



Evaluation of Surface And Groundwater Resources Management in The Sefidrud Watershed Under Land Use Change

Tahereh Gohari¹ , Mostafa Naderi^{2✉}

1. Ph.D. Student in Geophysics (Gravimetry), Faculty of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran.

2. Associate Professor of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran.

✉Corresponding Author: m.naderi@iasbs.ac.ir

Submit Date
22 September 2025

Revise Date
10 October 2025

Accept Date
11 October 2025

Keywords:
*Groundwater,
Land use change,
Level of Management,
River,
Sefidrud watershed.*

Extended abstract

Introduction

Integrated Water Resources Management (IWRM), defined by the Global Water Partnership (GWP), promotes coordinated development of water, land, and related resources to maximise welfare without compromising ecosystem sustainability. A key aspect is integrating environmental water needs into planning and allocation. The lack of a quantitative index that objectively reflects water management while considering environmental requirements remains a major challenge. A physical index has recently been proposed, based on water availability and supply, enabling integrated and comparative assessment (Naderi, 2021). It allows quantification under land use change, agricultural expansion, and increased abstraction. The Sefidrud watershed, covering 58,452.84 km² in north-west Iran, shows significant variation in elevation, rainfall, and geography. Studies highlight the need to quantify water management levels with a focus on preserving water-dependent ecosystems. Two gaps are evident: no prior quantitative estimation and no analysis of land use change effects. This study aims to assess surface and groundwater management in the Sefidrud watershed during 1995–2017 and evaluate the impact of observed land use changes on management levels.

Cite this article: Gohari, T., & Naderi, M. (2025). Evaluation of surface and groundwater resources management in the Sefidrud Watershed under land use change. *Journal of Aquifer and Qanat*, 6 (2), 199-236. DOI: 10.22077/jaaq.2025.10135.1128



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

To evaluate and quantify the level of surface and groundwater resource management in the Sefidrud watershed, the SWAT hydrological model was applied. Using a 30-metre resolution Digital Elevation Model (DEM) and data from hydrometric stations and dams, the watershed was divided into 15 sub-basins for the period 1995–2017. These 23 years were split into two phases: a 16-year calibration period (1995–2010) and a 7-year validation period (2011–2017). River management level (LOM) was estimated using a physical index incorporating available water and total water supply, defined as the volume abstracted from the river (Naderi, 2021):

$$LOM = \frac{AW - \sum_{i=1}^n TWS_i}{AW} \quad (1)$$

Where LOM is the management level for river or groundwater, AW is available water (m^3/s), TWS is water abstracted for sector i (e.g., agriculture), and n is the number of water-use sectors. Environmental Flow Requirement (EFR) was defined as a percentage of the long-term average annual river flow, and for groundwater, by considering baseflow contribution. Management levels for river and groundwater resources were calculated under two scenarios: (1) actual conditions (climate and land use), and (2) land use scenario (using the 2002 land use map with actual climate), and the results were compared.

Results and Discussion

SWAT model performance during the calibration period (1997–2010) showed acceptable accuracy in simulating monthly river flow at the subbasin scale. Most subbasins had a coefficient of determination above 0.7, and Nash–Sutcliffe efficiency exceeded 0.7 in most cases. Kling–Gupta efficiency ranged from 0.6 to 0.8, indicating reliable model performance. Validation results (2011–2017) confirmed SWAT's capability in simulating river flows in the Sefidrud basin. Most stations reported R^2 above 0.6, and Kling–Gupta efficiency exceeded 0.5 in all but subbasins 6 and 15. The agreement index was above 0.75 in most subbasins during both calibration and validation, reflecting good alignment with observed data. Uncertainty analysis showed P-factor > 0.5 and R-factor < 0.5 in most subbasins, indicating well-managed uncertainty. Although present, model uncertainty was not significant. Hydrological sensitivity varied by subbasin characteristics. Subbasins 1, 6, 8, and 9 were most sensitive to SOL-AWC; 10, 12, and 15 to GW-QMN; and 6, 7, 9, and 13 showed the lowest sensitivity to ESCO. Changes in the management index were driven by water availability. Land use changes increased subbasin management levels due to higher river flow and accessible water, but reduced groundwater availability in most areas. Consequently, the groundwater management index declined in most regions. Environmental water share was based on long-term average flow, though river discharge varied seasonally and annually. Thus, the environmental share fluctuates over time, likely decreasing during droughts due to reduced flow and infiltration, and increasing in wet years. Future climate change may alter rainfall patterns, affecting water volume and increasing instability. Groundwater recharge across the Sefidrud watershed was estimated at $1\text{--}49\text{ m}^3/s$ ($0.54\text{--}26.43\text{ mm/year}$), closely matching the 32 mm/year reported by the Japan International Cooperation Agency, confirming the validity and accuracy of this study's results.

Conclusion

This study assessed the effects of land use changes on the management level index of surface and groundwater resources in the Sefidrud watershed, Iran. Land use analysis shows a decline in rangelands and forests and an increase in agricultural lands from 2002 to 2021. The watershed also experienced rising annual temperatures; however, precipitation varied spatially between 1995 and 2017. River water assessment indicates that southern and some central areas had the lowest access and withdrawal, while northern and eastern areas had the highest, leading to negative management indices in eight subbasins during 1995–2017. Land use changes increased river flow and water availability, raising the river management index. Groundwater assessment shows western and eastern areas had the least access, while northern and central areas had the most during 1995–2017. Yet, groundwater withdrawal was higher in southern areas than in the eastern basin. Most areas had acceptable management levels ($LOM > 0$), but three subbasins had negative indices due to excessive groundwater withdrawal, marking them as ecological hotspots. Land use changes also reduced groundwater management indices in the most dominant areas. Overall, the watershed saw reduced natural cover and expanded agriculture, increasing surface runoff and reducing groundwater recharge. This raised the river water access and management index, while lowering the groundwater access and its index. These opposing responses highlight differing hydrological impacts of land use change. Land use type determines water distribution between river and groundwater systems: runoff-prone covers limit recharge, and vice versa. Areas with more natural cover

and less agriculture may show reduced river access but improved groundwater indices. Similar land use trajectories yield similar hydrological responses, while differing histories lead to varied patterns. Still, the contrasting behaviour of river and groundwater systems under similar land use changes remains consistent.



ارزیابی سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود تحت تأثیر تغییر کاربری اراضی

طاهره گوهری^۱ | مصطفی نادری^۲ ✉

۱. دانشجوی دکتری ژئوفیزیک (گرانی سنجی)، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران.

۲. دانشیار هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران.

✉ نویسنده مسئول: m.naderi@iasbs.ac.ir

چکیده

تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبریز سفیدرود طی دو دهه اخیر موجب تغییرات چشم‌گیر در الگوی بهره‌برداری از منابع آب شده است. هدف این پژوهش، ارزیابی کمی سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در این حوضه تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی است. برای این منظور، از مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده شده است و منطقه مطالعاتی به ۱۵ زیرحوضه تقسیم گردید. داده‌های اقلیمی، توپوگرافی، خاک و برداشت از منابع آب برای دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ به کار گرفته شد. شاخص سطح مدیریت با در نظر گرفتن نیاز زیست‌محیطی و حجم آب موجود برای منابع آب سطحی و زیرزمینی محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی واقعی، ۸ زیرحوضه دارای سطح مدیریت منفی در منابع آب سطحی هستند که به‌عنوان نقاط داغ اکولوژیکی شناخته می‌شوند. همچنین، در منابع آب زیرزمینی، ۳ زیرحوضه دارای سطح مدیریت منفی هستند که نشان‌دهنده اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی است. مناطق جنوبی و برخی از مناطق مرکزی کمترین حجم آب موجود و برداشت از آب رودخانه را نشان می‌دهند، در حالی که مناطق شمالی و شرقی بیشترین مقادیر ذکر شده را دارند. حوضه سفیدرود در طی دوره مطالعاتی شاهد کاهش مراتع و جنگل‌ها و افزایش مناطق شهری و کشاورزی بوده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات کاربری اراضی موجب بهبود نسبی در مدیریت رودخانه‌ها شده است در حالی که کاهش سطح مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی را به همراه داشته است. این مطالعه تأکید می‌کند که تغییر کاربری اراضی با تغییر توزیع آب موجود بین منابع آب، تأثیر متضادی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی اعمال می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹

کلیدواژه‌ها:

آب‌های زیرزمینی،
تغییر کاربری اراضی،
سطح مدیریت،
حوضه آبریز سفیدرود،
رودخانه.

مقدمه

مدیریت یکپارچه منابع آب^۱ (IWRM) توسط سازمان مشارکت جهانی آب^۲ (GWP) به عنوان «فرایندی تعریف می‌شود که توسعه و مدیریت هماهنگ آب، زمین و سایر منابع مرتبط را به منظور بیشینه‌سازی رفاه اقتصادی و اجتماعی به صورت عادلانه و بدون به خطر انداختن پایداری اکوسیستم‌ها و محیط زیست حیاتی ترویج می‌کند». یکی از ملاحظات کلیدی در این فرایند، گنجاندن نیازهای آبی محیط زیست در برنامه‌ریزی منابع آب و راهبردهای تخصیص برداشت است. مدیریت منابع آب در بخش‌های مختلف به‌ویژه کشاورزی اهمیت ویژه‌ای در توسعه پایدار اقتصادی و حفظ امنیت غذایی دارد (Mortezadeh et al., 2024). در مطالعات آب‌شناسی تاکنون، مدیریت منابع آب (آب‌های سطحی یا زیرزمینی) عمدتاً با استفاده از روش بیلان آب و بدون در نظر گرفتن سهم آبی محیط زیست ارزیابی شده است. مدیریت بر اساس بیلان نمی‌تواند اطلاعاتی را برای مقایسه بین سطح مدیریت منابع مختلف آب در یک منطقه ارائه دهد. فقدان یک شاخص کمی که بتواند سطح مدیریت منابع آب را به صورت عینی و همزمان با در نظر گرفتن الزامات زیست‌محیطی منعکس کند، به عنوان یک چالش اساسی مطرح بوده است. اخیراً یک شاخص فیزیکی برای ارزیابی کمی مدیریت منابع آب با در نظر گرفتن نیاز آبی محیط زیست پیشنهاد شده است. این شاخص بر پایه‌ی مفاهیم دسترسی به آب و تأمین آب بنا شده و امکان ارزیابی یکپارچه‌تر و مقایسه‌ای‌تر از عملکرد مدیریت را فراهم می‌کند (Naderi, 2021). شاخص پیشنهادی امکان کمی‌سازی مدیریت منابع آب را تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تغییرات اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی، رشد جمعیت، گسترش کشاورزی و افزایش برداشت آب فراهم می‌کند (Naderi, 2021). حوضه آبریز

سفیدرود با مساحت ۵۸۴۵۲/۸۴ کیلومترمربع در شمال غربی ایران واقع شده و در آن تغییرات قابل توجهی در ارتفاع، بارش و ویژگی‌های جغرافیایی مشاهده می‌شود (Entezami et al., 2024). مطالعات موجود نشان می‌دهند که برای تخصیص بهینه و قابل اعتماد آب در حوضه آبریز سفیدرود، علاوه بر تخصیص آب به بخش‌های صنعتی و کشاورزی، نیاز آبی محیط زیست نیز باید در نظر گرفته شود (Ayoubikia et al., 2019). علاوه بر این، Nagata و همکاران (۲۰۱۱) پیشنهاد کردند که مدیریت مؤثر حوضه مستلزم مدل‌سازی هیدرولوژیکی مناسب در این حوضه بزرگ است. ورود فاضلاب به رودخانه سفیدرود کیفیت آب رودخانه در منطقه رودبار را کاهش می‌دهد (Moravatdoust et al., 2015). در حالی که نیترا ت مهم‌ترین عاملی است که بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارد (Kamyab-Talesh et al., 2019). بهینه‌سازی تخصیص آب در استان گیلان (پایین‌دست سد سفیدرود) نشان می‌دهد که آب مورد نیاز برای آبیاری باید علاوه بر شبکه‌های آبیاری وابسته به آب سطحی، از منابع دیگر تأمین شود و در این فرایند، نیاز آبی محیط زیست نیز باید مدنظر قرار گیرد (Salar-Ashayeri et al., 2020). Haghghi و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که فعالیت‌های انسانی و توسعه ناهماهنگ منابع آب، اصلی‌ترین عوامل کاهش جریان رودخانه در این حوضه هستند. پوشش برف، به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوبی حوضه آبریز سفیدرود، طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ کاهش یافته است، در حالی که تحلیل تغییر کاربری اراضی نشان‌دهنده افزایش اراضی کشاورزی می‌باشد (Entezami et al., 2024).

khoezimehnezhad و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از تحلیل خاکستری، حوضه آبریز سفیدرود را به عنوان یکی از حوضه‌هایی که کاهش سطح آب‌های زیرزمینی آن مورد

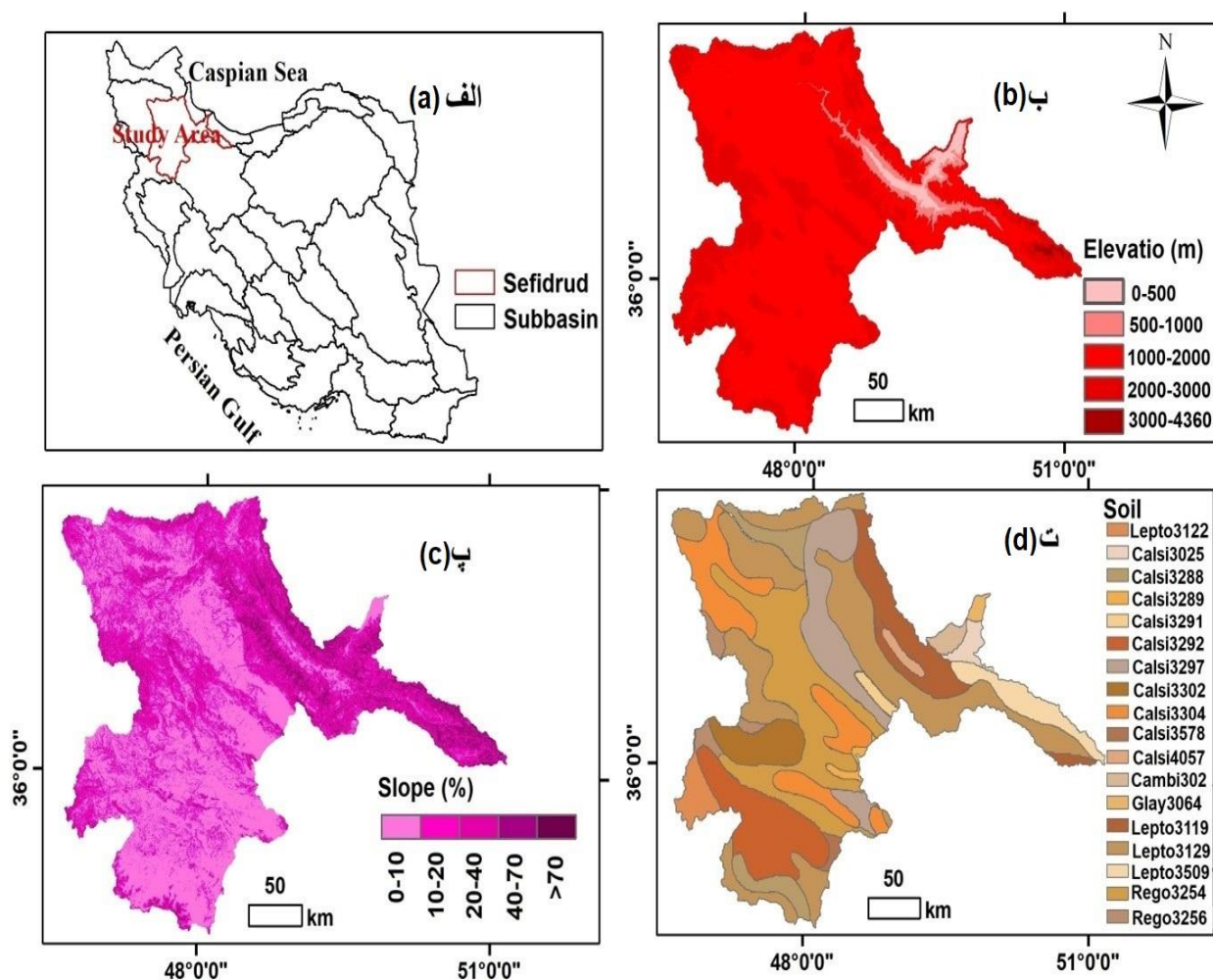
² Global Water Partnership¹ Integrated Water Resources Management (IWRM)

