

The effect of climate change on the Fariman dam watershed health using VOR model

Hamed Nikouei¹ , Mahmood Azari^{2*} , Mohammad Taghi Dastorani³ 

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

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

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

Extended Abstract

Introduction

Ecosystem health is the ability of ecosystems to maintain structure and function in the face of external pressures over time. The knowledge of watershed health with a systemic approach seeks to conserve the natural ecosystem by protecting healthy watersheds and preventing changes in them. Assessing watershed health and prioritizing sub-watersheds is essential for effective watershed management and will help in proper management and optimal allocation of resources. Considering that watersheds are dynamic systems, the hydrological function and health of watersheds are constantly changing under the influence of land use changes, climate change, and human interventions. The emission of greenhouse gases in recent decades has caused global warming, followed by changes in the hydrological regime and function of watersheds, which can threaten the health of the watersheds. In order to evaluate the health status of the ecosystem, various methods such as pressure-state-response (PSR), vigor-organization-resilience (VOR), reliability-resilience-vulnerability (RRV), and watershed health index (WHI) have been presented which determine the watershed health using several indicators. The aim of this research is to evaluate the health of the Fariman dam watershed in Khorasan Razavi province under current and future climate using the VOR model and hydrological simulation.

Materials and Methods

In order to achieve the research objectives, the hydrology of the watershed was simulated using the SWAT model. For this purpose, parameters sensitivity analysis, calibration, and validation of the model were performed using the SUFI-2 algorithm in SWAT-CUP software using daily discharge and suspended sediment yield data for the period of 2008-2014 and 2016-2019. Then, using the VOR model, the health of the watershed was calculated for the historical period of 1985-2014. In the VOR model, the indicators of landscape, soil erosion, and water loss were used to determine the components of the vigor, organization, and resilience of the watershed. The landscape indicators were determined using the watershed land use map in FRAGSTATS 4.2.1 software and indicators related to watershed hydrology (sediment yield and runoff) achieved from the output of the SWAT model. To assess the effect of climate change on watershed hydrology, precipitation and temperature data from CMCC-ESM2, GFDL-ESM4, and MRI-ESM2-0 climate models of IPCC sixth assessment report for three SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5 emission scenarios for two future time period (2030-2059 and 2070-2099), were downloaded. Then, CMhyd software was used for bias correction and downscaling of climate data. In the end, the SWAT model was run and the health index was calculated for future periods and compared with the historical period.

Results and Discussion

Calibration results of the SWAT model showed that Nash-Sutcliffe criterion for discharge and monthly sediment in the calibration period was 0.66 and 0.65, respectively. Nash-Sutcliffe criteria values for the validation period were 0.57 and 0.56 respectively for discharge and sediment. The results of watershed health by VOR model in the historical period showed that the average health index of the sub-watersheds for MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4,

and CMCC-ESM2 models is 0.545, 0.533, and 0.665, respectively. The average index of all three models is 0.581 which means the watershed health status is "Moderate". The presented results show that in the SSP1-2.6 scenario in the period of 2030-2059, the health index in three sub-watersheds 2, 8 and 9 has decreased by 16.1, 3.6, and 0.6% (average 7.6%) compared to the historical period (1985-2014). The health index has decreased in 4 sub-watersheds in the SSP2-4.5 scenario and in 6 sub-watersheds in the SSP5-8.5 scenario. The average reduction in the SSP2-4.5 scenario is 9.3 percent and in the SSP5-8.5 scenario, it is 10.6%. The health index of sub-watersheds 2 and 9 has decreased in all emission scenarios and the health index of sub-watersheds 5 has decreased only in the SSP5-8.5 by 10.7 %. As a result, watershed health in the future and under climate change indicated that in the period of 2030- 2059 with the increase of greenhouse gas emissions, the number of sub-watersheds with a decrease in watershed health index will increase from three sub-watersheds in the SSP1-2.6 to 4 and 6 sub-watersheds in the SSP2 -4.5 and SSP5-8.5. In other words, the watershed health index has decreased in 34.6 % of the watershed area in the SSP1-2.6, while in the SSP2-4.5, 51 % and in the SSP5-8.5, 65.5 % of the watershed area will experience a decrease in health. Also, The results for the period 2070-2099 show that in the SSP1-2.6, the health index has decreased in sub-watersheds 2, 3, 5, 6, and 9 with an average of 11.2%, in the SSP2-4.5 scenario, sub-watersheds 2, 5, 7, 8, and 9 with an average of 5.1% and in the SSP5-8.5 scenario, sub-watersheds 2, 4, 5, 6, 8 and 9 with an average of 7.5% had a more decreasing trend. Sub-watersheds 2, 5, and 9 had a decreasing trend in all three scenarios, and sub-watersheds 3, 4, and 7 only had a decrease only in SSP1-2.6, SSP5-8.5, and SSP2-4.5 scenarios. The results in the period of 2070-2099 indicate that the watershed health index in the SSP1-2.6 has decreased in 50.1% of the watershed area, while in the SSP2-4.5, it was 56.3%, and in the SSP5-8.5, 65.5% of the watershed area.

Conclusion

The results showed that the overall watershed health index in the study area based on the VOR model is "moderate", but with the increase in the amount of greenhouse gas emissions and the increase in temperature, the watershed health index decreases in a larger number of sub-watersheds, as in the SSP1 -2.6, the watershed health index has decreased in 34.6 % of the watershed, while in the SSP2-4.5, 51 % and in the SSP5-8.5 scenario, 65.5 % of the watershed area has been associated with a decrease in health. Overall, the results of the research showed that climate change can affect the watershed health index, and these effects are different in various sub-watersheds.

Keywords: Climate Change, Vigor-Organization-Resilience, Watershed Simulation, Watershed ecological potential

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: m.azari@um.ac.ir

Citation: Nikouei, H., Azari, M., & Dastorani, M.T. (2023). The effect of climate change on the Fariman dam watershed health using VOR model. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(4), 107-121.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11685.1156

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.9.3

Received: 17 October 2022, Received in revised form: 06 November 2022, Accepted: 08 November 2022, Published online: 08 November 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 4, pp. 107-121

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





اثر تغییر اقلیم بر سلامت حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل VOR

حامد نیکوئی^۱، محمود آذری^{۲*}، محمدتقی دستورانی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
^۲ استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
^۳ استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

چکیده

با توجه به این که حوزه‌های آبخیز سامانه‌های پویا هستند، کارکرد هیدرولوژیکی و سلامت آبخیزها تحت تأثیر تغییرات کاربری زمین، تغییر اقلیم و مداخلات انسانی به‌طور مداوم تغییر می‌کند. انتشار گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر، موجب گرم شدن کره زمین و به‌دنبال آن تغییر در رژیم هیدرولوژیکی و کارکرد حوزه‌های آبخیز شده است که این امر می‌تواند سلامت حوزه‌های آبخیز را تهدید کند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی سلامت حوزه آبخیز سد فریمان در استان خراسان رضوی در شرایط حال و تغییر اقلیم تعریف شد. بدین منظور، ابتدا هیدرولوژی حوزه آبخیز با استفاده از مدل SWAT-شبه‌سازی و متغیرهای هیدرولوژیکی زیرحوزه‌های آبخیز با رسوب و رواناب ماهانه تعیین شد. سپس با استفاده از مدل مفهومی بنیه-ساختار-انعطاف‌پذیری (VOR)، سلامت حوزه آبخیز برای دوره آینه (۲۰۳۰ تا ۲۰۵۹ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹) از خروجی‌های مدل‌های اقلیمی CMCC-ESM2، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 برای سه سناریو انتشار استفاده زیرحوزه‌های آبخیز. نتایج نشان داد که سلامت کلی حوزه آبخیز بر اساس مدل VOR در وضعیت "متوسط" قرار گرفته است، اما با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش دما، شاخص سلامت در تعداد بیش‌تری از زیرحوزه‌های آبخیز کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که برای دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۹ در سناریو SSP1-2.6 شاخص سلامت در ۳۴/۶ درصد از سطح حوزه آبخیز کاهش داشته است، در حالی که در سناریو SSP2-4.5، ۵۱ درصد و در سناریو SSP5-8.5، ۶۵/۵ درصد از سطح حوزه آبخیز با کاهش سلامت همراه بوده است. این میزان کاهش در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ برای سه سناریو مطالعاتی به‌ترتیب ۵۰/۱، ۵۶/۳ و ۶۵/۵ به‌دست آمد که نشان‌دهنده بدتر شدن وضعیت سلامت زیرحوزه‌های آبخیز در آینده است.

واژه‌های کلیدی: بنیه-ساختار-انعطاف‌پذیری، تغییر اقلیم، توان بوم‌شناختی آبخیز، شبه‌سازی آبخیز

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.azari@um.ac.ir

استناد: نیکوئی، حامد، آذری، محمود، و دستورانی، محمدتقی (۱۴۰۲). اثر تغییر اقلیم بر سلامت حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل VOR.

