Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems

Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

Investigating the effect of climate change in watershed health trend via the Pressure-State-Response framework (Case study: Radkan watershed of Razavi Khorasan province)

Atena Nezhadrahim [1], Ali Golkaian* [2], Azar Zarrin[3]

1. M.Sc. Student, Range and Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: nezhadrahim10@gmail.com
2. Associate Professor, Range and Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: Golkarian@um.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: zarrin@um.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history
Received: 19 September 2023
Revised: 15 October 2023
Accepted: 12 November 2023
Published online: 06 June 2024

Keywords:
Climate change, Pressure-State-Response framework, watershed health, watershed management, watershed sustainability.

ABSTRACT

Watersheds are socio-ecological systems that can be significantly affected by climate change. Changes in the pattern and amount of precipitation and increase in temperature can increase the vulnerability potential of watersheds. Understanding the impacts of climate change on hydrological processes and other aspects at the watershed level is crucial for developing approaches to mitigate or adapt to these effects. Therefore, this research aims to assess the impact of climate change on the health of the Radkan watershed in Razavi Khorasan province. In this study, the health of the watershed was initially evaluated for the historical period of 1990-2014 using the Pressure-State-Response (PSR) framework. Sixteen natural and human criteria were selected and classified into three indices: pressure, state, and response. After calculating the criteria for the 14 studied sub-watersheds, they were standardized and weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Finally, the health of the studied watershed was determined using the PSR framework for the 14 sub-watersheds and classified into five categories: healthy, relatively healthy, moderately healthy, relatively unhealthy, and unhealthy. To investigate the impact of climate change on the health of the watershed, data from the climate model MPI-ESM1.2-HR were used under two scenarios: SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The predicted climate data in three future time periods of 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100 were investigated. The results indicated that during the historical period, one sub-watershed was classified as healthy, two sub-watersheds were relatively unhealthy, and the remaining sub-watersheds were moderately healthy. Comparing the health index in the future time periods with the historical period revealed a decrease in health under both scenarios. The average decrease in the time periods of 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100 under the SSP2-4.5 scenario was 8.84, 8.49, and 11.11%, respectively. Under the SSP5-8.5 scenario, the average decrease was 7.33, 13.04, and 9.85% for the same time periods.

Citation: Nezhadrahim, A., Golkaian, A., & Zarrin, A (2024). Investigating the effect of climate change in watershed health trend via the Pressure-State-Response framework Case study: Radkan watershed of Razavi Khorasan province. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(1), 20-46.
DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5

Publisher: Iranian Rainwater Catchment Systems Association
© Author(s)

***Corresponding author:** Ali Golkarian
Address: Department of Range and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad.
Tel: +989131576912
Email: golkarian@um.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems 2024, Volume 12, Issue 1
ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

Investigating the effect of climate change in watershed health trend via the Pressure-State-Response framework Case study: Radkan watershed of Razavi Khorasan province

Atena Nezhadrahim [1], Ali Golkaian* [2], Azar Zarrin[3]

1. M.Sc. Student, Range and Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: nezhadrahim10@gmail.com
2. Associate Professor, Range and Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: Golkarian@um.ac.ir
3. Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: zarrin@um.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Introduction: Health assessment has been one of the most practical approaches to assessing the status and dynamics of watersheds. The health of ecosystems is its potential to preserve and maintain the structure, self-regulation, and reviving its strength after dealing with tensions. Therefore, the concept of ecosystem health is considered one of the most basic concepts in the comprehensive assessment and management of regions. Nowadays, watersheds are exposed to many risks due to changes in the natural environment caused by human activities. Therefore, to determine the appropriate management plan, there is a need to assess the health status of the watershed. Various methods have been provided in this field, including Conceptual models of Reliability-Resilience-Vulnerability (RRV), Vigor-Organization-Relaibility (VOR), and Pressure-State- Response (PSR) and extended versions of this model. The watershed can be considered as the intersection of a natural ecosystem and human activities, which is constantly changing. Since these changes, including changes in precipitation patterns and temperature increases, can increase the vulnerability of watersheds, therefore, knowing the effects of climate change on hydrological processes and other aspects of the watershed, can create approaches to reduce these effects or adapt be with them. Therefore, the current research was conducted to evaluate the effects of climate change on the health of the Radkan watershed in Razavi Khorasan province via the pressure-state-response (PSR) framework.

