمات بوم‌سازگان هیدرولوژیکی، نقشه‌های ماهانه دما و بارش WorldClim برای دوره ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ با تفکیک‌پذیری مناسب استفاده و مدل بر اساس آن اجرا شد.

* مسئول مکاتبات: m.azari@um.ac.ir

نتایج و بحث

از میان پارامترهای α , β , γ , CN , Z , K_b و IC_0 مدل بیشترین حساسیت را به پارامترهای Z (تعداد وقایع بارندگی)، CN ، IC_0 و K_b نشان داد. الگوی تغییرات مکانی رواناب در حوضه نیشابور نشان می‌دهد که رواناب عمدتاً تحت تأثیر بارش است. بخش‌های شمالی، شمال شرقی و شرق حوضه به دلیل شیب‌های تند و بارش‌های شدید، رواناب سریع‌تری دارند، در حالی که در بخش‌های جنوب غربی، جنوب و میانه حوضه، رواناب سریع کمتر است. همبستگی بالای 0.83 بین بارش و رواناب، تأثیر قوی بارش بر رواناب را تأیید می‌کند. مقدار متوسط رواناب سالانه در حوضه نیشابور $344/3$ میلی‌متر است. بالاترین مقدار رواناب سریع در زیرحوضه ۱ و کمترین مقدار در زیرحوضه ۴ مشاهده شده است. خاک‌های با نفوذپذیری کم در زیرحوضه ۱ باعث افزایش رواناب سریع شده، در حالی که خاک‌های نفوذپذیرتر در زیرحوضه ۴، این مقدار را کاهش می‌دهند. در زمینه آبدهی سالانه، متوسط سالانه آبدهی حوضه $43/4$ میلی‌متر است. بالاترین آبدهی در زیرحوضه ۱ و کمترین آن در زیرحوضه ۵ گزارش شده است. این تفاوت‌ها عمدتاً به تأثیرات شرایط اقلیمی و نوع کاربری اراضی مربوط می‌شوند. متوسط فرسایش در حوضه نیشابور برابر با 0.6 تن در هکتار در سال است. بالاترین میزان فرسایش در زیرحوضه ۳ و کمترین میزان در زیرحوضه ۴ مشاهده می‌شود. مناطق با شیب‌های زیاد و بارش‌های شدید بیشتر در معرض فرسایش هستند. مهم‌ترین یافته در زمینه نگهداشت خاک این است که میزان نگهداشت خاک در تمامی زیرحوضه‌ها بیشتر از میزان فرسایش است. زیرحوضه ۳ بالاترین میزان نگهداشت خاک را دارد، در حالی که زیرحوضه ۴ با کمترین میزان نگهداشت خاک به حفاظت بیشتری نیاز دارد. کاربری‌های جنگل و کاربری بیشه‌زار و درختچه بیشترین توانایی را در نگهداشت خاک و اراضی شور و نمک‌زار و کاربری مسکونی کمترین نقش در نگهداشت خاک را دارند.

نتیجه‌گیری

تعیین خدمات بوم‌سازگان هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز به منظور مدیریت بهتر و هدفمند حوضه حائز اهمیت است. این پژوهش با هدف تحلیل مکانی این خدمات در حوزه آبخیز نیشابور در استان خراسان رضوی انجام شد. در بخش‌های شمال و شمال شرقی حوضه مقدار آبدهی بیشتر است، این موضوع می‌تواند در بهره‌برداری از منابع آب حوضه و اجرای اقدامات کنترل سیل در این مناطق مد نظر قرار بگیرد. در بحث نگهداشت خاک نیز نتایج پژوهش بیانگر آن است که زیرحوضه ۳ با بیشترین میزان نگهداشت خاک، پتانسیل بالایی در جلوگیری از فرسایش را دارد. در مقابل، زیرحوضه ۴ با کمترین میزان از نگهداشت خاک، پتانسیل کمی در جلوگیری از فرسایش را دارد. در مجموع نتایج پژوهش بیانگر اهمیت بررسی الگوی ارائه خدمات بوم‌سازگانی هیدرولوژیکی در مدیریت حوزه‌های آبخیز است.

واژه‌های کلیدی: آبخیزداری، آبدهی، رواناب سریع، فرسایش خاک، نگهداشت خاک

مقدمه

بوم‌سازگان‌های طبیعی نقش حیاتی در حفظ فرایندهای محیطی و سامانه‌های حیاتی دارند (De Groot et al., 2002). خدمات بوم‌سازگانی به صورت فعال و غیرفعال، به رفاه بشر مرتبط می‌شوند و تأثیرات متعددی بر زندگی انسان‌ها دارند (Zhang et al., 2017). بر اساس تعریفی که در ماده ۲ کنوانسیون سازمان ملل درباره تنوع زیستی ارائه شده است، "بوم‌سازگان" به معنای یک سامانه زنده و پویا است که شامل جوامع گیاهی، جانوری، میکروارگانیسم‌ها و محیط‌های غیرزنده می‌شود که همگی به صورت یک

واحد کارکردی با یکدیگر در ارتباط هستند (Ritten et al., 2018).

خدمات بوم‌سازگان به چهار دسته اصلی شامل خدمات تنظیمی (مانند تصفیه آب و کنترل فرسایش خاک)، خدمات تأمینی (مانند آب شیرین و نیروی برق آبی)، خدمات فرهنگی (مانند تفریح و اکوتوریسم) و خدمات حمایتی (مانند تشکیل خاک) تقسیم می‌شوند (Brauman, 2015). خدمات هیدرولوژیکی بوم‌سازگان-ها، به فرایندهای مرتبط با آب بستگی دارند (Abson et al., 2014) و اغلب به وسیله بوم‌سازگان‌های خشکی و حوزه‌های آبخیز ارائه می‌شوند (Brauman, 2015).

این خدمات بر اساس کیفیت و کمیت آب قابل ارزیابی هستند. در دهه‌های اخیر، خدمات بوم‌سازگانی که برای حیات انسان ضروری هستند، به دلیل تغییرات گستره در استفاده از زمین و مدیریت نامناسب، در بسیاری از مناطق جهان کاهش یافته است.

با افزایش جمعیت و رشد نیازهای انسانی به منابع طبیعی محدود کره زمین، تقاضا برای این خدمات افزایش یافته، فشارهایی به بوم‌سازگان‌ها وارد کرده که به کاهش تنوع زیستی و بروز چالش‌هایی در زمینه‌های انرژی، آب و هوا و خدمات بوم‌سازگانی منجر شده است. این مسائل، اهمیت خدمات بوم‌سازگانی را در گفتمان‌های محیط زیستی بین‌المللی بیش از گذشته برجسته کرده است (Grunewald and Liu et al., 2010; Bastian, 2015) و محافظت از مناطقی که خدمات بوم‌سازگانی بالایی دارند از اهمیت ویژه‌ای برای مدیریت پایدار محیط زیست برخوردارند (Logsdon et al., 2013; Peng et al., 2018; Paudyal et al., 2019).

مطالعات اخیر نشان داده که توسعه کاربری‌های زمینی مانند کشاورزی و شهرسازی به همراه دیگر عوامل، به کاهش خدمات بوم‌سازگانی نظیر تثبیت کربن، کیفیت آب، تنوع زیستی و همچنین به افزایش جریان آب سطحی و فرسایش خاک منجر شده است (Huang et al., 2010). حفاظت خاک به‌عنوان یک خدمات تنظیم‌کننده حیاتی، در بوم‌سازگان‌ها است که از طریق ساختار و فرایندهای بوم‌سازگان‌ها عمل می‌کند. این خدمات به‌عنوان توانایی بوم‌سازگان‌ها در جلوگیری از فرسایش خاک، که یکی از مشکلات زیست‌محیطی مهم به‌شمار می‌رود، ارزیابی می‌شود (Zhao et al., Hou et al., 2024; Lu et al., 2022). یکی از شاخص‌های کلیدی برای سنجش این خدمات، "نگهداشت خاک"^۱ است (Hou et al., 2024). نگهداشت خاک به‌عنوان یک خدمات بوم‌سازگانی، در کنترل فرسایش و حفظ خاک است (Sharp et al., 2014). این شاخص نشان‌دهنده اثر پوشش گیاهی در جلوگیری از فرسایش خاک در چشم‌انداز است (Hou et al., 2024). برای ارزیابی و تحلیل مکانی خدمات هیدرولوژیکی بوم‌سازگان‌ها، روش‌های مختلفی مانند

اندازه‌گیری جریان، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و بررسی ارتباط بین کاربری زمین و خدمات ارائه شده وجود دارد (Brauman et al., 2007). یکی از ابزارهای مطرح در زمینه، مدل یکپارچه ارزشگذاری خدمات بوم‌سازگان^۲ است که به‌عنوان بخشی از پروژه سرمایه طبیعی توسعه یافته و متشکل از مجموعه‌ای از مدل‌های مستقل است (Asadolahi et al., 2015).

هدف اصلی توسعه نرم‌افزار InVEST، فراهم آوردن یک الگوی جامع برای درک توزیع مکانی خدمات بوم‌سازگان در سطح منطقه‌ای و تحلیل چگونگی تغییرات این خدمات در نتیجه تغییرات کاربری و پوشش زمین است (Sharp et al., 2014). با در نظر گرفتن تأثیرات گسترده فعالیت‌های بشری بر خدمات بوم‌سازگان، پژوهشگران قادرند با ارزیابی دقیق و کمی خدمات بوم‌سازگانی، به تحلیل و تفکیک استراتژی‌های مختلف مدیریتی و پایداری زمین بپردازند. این امر به آن‌ها امکان می‌دهد تا در جهت شناسایی، برنامه‌ریزی، مدیریت و اتخاذ تصمیمات مؤثر در خصوص خدمات بوم‌سازگانی مورد نظر، اقدامات لازم را انجام دهند (Logsdon et al., 2013; Huang et al., 2010).

نرم‌افزار InVEST در مقایسه با مدل‌های سنتی مانند SWAT و VIC، برتری قابل‌توجهی در تحلیل مکانی خدمات بوم‌سازگان دارد. این مدل با تکیه بر داده‌های ورودی کمتر، امکان ارزیابی مؤثر خدمات بوم‌سازگان را فراهم می‌کند. InVEST به‌ویژه در حوضه‌هایی با وسعت بالا، دسترسی میدانی محدود و نیاز به تجسم مکانی دقیق، عملکرد مناسبی دارد. بنابراین می‌تواند محدودیت‌های موجود در مطالعات پیشین را تا حد زیادی برطرف کند (Asadolahi and Mohammadyari, 2023; Keshtkar, 2019).