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۴)، ۱۰۷-۱۲۱.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11685.1156

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.4.9.3

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۴، صفحه ۱۰۷ تا ۱۲۱

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

امروزه با افزایش آلودگی و تخریب محیط زیست، ارزیابی وضعیت سلامت زیست‌بوم مورد توجه زیادی قرار گرفته و به یک شاخص مهم توسعه پایدار منطقه‌ای تبدیل شده است (Redman, 1999). دستیابی مناسب و اصولی به خدمات زیست‌بوم (بوم‌شناختی)، خصوصیات، عملکردها و یا فرآیندهای بوم‌شناختی که مرتبط با رفاه انسان است، تحت تأثیر عملکرد صحیح زیست‌بوم‌های مختلف قرار دارد (MEA, 2005; Jahandari et al., 2022). به همین جهت، ارزیابی توانمندی یک سامانه در راستای تأمین عملکردهای مورد انتظار در گرو سلامت آن است. سلامت به‌عنوان انحراف از شرایط پایه یا مشاهده تغییرات نسبت به شرایط طبیعی تعریف می‌شود (Wohl et al., 2005). سلامت زیست‌بوم توانایی حفظ ساختار و عملکرد در مواجهه با فشارهای خارجی در طول زمان است (Costanza, 1992). مفهوم سلامت زیست‌بوم، مفهوم جامع و تلفیقی از ابعاد اکولوژی، اقتصاد و جمعیت بسط داده شده است (Ding et al., 2008). سلامت رودخانه‌ها یک توصیف از شرایط حیات آن و همچنین ارزیابی جامع از عملکرد و ارتباط آن با جوامع انسانی است (Xiaoyan et al., 2006). طبق تعریف آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) ایالات متحده، حوزه آبخیز سالم، حوزه آبخیزی است که پوشش گیاهی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حوزه آبخیز در دامنه طبیعی حمایت شود، زیستگاه‌ها با اندازه کافی و اتصالات مناسب با گونه‌های آبرزی و نم‌سار وجود داشته باشد و کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب برای حیات بیولوژیکی آبریزان مناسب باشد. دانش سلامت حوزه آبخیز با یک رویکرد سیستمی به دنبال حفظ زیست‌بوم طبیعی از طریق حفاظت و جلوگیری از تغییر در حوزه‌های آبخیز سالم است. با این حال، با توجه به پیچیدگی‌های زیست‌بوم‌های حوزه آبخیز، تعیین و انتخاب شاخص‌های مناسب برای تعیین سلامت حوزه آبخیز دشوار است (Xu et al., 1999; Suo et al., 2008). ارزیابی سلامت حوزه آبخیز و اولویت‌بندی زیرحوزه‌های آبخیز برای مدیریت مؤثر ضروری است و به مدیریت صحیح و تخصیص بهینه منابع کمک خواهد کرد (Alilou et al., 2019). همچنین می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای برآورد جریان محیط زیستی و کمی‌کردن مقدار، زمان‌بندی و کیفیت جریان آب مورد نیاز در تداوم حیات اکوسیستم‌های رودخانه‌ای استفاده می‌شود (et al., 2017; Khorrooshi).

با توجه به پویایی حوزه‌های آبخیز، کارکرد آن‌ها در طول زمان تحت تأثیر تغییرات حوزه آبخیز مثل کاربری زمین، استفاده

از آب، اقلیم و افزایش جمعیت تغییر می‌کند. در دهه‌های اخیر، انتشار گازهای گلخانه‌ای، توازن انرژی زمین را برهم زده و موجب تغییر اقلیم زمین شده است. این تغییرات که در پی رشد سریع اقتصادی و صنعتی و گذر بسیاری از کشورهای جهان به جامعه صنعتی ایجاد شده است، باعث ایجاد تغییرات محیط زیستی متعدد می‌شود. به‌طوری که طبق گزارشات هیأت بین‌الدول دولتی تغییر اقلیم^۵ (IPCC)، اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش نیابد، تا سال ۲۱۰۰ متوسط دمای زمین ۱/۸ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که پیامد این تغییر به‌صورت بالا آمدن سطح آب دریاها، ذوب شدن یخ‌های قطبی، کاهش پوشش برف و افزایش پدیده‌های شدید اقلیمی، مانند سیل و خشکسالی نمایان خواهد شد (IPCC, 2007). پدیده تغییر اقلیم با تغییر در متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش، منجر به تغییر در سیستم هیدرولوژی حوزه آبخیز و اکوسیستم‌های آن می‌شود. طبق نتایج پژوهش‌های IPCC، پدیده تغییر اقلیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک قاره آسیا از جمله کشور ایران، اثرات منفی را بر روی منابع آب به همراه خواهد داشت (Hijioka et al., 2014). کاهش بارش، افزایش دما و همچنین کاهش منابع آبی از جمله اثراتی است که در مطالعات مختلف به آن اشاره شده است (Fallah-Ghalhari et al., 2019; Sharafati et al., 2020). این تغییرات آب و هوایی می‌تواند اثرات متنوعی بر کارکرد حوزه‌های آبخیز کشور داشته باشد.

برای ارزیابی وضعیت سلامت زیست‌بوم، روش‌های متنوعی مانند چهارچوب فشار- وضعیت- پاسخ^۶ (PSR)، بنیه-ساختار-انعطاف‌پذیری^۷ (VOR)، شاخص سلامت حوزه^۸ (WHI) و پایایی-تاب‌آوری-آسیب‌پذیری^۹ (RRV) ارائه شده است که با استفاده از شاخص‌های متعدد، وضعیت سلامت حوزه آبخیز را تعیین می‌کنند. به‌عنوان نمونه (Suo et al., 2008) برای ارزیابی سلامت اکوسیستم حوزه آبخیز رودخانه Jinhe در چین، سه شاخص بنیه-ساختار-انعطاف‌پذیری (VOR) را با ادغام مشاهدات زمینی و داده‌های سنجش از دور در مقیاس حوزه آبخیز محاسبه کردند. شاخص‌های سلامت ۱۲ زیرحوزه آبخیز توپوگرافی با استفاده از فرمول اصلاح شده Costanza محاسبه شد. در نهایت نتایج نشان داد که زیرآبخیزهای منطقه کوه Huangtu، دارای اکوسیستم نسبتاً سالم با امتیاز بیش از ۰/۶۷۳ بود. Ding et al. (2008) در پژوهشی با هدف ارزیابی سلامت منطقه Inner Mongolia واقع در چین، کاربرد مدل فشار-حالت-پاسخ (PSR)

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁶ Pressure-State-Response

⁷ Vigor-Organization-Resilience

⁸ Watershed health index

⁹ Reliability-Resilience-Vulnerability

¹ Ecosystem Health

² Ecosystem Services (ES)

³ Ecological Process

⁴ Environmental Protection Agency

پربابی، به ارزیابی سلامت حوزه آبخیز مطالعاتی در چهار مقطع زمانی مختلف با استفاده از مدل مفهومی RRV پرداختند. نتایج نهایی این پژوهش نشان‌دهنده وضعیت متوسط و نسبتاً سالم شاخص سلامت کل حوزه آبخیز شازند به ترتیب برای معیارهای دبی مشخصه کم‌آبی و پربابی بود. در پژوهشی دیگر، Hazbavi et al. (2020) با استفاده از اصول حاکم بر مدل PSR و با تحلیل ۲۷ معیار مرتبط با ابعاد مختلف هیدرولوژیکی، انسانی و اقلیمی، وضعیت و تغییرات مکانی سلامت حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی واقع در استان اردبیل را در سطح ۳۶ زیرآبخیز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میانگین شاخص ارزیابی جامع سلامت حوزه آبخیز کوزه‌تپراقی برابر با ۰/۴۱ به دست آمد.

با توجه به مطالعات انجام شده و توجه کم‌تر به اثر تغییرات آب و هوایی بر سلامت اکوسیستم حوزه‌های آبخیز، پژوهش حاضر با هدف تعیین سلامت حوزه و زیرحوزه‌های آبخیز سد فریمان در استان خراسان رضوی در شرایط حال و تغییر اقلیم با استفاده از مدل مفهومی VOR، برنامه‌ریزی شده است. بدین منظور از مدل SWAT برای شبیه‌سازی هیدرولوژی و از خروجی سه مدل اقلیمی برای پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم در آینده استفاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سد فریمان به وسعت ۲۷۸/۸ کیلومتر مربع در محدوده عرض جغرافیایی $35^{\circ} 33' 1''$ تا $35^{\circ} 41' 10''$ و طول جغرافیایی $54^{\circ} 33' 54''$ تا $59^{\circ} 44' 11''$ در استان خراسان رضوی و ۱۵ کیلومتری شهر فریمان واقع شده است. شیب متوسط حوزه آبخیز سد فریمان ۱۶/۹ درصد، طول آبراهه اصلی ۵۵/۲۳ کیلومتر و ارتفاع متوسط حوزه آبخیز از سطح دریا برابر با ۲۱۱۹ متر است (Naseri et al., 2018). واحد اصلی زمین‌شناسی حوزه آبخیز شامل سازندهای نتورن است که در فرسایش خاک و تولید رسوب حوزه آبخیز مؤثر است. به علت شیب زیاد حوزه آبخیز، خاک سطحی کم‌عمق دامنه‌ها و وجود دیم‌زارهای مرتعی رها شده از موارد دیگری است که در وضعیت هیدرولوژیکی و رسوب حوزه آبخیز مؤثر است (Naseri et al., 2018). در مجموع، ۶۵ درصد حوزه آبخیز سد فریمان از مراتع با تراکم کم و نیمه‌متراکم و ۳۰ درصد این حوزه آبخیز نیز از زراعت دیم تشکیل شده و مابقی آن را زراعت آبی و مناطق مسکونی تشکیل داده است. شکل ۱ نقشه موقعیت حوزه آبخیز سد فریمان را نشان می‌دهد.