Methodology: Methodology: To evaluate the health of the Radkan watershed in the historical period of 1990-2014, first, 16 natural and human criteria were selected and classified into three pressure, state, and response indicators. Then the studied area was divided into 14 sub-watersheds and the mentioned criteria were calculated and standardized for all of them. After, the weight of each criterion was calculated through the analytic hierarchy process (AHP). Finally, the health index in the historical period of 1990-2014 was calculated for 14 sub-watersheds through the PSR framework and classified into five classes (healthy, relatively healthy, moderately healthy, relatively unhealthy, and unhealthy). To investigate the role of climate change in the health of the watershed, rainfall, and temperature data of climate model MPI-ESM1.2-HR have been used under two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5. In this way, the precipitation data in the average annual precipitation criterion, the temperature data in the potential evapotranspiration criterion, and the relationship between precipitation criteria and Normalized Difference Vegetation Index (NDVA) was used to calculate NDVA in three future time periods including 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100. Finally, the health index was calculated for 14 sub-watersheds in three future time frames under two scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5, and its changes compared to the historical period were investigated.

Results and Discussion: he results of calculating the health index in the historical period of 1990-2014 showed that sub-watersheds 1 and 10 are in the relatively unhealthy class, sub-watershed 9 is in the healthy class, and the rest of the sub-watersheds are in the moderately healthy class. The results of the health index evaluation of the study area in the time period of 2026-2050 under the SSP2-4.5 scenario showed that most of the sub-watersheds are in a moderately healthy class. In terms of health index, sub-watershed 1 has decreased from a relatively unhealthy class to an unhealthy one. Sub-watershed 9 is in the healthy class and other sub-watersheds are in the moderately healthy class. In the time periods of 2051-2075 and 2076-2100 under the SSP2-4.5

***Corresponding author:** Ali Golkarian
Address: Department of Range and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad.
Tel: +989131576912
Email: golkarian@um.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

scenario and all three future periods under the SSP5-8.5 scenario, a decrease in the health index has occurred in most of the sub-watersheds, but this decrease was not enough to make the health class from the moderately healthy class to change. Therefore, the health class of the entire study area in all three future periods under two medium and very pessimistic scenarios is often moderately healthy. Finally, the results show that the greatest decrease in the health index in the studied area occurred from 2051 to 2075 under the SSP5-8.5 scenario. On the other hand, the largest decrease in health index among the studied sub-watersheds belongs to sub-watershed 1.

Conclusion: In the studies of the health index related to climate change, two criteria of average annual precipitation and potential evapotranspiration from the pressure index and only the NDVI criterion from the state index were used, and other criteria affecting the pressure, state, and response indices were considered constant. Therefore, it can be said that any change in the health index, in the future periods under both medium and very pessimistic scenarios, will be caused by changes in the three parameters of temperature, precipitation, and vegetation in the 14 studied sub-watersheds. The results of examining the percentage of changes in the health of the studied watershed in the future periods compared to the historical under both scenarios state that a decrease in health has occurred in most of the studied sub-watersheds. In other words, in the whole area of Radkan watershed in the time periods of 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100 under the middle scenario, 62.04%, 49.79%, and 74.81% of health will decrease compared to the historical period. Also, the health index at the entire level of the studied area in the time periods of 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100 in the SSP5-8.5 scenario decreased by 44.90%, 90.97%, and 62.04%, respectively, compared to the historical period. Finally, the results show the reduction of health index values in the future compared to the historical period. This result was not far from expected due to the increase in greenhouse gas emissions and the subsequent increase in temperature and the unprojectability of precipitation patterns in the future.

