Iranian Water Research Journal
Vol. 20/ No. 1/ Serial No. 60/ Spring 2026 (35-54)
https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15438.2714

Assessing the impact of climate change on the management levels of surface and groundwater resources in the Sefidrud watershed

Tahereh. Gohari[1] and Mostafa. Naderi[2*]

Extended Abstract

Introduction:

Integrated Water Resources Management (IWRM) is defined by the Global Water Partnership (GWP) as "a process that promotes the coordinated development and management of water, land, and related resources to maximize economic and social welfare equitably without compromising the sustainability of vital ecosystems and the environment." Recently, a physical index has been proposed to quantitatively evaluate water resource management by accounting for environmental water requirements. This index, based on the concepts of water accessibility and water supply, allows for a more integrated and comparative assessment of management performance. The Sefidrud watershed, covering an area of 58,452.84 km², is located in northwestern Iran. This study aims to: (a) assess the management levels of surface and groundwater resources across the Sefidrud watershed during the 1995–2017 observation period, and (b) examine the impacts of observed climate changes on water resource management levels during the study period.

Materials and Methods:

To evaluate and quantify the management levels of surface and groundwater resources in the Sefidrud watershed, SWAT hydrological model was employed. The watershed was delineated into 15 subbasins based on elevation, hydrometric, and dam data, and the model was run with inputs of soil, land-use, slope, and daily dam outflows. The model was implemented over the 1995–2017 period in two stages: a 16-year calibration period (1995–2010) and a 7-year validation period (2011–2017). Level of Management (LOM) for river water was estimated using a physical index that accounts for available water and total water supply. In this context, total water supply is defined as the volume of water withdrawn from the river. To calculate LOM, which denotes the management level of either river or groundwater resources, the available water volume (AW) of the river or groundwater and the water withdrawn from the river or groundwater for use in sectors (TWS), were considered. The Environmental Flow Requirement (EFR) is also defined as a percentage of the river's long-term annual mean flow. In this study, 80% of the river's long-term annual mean flow was allocated to EFR, and the remaining 20% to human needs and Accessible River Water (ARW). EFR for groundwater was determined based on the river's baseflow contribution. River and groundwater management levels may vary from negative values up to +1, where negative values indicate mismanagement and positive values reflect acceptable management. The management levels of both river and groundwater resources during the observation period were computed under two scenarios: (1) the real scenario (reflecting actual climate and land-use conditions), and (2) the climate scenario (using daily precipitation and temperature data with trends removed, i.e., de-trended), and were subsequently compared.

Results and Discussions:

The performance evaluation of the SWAT model during the calibration period (1997–2010) indicated an acceptable level of accuracy in simulating monthly river flows at the subbasin scale. The coefficient of determination (R^2) and the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) exceeded 0.7 in most subbasins. To investigate the effect of precipitation changes, the annual mean precipitation derived from the observed time series was compared with the corresponding values from the detrended series. The impact of precipitation changes was estimated as the difference between the mean annual observed precipitation and the detrended values (observed

1- PhD student, Geophysics, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran/
2- Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran.
*** Corresponding Author:** naderi64@gmail.com , m.naderi@iasbs.ac.ir
Received: 2025/09/21 Accepted:2025/11/19

minus detrended). Spatial analysis of the distribution of climate stations showed that decreasing precipitation trends predominantly occurred in the southwestern and eastern parts of the basin, whereas the central and northern regions experienced increases in annual precipitation during the period 1995–2017. Analysis of annual minimum and maximum temperature trends revealed that the entire study area experienced warming during 1995–2017, with the exception of the minimum temperature at the Tabriz station. The effect of climate change on river flow in each subbasin was determined by calculating the difference between simulated river flows under the actual scenario and those under the no-climate-change scenario (flow in actual scenario minus flow in no-climate-change scenario). Climate impact mapping showed that most subbasins experienced reductions in river flow due to decreased precipitation, although a few subbasins exhibited increases in flow associated with increased precipitation during 1995–2017. Because total water withdrawals in both the actual and no-climate-change scenarios remained constant, the observed changes in LOM values were attributable to variations in water availability. Consequently, climate change improved LOM in subbasins that experienced increased precipitation and river flow during the study period, whereas LOM declined in subbasins with decreased precipitation and flow. The impact of climate change on groundwater recharge in each subbasin was assessed by calculating the difference between simulated aquifer recharge under the actual scenario and that under the no-climate-change scenario (recharge in actual scenario minus recharge in no-climate-change scenario). Evaluation of climate change effects revealed that most subbasins experienced reductions in groundwater recharge due to decreased precipitation, whereas some subbasins showed slight increases in recharge rates as a result of higher precipitation during 1995–2017. The groundwater LOM declined in most of the study area because of reduced precipitation, although some areas exhibited increases.

Conclusion:

In this study, the impact of climate change on the Level of Management (LOM) of surface and groundwater resources was evaluated in the Sefidrud watershed, Iran, during the period 1995–2017. The watershed has experienced an increase in annual temperature; however, annual precipitation has been shown to increase or decrease depending on geographical location. The assessment of river and groundwater management levels indicated that the river management level in eight subbasins and the groundwater management level in three subbasins had negative values, indicating that water abstraction exceeded the volume of available water resources. Subbasins with negative management levels were recognised as ecological hotspots. Surface and groundwater resources respond to climate change in a coordinated manner. As precipitation is the main source of accessible water for both river and groundwater systems, long-term climatic trends continuously influence long-term water availability and management levels. In the evaluation of management levels of Sefidrud watershed, ecological hotspots were identified. These results can serve as a model for water resource decision-makers to propose management strategies adapted to local conditions. For example, in sustainable management approaches, special attention should be paid to areas where ecosystems dependent on water resources are stressed. To achieve an acceptable management level, appropriate strategies should be implemented such as reducing abstraction from surface and groundwater resources, improving irrigation efficiency, cultivating crops with lower water requirements, and enhancing agricultural land productivity.

Keywords: Climate variability, Groundwater, Level of Management, River, Sefidrud watershed

Citation: Gohari, T., Naderi, M., 2026. Assessing the impact of climate change on the management levels of surface and groundwater resources in the Sefidrud watershed. Iranian Water Research Journal, 20(60), pp. 35-54. https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15438.2714

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۲۰/ شماره ۱/ پیاپی ۶۰/ بهار ۱۴۰۵ (۳۵-۵۴)
https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15438.2714

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه‌ی سفیدرود

طاهره گوهری[۱]، مصطفی نادری[۲*]

چکیده

در دو دهه گذشته تغییرات اقلیم با ایجاد تغییر در الگوی برداشت و حجم آب موجود منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود، مدیریت منابع آب را دچار چالش کرده است. بنابراین هدف این مطالعه بررسی اثر تغییرات اقلیم به‌صورت کمی بر سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی این حوضه می‌باشد. در این راستا از مدل هیدرولوژی SWAT استفاده و منطقه به ۱۵ زیرحوضه تقسیم شد. در این تحقیق سطح مدیریت بر اساس یک شاخص فیزیکی که نیاز آبی محیط زیست، حجم آب موجود و برداشت از منابع آب را همزمان در نظر می‌گیرد، محاسبه شده است. نتایج نشان داد اگر چه دمای سالانه در سراسر حوضه افزایش یافته، اما روند بلندمدت بارش‌ها، الگوی مکانی متفاوتی نشان می‌دهد. در شرایط کنونی نواحی جنوبی و بخش‌هایی از مناطق مرکزی کمترین میزان حجم آب موجود و برداشت آب از رودخانه را دارند، در حالی که نواحی شمالی و شرقی بیشترین حجم آب موجود را نشان می‌دهند، به‌طوری که در هشت زیرحوضه، سطح مدیریت منفی (نقاط بحرانی اکولوژیکی) می‌باشد. حجم آب موجود زیرزمینی در مناطق غربی و شرقی دارای کمترین مقدار و در نواحی شمالی و مرکزی دارای بیشترین مقدار است. با این حال، برداشت آب زیرزمینی در نواحی جنوبی بیش از مناطق شرقی است. اکثر نواحی، سطح مدیریت قابل قبولی دارند، اما سه زیرحوضه به‌دلیل اضافه برداشت از آب زیرزمینی دارای سطح مدیریت منفی هستند. تغییر اقلیم در دوره مطالعاتی بسته به‌شرایط منطقه‌ای، منجر به کاهش یا بهبود سطح مدیریت رودخانه و منابع آب زیرزمینی شده است. سطح مدیریت منابع در حوضه‌های با روند بارندگی مثبت، افزایش و سطح مدیریت در حوضه‌هایی با روند بارندگی منفی، کاهش یافته است. بنابراین این پژوهش تأکید می‌کند که اثر تغییر اقلیم بر سطح مدیریت رودخانه و آب زیرزمینی یکسان است، زیرا در دسترسی به آب شیرین نقش اصلی دارد. بنابراین روند بلندمدت عناصر اقلیمی به‌طور پیوسته بر دسترسی بلندمدت به آب و سطح مدیریت تأثیرگذار است.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، تغییر اقلیم، حوضه آبریزسفیدرود، رودخانه، سطح مدیریت.

ارجاع: گوهری، ط.، نادری، م.، ۱۴۰۵. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه‌ی سفیدرود. . مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۰)، صص. ۳۵-۵۴. https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15438.2714

۱- دانشجوی دکترا ژئوفیزیک 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 , naderi64@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۸