تهدید قرار دارد معرفی کرد. از لحاظ بر اساس مطالعات موجود، نیاز واضحی برای کمی‌سازی سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود با رویکرد حفظ اکوسیستم‌های وابسته به آب وجود دارد. مطالعات موجود از دو جنبه قابل تأمل است اول اینکه سطح مدیریت برای حوضه سفیدرود به صورت کمی برآورد نشده است و دوم اینکه اثر تغییر کاربری اراضی بر سطح مدیریت بررسی نشده است با توجه به اینکه حوضه سفیدرود یکی از حوضه‌های بزرگ و مهم کشور می‌باشد در این تحقیق سعی شده است تا اثر تغییر کاربری اراضی بر سطح مدیریت منابع آب بررسی گردد. این مطالعه با اهداف ارزیابی سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود طی دوره مشاهداتی ۱۹۹۵-۲۰۱۷ و بررسی تأثیر تغییرات مشاهده شده در کاربری اراضی بر سطح مدیریت منابع آب طی دوره مشاهداتی، انجام شده است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سفیدرود با مساحتی حدود ۵۸۴۵۲/۸۴ کیلومتر مربع، در شمال غربی ایران (شکل ۱) و بین طول‌های جغرافیایی ۳۱° ۴۶' تا ۵۱° ۴' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۵۴° ۳۴' تا ۳۷° ۴۹' شمالی قرار دارد. ارتفاع از صفر در ساحل جنوبی دریای خزر تا ۴۳۶۰ متر در ارتفاعات متغیر بوده و ارتفاع متوسط مکانی در سراسر حوضه ۲۰۶۳/۲ متر است. طبق داده‌های کاربری اراضی (Iranian Water Resources Management Company, 2025) مساحت اراضی کشاورزی، مراتع، جنگل‌ها، مناطق شهری و باغ‌ها (شکل ۲) برای سال ۲۰۰۲ به ترتیب ۲۳۰۵۶/۶۲، ۳۱۷۵۴/۴۲، ۲۳۵۳/۲۹،

۱۳۳/۵۲ و ۱۱۳۱/۳۴ کیلومترمربع که به ترتیب ۳۹/۴۴، ۵۴/۳۲، ۴/۰۲ و ۰/۲۲ درصد از مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند و برای سال ۲۰۲۱ به ترتیب ۳۱۶۱۵/۹۳، ۲۴۴۸۱/۷۴، ۱۲۱۵/۳۹، ۴۷۲/۹۳ و ۵۲۸/۹۷ کیلومترمربع را پوشش می‌دهند و سهم آن‌ها به ترتیب ۵۴/۰۹، ۴۱/۸۸، ۲/۰۸، ۰/۸۱ و ۰/۹۰ درصد از مساحت حوضه است. داده‌های بارش روزانه در طول دوره مشاهده ۱۹۹۵-۲۰۱۷ در ۳۰ ایستگاه اقلیمی (شکل ۳) سراسر حوضه اندازه‌گیری شده‌اند، در حالی که اندازه‌گیری‌های دمای حداقل و حداکثر روزانه محدود به ایستگاه‌های سینوپتیک بوده است میانگین بارش سالانه از ۲۱۹ میلی‌متر در ایستگاه مشمپا تا ۱۲۴۸ میلی‌متر در ایستگاه آستانه متغیر است و میانگین دمای سالانه از ۱۱/۶۷ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه سقز تا ۱۶/۸۳ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه رشت متفاوت است. این حوضه شامل ۹ ایستگاه هیدرومتریک است که جریان روزانه رودخانه را در طول دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ ثبت می‌کنند و ۶ سد که داده‌های ورودی و خروجی روزانه آن‌ها در همان بازه زمانی پایش می‌شود. بر این اساس، حوضه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر و بر اساس موقعیت این ایستگاه‌ها و سدها به ۱۵ زیرحوضه تقسیم شده است، به طوری که مساحت زیرحوضه‌ها از ۲۲۶/۳۷ کیلومترمربع در زیرحوضه ۸ تا ۷۸۸۱/۳۱ کیلومترمربع در زیرحوضه ۳ متغیر است. منابع آب سطحی و زیرزمینی عمدتاً برای پشتیبانی از آبیاری کشاورزی و تأمین نیازهای آب شهری و صنعتی برداشت می‌شوند. داده‌های مربوط به برداشت آب سطحی و زیرزمینی برای سال ۲۰۰۹ توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران (۲۰۲۵) ارائه شده و میزان برداشت ماهانه برای هر زیرحوضه در جدول ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه (الف)، نقشه تغییرات مکانی ارتفاع (ب)، کلاس بندی شیب (پ) و انواع خاک (ت) در منطقه مطالعاتی.

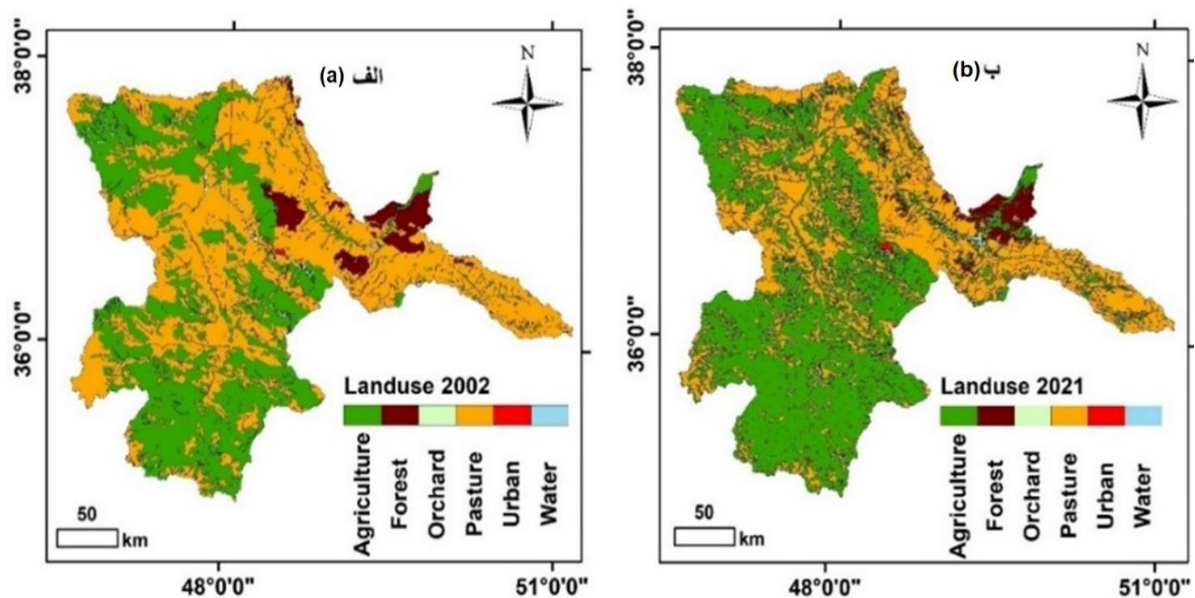
Fig 1. Study Area (a) Spatial Distribution Maps of Elevation (b), Slope Classification (c), And Soil Types (d) Within The Sefidrud Watershed.

جدول ۱. برداشت ماهانه آب (متر مکعب بر ثانیه) از رودخانه و آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه برای سال مرجع ۲۰۰۹.

Table 1. Monthly Water Withdrawals (m^3/s) From River And Groundwater Resources of The Study Area For The Reference Year 2009.

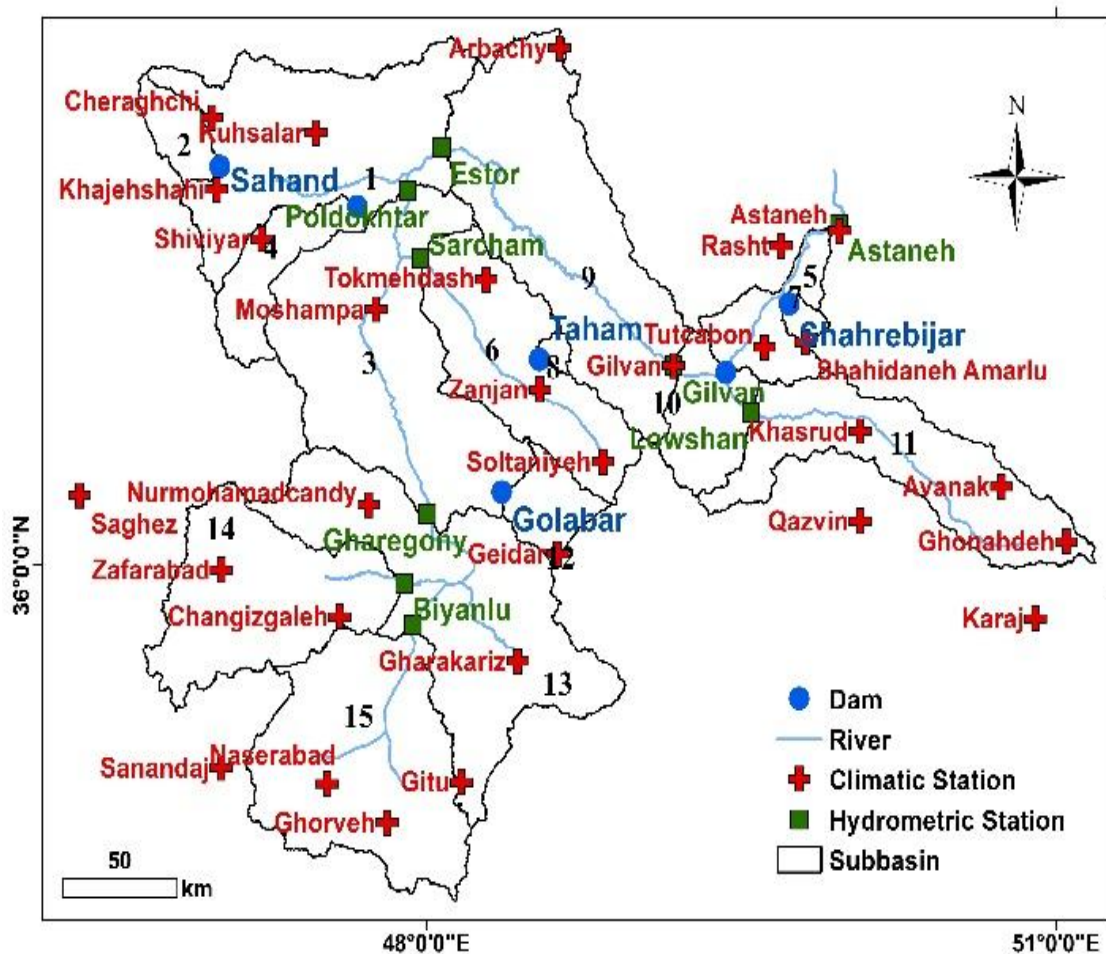
رودخانه												حوضه
River												
مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامر	دسامبر	ژانویه	فوریه	Subbasin
Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	
6.72	6.72	6.72	4.50	4.50	4.50	0.43	0.43	0.43	0.05	0.05	0.05	1
2.06	2.06	2.06	3.37	3.37	3.37	0.36	0.36	0.36	0.00	0.00	0.00	2
3.65	3.65	3.65	4.67	4.67	4.67	1.03	1.03	1.03	0.23	0.23	0.23	3
1.25	1.25	1.25	1.30	1.30	1.30	0.11	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00	4
1.80	1.80	1.80	1.50	1.50	1.50	0.54	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	5
4.69	4.69	4.69	2.44	2.44	2.44	0.84	0.84	0.84	0.07	0.07	0.07	6
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7
0.10	0.10	0.10	0.06	0.06	0.06	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	8
12.81	12.81	12.81	16.48	16.48	16.48	8.85	8.85	8.85	4.81	4.81	4.81	9

1.71	1.71	1.71	2.58	2.58	2.58	0.73	0.73	0.73	0.00	0.00	0.00	10
8.51	8.51	8.51	16.61	16.61	16.61	4.75	4.75	4.75	0.38	0.38	0.38	11
0.92	0.92	0.92	1.22	1.22	1.22	0.49	0.49	0.49	0.00	0.00	0.00	12
0.66	0.66	0.66	0.78	0.78	0.78	0.47	0.47	0.47	0.04	0.04	0.04	13
0.43	0.43	0.43	0.51	0.51	0.51	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	14
2.45	2.45	2.45	2.93	2.93	2.93	0.61	0.61	0.61	0.04	0.04	0.04	15
آب‌های زیرزمینی Groundwaters												
مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	حوضه
Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Subbasin
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2
0.79	0.79	0.79	1.15	1.15	1.15	0.40	0.40	0.40	0.14	0.14	0.14	3
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4
0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	5
13.16	13.16	13.16	18.63	18.63	18.63	6.00	6.00	6.00	2.15	2.15	2.15	6
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8
1.59	1.59	1.59	1.80	1.80	1.80	0.78	0.78	0.78	0.41	0.41	0.41	9
0.20	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.13	0.13	0.13	0.02	0.02	0.02	10
0.19	0.19	0.19	0.21	0.21	0.21	0.15	0.15	0.15	0.12	0.12	0.12	11
1.87	1.87	1.87	2.98	2.98	2.98	0.77	0.77	0.77	0.25	0.25	0.25	12
3.93	3.93	3.93	8.45	8.45	8.45	3.13	3.13	3.13	0.31	0.31	0.31	13
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14
1.78	1.78	1.78	2.40	2.40	2.40	0.83	0.83	0.83	0.03	0.03	0.03	15



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی در حوضه آبریز سفیدرود برای سال‌های ۲۰۰۲ (الف) و ۲۰۲۱ (ب).

Fig 2. Spatial Distribution Maps of Land Use Within The Sefidrud Watershed For The Years 2002 (a) And 2021 (b).



شکل ۳. موقعیت مکانی سدها، ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی منطقه مطالعاتی

Fig 3. Location of Dams, Hydrometric Stations And Climatic Stations in The Study Area.

جدول ۲. مساحت کاربری اراضی و تغییرات آن در هر زیرحوضه برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲

Table 2. Land Use Area in Each Subbasin of The Sefidrud Watershed For The Years 2002 And 2021. The ΔA Denotes Change in Land Use Area.

Subbasin حوضه	مساحت اراضی ۲۰۰۲ (کیلومتر مربع) The land area in 2002 (km ²)						مساحت اراضی ۲۰۲۱ (کیلومتر مربع) The land area in 2021 (km ²)						تغییرات مساحت (سال ۲۰۲۱ منهای ۲۰۰۲) ΔA (2021–2002)					
	شهر	مرتع	باغ	جنگل	آب	کشاورزی	شهر	مرتع	باغ	جنگل	آب	کشاورزی	شهر	مرتع	باغ	جنگل	آب	کشاورزی
Subbasin حوضه	Urban	Pasture	Orchard	Forest	water	Agriculture	Urban	Pasture	Orchard	Forest	water	Agriculture	Urban	Pasture	Orchard	Forest	water	Agriculture
	شهر	مرتع	باغ	جنگل	آب	کشاورزی	شهر	مرتع	باغ	جنگل	آب	کشاورزی	شهر	مرتع	باغ	جنگل	آب	کشاورزی
1	11.92	2524.09	163.44	0.00	0.00	3900.63	48.61	2.39656	99.93	0.00	3.36	3791.79	36.69	123.3	-63.51	0.00	3.36	-108.84
2	0.00	221.48	55.07	0.00	0.00	546.33	2.79	1.3562	6.71	0.00	9.38	641.76	2.79	-59.13	-48.36	0.00	9.38	95.43
3	5.64	5202.54	88.24	0.00	0.87	2575.52	34.7	4.65435	11.17	0.00	3.51	3387.78	29.06	-766.89	-77.07	0.00	2.64	812.26
4	0.11	935.19	15.93	0.00	0.00	678.13	1.18	903.85	0.30	0.00	5.19	719.38	1.07	-31.34	-15.63	0.00	5.19	41.25
5	8.50	402.12	9.46	915.14	0.00	258.46	27.23	172.35	17.29	787.49	17.9	572.03	18.73	-229.77	7.83	-127.65	17.90	313.57
6	57.26	2462.44	193.76	142.88	0.16	1554.59	95.5	1534.28	61.28	-0.48	7.68	2712.83	38.24	-928.16	-132.48	-143.36	7.52	1158.24
7	0.00	10.97	0.00	214.29	0.00	2.03	0.00	17.08	0.00	199.01	2.58	8.62	0.00	6.11	0.00	-15.28	2.58	6.59
8	0.00	126.73	5.37	29.29	0.00	0.00	0.27	135.54	0.01	0.03	0.50	27.04	0.27	6.81	-5.36	-29.26	0.50	27.04
9	4.55	6298.69	101.24	692.35	0.00	676.41	52.46	5462.94	163	148.77	1.66	1944.34	47.91	-835.75	61.76	-543.58	1.66	1267.93
10	4.58	1404.19	44.41	245.58	22.51	51.42	14.21	1233.19	71.62	72.02	41.13	340.46	9.63	-171	27.21	-173.56	18.62	289.04
11	2.84	4405.53	83.43	113.77	0.00	266.85	9.65	3903.12	80.99	8.56	11.35	858.75	6.81	-502.41	-2.44	-105.21	11.35	591.90
12	5.21	262.58	56.17	0.00	0.00	731.22	12.93	143.49	9.92	0.00	4.86	883.98	7.72	-119.09	-46.25	0.00	4.86	152.76
13	7.99	3324.07	124.36	0.00	0.00	4330.83	63.87	1701.19	4.48	0.00	9.42	6008.29	55.88	-1622.88	-119.88	0.00	9.42	1677.46
14	7.94	2681.59	78.19	0.00	0.00	2303.21	39.43	1142.59	-0.08	0.00	4.54	3884.45	31.49	-1539	-78.27	0.00	4.54	1581.24
15	16.98	1490.21	112.27	0.00	0.46	5180.62	70.1	877.73	2.35	0.00	15.34	5834.42	53.12	-612.48	-109.92	0.00	14.88	653.80
کل Total	133.52	31754.42	1131.34	2353.293	24	23056.26	472.93	24481.74	528.97	1215.39	138.4	31615.93	339.41	-7272.68	-602.37	-1137.9	114.4	8559.67

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی هیدرولوژیکی

برای ارزیابی و کمی‌سازی سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود، از مدل هیدرولوژیکی SWAT^۱ استفاده شد.

مدل هیدرولوژی SWAT یکی از ابزارهای مؤثر در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی از جمله رواناب در حوضه‌های آبریز است که نتایج آن دقت بالایی در تحلیل مناطقی با شرایط پیچیده و ناهمگن دارد (Chazgi et al., 2022).