۲-۲- روش کار

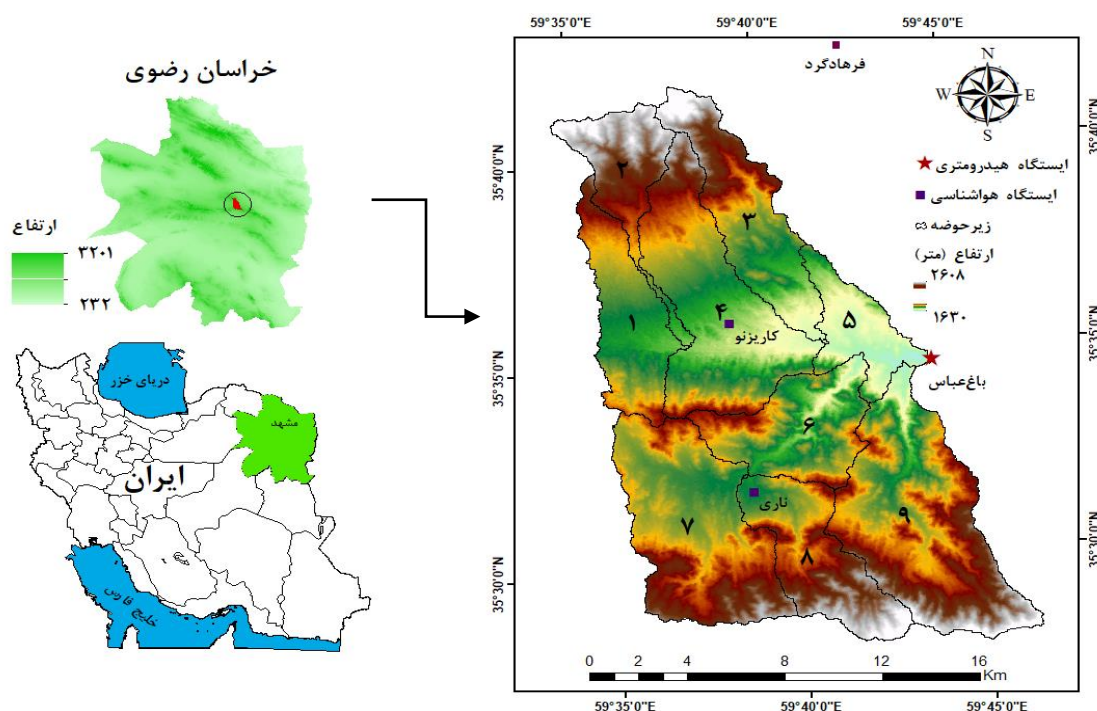
را در مقیاس حوزه آبخیز مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از کاربرد مدل اصلاح شده PSR در منطقه مطالعاتی مذکور نشان داد که به‌طور کلی تنها ۱۸ درصد از کل منطقه در قسمت‌های شمال شرقی در وضعیت سالم قرار گرفته است. Costanza (2012) با بررسی سلامت زیست‌بوم و مهندسی محیط زیست به‌صورت جامع و چندمقیاسی، سه شاخص بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری را به‌شکل یک نمودار سه بعدی با سطوح شکننده، متبلور و غنی از مواد معدنی نشان داد و به این نتیجه رسید که یک سامانه سالم بایستی ترکیبی متعادل هر سه مشخصه بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری را داشته باشد. Hazbavi and Sadeghi (2017) با استفاده از مدل RRV و چهار معیار شاخص خشکسالی، دبی کم‌آبی، دبی پربابی و غلظت رسوب معلق، سلامت حوزه آبخیز شازند در استان مرکزی، ایران را برای دوره آماری ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۴ بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها دلالت بر روند کاهشی سلامت حوزه آبخیز شازند در طول دوره مورد مطالعه داشته است. Sadeghi and Hazbavi (2017) با هدف تحلیل متغیرهای زمانی و مکانی شاخص‌های پایایی، تاب‌آوری و آسیب‌پذیری در سال‌های ۱۹۸۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴، شاخص خشکسالی (SPI) را برای ۲۴ زیرحوزه آبخیز شازند محاسبه کردند. نتایج مطالعه آن‌ها، دلالت بر تغییرات مکانی و زمانی شاخص سلامت حوزه در منطقه مطالعاتی داشت و نشان داد که تمامی زیرحوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در هر چهار سال مذکور در شرایط ناسالم و بسیار ناسالم قرار گرفتند. Xiao et al. (2019) نیز با استفاده از مدل VOR به بررسی روند تغییر سلامت اکوسیستم شانگهای و خلیج هانگزو پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در دو دوره ۲۰۰۷-۲۰۱۱ و ۲۰۱۳-۲۰۰۷ وضعیت سلامت اکوسیستم منطقه رو به زوال است و این کاهش از شهرهای مرکزی (شانگهای و جیاکسینگ) به مناطق اطراف گسترش می‌یابد. Hazbavi et al. (2020) برای ارزیابی سلامت حوزه آبخیز شازند با مدل PSR، ۱۷ معیار اقلیمی، انسانی و هیدرولوژیکی را برای سال‌های ۱۹۸۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص سلامت حوزه مورد مطالعه در طول دوره‌های ۱۹۸۶-۱۹۹۸ و ۱۹۸۶-۲۰۰۸، حدود ۱۲ درصد کاهش یافته است. در ایران (Jafari et al. (2017) با هدف ارزیابی مؤلفه‌های مؤثر بر سلامت زیست‌بوم به‌صورت جامع در حوزه آبخیز ایریل استان اردبیل، مقادیر سه مؤلفه بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری (VOR) را به‌صورت کمی محاسبه کردند. نتایج حاکی از این بود که مؤلفه انعطاف‌پذیری دارای بالاترین تغییرات در زیرحوزه‌های آبخیز منطقه مورد مطالعه بوده است. همچنین Sadeghi et al. (2019) با تهیه داده‌های طولانی مدت دبی جریان حوزه آبخیز شازند واقع در استان مرکزی و تعیین آستانه‌های دبی کم‌آبی و

کاربری اراضی، نقشه خاک و پارامترهای آن شامل گروه هیدرولوژیکی خاک، عمق خاک، وزن مخصوص خاک، ظرفیت آب در دسترس برای گیاه، هدایت هیدرولیکی، نسبت کربن آلی، درصد رس، سیلت و شن است. در این پژوهش مدل رقومی ارتفاع از وبگاه سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، نقشه و پارامترهای خاک از گزارشات خاک‌شناسی اداره کل منابع طبیعی استان خراسان رضوی و نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز با تحلیل تصاویر ماهواره‌ای Landsat5 سال ۲۰۱۰ تهیه شد. به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل، از داده‌های دبی جریان و رسوب ایستگاه هیدرومتری باغ‌عباس در خروجی حوزه آبخیز استفاده شد. بدین‌منظور داده‌های هواشناسی شامل بارش روزانه ایستگاه‌های باغ‌عباس، فرهادگرد، کاریزنو، ناری و بکاول و دمای حداقل و حداکثر روزانه ایستگاه‌های تبخیرسنجی فرهادگرد و بکاول از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی گرفته شد (جدول ۱). سپس برای شبیه‌سازی نیز با بررسی کیفیت و کمیت داده‌های موجود، دوره آماری ۲۰ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ انتخاب شد.

در این پژوهش برای تعیین سلامت حوزه آبخیز در دوره حال و آینده، از مدل VOR استفاده شد. در این چهارچوب از شاخص‌های چشم‌انداز، فرسایش خاک و هدررفت آب برای تعیین مؤلفه‌های بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری حوزه آبخیز استفاده شده است. شاخص‌های چشم‌انداز با استفاده از نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز و نرم‌افزار FRAGSTATS 4.2.1 و شاخص‌های مرتبط با رسوب و رواناب با استفاده از شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه آبخیز با مدل SWAT تعیین شد و اثر تغییر اقلیم با اجرای مدل با داده‌های بارش و دمای مدل‌های اقلیمی گزارش ششم IPCC شامل CMCC-ESM2، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی شد.