مقدمه

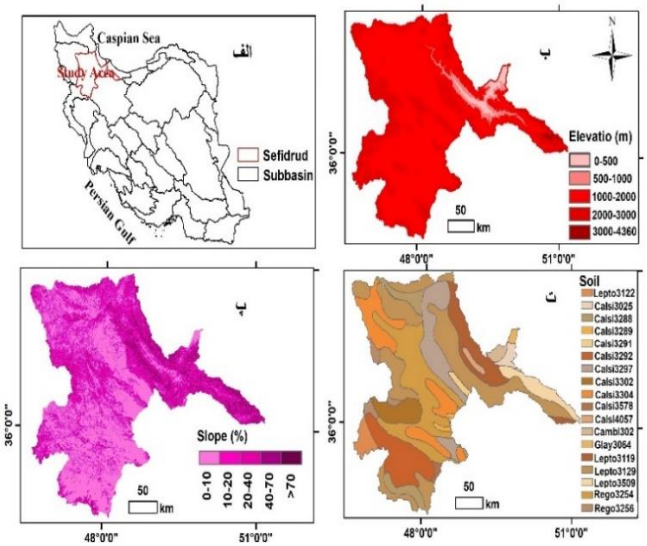
مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM[1]) توسط سازمان مشارکت جهانی آب (GWP[2]) به‌عنوان فرایندی تعریف می‌شود که توسعه و مدیریت هماهنگ آب، زمین و سایر منابع مرتبط را به‌منظور بیشینه‌سازی رفاه اقتصادی و اجتماعی به‌صورت عادلانه و بدون به خطر انداختن پایداری اکوسیستم‌ها و محیط‌زیست حیاتی ترویج می‌کند. یکی از ملاحظات کلیدی در این فرایند، گنجاندن نیازهای آبی محیط زیست در برنامه‌ریزی منابع آب و راهبردهای تخصیص برداشت است. به‌طور تاریخی، مطالعات هیدرولوژیکی عمدتاً مدیریت منابع آب چه در ارتباط با آب‌های سطحی و چه آب‌های زیرزمینی را از طریق رویکردهای متداول موازنه‌ی آب، ارزیابی کرده‌اند، در حالی که نیازهای آبی اکوسیستم غالباً نادیده گرفته شده است. فقدان یک شاخص کمی که بتواند سطح مدیریت منابع آب (LOM[3]) را به‌صورت عینی و همزمان با در نظر گرفتن الزامات زیست‌محیطی منعکس کند، به‌عنوان یک چالش اساسی مطرح بوده است. رویکردهای مبتنی بر موازنه آب ذاتاً در ارائه بینش‌های مقایسه‌ای از سطح مدیریت منابع آب در میان منابع مختلف یک منطقه محدودیت دارند. در سال‌های اخیر یک شاخص فیزیکی برای ارزیابی کمی مدیریت منابع آب با در نظر گرفتن نیاز آبی زیست‌محیطی پیشنهاد شده است. این شاخص بر پایه‌ی مفاهیم آب موجود 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 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 et al. (2011) پیشنهاد کردند که مدیریت مؤثر حوضه مستلزم مدل‌سازی هیدرولوژیکی مناسب در این حوضه بزرگ است. Hadiyan et al. (2020) نتیجه گرفتند که شبکه عصبی مصنوعی پویا عملکرد بهتری در شبیه‌سازی جریان ورودی سد سفیدرود نشان می‌دهد. 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 اکوسیستم نیز باید مدنظر قرار گیرد (Salar-Ashayeri et al., 2020). Haghighi et al. (2024) نشان دادند که فعالیت‌های انسانی و توسعه ناهماهنگ منابع آب، اصلی‌ترین عوامل کاهش جریان رودخانه در این حوضه هستند. ورود فاضلاب به رودخانه سفیدرود کیفیت آب رودخانه را در منطقه رودبار کاهش داده است (Moravatdoust et al., 2015). همچنین بررسی‌ها نشان داده است که نیترات تأثیرگذارترین عامل مؤثر بر کیفیت آب این رودخانه است (Kamyab-Talesh et al., 2019). Adineh et al. (2023) تأثیر سطح اولیه آب و عملیات دریچه در سد سفیدرود را ارزیابی کرده و مدل‌سازی عددی را به‌عنوان ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی مدیریت رسوب در مخازن، معرفی کردند. کیفیت آب مخزن سد تهم (واقع در حوضه سفیدرود) در طول فصل تابستان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Abed et al., 2019). تغییر اقلیم موجب کاهش ۱۲ درصدی بارش و ۱۳درصدی ورودی سد سفیدرود خواهد شد که منجر به کاهش منابع آب سطحی، به‌ویژه در مناطق پایین‌دست، می‌گردد (Mehraban et al., 2024). بر اساس مطالعات موجود، کمی‌سازی سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود با رویکرد حفظ اکوسیستم‌های وابسته به منابع آب مورد نیاز است. مطالعات موجود از دو جنبه قابل تامل است: الف) سطح مدیریت برای حوضه سفیدرود به‌صورت کمی برآورد نشده و ب) اثر تغییر اقلیم بر سطح مدیریت نیز بررسی نشده است. با توجه به اهمیت حوضه سفیدرود که یکی از حوضه‌های بزرگ و مهم کشور می‌باشد، در این تحقیق سعی شده است تا اثر تغییر اقلیم بر سطح مدیریت منابع آب کمی‌سازی گردد. بنابراین هدف این مطالعه ارزیابی اثر تغییرات دما و بارش بر سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود در دوره مشاهداتی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ است.

[1]- Integrated Water Resources Management
[2]- Global Water Partnership
[3]- Level of Management

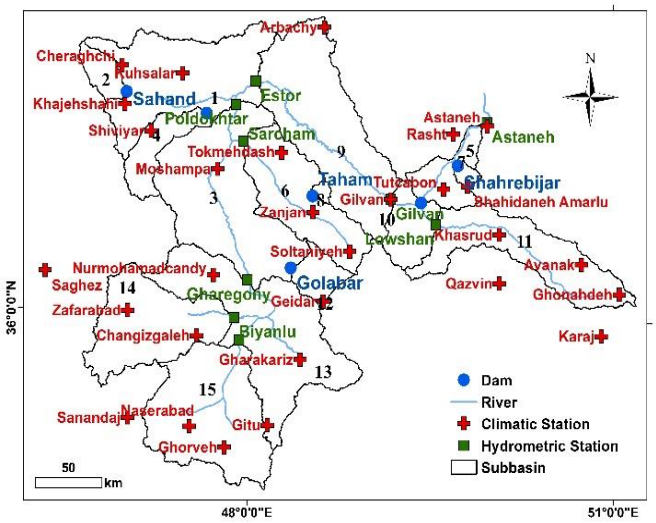
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز سفیدرود با مساحتی حدود ۵۸۴۵۲/۸۴ کیلومتر مربع، (شکل۱) در شمال غربی ایران واقع شده است. ارتفاع حوضه از صفر در منطقه ساحلی جنوبی دریای خزر تا ۴۳۶۰ متر در مناطق مرتفع متغیر بوده و متوسط ارتفاع حوضه ۲۰۶۳/۲ متر است. داده‌های بارش روزانه در طول دوره مشاهده ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ (شکل۲) در ۳۰ ایستگاه اقلیمی 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 هیدرومتری 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.



شکل ۱- موقعیت مکانی(الف)، نقشه رقومی ارتفاعی(ب)، کلاس-بندی شیب (پ) و انواع خاک (ت) منطقه مطالعاتی



شکل۲- موقعیت مکانی سدها، ایستگاه‌های هیدرومتری وهواشناسی منطقه مطالعاتی

برای ارزیابی و کمی‌سازی سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود، از مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی و مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی SWAT[1] استفاده شد. در گام نخست، حوضه آبریز با بهره‌گیری از مدل رقومی ارتفاع[2](DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر مرزبندی شد. در ادامه، به‌منظور انعکاس دقیق شرایط هیدرولوژیکی منطقه، حوضه بر اساس موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و محل سدها به ۱۵ زیرحوضه تقسیم گردید (شکل۲). مدل SWAT داده‌های محلی با توزیع مکانی، شامل توپوگرافی، کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی و برداشت از منابع آب را تلفیق می‌کند. داده‌های مشاهداتی روزانه بارش و دما از ۳۰ ایستگاه هواشناسی برای دوره‌ی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ مورد استفاده قرار گرفت. این بازه‌ی ۲۳ ساله به دو مرحله‌ی اصلی دوره‌ی واسنج ی[3] ۱۶ ساله (۱۹۹۵–۲۰۱۰) و دوره‌ی اعتبارسنجی[4]۷ ساله (۲۰۱۱–۲۰۱۷) تقسیم شد. علاوه بر این، دو سال ابتدایی (۱۹۹۵–۱۹۹۶) به‌عنوان دوره‌ی آماده-سازی[5]مدل SWAT تخصیص داده شد تا شرایط اولیه سیستم پایدار گردد. داده‌های توپوگرافی حاصل از مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۳۰ متر برای تعریف پنج بازه‌ی شیب بر حسب درصد (۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۷۰ و بیش از ۷۰) در هر زیرحوضه مورد استفاده قرار گرفت. کاربری اراضی در هر زیرحوضه مدل SWAT به‌صورت سالانه و بر اساس تغییرات مشاهده شده در دوره شبیه‌سازی، به‌روزرسانی شده است (شکل۳). به‌منظور در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی ناشی

[1]- The Soil and Water Assessment Tool
[2]- Digital Elevation Model
[3]- Calibration
[4]- Validation
[5]- Warm-up

از اختلاف ارتفاع، برای هر زیرحوضه ده ناحیه ارتفاعی تعریف شد. میزان کاهش دما با ارتفاع، با استفاده از داده‌های بلندمدت هشت ایستگاه سینوپتیک در دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷، برابر ۳/۶- درجه سانتیگراد بر کیلومتر برآورد شد. میزان تغییر بارش با ارتفاع نیز بر اساس داده‌های بارندگی ۳۰ ایستگاه برای سه ناحیه از 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 شد (شکل۲). داده‌های خاک (FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012; Iranian Water Resources Management Company, 2025) به‌منظور تفکیک هر زیرحوضه به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs[1]) همگن از نظر کاربری اراضی، شیب و نوع خاک به‌کار گرفته شد (Winchell et al., 2013)، که در مجموع منجر به تعریف ۹۴۱ HRU در کل حوضه شد. افزون بر این، میزان برداشت ماهانه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، با استفاده از داده‌های مرجع سال ۲۰۰۹ (Iranian Water Resources Management Company, 2025)، برای هر زیرحوضه در مدل SWAT اعمال شد. جریان‌های خروجی روزانه از ۶ سد موجود در حوضه، بر اساس دوره‌های بهره‌برداری آن‌ها، به مدل وارد شدند. برای انجام فرآیندهای واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل، از الگوریتم SUFI-2[2] در محیط SWAT-CUP[3] استفاده شده است (Abbaspour et al., 2009)، این رویکرد امکان ارزیابی هم‌زمان کارایی مدل و عدم‌قطعیت پارامترها را فراهم می‌سازد. عملکرد مدل نیز با استفاده از شاخص‌های برازش، از جمله ضریب تعیین (R^2[4]) و ضریب کارایی نش–ساتکلیف(NSE[5]) کلینگ‌گوپتا (KGE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، خطای بایاس میانگین (MBE) و شاخص تطابق (IA) ارزیابی شد. شاخص تطابق، مقادیر حدی و سایر شاخص‌ها مقادیر میانگین مدل را ارزیابی می‌کنند (Salarijazi et al., 2024; Zhou et al., 2024). ارزیابی شد. فرآیند واسنجی مدل SWAT شامل تعدادی پارامتر کلیدی از جمله: Curve Number2 (CN2)، هدایت هیدرولیکی خاک (SOL-K)، ظرفیت آب قابل دسترس خاک (SOL-AWC)، ضریب زبری مانینگ برای رواناب سطحی (OV-N)، تاخیر جریان زیرزمینی (GW-DELAY)، عمق آستانه آب در سفره کم‌عمق برای جریان پایه (GW-QMN)، ضریب آلفای جریان پایه (ALPHA-BF)، ضریب بازتبخیر جریان زیرزمینی (GW-REVAP)، عمق آستانه آب در سفره کم‌عمق برای تبخیر (REVAP-MN)، ضریب جبران تبخیر خاک (ESCO) و کسر نفوذ به سفره آب عمیق (RCHRGDP) است که نقش مهمی در عملکرد هیدرولوژیکی مدل دارند. این پارامترها به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل و بازتاب دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفتند. در انتها مدل SWAT بعد از واسنجی و صحت سنجی با دو سناریو تحلیل شد(شکل ۴). عدم قطعیت مدل با معیارهای P–factor و R–factor بررسی شده است. مقادیر کوچک R–factor نشان‌دهنده عدم قطعیت کمتر نتایج مدل است. مقدار P–factor بین صفر و ۱ تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیکتر باشد نتایج مطلوب‌تر است (Nezaratian et al., 2018).