در انتخاب نرم‌افزار مناسب برای مدل‌سازی خدمات بوم‌سازگان، InVEST با ساختار مبتنی بر GIS و توانایی تحلیل مکانی، گزینه‌ای کاربردی محسوب می‌شود. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های محیطی و مدیریتی، شاخص‌های متعددی ارائه داده است. مزیت قابل‌توجه مدل InVEST آن است که امکان تحلیل خدمات را در مقیاس پیکسل فراهم می‌سازد، در حالی‌که بسیاری از

² Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST)

¹ Soil retention

مطالعات مشابه، صرفاً در مقیاس حوضه یا زیرحوضه عمل می‌کنند. این ویژگی، دقت مکانی بالاتری را در اولویت‌بندی مناطق و تصمیم‌گیری مدیریتی ممکن می‌سازد.

مطالعات مختلفی با هدف بررسی خدمات بوم‌سازگان هیدرولوژیکی انجام شده است. Asadolahi et al., (2015) به مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی نگهداشت خاک با نرم‌افزار InVEST در بخش شرقی حوزه آبخیز گرگان‌رود پرداختند. نتایج نشان داد، میزان هدر رفت خاک سالانه تا ۷۵ تن در سطح و نگهداشت سالانه خاک از ۰/۵ تا ۳۹۱۶ تن در هکتار در هر زیرحوضه متغیر است. (Haghdadi et al., 2018) بررسی تولید آب اکوسیستم با استفاده از نرم‌افزار InVEST در حوزه آبخیز دلیچای استان تهران پرداختند. نتایج نشان داد، بیشترین میزان تولید رواناب با مقدار ۲۹۲۳/۹ مترمکعب در هکتار مربوط به زمین‌های بایر بوده و پس از آن مناطق مسکونی و مرتع با مقدار ۲۳۷۰/۴ و ۱۲۶۳/۳ مترمکعب در هکتار بیشترین مقدار را دارا هستند.

Khosravi, (2020) به تغییرات زمانی و مکانی خدمات اکوسیستمی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز کشف رود با نرم‌افزار InVEST پرداخت. نتایج نشان داد، در دوره سوم مطالعاتی نسبت به دوره اول آبدهی حدود ۴/۸ درصد افزایش داشته است و نگهداشت رسوب در دوره دوم نسبت به دوره اول به میزان ۱۰ درصد کاهش داشته است. همچنین مقدار آبدهی در دوره دوم نسبت به دوره اول حدود ۲۳ درصد کاهش داشته که در زیرحوضه‌های مختلف از ۱۰ تا ۶۴ درصد متغیر است. Gashaw et al., (2021) به ارزیابی نرم‌افزار InVEST برای تخمین فرسایش خاک و رسوب خروجی در حوضه نیل آبی پرداختند. نتایج نشان داد، از دست دادن خاک برای حوضه‌های آنداسا و کوگا به ترتیب ۵۸/۲ و ۲۷/۳ تن در هکتار در سال و رسوب مشاهده شده حوضه آنداسا و کوگا به ترتیب ۱۹/۵ و شش تن در هکتار در سال است در حالی که رسوب خروجی مدل‌سازی شده به ترتیب ۱۸ و ۵/۱ تن در هکتار در سال برآورد شده است.

Chacko et al., (2022) به ارزیابی خدمات بوم‌سازگان تولید آب در حوزه آبخیز پریار، جنوب غربی

هند پرداختند. در این مطالعه از نرم‌افزار InVEST استفاده شده است. نتایج نشان داد، تولید آب به‌طور تخمینی $2/33 \times 10^9$ مترمکعب در سال است که ۶۷ درصد از حوزه آبخیز پریار و ۳۳ درصد از حوزه آبخیز پامبا تأمین شده است. همچنین جنگل‌های حوضه، بخش عمده‌ای از کل تولید آب، یعنی ۶۳/۵ درصد را به خود اختصاص می‌دهند. (Yu et al., 2022) با استفاده از نرم‌افزار InVEST به ارزیابی خدمات تولید آب در شانگریلا چین پرداختند. نتایج نشان داد، تولید آب شهر شانگریلا از شمال و جنوب به مرکز کاهش می‌یابد و روندی موقتی را از سال ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۵ با کاهش اولیه و به دنبال آن افزایش نشان می‌دهد همچنین تولید آب به ترتیب با بارش و تبخیر و تعرق همبستگی مثبت و منفی داشت.

Valencia et al., (2023) به ارزیابی مدل تولید آب سالانه InVEST برای رودخانه‌های کلمبیا و حوضه رودخانه متا پرداختند. نتایج نشان داد، کاهش ۳۰ درصد در مقادیر ضریب محصول (Kc) منجر به کاهش ۱۰/۷ درصد در تولید آب می‌شود. این مدل میانگین سالانه تولید آب در سال ۲۰۱۸ را ۶۲۷۳/۴ مترمکعب بر ثانیه برآورد کرد که ۱/۳ درصد کمتر از مقدار گزارش شده است. همچنین ضرایب همبستگی در واسنجی و صحت‌سنجی برای زیرحوضه‌های رودخانه متا، رودخانه یوکائو، رودخانه کراوو جنوبی و زیرحوضه‌های رودخانه کاساناره ۰/۷۹ و ۰/۸۳، ۰/۴ و ۰/۲۲، ۰/۵ و ۰/۲۵- و صفر گزارش شده است.

Zhao et al., (2023) به بررسی یک ابزار جدید برای ارائه نقشه آبدهی در مناطق سرد آلپ با نرم‌افزار InVEST پرداختند. نتایج نشان داد، زمین‌های یخ‌زده به‌عنوان یک لایه کم نفوذ عمل می‌کند که نفوذ آب را کاهش می‌دهد، در حالی که پوشش برف از طریق فرایندهای ذوب و تصعید بر آبدهی تأثیر می‌گذارد، هر دوی این عوامل می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر توزیع رواناب سریع مکانی و زمانی و جریان پایه تأثیر بگذارند. میانگین سالانه جریان پایه و آبدهی به ترتیب ۱۳ میلی‌متر و ۱۴ میلی‌متر بیش از حد تخمین زده شد. علاوه بر این، اگر تأثیر زمین یخ‌زده بر آبدهی محاسبه نشود، به‌طور متوسط هر سال شش میلی‌متر از رواناب

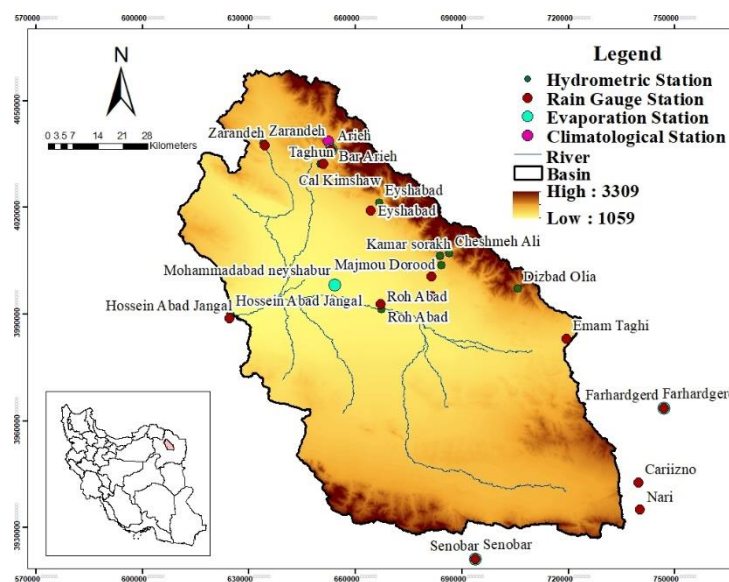
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز نیشابور، که جزئی از بزرگ حوضه کویر مرکزی است، دارای وسعت ۹۱۵۷ کیلومتر مربع است و در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۸ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی قرار دارد. این حوضه از شمال به رشته کوه‌های بینالود، از شرق به ارتفاعات لیلاجوق و یال پلنگ، از جنوب به تپه‌های نیزه بند و کوه‌های سیاه و نمک، و از غرب به حوزه آبخیز دشت سبزوار محدود می‌شود (Saadatpour et al., 2019).

شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. حوزه آبخیز نیشابور دارای شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک است. میانگین دمای منطقه ۱۲ درجه سانتی‌گراد و میزان بارندگی سالانه ۲۲۲ میلی‌متر گزارش شده است. بر اساس آمار ۴۰ ساله، میانگین بارندگی حوضه ۲۴۷ میلی‌متر است. میزان تبخیر به دلیل بالا بودن دمای هوا زیاد است و میانگین آن برای کل حوضه ۲۳۳۵ میلی‌متر در سال است (Sarvari, 2019).

سریع به اشتباه به‌عنوان جریان پایه تخمین زده می‌شود.

Suryanta et al., (2024) به مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل دینامیک آب برای خدمات بوم‌سازگان در حوزه آبخیز مرکزی سیتاروم، اندونزی پرداختند. در این مطالعه از نرم‌افزار InVEST و MGWR استفاده شد. نتایج نشان داد، کاهش پوشش زمین و افزایش تقاضای خدمات بوم‌سازگانی در حوزه آبخیز، همراه با کاهش تولید آب است و برخی از مناطق با کمبود آب مواجه هستند، در حالی که برخی دیگر دارای منابع آبی فراوان هستند. مرور منابع دلالت بر اهمیت تعیین خدمات بوم‌سازگانی هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها و نقش کاربری های زمین در مناطق مختلف جهان دارد که می‌تواند نقش مهمی در تدوین استراتژی‌های مدیریتی حوضه داشته باشد. از این‌رو هدف اصلی این پژوهش تحلیل مکانی خدمات بوم‌سازگانی هیدرولوژیکی حوزه و زیرحوضه‌های آبخیز نیشابور در استان خراسان رضوی برای یک دوره ۳۰ ساله است که در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها و برنامه مدیریت حوضه می‌تواند به‌کار رود.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز نیشابور

Fig. 1. Location of Neyshabour Watershed

Seasonal Water Yield و Sediment Delivery Ratio برای ارزیابی میزان تولید آب حوضه و تأثیر آن‌ها در جلوگیری از فرسایش خاک استفاده شد. اجرای این

نرم‌افزار InVEST: با توجه به هدف این پژوهش، از نرم‌افزار InVEST برای تعیین خدمات بوم‌سازگانی هیدرولوژیکی حوضه (آبدی، رواناب و فرسایش خاک خاک) استفاده شد. در این مطالعه از دو زیر مدل

در رابطه (۱) T دمای متوسط ماهانه و TR اختلاف متوسط دمای بیشینه و کمینه است (Alizadeh, 2008).

$$ET_0 = 0.0023 R_a (T + 17.8) \sqrt{TR} \quad (1)$$

نقشه و اطلاعات خاک: یکی دیگر از ورودی‌های مدل مقدار CN، نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک و نقشه کاربری اراضی است. در نرم‌افزار InVEST برای محاسبه رواناب از روش SCS استفاده می‌شود. برای محاسبه CN، نقشه‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی و همچنین نقشه بافت خاک از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شد و پس از روی هم گذاری مقدار CN برای هر واحد تعیین شد. همچنین نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک براساس اطلاعات بافت خاک تهیه شد.