ابتدا، حوضه آبریز با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاع (DEM^۲) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و بر اساس موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و محل سدها به ۱۵ زیرحوضه تقسیم گردید (شکل ۳).

مدل هیدرولوژیکی، از داده‌های محلی با توزیع مکانی شامل توپوگرافی با پنج رده‌بندی شیب، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی و برداشت از منابع آب و جریان خروجی روزانه سدهای منطقه بر اساس دوره بهره‌برداری آن‌ها و داده‌های مشاهداتی روزانه بارش و دما برای دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ استفاده می‌کند.

قابل ذکر است داده‌های مورد نیاز در شرکت مدیریت منابع آب ایران تا سال ۲۰۱۷ و نقشه‌های مربوط به کاربری اراضی منطقه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۲۱ و داده‌های مربوط به برداشت از منابع آب فقط در سال ۲۰۰۹ در دسترس بوده است.

تغییرات کاربری اراضی بین دو بازه ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ برآورد شده و میزان تغییرات کاربری اراضی به‌صورت سالانه به مدل SWAT بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ اعمال شد،

بنابراین طول دوره تغییرات کاربری اراضی به‌صورت سازگار با دوره مشاهداتی سایر پارامترهای مدل می‌باشد. بازه زمانی مطالعاتی ۲۳ ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۷) به دو مرحله اصلی کالیبراسیون^۳ ۱۶ ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۰) و اعتبارسنجی^۴ ۷ ساله (۲۰۱۱-۲۰۱۷). تقسیم شده است (شکل ۴).

به‌منظور در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی ناشی از اختلاف ارتفاع، برای هر زیرحوضه ده ناحیه ارتفاعی تعریف شده است.

نرخ کاهش دما با ارتفاع، با استفاده از داده‌های بلندمدت هشت ایستگاه سینوپتیک طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷، برابر ۳/۶- درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر برآورد شد.

نرخ تغییر بارش با ارتفاع نیز بر اساس داده‌های بارندگی ۳۰ ایستگاه برای سه بخش حوضه ۱۴۰/۲ میلی‌متر بر کیلومتر برای زیرحوضه‌های شمالی (۵، ۱۰ و ۷)، ۳۵۰- میلی‌متر بر کیلومتر برای بخش شرقی (زیرحوضه ۱۱) و ۲۷۲/۲ میلی‌متر بر کیلومتر برای سایر مناطق حوضه تعیین شده است.

کارایی مدل از طریق شاخص‌های استاندارد برازش، شامل ضریب تعیین^۵ (R^2) و نش-ساتکلیف^۶ (NSE) مورد ارزیابی قرار گرفت تا دقت پیش‌بینی و قابلیت اعتماد مدل به‌طور جامع سنجیده شود.

فرآیند کالیبراسیون مدل SWAT شامل تعدادی پارامتر کلیدی است که نقش مهمی در عملکرد هیدرولوژیکی مدل دارند، این پارامترها به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل و بازتاب دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفتند.

^۵ R-squared correlation

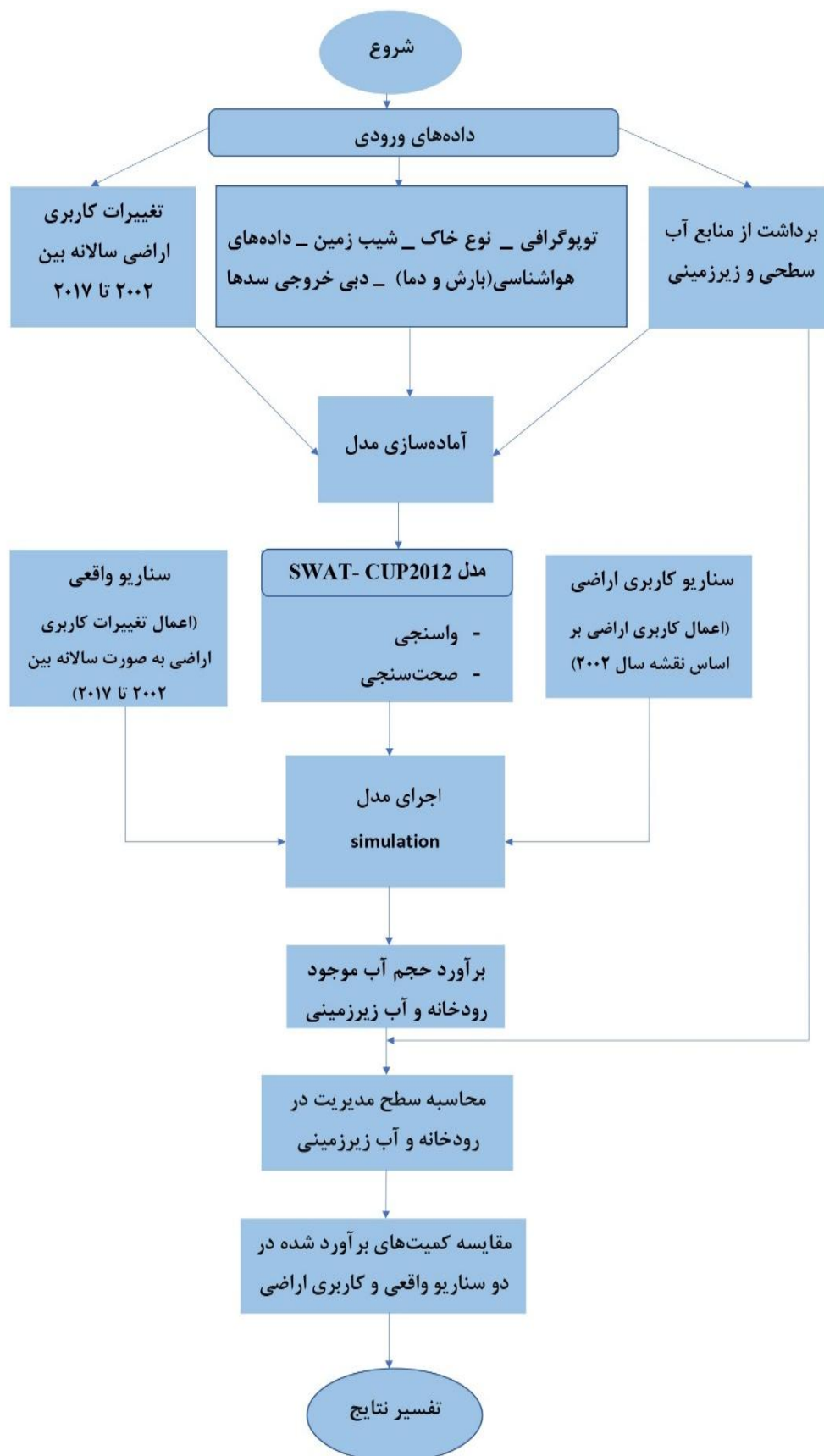
^۶ Nash-Sutcliffe Efficiency

^۱ Soil and Water Assessment Tool

^۲ Digital Elevation Model

^۳ Calibration

^۴ Validation



شکل ۴. مراحل انجام کار در این مطالعه

Fig 4. Methodological framework used in this study

سطح مدیریت

رودخانه و آب زیرزمینی

سطح مدیریت رودخانه^۱ (LOM) با استفاده از یک شاخص فیزیکی که آب در دسترس و حجم کل تأمین آب را لحاظ می‌کند، برآورد می‌شود. در این رابطه، کل تأمین آب به‌عنوان حجم آب برداشت شده از رودخانه تعریف می‌گردد (Naderi, 2021):

$$LOM = \frac{AW - \sum_{i=1}^n TWS_i}{AW} \quad (۱)$$

در رابطه‌ی LOM سطح مدیریت در رودخانه یا آب‌زیرزمینی، AW^2 حجم آب موجود (رودخانه یا آب‌زیرزمینی) (m^3/s)، TWS^3 آب برداشت شده از رودخانه یا آب‌زیرزمینی (m^3/s) برای مصرف در بخش i (مثلاً کشاورزی) و n تعداد بخش‌های مصرفی آب را نشان می‌دهد.

دبی مورد نیاز محیط زیست^۴ (EFR) به‌عنوان درصدی از میانگین جریان سالانه بلندمدت رودخانه تعریف می‌شود:

$$EFR = cQ_{mean} \quad (۲)$$

$$ARW = Q - EFR \quad (۳)$$

در این رابطه، c ضریب سهم‌دهی دبی به نیاز آبی اکوسیستم در بازه ۰ تا ۱ است و Q_{mean} میانگین بلندمدت دبی سالانه رودخانه (مترمکعب بر ثانیه) را نشان می‌دهد. طبق روش استاندارد فرضی، ۸۰ درصد جریان رودخانه ($c=0.8$) به‌منظور حفظ محیط‌زیست اختصاص می‌یابد (Richter et al., 2012) و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای مصارف انسانی در نظر گرفته می‌شود.

بر این اساس، در مطالعه حاضر ۸۰ درصد از جریان بلندمدت رودخانه برای دبی مورد نیاز اکوسیستم لحاظ

شد و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای تأمین نیازهای انسانی و آب در دسترس^۵ (ARW) در نظر گرفته شد.

سطح مدیریت رودخانه می‌تواند از مقادیر منفی تا ۱ متغیر باشد سطح مدیریت منفی نشان‌دهنده برداشت بیش از حد آب نسبت به میزان آب موجود است و نشانه مدیریت نامناسب رودخانه است که می‌تواند منجر به ایجاد "نقاط بحرانی اکولوژیکی" شود.

سطح مدیریت برابر صفر به‌عنوان سطح بحرانی، بیانگر این است که تمام آب موجود برای تأمین تقاضای بخش‌های مختلف برداشت شده و ظرفیت توسعه بیشتر زیرساخت‌ها و صنایع وابسته به آب در حوضه رودخانه وجود ندارد. در مقابل، سطح مدیریت برابر یک نمایانگر وضعیت طبیعی رودخانه و عدم برداشت آب است.

مقادیر سطح مدیریت مثبت بین ۰ و ۱ نشان‌دهنده مدیریت قابل اعتماد است، جایی که اکوسیستم به‌طور کامل پشتیبانی شده و امکان توسعه بیشتر صنایع و زیرساخت‌های وابسته به آب وجود دارد.

آب زیرزمینی موجود به‌عنوان تفاوت بین تغذیه آب زیرزمینی و سهم آب زیرزمینی برای تأمین نیازهای محیط‌زیستی تعریف می‌شود:

$$AGW = R - EFR \quad (۴)$$

در معادله فوق، AGW^6 معرف حجم آب زیرزمینی در دسترس بر حسب مترمکعب بر ثانیه است. نماد R^7 بیانگر میزان تغذیه آب زیرزمینی (m^3/s) بوده و EFR نشان‌دهنده نیاز آبی محیط زیست به همان واحد (m^3/s) است.

در اکوسیستم منطق خشک و نیمه خشک مانند ایران، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی آب محسوب می‌شوند برداشت بی‌رویه، آن‌ها را در معرض نابودی قرار داده لذا بررسی تغییرات کمی آب‌های زیرزمینی از اهمیت

⁵ Available River Water (ARW)

⁶ Available Groundwater (AGW)

⁷ Groundwater Richarge (R)

¹ Level Of Management (LOM)

² Available Water (AW)

³ Total Water Supply (TWS)

⁴ Environmental flow requirement (EFR)

کمتر از ۱۰۰ درصد می‌گردد. مقادیر مثبت ($0 < LOM$) نمایانگر مدیریت مطلوب و پایدار منابع آب زیرزمینی هستند، جایی که برداشت کمتر از میزان آب موجود، صورت می‌گیرد و افزایش سطح آب زیرزمینی مشهود است (Naderi & Hajiketabi, 2023).

از این رو، مدیران منابع آب و سیاست‌گذاران می‌توانند این شاخص را برای ارزیابی اثرات سناریوهای مدیریتی مختلف بر سطح مدیریت آب زیرزمینی به کار گرفته و تلاش نمایند تا مقادیر سطح مدیریت به ۱۰۰ درصد نزدیک شود.

تغییرات اقلیم

نتایج تحلیل روند سالانه بارش طی بازه ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ بیانگر توزیع ناهمگن مکانی در تغییرات اقلیمی منطقه است؛ به گونه‌ای که در ۱۶ ایستگاه روند افزایشی بارش سالانه مشاهده شد، در حالی که در ۱۴ ایستگاه روند سالانه بارش کاهشی است (شکل ۵).

تحلیل مکانی پراکندگی ایستگاه‌های اقلیمی بیانگر آن است که روند کاهشی بارش عمدتاً در نواحی جنوب‌غربی و شرقی حوضه مشاهده می‌شود، در حالی که بخش‌های مرکزی و شمالی عمدتاً با افزایش بارش سالانه طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ مواجه بوده‌اند (شکل ۶).

بررسی روندهای سالانه دمای حداقل و حداکثر نشان داد که به جز دمای حداقل در ایستگاه تبریز، کل منطقه مطالعه طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ تحت تأثیر افزایش دما قرار گرفته است (شکل ۵).

بر این اساس، نتایج نشان می‌دهد که ایستگاه تبریز کمترین و ایستگاه سقز بیشترین سطح گرمایش را طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ تجربه کرده‌اند.

ویژه‌ای برخوردار است (Dastandaz et al., 2024). آب‌های زیرزمینی می‌توانند به عنوان جریان پایه رودخانه در تأمین جریان رودخانه مشارکت داشته و نقش حیاتی در پشتیبانی از اکوسیستم‌های وابسته به رودخانه ایفا کنند.

بر این اساس، نیاز آبی محیط‌زیست برای منابع زیرزمینی می‌تواند با در نظر گرفتن سهم جریان پایه رودخانه تعیین شود (Gleeson & Wada, 2013; Gleeson et al., 2012; Kourgialas et al., 2018; Naderi, 2021).

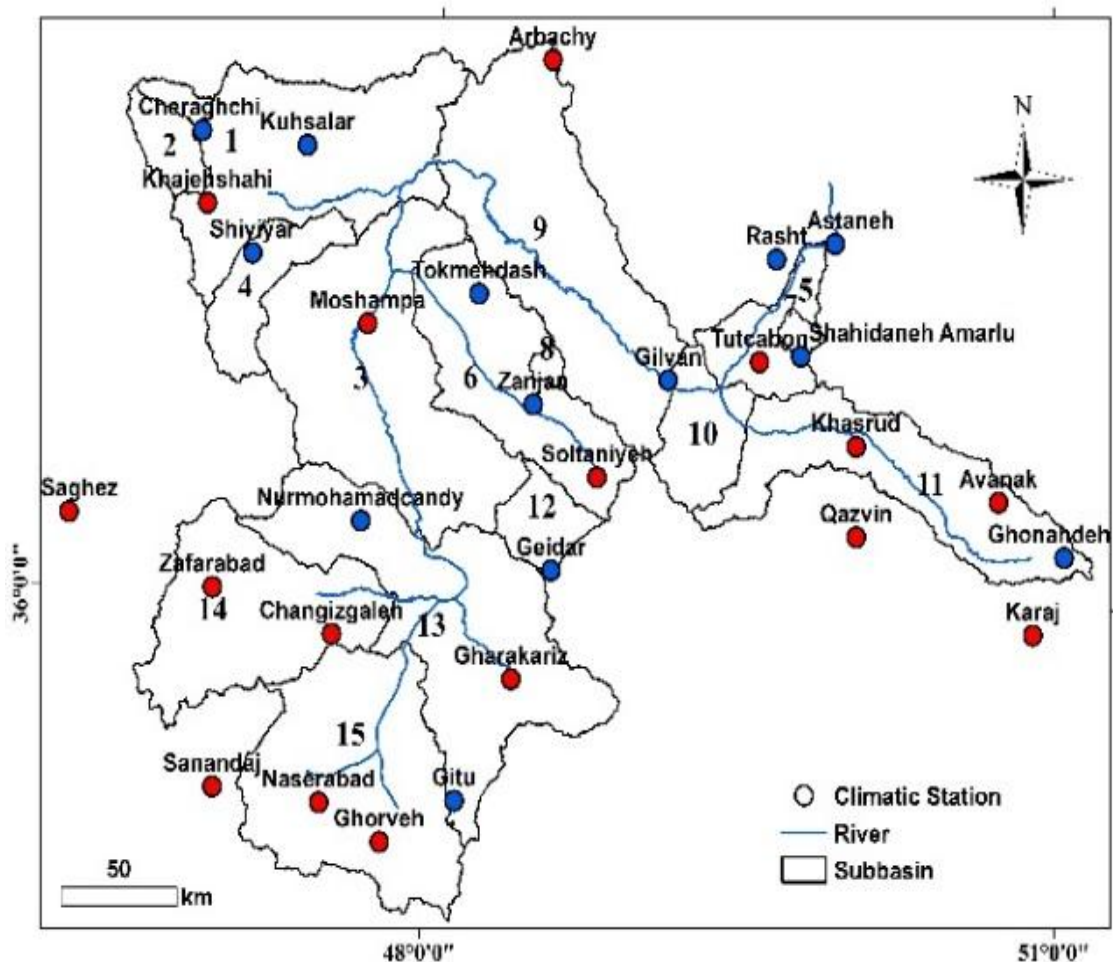
آب زیرزمینی موجود نمایانگر بخشی از حجم آب است که می‌تواند سالانه شارژ و جایگزین شود (ذخیره پویا) و شامل ذخیره ایستا نمی‌شود.