حذف روند از سری‌های زمانی روزانه بارش و دما

بررسی روند دما و بارش در این مطالعه با استفاده از بررسی شیب تغییرات سری‌های زمانی سالانه در طول دوره مطالعاتی بر آورده شده است. برای تحلیل تغییرات سالانه و حذف اثر روندهای بلندمدت، ابتدا تغییرات سالانه دما و بارش با معادله خطی زیر مدل شد :

$$y_{prd,x} = ax + b \qquad (۱)$$

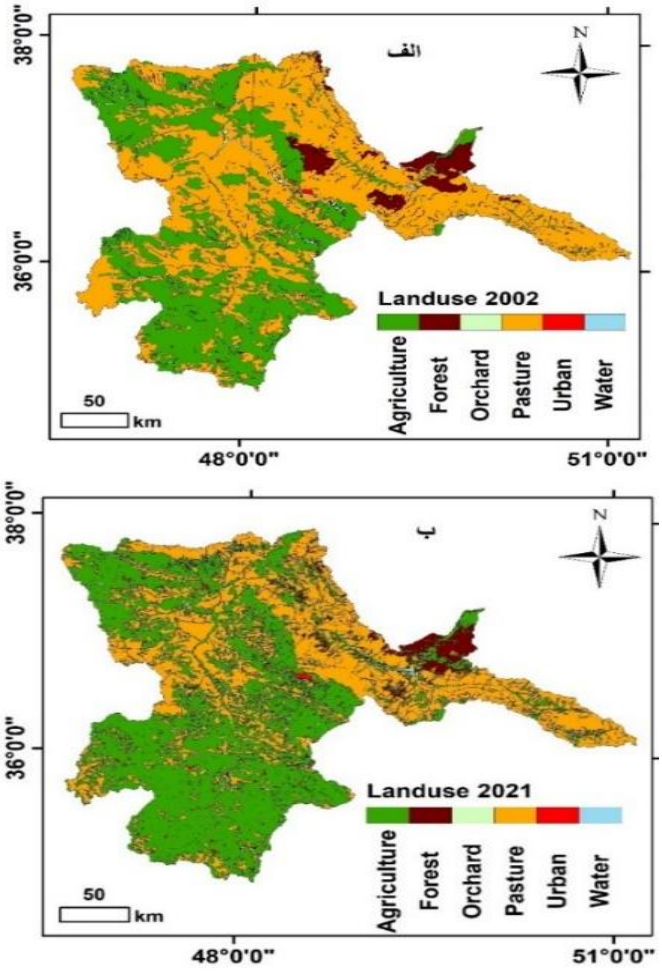
که در آن y_{prd,x_i} بارش (mm) یا دمای (℃) پیش‌بینی شده در سال iام، a شیب خط یا همان میزان تغییرات سالانه-ی بارندگی (mm/year) یا دما (℃/year)، x سال مورد نظر و b عرض از مبدا است.

سپس روند سالانه داده‌های مشاهده‌شده با معادله زیر اصلاح گردید (Xing et al., 2024):

$$y_{detr,x_i} = \left[y_{obs,x_i} - y_{prd,x_i} \right] + \left[y_{obs,x_0} - y_{prd,x_0} \right] \qquad (۲)$$

که در آن y_{detr,x_i} مقدار دما (℃) و بارش (mm) فاقد روند، y_{obs,x_i} مقدار واقعی دما (℃) و بارش (mm) در سال i ام، y_{prd,x_i} بارش (mm) یا دمای (℃) پیش‌بینی شده در سال i ام، y_{obs,x_0} مقدار دما (℃) و بارش (mm) در ابتدای دوره‌ی مطالعاتی و y_{prd,x_0} بارش (mm) یا دمای (℃) پیش‌بینی شده در ابتدای دوره‌ی مطالعاتی است.

[1]- Hydrological Response Units
[2]- Sequential Uncertainty Fitting, version 2
[3]- SWAT Calibration and Uncertainty Program
[4]- Coefficient of determination
[5]- Nash–Sutcliffe Efficiency



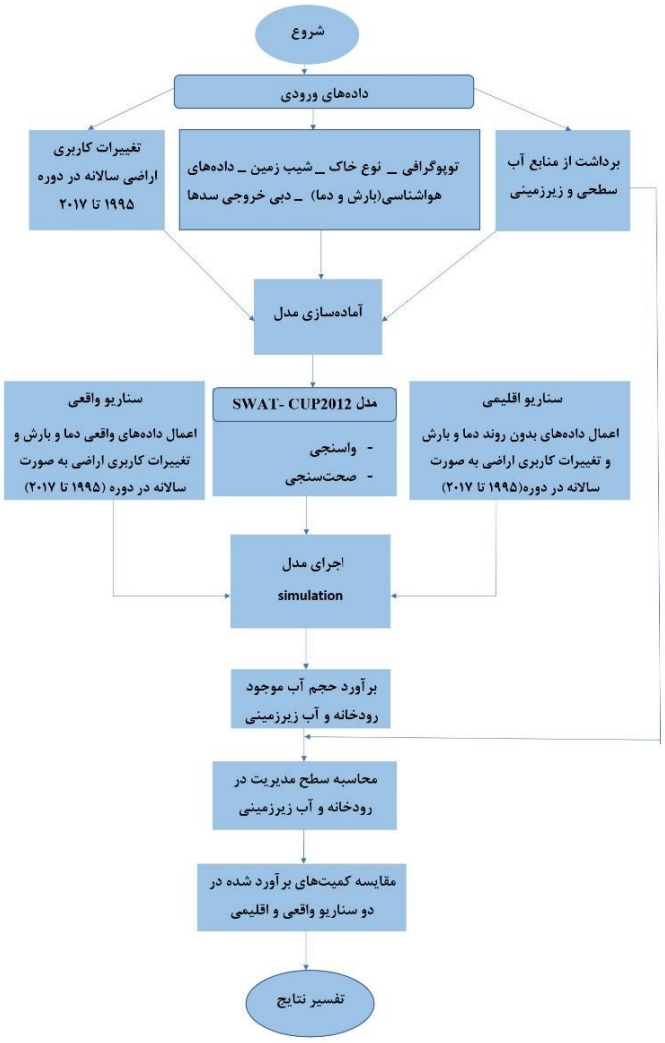
شکل ۳- کاربری اراضی در حوضه آبریز سفیدرود برای (الف) سال‌های ۲۰۰۲ و (ب) ۲۰۲۱

با توجه به تفاوت ماهیت مقادیر دما و بارش (دما می‌تواند منفی و بارش همواره مثبت باشد)، روندهای بلندمدت داده‌های روزانه با استفاده از ضریب‌های مقیاس سالانه و بر اساس روابط زیر اصلاح شدند:

$$y_{det,d_i} = y_{obs,d_i} \times [\frac{y_{det,x_i}}{y_{obs,x_i}}] \quad (۳)$$

$$y_{det,d_i} = y_{obs,d_i} \times [y_{det,x_i} - y_{obs,x_i}] \quad (۴)$$

که در آن y_{det,d_i} مقدار بارش (mm) فاقد روند روزانه در روز i سال مورد نظر، y_{obs,d_i} مقدار واقعی بارش (mm) در روز i سال مورد نظر و $[\frac{y_{det,x_i}}{y_{obs,x_i}}]$ ضریب مقیاس مقادیر بارندگی است. y_{det,d_i} مقدار دمای (°C) فاقد روند روزانه در روز i سال مورد نظر، y_{obs,d_i} مقدار واقعی دما (°C) در روز iام سال مورد نظر و $[y_{det,x_i} - y_{obs,x_i}]$ ضریب مقیاس مقادیر دما است.



شکل ۴- مراحل انجام پژوهش

سطح مدیریت رودخانه و آب زیرزمینی

سطح مدیریت رودخانه (LOM) با استفاده از یک شاخص فیزیکی که آب موجود و حجم کل تأمین آب را لحاظ می‌کند، برآورد شد. در این رابطه، کل تأمین آب به‌عنوان حجم آب برداشت‌شده از رودخانه تعریف می‌گردد (Naderi, 2021):

$$LOM = \frac{AW - \sum_{i=1}^{n} TWS_i}{AW} \quad (۵)$$

در رابطه‌ی بالا LOM سطح مدیریت در رودخانه یا آب‌زیرزمینی، AW[1] حجم آب موجود (رودخانه یا آب‌زیرزمینی) (m^3/s)، TWS[2] 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.

[1]- Available Water (AW)

[2]- Total Water Supply (TWS)

دبی مورد نیاز محیط زیست (EFR[1]) به‌عنوان درصدی از میانگین جریان سالانه بلندمدت رودخانه تعریف می‌شود:

$$EFR = cQ_{mean} \quad (۶)$$

$$ARW = Q - EFR \quad (۷)$$

در این رابطه، c ضریب سهم‌دهی دبی به نیاز آبی اکوسیستم (EFR) در بازه‌ی ۰ تا ۱ است و Qmean 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 EFR و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای تأمین نیازهای انسانی و آب موجود (ARW[2]) در نظر گرفته شد.

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

$$AGW = R - EFR \quad (۸)$$

در این معادله، AGW[3] معرف حجم آب زیرزمینی موجود (m^3/s) است.R[4] بیانگر میزان تغذیه آب زیرزمینی (m^3/s) و EFR نشان‌دهنده جریان مورد نیاز محیط زیست (m^3/s) است.

نیاز آبی محیط زیست (EFR) برای منابع زیرزمینی با در نظر گرفتن سهم جریان پایه رودخانه تعیین می‌شود.

سطح مدیریت رودخانه و منابع آب زیرزمینی می‌تواند از مقادیر منفی تا مثبت ۱ تغییر کند؛ مقادیر منفی نشان‌دهنده سوء مدیریت و مقادیر مثبت نشان‌دهنده سطح مدیریت قابل قبول است.

سطح مدیریت تحت سناریوهای مختلف

برای ارزیابی سطح مدیریت رودخانه و منابع زیرزمینی در دوره مشاهداتی ۱۹۹۷–۲۰۱۷، دو سناریو تعریف شد (شکل۴).

سناریوی واقعی

این سناریو شرایط واقعی اقلیم و کاربری اراضی طی دوره مطالعه را منعکس می‌کند. کاربری اراضی هر زیرحوضه نیز به‌صورت سالانه بر اساس تغییرات مشاهده‌شده در بازه ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۱ به‌روزرسانی شد. برای سال‌های پیش از ۲۰۰۲ (۱۹۹۷–۲۰۰۱)، فرض شد که کاربری اراضی مشابه سال ۲۰۰۲ باقی بماند. بر این اساس، سطح مدیریت رودخانه و آب‌های زیرزمینی تحت شرایط واقعی ارزیابی شد.

سناریوی بدون تغییر اقلیم

در این سناریو فرض شده است که هیچ روند بلندمدتی در متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) در منطقه مطالعه وجود ندارد؛ در حالی که کاربری اراضی به‌صورت سالانه بر اساس شرایط واقعی در دوره مطالعه تغییر می‌کند. جریان رودخانه با مدل SWAT با داده‌های روزانه بارش و دما پس از حذف روند (de-trended) و روند واقعی کاربری اراضی شبیه‌سازی شد. سطح مدیریت منابع آب زیرزمینی و رودخانه نیز ارزیابی شد. مقایسه بین سناریوی واقعی و این سناریوی مدل‌سازی شده، نقش اقلیم در تغییرات سطح مدیریت هر دو منبع آب را آشکار می‌سازد.

نتایج و بحث

تغییرات اقلیم

نتایج تحلیل روند سالانه بارش در بازه ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ بیانگر توزیع ناهمگن مکانی در تغییرات اقلیمی منطقه است؛ به‌گونه‌ای که در ۱۴ ایستگاه روند افزایشی بارش سالانه مشاهده شد، و ۱۶ ایستگاه روند کاهشی بارش را نشان دادند (شکل ۵). به‌منظور بررسی اثر تغییرات بارش، اختلاف بین میانگین سالانه بارش واقعی و مقادیر بدون روند (واقعی منهای بدون روند) برآورد شد. تحلیل مکانی پراکندگی ایستگاه‌های اقلیمی بیانگر آن است که روند کاهشی بارش عمدتاً در نواحی جنوب‌غربی و شرقی حوضه مشاهده می‌شود، در حالی‌که بخش‌های مرکزی و شمالی عمدتاً با افزایش بارش سالانه در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ مواجه بوده‌اند (شکل ۶). بررسی روندهای سالانه دمای حداقل و حداکثر نشان داد که به‌جز دمای حداقل در ایستگاه تبریز، کل منطقه مطالعه در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ تحت تأثیر افزایش دما قرار گرفته است.