Ethical Considerations

Data availability statement: The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Funding: This research is the result of the M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Authors' contribution: All the authors cooperated to prepare the article in all sections.

Conflicts of interest: The author of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Acknowledgment: Khorasan Razavi Regional Water Company is thanked and appreciated for its sincere cooperation in providing statistics and information.

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱   شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

بررسی اثر تغییر اقلیم در روند سلامت حوزه آبخیز از طریق چهارچوب فشار-وضعیت-پاسخ مطالعه موردی: حوزه آبخیز رادکان، استان خراسان رضوی

آتنا نژادرحیم[۱]، علی گلکاریان[۲*]، آذر زرین[۳]

۱. کارشناس ارشد آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. nezhadrahim10@gmail.com

۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. Golkarian@um.ac.ir

۳. دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. zarrin@um.ac.ir

مشخصات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله

دریافت: ۲۸ شهریور ۱۴۰۲
بازنگری: ۲۳ مهر ۱۴۰۲
پذیرش: ۲۱ آبان ۱۴۰۲
انتشار برخط: ۱۷ خرداد ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
پایداری آبخیز، تغییر اقلیم، چهارچوب فشار-وضعیت-پاسخ، سلامت آبخیز، مدیریت آبخیز.

چکیده

حوزه‌های آبخیز سیستم‌های اجتماعی-بوم‌شناختی هستند که به‌طور قابل توجهی می‌توانند تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار گیرند. از آن‌جایی که این تغییرات از جمله تغییر در میزان و الگوهای بارش و افزایش دما، می‌تواند سبب افزایش آسیب‌پذیری حوزه‌های آبخیز شود، لذا شناخت اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و سایر جنبه‌های مختلف در سطح حوزه آبخیز، می‌تواند سبب ایجاد رویکردهایی جهت کاهش این اثرات و یا سازگاری با آن‌ها شود. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تاثیرات تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز رادکان در استان خراسان رضوی، انجام شده است. در این مطالعه، ابتدا سلامت آبخیز از طریق چهارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR) برای دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ تعیین شد. بدین منظور ۱۶ معیار طبیعی و انسانی انتخاب و در قالب سه شاخص فشار، وضعیت و پاسخ طبقه‌بندی شدند. پس از محاسبه معیارها برای ۱۴ زیرحوضه مورد مطالعه، استانداردسازی معیارها انجام و سپس از طریق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) تعیین وزن شدند. در نهایت سلامت آبخیز مورد مطالعه از طریق چهارچوب PSR برای ۱۴ زیرحوضه تعیین و در پنج کلاس سالم، نسبتا سالم، متوسط، نسبتا ناسالم و ناسالم طبقه‌بندی شد. سپس به‌منظور بررسی تاثیرات تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز ، از داده‌های مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-HR تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، برای سه دوره زمانی آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ استفاده شد. نتایج نشان داد در دوره تاریخی غیر از یک زیرحوضه که در طبقه سالم و دو زیرحوضه که در طبقه نسبتا ناسالم قرار داشتند، مابقی زیرحوضه‌ها از نظر سلامت در طبقه متوسط بودند. مقایسه شاخص سلامت در دوره‌های زمانی آینده با دوره تاریخی، نشان‌دهنده کاهش سلامت در هر دو سناریو بود که میانگین این کاهش به‌ترتیب در دوره‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ تحت سناریو SSP2-4.5 برابر با ۸/۸۴ ، ۸/۴۹ و ۱۱/۱۱ درصد و در سناریو SSP5-8.5 به‌ترتیب برابر با ۷/۳۳، ۱۳/۰۴ و ۹/۸۵ درصد است.