فرسایش‌پذیری خاک: نقشه فرسایش‌پذیری خاک^۱ یکی دیگر از اطلاعات ورودی مدل است. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های جهانی خاک ارائه شده در پایگاه SoilGrids و با به کارگیری اطلاعات بافت خاک، مقدار شاخص فرسایش پذیری خاک (K)، براساس رابطه Renard et al., (1997) به دست آمد (رابطه ۲). داده‌های SoilGrids با استفاده از روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین و بیش از ۲۳۰ هزار پروفیل خاک از پایگاه WoSIS تهیه شده‌اند.

خروجی‌های این سامانه شامل نقشه‌های جهانی ویژگی‌های خاک در شش عمق استاندارد و با دقت مکانی ۲۵۰ متر است (ISRIC, 2020). در این رابطه، K عامل فرسایش پذیری خاک (تن در ساعت در هکتار بر مگاژول در هکتار در میلی‌متر)، M عامل بافت خاک است که با استفاده از درصد رس و شن ریز (اندازه ۰/۰۰۲ تا ۰/۱ میلی‌متر) تعیین می‌شود. OM مقدار ماده آلی خاک به درصد، S طبقه ساختمان خاک و P طبقه نفوذپذیری خاک است. شکل ۲ نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک، نقشه کاربری اراضی حوضه، نقشه شماره منحنی و نقشه فرسایش پذیری خاک را نشان می‌دهد.

$$K = 0.01 [2/1 * 10^{-4} * M^{1/4} * (12 - OM) + 3/25 * (s - 2) + 2/5 * (P - 3)] * 0.1317 \quad (2)$$

مدل نیازمند یک سری داده‌های مکانی و توصیفی است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

مدل رقومی ارتفاع (DEM): به منظور تعیین حوضه و زیرحوضه‌ها و ارتباط هیدرولوژیکی حوضه از مدل رقومی ارتفاع استفاده می‌شود. در این پژوهش از مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر استفاده شد که از سایت سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) دریافت شد. **نقشه بارش حوضه:** بارش عامل مهمی در میزان آب تولید شده یک بوم‌سازگان و میزان فرسایش خاک و رسوب است. در این پژوهش از آمار روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه برای دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۳ به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد که از شرکت سهامی آب منطقه‌ای و اداره کل هواشناسی خراسان رضوی دریافت شد. سپس داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های منتخب به داده‌های ماهانه تبدیل شد و با استفاده از روش درون‌یابی kriging نقشه بارش حوضه تهیه شد.

با توجه به لزوم پیوستگی در سری داده‌ها و پوشش مکانی مناسب، برای تعیین خدمات هیدرولوژیکی بوم‌سازگان، برای دوره مورد مطالعه از داده‌های بارش پایگاه WorldClim استفاده شد. WorldClim، یک پایگاه اطلاعاتی بین المللی اقلیم جهان با وضوح مکانی بالا (تقریباً یک کیلومتر مربع) است که برای تهیه نقشه و مدل‌سازی مکانی استفاده می‌شود. نسخه ۲/۱ نقشه های WorldClim برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۰ در ژانویه ۲۰۲۰ منتشر شده است. طبق مطالعات صحت‌سنجی انجام شده در مقیاس جهانی، همبستگی برای داده‌های دما و رطوبت بیشتر یا مساوی ۰/۹۹، بارش ۰/۸۶ و برای سرعت باد ۰/۷۶ است (Fick and Hijmans, 2017).

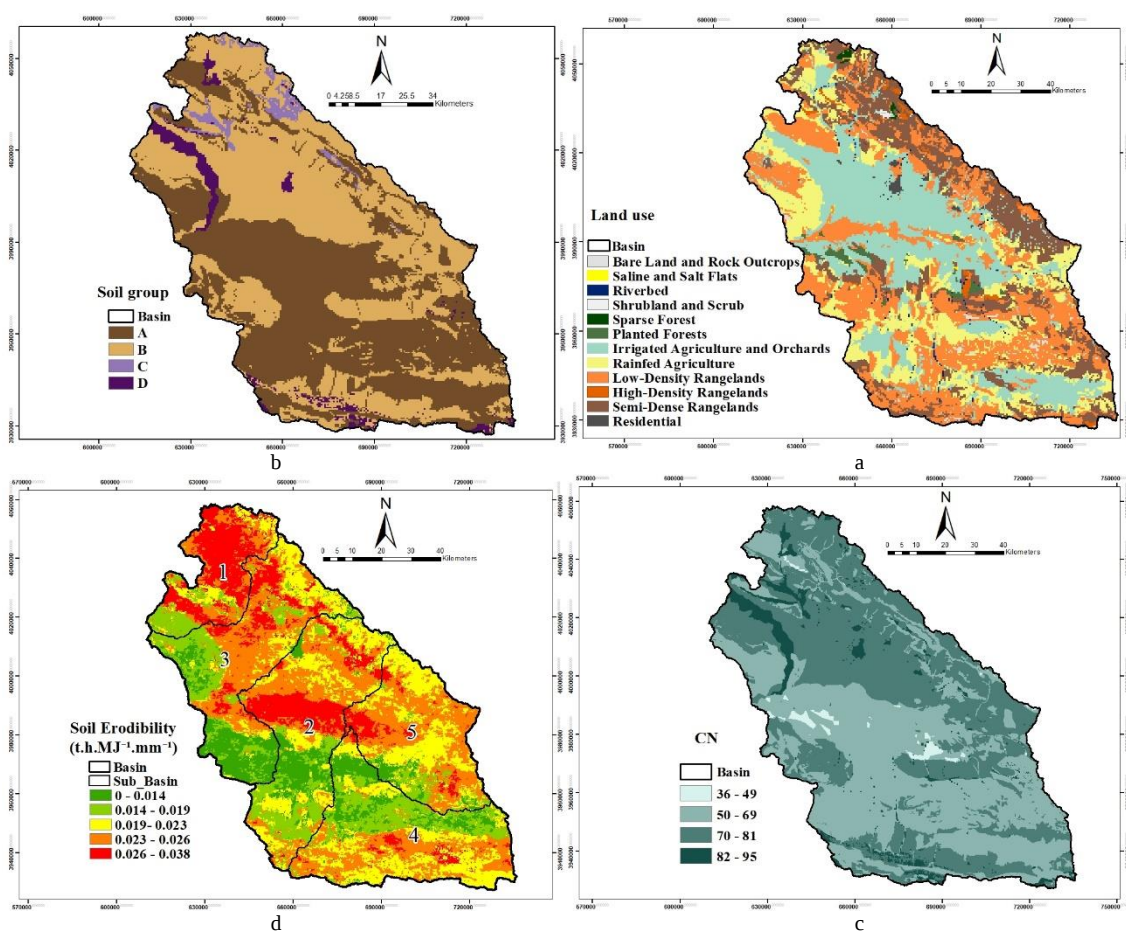
نقشه تبخیر تعرق مرجع (ET₀): در این پژوهش از روش Hargreaves Samani, (1985) برای تهیه نقشه تبخیر تعرق مرجع استفاده شد (رابطه ۱). طبق این رابطه برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع نیاز به داده‌های دمای کمینه و بیشینه، همچنین تابش خورشیدی (R_a) است که با استفاده از عرض جغرافیایی تعیین می‌شود.

¹ Soil Erodibility

$$R = \sum_{i=1}^{n+2} 1/735 * 10^{(1/5 * \log(\frac{P_i^2}{p}) - 0/08188)} \quad (3)$$

پارامترهای بیوفیزیکی: برای اجرای نرم‌افزار InVEST اطلاعات بیوفیزیکی مربوط به هر یک از طبقات کاربری اراضی و پوشش زمین نیاز است. این اطلاعات با توجه به نوع کاربری از منابع مربوطه استخراج شد. جدول ۱، پارامترهای بیوفیزیکی برای هر یک از طبقات کاربری زمین را نشان می‌دهد.

نقشه فرساینده‌گی باران: عامل فرساینده‌گی باران^۱ نیازمند داده‌های رگبار در پایه‌های زمانی کوتاه مدت می‌باشد که برای بسیاری از مناطق قابل دسترس نیست از این‌رو در این پژوهش نقشه فرساینده‌گی باران با رابطه بین فرساینده‌گی باران و بارش ماهانه Arnoldus, (1980) تهیه شد (رابطه ۳). در این رابطه P_i مقدار بارندگی ماهانه (میلی‌متر) و P مقدار بارندگی سالانه (میلی‌متر) است که از داده‌های بارش WorldClim برای این منظور استفاده شد.



شکل ۲- (الف) نقشه کاربری اراضی، (ب) نقشه گروه هیدرولوژیکی خاک، (ج) نقشه شماره منحنی و (د) نقشه فرسایش‌پذیری خاک حوزه آبخیز نیشابور

Fig. 2. (a) Land use map, (b) Soil hydrological group map, (c) Curve number map, and (d) Soil erodibility map of the Neyshabur Watershed

به‌دست آمد در انتها پس از تعیین تعداد رگبار ایستگاه‌ها میانگین تعداد رگبار سه ایستگاه برای هر ماه ثبت شد.

واسنجی و اعتبار سنجی نرم‌افزار InVEST: واسنجی مدل به معنای تنظیم پارامترهای ورودی مدل،

تعداد رگبار بارش: برای برآورد رواناب و آبدهی نیاز به تعداد رویداد بارش در هر ماه است. آمار بارش ماهانه ایستگاه بار اریه، طاعون و زرنده، برای دوره ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳ اخذ شد سپس برای هر ایستگاه به صورت جداگانه، میانگین تعداد رگبار ۱۲ ماه

¹ Rainfall erosivity

به گونه‌ای است که مقادیر پیش‌بینی شده مدل کمترین اختلاف را با مقادیر مشاهداتی داشته باشند (Jorenush et al., 2023). هدف از اعتبار سنجی مدل، اطمینان به مدل است که با به‌کارگیری پارامترهای واسنجی شده و لایه‌های اطلاعاتی از دوره‌ای متفاوت حاصل می‌شود (Hossein Zadeh Kohi and

Ardestani, 2022). برای واسنجی و اعتبارسنجی حوضه مورد مطالعه مدل با مقادیر دبی و رسوب در ایستگاه‌های بار اریه، طاغون و زرنده، برای دوره ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۹ واسنجی شد و با استفاده از داده‌های دوره ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۳ اعتبار سنجی شد.