۲-۱- شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه آبخیز با مدل SWAT

برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه آبخیز با مدل SWAT نیاز به داده‌های مکانی برای تعریف حوزه آبخیز (Watershed Delineation Data) و داده‌های هواشناسی است. برای تعریف حوزه آبخیز و معرفی وضعیت هیدرولوژیکی آن نیاز به نقشه مدل ارتفاع رقومی (Digital Elevation Model) (برای تعیین و تعریف مرز زیرحوضه‌های آبخیز و همچنین شبکه آبراهه‌ها)،



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد فریمان در استان خراسان رضوی و ایران

Figure 1- Location of the Fariman dam watershed in Khorasan Razavi province and Iran

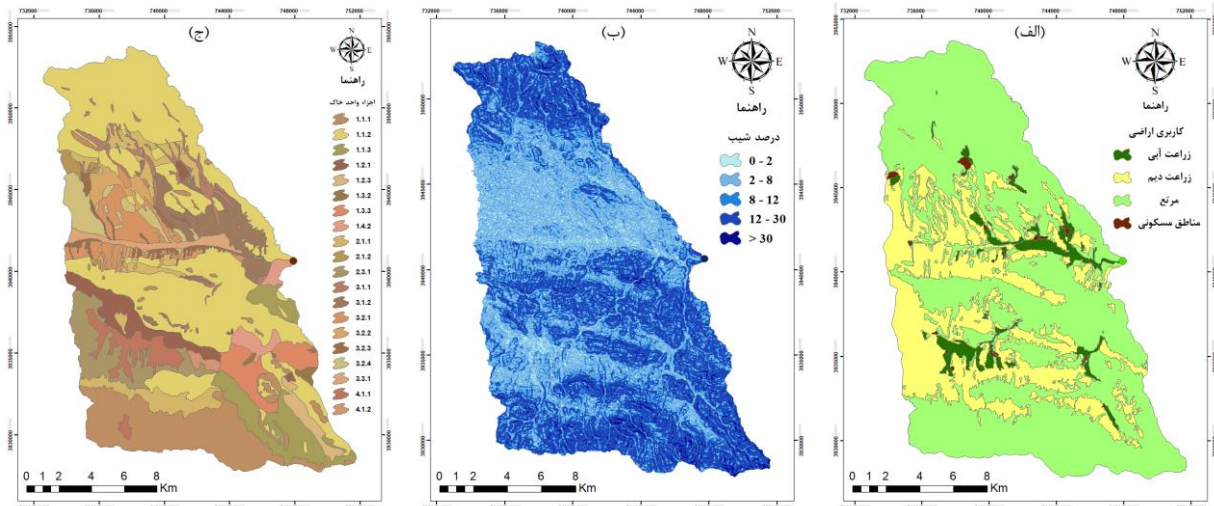
جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

Table 1- Characteristics of the hydrometeorological stations used in the present research

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	نوع ایستگاه
باغ عباس	59° 44' 03"	35° 34' 40"	1646	هیدرومتری
ناری	59° 38' 59"	35° 31' 46"	1861	باران سنجی
کارینو	59° 38' 45"	35° 35' 54"	1798	باران سنجی
فرهادگرد	59° 43' 54"	35° 46' 66"	1503	تبخیرسنجی
بکاول	59° 09' 08"	35° 29' 31"	1849	تبخیرسنجی

تفکیک شد. در مرحله بعد، به منظور تعیین واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز، نقشه شیب در پنج طبقه (۲-۸، ۸-۱۲، ۱۲-۳۰ و بزرگ‌تر از ۳۰)، نقشه خاک با ۲۰ واحد، نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز در چهار طبقه زراعت آبی، زراعت دیم، مرتع و مناطق مسکونی به مدل معرفی شد (شکل ۲).

با توجه به روند اجرای مدل SWAT، در ابتدا مدل ارتفاع رومی به افزونه Arc SWAT 2012 در نرم‌افزار ArcMap 10.7.1 معرفی شده تا زیرحوزه‌های آبخیز و آبراهه‌های حوزه آبخیز تعیین شود. با تعیین محل ایستگاه هیدرومتری باغ‌عباس به‌عنوان خروجی، حوزه آبخیز مورد مطالعه به نه زیرحوزه آبخیز،



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی (الف)، شیب (ب) و اجزاء واحد خاک (ج) حوزه آبخیز سد فریمان

Figure 2- Land use map (a), slope map (b), and soil unit components map (c) of the Fariman dam watershed

۲-۲-۲- ارزیابی اثر تغییر اقلیم

در پژوهش حاضر از خروجی‌های مدل‌ها و سناریوهای گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم (CMIP6) استفاده شد. بدین منظور و به دلیل برتری مدل‌های ESM نسبت به مدل‌های GCM که چرخه‌های بیوشیمیایی از قبیل چرخه کربن، گوگرد و ازن نیز در آن‌ها گنجانده شده است (Flato et al., 2014)، از خروجی‌های داده روزانه بارش، دمای کمینه و بیشینه سه مدل CMCC-ESM2، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 از طریق سایت ESGF^۲ (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>) دریافت شد. داده‌های مربوط به سال ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره تاریخی و از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ به‌عنوان داده‌های آینده تحت سناریوهای اصلی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 که

به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل، تحلیل حساسیت^۱ پارامترها با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 انجام شد (Yang et al., Ghafari and Gorji, 2021; Abbaspour et al., 2009 2008; Arnold et al., 2012; Abbaspour et al., 2015)، تعداد ۳۰ پارامتر برای دبی و ۱۴ پارامتر برای رسوب به نرم‌افزار معرفی و تحلیل حساسیت به روش کلی انجام گرفت. به این ترتیب دوره ۲۰۰۸-۲۰۱۴ به‌عنوان واسنجی و دوره ۲۰۱۶-۲۰۱۹ به‌عنوان اعتبارسنجی مدل انتخاب شد.

^۲ Earth System Grid Federation

^۱ Sensitivity Analysis

معیار بنیه که نشان‌دهنده توان تولیدی اکوسیستم است، با شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی^۲ (NDVI)، مقدار رسوب^۳ (SM) و عمق رواناب^۴ (DR) تعیین می‌شود (رابطه ۱). ساختار زیست‌بوم، تنوع گونه‌ای و ارتباطات و تعاملات بین گونه‌های (اجزای) یک زیست‌بوم را نشان می‌دهد (Costanza, 1992) و تحت تأثیر تنوع گونه‌ای و همچنین تعداد مسیرها و الگوهای چرخه مواد و تبادل اطلاعات بین اجزای مختلف قرار می‌گیرد (Mageau et al., 1998). در این بخش شاخص‌های تنوع چشم‌انداز^۵ (LDI)، یکنواختی رسوب^۶ (US) و یکنواختی رواناب^۷ (UR) مورد استفاده قرار گرفته است (رابطه ۲). سومین معیار از مدل مفهومی VOR نیز انعطاف‌پذیری حوزه آبخیز است که به توانایی زیست‌بوم برای حفظ ساختار خود بعد از تنش (Holling, 1986) و یا برگشت به حالت قبل از تنش اطلاق می‌شود (Hazbavi et al., 2020). در این قسمت شاخص‌های غنای چشم‌انداز^۸ (LRI)، تغییرات رسوب^۹ (VS) و تغییرات رواناب^{۱۰} (VR) به‌عنوان معیارهای اصلی استفاده شده است (رابطه ۳). در این پژوهش برای شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی، از محصول NDVI سنجنده مودیس استفاده شده و دو شاخص تنوع و غنای سیمای سرزمین بر اساس نقشه کاربری زمین در محیط نرم‌افزار FRAGSTATS 4.2.1 تعیین شد (Hazbavi et al., 2020). متغیرهای مربوط به فرسایش خاک و هدررفت آب نیز از خروجی‌های مدل SWAT برای دوره‌های مطالعاتی استفاده شد. پس از تعیین این مقادیر و محاسبه شاخص سلامت حوزه آبخیز، وضعیت سلامت حوزه آبخیز در پنج طبقه سالم (۱-۰/۸۱)، نسبتاً سالم (۰/۸-۰/۶۱)، متوسط (۰/۶-۰/۴۱)، نسبتاً ناسالم (۰/۴-۰/۲۱) و ناسالم (۰-۰/۲۰) طبقه‌بندی شد.

$$V_i = \frac{1}{3} \left(\frac{NDVI_i}{NDVI_{max}} + \frac{SM_{min}}{SM_i} + \frac{DR_i}{DR_{max}} \right) \quad V_i \in [0,1] \quad (1)$$

$$O_i = \frac{1}{3} \left(\frac{LDI_i}{LDI_{max}} + \frac{US_{min}}{US_i} + \frac{UR_{min}}{UR_i} \right) \quad O_i \in [0,1] \quad (2)$$

$$R_i = \frac{1}{3} \left(\frac{LRI_i}{LRI_{max}} + \frac{VR_{min}}{VR_i} + \frac{VS_{min}}{VS_i} \right) \quad R_i \in [0,1] \quad (3)$$

² Normalized Difference Vegetation Index

³ Sediment Modulus

⁴ Depth of Runoff

⁵ Landscape Diversity Index

⁶ Uniform of Sediment

⁷ Uniform of Runoff

⁸ Landscape Richness Index

⁹ Variation of Sediment

¹⁰ Variation of Runoff

به‌ترتیب سناریوهای خوشبینانه، میانی و بدبینانه هستند، استخراج شدند. پس از دریافت داده‌های روزانه بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه، به‌منظور اصلاح آریبی و مقیاس‌کاهی، از نرم‌افزار CMhyd^۱ استفاده شد (Rathjens et al., 2016). این نرم‌افزار به‌دلیل برخورداری از هشت روش گوناگون مقیاس‌کاهی و همچنین اجرای سریع روش‌های منتخب می‌تواند به‌عنوان مدلی کارا برای مقیاس‌کاهی برون‌داد مدل‌های سری CMIP6 به‌کار رود (Babaian et al., 2021). در این مرحله از روش LinearScaling برای مقیاس‌کاهی داده‌های بارش و دما استفاده شد. ورودی این نرم‌افزار نیز دارای سه نوع داده است که عبارتند از: داده‌های مشاهده‌ای، داده‌های دوره تاریخی و داده‌های سناریوی آینده مدل‌های اقلیمی. در ادامه پس از مقیاس‌کاهی با استفاده از نرم‌افزار CMhyd، داده‌های دوره گذشته هر سه مدل اقلیمی با سناریوهای مربوطه ادغام شد و مدل SWAT به تعداد ۹ بار (سه مدل و سه سناریو) برای سه دوره زمانی اصلی ۳۰ ساله شامل یک دوره تاریخی از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ و دو دوره آینده شامل سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۹ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ اجرا و نتایج برای مراحل بعدی استخراج شد.