استناد: نژادرحیم، آتنا، گلکاریان، علی، و زرین، آذر (۱۴۰۳). بررسی اثر تغییر اقلیم در روند سلامت حوزه آبخیز از طریق چهارچوب فشار-وضعیت-پاسخ مطالعه موردی: حوزه آبخیز رادکان، استان خراسان رضوی. *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۲(۱)، ۲۰-۴۶.

DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5

CC BY NC

© نویسندگان

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران

*** نویسنده مسئول:** علی گلکاریان
نشانی: گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
تلفن: ۰۹۱۳۱۵۷۶۹۱۲
پست الکترونیکی: Golkarian@um.ac.ir

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

مقدمه

حوزه‌های آبخیز سیستم‌های اجتماعی-بوم‌شناختی هستند که در آن انسان‌ها و موجودات دیگر با محیط فیزیکی و یکدیگر تعامل دارند (Cabello et al., 2015; Gari et al., 2018). حوزه‌های آبخیز می‌توانند مزایایی را برای انسان فراهم کنند که به‌عنوان خدمات آبخیز تعریف می‌شود (Hamel et al., 2018). در اواخر قرن بیستم، رشد جمعیت منجر به افزایش محدودیت‌ها در دسترسی به خدمات آبخیز شد. متاسفانه، حوزه‌های آبخیز به‌دلیل فعالیت‌های انسانی و تغییر اقلیم در حال تخریب هستند یا پتانسیل تخریب را دارند (Hazbavi & Sadeghi, 2017; Mosaffaie et al., 2015). در این راستا می‌توان سلامت را به‌عنوان یک معیار نسبی از انحراف فرآیندهای آبخیز نسبت به شرایط پایه، یعنی حالت طبیعی و بدون دخالت انسان یا با دخالت بسیار کم انسان تعریف کرد و آن را از طریق اندازه‌گیری و پایش متغیرها و شاخص‌های گوناگون ارزیابی نمود (Hazbavi et al., 2020; Mosaffaie et al., 2021). امروزه زیست‌بوم‌های آبخیز به‌دلیل تغییرات محیط طبیعی که ناشی از فعالیت‌های انسانی است، در معرض خطرات زیادی قرار دارند. بنابراین به جهت تعیین برنامه مدیریتی مناسب، نیاز به ارزیابی وضعیت سلامت آبخیز وجود دارد. روش‌های مختلفی همچون، مدل مفهومی پایایی، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری[۱] (RRV)، مدل مفهومی بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری[۲] (VOR) و مدل مفهومی فشار، وضعیت و پاسخ[۳] (PSR) و مدل‌های DSR[۴]، PSIR[۵]، DPSRC[۶]، DPSIR[۷] و DPSIRM[۸] که بر پایه مدل PSR به وجود آمده‌اند.

مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی پایداری و سلامت بوم‌سازگان‌ها از جنبه‌های متفاوتی در نقاط مختلف جهان انجام شده است. در پژوهشی Liu و Hao (۲۰۱۶)، بر اساس چهارچوب فشار-وضعیت-پاسخ مجموعه‌ای از شاخص‌های جامع، شامل جنبه‌های طبیعی، اجتماعی و اقتصادی را جهت بررسی سلامت بوم‌سازگان در مقیاس شهرستان Yuanzhou، چین استفاده کردند. نتایج نشان داد که شرایط سلامت بوم‌سازگان اکثر بخش‌های Yuanzhou در سطح نسبتا سالم و سالم قرار داشت. Sadeghi و همکاران (۲۰۱۹)، مطالعه‌ای با هدف ارزیابی جامع سلامت آبخیز با استفاده از چهارچوب پایایی، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری (RRV) برای ۲۴ زیرحوزه آبخیز شازند در استان مرکزی ایران به انجام رساندند. نتایج نشان داد که هیچ یک از زیرحوضه‌ها در سال‌های مورد مطالعه براساس چهارچوب RRV از نظر وضعیت سلامت، سالم ارزیابی نشده است. در مطالعه‌ای دیگر، Hazbavi و همکاران (۲۰۱۹) از چهارچوب فشار-وضعیت-پاسخ برای تشریح مفهوم سلامت آبخیز شازند استفاده کردند. جهت این مطالعه ۱۷ شاخص آب و هوایی، انسانی و هیدرولوژیکی مدنظر قرار گرفت. در این مطالعه، چهار سال ۱۹۸۶، ۱۹۹۸، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ انتخاب شدند. نتایج نشان داد که عوامل انسانی در تمامی سال‌ها، فشار اصلی را بر منطقه وارد می‌کنند. Mosaffaie و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی با استفاده از چهارچوب نیروی‌محرکه-فشار-وضعیت-برخورد-پاسخ (DPSIR) به تحلیل مشکلات زیست محیطی اصلی سلامت آبخیز گرگان‌رود پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که به‌جز شاخص S، سایر شاخص‌ها در طول دوره مورد مطالعه، روند صعودی دارند. این بدان معناست که سلامت آبخیز گرگان‌رود به مرور زمان به‌دلیل فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی و فشارهای ناشی از آن کاهش می‌یابد.