ذخیره ایستا بخش عمده‌ای از ظرفیت سفره آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهد که بازپایی آن نیازمند زمان طولانی است. در شرایطی که کل تأمین آب (میزان برداشت از آب زیرزمینی) بیش از میزان آب زیرزمینی موجود باشد، سطح مدیریت منفی می‌شود و بخشی از برداشت از ذخایر ایستا صورت می‌گیرد که منجر به افت سطح آب زیرزمینی و کاهش حجم آب موجود ذخیره، می‌گردد.

سطح مدیریت برابر صفر نشان‌دهنده سطح بحرانی مدیریت است، جایی که تمام آب موجود استخراج شده و تعادل بین جریان‌های ورودی و خروجی برقرار است (بدون تغییر بلندمدت در عمق سطح آب).

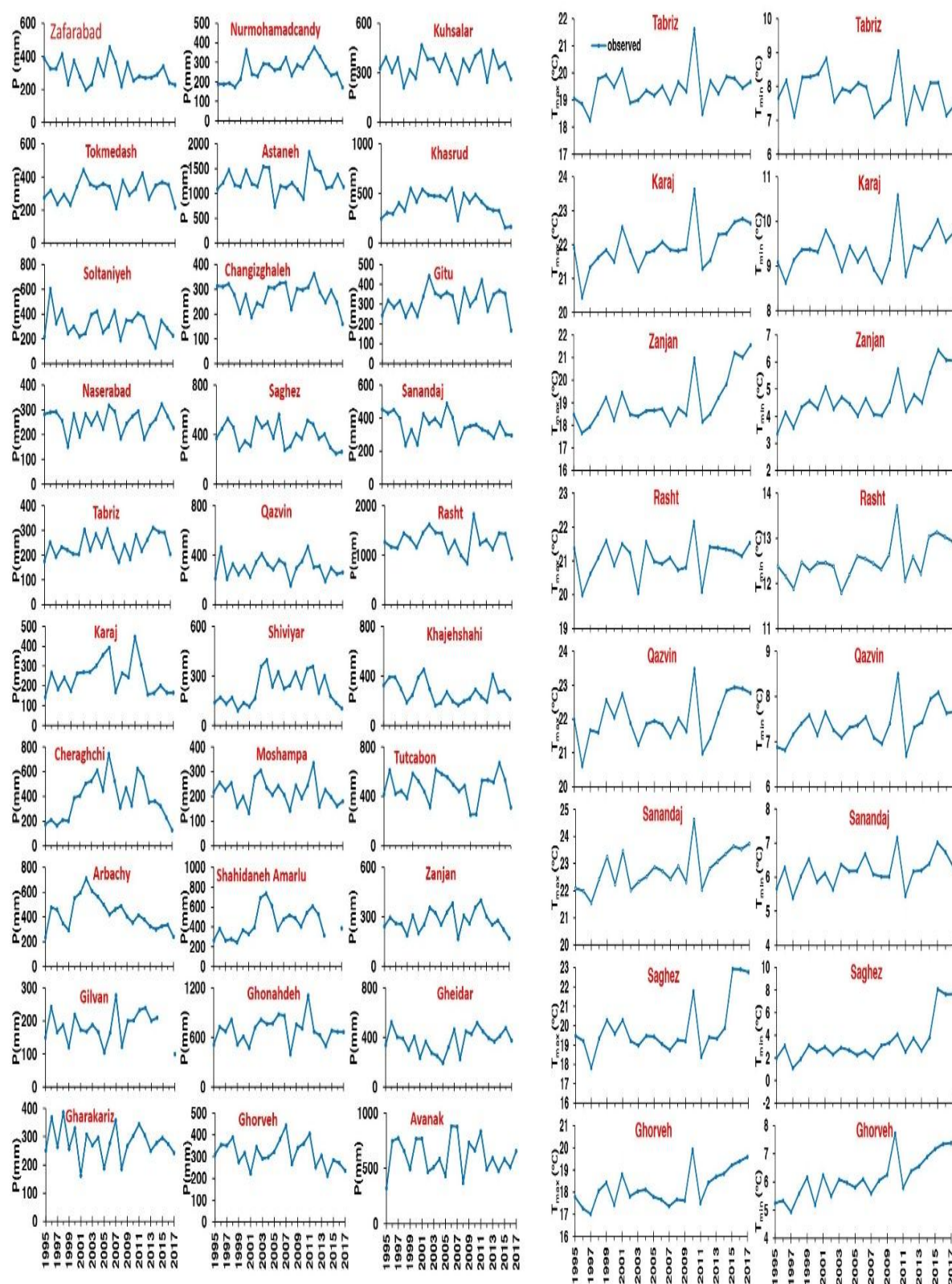
هنگامی که نرخ برداشت آب زیرزمینی صفر باشد، سطح مدیریت برابر با ۱ است که وضعیت طبیعی سیستم آبخوان را نشان می‌دهد. در نتیجه، سطح مدیریت معادل ۱۰۰ درصد نشان‌دهنده وضعیت طبیعی آب زیرزمینی بدون اثرات فعالیت انسانی است.

با این حال، در اغلب شرایط طبیعی، برداشت آب زیرزمینی انجام می‌شود که موجب کاهش مقادیر سطح مدیریت به



شکل ۵. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی به همراه روند سالانه بارش در طول دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ رنگ‌های آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش بارش سالانه هستند.

Fig 5. Location of Meteorological Stations Associated With Annual Precipitation Trends During The Study Period (1995–2017). Blue And Red Colors Indicate Increasing And Decreasing Annual Precipitation Trends, Respectively.



شکل ۶. بارش و دمای (بیشینه و کمینه) سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی طی دوره (۱۹۹۷-۲۰۱۷).

Fig 6. Annual Precipitation As Well As Maximum And Minimum Temperature at Climatic Stations During The Period 1997–2017.

تغییرات کاربری اراضی

تغییر کاربری اراضی به‌ویژه در بخش کشاورزی می‌تواند الگوی مصرف آب و بهره‌برداری از منابع آب را به‌طور معنی‌دار تغییر دهد (Soltani et al., 2025, Faghani et al., 2021). یوسفی و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از روش شماره منحنی و داده‌های سنجش از دور نشان دادند که تغییرات کاربری اراضی اثر قابل توجهی در تولید رولناب سطحی دارند. نقشه‌های کاربری اراضی مربوط به سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۰ (شکل ۷) نشان می‌دهد که کاربری‌های غالب شامل مراتع و اراضی کشاورزی هستند؛ با این حال، در برخی زیرحوضه‌ها جنگل‌ها نیز کاربری غالب هستند. تحلیل تغییرات کاربری اراضی حاکی از آن است که در سال ۲۰۲۰ کاربری غالب مراتع بوده، در حالی که در سال ۲۰۲۱ اراضی کشاورزی به‌عنوان کاربری غالب شناسایی شده‌اند؛ این امر ناشی از تغییر کلی کاربری از مراتع به اراضی کشاورزی در محدوده حوضه آبریز است.

به‌طورکلی، روند قابل توجه در سراسر حوضه آبریز کاهش پوشش‌های طبیعی زمین، شامل مراتع و جنگل‌ها، است که به اراضی کشاورزی تبدیل شده‌اند (شکل ۷، جدول ۲). به‌عنوان نمونه، در زیرحوضه ۲، مساحت مراتع از حدود ۲۲۱/۴۸ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۰ به ۱۶۲/۳۵ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۱ کاهش یافته است (کاهشی معادل ۵۹/۱۳ کیلومتر مربع)، در حالی که مساحت اراضی کشاورزی از ۵۴۶/۳۲ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۰ به ۶۴۱/۷۶ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته است (افزایشی معادل ۹۵/۴۴ کیلومتر مربع). در همین حال، در زیرحوضه ۵ مساحت مراتع از ۴۰۲/۱۲ به ۱۷۲/۳۵ کیلومتر مربع و مساحت جنگل‌ها از ۹۱۵/۱۴ به ۷۸۷/۴۹ کیلومتر مربع طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۰ کاهش یافته است که به‌ترتیب منجر به کاهش ۲۲۹/۷۷ کیلومتر مربع مراتع و ۱۲۷/۶۵ کیلومتر مربع جنگل‌ها شده است. با این حال، اراضی کشاورزی به‌طور چشمگیری از ۲۵۸/۴۶ به ۵۷۲/۰۳

کیلومتر مربع افزایش یافته و طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ افزایشی معادل ۳۱۳/۵۷ کیلومتر مربع را نشان می‌دهند. در زیرحوضه ۱۰ نیز مساحت اراضی کشاورزی از ۵۱/۴۲ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۰ به ۳۴۰/۴۶ کیلومتر مربع در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته است که افزایشی معادل ۲۸۹/۰۴ کیلومتر مربع طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۰ را نشان می‌دهد؛ در حالی که مساحت مراتع و جنگل‌ها در همین دوره به‌ترتیب از ۱۴۰۴/۱۹ و ۲۴۵/۵۸ کیلومتر مربع به ۱۲۳۳/۱۸ و ۷۲/۰۲ کیلومتر مربع کاهش یافته است که متناظر با کاهش‌های به‌ترتیب ۱۷۱ و ۱۷۳/۵۶ کیلومتر مربع می‌باشد. با این حال، چند زیرحوضه ممکن است الگوی متفاوتی از تغییرات کاربری اراضی را تجربه کنند. به‌عنوان مثال، در زیرحوضه ۷ طی دوره مشاهداتی ۲۰۲۱-۲۰۲۰ کاهش اندکی در مساحت جنگل‌ها از ۲۱۴/۲۹ به ۱۹۹/۰۱ کیلومتر مربع و افزایش مساحت مراتع از ۱۰/۹۷ به ۱۷/۰۸ کیلومتر مربع مشاهده می‌شود.

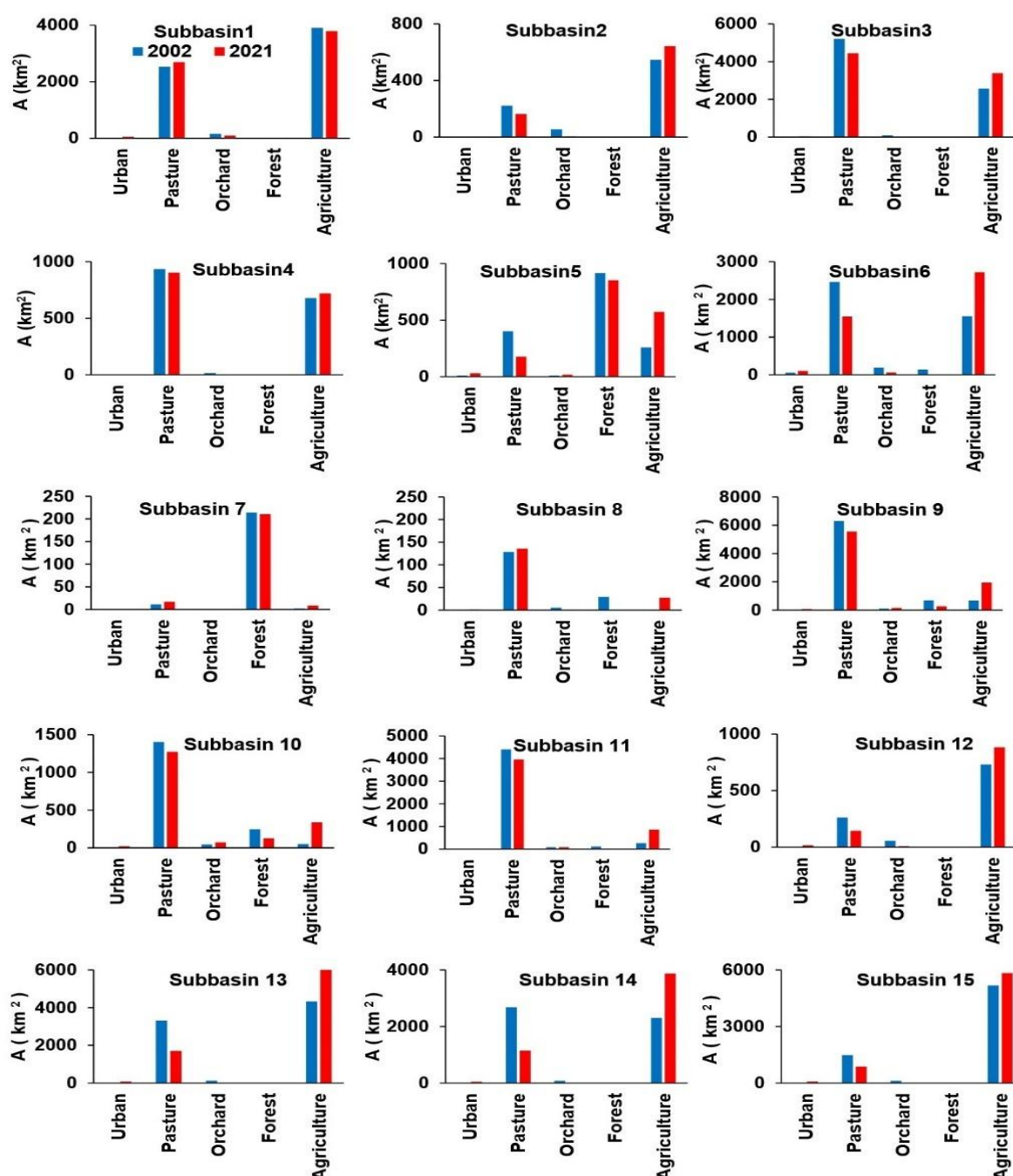
سطح مدیریت تحت سناریوهای مختلف

برای ارزیابی سطح مدیریت رودخانه و منابع زیرزمینی در دوره مشاهداتی ۱۹۹۷-۲۰۱۷، دو سناریو تعریف شد.

سناریوی واقعی: این سناریو شرایط واقعی اقلیم و کاربری اراضی طی دوره مطالعه را منعکس می‌کند. جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد و داده‌های روزانه واقعی بارش و دما از ۳۰ ایستگاه اقلیمی طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۱۷ لحاظ گردید. کاربری اراضی هر زیرحوضه نیز به‌صورت سالانه بر اساس تغییرات مشاهده‌شده در بازه ۲۰۲۱-۲۰۲۰ به‌روزرسانی شد. برای سال‌های پیش از ۲۰۲۰ (۱۹۹۷-۲۰۰۱)، فرض شد که کاربری اراضی مشابه سال ۲۰۲۰ باقی بماند. بر این اساس، سطح مدیریت رودخانه و آب‌های زیرزمینی تحت شرایط واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت.

برای هر سال شبیه‌سازی، کاربری اراضی ثابت در نظر گرفته شد و مشابه سال ۲۰۰۲ فرض گردید. مقایسه بین سطح مدیریت سناریوی واقعی و این سناریوی با کاربری اراضی ثابت، تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه مطالعه را مشخص می‌سازد.

سناریوی بدون تغییر کاربری اراضی: در این سناریو فرض شد که کاربری اراضی طی کل دوره مطالعه ثابت باقی می‌ماند، در حالی که از سری‌های زمانی واقعی بارش و دما استفاده می‌شود. جریان رودخانه با مدل SWAT شبیه‌سازی شد و داده‌های روزانه بارش و دما از ۳۰ ایستگاه اقلیمی طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۱۷ لحاظ گردید.



شکل ۷. مقایسه تغییرات کاربری اراضی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ حوضه‌های منطقه مطالعاتی

Fig 7. Comparison of Land Use Changes Within The Study Area Between 2002 And 2021.

نتایج

عملکرد مدل SWAT

عملکرد مدل با شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، نش-ساتکلیف (NSE)، کلینگ‌گوپتا (KGE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، خطای بایاس میانگین (MBE) و شاخص تطابق (IA) مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. شاخص تطابق مقادیر حدی و سایر شاخص‌ها مقادیر میانگین مدل را ارزیابی می‌کنند (Salarjazi et al., 2024; Zhou et al., 2024). نتایج ارزیابی عملکرد مدل SWAT طی دوره واسنجی (۱۹۹۷-۲۰۱۰) حاکی از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه در مقیاس زیرحوضه است. مقدار ضریب تعیین بین ۰/۵۲ در زیرحوضه ۸ تا ۰/۹۶ در زیرحوضه ۱۴ متغیر بوده و در اغلب زیرحوضه‌ها مقادیر بالاتر از ۰/۷ به دست آمده است. همچنین، شاخص کارایی نش-ساتکلیف در اکثر زیرحوضه‌ها فراتر از ۰/۷ گزارش شد و در بازه ۰/۵ (زیرحوضه ۸) تا ۰/۸۷ (زیرحوضه ۱۴) قرار دارد. مقدار کلینگ‌گوپتا در بیشتر زیرحوضه‌ها بین ۰/۶ تا ۰/۸ است که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل است. مقایسه دبی‌های میانگین سالانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در هر زیرحوضه طی این دوره نشان داد که مدل SWAT توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه مورد مطالعه دارد. نتایج اعتبارسنجی مدل در بازه زمانی ۲۰۱۱-۲۰۱۷ نشان‌دهنده توانایی مطلوب مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان‌های رودخانه‌ای در حوضه سفیدرود است. اگرچه در اغلب ایستگاه‌های مقدار ضریب تعیین بالاتر از ۰/۶ گزارش شده است، برخی ایستگاه‌ها، به‌ویژه زیرحوضه‌های ۶ و ۱۵، مقداری کمتر از ۰/۵ را نشان می‌دهند. شاخص کارایی نش-ساتکلیف نیز در اکثر ایستگاه‌های بیش از ۰/۶ برآورد شد و در بازه ۰/۲۹ (زیرحوضه ۶) تا ۰/۸۴ (زیرحوضه ۱۴) متغیر است. ضریب کلینگ‌گوپتا در برخی زیرحوضه‌ها کاهش یافته اما در

اکثر زیرحوضه‌ها مقدار آن بالای ۰/۵ است به‌جز دو زیرحوضه ۶ (۰/۴۱) و ۱۵ (۰/۲۹) که کمتر از ۰/۵ می‌باشد. مقایسه جریان‌های سالانه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مقیاس زیرحوضه نشان داد که مدل به‌طور قابل قبولی تغییرات جریان سالانه را طی دوره اعتبارسنجی شبیه‌سازی کرده است (شکل ۸ و جدول ۳). در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی شاخص تطابق بیشتر زیرحوضه‌ها بالاتر از ۰/۷۵ می‌باشد، که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول مدل با داده‌های مشاهداتی است. مقادیر خطای بایاس میانگین که مشخص می‌کند مدل چه اندازه بیشتر و یا کمتر از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده پیش‌بینی می‌کند، در ۵۰ درصد منطقه مطالعاتی در زیرحوضه‌های ۲، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۱۲ قابل قبول می‌باشد. خطای جذر میانگین مربعات نشان‌دهنده میزان پراکندگی خطاها است که هر چه مقدار آن کمتر باشد (به صفر نزدیک باشد) یعنی مدل با دقت بالا جریان را پیش‌بینی کرده است که در اکثر حوضه‌ها خطای جذر میانگین مقدار قابل قبولی دارد که نشان از دقت بالای مدل در پیش‌بینی جریان است.