عملکرد مدل SWAT

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 (شکل۷). مقدار ضریب تعیین (R^2) بین ۰/۵۲ در زیرحوضه ۸ تا ۰/۹۶ در زیرحوضه ۱۴ متغیر بوده و در اغلب زیرحوضه‌ها مقادیر بالاتر از ۰/۷ به‌دست آمده است. همچنین، شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) در اکثر زیرحوضه‌ها فراتر از ۰/۷ گزارش

[1]- Environmental flow requirement (EFR)
[2]- Available River Water (ARW)
[3]- Available Groundwater (AGW)
[4]- Groundwater Richarge (R)

شد و در بازه ۰/۵ (زیرحوضه ۸) تا ۰/۸۷ (زیرحوضه ۱۴) قرار دارد. مقایسه دبی‌های میانگین سالانه شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در هر زیرحوضه در این دوره نشان داد که مدل SWAT توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه مورد مطالعه دارد (شکل۶). ضریب کلینگ گوپتا در برخی زیرحوضه‌ها کاهش یافت اما در اکثر زیرحوضه‌ها -به‌جز دو زیرحوضه ۶ (۰/۴۱) و ۱۵(۰/۲۹) که کمتر از ۰/۵ می‌باشد- مقدار آن بالای ۰/۵ است.

نتایج اعتبارسنجی مدل در بازه زمانی ۲۰۱۷–۲۰۱۱ نشان‌دهنده توانایی مطلوب مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان‌های رودخانه‌ای در حوضه سفیدرود است. اگرچه مقدار ضریب تعیین (R^2) در اغلب ایستگاه‌ها بالاتر از ۰/۶ گزارش شده است، اما در برخی ایستگاه‌ها، به‌ویژه زیرحوضه‌های ۶ و ۱۵، مقادیری کمتر از ۰/۵ را نشان داد. شاخص کارایی نش–ساتکلیف (NSE) نیز در اکثر ایستگاه‌ها بیش از ۰/۶ به دست آمد. این ضریب در بازه ۰/۲۹ (زیرحوضه ۶) تا ۰/۸۴ (زیرحوضه ۱۴) متغیر است. مقایسه میانگین سالانه جریان‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در مقیاس زیرحوضه نشان داد که مدل به‌طور قابل قبولی تغییرات جریان سالانه را طی دوره اعتبارسنجی شبیه‌سازی کرده است. در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی شاخص تطابق بیشتر زیرحوضه‌ها بالاتر از ۰/۷۵ است، که تطابق قابل قبول مدل با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. مقادیر خطای بایاس میانگین که مشخص می‌کند مدل چه اندازه بیشتر و یا کمتر از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده پیش بینی می‌کند، در ۵۰ درصد منطقه مطالعاتی در زیرحوضه‌های ۲، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۱۲ قابل قبول است. 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 جذرمیانگین مقدار قابل قبولی دارد که نشان از دقت بالای مدل در پیش بینی جریان است.

عدم قطعیت

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 نشان‌دهنده توانایی مدل در پوشش داده-های مشاهداتی است (جدول ۱). با توجه به اینکه در بیشتر حوضه P–factor بالای ۰/۵ و R–factor کمتر از ۰/۵ است، نتیجه می‌شود که در مدل، تحلیل عدم قطعیت به‌خوبی انجام شده است. اگر چه عدم قطعیت وجود دارد، اما عدم قطعیت مدل زیاد نیست.

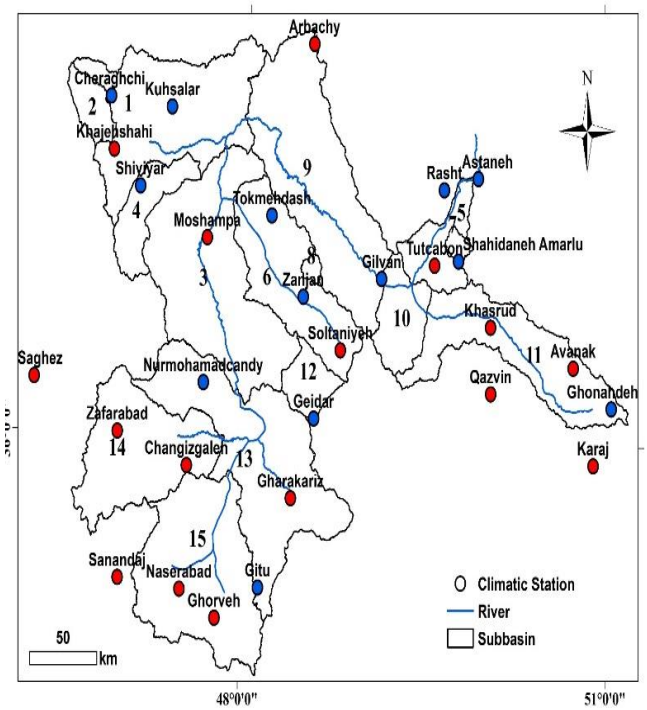
جدول۱- معیارهای عدم قطعیت مدل (P-factor وR-factor) و میانگین جریان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی دوره‌ی واسنجی (۱۹۹۷-۲۰۱۰)

حوضه	P-Factor	R-Factor	میانگین جریان (مترمکعب در ثانیه)	
			اندازه گیری شده	شبیه سازی شده
۱	۰/۵۴	۰/۲۸	۳۹/۸۸	۳۶/۲۱
۲	۰/۶۴	۰/۴۸	۳/۳۱	۳/۵۱
۳	۰/۵۷	۰/۴۱	۲۳/۵۸	۲۴/۱۰
۴	۰/۶۰	۰/۴۹	۲/۰۵	۲/۰۸
۵	۰/۳۵	۰/۲۷	۶۵/۵۳	۷۲/۱۵
۶	۰/۵۶	۰/۳۶	۲/۰۳	۱/۹۰
۷	۰/۵۷	۰/۳۴	۶/۵۹	۶/۳۹
۸	۰/۵۲	۰/۳۳	۰/۲۸	۰/۳۸
۹	۰/۶۵	۰/۳۰	۵۱/۶۴	۴۶/۶۴
۱۰	۰/۴۴	۰/۱۵	۶۸/۹۳	۶۸/۹۳
۱۱	۰/۶۸	۰/۷۸	۱۸/۲۳	۱۶/۹۶
۱۲	۰/۷۷	۰/۵۳	۱/۱۰	۱/۰۲
۱۳	۰/۶۴	۰/۶۴	۱۷/۴۰	۱۴/۸۶
۱۴	۰/۵۰	۰/۲۹	۱۱/۰۳	۸/۴۸
۱۵	۰/۸۳	۴/۳۲	۴/۰۲	۳/۱۰

آنالیز حساسیت

در این پژوهش از ۱۴ پارامتر برای واسنجی مدل SWAT استفاده شده است (جدول ۲). همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقادیر مشخص شده برای هر پارامتر در یک زیرحوضه با زیرحوضه‌های دیگر متفاوت است به‌همین دلیل آنالیز حساسیت در مرحله واسنجی برای زیرحوضه‌ها جداگانه انجام شد. در واقع حساسیت هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها بر حسب شرایط و ویژگی‌ها، در برابر یک پارامتر

خاص، متفاوت است. تغییر در محدوده مقادیر هر پارامتر بر نتایج واسنجی اثر می‌گذارد.



شکل ۵- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مرتبط با روند سالانه بارندگی در طول دوره مطالعه ۲۰۱۷-۱۹۹۵. رنگ‌های آبی و قرمز به‌ترتیب نشان‌دهنده افزایش و کاهش روند سالانه بارندگی هستند.

سطح مدیریت رودخانه

سطح مدیریت رودخانه تحت سناریو واقعی

بر اساس این سناریو، میانگین جریان سالانه رودخانه در حوضه آبریز دارای تغییرات قابل توجه بوده و در بازه ۰/۵ تا ۱۰۸ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد (شکل ۸). زیرحوضه‌های جنوبی و برخی زیرحوضه‌های مرکزی پایین‌ترین دبی‌رودخانه را تجربه می‌کنند، به‌گونه‌ای 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. به‌طور کلی، جریان رودخانه در مسیر پایین‌دست 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 موجود در طول حوضه آبریز در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ عمدتاً در بازه ۰/۱ تا ۲۱ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد، الگوی توزیع مکانی آب موجود، مشابه الگوی توزیع جریان رودخانه در سطح حوضه مورد مطالعه است. به‌طور مشابه، مناطق جنوبی و برخی مناطق مرکزی حوضه دارای پایین‌ترین میزان آب موجود هستند، که عمدتاً کمتر از ۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد، در حالی که بیشترین مقادیر آب موجود (۱۰–۲۱ مترمکعب بر ثانیه) در مناطق شمالی و شرقی مشاهده شد. تحلیل مکانی میانگین برداشت سالانه در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ نشان داد که مناطق جنوبی، به‌استثنای 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 در طول دوره مورد مطالعه قرار داشت. ارزیابی نهایی سطح مدیریت رودخانه در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ نشان داد که مقدار سطح مدیریت در سطح حوضه بین ۳/۱۱- تا ۱+ متغیر است. هشت زیرحوضه به‌عنوان نقاط داغ اکولوژیکی شناسایی شدند که در آن‌ها سطح مدیریت منفی است؛ این وضعیت ناشی از برداشت آب بیش از میزان آب موجود بوده و موجب تنش بر اکوسیستم‌های وابسته به آب در این زیرحوضه‌ها می‌شود. با وجود حجم بالای آب موجود در مناطق شرقی و شمال‌شرقی، سطح مدیریت منفی گزارش شده است. در مناطق مرکزی، با وجود دسترسی محدودتر به منابع آبی، کاهش میزان برداشت‌ها منجر به‌دستیابی به سطح مدیریت قابل قبول گردید.