تغییر اقلیم مشاهده شده و پیش‌بینی شده قرن بیست و یکم و گرم شدن کره زمین، تغییرات قابل توجهی هستند که جهان در طول ۶۵ سال گذشته با آن مواجه شده است (Abbass et al., 2022). براساس تجزیه و تحلیل ناسا، میانگین دمای سطح زمین در سال ۲۰۲۲ به میزان ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد بیش‌تر از میانگین دوره پایه ناسا (۱۹۵۱-۱۹۸۰) بوده است. لذا این سال به‌عنوان پنجمین سال گرم تاریخ زمین شناخته می‌شود (NASA, 2023). تغییر اقلیم، از نظر تغییر دما و الگوهای بارش، تاثیر بسزایی در منابع آب و بوم‌سازگان‌های طبیعی دارد. سازگاری با تغییر اقلیم در حال تبدیل شدن به یک راهبرد مهم برای مدیریت حوزه آبخیز است (Qiu et al., 2019). درک این موضوع که ویژگی‌های فیزیکی و اقلیمی یک حوزه آبخیز چگونه بر آسیب‌پذیری آن در برابر تغییرات محیطی (اقلیمی و کاربری اراضی) تاثیر می‌گذارد، برای مدیریت این سیستم‌های پیچیده بسیار مهم است (Deshmukh & Singh, 2016). فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز نیز می‌تواند تحت‌تاثیر قرار گیرد و منجر به تغییر سطح آب در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و اختلال کلی در بوم‌سازگان شود (Yang et al., 2020; Lian et al., 2021). مطالعات زیادی با محوریت ایجاد یک رویکرد یکپارچه جهت بررسی سلامت بوم‌سازگان‌های

[1] Reliability-Resilience-Vulnerability
[2] Vigor-Organization-Resilience
[3] Pressure-State-Response
[4] Drive force-State-Response
[5] Pressure-State-Impact-Response
[6] Driving force-Pressure State- Response-Control
[7] Driving force-Pressure-State- Impact-Response
[8] Driving force-Pressure-State-Impact-Response-Management