جدول ۱- شاخص‌های بیوفیزیکی طبقات پوشش گیاهی حوزه آبخیز نیشابور

Table 1. Biophysical parameters of vegetation classes of the Neyshabur Watershed

Land use	P	C	CN_A	CN_B	CN_C	CN_D
Bare Land and Rock Outcrops	1	0.25	74	84	90	92
Saline and Salt Flats	1	0.25	74	84	90	92
Riverbed	1	0.001	30	58	71	78
Shrubland and Scrub	1	0.01	45	66	77	83
Sparse Forest	1	0.003	36	60	73	79
Planted Forests	1	0.003	36	60	73	79
Irrigated Agriculture and Orchards	1	0.006	36	75	82	86
Rainfed Agriculture	1	0.0001	65	76	84	88
Low-Density Rangelands	1	0.16	68	79	86	89
High-Density Rangelands	1	0.14	39	61	74	80
Semi-Dense Rangelands	1	0.18	49	69	79	84
Residential	1	0.001	98	98	98	98

بدین منظور مقدار آب پایه از جریان مستقیم رواناب جداسازی شد. و مقادیر ماهانه رواناب برای این سه زیرحوضه محاسبه شد. پس از آن، برای واسنجی مقدار رسوب حوضه، میانگین سالانه رسوب معلق دو زیرحوضه با استفاده از رابطه دبی-رسوب ایستگاه تعیین شد. سپس با تنظیم پارامترهای حساس مدل شامل پارامتر β (پارامتر توپوگرافی محلی و خاک)، Y (پارامتر میزان نفوذ در سلول)، Z (تعداد وقایع باران)، CN ، IC_0 و K_b (پارامترهای ارتباط بین اتصال هیدرولوژیکی و نسبت تحویل رسوب^۱) در حدود مجاز، واسنجی و اعتبارسنجی مدل انجام شد.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت و واسنجی و اعتبار سنجی مدل: از میان پارامترهای α ، β ، Y ، CN ، Z ، K_b و IC_0 مدل بیشترین حساسیت را به پارامترهای Z (تعداد وقایع بارندگی)، CN ، IC_0 و K_b نشان داد. در مطالعات انجام شده به‌وسیله (Pessacg et al., Zhang et al., 2012)، (Khosravi, 2020) نیز پارامتر Z به‌عنوان پارامتر حساس معرفی شده است. همچنین IC_0 و K_b

به‌عنوان پارامترهای حساس در مطالعه Hamel and Guswa, (2015)، (Khosravi, 2020) ذکر شده است. جدول ۲ نتایج مربوط به سنج‌های ارزیابی مدل برای رواناب سریع مشاهداتی و پیش‌بینی مدل ارائه شده است. شکل‌های ۳ و ۴ نیز وضعیت رسوب و رواناب برای دوره واسنجی و اعتبار سنجی را نشان می‌دهد. **پارامترهای اقلیمی ورودی نرم‌افزار InVEST:** اطلاعات اقلیمی ورودی نرم‌افزار InVEST شامل داده‌های بارش و تبخیر تعرق مرجع است. میانگین بارش در حوزه مورد مطالعه ۲۹۷/۴ میلی‌متر است، مقدار آن طبق جدول ۳، در زیرحوضه‌ها از ۲۸۸ میلی‌متر تا ۳۳۰ میلی‌متر متغیر بوده است. همچنین، میانگین تبخیر تعرق مرجع ۱۱۷۸/۵۵ میلی‌متر است، که دامنه تغییرات آن بین ۱۱۵۴/۳۷ میلی‌متر تا ۱۲۰۸/۲۵ میلی‌متر قرار دارد. طبق شکل ۵ توزیع مکانی بارش نشان می‌دهد که در نواحی شمال و شمال شرق حوضه، بارش به میزان قابل توجهی بیشتر است. این نواحی شامل کوه‌های بینالود هستند که تأثیر چشم‌گیری در میزان بارش دارند. در مقابل، در نواحی میانی و غربی حوضه، میزان بارش کاهش می‌یابد.

¹ Sediment Delivery Ratio

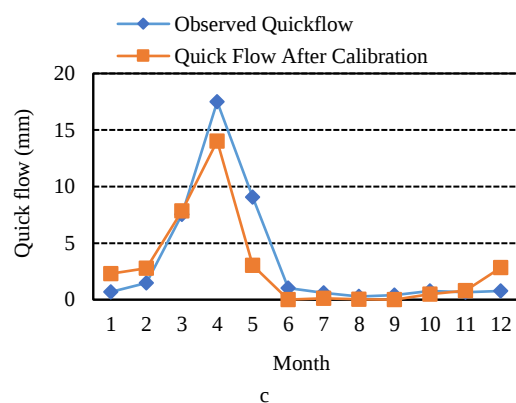
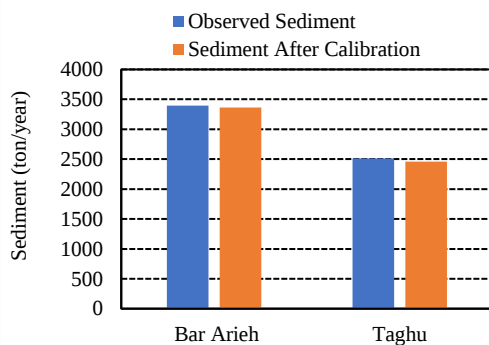
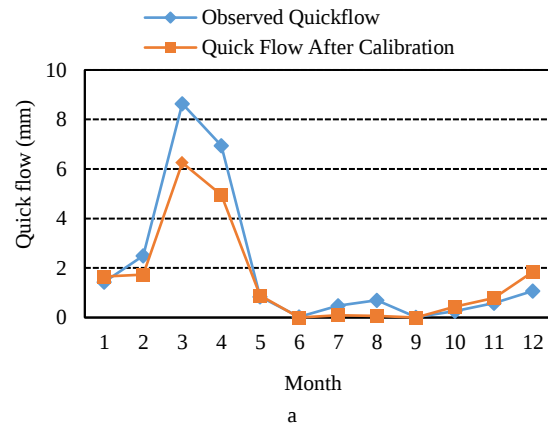
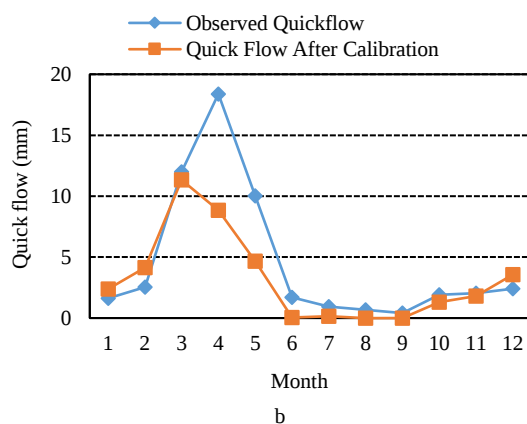
خاص، در جنگل‌های دست‌کاشت تبخیر و تعرق بیشتری مشاهده می‌شود که این پدیده را می‌توان به مقادیر بالاتر ضریب گیاهی آن‌ها نسبت به سایر کاربری‌ها نسبت داد. در مقابل، در مراتع متراکم، تبخیر و تعرق کمتری مشاهده می‌شود.

در مورد تبخیر تعرق مرجع، در شکل ۵ مشاهده می‌شود که در نواحی شرقی حوضه، تبخیر تعرق کمتری برآورد شده است. اما در مناطق مرکزی و غربی حوضه، میزان تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد. میزان تبخیر و تعرق تحت تأثیر نوع کاربری اراضی قرار دارد. به‌طور

جدول ۲- نتایج مقادیر سنج‌های آماری برای رواناب سریع در ایستگاه‌های مختلف حوزه آبخیز نیشابور (دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۳)

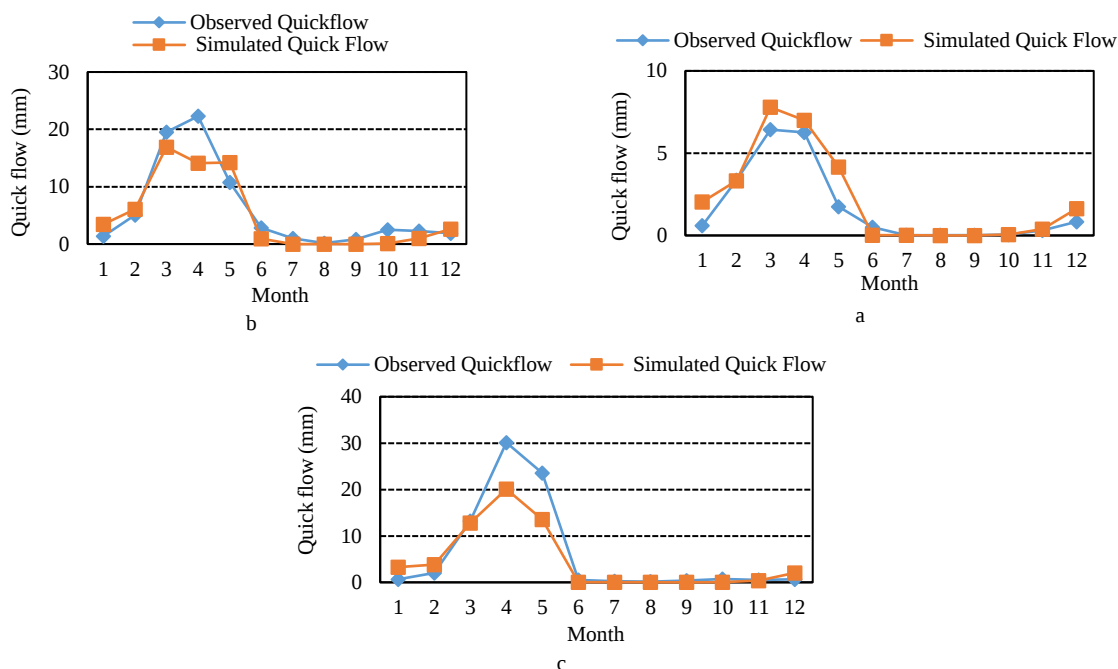
Table 2. The results of statistical measures for quickflow at different stations of the Neyshabur Watershed (period 1982-1993)