سطح مدیریت رودخانه تحت سناریو تغییرات اقلیم

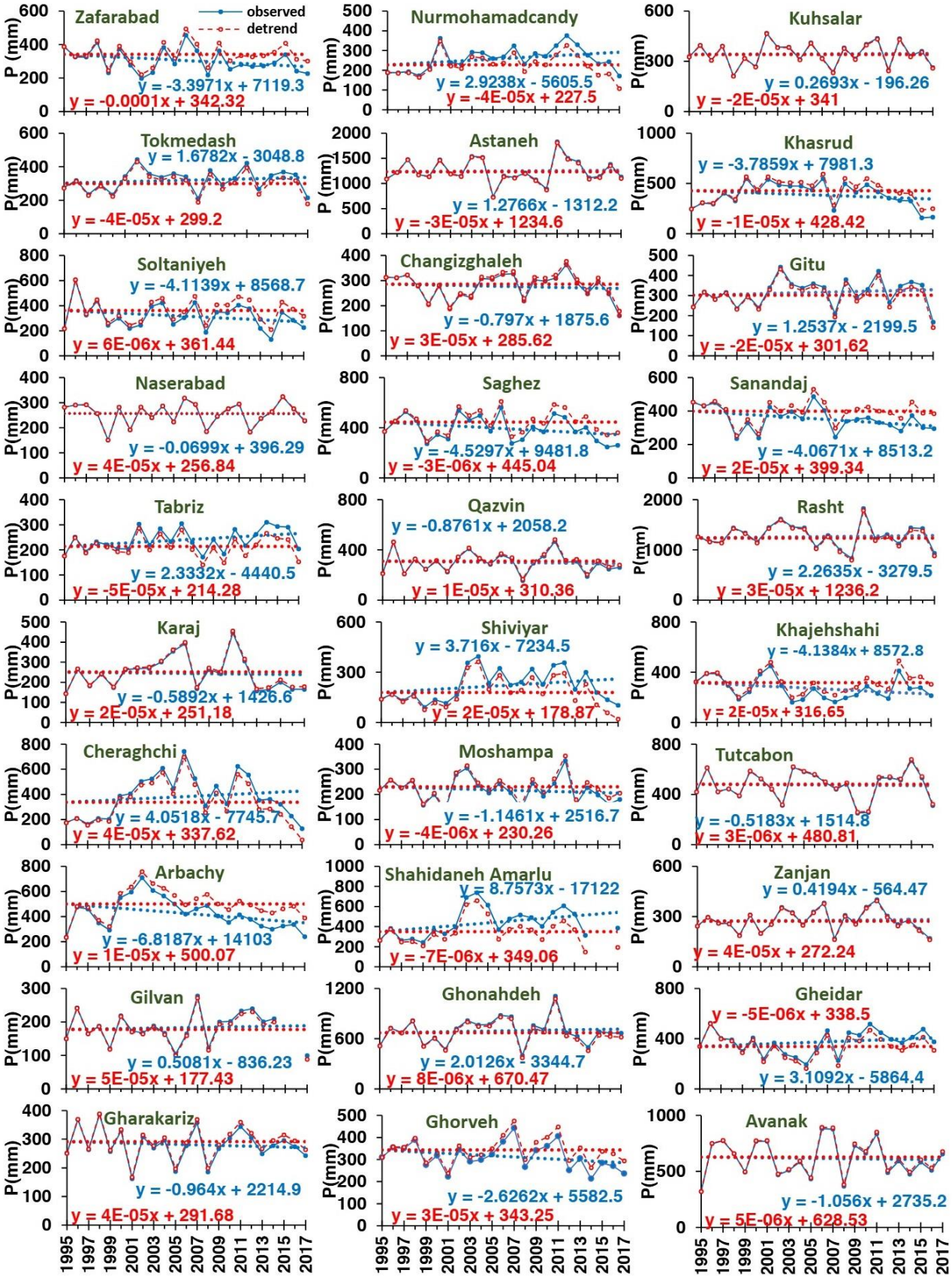
شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل SWAT در این سناریو نشان داد که الگوی توزیع مکانی جریان رودخانه مشابه آنچه در سناریوی واقعی مشاهده شد، است (شکل ۹). زیرحوضه‌های جنوبی و برخی مناطق مرکزی حوضه، کمترین مقادیر جریان رودخانه را تجربه می‌کنند که عمدتاً کمتر از ۵ مترمکعب بر ثانیه است. در مقابل، در نواحی شمالی و شرقی جریان رودخانه بیش از ۱۵ مترمکعب بر ثانیه گزارش شد. بر اساس این سناریو، میانگین جریان سالانه رودخانه در سطح حوضه بین ۰/۵ تا ۹۵ مترمکعب بر ثانیه قرار داشت. همچنین میانگین سالانه آب موجود در کل حوضه در بازه‌ای از ۰/۱ تا ۱۹ مترمکعب بر ثانیه قرار داشت. مناطق جنوبی و برخی زیرحوضه‌های مرکزی پایین‌ترین میزان آب موجود، عمدتاً کمتر از ۱ مترمکعب بر ثانیه، را تجربه کردند؛ در حالی که مناطق شمالی و شرقی بیش از ۶ مترمکعب بر ثانیه آب موجود داشتند. تحلیل مکانی میانگین برداشت سالانه نشان داد که اکثر زیرحوضه‌ها در دوره مطالعه مقادیر برداشت بین ۱ تا ۵ مترمکعب بر ثانیه داشته‌اند. میانگین سالانه میزان برداشت آب در سراسر حوضه سفیدرود در بازه صفر تا ۴۸

مترمکعب بر ثانیه قرار داشت؛ به‌گونه‌ای که حداقل برداشت‌ها، که عمدتاً کمتر از ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه، بود در مناطق جنوبی و بیشترین برداشت‌ها (۱۰–۴۸ مترمکعب بر ثانیه) در مناطق شمالی و شرقی مشاهده شد. ارزیابی سطح مدیریت رودخانه نشان داد که مقدار آن بین ۳/۱۷- تا ۱+ در سطح حوضه متغیر است. مشابه سناریوی واقعی، سطح مدیریت در مناطق شرقی و شمال‌شرقی منفی بوده که ناشی از برداشت بیش از میزان آب موجود است. در مجموع، هشت زیرحوضه به‌عنوان نقاط داغ اکولوژیکی شناسایی شدند؛ با این حال، مناطق مرکزی با میزان آب کمتر به‌دلیل برداشت‌های اندک، سطح مدیریت قابل قبولی ($LOM>0$) را تجربه می‌کنند. اثر تغییرات اقلیمی بر جریان رودخانه هر زیرحوضه با محاسبه تفاوت بین جریان رودخانه شبیه‌سازی‌شده در سناریوی واقعی و مقادیر متناظر آن در سناریوی بدون تغییر اقلیم (جریان در سناریوی واقعی منهای جریان در سناریوی بدون تغییر اقلیم) تعیین شد (شکل ۱۰).

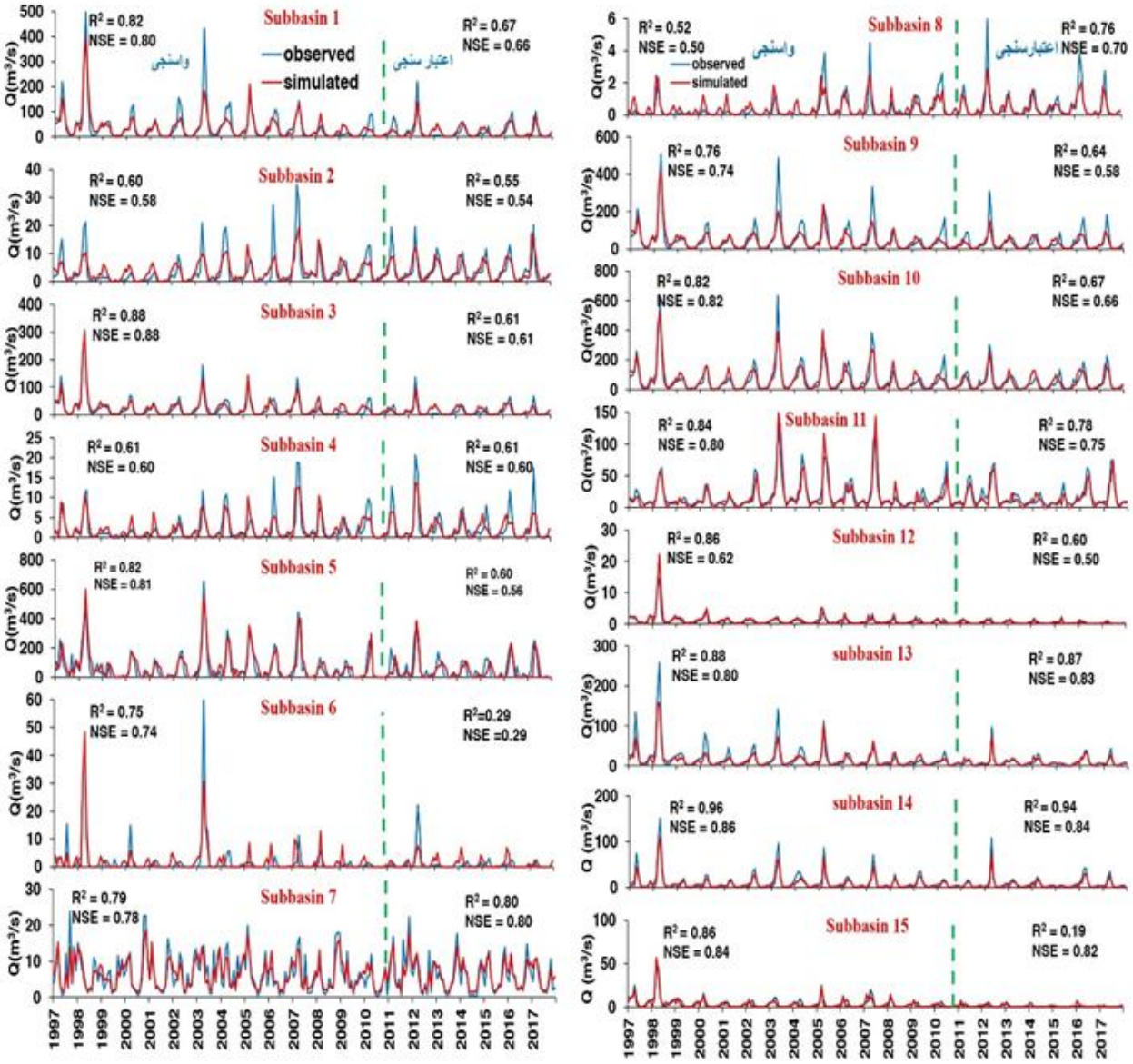
نتایج نشان داد که اکثر زیرحوضه‌ها کاهش جریان رودخانه را به‌دلیل کاهش بارش تجربه کردند؛ با این حال، چند زیرحوضه افزایش جریان را به‌سبب افزایش بارش نشان دادند. تغییرات اقلیمی موجب افزایش جریان رودخانه در بازه ۰/۳ تا ۱۲/۶ مترمکعب بر ثانیه در سراسر حوضه سفیدرود شده است، در حالی که کاهش جریان بین صفر تا ۱/۲ مترمکعب بر ثانیه قرار داشت. بر این اساس، تغییر آب موجود رودخانه ناشی از تغییرات اقلیمی بین ۰/۲۵- تا ۲/۵+ مترمکعب بر ثانیه در زیرحوضه‌ها متغیر بود، به‌گونه‌ای که بیشتر مناطق، کاهش آب موجود رودخانه را تجربه کردند. از آنجا که کل تأمین آب (برداشت) در هر دو سناریوی واقعی و بدون تغییر اقلیم یکسان است، تغییرات مشاهده شده در سطح مدیریت‌ها، ناشی از تغییر در میزان آب موجود می‌باشد. بنابراین، تغییرات اقلیمی منجر به بهبود سطح مدیریت در زیرحوضه‌هایی می‌شود که در دوره مطالعه افزایش بارش و جریان رودخانه را تجربه کرده‌اند، در حالی که در زیرحوضه‌هایی که کاهش بارش و جریان را تجربه کرده‌اند، سطح مدیریت کاهش می‌یابد.