عدم قطعیت

عدم قطعیت مدل با معیارهای P-factor و R-factor بررسی شده است. درصد داده‌های اندازه‌گیری شده در باند 95 PPU با معیار P-factor ارائه می‌شود. باند 95 PPU شامل جریان‌های روزانه مدل سازی شده است که بین سطح اطمینان ۲/۵٪ تا ۹۷/۵٪ قرار می‌گیرند. قرار گرفتن ۵۰ درصد از مقادیر مشاهده شده درون باند عدم قطعیت کفایت می‌کند. تغییر R-factor با نسبت عرض باند 95PPU به انحراف معیار داده‌ها، برابر است. مقادیر کوچک R-factor نشان‌دهنده عدم قطعیت کمتر نتایج مدل است و برای مقادیر کوچک‌تر از ۱/۵ نتایج مطلوب می‌باشد. مقدار P-factor بین صفر و ۱ تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد نتایج مطلوب‌تر است (Nezaratian et

al., 2018). نتایج شاخص‌های R-factor و P-factor نشان می‌دهد P-factor در بیشتر زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی بین ۰/۵ تا ۰/۸۳ قرار دارد که نشان دهنده تولدایی مدل در پوشش داده‌های مشاهداتی است (جدول ۴). زیرحوضه‌های ۱۲ و ۱۵ عملکرد بسیار خوبی داشتند و مدل توانسته داده‌های واقعی را با دقت بالا پوشش دهد و در سایر زیرحوضه‌ها مدل عملکرد قابل قبولی دارد. R-factor در اکثر حوضه کمتر از ۰/۵ است با توجه به اینکه در بیشتر حوضه P-factor بالای ۰/۵ و R-factor کمتر از ۰/۵ است در مدل آنالیز عدم قطعیت به خوبی انجام شده اگر چه عدم قطعیت وجود دارد اما عدم قطعیت مدل زیاد نیست.

آنالیز حساسیت

در این پژوهش از ۱۴ پارامتر برای واسنجی مدل SWAT استفاده شده است (جدول ۵). مقادیر مشخص شده برای هر پارامتر در یک زیرحوضه با زیرحوضه‌های دیگر متفاوت است به همین علت آنالیز حساسیت در مرحله واسنجی برای زیرحوضه‌ها جداگانه انجام می‌شود در واقع حساسیت هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها بر حسب شرایط و ویژگی‌هایشان، در برابر یک پارامتر خاص متفاوت می‌باشد (جدول ۵). تغییر در محدوده مقادیر هر پارامتر بر نتایج واسنجی اثر می‌گذارد. جدول آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های ۱، ۶، ۸ و ۹ به SOL-AWC بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند و زیرحوضه‌های ۱۰، ۱۲، ۱۵ به GW-QMN بیشترین حساسیت را نشان می‌دهند و حوضه‌های ۶، ۷، ۹ و ۱۳ کمترین حساسیت را به ESCO نشان می‌دهند.

سطح مدیریت رودخانه

سطح مدیریت رودخانه تحت سناریو واقعی

بر اساس این سناریو، (شکل ۹) میانگین جریان سالانه رودخانه در حوضه آبریز دارای تغییرات قابل توجه بوده و

در بازه ۰/۵ تا ۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد. زیرحوضه‌های جنوبی و برخی زیرحوضه‌های مرکزی پایین‌ترین دبی‌های رودخانه را تجربه می‌کنند، به گونه‌ای که جریان رودخانه عمدتاً کمتر از ۱۵ مترمکعب بر ثانیه است. در مقابل، در نواحی شمالی و شرقی جریان رودخانه بیش از ۳۰ مترمکعب بر ثانیه بوده است. به طور کلی، جریان رودخانه در مسیر پایین دست افزایش یافته و بیشینه دبی به ۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه در زیرحوضه ۵ می‌رسد، که در این نقطه آب رودخانه به دریای خزر تخلیه می‌شود. با وجود آنکه میانگین سالانه آب در دسترس در طول حوضه آبریز طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ عمدتاً در بازه ۰/۱ تا ۲۱ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد، الگوی توزیع مکانی آب در دسترس، مشابه الگوی توزیع جریان رودخانه در سطح حوضه مطالعه است به طور مشابه، مناطق جنوبی و برخی مناطق مرکزی حوضه دارای پایین‌ترین میزان آب در دسترس هستند، که عمدتاً کمتر از ۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، در حالی که بیشترین مقادیر آب در دسترس (۱۰-۲۱ مترمکعب بر ثانیه) در مناطق شمالی و شرقی مشاهده شد. تحلیل مکانی برداشت سالانه میانگین (کل تأمین آب) طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ نشان داد که مناطق جنوبی، به استثنای زیرحوضه ۱۵، حداقل برداشت‌ها را تجربه می‌کنند و این مقادیر معمولاً کمتر از ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه در کل حوضه آبریز است. همچنین، برداشت آب در چند زیرحوضه واقع در مناطق شمالی و شرقی بیش از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه گزارش شد. با این حال، در اکثر زیرحوضه‌ها، میزان برداشت بین ۱ تا ۵ مترمکعب بر ثانیه است که با وجود حجم بالای آب در دسترس در مناطق شرقی و شمال شرقی، سطح مدیریت منفی گزارش شد که علت آن برداشت بیش از حجم آب در دسترس است. در مناطق مرکزی، با وجود دسترسی محدودتر به منابع آبی، کاهش میزان برداشت منجر به دستیابی به سطح مدیریت، قابل قبول است.

جدول ۳. عملکرد SWAT در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی

Table 3. The SWAT performance during the Calibration and Validation periods

دوره‌ی صحت سنجی (۲۰۱۷-۲۰۱۱) Validation Period (2011-2017)								دوره‌ی واسنجی (۲۰۱۰-۱۹۹۷) Calibration Period (1997-2010)								حوضه Subbasin
میانگین جریان (مترمکعب در ثانیه) Mean Annual Flow (m³/s)		شاخص تطابق Index of Agreement (IA)	خطای بایاس میانگین Mean Bias Error (MBE)	خطای جذر میانگین مربعات Root Mean Square Error (RMSE)	کلین گوپتا Kling-Gupta efficiency (KGE)	ضرب نش ساتکلیف Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)	ضرب تعیین Coefficient of Determination (R²)	میانگین جریان (مترمکعب در ثانیه) Mean Annual Flow (m³/s)		شاخص تطابق Index of Agreement (IA)	خطای بایاس میانگین Mean Bias Error (MBE)	خطای جذر میانگین مربعات Root Mean Square Error (RMSE)	کلینگ گوپتا Kling-Gupta efficiency (KGE)	ضرب نش ساتکلیف Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)	ضرب تعیین Coefficient of Determination (R²)	
شبیه سازی شده Simulated	اندازه گیری شده Observed							شبیه سازی شده Simulated	اندازه گیری شده Observed							
19.59	18.41	0.88	1.18	18.45	0.69	0.67	0.67	36.21	39.88	0.93	-3.60	30.10	0.70	0.80	0.83	1
3.80	3.81	0.84	-0.01	2.91	0.71	0.54	0.55	3.51	3.31	0.82	0.20	3.64	0.56	0.58	0.60	2
12.75	11.36	0.86	1.39	12.41	0.67	0.61	0.62	24.10	23.58	0.96	0.52	13.40	0.90	0.88	0.88	3
2.23	2.46	0.84	-0.23	2.46	0.61	0.61	0.62	2.08	2.05	0.87	0.03	2.00	0.75	0.61	0.62	4
43.49	53.39	0.86	-9.90	50.74	0.69	0.56	0.59	72.15	65.53	0.95	6.691	45.49	0.86	0.81	0.82	5
0.95	0.93	0.66	0.01	2.37	0.41	0.29	0.29	1.90	2.03	0.92	-0.14	3.43	0.75	0.75	0.76	6
6.21	6.24	0.94	-0.04	2.11	0.79	0.80	0.80	6.39	6.59	0.93	-0.20	2.32	0.78	0.89	0.80	7
0.46	0.52	0.88	-0.06	0.50	0.58	0.70	0.77	0.38	0.28	0.82	0.10	0.46	0.51	0.49	0.52	8
28.23	33.35	0.82	-5.12	31.18	0.51	0.58	0.64	46.64	51.64	0.91	-5.00	39.37	0.69	0.74	0.77	9
45.93	48.98	0.90	-3.05	32.00	0.80	0.66	0.68	68.93	68.93	0.95	-1.53	39.89	0.88	0.82	0.82	10
13.82	16.65	0.93	-2.83	8.45	0.77	0.75	0.78	16.96	18.23	0.96	-1.27	9.60	0.85	0.81	0.85	11
0.30	0.40	0.86	-0.10	0.32	0.66	0.49	0.60	1.02	1.10	0.93	-0.08	0.95	0.57	0.62	0.87	12
8.56	7.30	0.94	1.26	5.51	0.69	0.83	0.88	14.86	17.40	0.92	-2.54	14.40	0.62	0.80	0.89	13
5.83	6.83	0.94	-1.00	5.66	0.63	0.84	0.95	8.48	11.03	0.95	-2.55	7.44	0.62	0.87	0.96	14
0.94	0.73	0.58	0.21	1.43	0.23	0.83	0.19	3.10	4.02	0.96	-0.92	2.57	0.76	0.84	0.86	15

جدول ۴. معیارهای عدم قطعیت مدل (R-factor و P-factor) و میانگین جریان اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در دوره واسنجی.

Table 4. Model Uncertainty Metrics (P-Factor And R-Factor) And Mean Annual Observed And Simulated Streamflows During The Calibration Period.

دوره ی واسنجی (۱۹۹۷-۲۰۱۰)				
Calibration period (1010 – 1997)				
میانگین جریان (مترمکعب در ثانیه)		R-Factor	P-Factor	حوضه Subbasin
Mean Annual Flow (m ³ /s)				
شبیه سازی شده Simulated	اندازه گیری شده Observed			
36.21	39.88	0.28	0.54	1
3.51	3.31	0.48	0.64	2
24.10	23.58	0.41	0.57	3
2.08	2.05	0.49	0.60	4
72.15	65.53	0.27	0.35	5
1.90	2.03	0.36	0.56	6
6.39	6.59	0.34	0.57	7
0.38	0.28	0.33	0.52	8
46.64	51.64	0.30	0.65	9
68.93	68.93	0.15	0.44	10
16.96	18.23	0.78	0.68	11
1.02	1.10	0.53	0.77	12
14.86	17.40	0.64	0.64	13
8.48	11.03	0.29	0.50	14
3.10	4.02	4.32	0.83	15

جدول ۵. پارامترهای مورد استفاده در مدل SWAT و نتایج آنالیز حساسیت

Table 5. Parameters used in the SWAT model and results of sensitivity analysis

آنالیز حساسیت Sensitivity analysis					پارامترهای استفاده شده در مدل SWAT parameters used in the SWAT model			
کمترین Minimum	بیشترین Maximum	حوضه Subbasin	بازه Range	واحد Unit	تعریف Definition	نوع تغییرات Type of variations	نام پارامتر Parameter name	ردیف Row
SOL_K	SOL_AWC	1	-0.2 – 0.2	_____	شماره منحنی Curve Number	نسبی Relative	CN2	1
SOL_AWC	HRU_SLP	2	0 - 2000	mm/h	هدایت هیدرولیک خاک Soil Hydraulic Conductivity	مطلق Absolute	SOL_K	2
ALPHA_BF	SLSOIL	3	0 - 1	_____	ضریب جبران تبخیر خاک Soil Evaporation Reduction Coefficient	مطلق Absolute	ESCO	3
REVAPMN	CN2	4	0.01 - 1	_____	ضریب زبری در معادله مانینگ Manning's Roughness Coefficient	مطلق Absolute	OV_N	4
REVAPMN	GW_DELAY	5	0 - 1	_____	درجه شیب Slope angle	مطلق Absolute	HRU_SLP	5
ESCO	SOL_AWC	6	10 - 150	m	میانگین طول شیب Mean slope length	مطلق Absolute	SLSUBBSN	6
ESCO	LAT_TTIME	7	0 - 1	mm	مقدار نفوذ آب به آبخوان عمیق Deep aquifer recharge	مطلق Absolute	RCHRG_DP	7
SOL_BD	SOL_AWC	8	0 - 500	mm	حداقل عمق آب زیرزمینی برای تبخیر Minimum groundwater depth for evaporation	مطلق Absolute	REVAPMN	8
ESCO	SOL_AWC	9	0.02 – 0.2	_____	ضریب تبخیر مجدد آب‌های زیرزمینی Groundwater Re-evaporation Coefficient	مطلق Absolute	GW_REVAP	9
LAT_TTIME	GW_QMN	10	0 - 1	days	ضریب آلفا دبی پایه Baseflow Alpha Factor	مطلق Absolute	ALPHA_BF	10
GW_DELAY	ALPHA_BF	11	0 - 500	days	تأخیر آب‌های زیرزمینی در پیوستن به جریان پایه رودخانه	مطلق	GW_DELAY	11

					Groundwater Delay	Absolute		
SOL_K	GW_QMN	12	0 - 5000	mm	حداقل عمق آب مورد نیاز در آبخوان برای ایجاد جریان پایه Minimum water table depth required for baseflow	مطلق Absolute	GW_QMN	12
ESCO	GW_REVAP	13	0 - 1	mm	میزان آب در دسترس خاک Available Water Content	مطلق Absolute	SOL_AWC	13
GW_REVAP	LAT_TTIME	14	0.9 - 2.5	gr/cm ³	چگالی ظاهری خاک Soil Bulk Density	مطلق Absolute	SOL_BD	14
SLSOIL	GW_QMN	15	0 - 180	days	زمان حرکت جریان جانبی Lateral Flow Travel Time	مطلق Absolute	LAT_TTIME	15
			0 - 150	mm	طول شیب برای جریان جانبی زیرسطحی Slope Length for Subsurface Lateral Flow	مطلق Absolute	SLSOIL	16

سطح مدیریت رودخانه تحت سناریو کاربری اراضی

همان گونه که پیش تر اشاره شد، این سناریو شرایط اقلیمی واقعی (سری زمانی واقعی بارش و دما) را تحت فرض عدم تغییر کاربری اراضی طی دوره مشاهداتی ۱۹۹۵-۲۰۱۷ در نظر می گیرد. شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل SWAT نشان می دهد (شکل ۱۰) که دبی متوسط سالانه رودخانه در محدوده حوضه آبریز از ۰/۵ تا ۸۹ مترمکعب بر ثانیه متغیر است. اکثر ایستگاه ها، از مناطق جنوبی تا مناطق شمالی، عموماً دبی رودخانه ای در محدوده ۱۰ تا ۶۰ مترمکعب بر ثانیه را تجربه می کنند. برخی مناطق مانند زیرحوضه های ۱۲ و ۱۵ معمولاً دبی رودخانه ای کمتر از ۵ مترمکعب بر ثانیه را تجربه می کنند، در حالی که مناطق شمالی نظیر زیرحوضه های ۵ و ۱۰ طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ تمایل به تجربه دبی هایی بیش از ۶۰ مترمکعب بر ثانیه دارند. در همین حال، متوسط سالانه آب موجود در سراسر حوضه آبریز طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ در محدوده ۰/۱ تا ۱۸ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد و توزیع مکانی مشابهی با جریان رودخانه نشان می دهد. مجدداً، مناطق شمالی بیشترین میزان آب موجود، معمولاً بین ۱۰ تا ۱۸ مترمکعب بر ثانیه، را دارا هستند. از آنجایی که فرض شده است کل منابع آب برابر با مقادیر متناظر در سناریوی واقعی باشد، توزیع مکانی برداشت از منابع آب نیز به همین ترتیب خواهد بود. میزان برداشت آب در حوضه آبریز سفیدرود از صفر تا ۴۸ مترمکعب بر ثانیه متغیر است، به طوری که مناطق جنوبی معمولاً حداقل برداشت ها را تجربه می کنند که معمولاً کمتر از ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه است، در حالی که مناطق شمالی و شرقی بیشترین میزان برداشت ها را دارند (بیش از ۲۵ مترمکعب بر ثانیه). همچنین، ارزیابی شاخص سطح مدیریت نشان می دهد که این شاخص در حوضه سفیدرود در محدوده ۴- تا ۱+ متغیر است. مشابه توزیع شاخص سطح مدیریت در سناریوی واقعی، شاخص سطح مدیریت در مناطق شرقی و

شمال شرقی و همچنین در چند زیرحوضه جنوبی و غربی منفی است، که ناشی از میزان برداشت بالاتر از آب موجود می باشد و منجر به ایجاد هشت نقطه حساس اکولوژیکی شده است. تحلیل تغییرات کاربری اراضی طی سال های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ نشان می دهد که تغییر کلی کاربری اراضی شامل کاهش مراتع و جنگل ها و افزایش اراضی کشاورزی و همچنین شهرنشینی است. با این حال، هر زیرحوضه ممکن است نرخ تغییرات متفاوتی را تجربه کند. تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر جریان رودخانه در هر زیرحوضه، با استفاده از اختلاف بین جریان رودخانه شبیه سازی شده در سناریوی واقعی و مقادیر متناظر در سناریوی بدون تغییر کاربری اراضی اندازه گیری می شود (جریان در سناریوی واقعی منهای جریان در سناریوی بدون تغییر کاربری اراضی). نقشه تأثیر تغییرات کاربری اراضی نشان می دهد (شکل ۱۱) که اکثر زیرحوضه ها افزایش جریان رودخانه را تجربه می کنند؛ با این حال، برخی مناطق از جمله زیرحوضه های ۷، ۸ و ۱۲ تغییر قابل توجهی در جریان رودخانه ندارند. پوشش های طبیعی زمین مانند جنگل ها و مراتع نسبت به اراضی کشاورزی پتانسیل کمتری برای تولید رواناب دارند. در نتیجه، افزایش اراضی کشاورزی موجب افزایش پتانسیل رواناب تولید شده در حوضه آبریز می شود. تغییرات کاربری اراضی جریان رودخانه را تا ۲۲ مترمکعب بر ثانیه در سراسر حوضه سفیدرود افزایش می دهد، در حالی که بیشترین افزایش در مناطق شرقی رخ می دهد. در همین حال، افزایش جریان رودخانه در اکثر مناطق معمولاً کمتر از ۲ مترمکعب بر ثانیه است. همچنین، آب موجود رودخانه طی دوره مطالعه معمولاً بین صفر تا ۴/۴ مترمکعب بر ثانیه افزایش می یابد. باز هم، از آنجایی که میزان برداشت از منابع آب در هر دو سناریوی واقعی و بدون تغییر کاربری اراضی یکسان است، تغییرات شاخص سطح مدیریت ناشی از تغییر در آب در دسترس می باشد. به طور کلی، تغییرات

کاربری اراضی باعث افزایش سطح مدیریت زیرحوضه‌ها به دلیل افزایش جریان رودخانه و آب موجود در طی دوره مطالعه می‌شود.