۳-۲-۲- ارزیابی سلامت حوزه آبخیز با مدل VOR

در این پژوهش با بررسی منابع و دسترسی به داده‌های لازم، برای تعیین سلامت حوزه آبخیز در شرایط حال و تحت تأثیر تغییر اقلیم، از روش VOR و چارچوب ارائه شده توسط Suo et al. (2008) برای ارزیابی سلامت حوزه آبخیز سد فریمان استفاده شد (جدول ۲). در این چارچوب از مؤلفه‌های وضعیت چشم‌انداز، افت خاک و هدررفت آب حوزه آبخیز برای تعیین شاخص‌های بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری استفاده می‌شود و در نهایت با محاسبه میانگین هندسی این شاخص‌ها، وضعیت کلی سلامت حوزه آبخیز محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول ۲- پارامترهای ارزیابی سلامت حوزه آبخیز
Table 2- Watershed health assessment parameters

متغیر	شاخص
شاخص پوشش گیاهی (NDVI)	بنیه
مقدار رسوب (SM)	
عمق رواناب (DR)	
تنوع سیمای سرزمین (LDI)	ساختار
یکنواختی رسوب (US)	
یکنواختی رواناب (UR)	
غنای سیمای سرزمین (LRI)	انعطاف‌پذیری
تغییرات رسوب (VS)	
تغییرات رواناب (VR)	

¹ Climate Model data for hydrologic modeling

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT پس از چندین مرحله آزمون و خطا و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر دبی و رسوب بر اساس مقدار P-Value، مشخص شد که شش پارامتر برای دبی و سه پارامتر برای رسوب دارای حساسیت بیش‌تری هستند که از آن‌ها در واسنجی مدل استفاده شد (جدول ۳). در این بین پارامترهای CH_K1، CANMX و

CN2، بیش‌ترین حساسیت برای دبی جریان و پارامتر USLE_K بالاترین حساسیت را برای رسوب داشته‌اند. این پارامترها در پژوهش‌های (Duan et al. (2009)، (Naseri et al. (2017) و Briak به‌عنوان پارامترهای حساس شناخته شده‌اند.

جدول ۳- پارامترهای منتخب دبی و رسوب و مقدار آن‌ها

Table 3- Selected flow and sediment parameters and their values

علامت اختصاری پارامتر	مقدار بهینه	حداقل	حداکثر
r_CN2.mgt	0.0784	0	0.11
v_RCHRG_DP.gw	0.0976	0	0.4
v_CH_K1.sub	165.111	135	175
v_ALPHA_BNK.rte	0.9493	-0.1	1
v_CANMX.hru	4.5366	4	50
r_SOL_BD(..).sol	-0.2576	-0.4	-0.2
v_ADJ_PKR.bsn	1.0485	1	1.3
r_USLE_P.mgt	-0.1538	-0.16	-0.08
r_USLE_K(..).sol	-0.1141	-0.16	0.008

تعیین (R^2) با محدوده معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SWAT ارائه شده در پژوهش (Moriassi et al. (2015)، بیان‌گر دقت قابل قبول و رضایت‌بخش مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب است.

پس از تحلیل حساسیت و واسنجی کردن مدل SWAT، ضریب نش-ساتکلیف در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۶۵ برای داده‌های دبی و رسوب ماهانه به دست آمد. این مقادیر برای دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۵۶ برای دبی و رسوب حاصل شد (جدول ۴). مقایسه مقادیر ضریب NSE و ضریب

جدول ۴- معیارهای ارزیابی مدل برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 4- Model evaluation criteria for calibration and validation period

متغیر	دوره	دوره آماری	NS	R^2	PBIAS	RSR
دبی	واسنجی	2008-2014	0.66	0.67	-7.2	0.58
	اعتبارسنجی	2016-2019	0.57	0.63	16.1	0.66
رسوب	واسنجی	2008-2014	0.65	0.73	38.2	0.59
	اعتبارسنجی	2016-2019	0.56	0.69	45.3	0.67

۳-۲- نتایج ارزیابی سلامت حوزه آبخیز با مدل VOR

در پژوهش حاضر با استفاده از مدل VOR، سلامت زیرحوزه‌های آبخیز سد فریمان برای دوره تاریخی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ و دو دوره آینده شامل سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۹ و ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تعیین شد. از میان شاخص‌های مورد بررسی، مقادیر شاخص‌های چشم‌انداز شامل NDVI، تنوع چشم‌انداز (LDI) و غنای چشم‌انداز (LRI) برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به عدم امکان پیش‌بینی قابل قبول تغییرات کاربری زمین و عدم قطعیت زیاد نتایج، شاخص‌های چشم‌انداز برای آینده ثابت فرض شد و تنها اثر تغییر متغیرهای اقلیمی بر سلامت حوزه آبخیز مورد بررسی قرار گرفت.

در جدول ۶ شاخص‌های بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری و همچنین شاخص سلامت زیرحوزه‌های آبخیز با مدل‌های اقلیمی مطالعاتی در دوره تاریخی ارائه شده است. نتایج شاخص سلامت زیرحوزه‌های آبخیز نشان می‌دهد که شاخص سلامت از مقدار ۰/۴۴۲ در زیرحوزه آبخیز ۶ در مدل GFDL-ESM5 تا مقدار ۰/۸۵۷ برای زیرحوزه آبخیز ۷ در مدل اقلیمی CMCC-ESM3 متفاوت است. میانگین شاخص سلامت حوزه آبخیز برای مدل‌های MRI-ESM2-0، GFDL-ESM4 و CMCC-ESM2 به ترتیب ۰/۵۴۵، ۰/۵۳۳ و ۰/۶۶۵ است و نتایج دو مدل اقلیمی MRI-ESM2-0، GFDL-ESM4 نیز اختلاف زیادی با هم ندارند. همچنین، طبق پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی هیچ‌کدام از

زیرحوزه‌های آبخیز ۲، ۸ و ۹ به میزان ۱/۶، ۳/۶ و ۰/۶ درصد (میانگین ۶/۷ درصد) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) کاهش یافته است. کاهش شاخص سلامت در سناریوی SSP2-4.5 در چهار زیرحوزه آبخیز و در سناریوی SSP5-8.5 در شش زیرحوزه آبخیز اتفاق افتاده است. میانگین کاهش در سناریوی SSP2-4.5، ۹/۳ درصد و در سناریوی SSP5-8.5، ۱۰/۶ درصد است. شاخص سلامت زیرحوزه‌های آبخیز ۲ و ۹ در هر سه سناریو روند کاهشی داشته است و زیرحوزه آبخیز ۵ فقط در سناریو بدبینانه SSP5-8.5 با درصد تغییر ۱۰/۷ کاهش داشته است. همچنین شاخص سلامت در زیرحوزه‌های آبخیز ۱، ۳ و ۷ در هر سه سناریو افزایش داشته‌اند. در مجموع شواهد نشان می‌دهد که با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش دما، شاخص سلامت در تعداد بیش‌تر از زیرحوزه‌های آبخیز کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در سناریو SSP1-2.6، شاخص سلامت در ۳۴/۶ درصد از سطح حوزه آبخیز کاهش داشته است، در حالی که در سناریو SSP2-4.5، ۵۱ درصد و در سناریو SSP5-8.5، ۶۵/۵ درصد از سطح حوزه آبخیز با کاهش سلامت همراه بوده است. پژوهش‌های (Singh et al., Ross and Randhir (2022)، (Ray et al. (2022) و (2022) نیز به اثر تغییر اقلیم بر کاهش شاخص سلامت حوزه آبخیز اشاره شده است.