جدول۲- مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در دوره‌های واسنجی و صحت سنجی و آنالیز حساسیت زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی

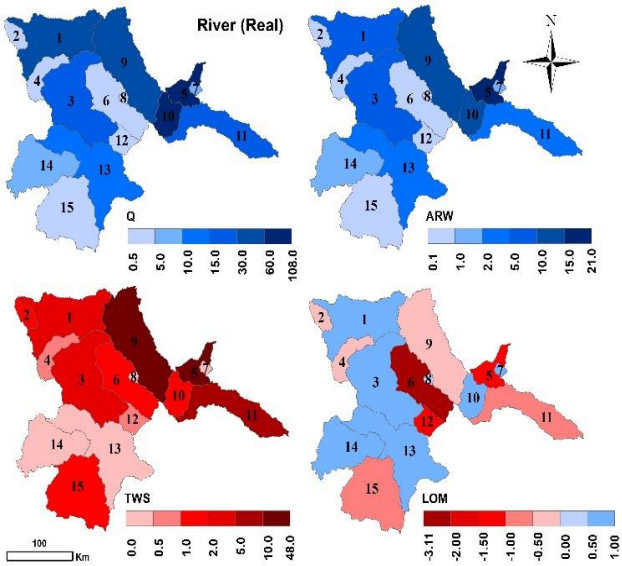
حوضه	دوره‌ی واسنجی (۱۹۹۷-۲۰۱۰)										دوره‌ی صحت سنجی (۲۰۱۱-۲۰۱۷)									
	ضریب تعیین	ضریب نش ساتکلیف	کلین گوپتا	خطای جذر میانگین مربعات	خطای پایاس میانگین	شاخص تطابق	میانگین جریان (مترمکعب در ثانیه)		آنالیز حساسیت		ضریب تعیین	ضریب نش ساتکلیف	کلین گوپتا	خطای جذر میانگین مربعات	خطای پایاس میانگین	شاخص تطابق	میانگین جریان (مترمکعب در ثانیه)	
							اندازه گیری شده	شبیه سازی شده	بیشترین	کمترین							اندازه گیری شده	شبیه سازی شده
۱	۰/۸۳	۰/۸۰	۰/۷	۳۰/۱	-۳/۶	۰/۹۳	۳۹/۸۸	۳۶/۲۱	SOL _ AWC	SOL_K	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۹	۱۸/۴۵	۱/۱۸	۰/۸۸	۱۸/۴۱	۱۹/۵۹
۲	۰/۶۰	۰/۵۸	۰/۵۶	۳/۶۴	۰/۲۰	۰/۸۲	۳/۳۱	۳/۵۱	HRU_SLP	SOL _ AWC	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۷۱	۲/۹۱	-۰/۰۱	۰/۸۴	۳/۸۱	۳/۸۰
۳	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹۰	۱۳/۴۰	۰/۵۲	۰/۹۶	۲۳/۵۸	۲۴/۱۰	SLSOIL	ALPHA _ BF	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۷	۱۲/۴۱	۱/۳۹	۰/۸۶	۱۱/۳۶	۱۲/۷۵
۴	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۷۵	۲/۰۰	۰/۰۳	۰/۸۷	۲/۰۵	۲/۰۸	CN2	REVAP MN	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۶۱	۲/۴۶	-۰/۲۳	۰/۸۴	۲/۴۶	۲/۲۳
۵	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۶	۴۵/۴۹	۶/۶۱	۰/۹۵	۶۵/۵۳	۷۲/۱۵	GW_ DELAY	REVAP MN	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۹	۵۰/۷۴	-۹/۹۰	۰/۸۶	۵۳/۳۹	۴۳/۴۹
۶	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۷۵	۳/۴۳	-۰/۱۴	۰/۹۲	۲/۰۳	۱/۹۰	SOL _ AWC	ESCO	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۴۱	۲/۳۷	۰/۰۱	۰/۶۶	۰/۹۳	۰/۹۵
۷	۰/۸۰	۰/۷۹	۰/۷۸	۲/۳۲	-۰/۲۰	۰/۹۳	۶/۵۹	۶/۳۹	LAT_T TIME	ESCO	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۷۹	۲/۱۱	-۰/۰۴	۰/۹۴	۶/۲۴	۶/۲۱
۸	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۱۰	۰/۸۲	۰/۲۸	۰/۳۸	SOL _ AWC	SOL_ BD	۰/۷۷	۰/۷۰	۰/۵۸	۰/۵۰	-۰/۰۶	۰/۸۸	۰/۵۲	۰/۴۶
۹	۰/۷۷	۰/۷۴	۰/۶۹	۳۹/۳۷	-۵/۰۰	۰/۹۱	۵۱/۶۴	۴۶/۶۴	SOL _ AWC	ESCO	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۵۱	۳۱/۱۸	-۵/۱۲	۰/۸۲	۳۳/۳۵	۲۸/۲۳
۱۰	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۸	۳۹/۸۹	-۱/۵۳	۰/۹۵	۶۸/۹۳	۶۸/۹۳	GW QMN	LAT_T TIME	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۸	۳۲/۰۰	-۳/۰۵	۰/۹۰	۴۸/۹۸	۴۵/۹۳
۱۱	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۸۵	۹/۶۰	-۱/۲۷	۰/۹۶	۱۸/۲۳	۱۶/۹۶	ALPHA _ BF	GW_ DELAY	۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۷۷	۸/۴۵	-۲/۸۳	۰/۹۳	۱۶/۶۵	۱۳/۸۲
۱۲	۰/۸۷	۰/۶۲	۰/۵۷	۰/۹۵	-۰/۰۸	۰/۹۳	۱/۱۰	۱/۰۲	GW QMN	SOL_K	۰/۶۰	۰/۴۹	۰/۶۶	۰/۳۲	-۰/۱۰	۰/۸۶	۰/۴۰	۰/۳۰
۱۳	۰/۸۹	۰/۸۰	۰/۶۲	۱۴/۴۰	-۲/۵۴	۰/۹۲	۱۷/۴۰	۱۴/۸۶	GW_ REVAP	ESCO	۰/۸۸	۰/۸۳	۰/۶۹	۵/۵۱	۱/۲۶	۰/۹۴	۷/۳۰	۸/۵۶
۱۴	۰/۹۶	۰/۸۷	۰/۶۲	۷/۴۴	-۲/۵۵	۰/۹۵	۱۱/۰۳	۸/۴۸	LAT_T TIME	GW_ REVAP	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۶۳	۵/۶۶	-۱/۰۰	۰/۹۴	۶/۸۳	۵/۸۳
۱۵	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۷۶	۲/۵۷	-۰/۹۲	۰/۹۶	۴/۰۲	۳/۱۰	GW QMN	SLSOIL	۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۲۳	۱/۴۳	۰/۲۱	۰/۵۸	۰/۷۳	۰/۹۴



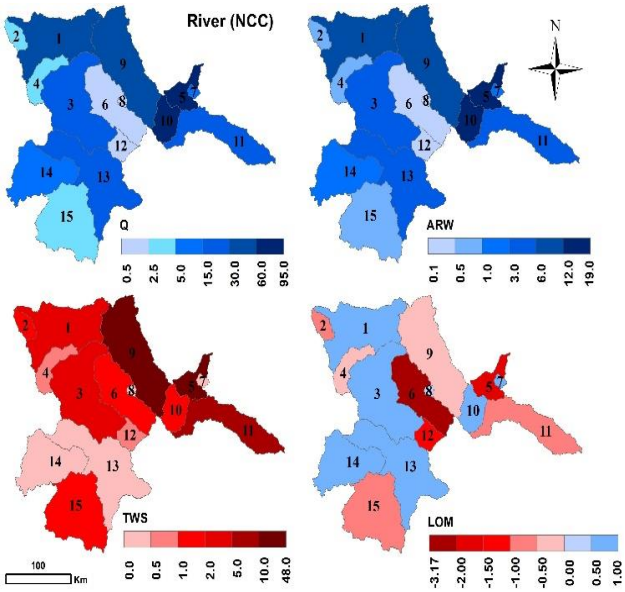
شکل ۶- تغییرات تدریجی سالانه و حذف تغییرات تدریجی سالانه مقادیر بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی در دوره ۱۹۹۵- ۲۰۱۷



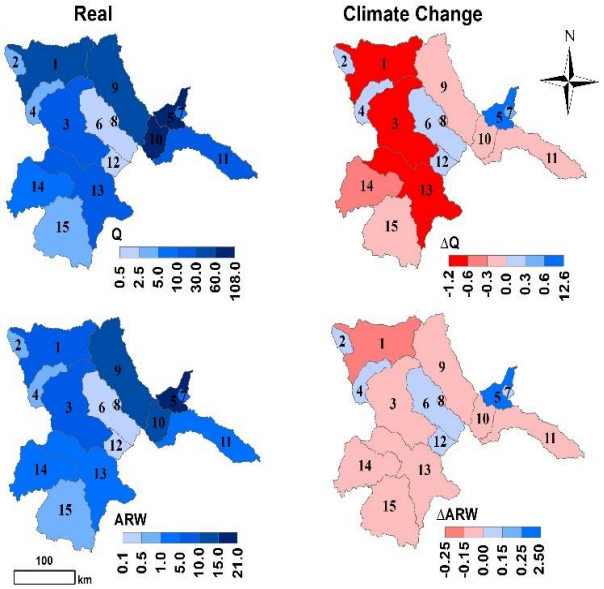
شکل۷- مقایسه بین جریان ماهانه جریان ماهانه مشاهده شده و پیش‌بینی شده رودخانه توسط SWAT برای پانزده زیرحوضه در طول دوره‌های واسنجی (۱۹۹۷-۲۰۱۰) و اعتبارسنجی (۲۰۱۱-۲۰۱۷) با استفاده از معیارهای ضریب تعیین (R^2) و کارایی نش ساتکلیف (NSE)



شکل ۸- توزیع مکانی میانگین جریان سالانه رودخانه (Q)، آب موجود رودخانه (ARW)، کل تأمین آب از رودخانه (TWS)، بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت (LOM) برای منابع آب سطحی در سناریوی واقعی (Real)



شکل ۹- توزیع مکانی میانگین جریان سالانه رودخانه Q، آب موجود رودخانه ARW، کل تأمین آب از رودخانه (TWS) بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت (LOM) برای منابع آب سطحی در سناریوی بدون تغییر اقلیم (NCC)



شکل ۱۰- توزیع مکانی میانگین جریان سالانه رودخانه (Q) و آب موجود رودخانه (ARW) در طول دوره مشاهده (Real) و همچنین تغییرات مربوطه در جریان رودخانه (ΔQ) و آب موجود رودخانه (ΔARW) تحت تغییرات اقلیمی (Climate Change) بر حسب متر مکعب بر ثانیه

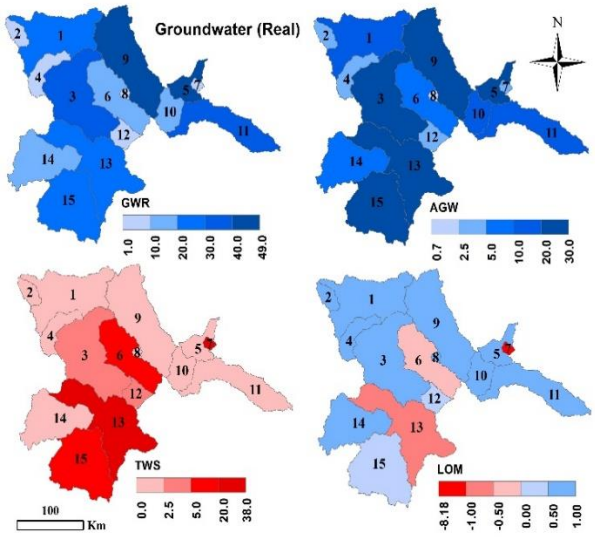
سطح مدیریت آب های زیرزمینی

سطح مدیریت آب های زیرزمینی تحت سناریو واقعی

تحلیل تغذیه آب‌های زیرزمینی در سناریوی واقعی نشان داد که میانگین سالانه تغذیه آب‌های زیرزمینی در سطح حوضه در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ در بازه ۱ تا ۴۹ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد (شکل ۱۱). اکثر زیرحوضه‌ها، تغذیه آب‌زیرزمینی در محدوده ۲۰–۳۰ مترمکعب بر ثانیه را تجربه کردند، در حالی که مناطق شمالی بیشترین میزان 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 موجود نشان داد که میانگین سالانه آب زیرزمینی موجود در حوضه سفیدرود بین ۰/۷ تا ۳۰ مترمکعب بر ثانیه قرار داشت، به‌گونه‌ای 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 صفر 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 است.