Station	Coefficients	Calibration	Validation
Zarande	RMSE	0.98	0.97
	NS	0.87	0.82
	R2	0.96	0.92
	MAE	0.64	0.62
Bar Arie	RMSE	3.28	2.95
	NS	0.64	0.83
	R2	0.76	0.86
	MAE	1.95	2.13
Taghun	RMSE	2.21	4.22
	NS	0.81	0.82
	R2	0.84	0.94
	MAE	1.45	2.37



شکل ۳- رواناب سریع ماهانه مشاهداتی و پیش‌بینی شده مدل در ایستگاه (الف) زرنده، (ب) باراریه، (ج) طاغون و (د) رسوب سالانه مشاهداتی و پیش‌بینی مدل در ایستگاه باراریه و طاغون

Fig. 3. Observed and predicted quickflow Hydrograps (a) Zarandeh quickflow, (b) Bar Arie quickflow, (c) Taghun quickflow and (d) Bar Arie and Taghun sediment



شکل ۴- هیدروگراف رواناب سریع ماهانه مشاهداتی و اعتبار سنجی شده (الف) زرنده، (ب) باراریه و (ج) طاغون
Fig. 4. Observed and validated monthly quickflow hydrograph of (a) Zarandeh, (b) Bar Arieih and (c) Taghun

متوسط رواناب سالانه در کل حوضه $34/3$ میلی‌متر برآورد شده است. بیشترین مقدار رواناب سریع در زیرحوضه ۱ با مقدار $39/24$ میلی‌متر و کمترین مقدار رواناب در زیرحوضه ۴ با $31/21$ میلی‌متر تعیین شده است (شکل ۷). زیرحوضه ۱ در مقایسه با سایر زیرحوضه‌ها بیشترین سهم در تولید رواناب کل حوضه را دارد که این امر عمدتاً به ویژگی‌های خاص خاک و نفوذپذیری کم حوضه بستگی دارد.

بر اساس نقشه گروه‌های هیدرولوژیک حوضه، خاک این زیرحوضه به گروه‌های B و D تعلق دارد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که مقدار رواناب سریع در این زیرحوضه افزایش یابد. در زیرحوضه ۱، شیب زیاد ($14/8$ درصد) و کاربری اراضی غالب که مراتع نیمه‌مراکم هستند، موجب افزایش مقدار رواناب در این بخش شده است. شیب بالا در این منطقه تأثیر به‌سزایی در کاهش ماندگاری آب در سطح دارد، به‌طوری‌که مقدار نفوذ آب به خاک را کاهش داده و جریان سطحی را افزایش می‌دهد. این الگو با یافته‌های Jabbari Zahra et al., (2022) و Moghadamirad et al., (2017) و Khazaei et al., (2021) همخوانی دارد.

در مقابل، در زیرحوضه ۴، تولید رواناب کم است که این به‌دلیل خاک‌هایی با نفوذپذیری بالا (گروه A) و

تحلیل مکانی رواناب سریع: رواناب سریع روانابی است که در مدت کوتاهی پس از باران تشکیل می‌شود و به جریان آب می‌رسد (Gashaw et al., 2022). براساس شکل ۶ الگوی تغییرات مکانی رواناب تا حدود زیادی از الگوی تغییرات مکانی بارش حوضه تبعیت می‌کند. به گونه‌ای که رواناب سریع در بخش‌های شمال، شمال شرقی و شرق حوضه بیشتر است، درحالی‌که در بخش‌های جنوب غربی، غرب و میانه حوضه، مقادیر رواناب سریع کمتر است.

بر اساس نتایج برآورد شده از منطقه، میزان بارش و تبخیر تعرق به‌ترتیب در زیرحوضه ۱ برابر با 330 و $1180/14$ میلی‌متر، و در زیرحوضه ۴ برابر با 288 و $1154/37$ میلی‌متر بوده است. در بررسی همبستگی پارامترها در تحلیل رواناب، بیشترین همبستگی با بارش ($0/83$) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر قوی بارش بر رواناب است. پس از آن، تبخیر تعرق با مقدار همبستگی $0/58$ و شیب با مقدار همبستگی $0/38$ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. در مطالعات متعدد از جمله Ebadifrd and Ebrahimi et al (2010) و Baygan, (2018) Farshidnia and Fatehi- Nobarrian, (2023) ارتباط خطی میان بارش و رواناب تأیید شده است.

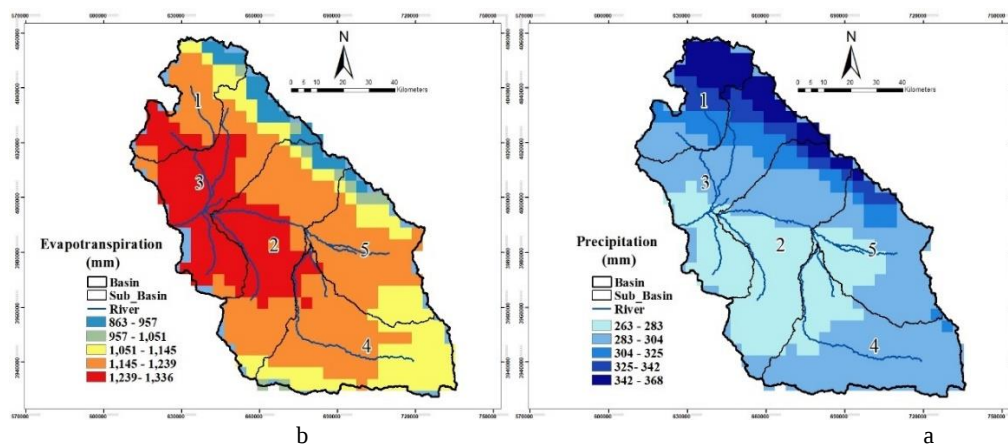
مدیریت صحیح منابع آب در حوزه‌های آبخیز یکی از ارکان اساسی برای دستیابی به پایداری محیطی است. از این‌رو، ضروری است که سازه‌های آبی به‌گونه‌ای طراحی شوند که در فصل بارانی، رواناب منجر به سیلاب نشود و در فصل خشک نیز کمبود آب ایجاد نشود (Lismadanti et al., 2024). نتایج به‌دست‌آمده از الگوی مکانی رواناب، نشان‌دهنده لزوم توجه به پتانسیل بالای زیرحوضه ۱ در وقوع سیلاب است و نیاز به برنامه‌های کنترل رواناب و ذخیره‌سازی آب در این مناطق احساس می‌شود.

مقدار CN پایین در این زیرحوضه است. همچنین، تغییرات مکانی توپوگرافی و نوع کاربری اراضی حوضه نقش مهمی در تغییرات مکانی رواناب ایفا می‌کنند. در بررسی تولید رواناب در کاربری‌های مختلف، مناطق مسکونی به‌دلیل نفوذپذیری پایین، سهم بالایی در تولید رواناب دارند (Khosravi, 2020)، در حالی که کاربری‌هایی نظیر زراعت آبی که عمدتاً در بخش‌های غربی و جنوبی حوضه قرار دارند، به‌دلیل افزایش ضریب نگهداشت آب و کاهش شماره منحنی، رواناب کمتری تولید کرده‌اند (Chamani et al., 2023).

جدول ۳- متوسط بارش و تبخیر تعرق سالانه (میلی‌متر) حوزه آبخیز نیشابور طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰

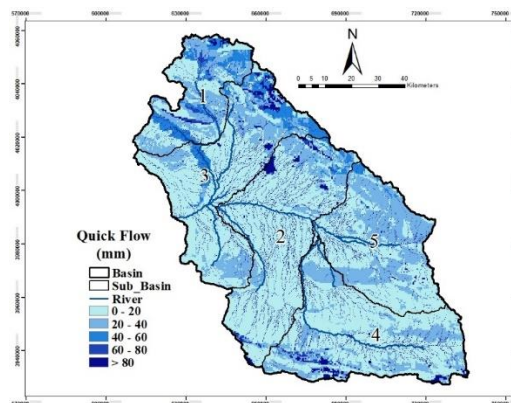
Table 3. Average annual precipitation and evapotranspiration (mm) of the Neyshabur watershed during the period 1970-2000

Sub-basin	Precipitation	Evapotranspiration
1	330	1180.14
2	289	1208.25
3	300	1207.24
4	288	1154.37
5	294	1156.17



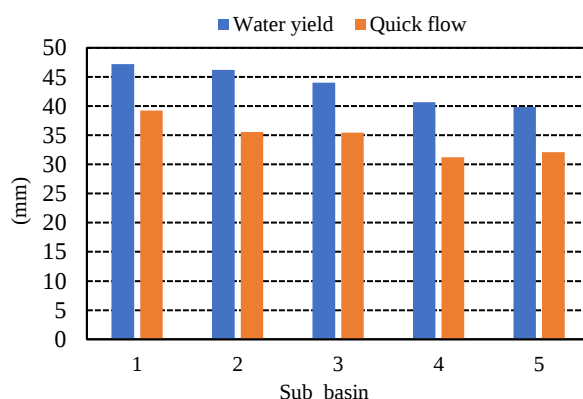
شکل ۵- (الف) نقشه بارش، (ب) نقشه تبخیر تعرق مرجع (میلی‌متر) حوزه آبخیز نیشابور طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰

Fig. 5. (a) Precipitation map, (b) Evapotranspiration map (mm) of the Neyshabur watershed during the period 1970-2000



شکل ۶- نقشه رواناب سریع سالانه (میلی‌متر) حوزه آبخیز نیشابور طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰

Fig. 6. Annual quickflow map (mm) of the Neyshabur watershed during the period 1970-2000



شکل ۷- میزان رواناب سریع سالانه و آبدهی (میلی‌متر) در زیر حوضه‌های حوزه آبخیز نیشابور طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰
Fig. 7. Annual quickflow and Water yield rate in the sub-basins of the Neyshabur watershed during the period 1970-2000

اراضی یک مسئله مهم زیست‌محیطی است که بر خدمات بوم‌سازگان و به ویژه خدمات بوم‌سازگان آب تأثیر می‌گذارد (Liu et al., 2021). کاربری اراضی می‌تواند جریان هیدرولوژیکی را با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی سطح حوضه، خاک و پوشش گیاهی، از جمله زبری سطح، آلودگی، ظرفیت نفوذ، عمق ریشه، شاخص پوشش گیاهی و هدایت روزنه‌ای تغییر دهد (Wei et al., 2021).