سطح مدیریت آب‌های زیرزمینی

سطح مدیریت آب‌های زیرزمینی تحت سناریو واقعی

تحلیل تغذیه آب‌های زیرزمینی در سناریوی واقعی (شکل ۱۲) نشان داد که میانگین سالانه تغذیه آب‌های زیرزمینی در سطح حوضه طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ در بازه ۱ تا ۴۹ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد.

اکثر زیرحوضه‌ها، تغذیه آب‌های زیرزمینی در محدوده ۲۰-۳۰ مترمکعب بر ثانیه را تجربه کردند، در حالی که مناطق شمالی بیشترین نرخ تغذیه، بیش از ۳۰ مترمکعب بر ثانیه، را نشان دادند.

برخی زیرحوضه‌های واقع در مناطق غربی و شرقی، تغذیه آب زیرزمینی کمتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه داشتند.

ارزیابی میزان آب زیرزمینی در دسترس نشان داد که میانگین سالانه آب در دسترس زیرزمینی در حوضه سفیدرود بین ۰/۷ تا ۳۰ مترمکعب بر ثانیه قرار داشت، به گونه‌ای که اکثر مناطق در بازه ۱۰-۳۰ مترمکعب بر ثانیه از منابع زیرزمینی بهره‌مند بودند.

با این حال، میزان آب‌های زیرزمینی موجود در برخی از زیر حوضه‌های غربی و شرقی منطقه مطالعه به کمتر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد.

تحلیل توزیع مکانی متوسط برداشت سالانه آب زیرزمینی (کل تأمین آب از منابع زیرزمینی) نشان می‌دهد که میزان کل تأمین آب در حوضه آبریز سفیدرود در بازه ۰ تا ۳۸ متر مکعب بر ثانیه قرار دارد.

با این وجود، در حالی که مناطق جنوبی حوضه به‌طور معمول با برداشت‌های حداکثری بیش از ۵ متر مکعب بر

ثانیه مواجه هستند، میزان برداشت آب زیرزمینی در زیرحوضه‌های واقع در شمال و شرق منطقه کمتر از ۲/۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد.

شایان ذکر است که میزان برداشت آب زیرزمینی در مناطق شمالی و شرقی پایین است، در حالی که برداشت آب رودخانه در این مناطق به دلیل جریان کافی رودخانه در بیشترین مقدار خود قرار دارد.

در واقع، به دلیل دسترسی آسان‌تر و هزینه کمتر آب رودخانه نسبت به منابع زیرزمینی، تمایل به تأمین آب از رودخانه در شمال و شرق منطقه بیشتر است.

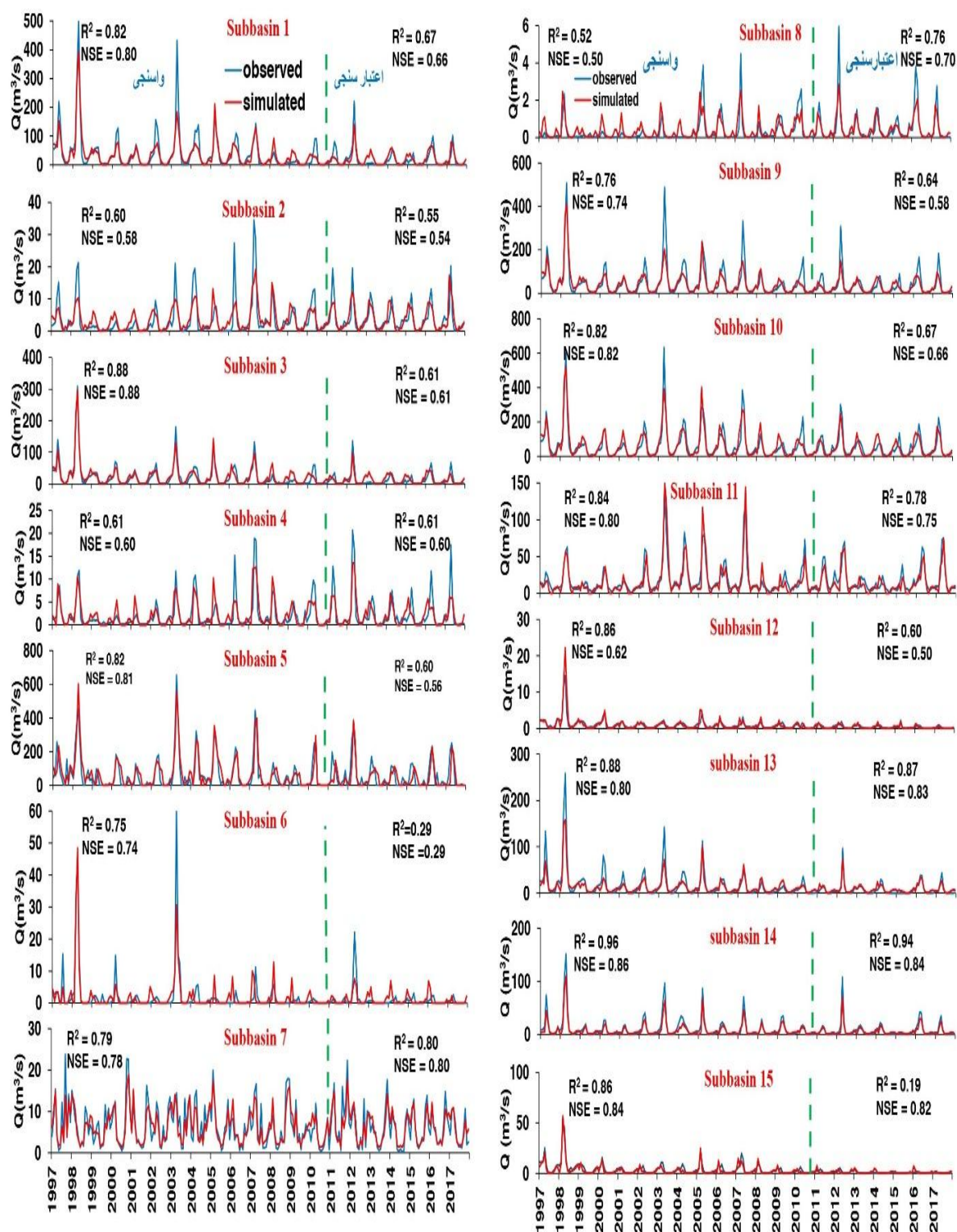
در مقابل، جریان رودخانه در زیرحوضه‌های جنوبی حوضه سفیدرود کمتر از سایر حوضه‌ها بوده و این امر منجر به کاهش دسترسی به آب رودخانه برای برداشت و افزایش تمایل به بهره‌برداری از آب زیرزمینی می‌شود.

سرانجام، ارزیابی سطح مدیریت آب زیرزمینی در دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ نشان می‌دهد که مقادیر سطح مدیریت در منطقه مطالعه بین ۸/۱۸- تا ۱+ تغییر می‌کند.

اکثر زیرحوضه‌ها دارای سطح مدیریت آب زیرزمینی بالاتر از صفر بوده که نشان‌دهنده سطح مدیریت مطلوب منابع است.

علاوه بر این، ۱۰ زیرحوضه دارای مقادیر سطح مدیریت بالاتر از ۰/۵+ هستند، که بیانگر وجود ظرفیت کافی (برابر یا بیشتر از میزان برداشت از آب زیرزمینی) برای توسعه بیشتر زیرساخت‌ها و فعالیت‌های صنعتی وابسته به آب در حالی که اکوسیستم حفظ می‌شود، می‌باشد.

با این حال، سه زیرحوضه که دارای سطح مدیریت منفی هستند، به عنوان نقاط داغ اکولوژیکی شناخته می‌شوند، چرا که میزان برداشت آب زیرزمینی در این مناطق از میزان موجود فراتر رفته و منجر به فشار آبی بر اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی حوضه‌ها می‌شود.



شکل ۸. مقایسه بین جریان رودخانه ماهانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط SWAT در طول دوره‌های کالیبراسیون (۱۹۹۷–۲۰۱۰) و اعتبارسنجی (۲۰۱۱–۲۰۱۷) با استفاده از معیارهای ضریب تعیین (R^2) و کارایی نش ساتکلیف (NSE).

Fig 8. Comparison Between Observed And SWAT Simulated Monthly River Discharge During The Calibration (1997–2010) And Validation (2011–2017) Periods Using The Coefficient of Determination (R^2) And Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE).

اکثر زیرحوضه‌ها دارای سطح مدیریت آب زیرزمینی بالاتر از صفر بوده که نشان‌دهنده سطح مدیریت مطلوب منابع است.

علاوه بر این، ۱۰ زیرحوضه دارای مقادیر سطح مدیریت بالاتر از $+0.5$ هستند، که بیانگر وجود ظرفیت کافی (برابر یا بیشتر از میزان برداشت از آب زیرزمینی) برای توسعه بیشتر زیرساخت‌ها و فعالیت‌های صنعتی وابسته به آب در حالی که اکوسیستم حفظ می‌شود، می‌باشد.

با این حال، سه زیرحوضه که دارای سطح مدیریت منفی هستند، به‌عنوان نقاط داغ اکولوژیکی شناخته می‌شوند، چرا که میزان برداشت آب زیرزمینی در این مناطق از میزان موجود فراتر رفته و منجر به فشار آبی بر اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی حوضه‌ها می‌شود.

سطح مدیریت آب‌های زیرزمینی تحت سناریو

کاربری اراضی

شبیه‌سازی تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی در سناریوی بدون تغییر کاربری اراضی نشان می‌دهد (شکل ۱۳) که متوسط سالانه تغذیه آب‌های زیرزمینی در سراسر حوضه آبریز طی دوره مشاهداتی ۱۹۹۵-۲۰۱۷ در محدوده ۱ تا ۶۸ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد.

اگرچه چند زیرحوضه طی دوره مطالعه تغذیه آب زیرزمینی کمتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه را تجربه می‌کنند، مناطق شمالی حوضه عموماً بیشترین نرخ تغذیه، معمولاً بیش از ۵۰ مترمکعب بر ثانیه، را نشان می‌دهند.

نرخ تغذیه آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود عمدتاً در محدوده ۱۰ تا ۵۰ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد.

ارزیابی دسترسی به آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که اکثر مناطق طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ متوسط سالانه‌ای در

محدوده ۱۰ تا ۳۰ مترمکعب بر ثانیه را تجربه می‌کنند، در حالی که دسترسی به آب زیرزمینی در محدوده ۰/۶ تا ۱۰ مترمکعب بر ثانیه در شش زیرحوضه که به‌صورت پراکنده در حوضه آبریز سفیدرود واقع شده‌اند، مشاهده می‌شود.

به‌طور کلی، متوسط سالانه آب زیرزمینی موجود در سراسر حوضه آبریز طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ در محدوده ۰/۶ تا ۴۲ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد.

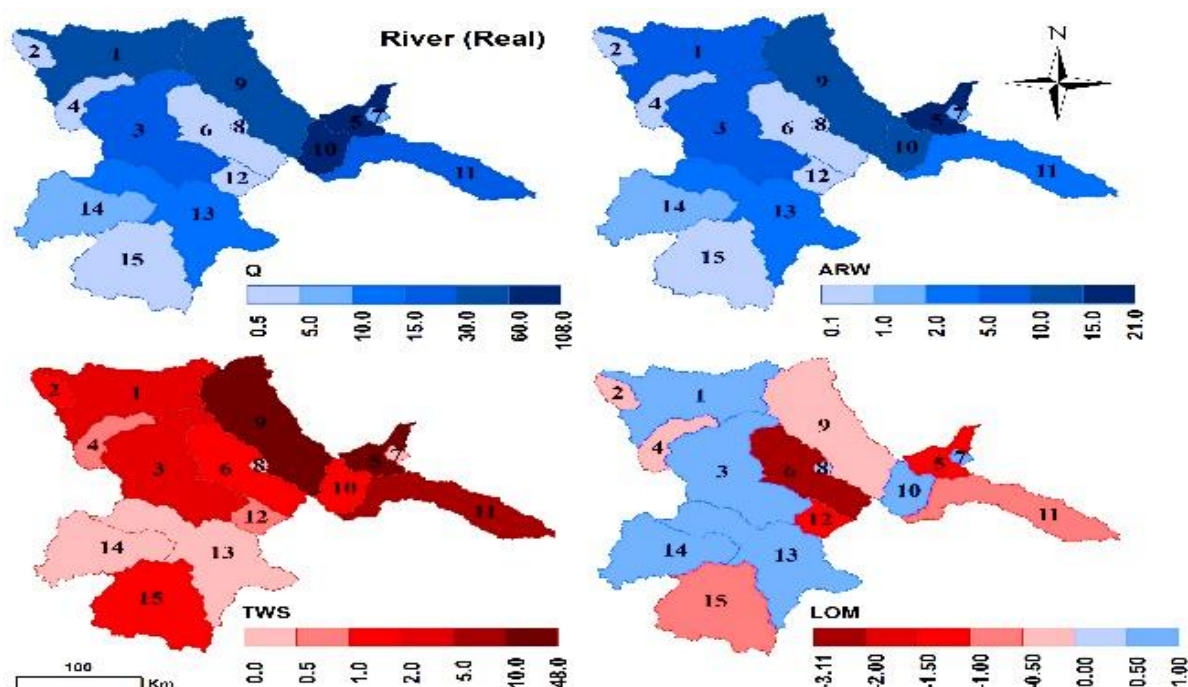
همچنین، توزیع مکانی برداشت از منابع آب در حوضه آبریز سفیدرود طی دوره مطالعه در محدوده صفر تا ۳۸ مترمکعب بر ثانیه متغیر است.

میزان برداشت آب زیرزمینی در مناطق شمالی و شرقی پایین است (کمتر از ۵ مترمکعب بر ثانیه)، در حالی که مناطق جنوبی تمایل به تجربه بیشترین برداشت از آب زیرزمینی دارند (بیش از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه)، که مشابه توزیع مکانی متوسط سالانه برداشت آب زیرزمینی در سناریوی واقعی است.

در نهایت، شاخص سطح مدیریت آب زیرزمینی در سراسر منطقه مطالعه از $-8/27$ تا $+1$ متغیر است، به‌طوری که اغلب مناطق مدیریت قابل قبول را نشان می‌دهند، یعنی سطح مدیریت بزرگ‌تر از صفر است.