زیرحوزه‌های آبخیز در بازه زمانی ۱۹۸۵-۲۰۱۴ در وضعیت ناسالم قرار ندارند و بر اساس مدل CMCC-ESM2، کل حوزه آبخیز در طبقه نسبتاً سالم قرار دارد. این درحالی است که طبق نتایج دو مدل MRI-ESM2-0 و GFDL-ESM4 در این دوره، تنها زیرحوزه آبخیز ۲ که در شمال غرب و بالادست حوزه آبخیز سد فریمان قرار دارد، به دلیل مقادیر کم‌تر رواناب و رسوب نسبت به دیگر زیرحوزه‌های آبخیز، در شرایط نسبتاً سالم قرار داشته و مابقی زیرحوزه‌های آبخیز در طبقه متوسط قرار گرفته‌اند. طبیعی است که سلامت کل حوزه آبخیز نیز بر اساس این دو مدل اقلیمی و با تأثیرپذیری از شرایط عمومی اغلب زیرحوزه‌های آبخیز، در وضعیت متوسط قرار داشته باشد. در مجموع، نتایج شاخص سلامت در دوره گذشته نشان داد که وضعیت کلی سلامت حوزه آبخیز سد فریمان در طبقه "متوسط" قرار دارد. در جدول‌های ۷ و ۸ میزان تغییر شاخص سلامت حوزه آبخیز در دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۵۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره تاریخی ارائه شده است. همچنین در شکل ۳ میزان تغییرات سلامت زیرحوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در دو دوره آینده نسبت به دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که در سناریوی SSP1-2.6 در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۹، شاخص سلامت در سه

جدول ۵- شاخص‌های چشم‌انداز حوزه آبخیز سد فریمان

Table 5- Landscape indicators of the Fariman dam watershed

شاخص غنای چشم‌انداز (LRI)	شاخص تنوع چشم‌انداز (LDI) - شاخص شانون	شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI)	زیرحوزه
4	0.7759	0.1052	1
3	0.3228	0.1063	2
4	0.4382	0.1104	3
4	0.8987	0.1270	4
4	1.0187	0.1489	5
4	0.7169	0.1011	6
4	0.8951	0.1265	7
4	0.7185	0.1190	8
4	0.6459	0.1166	9

جدول ۶- ارزیابی کلی سلامت حوزه آبخیز برای مدل‌های اقلیمی در دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴

Table 6- General assessment of watershed health for climate models in the period of 1985-2014

مدل زیرحوزه	MRI-ESM2-1				GFDL-ESM5				CMCC-ESM3			
	WHI	Ri	Oi	Vi	WHI	Ri	Oi	Vi	WHI	Ri	Oi	Vi
1	0.545	0.673	0.590	0.407	0.531	0.629	0.550	0.433	0.735	0.815	0.721	0.675
2	0.730	0.819	0.688	0.691	0.734	0.850	0.694	0.670	0.546	0.604	0.463	0.583
3	0.474	0.591	0.404	0.446	0.477	0.600	0.404	0.448	0.619	0.715	0.525	0.631
4	0.514	0.526	0.486	0.532	0.492	0.525	0.480	0.473	0.603	0.612	0.573	0.624
5	0.587	0.626	0.632	0.511	0.552	0.607	0.600	0.463	0.725	0.755	0.762	0.663
6	0.456	0.457	0.365	0.569	0.442	0.445	0.343	0.566	0.542	0.567	0.456	0.615
7	0.574	0.610	0.569	0.545	0.524	0.553	0.511	0.510	0.857	0.893	0.863	0.816
8	0.543	0.665	0.574	0.419	0.541	0.674	0.578	0.406	0.792	0.958	0.810	0.640
9	0.479	0.539	0.427	0.477	0.506	0.631	0.492	0.417	0.570	0.644	0.534	0.539

جدول ۷- درصد تغییر شاخص سلامت حوزه آبخیز در دوره ۲۰۳۰-۲۰۵۹ نسبت به دوره تاریخی

Table 7- Percentage change of watershed health index in the period 2030-2059 compared to the historical period

درصد تغییر در شاخص سلامت			شاخص سلامت			دوره تاریخی	زیرحوزه
SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP1-2.6		
10.0	3.1	7.8	0.664	0.622	0.651	0.603	1
-21.5	-25.7	-16.1	0.526	0.498	0.562	0.670	2
9.9	12.3	31.6	0.575	0.587	0.688	0.523	3
-1.6	-0.6	3.2	0.528	0.533	0.553	0.536	4
-10.7	0.5	4.8	0.555	0.624	0.651	0.621	5
-8.2	-3.4	3.5	0.440	0.463	0.497	0.480	6
5.9	20.3	9.4	0.690	0.784	0.713	0.652	7
-4.6	0.5	-3.6	0.597	0.629	0.603	0.625	8
-17.2	-7.6	-0.6	0.429	0.479	0.515	0.518	9

جدول ۸- درصد تغییر شاخص سلامت حوزه آبخیز در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره تاریخی

Table 8- Percentage change of watershed health index in the period 2070-2099 compared to the historical period

درصد تغییر در شاخص سلامت			شاخص سلامت			دوره تاریخی	زیرحوزه
SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP1-2.6		
14.1	3.2	4.5	0.689	0.623	0.631	0.603	1
-26.4	-4.7	-34.3	0.493	0.639	0.440	0.670	2
7.4	23.8	-5.6	0.562	0.648	0.494	0.523	3
-4.9	1.5	1.3	0.510	0.545	0.543	0.536	4
-2.4	-1.8	-2.9	0.607	0.610	0.604	0.621	5
-1.7	0.2	-1.7	0.472	0.481	0.472	0.480	6
18.0	-3.0	31.0	0.769	0.632	0.854	0.652	7
-0.6	-10.5	8.1	0.622	0.560	0.676	0.625	8
-9.4	-5.7	-11.4	0.470	0.489	0.459	0.518	9

کاهش شاخص سلامت حوزه آبخیز بر وسعت بیش تر نسبت به دوره قبل مشاهده می شود.

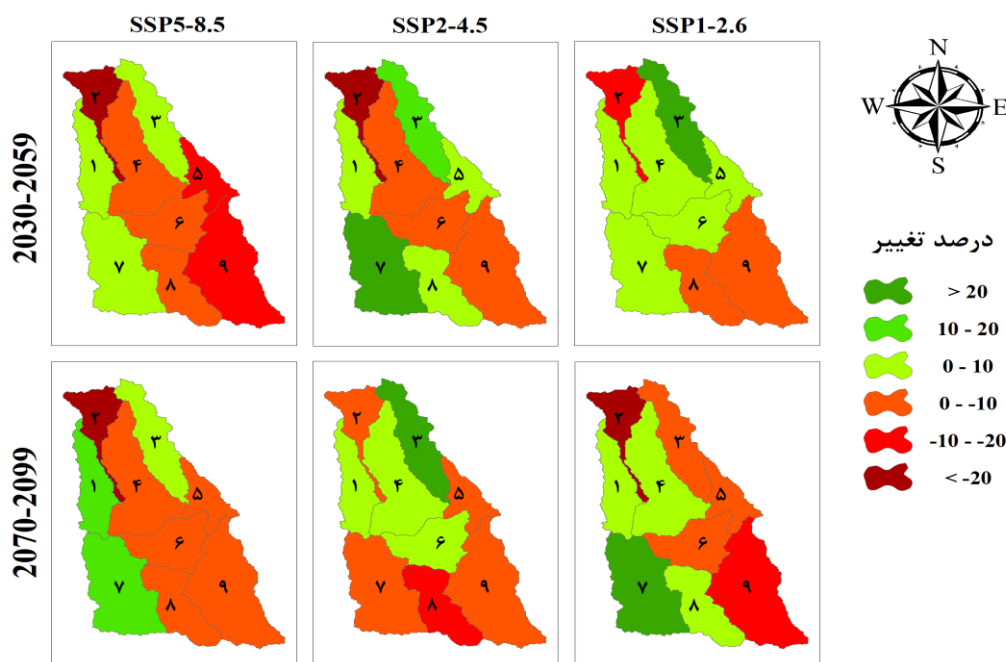
در مجموع، بخش های میانی و پایین دست حوزه آبخیز در همه دوره های مطالعاتی در وضعیت وخیم تری از نظر سلامت قرار دارند. زیرحوزه ۲ به دلیل پایین بودن شاخص های چشم انداز و هم چنین افزایش مقادیر رواناب و رسوب در دو دوره آتی نسبت به گذشته، زیرحوزه ۶ به دلیل دارا بودن کمترین مقدار شاخص NDVI (جدول ۵) و همچنین بالا بودن مقادیر فرسایش خاک و ایجاد رسوب در زیرحوزه های آبخیز ۴، ۶ و ۹، بیشترین تأثیر را در سلامت ضعیف تر این زیرحوزه های آبخیز داشته است. در مطالعه Ding et al. (2008) در منطقه Inner Mongolia چین نیز عنوان شده است که بخش های میانی و جنوب غربی حوزه آبخیز مطالعاتی به دلیل بیابانی بودن، به طور جدی در معرض خطر قرار دارند. نتایج پژوهش Ahn and Kim (2019) در حوزه آبخیز رودخانه هان در کره جنوبی هم دلالت بر این موضوع داشت که سلامت زیرحوزه های آبخیز پایین دست به دلیل شرایط

از طرف دیگر، نتایج ارائه شده در جدول ۸ برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۰ نشان می دهد که در سناریوی SSP1-2.6، شاخص سلامت در زیرحوزه های آبخیز ۲، ۳، ۵، ۶ و ۹ با میانگین ۱۱/۲ درصد، در سناریوی SSP2-4.5، زیرحوزه های آبخیز ۲، ۵، ۷، ۸ و ۹ با میانگین ۵/۱ درصد و در سناریوی SSP5-8.5، زیرحوزه های آبخیز ۲، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۹ با میانگین ۷/۵ درصد دارای روند نزولی بیش تر نسبت به دوره تاریخی بوده است. زیرحوزه های آبخیز ۲، ۵ و ۹ در هر سه سناریو روند کاهشی داشتند و زیرحوزه های آبخیز ۳، ۴ و ۷ (به ترتیب) فقط در سناریوهای SSP1-2.6، SSP5-8.5 و SSP2-4.5 کاهش داشته اند. همچنین نتایج دلالت بر این دارد که در سناریو SSP1-2.6 در ۵۰/۱ درصد از سطح حوزه آبخیز، شاخص سلامت کاهش داشته است، در حالی که در سناریو SSP2-4.5، ۵۶/۳ درصد و در سناریو SSP5-8.5، ۶۵/۵ درصد از سطح حوزه آبخیز کاهش سلامت داشته است که همه این نتایج نشان دهنده این است که تأثیر تغییر اقلیم بر