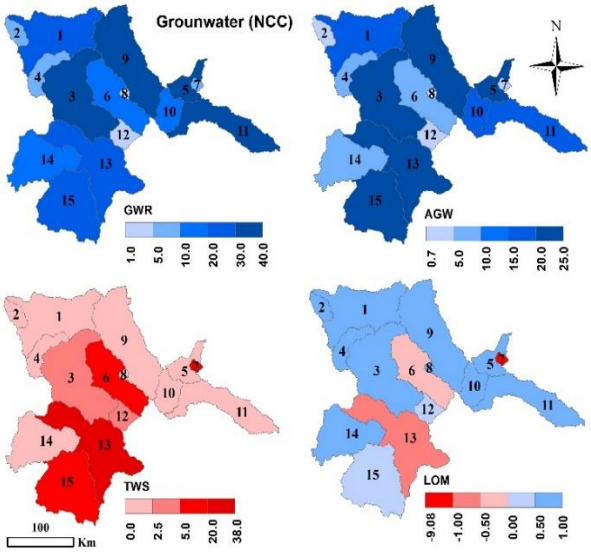
شایان ذکر است که میزان برداشت آب زیرزمینی در مناطق شمالی و شرقی پایین است، در حالی که برداشت آب رودخانه در این مناطق به‌دلیل جریان کافی رودخانه در بیشترین مقدار خود قرار دارد. در واقع، به‌دلیل دسترسی آسان‌تر و هزینه کمتر آب رودخانه نسبت به منابع زیرزمینی، تمایل به تأمین آب از رودخانه در شمال و شرق منطقه 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. به طور کلی ارزیابی سطح مدیریت آب زیرزمینی در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ نشان می‌دهد که مقادیر سطح مدیریت در منطقه مورد 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 آب زیرزمینی) برای توسعه بیشتر زیرساخت‌ها و فعالیت‌های صنعتی وابسته به آب با حفظ اکوسیستم است. 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 تنش آبی بر اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی حوضه‌ها می‌شود.



شکل ۱۱- توزیع مکانی میانگین تغذیه سالانه آب‌های زیرزمینی (GWR)، آب‌های زیرزمینی موجود (AGW)، کل تأمین آب از سفره‌های آب زیرزمینی (TWS) بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت LOM برای منابع آب زیرزمینی در سناریو واقعی (Real)

سطح مدیریت آب‌های زیرزمینی تحت سناریو اقلیمی

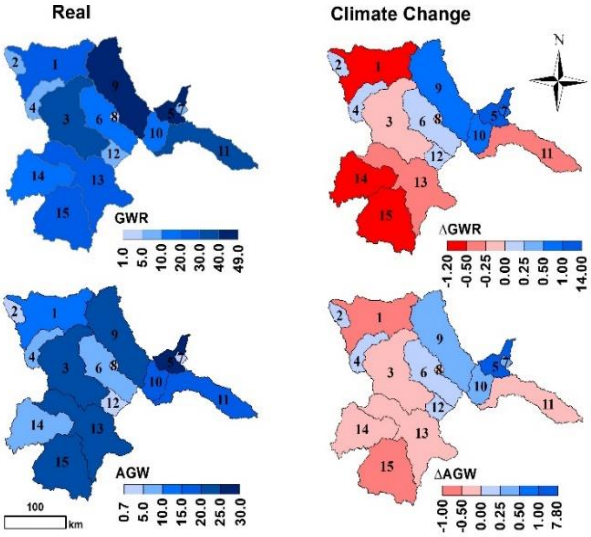
تحلیل نتایج نشان می‌دهد که میانگین سالانه تغذیه مجدد آب زیرزمینی در حوضه آبریز در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ در بازه ۱ تا ۴۰ متر مکعب بر ثانیه قرار دارد، به‌طوری که در اکثر مناطق، نرخ تغذیه آبخوان بین ۱۰ تا ۳۰ متر مکعب بر ثانیه مشاهده می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- توزیع مکانی میانگین سالانه تغذیه آب‌های زیرزمینی (GWR)، آب‌های زیرزمینی موجود (AGW)، کل تأمین آب از سفره‌های آب زیرزمینی (TWS)، بر حسب متر مکعب بر ثانیه و سطح مدیریت LOM برای منابع آب زیرزمینی در سناریوی بدون تغییر اقلیم (NCC)

مناطق شمالی حوضه معمولاً بیشینه میزان تغذیه آب زیرزمینی و بالاتر از ۳۰ متر مکعب بر ثانیه را نشان می‌دهند، در حالی که برخی مناطق در طول دوره مطالعه تغذیه آب زیرزمینی کمتر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه دارند. علاوه بر این، میانگین سالانه آب زیرزمینی موجود در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ در بازه ۰/۷ تا ۲۵ متر مکعب بر ثانیه قرار دارد، به‌طوری که اکثر زیرحوضه‌ها، میانگین دسترسی به آب زیرزمینی بین ۱۵ تا ۲۵ متر مکعب بر ثانیه را تجربه می‌کنند. برخی مناطق، از جمله زیرحوضه‌های غربی، معمولاً دارای میزان تغذیه آب زیرزمینی کمتر از ۱۰ متر مکعب بر ثانیه هستند. توزیع مکانی میانگین برداشت سالانه آب زیرزمینی مشابه سناریوی واقعی است، چرا که فرض شده کل تأمین آب از منابع زیرزمینی در هر زیرحوضه با مقادیر متناظر در سناریوی واقعی برابر است، که این امر منجر به مقدار کل تأمین آب بین صفر تا ۳۸ متر مکعب بر ثانیه در حوضه آبریز سفیدرود می‌شود. علاوه بر این، بررسی سطح مدیریت آب زیرزمینی نشان می‌دهد که مقادیر سطح مدیریت در کل منطقه مطالعه، بین ۹/۰۸- تا ۱+ تغییر می‌کند. در شرایطی که هیچ روند بلندمدت در سری‌های زمانی سالانه بارش و دما مشاهده نمی‌شود، تنها سه زیرحوضه به‌عنوان نقاط داغ اکولوژیکی دارای مقادیر منفی

سطح مدیریت آب زیرزمینی هستند، چرا که میزان برداشت در این حوضه‌ها از میزان آب موجود فراتر رفته و موجب تنش آبی بر اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی می‌شود. در عین حال، مقادیر سطح مدیریت برای بیشتر حوضه‌ها در منطقه مطالعه بالاتر از ۰/۵+ بود که نشان‌دهنده سطح مدیریت مطلوب منابع آب است. علاوه بر این، تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغذیه مجدد آب زیرزمینی در هر زیرحوضه با محاسبه تفاوت بین تغذیه آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در سناریوی واقعی و مقادیر متناظر آن در سناریوی بدون تغییر اقلیم (تفاضل تغذیه آب زیرزمینی در سناریوی واقعی و سناریوی بدون تغییر اقلیم) ارزیابی شده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- توزیع مکانی میانگین تغذیه سالانه آب‌های زیرزمینی (GWR) و آب‌های زیرزمینی موجود (AGW) در طول دوره مشاهده (سناریوی واقعی) و همچنین تغییرات مربوطه در تغذیه آب‌های زیرزمینی (ΔGWR) و آب‌های زیرزمینی موجود (ΔAGW) تحت تغییرات اقلیمی (Climate Change) بر حسب متر مکعب بر ثانیه

ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که اکثر زیرحوضه‌ها به‌دلیل کاهش بارش دچار کاهش در تغذیه آب زیرزمینی شده‌اند، در حالی که برخی زیرحوضه‌های دیگر به‌واسطه افزایش بارش شاهد افزایش جزئی میزان تغذیه آب زیرزمینی هستند. تغییرات اقلیمی منجر به افزایش تغذیه آب زیرزمینی بین ۰/۲۵ تا ۱۴ متر مکعب بر ثانیه در برخی مناطق حوضه آبریز سفیدرود می‌شود، در حالی که در اکثر مناطق، تغذیه آب زیرزمینی تا ۱/۲ متر مکعب بر ثانیه در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ کاهش می‌یابد. به‌این‌ترتیب، تغییرات اقلیمی باعث کاهش آب زیرزمینی موجود تا ۱ متر مکعب بر ثانیه در اکثر مناطق حوضه سفیدرود می‌شود، در حالی که برخی زیرحوضه‌ها، عمدتاً واقع در مناطق شمال شرقی، افزایش دسترسی به آب زیرزمینی تا ۷/۸ متر مکعب بر ثانیه را در طول دوره مورد مطالعه تجربه می‌کنند. در نتیجه، سطح مدیریت آب زیرزمینی در اکثر مناطق مطالعه به‌علت کاهش بارش کاهش می‌یابد، در حالی که برخی مناطق ممکن است در پاسخ به روند بلندمدت افزایشی بارش سالانه، شاهد افزایش سطح مدیریت باشند. در شرکت مدیریت منابع آب ایران داده‌های مشاهداتی روزانه بارش و دما تا سال ۲۰۱۷ و داده‌های مربوط به برداشت از منابع برای سال ۲۰۰۹ ارائه شده است. یکی از چالش‌های موجود در پژوهش حاضر عدم دسترسی به مقادیر برداشت ماهانه در دوره مطالعاتی بود. مطالعات انجام شده 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; Modabber-Azizi et al., 2023; Salarijazi et al., 2023). در سال‌های تر سالی کاهش برداشت و در سال‌های خشکسالی افزایش برداشت از منابع آب صورت می‌گیرد، بنابراین انتظار می‌رود برداشت از منابع آب در طول زمان متغیر باشد که این امر می‌تواند نتایج مدل را به‌صورت سالانه تغییر دهد، اما نتایج مربوطه برای متوسط دوره، قابل اعتماد است. بنابراین در این مطالعه نتایج متوسط دوره ارائه شده است. با توجه به مقادیر مورد نیاز در دسترس در زمان انجام پژوهش مدل تا سال ۲۰۱۷ بررسی شده است، بنابراین تغییرات بارش و دبی در سال‌های اخیر (۲۰۱۷ تا کنون) در مدل گنجانده نشده است.

با توجه به اینکه مدل در ۷۰ درصد مدت زمان مطالعاتی کالیبره شده است این قابلیت وجود دارد که به‌ازای مقادیر حدی متفاوت دما و بارش و مقادیر برداشت، خروجی (نتایج) مدل بررسی و تحلیل شود.