بر اساس مطالعه Bonan, (2015) آبدهی بیشتر تحت تأثیر فرایندهای بارش، تبخیر و تعرق قرار دارد و تغییرات در کاربری اراضی که ناشی از فعالیت‌های انسانی است، به طور غیر مستقیم بر آن تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی، بیشترین مقدار آبدهی در مناطق مسکونی و اراضی شور و نم‌زار مشاهده شده است که این امر به دلیل نفوذپذیری کم و عدم نگهداری آب در این اراضی و سهم بالای تولید رواناب سریع است. در مقابل، جنگل‌های تنک و جنگل‌های دست‌کاشت کمترین مقدار آبدهی را داشته‌اند.

اراضی جنگلی، مستلزم مصرف مقادیر نسبتاً زیاد آب هستند و ضریب تبخیر و تعرق این اراضی نیز بالا است (Yu et al., 2022). این نتایج با پژوهش‌هایی که نشان می‌دهند جنگل‌کاری (جنگل‌های دست‌کاشت) می‌تواند منجر به کاهش آبدهی حوزه‌های آبخیز، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شود، هم‌خوانی دارد (Sun et al., 2006). همچنین، این الگو با یافته‌های Khosravi, (2020) نیز مطابقت دارد.

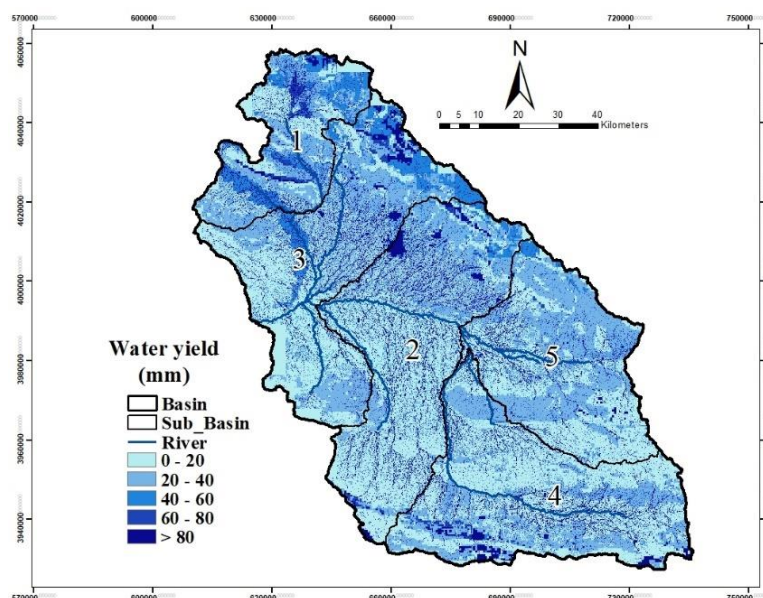
تحلیل مکانی آبدهی: آبدهی، به‌عنوان شاخصی برای نشان دادن سهم نسبی هر بخش از حوضه در تولید جریان پایه و رواناب سریع است (Sahel et al., 2019). شکل ۸ نشان می‌دهد که تغییرات مکانی آبدهی در بخش‌های شمال و شمال شرقی حوضه بیشتر است، در حالی که در بخش‌های جنوب شرقی تا میانه حوضه، مقادیر آبدهی کمتر است. مقدار متوسط آبدهی سالانه حوضه نیشابور در دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰ برابر با ۴۳/۴ میلی‌متر (۴۰۲ میلیون متر مکعب) برآورد شده است. بیشترین آبدهی مربوط به زیرحوضه ۱ با مقدار ۴۷/۲۰ میلی‌متر (۵۱ میلیون متر مکعب) است. در مقابل، کمترین آبدهی مربوط به زیرحوضه ۵ با مقدار ۳۹/۸۴ میلی‌متر (۸۴ میلیون متر مکعب) است (شکل ۷).

طبق نتایج برآورد شده، مقدار بارش و تبخیر تعرق به ترتیب ۳۳۰، ۱۱۸۰/۱۴ میلی‌متر (زیرحوضه ۱) و ۲۹۴، ۱۱۵۶/۱۷ میلی‌متر (زیرحوضه ۵) بوده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر ترکیب تعاملات بین عوامل مختلف بیشتر از تأثیر هر یک از عوامل به‌طور جداگانه است. به عبارت دیگر در تحلیل آبدهی، تبخیر تعرق با مقدار همبستگی ۰/۷۳ و بارش با مقدار همبستگی ۰/۶۰ تأثیرات قابل توجهی دارند و شیب نیز تأثیر کمتری (۰/۰۰۹) بر مقدار آبدهی دارد. بنابراین، بارش و تبخیر تعرق از عوامل اصلی تأثیرگذار بر مقدار آبدهی هستند.

علاوه بر عوامل اقلیمی عامل دیگری نظیر کاربری اراضی نیز بر آبدهی تأثیرگذار است. تغییر در کاربری

مناطق که سهم بالاتری در تولید آب دارند (مانند زیرحوضه ۱)، نقش حیاتی در تأمین آب حوزه آبخیز ایفا می‌کنند. از این رو، حفظ منابع آب این مناطق باید در اولویت قرار گیرد. که این موضوع در حوزه آبخیز نیشابور که یکی از مناطق مهم برای تولیدات زراعی در استان شناخته می‌شود، اهمیت مضاعف دارد.

زیرحوضه ۱ که بیشترین آبدهی را دارد، عمدتاً شامل مراتع نیمه‌متراکم در مناطق مرتفع ارتفاعات بینالود است. درحالی‌که زیرحوضه ۵ شامل مراتع نیمه‌متراکم، مراتع کم‌تراکم و بخش کمی از جنگل‌های دست‌کاشت در قسمت غربی زیرحوضه است.



شکل ۸- نقشه آبدهی (میلی‌متر) حوزه آبخیز نیشابور طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰

Fig. 8. Water yield map (mm) of the Neyshabur watershed during the period 1970-2000

خاک می‌شود (Vaezi and Mohammadi, 2021). یکی دیگر از عوامل تاثیر گذار در تغییرات مکانی فرسایش خاک، الگوی تغییرات مکانی توپوگرافی می‌باشد. این عامل به ویژه در مناطق کوهستانی با دامنه وسیع تغییرات توپوگرافی، تأثیر زیادی بر فرسایش خاک دارد. در واقع، تغییرات قابل توجه در شیب‌ها در مناطق کوهستانی به‌عنوان یکی از عوامل، در تعیین الگوی مکانی فرسایش خاک شناخته می‌شود (Khaledi Darvishan et al., 2021).

مقدار فرسایش خاک در زیر حوضه‌ها به تفکیک در جدول ۴ ارائه شده است. بر این اساس متوسط فرسایش خاک در حوضه نیشابور برابر با ۰/۶ تن در هکتار در سال به‌دست آمده است. البته باید عنوان کرد که این میزان فرسایش با توجه به روش مورد استفاده در نرم‌افزار InVEST که روش RUSLE است فقط شامل فرسایش آبی می‌شود و فرسایش کل حوضه را شامل نمی‌شود این حال، در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها قابل استفاده است. از سوی دیگر با توجه به بارش کم در

تحلیل مکانی فرسایش و نگهداشت خاک:

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در قسمت‌های شرقی و شمال شرق حوضه، به ویژه در مناطق کوهستانی بینالود، میزان فرسایش خاک بیشتر است. در این مناطق، کاربری مراتع نیمه‌متراکم، غالب است و فرسایش خاک در این بخش‌ها بیشتر از سایر کاربری‌ها تخمین زده شده است. در این نواحی به دلیل بارش بیشتر و به تبع آن افزایش فرساینده‌گی باران فرسایش بیشتر است. البته شیب زیاد، رواناب بالا و بهره‌برداری بی‌رویه از مراتع نیز موجب تشدید فرسایش خاک حوضه شده است (Hejazi and Borumand, 2014; Bayati and Karami, 2019).

عامل فرساینده‌گی باران یکی از متغیرهای کلیدی در مدل‌های فرسایش خاک است و در معادلات جهانی فرسایش خاک مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش شیب، میزان جدایش خاک و انتقال ذرات به‌وسیله جریان آب افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش تنش برشی جریان و در نتیجه فرسایش بیشتر

مناطق مرکزی حوضه و شیب ناچیز این مقدار دور از انتظار نیست. کمترین مقدار فرسایش خاک در زیر حوضه ۴ با مقدار ۰/۴۲ تن در هکتار در سال و بیشترین مقدار فرسایش خاک با مقدار ۰/۷۳ تن در هکتار در سال در زیر حوضه ۳ مشاهده می‌شود. بارش در این زیر حوضه‌ها نیز به ترتیب ۲۸۸ و ۳۰۰ میلی‌متر به‌دست آمد. تغییرات مکانی بارش به‌طور مشابه تغییرات فرسایش خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، که در مطالعات متعددی مانند Dash and Maity, (2023) و Teymouri et al., (2018) نیز عنوان شده‌است.

در زیرحوضه ۴، کمترین میزان فرسایش خاک مربوط به کاربری زراعت آبی است. این امر به دلیل کم بودن شیب (۱۱/۴ درصد) و همچنین CN پایین برآورد شده است. نکته قابل توجه این است که کاربری زراعت آبی عمدتاً در بخش‌های میانی حوضه واقع شده است، جایی که فرسایش باران در این مناطق نسبت به سایر بخش‌ها کمتر به‌دست آمده است. در نهایت، میزان متوسط فرسایش خاک با یافته‌های سایر مطالعاتی که در سطح حوضه انجام شده است (Mohammadi et al., 2018) انطباق دارد.

نتایج مدل نشان داد که کاربری‌های اراضی مختلف از نظر توانایی نگهداشت خاک تفاوت‌های قابل توجهی دارند. بیشترین توانایی در نگهداشت خاک مربوط به کاربری جنگل تنک بود، در حالی که بعد از آن، اراضی بیشه زار و درختچه توانسته‌اند بیشترین نقش را در حفظ خاک ایفا کنند. از سوی دیگر، کمترین توانایی در نگهداشت خاک به اراضی شور و نمک‌زار اختصاص داشت و پس از آن، مناطق مسکونی کمترین اثر را در این زمینه داشتند. مطالعات Bartley et al., (2006) و همچنین Bautista et al., (2007) نیز نشان داد که فرسایش و نگهداشت خاک به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و میزان پوشش گیاهی قرار دارند.