گونه‌های یک زیست‌بوم یا حوزه آبخیز است؛ بنابراین، می‌توان گفت که از لحاظ مدل VOR، وضعیت حوزه آبخیز مطالعاتی از نظر تنوع گونه‌ای در شرایط مطلوبی قرار ندارد. از طرفی مشاهده می‌شود که با بدتر شدن سناریوها در دو دوره آینده، در مجموع از توان تولیدی حوزه آبخیز نیز کاسته می‌شود اما شاخص انعطاف‌پذیری در یک محدوده ثابت باقی می‌ماند. این در حالی است که ساختار زیرحوزه‌های آبخیز سد فریمان در آینده دور یعنی طی سال‌های ۲۰۷۰ تا ۲۰۹۹ با بدتر شدن سناریوها، وضعیت نسبی بهتری به خود می‌بیند که علاوه بر کاهش میزان و شدت بارش تخمینی حاصل از سناریوهای بدبینانه داده‌های گزارش ششم ارزیابی تغییر اقلیم و در نتیجه کاهش اختلاف میزان رسوب و رواناب سناریوها در این دوره نسبت به دوره ۲۰۵۹-۲۰۳۰، پیش‌بینی می‌شود که ثابت در نظر گرفتن شاخص شانون سیمای سرزمین نیز در این امر بسیار نقش داشته است.

هیدرولوژی رودخانه و کیفیت آب، با سرعت بیش‌تر رو به کاهش بوده است.

هم‌چنین با استفاده از مقادیر شاخص‌های چشم‌انداز در جدول ۵ و مقادیر رواناب و رسوب حاصل از مدل‌سازی حوزه آبخیز با مدل SWAT مشخص شد که از میان شاخص‌های مدل مفهومی VOR، متوسط شاخص انعطاف‌پذیری به‌دست آمده از هر سه مدل اقلیمی مطالعاتی در دوره‌های مختلف زمانی و تحت هر سه سناریو در وضعیت مناسب‌تری نسبت به دو شاخص دیگر قرار دارد که بیان‌گر توانایی بالای حوزه آبخیز برای حفظ ساختار خود در حضور تنش است. هم‌چنین تنها شاخصی که بر اساس آن وضعیت برخی از زیرحوزه‌های آبخیز سد فریمان را در شرایط نسبتاً ناسالم قرار داده است، شاخص ساختار می‌باشد. از این‌رو طبیعی است که این شاخص کم‌ترین درصد مشارکت را نیز در وضعیت سلامت آبخیز سد فریمان داشته باشد. از آن جایی که شاخص ساختار نشان‌دهنده تنوع گونه‌ای و ارتباطات بین



شکل ۳- درصد تغییر شاخص سلامت زیرحوزه‌های آبخیز مطالعاتی در اثر تغییر اقلیم
Figure 3- The percent changes in the sub-watershed health index due to climate change

از اطمینان از صحت و دقت مدل شبیه‌سازی، سناریوهای مختلف سه مدل اقلیمی برای دوره سال ۱۹۷۵ تا ۲۱۰۰ با مدل SWAT اجرا شد و با استفاده از خروجی به‌دست آمده، وضعیت سلامت حوزه آبخیز تعیین شد.

نتایج تعیین سلامت حوزه آبخیز با روش VOR در دوره تاریخی نشان داد که میانگین شاخص سلامت زیرحوزه‌های آبخیز برای مدل‌های CMCC- و GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0 و ESM2 به ترتیب ۰/۵۴۵، ۰/۵۳۳ و ۰/۶۶۵ و میانگین شاخص هر سه مدل، ۰/۵۸۱ است که بر این اساس سلامت حوزه آبخیز در

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف تعیین اثر تغییر اقلیم بر سلامت حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل VOR انجام شد. برای دستیابی به پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز در مواجهه با تغییر اقلیم از مدل SWAT استفاده شد و با استفاده از خروجی‌های سه مدل اقلیمی تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 اثر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی حوزه آبخیز و شاخص‌های سلامت تعیین شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT دلالت بر رضایت‌بخش بودن نتایج در شبیه‌سازی رواناب و رسوب دارد. پس

در حالی که در سناریو SSP2-4.5، ۵۶/۳ درصد و در سناریو SSP5-8.5، ۶۵/۵ درصد از سطح حوزه آبخیز کاهش سلامت داشته است که همه این نتایج نشان دهنده این است که تأثیر تغییر اقلیم بر کاهش شاخص سلامت حوزه آبخیز بر وسعت بیش تر نسبت به دوره قبل مشاهده می شود. پایین بودن شاخص های چشم انداز و ایجاد رواناب و رسوب بیش تر در دوره های آینده نسبت به دوره تاریخی، از دلایل کاهش شاخص سلامت در حوزه آبخیز مورد مطالعه است. در مجموع نتایج تحقیق نشان داد که تغییر اقلیم می تواند کاهش شاخص سلامت حوزه آبخیز را به همراه داشته باشد که این تأثیرات در زیرحوزه های مختلف متفاوت است. از این رو ضروری است که در زیرحوزه های آبخیز آسیب پذیر، اقدامات حفاظتی برای جلوگیری از تخریب بیش تر و توقف روند کاهش سلامت مد نظر قرار بگیرد.

وضعیت "متوسط" قرار دارد. نتایج تعیین سلامت حوزه آبخیز در آینده و تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان داد که در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۹ با تشدید انتشار گازهای گلخانه ای، تعداد زیرحوزه های آبخیزی که شاخص سلامت آن ها کاهش یافته است از سه زیرحوزه آبخیز در سناریو SSP1-2.6 به چهار و شش زیرحوزه آبخیز در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 افزایش یافته است. در مجموع شواهد نشان می دهد که با افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه ای و افزایش دما، شاخص سلامت در تعداد بیش تر از زیرحوزه های آبخیز کاهش می یابد، به گونه ای که در سناریو SSP1-2.6، شاخص سلامت در ۳۴/۶ درصد از سطح حوزه آبخیز کاهش داشته است، در حالی که در سناریو SSP2-4.5، ۵۱ درصد و در سناریو SSP5-8.5، ۶۵/۵ درصد از سطح حوزه آبخیز با کاهش سلامت همراه بوده است. همچنین نتایج در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ دلالت بر این دارد که در سناریو SSP1-2.6 در ۵۰/۱ درصد از سطح حوزه آبخیز شاخص سلامت کاهش داشته است.

منابع

- بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، خزانه داری، لیلی، کوهی، منصوره، کوزه گران، سعیده، فلامرزی، یاشار، کریمیان، مریم، و ملبوسی، شراره (۱۴۰۰). چشم انداز بارش و دمای کشور در قرن ۲۱ با استفاده از سناریوهای اقتصادی-اجتماعی SSP. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، پژوهشکده اقلیم شناسی مشهد.
- جعفری، انیس، کیوان بهجو، فرشاد، و مصطفی زاده، رئوف (۱۳۹۶). مقایسه مؤلفه های مختلف وضعیت سلامت زیست بوم در حوزه آبخیز ایریل، استان اردبیل. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۶(۶)، ۸۱-۹۲. doi:10.22052/6.16.81.92-81
- جهانداری، جاوید، حجازی، رخشاد، جوزی، سیدعلی، و مرادی، عباس (۱۴۰۱). اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی، زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم افزار InVEST. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲(۴)، ۹۱-۱۰۶. doi:10.22098/mmws.2022.11069.1097
- حزباوی، زینب، پرچمی، ناهیده، علایی، نازیلا، و بابایی، لیلا (۱۳۹۹). ارزیابی و تحلیل وضعیت سلامت آبخیز کوزه تپراقی، استان اردبیل. *حفاظت منابع آب و خاک*، ۹(۳)، ۱۲۱-۱۴۲. doi:10.1001.1.22517480.1399.9.3.8.0
- حزباوی، زینب، و صادقی، سید حمیدرضا (۱۳۹۶). مدل مفهومی بنبه، ساختار و انعطاف پذیری (VOR). *ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۱۶(۱)، ۳۷۳-۳۹۳.
- خروشی، سعید، مصطفی زاده، رئوف، اسمعیل عوری، ابادز، و رئوف، مجید (۱۳۹۶). ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی شاخص سلامت هیدرولوژیک رودخانه در حوزه های آبخیز استان اردبیل. *اکوهیدرولوژی*، ۴(۲)، ۳۷۹-۳۹۳. doi:10.22059/ije.2017.61475
- صادقی، سید حمیدرضا، حزباوی، زینب، و غلامعلی فرد، مهدی (۱۳۹۸). پهنه بندی پویایی سلامت آبخیز سازند بر اساس دبی های مشخصه کم آبی و پر آبی. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۳)، ۵۸۹-۶۰۸. doi:10.22092/ijwms.2018.120288.1427.608-589
- غفاری، حیدر، و گرجی، منوچهر (۱۴۰۰). ارزیابی اثر فرسایش خاک بر عملکرد گندم دیم با استفاده از مدل SWAT. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۳)، ۵۳-۶۶. doi:10.22098/mmws.2021.9267.1029
- ناصری، فرزانه، آذری، محمود، و دستورانی، محمدتقی (۱۳۹۷). شبیه سازی جریان و رسوب حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم ژنتیک. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۳۲(۳)، ۴۴۷-۴۶۲. doi:10.22067/jsw.v32i3.68900