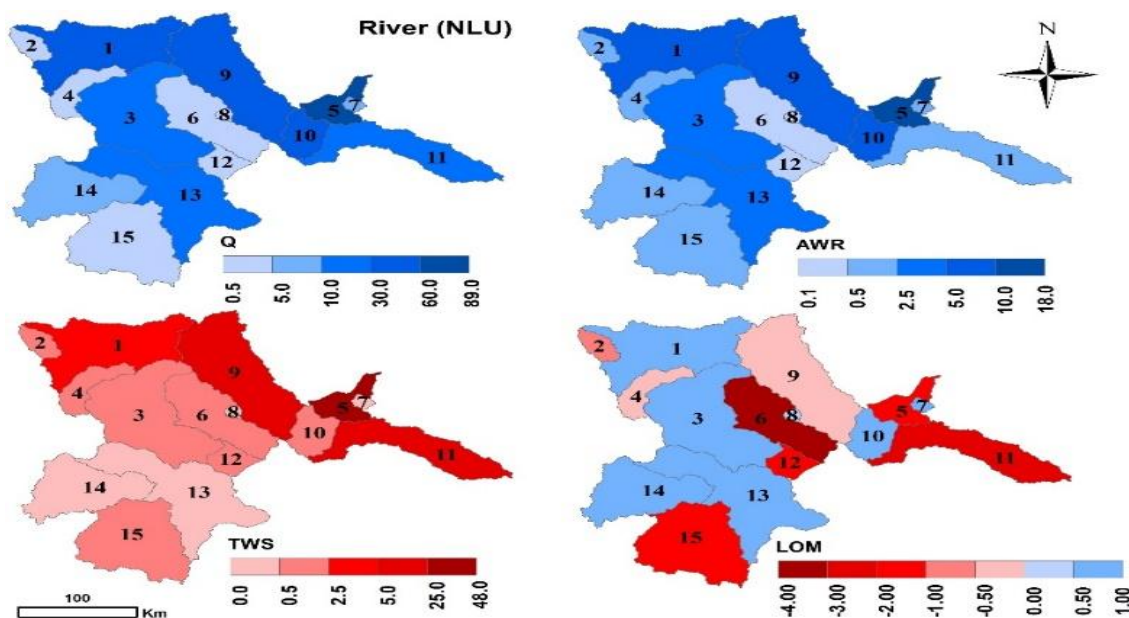
دو منطقه (زیرحوضه‌های ۷ و ۱۳) وجود دارد که به‌دلیل میزان برداشت بالاتر از آب زیرزمینی موجود، شاخص سطح مدیریت منفی را تجربه می‌کنند.

سطح مدیریت منفی یعنی مقدار برداشت بیشتر از تغذیه سالانه بوده و در این شرایط قسمتی از برداشت از سهم چشمه‌ها و یا زهکشی توسط رودخانه تأمین می‌گردد و لذا این امر منجر به تنش در نیاز آبی اکوسیستم وابسته به آب زیرزمینی می‌شود.



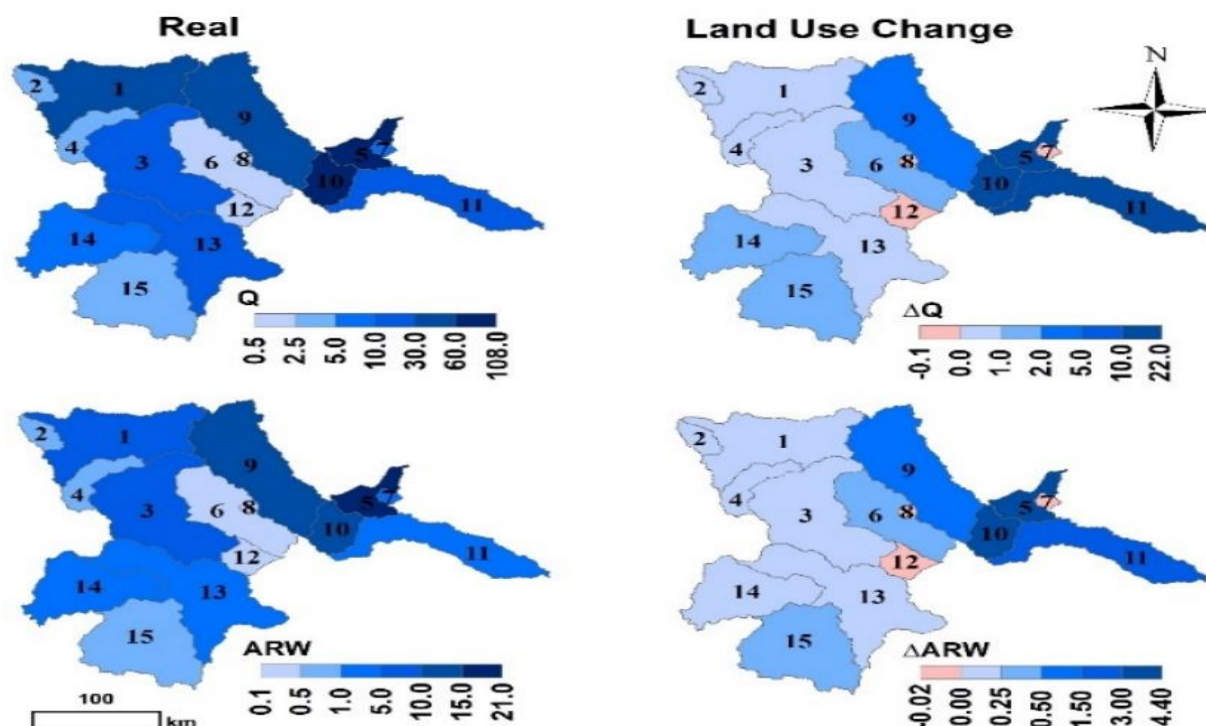
شکل ۹. نقشه‌های توزیع مکانی میانگین سالانه جریان رودخانه (Q)، حجم آب موجود رودخانه (Available River Water, ARW)، کل حجم آب تأمین شده از رودخانه (Total Water Supply, TWS)، بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت (Level of Management, LOM) برای منابع آب سطحی در سناریوی واقعی.

Fig 9. Spatial Distribution Maps of Mean Annual River Discharge (Q), Available River Water (ARW), Total Water Supply From Rivers (TWS) And Level of Management (LOM) For Surface Water Resources Under Real Scenario.



شکل ۱۰. نقشه‌های توزیع مکانی میانگین سالانه جریان رودخانه (Q)، حجم آب موجود رودخانه (Available River Water, ARW)، حجم کل آب تأمین شده از رودخانه (Total Water Supply, TWS)، بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت (Level of Management, LOM) برای منابع آب سطحی در سناریو کاربری اراضی (NLU).

Fig 10. Spatial Distribution Maps of Mean Annual River Discharge (Q), Available River Water (ARW), Total Water Supply From Rivers (TWS) And Level of Management (LOM) For Surface Water Resources Under The Land Use (NLU) Scenario.



شکل ۱۱. نقشه‌های توزیع مکانی میانگین سالانه جریان رودخانه (Q) و حجم آب موجود رودخانه (ARW) در سناریو واقعی (Real) و تغییرات مربوطه در جریان (ΔQ) و حجم آب موجود (ΔARW) رودخانه تحت تغییرات کاربری اراضی (Land Use Change) بر حسب متر مکعب بر ثانیه.

Fig 11. Spatial Distribution Maps of Mean Annual River Discharge (Q) And Available River Water (ARW) Under The Real Scenario, And Corresponding Changes in River Discharge (ΔQ) And Available River Water (ΔARW) Under Land Use Change All Unites Are m³/s.

تغییرات کاربری اراضی منجر به کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی به میزان ۰/۵ تا ۲۲ مترمکعب بر ثانیه در اکثر مناطق طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ می‌شود،

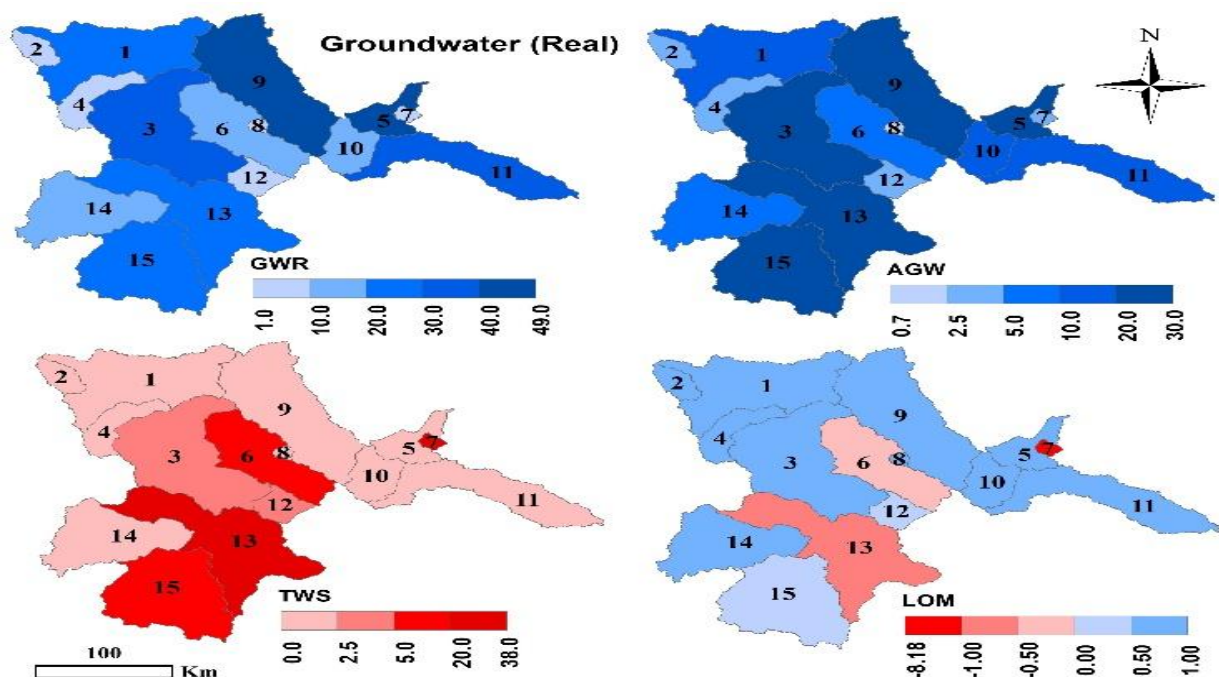
در حالی که تغذیه آب‌های زیرزمینی در سه زیرحوضه کوچک ممکن است به‌طور بسیار جزئی (کمتر از ۰/۱ مترمکعب بر ثانیه) افزایش یابد.

همچنین، تغییرات کاربری اراضی باعث کاهش آب زیرزمینی موجود (۰-۲۰ مترمکعب بر ثانیه) در اکثر مناطق حوضه آبریز سفیدرود طی دوره مطالعه ۱۹۹۵-۲۰۱۷ می‌شود.

در نهایت، شاخص سطح مدیریت آب زیرزمینی در بیشتر مناطق مطالعاتی به‌دلیل تغییرات کاربری اراضی کاهش می‌یابد.

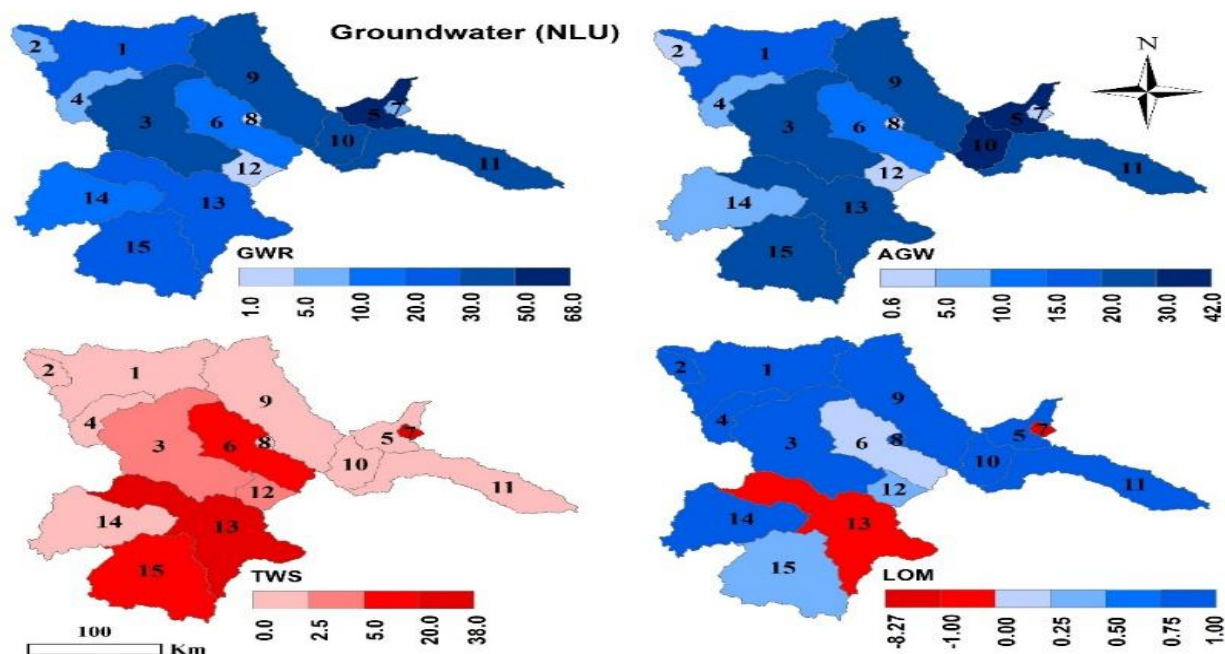
شاخص سطح مدیریت آب زیرزمینی در سه زیرحوضه بین صفر تا ۰/۲۵+ متغیر است؛ با این حال، در اکثر مناطق این شاخص بیش از ۰/۵+ است.

ارزیابی اختلاف بین تغذیه شبیه‌سازی‌شده آب‌های زیرزمینی در سناریوی واقعی و مقادیر متناظر، در سناریوی بدون تغییر کاربری اراضی (تغذیه آب‌های زیرزمینی در سناریوی واقعی من‌های مقادیر سناریوی بدون تغییر کاربری اراضی) نشان می‌دهد (شکل ۱۴) که اکثر مناطق کاهش در تغذیه آب‌های زیرزمینی را تجربه می‌کنند؛ با این حال، سه زیرحوضه کوچک تمایل به تجربه افزایش ناچیز در نرخ تغذیه آب‌های زیرزمینی طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ دارند.



شکل ۱۲. نقشه‌های توزیع مکانی میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی (Ground Water Recharge, GWR)، حجم آب زیرزمینی موجود (Available Groundwater, AGW)، حجم کل تأمین آب از سفره‌های آب زیرزمینی (Total Water Supply, TWS) بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت (Level of Management, LOM) برای منابع آب زیرزمینی در سناریوی واقعی.

Fig 12. Spatial Distribution Maps of Mean Annual Groundwater Recharge (GWR), Available Groundwater (AGW), Total Water Supply From Aquifers (TWS) And Level of Management (LOM) For Groundwater Resources Under The Real Scenario.



شکل ۱۳. نقشه‌های توزیع مکانی میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی (Ground Water Recharge, GWR)، حجم آب زیرزمینی موجود (Available Groundwater, AGW)، حجم کل تأمین آب از سفره‌های آب زیرزمینی (Total Water Supply, TWS) بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت (Level of Management, LOM) برای منابع آب زیرزمینی در سناریوی کاربری اراضی (NLU).

Fig 13. Spatial Distribution Maps of Mean Annual Groundwater Recharge (GWR), Available Groundwater (AGW), Total Water Supply From Aquifers (TWS) And Level of Management (LOM) For Groundwater Resources Under The Land Use (NLU) Scenario.

بحث

مطالعات انجام شده بر روی فرایندهای مرتبط با منابع آب و محیط زیست وابسته به آنها نشان می‌دهد که حجم آب موجود و میزان برداشت از منابع آب و سایر شاخص‌های زیست محیطی در طول زمان دچار تغییرات قابل توجهی هستند (Kousali et al., 2022; ModabberAzizi et al., 2023; Salarijazi et al., 2023).

این تغییرات عمدتاً تحت تأثیر عوامل مدیریتی، تغییرات کاربری اراضی و الگوهای بهره برداری از منابع آب قرار دارد. این مطالعه سهم محیط زیست بر اساس متوسط طولانی مدت دوره مطالعاتی در نظر گرفته شده است در حالی که دبی رودخانه در طی سال‌های مختلف و ماه‌ها متغیر بوده، بنابراین سهم محیط زیست با زمان تغییر می‌کند این تغییرات نشان می‌دهد که برای ارزیابی دقیق مدیریتی سهم آبی محیط زیست را نباید مقدار ثابتی در نظر گرفت اما می‌توان جهت برآورد مدیریت رودخانه و آب زیرزمینی در هر زمان سهم محیط زیست را بر اساس روش‌های استفاده شده در این مطالعه برآورد کرد تا مدیران منابع آب در مواجهه شدن با تغییرات در حجم آب موجود، تصمیمات مبتنی بر شرایط واقعی اتخاذ کنند. بنابراین انتظار می‌رود سهم محیط زیست در دوره‌های خشک‌سالی به دلیل کاهش دبی رودخانه‌ها و نفوذ به آب زیرزمینی، کاهش یافته و در دوره‌های تر سالی، افزایش یابد.

در آینده تغییرات اقلیم که منجر به کاهش یا افزایش بارندگی شود، بر روی حجم آب موجود اثر گذاشته و ناپایداری را افزایش می‌دهد.

یکی از پارامترهای مهم در تعیین سطح مدیریت منابع آب زیرزمینی تغذیه آب زیرزمینی است، بنابراین ارزیابی دقیق آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

برداشت بیش از ظرفیت آب موجود در منابع آب زیرزمینی عامل پایین آمدن سطح آنها بوده بنابراین بهبود سیستم

برداشت و پایش و بررسی آب‌های زیرزمینی باید در اولویت مدیریت منابع آب باشد (Japan International Cooperation Agency (JICA), 2015).