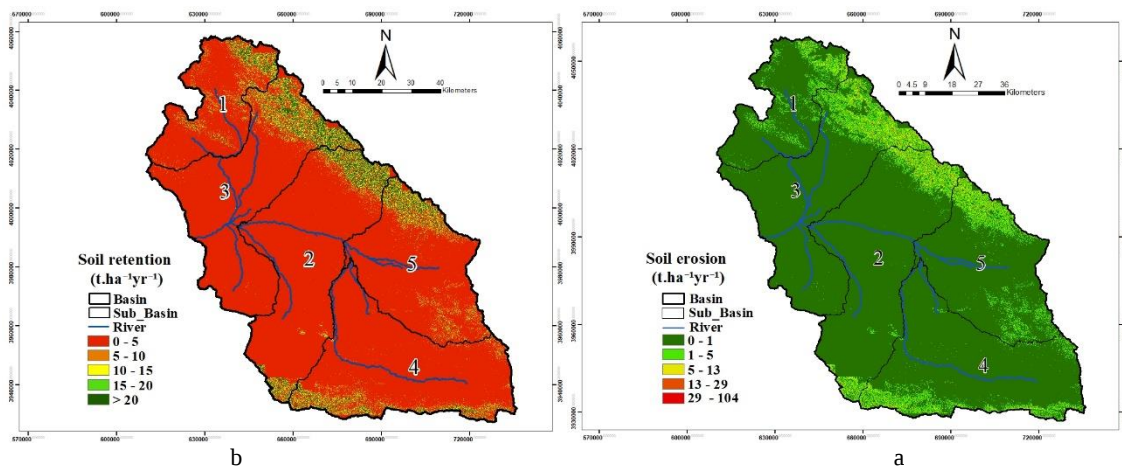
طبق جدول ۴ میزان نگهداشت خاک در تمامی زیرحوضه‌ها بیشتر از میزان فرسایش خاک است، که به معنای نقش مثبت پوشش گیاهی در حفظ فرسایش است. زیرحوضه ۳ بالاترین میزان فرسایش خاک (۰/۷۳ تن بر هکتار در سال) و نگهداشت خاک (۴/۱۰ تن بر هکتار در سال) را نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده پتانسیل بالا در جلوگیری از فرسایش است.

در این بخش باید برنامه‌هایی برای کاهش میزان فرسایش مانند کنترل جریان آب سطحی، بهبود پوشش گیاهی و تقویت ظرفیت نگهداری خاک اجرا شود. در مقابل، زیرحوضه ۴ با کمترین میزان فرسایش خاک (۰/۴۲ تن بر هکتار در سال) و نگهداشت خاک (۲/۴۴ تن بر هکتار در سال) نیاز به اقدامات حفاظتی بیشتری دارد. زیر حوضه ۲ و ۵ نیاز به اقدامات حفاظتی برای کاهش فرسایش خاک را دارد، چرا که فرسایش خاک قابل توجهی تولید می‌کند، اما پتانسیل بالایی در نگهداشت فرسایش خاک را ندارند.

قسمت‌های کوهستانی حوضه که ارتفاع زیاد و شیب‌های تندی دارند، به دلیل بارش‌های زیاد، مستعد فرسایش بودند. با این حال، وجود جنگل‌ها تنک و بیشه زار در بخش کوچکی از زیر حوضه ۳ باعث افزایش نگهداشت خاک در این نواحی می‌شود. اهمیت پوشش جنگلی به‌عنوان منبع اصلی تأمین خدمات بوم‌سازگان، از جمله نگهداشت خاک، در مناطق مختلف نیز قابل مشاهده است (Asadolahi et al., 2015). یکی از اولویت‌های اصلی در خدمات بوم‌سازگانی مربوط به خاک، حفظ و گسترش پوشش گیاهی، به ویژه در مناطق حساس مانند کوهستان‌ها و مناطق با شیب‌های تند باشد. همچنین توجه به مدیریت کاربری اراضی در مناطقی با اراضی شور و نمک‌زار و مناطق مسکونی ضروری است تا از فرسایش بیشتر جلوگیری شود.

جدول ۴- میزان فرسایش خاک و نگهداشت خاک (تن/هکتار/سال) در زیر حوضه‌های حوزه آبخیز نیشابور طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰

Table 4. Soil erosion rate and soil retention (to/ha/yr) in the sub-basins of the Neyshabur watershed during the period 1970-2000		
Sub-basin	Soil erosion	Soil retention
1	0.60	4.05
2	0.64	3.60
3	0.73	4.10
4	0.42	2.44
5	0.64	3.51



شکل ۹- (الف) نقشه فرسایش خاک، (ب) نقشه نگهداشت خاک (تن/هکتار/سال) حوزه آبخیز نیشابور طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۰
Fig. 9. (a) Soil erosion map, (b) Soil retention map (to/ha/yr) of the Neyshabur watershed during the period 1970-2000

نتیجه‌گیری

تعیین خدمات بوم‌سازگانی هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز به‌منظور مدیریت بهتر و هدفمند حوضه حائز اهمیت است. این پژوهش با هدف تحلیل مکانی این خدمات در حوزه آبخیز نیشابور در استان خراسان رضوی انجام شد. الگوی تغییرات مکانی رواناب سریع و آبدی سالانه حوضه بیانگر این است که عواملی نظیر آب و هوا، نوع خاک و کاربری، همچنین عوامل فیزیوگرافی تاثیر زیادی در ارائه این خدمات دارند. در بخش‌های شمال و شمال شرقی حوضه مقدار آبدی بیشتر است، در حالی که در بخش‌های جنوب شرقی تا میانه حوضه، مقادیر آبدی کمتر است. این موضوع می‌تواند در بهره‌برداری از منابع آب حوضه در ارتفاعات شمالی و شمال شرق حوضه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین پتانسیل بالای تولید رواناب سطحی می‌تواند باعث وقوع سیلاب در این بخش‌ها شود که لزوم اجرای اقدامات کنترل سیل در این مناطق را نشان می‌دهد.

در بحث نگهداشت خاک نیز نتایج پژوهش بیانگر آن است که زیرحوضه ۳ با بیشترین میزان نگهداشت خاک، پتانسیل بالایی در جلوگیری از فرسایش را دارد. در مقابل، زیرحوضه ۴ با کمترین میزان از نگهداشت خاک، پتانسیل کمی در جلوگیری از فرسایش را دارد. همچنین در کاربری جنگل تنک، بیشه‌زار و درختچه زار مقدار نگهداشت خاک بیشتر از سایر کاربری‌ها

برآورد شده است که این موضع لزوم توجه به نقش پوشش گیاهی و مدیریت جنگل برای بخش‌هایی که خدمت نگهداشت خاک بالایی دارند را مورد تاکید قرار می‌دهد.

در مجموع یافته‌های پژوهش حاضر بیانگر آن است که زیرحوضه ۱ به‌عنوان مهمترین بخش حوضه در تولید رواناب سریع و آبدی به مدیریت دقیق‌تری برای جلوگیری از سیلاب‌ها و بهینه‌سازی ذخیره‌سازی آب نیاز دارد. این اقدام می‌تواند به حفظ تعادل بوم‌سازگان‌های آبی و جلوگیری از خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها کمک کند. همچنین در بحث حفاظت خاک، اهمیت حفاظت از پوشش‌های جنگلی برای حفظ استمرار تدارک خدمات نگهداشت خاک امری حیاتی محسوب می‌شود.

تشکر و قدردانی

از سازمان آب منطقه خراسان رضوی، اداره کل هواشناسی خراسان رضوی و شرکت مهندسی مشاور ساز و آب شرق به دلیل تامین داده‌های پژوهش حاضر تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

منابع مورد استفاده

- Abson, D.J., Von Wehrden, H., Baumgärtner, S., Fischer, J., Hanspach, J., Härdtle, W., Heinrichs, H., Klein, A.M., Lang, D.J., Martens, P., Walmsle, D., 2014. Ecosystem services as a boundary object for sustainability. *Ecol. Economic.* 103, 29-37.
- Alizadeh, A., 2008. Principles of applied hydrology. Imam Reza University Press, Astan Quds Razavi, 815 pages (in Persian).
- Arnoldus, H.M.J., 1980. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. 127-132, In: M. de Boodts and D. Gabriels (eds), *Assessment of Erosion*, Wiley.
- Asadolahi, Z., Keshtkar, M., 2019. Comparative study of ecosystem hydrological services modeling tools. *J. Water Sustain. Develop.* 6(2), 47-54 (in Persian).
- Asadolahi, Z., Salmanmahiny, A., Mirkarimi, S.H., Azimi, M., 2015. Modeling sediment retention ecosystem service using InVEST software (case study: Eastern part of Gorganrud-Rud Watershed). *Environ. Erosion Res.* 5(3), 61-75 (in Persian).
- Bartley, R., Roth, C.H., Ludwig, J., McJannet, D., Liedloff, A., Corfield, J., Hawdon, A., Abbott, B., 2006. Runoff and erosion from Australia's tropical semiarid rangelands: Influence of ground cover for differing space and time scales. *Hydrol. Process.: An Int. J.* 20(15), 3317-3333.
- Bautista, S., Mayor, A.G., Bourakhouadar, J., Bellot, J., 2007. Plant spatial pattern predicts hill slope runoff and erosion in a semiarid Mediterranean landscape. *J. Ecosys.* 10, 987-998.
- Bayati, M., Karami, F., 2019. The time and runoff velocity estimation on slopes of Ojan Chay watershed. *Quantita. Geomorphol. Res.* 7(4), 1-14 (in Persian).
- Bonan, G., 2015. *Ecological climatology: concepts and applications*; Cambridge University Press: Cambridge, UK. 68pp
- Brauman, K.A., 2015. Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *Wiley Interdisciplinary Rev.: Water* 2(4), 345-358.
- Brauman, K.A., Daily, G.C., Duarte, T.K., Mooney, H.A., 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual Rev. Environ. Res.* 32(1), 67-98.
- Chacko, S., Kurian, J., Ravichandran, C., Vairavel, S.M., Kumar, K., 2022. Water yield ecosystem services assessment in periyar tiger reserve. In *Geospatial Information Handbook for Water Resources and Watershed Management*, Volume III (187-201), CRC Press.
- Chamani, R., Mostafazadeh, R., Kolehrouei, M., Haji, K., 2023. Determining the spatial correlation and pattern of changes in the height and volume of runoff in the sub-watersheds of Sharganj Birjand region. *Quantita. Geomorphol. Res.* 12(3), 201-219 (in Persian).
- Dash, S.S., Maity, R., 2023. Effect of climate change on soil erosion indicates a dominance of rainfall over LULC changes. *J. Hydrol.: Region. Studie.* 47, 101373.
- De Groot, R.S., Wilson, M.A., Boumans, R.M., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecol. Economic.* 41(3), 393-408.
- Ebadi Far, M., Baygan, A., 2017. Investigation of the relationship between precipitation and annual runoff (case study: Navroud Watershed in Gilan Province). In *Proceedings of the 2nd National* (in Persian).
- Ebrahimi, H., Nasrazadani, A., Ramazani, B., Jeddi Mostafalou, A., 2009. Investigating the relationship between rainfall and runoff in the watershed of the Barjstanak dam. The 5th National Conference of Iran's Watershed Science and Engineering (Sustainable Management of Natural Disasters) (in Persian).
- Farshidnia, S., Fatehi-Nobarian, B., 2023. A study of discharge estimation using justin's method and comparison with experimental methods (case study: The Central Alborz Sub-Basins). *New Approach. Civil Engin.* 7(2), 1-12 (in Persian).
- Fick, S.E., Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37(12), 4302-4315.
- Gashaw, T., Bantider, A., Zeleke, G., Alamirew, T., Jemberu, W., Worqlul, A.W., Dile, Y.T., Bewket, W., Meshesha, D.T., Adem, A.A., Addisu, S., 2021. Evaluating InVEST model for estimating soil loss and sediment export in data scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implications for land managers. *Environ. Challenge.* 5, 100381.
- Gashaw, T., Worqlul, A.W., Dile, Y.T., Sahle, M., Adem, A.A., Bantider, A., Teixeira, Z., Alamirew, T., Meshesha, D.T., Bayable, G., 2022. Evaluating InVEST model for simulating annual and seasonal water yield in data-scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: implications for water resource planners and managers. *Sustain. Water Resourc. Manage.* 8(5), 170.
- Grunewald, K., Bastian, O. (Eds.), 2015. *Ecosystem services—concept, methods and case studies*. Springer, 366 pages.
- Haghdadi, M., Heshmati, Gh.A., Azimi, M.S., 2018. Assessment of water yield service on the basis of InVEST tool (case study: Delichai watershed). *J. Water Soil Conserv.* 25(4), 275-290 (in Persian).