References

- Abbaspour, K.C. (2009). *User manual for SWAT-CUP2, SWAT calibration and uncertainty analysis programs*. Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 95 pages.
- Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Klve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.03.027
- Ahn, S.R., & Kim, S.J. (2019). Assessment of watershed health, vulnerability and resilience

- for determining protection and restoration Priorities. *Environmental Modelling & Software*, 122, 1-19. doi:10.1016/j.envsoft.2017.03.014
- Alilou, H., Rahmati, O.P., Singhc, V., Choubin, B., Pradhan, B., Keesstra, S., Ghiasi, S.S., & Sadeghi, S.H.R. (2019). Evaluation of watershed health using Fuzzy-ANP approach considering geoenvironmental and topohydrological criteria. *Journal of Environmental Management*, 232, 22-36. doi:10.1016/j.jenvman.2018.11.019
- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., & Kannan, N. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Babaian, A., Modirian, R., Khazanedari, L., Kohi, M., Kozegran, S., Flamerzi, Y., Karimian, M., & Malboosi, Sh. (2021). Outlook of rainfall and temperature of iran in the 21st century using SSP socio-economic scenarios. Final report of research project, Climatology Research Institute. [In Persian]
- Briak, H., Moussadek, R., Aboumaria, K., & Mrabet, R. (2016). Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3), 177-185. doi:10.1016/j.iswcr.2016.08.002
- Costanza, R. (1992). *Toward an operational definition of health*. Pp. 239-256, In: Ecosystem Health—New Goals for Environmental Management, Norton BD (editors), Washington, DC: Inland Press.
- Costanza, R. (2012). Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 45, 24-29. doi:10.1016/j.ecoleng.2012.03.023
- Ding, Y., Wang, W., Chang, X., & Zhao, S. (2008). Ecosystem health assessment in Inner Mongolia region based on remote sensing and GIS. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XXXVII, Part B1*, 1029-1034.
- Duan, Z., Song, X., & Liu, J. (2009). Application of SWAT for sediment yield estimation in a mountainous agricultural basin. In Geoinformatics, 17th International Conference on (1-5).
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., & Rummukainen, M. (2014). Evaluation of climate models. Pp. 741-866, In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), *Climate Change 2013, The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & DadashiRoudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3-4), 1539-1562. doi:10.1007/s00704-019-02906-9
- Ghafari, H., & Gorji, M. (2021). Evaluation of soil erosion effects on rainfed wheat (*Triticum aestivum*) yield using SWAT model. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(3), 53-66. doi:10.22098/mmws.2021.9267.1029 [In Persian]
- Hazbavi, Z., Parchami, N., Alaei, N., & Babaei, L. (2020). Assessment and Analysis of the KoozehTopraghi Watershed health status, Ardabil Province, Iran, *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 9(3), 121-142. doi:10.1001.1.22517480.1399.9.3.8.0 [In Persian]
- Hazbavi, Z., & Sadeghi, S.H.R. (2017). Watershed health characterization using reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses. *Land Degradation & Development*, 28(5), 1528-1537. doi:10.1002/ldr.2680
- Hazbavi, Z., & Sadeghi, S.H.R. (2017). Watershed health (part three): vigor, organization and resilience conceptual model. *Promotion and Development of Watershed Management*, 5(16), 373-393. [In Persian]
- Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R., Gholamalifard, M., & Davudirad, A.A. (2020). Watershed health assessment using the pressure-state-response (PSR) framework. *Land Degradation & Development*, 31(1), 3-19. doi:10.1002/ldr.3420
- Hijioka, Y., Lin, E., Pereira, J.J., Corlett, R., Cui, X., Insarov, G., Surjan, A., Field, C., Barros, V., & Mach, K. (2014). Asia Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Pp. 351-365, In: IPCC Working Group II Contribution to AR5, Cambridge, U. Press, Cambridge UK and New York, USA, 139(3).
- Holling, C.S. (1986). The resilience of terrestrial ecosystems; local surprise and global change. Pp. 292-320, In: Clark, W.C. and Munn, R.E., *Sustainable Development of the Biosphere*.
- IPCC, (2007). Summary for policymakers. in climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Pp. 7-22, In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., and Hanson, C.E. Eds., Contribution of working group ii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press.

- Jafari, A., Keivan-behjoui, F., & Mostafazadeh, R. (2017). Comparing the conditions of different Ecosystem Health components in Iiril watershed, Ardabil Province. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 6(16), 81-92. doi:10.22052/6.16.81 [In Persian]
- Jahandari, J., Hejazi, R., Jozi, S.A., & Moradi, A. (2022). Impacts of urban expansion on spatio-temporal patterns of carbon storage ecosystem service in Bandar Abbas Watershed using InVEST software. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(4), 91-106. doi:10.22098/mmws.2022.11069.1097 [In Persian]
- Khorooshi, S., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., & Raoof, M. (2017). Spatiotemporal assessment of the hydrologic river health index variations in Ardabil Province Watersheds. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(2), 379-393. doi:10.22059/ije.2017.61475 [In Persian]
- Mageau, M.T., Costanza, R., & Ulanowicz, R.E. (1998). Quantifying the trends associated with developing ecosystems. *Ecological Modeling*, 1-22. doi:10.1016/s0304-3800(98)00092-1
- MEA, (2005). *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington DC: Island Press, 155 pages.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785. doi:10.13031/trans.58.10715
- Naseri, F., Azari, M., & Dastoorani, M.T. (2018). Simulation of stream flow and sediment yield in Fariman Dam Watershed using SWAT model and genetic algorithm. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 32(3), 447-462. doi:10.22067/jsw.v32i3.68900 [In Persian]
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J.G. (2016). *CMhyd user manual*. Doc. Prep. Simulated Clim. Change Data Hydrol, Impact Study.
- Ray, A., Pandey, V.P., & Thapa, B.R. (2022). An assessment of climate change impacts on water sufficiency: The case of Extended East Rapti watershed, Nepal. *Environmental Research*, 113434. doi:10.1016/j.envres.2022.113434
- Redman, C.L. (1999). *Human impact on ancient environments*. University of Arizona Press, Tucson, AZ, 239 pages.
- Ross, E.R. & Randhir, T.O. (2022). Effects of climate and land use changes on water quantity and quality of coastal watersheds of Narragansett Bay. *Science of the total environment*, 807, 151082. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151082
- Sadeghi, S.H.R., & Hazbavi, Z. (2017). Spatiotemporal variation of watershed health propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought index (case study: Shazand Watershed in Iran). *Science of the Total Environment*, 587, 168-176. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.098
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019). Zonation of health dynamism for the Shazand Watershed based on low and high flow discharges. *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 589-608. doi:10.22092/ijwmse.2018.120288.1427 [In Persian]
- Sharafati, A., Nabaei, S., & Shahid, S. (2020). Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1864-1884. doi:10.1002/joc.6307
- Singh, R., Kayastha, S.P., & Pandey, V.P. (2022). Climate change and river health of the Marshyangdi Watershed, Nepal: An assessment using integrated approach. *Environmental Research*, 114104. doi:10.1016/j.envres.2022.114104
- Suo, A.N., Xiong, Y.C., Wang, T.M., Yue, D.X., & Ge, J.P. (2008). Ecosystem health assessment of the Jinghe River watershed on the Huangtu plateau. *International Association for Ecology and Health*, 5, 127-136. doi:10.1007/s10393-008-0167-z
- Wohl, E., Angermeier, P.L., Bledsoe, B., Kondolf, G.M., MacDonnell, L., Merritt, D.M., Palmer, M.A., Poff, N.L., & Tarboton, D. (2005). River restoration. *Water Resources Research*, 41(10301), 1-12.
- Xiao, R., Liu, Y., Fei, X., Yu, W., Zhang, Z., & Meng, Q. (2019). Ecosystem health assessment: A comprehensive and detailed analysis of the case study in coastal metropolitan region, eastern China. *Ecological indicators*, 98, 363-376. doi:10.1016/j.ecolind.2018.11.010
- Xiaoyan, L., Yuanfeng, Z., & Jianzhong, Z. (2006). Healthy Yellow River's essence and indicators. *Journal of Geographical Sciences*, 16(3), 259-270. doi:10.1007/s11442-006-0301-1
- Xu, F.L., Jorgensen, S.E., & Shu, T. (1999). Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecological Modeling*, 116, 77-106. doi:10.1016/s0304-3800(98)00160-4
- Yang, J., Reicher, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., & Yang, H. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chao he Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358 (1-2), 1-23. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.05.012