حجم آب موجود، آب در دسترس، سطح مدیریت و برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی در هر زیرحوضه بر اساس ایستگاه هیدرومتری آن زیرحوضه کالیبره شده است، بنابراین نتایج پژوهش حاضر در مقیاس حوضه سفیدرود بوده و تغییرات مکانی داخل حوضه در سطح هر زیرحوضه قابل اعتماد است. تغییرات مکانی در هر زیر حوضه بررسی نشده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تغییر اقلیم در سطح مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز سفیدرود تغییرات مکانی و زمانی ایجاد می‌کند و سبب بهبود سطح مدیریت در حوضه‌هایی با روند افزایشی بارش و کاهش سطح مدیریت در حوضه‌هایی با روند کاهشی بارش می‌شود. نتایج حاصل با مطالعات پیشین در سایر حوضه‌های ایران و جهان قابل مقایسه و تحلیل است. برای نمونه Abbaspour et al. (2009) با بررسی اثر اقلیم بر منابع آب

ایران نشان دادند که کاهش بارش و افزایش دما سبب کاهش جریان رودخانه‌ها و تغذیه منابع آب زیرزمینی می‌شود، این نتیجه با کاهش سطح مدیریت در حوضه‌های جنوبی و شرقی سفیدرود هم راستا بوده و تاکید بر اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در مقیاس منطقه‌ای دارد. از طرفی Saadatpour (2025) and Kamali با استفاده از مدل SWAT نشان دادند افزایش بارش سبب افزایش رواناب و در نتیجه میزان آب موجود می‌شود، این نتایج با نتیجه پژوهش حاضر که حوضه‌هایی با روند افزایشی بارش سطح مدیریت بالاتری را تجربه می‌کنند، همخوانی دارد. مطالعه Rashedi et al. (2025) در حوضه پسیخان نشان داد که تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی سبب کاهش جریان رودخانه و افزایش رسوب‌گذاری شده است، این نتیجه با کاهش سطح مدیریت در حوضه‌هایی با روند بارندگی منفی و اینکه تغییر اقلیم در تعامل با عوامل انسانی بر منابع آب اثر می‌گذارد، در حوضه آبریز سفیدرود قابل مقایسه است. Noori et al. (2023) با استفاده ازداده‌های پایگاه ملی برداشت از یک میلیون چاه و قنات، کاهش میانگین سالانه تغذیه آب زیرزمینی را عمدتاً ناشی از مدیریت ناپایدار منابع آب دانستند و سهم عوامل انسانی را بیشتر از عوامل طبیعی معرفی کردند. همچنین Shaabani et al. (2024) در استان فارس با استفاده از مدل‌های هیدرولوژی نشان دادند که افزایش برداشت سبب کاهش تغذیه آب زیرزمینی شده است که این نتایج با سطح مدیریت منفی تعدادی از زیرحوضه‌های، حوضه سفیدرود به‌دلیل برداشت بیش از ظرفیت آب موجود منابع آب زیرزمینی همخوانی داشته و اهمیت توجه به تغذیه آب زیرزمینی و مدیریت انسانی را در پایداری منابع آب برجسته می‌سازد. مطالعه Japan International Cooperation Agency (JICA).(2015)بر ضرورت در نظر گرفتن نیاز آبی اکوسیستم و پایداری محیط زیست در طرح مدیریت منابع آب تاکید دارد، پژوهش حاضر نیز سطح مدیریت منابع آب حوضه سفیدرود را با در نظر گرفتن سهم آبی محیط‌زیست کمی‌سازی نموده است که می‌تواند به‌عنوان یک شاخص ارزیابی برای عملکرد مدیریتی در مقیاس زیرحوضه در نظر گرفته شود. 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 ۰/۵۴- ۲۶/۴۳ میلی‌متر در سال است، محاسبه نموده که با توجه به بخش نتایج و ارزیابی عملکرد مدل و عدم قطعیت کم در نتایج آن و مقایسه مقادیر محاسبه شده با مقدار تغذیه آب‌زیرزمینی حوضه سفیدرود در مطالعات سازمان همکاری بین‌المللی ژاپن که ۳۲ میلی‌متر در سال گزارش شده است، نشانه اعتبار و دقت نتایج این مطالعه است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی در دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ تأثیرات قابل‌توجهی بر حجم آب موجود و سطح مدیریت منابع سطحی و زیرزمینی داشته است. افزایش دمای سالانه در سراسر حوضه، همراه با روندهای متفاوت بارش در زیرحوضه‌های مختلف، منجر به تغییرات مکانی در جریان رودخانه، تغذیه منابع آب زیرزمینی و میزان برداشت از منابع آب شده است. علت اصلی وضعیت موجود را می‌توان در تغییرات اقلیمی منطقه‌ای، به‌ویژه کاهش بارش در نواحی جنوب‌غربی و شرقی، و افزایش دما در کل حوضه بیان نمود. پیامدهای این وضعیت شامل کاهش پایداری اکوسیستم‌های وابسته به منابع آب، تهدید امنیت آبی در نواحی که دچار کم آبی یا بحران آبی شده‌اند و افزایش احتمال بروز تعارضات در تخصیص منابع آب در بخش‌های مختلف است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر تغییرات اقلیمی بر سطح مدیریت (LOM) منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سفیدرود، در دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۷ ارزیابی شد. حوضه آبریز شاهد افزایش دمای سالانه بوده، با این حال بارش سالانه بسته به موقعیت مکانی افزایش یا کاهش یافته است. بررسی سطح مدیریت رودخانه و آب زیرزمینی نشان داد که سطح مدیریت رودخانه در هشت حوضه و سطح مدیریت آب زیرزمینی در سه حوضه دارای مقادیر منفی می‌باشند که دلیل آن برداشت بیش از میزان آب موجود منابع آب می‌باشد. حوضه‌هایی با سطح مدیریت منفی به‌عنوان نقاط داغ اکولوژیکی شناخته می‌شوند. منابع آب سطحی و زیرزمینی به تغییرات اقلیمی به‌صورت هماهنگ پاسخ می‌دهند، در واقع بارش منبع اصلی تامین آب موجود برای رودخانه و آب زیرزمینی است و بنابراین روند بلندمدت عناصر اقلیمی به‌طور پیوسته بر دسترسی بلندمدت به منابع آب و سطح مدیریت تأثیرگذار است.

تعیین نقاط داغ اکولوژیکی می‌تواند به‌عنوان یک الگو برای تصمیم گیرنده‌های مدیریتی منابع آب، برای ارائه راهکارهای مدیریتی متناسب با شرایط مکانی کمک کند، برای مثال در

مدیریت‌های پایدار، باید به نقاطی که اکولوژیک وابسته به منابع آب تحت استرس می‌باشند توجه ویژه داشته باشند و راهکارهای مدیریتی مانند کاهش میزان برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی، افزایش راندمان آبیاری، کاشت گیاهان با نیاز آبی کمتر و افزایش بهره‌وری زمین‌های کشاورزی را پیاده کنند تا سطح مدیریت منابع به حد قابل قبولی برسد. از این رو، مدیران منابع آب و سیاست‌گذاران می‌توانند شاخص سطح مدیریت منابع آب را برای ارزیابی اثر سناریوهای مدیریتی مختلف بر سطح مدیریت رودخانه و آب زیرزمینی به‌کار گرفته و تلاش نمایند تا مقادیر سطح مدیریت به ۱۰۰ درصد نزدیک شود و شرایط توسعه بیشتر زیرساخت‌ها و صنایع وابسته به منابع آب فراهم شود. از این‌رو، نتایج این پژوهش، ضرورت بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آب را برجسته می‌سازد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایهٔ زنجان کمال تشکر را داشته و از شرکت مدیریت منابع آب ایران برای در اختیارگذاشتن اطلاعات مورد نیاز تشکر می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها، رسم نقشه و تجزیه و تحلیل نتایج و نتیجه گیری

نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1. Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Seyed Ghasemi, S. and Yang, H., 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45(W10434), pp.1–16. https://doi.org/10.2113/3.4.1340
2. Abed, E., Meftah, M., Zahiri, A. and Saeidi, P., 2019. Simulation of thermal stratification and eutrophication of Taham dam reservoir using CE-QUAL-W2 model. *Journal of Research in Ecology*, 7, pp.2510–2521. http://ecologyresearch.info/documents/EC0640.pdf
3. Adineh, M., Bejestan, M. S. and Ghodoosi, H., 2023. Numerical simulation of pressurized flushing at different water levels (Case study: Sefid-Rud Dam). Published in *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.10450360
4. Ayoubikia, R., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A. and 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
5. Entezami, H., Mojarrad, F., Shahabi, H. and 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
6. FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC., 2012. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. https://doi.org/10.4060/cc3823en
7. Hadiyan, P. P., Moeini, R. and Ehsanzadeh, E., 2020. Application of static and dynamic artificial neural networks for forecasting inflow discharges, case study: Sefidroud Dam reservoir. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 27, 100401. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100401
8. Haghighi, A. T., Sharifi, A., Darabi, H., Mazaheri, M., Mohammadpour, R., Gohari, A. and 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
9. Iranian Water Resources Management Company., 2025. *Data Center*. Tehran: Iranian Water Resources Management Company. http://wrbs.wrm.ir.
10. 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
11. Kamyab-Talesh, F., Mousavi, S. F., Khaledian, M., Yousefi-Falakdehi, O. and 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), pp.112–116. https://doi.org/10.1134/S0097807819010056
12. Kousali, M., Salarijazi, M. and 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), pp.835–847. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10010-5

13. Mehraban, M., Marghmaleki, S. N., Sarang, A. and Azar, N. A., 2024. Developing climate change adaptation pathways in the agricultural sector based on robust decision-making approach (case study: Sefidroud Irrigation Network, Iran). Environmental Monitoring and Assessment, 196(4), 378. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12511-7
14. Modabber-Azizi, S., Salarijazi, M. and 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://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103426
15. Moravatdoust Anarkoli, M., Haeripour, S. and Amirnezhad, R., 2015. Study of Sefidroud River water quality in Roudbar. *Journal of Wetland Ecobiology*, 7(25), 33–42. .[In Persian] https://sid.ir/paper/174804/en
16. 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
17. Nagata, K., Sayyari, M., Inaoka, M. and 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
18. Nezaratian, H., Zahiri, J. and Kashefipour, S. M., 2018. Sensitivity analysis of empirical and data-driven models on longitudinal dispersion coefficient in streams. *Environmental Processes*, 5(4), 833–858 https://doi.org/10.1007/s40710-018-0334-3
19. Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S. M., Heggy, E., Javadi, S., Noury, M., Pistre, S., Abolfathi, S. and AghaKouchak, A., 2023. Decline in Iran's groundwater recharge. Nature Communications, 14(1), 6674. https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2
20. Rashedi, S., Hisseini, S. A., Nazif, S. and Cheshmeh, B. G., 2025. Modeling the effects of climate change and land use on flow rate and sedimentation by SWAT model in Anzali Wetland in the north of Iran. Theoretical and Applied Climatology, 156(1), 69. https://doi.org/10.1007/s00704-024-05326-6
21. Richter, B. D., Davis, M. M., Apse, C. and Konrad, C., 2012. A presumptive standard for environmental flow protection. *River Research and Applications*, 28(8), pp.1312–1321. https://doi.org/10.1002/rra.1511
22. Saadatpour, M. and Kamali, F., 2025. Studying the impact of climate change on spatiotemporal variability of blue and green water resources. Water Supply, 25(2), pp.289–302. https://doi.org/10.2166/ws.2025.008
23. Salar-Ashayeri, M., Khaledian, M., Kavoosi-Kalashami, M. and Rezaei, M., 2020. Simulation of water allocation in Sefidroud irrigation and drainage network for sustainability of rice production. *Paddy and Water Environment*, 18(4), pp.607–621. https://doi.org/10.1007/s10333-020-00805-8
24. Salarijazi, M., Ahmadianfar, I. and 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
25. Salarijazi, M., Ghorbani, K., Mohammadi, M., Ahmadianfar, I., Mohammadrezapour, O., Naser, M. H. and 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
26. Shaabani, M. K., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S. S. and Gohari, S. A. R., 2024. Simulation of the effects of climate change, crop pattern change, and developing irrigation systems on the groundwater resources by SWAT, WEAP and MODFLOW models: A case study of Fars province, Iran. Environment, Development and Sustainability, 26(4), pp.10485-10511. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03157-5
27. Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. and Arnold, J., 2013. *ArcSWAT interface for SWAT2012: User's Guide*. Blackland Research and Extension Center, Texas Agrilife Research. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, Texas. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1935534
28. Zhou, X., Leng, Y., Salarijazi, M., Ahmadianfar, I. and 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, pp.1355–1375. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.06.050
29. Xing, Y., Li, Y., Bai, P., Zhuang, J., Feng, A., Huang, M. and Yan, H., 2024. Spatiotemporal variations of meteorological drought and its dominant factors in different climate regions for the first two decades of the twenty-first century. *Theoretical & Applied Climatology*, 155(5). https://doi.org/10.1007/s00704-024-04833-w