مطالعه انجام شده تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل سازی عددی SWAT در کل حوضه آبریز سفیدرود را در بازه ۱-۴۹ متر مکعب بر ثانیه که معادل ۵۴/۰-۴۳/۲۶ میلی‌متر در سال است، محاسبه نموده که با توجه به بخش نتایج و ارزیابی عملکرد و عدم قطعیت کم در نتایج آن و مقایسه مقادیر با مقدار تغذیه آب زیرزمینی حوضه سفیدرود در مطالعات سازمان همکاری بین‌المللی ژاپن که ۳۲ میلی‌متر در سال گزارش شده است نشانه اعتبار و دقت نتایج این مطالعه است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیرات تغییرات کاربری اراضی بر شاخص سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود در ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل تغییرات کاربری اراضی نشان می‌دهد که منطقه مطالعه طی دوره ۲۰۰۲-۲۰۲۱ کاهش مراتع و جنگل‌ها و افزایش اراضی کشاورزی را تجربه کرده است. همچنین، حوضه آبریز شاهد افزایش دمای سالانه است؛ با این حال، بارش سالانه بسته به موقعیت مکانی می‌تواند طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ افزایش یا کاهش یابد.

ارزیابی منابع آب رودخانه‌ای نشان می‌دهد که مناطق جنوبی و چند منطقه مرکزی کمترین میزان دسترسی و برداشت از آب رودخانه را دارند، در حالی که مناطق شمالی و شرقی بیشترین میزان آب موجود و میزان برداشت را تجربه می‌کنند، که منجر به منفی شدن شاخص سطح مدیریت در هشت زیرحوضه طی دوره مشاهداتی ۱۹۹۵-۲۰۱۷ شده است.

تغییرات کاربری اراضی به دلیل افزایش جریان رودخانه و آب موجود، شاخص سطح مدیریت رودخانه را افزایش

می‌دهد (شکل ۱۵). ارزیابی منابع آب زیرزمینی نشان می‌دهد که مناطق غربی و شرقی کمترین دسترسی به آب زیرزمینی را دارند، در حالی که مناطق شمالی و مرکزی بیشترین میزان آب موجود را طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۷ تجربه می‌کنند.

با این حال، برداشت از آب زیرزمینی در مناطق جنوبی بیشتر از بخش‌های شرقی حوضه آبریز سفیدرود است. در نهایت، اکثر مناطق شاخص سطح مدیریت قابل قبولی دارند ($LOM > 0$)، در حالی که سه زیرحوضه به دلیل میزان برداشت بالاتر از آب زیرزمینی در دسترس، شاخص سطح مدیریت منفی دارند که به عنوان نقاط حساس اکولوژیکی شناخته می‌شوند.

تغییرات کاربری اراضی نیز منجر به کاهش شاخص سطح مدیریت آب زیرزمینی در اکثر مناطق می‌شود. یافته‌های کلی این پژوهش به شرح زیر است:

حوضه آبریز سفیدرود کاهش پوشش‌های طبیعی زمین و گسترش اراضی کشاورزی را تجربه کرده است که این امر منجر به افزایش پتانسیل رواناب سطحی و کاهش فرصت‌های تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شده است.

این تغییر کاربری اراضی موجب افزایش دسترسی به آب رودخانه و در نتیجه ارتقای شاخص سطح مدیریت رودخانه می‌شود، در حالی که همزمان دسترسی به آب زیرزمینی و

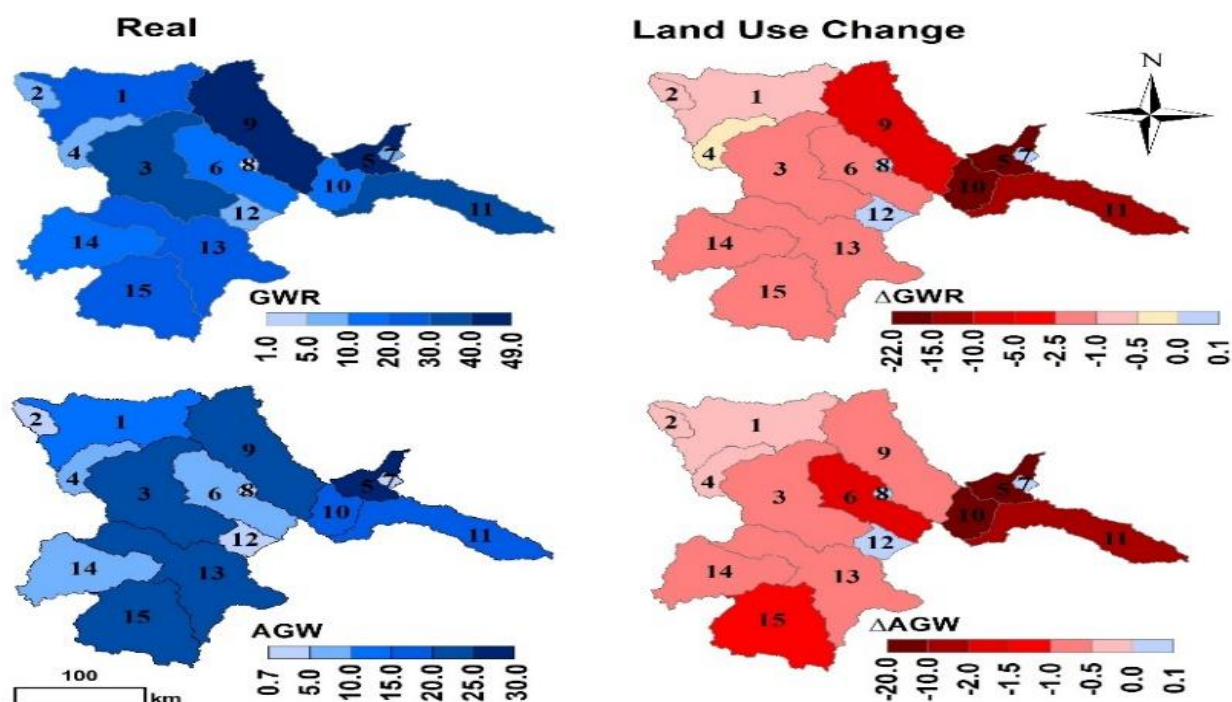
شاخص سطح مدیریت مرتبط با آن کاهش می‌یابد. این پاسخ‌های متضاد، تأثیرات هیدرولوژیکی متفاوت تغییر کاربری اراضی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی را برجسته می‌سازد.

به طور مشخص، نوع کاربری اراضی توزیع آب موجود بین سیستم‌های رودخانه‌ای و زیرزمینی را تعیین می‌کند، به طوری که پوشش‌های مستعد رواناب، تغذیه آب زیرزمینی را محدود می‌کنند و بالعکس.

مناطق که افزایش پوشش‌های طبیعی و کاهش اراضی کشاورزی را تجربه می‌کنند، ممکن است کاهش دسترسی به آب رودخانه و سطح مدیریت رودخانه را نشان دهند، اما شاخص‌های آب زیرزمینی آن‌ها بهبود یابد.

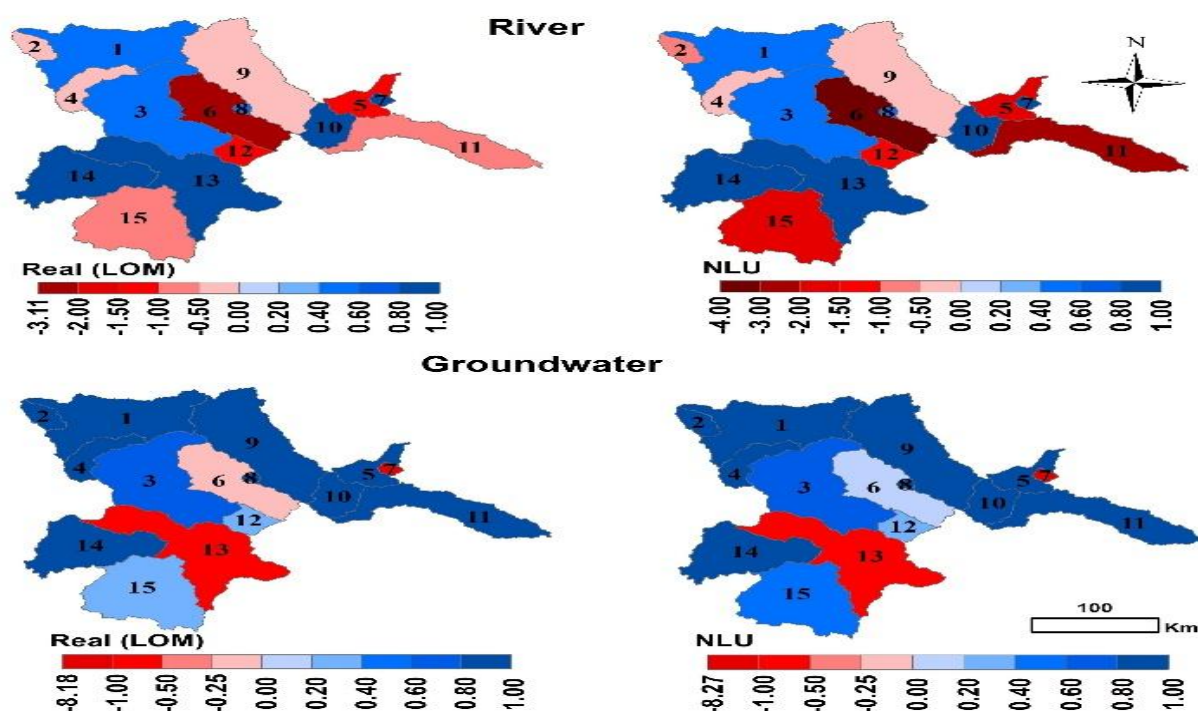
در نتیجه، مناطقی که مسیرهای تغییر کاربری اراضی مشابهی دارند، ممکن است پاسخ‌های هیدرولوژیکی مشابهی نشان دهند، در حالی که مناطق با تاریخچه‌های متفاوت کاربری اراضی ممکن است الگوهای متفاوتی در دسترسی به آب و سطح مدیریت از خود بروز دهند.

با این حال، رفتار متضاد سیستم‌های رودخانه و آب زیرزمینی در پاسخ به تغییرات مشابه کاربری اراضی، یک پدیده ثابت و تکرارشونده باقی می‌ماند.



شکل ۱۴. نقشه‌های توزیع مکانی میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی (Ground Water Recharge, GWR) و حجم آب زیرزمینی موجود (Available Groundwater, AGW) در سناریو واقعی (Real) و تغییرات تغذیه آب زیرزمینی (ΔGWR) و حجم آب زیرزمینی موجود (ΔAGW) در اثر تغییرات کاربری اراضی (Land Use Change) بر حسب متر مکعب بر ثانیه.

Fig 14. Spatial Distribution Maps of Mean Annual Groundwater Recharge (GWR) And Available Groundwater (AGW) For Real Scenario And Corresponding Changes in Groundwater Recharge (ΔGWR) And Available Groundwater (ΔAGW) Due to Land Use Change All Unites Are m^3/s .



شکل ۱۵. مقادیر سطح مدیریت (LOM) رودخانه‌ها و آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی در سناریوهای واقعی (Real) و کاربری اراضی (NLU)

Fig 15. Levels of Management (LOM) For River And Groundwater Resources in The Study Area Under Scenarios Real And Land Use (NLU).

- Khozeymeh-Nezhad, H., Kazerooni, H., Hasanlou, H., & Ali Ramaee, R. (2023). Prioritization of sub-basins based on severity of water threat factors by gray relation analysis method. *Journal of Auifer and Qanat*, 3(2), 135-155.[In Persian] <http://dx.doi.org/10.22077/jaaq.2020.2976.1021>
- Kourgialas, N. N., Karatzas, G. P., Dokou, Z., & Kokorogiannis, A. (2018). Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands - The case of Crete, Greece. *Science of The Total Environment*, 615, 381-389. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.308>
- Kousali, M., Salarijazi, M., & Ghorbani, K. (2022). Estimation of non-stationary behavior in annual and seasonal surface freshwater volume discharged into the Gorgan Bay, Iran. *Natural Resources Research*, 31(2), 835-847. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11053-022-10010-5>
- Modabber-Azizi, S., Salarijazi, M., & Ghorbani, K. (2023). A novel approach to recognize the long-term spatial-temporal pattern of dry and wet years over Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 131, 103426. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706523000700>
- Moravatdoust Anarkoli, M., Haeripour, S., & Amirnezhad, R. (2015). Study of sefidroud river water quality in roudbar. *journal of wetland ecobiology*, 7(25), 33-42. SID.[In Persian] <https://sid.ir/paper/174804/en>
- Mortezadeh, Feizollah, Pourmohammadi, Mohammad Hossein, Khoshnawaz, Saeb, Nohani, Ebrahim and Eslami, Hossein. (1404). Optimal exploitation model of water resources of Handijan plain using multi-objective bargaining method. *Journal of Drought and Climate Change Research*. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9141.1131>
- Naderi, M. (2021). Assessing level of water resources management based on water supply and availability concepts. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127086>
- Naderi, M., & Hajiketabi, M. (2023). Quantification of normal and sustainable management practices for groundwater resources: example of the arid Najafabad alluvial aquifer in Isfahan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 31(2), 195-218. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02596-8>
- Nagata, K., Sayyari, M., Inaoka, M., & Yajima, M. (2011). Conflict management of water resources in the Sefidrud River Basin of Iran. *Water Resources Management*, 6, 63. <https://doi.org/10.2495/WRMI10061>
- Nezaratian, H., Zahiri, J., & Kashefipour, S. M. (2018). Sensitivity analysis of empirical and data-
- Ayoubikia, R., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A., & SHAFIEI, S. B. (2019). Optimization of regional water resources allocation in sefidroud river basin by social equity approach. [In Persian] <https://www.sid.ir/paper/100216/en>
- Chazgi, Javad and Hamed, Ehsan. (1402). Flooding Prioritization of Sarbaz River Sub-basins Using SWAT Model. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(3), 73-86. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6478.1026>
- Dastandaz, T., Sadeghi-Lari, A., & Bahrami, M. (2024). Spatial and temporal analysis of groundwater level, flow direction and unit hydrograph of the Kahorestan plain aquifer. **Journal of Drought and Climate Change Research**, 1(4), 57-70. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6680.1038>
- Entezami, H., Mojarad, F., Shahabi, H., & Ghaderpour, E. (2024). Spatiotemporal Variability in Snow and Land Cover in Sefid-Rud Basin, Iran. *Sustainability*, 16(21), 9381. <https://doi.org/10.3390/su16219381>
- Faghani, M., Aligholi Nia, T., & Ghorbani, K. Investigation of groundwater stress using groundwater footprint indicator in agricultural products. *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(1), 66-80. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.22077/jaaq.2021.1865>
- Gleeson, T., & Wada, Y. (2013). Assessing regional groundwater stress for nations using multiple data sources with the groundwater footprint. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044010. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044010>
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & Van Beek, L. P. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200. <https://www.nature.com/articles/nature11295>
- Haghighi, A. T., Sharifi, A., Darabi, H., Mazaheri, M., Mohammadpour, R., Gohari, A.,... & Klöve, B. (2024). When rain does not run, a fingerprint of uncoordinated water resources development. *Journal of Hydrology*, 629, 130626. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130626>
- Iranian Water Resources Management Company. (2025). Data Center. <http://wrbs.wrm.ir>
- Japan International Cooperation Agency (JICA). (2015). *Groundwater Resources Assessment and Management in Central Iran*. Final Report. Tehran: Ministry of Energy. <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12031373.pdf>
- Kamyab-Talesh, F., Mousavi, S. F., Khaledian, M., Yousefi-Falakdehi, O., & Norouzi-Masir, M. (2019). Prediction of water quality index by support vector machine: a case study in the Sefidrud Basin, Northern Iran. *Water Resources*, 46(1), 112-116. <https://doi.org/10.1134/S0097807819010056>

- driven models on longitudinal dispersion coefficient in streams. *Environmental Processes*, 5(4), 833-858. <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0334-3>
- Richter, B. D., Davis, M. M., Apse, C., & Konrad, C. (2012). A presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications*, 28(8), 1312-1321. <https://doi.org/10.1002/rra.1511>
- Salar-Ashayeri, M., Khaledian, M., Kavooosi-Kalashami, M., & Rezaei, M. (2020). Simulation of water allocation in Sefidroud irrigation and drainage network for sustainability of rice production. *Paddy and Water Environment*, 18(4), 607-621. <https://doi.org/10.1007/s10333-020-00805-8>
- Salarijazi, M., Ahmadianfar, I., & Yaseen, Z. M. (2024). Prediction enhancement for surface water sodium adsorption ratio using limited inputs: Implementation of hybridized stacked ensemble model with feature selection algorithm. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 134, 103561. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103561>
- Salarijazi, M., Ghorbani, K., Mohammadi, M., Ahmadianfar, I., Mohammadrezapour, O., Naser, M. H., & Yaseen, Z. M. (2023). Spatial-temporal estimation of maximum temperature high returns periods for annual time series considering stationary/nonstationary approaches in Iran urban area. *Urban Climate*, 49, 101504. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101504>
- Soltani, M., Bahmanabadi, B., & Kaviani, A. (2025). Investigating the Changes in the Major Cultivated Area of Qazvin Plain Using Multi-Temporal Satellite Images. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(4), [pp. TBD]. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8743.1106>
- Yousefi, E., Khazai, A., & Sahragard, F. (2025). Calculating runoff in Google Earth Engine using the curve number method (Case study: Birjand Plain). *Journal of Aquifer and Qanat*. [In Persian] <http://10.22077/10.22077/jaaq.2025.9003.1101>
- Zhou, X., Leng, Y., Salarijazi, M., Ahmadianfar, I., & Farooque, A. A. (2024). Development of forecasting of monthly SAR time series in river systems: A multivariate data decomposition-based hybrid approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 1355-1375. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.050>