- Hamel, P., Guswa, A.J., 2015. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina. *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 19(2), 839-853.
- Hamel, P., Valencia, J., Schmitt, R., Shrestha, M., Piman, T., Sharp, R.P., Francesconi, W., Guswa, A.J., 2020. Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *J. Environ. Manage.* 270, 110792.
- Hejazi, A., Boroumand, R., 2014. An analysis on the evaluation of the causes of erosion and the estimation of the amount of sediment in the mountain basins of semi-arid regions (case: Farob Roman Neyshabur Watershed). *Quantita. Geomorphol. Res.* 3(1), 128-146 (in Persian).
- Hossein Zadeh Kuhi, H., Ardestani, M., 2022. Modeling and quantitative investigation of the groundwater condition of the South Mehyar-Dasht Asman aquifer using the MODFLOW model. *Water Soil Manage. Model.* 4(1), 1-17 (in Persian).
- Hou, X., Yang, H., Cao, J., 2024. The spatial and temporal dynamics of soil conservation and its influencing factors in the ten tributaries of the upper yellow river, China. *Water* 16(20), 2888.
- Huang, X., Chen, Y., Ma, J., Chen, Y., 2010. Study on change in value of ecosystem service function of Tarim River. *Acta Ecol. Sinica.* 30(2), 67-75.
- ISRIC, 2020. SoilGrids-global gridded soil information. ISRIC-World Soil Information. <https://www.isric.org/explore/soilgrids> (accessed 17 May 2020).
- Jabbari Zahra, A., Mohammadi Ghalehi, M., Moghaddasi, M., Dehban, H., 2022. The effect of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion using a rainfall simulator. *Environ. Erosion Res. J.* 12(1), 113-128 (in Persian).
- Jorenush, M.H., Egdernezhad, A., Shahrokhnia, M.A., Ebrahimi Pak, N.A., 2023. Evaluation of AquaCrop model for simulation of Wheat plant (Triticum) yield under different scenarios of agricultural management in Qazvin. *Water Soil Manage. Model.* 4(1), 1-16 (in Persian).
- Khaledi Darvishan, A., Faraji, J., Gholami, L., Khorsand, M., 2021. Spatio-temporal variation of soil erosion in Khamsan representative watershed using RUSLE. *Water. Engin. Manage.* 13(3), 534-547 (in Persian).
- Khazaei, M., Bayat R., Saleh, I., 2021. Effects of rainfall and slope components on runoff and soil erosion in dry lands (case study: Gachsaran Dry Lands). *J. Water. Manage. Res.* 12(24), 182-192 (in Persian).
- Khosravi, A., 2019. Temporal and spatial changes of hydrological ecosystem services of the Kashfer Watershed. MSc Thesis, Ferdowsi University (in Persian).
- Lismadanti, A., Christanto, N., Effendi, I., 2024. Enhancing watershed management through seasonal water yield modelling using InVEST (case study: Rawa Pening Catchment Area). In *IOP Conference Series: Earth Environ. Sci.* 1313(1), 012003. IOP Publishing.
- Liu, M., Min, L., Zhao, J., Shen, Y., Pei, H., Zhang, H., Li, Y., 2021. The impact of land use change on water-related ecosystem services in the Bashang area of Hebei Province, China. *Sustain.* 13(2), 716.
- Liu, S., Costanza, R., Troy, A., D'Aagostino, J., Mates, W., 2010. Valuing New Jersey's ecosystem services and natural capital: a spatially explicit benefit transfer approach. *Environ. Manage.* 45, 1271-1285.
- Logsdon, R.A., Chaubey, I., 2013. A quantitative approach to evaluating ecosystem services. *Ecol. Model.* 257, 57-65.
- Lu, S.J., Duan, X.W., Wei, S.Z., Lin, H.H., 2022. An insight to calculate soil conservation service. *Geogr. Sustain.* 3, 237-245.
- Moghadamirad, M., Abdi, E., Moayeri, M. H., Gorbani Vaghei, H., 2017. Effect of uphill gradient on runoff and soil loss in forest road (A case study: Kohmiyan forest, Azadshahr). *Forest Wood Product.* 71(2), 105-115 (in Persian).
- Mohammadi, Sh., Karimzadeh, H.R., Alizadeh, M., 2018. Spatial estimation of soil erosion in Iran using the RUSLE model. *Iran. J. Ecohydrol.* 5(2), 551-569 (in Persian).
- Mohammadyari, F., 2023. Evaluation the effects of land use changes on ecosystem services based on the InVEST model (case study: Chaharmahal and Bakhtiari Province). *Town Country Plan.* 15(2), 327-342 (in Persian).
- Paudyal, K., Baral, H., Bhandari, S.P., Bhandari, A., Keenan, R.J., 2019. Spatial assessment of the impact of land use and land cover change on supply of ecosystem services in Phewa watershed, Nepal. *Ecosys. Service.* 36, 100895.
- Peng, J., Yang, Y., Liu, Y., Du, Y., Meersmans, J., Qiu, S., 2018. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Sci. Total Environ.* 644, 781-790.
- Pessacg, N., Flaherty, S., Brandizi, L., Solman, S., Pascual, M., 2015. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data. *Sci. Total Environ.* 537, 225-234.
- Renard, K.G., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 404 pages.

- Ritten, J., Fernández-Giménez, M.E., Pritchett, J., Kachergis, E., Bish, W., 2018. Using state and transition models to determine the opportunity cost of providing ecosystem services. *Rangeland Ecol. Manage.* 71(6), 737-752.
- Saadatpour, A., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., Izady, A., 2019. Estimation and comparison of blue and green water using SWAT and SWAT-MODFLOW models in the NeIshabur watershed. *Iranian J. Irriga. Drain.* 13(4), 1113-1129 (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. *Sci. Total Environ.* 646, 573-586.
- Sarvari, M., 2018. Investigating the effect of climate change on economic well-being in Neyshabur Plain. MSc. Thesis, Tarbiat Modares University (in Persian).
- 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., 2014. InVEST user's guide. The Natural Capital Project. The Natural Capital Project.
- Sun, G., Zhou, G., Zhang, Z., Wei, X., McNulty, S.G., Vose, J.M., 2006. Potential water yield reduction due to forestation across China. *J. Hydrol.* 328(3-4), 548-558.
- Suryanta, J., Nahib, I., Ramadhani, F., Rifaie, F., Suwedi, N., Karolinoerita, V., Cahyana, D., Amhar, F., 2024. Modelling and dynamic water analysis for the ecosystem service in the Central Citarum watershed, Indonesia. *J. Water Land Develop.*
- Teymouri, F., Bezarafshan, E., Rafiei Sardouei, E., 2018. Evaluation of the effects of climate change and land use change on soil erosion (case study: Kandaran Watershed). *Ecohydrol.* 6(2), 353-368 (in Persian).
- Vaezi, A.R., Mohammadi, E., 2022. Temporal variation pattern of runoff generation and rill erosion in different soils and slope gradients (in Persian).
- Valencia, J.B., Guryanov, V.V., Mesa-Diez, J., Tapasco, J., Gusarov, A.V., 2023. Assessing the Effectiveness of the use of the InVEST annual water yield model for the rivers of Colombia: a case study of the meta river basin. *Water* 15(8), 1617.
- 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.
- Yu, Y., Sun, X., Wang, J., Zhang, J., 2022. Using InVEST to evaluate water yield services in Shangri-La, Northwestern Yunnan, China. *PeerJ.* 10, e12804.
- Zhang, C., Wenhua, L., Biao, Z., Moucheng, L., 2012. Water yield of Xitiaoxi river basin based on InVEST modeling. *J. Resour. Ecol.* 3(1), 50-54.
- Zhang, L., Lü, Y., Fu, B., Dong, Z., Zeng, Y., Wu, B., 2017. Mapping ecosystem services for China's ecoregions with a biophysical surrogate approach. *Landscape Urban Plan.* 161, 22-31.
- Zhao, L., Chen, R., Yang, Y., Liu, G., Wang, X., 2023. A new tool for mapping water yield in cold alpine regions. *Water* 15(16), 2920.
- Zhao, W., Liu, Y., Daryanto, S., Fu, B., Wang, S., Liu, Y., 2018. Metacoupling supply and demand for soil conservation service. *Current Opinion Environ. Sustain.* 33, 136-141.