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

طبیعی تحت تنوع اقلیمی آینده به انجام رسیده است. نیکویی و همکاران (۱۴۰۱)، در مطالعه‌ای به بررسی اثر تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل VOR برای یک دوره تاریخی (۱۹۸۵–۲۰۱۴) و دو دوره زمانی آینده (۲۰۳۰–۲۰۵۹ و ۲۰۹۹–۲۰۷۰) توسط سه مدل اقلیمی و تحت سه سناریوی انتشار پرداختند. نتایج نشان داد که سلامت کلی حوضه 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 زیرحوضه‌ها کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده بدتر شدن وضعیت سلامت زیرحوضه‌ها در آینده است. در مطالعه‌ای دیگر Singh و همکاران (۲۰۲۲)، تغییر اقلیم و سلامت آبخیز رودخانه Marshyangdi در Nepal را با استفاده از رویکرد یکپارچه ارزیابی نمودند. از طرفی تاثیر تغییر اقلیم بر سلامت رودخانه طبق اقلیم پیش‌بینی‌شده (بارش و دما) بر اساس مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای تحت خط سیر سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 تا اواسط قرن ارزیابی شد. نتایج نشان داد وضعیت سلامت رودخانه در هر دو فصل متوسط و تحت سناریوها و دوره‌های آتی کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر، Zhaia و همکاران (۲۰۲۳)، به ارزیابی اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر حوزه آبخیز Syr Darya به کمک یک روش تجزیه و تحلیل مجموعه ترکیبی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ پرداخته‌اند. در مقایسه با دوره پایه (۱۹۶۰–۲۰۰۵)، یافته‌ها افزایش متوسط دمای سالانه را در محدوده ۰/۲ تا ۳/۸ درجه برای RCP4.5 و از ۱/۴ تا ۵/۵ درجه برای RCP8.5 در دهه ۲۰۸۰ نشان می‌دهند. علاوه‌بر این، تحقیق روند نزولی در بارش سالانه را با کاهش ۳/۷–۲۷/۸ درصد برای RCP4.5 و ۵/۱–۴۷/۷ درصد برای RCP8.5 تایید می‌کند.

به‌طور کلی، مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی پایداری و سلامت بوم‌سازگان‌ها، به روش‌های مختلف و اکثرا با نظر به معیارهای موثر اقلیمی، انسانی و هیدرولوژیکی، در نقاط مختلف جهان انجام شده است. از طرفی پژوهش‌های متعددی نیز با محوریت ایجاد یک رویکرد یکپارچه جهت بررسی سلامت بوم‌سازگان‌های طبیعی تحت تنوع اقلیمی آینده و یا تعیین تاثیرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و کیفیت آب بوم‌سازگان‌ها، به انجام رسیده است. می‌توان گفت هدف تمامی پژوهش‌ها در این زمینه، شناسایی عوامل تهدید سلامت حوزه‌های آبخیز و به دنبال آن ارائه پیشنهادها و راهکارهای مدیریتی مناسب جهت کاهش آسیب‌های وارده به آن‌هاست. لذا هدف پژوهش حاضر نیز، بررسی شرایط سلامت آبخیز رادکان، در یک دوره تاریخی و سپس سه دوره زمانی آینده تحت یک مدل و دو سناریوی اقلیمی، است.

مواد و روش تحقیق

محدوده مورد مطالعه

حوزه آبخیز رادکان در شمال شرقی ایران، استان خراسان‌رضوی، شهرستان چناران، در بخش مرکزی و در ۷۵ کیلومتری شمال غربی مشهد واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در زون UTM 40[1] و در محدوده ۶۷۵۸۷۶ تا ۶۹۴۲۹۸ متر طول شرقی و ۴۰۷۰۸۷۵ تا ۴۱۰۲۳۶۱ متر عرض شمالی قرار دارد. این منطقه در دامنه‌های جنوبی سلسله جبال هزارمسجد و در حاشیه دشت کشف‌رود قرار دارد. رودخانه رادکان از ارتفاعات قره‌لکه و مریجگان شروع و در حوالی روستاهای رادکان و مغان، وارد دشت مشهد می‌شود (صدیق و همکاران، ۱۳۹۷). وسعت حوزه آبخیز این رودخانه حدود ۲۴۸ کیلومتر مربع و متوسط حجم سالانه آب آن حدود ۱۶ میلیون مترمکعب است. ارتفاع متوسط این حوزه، ۱۲۱۴ متر، شیب متوسط ۳۳ درصد و میانگین بارندگی سالانه، ۲۱۵ میلی‌متر است.

روش کار

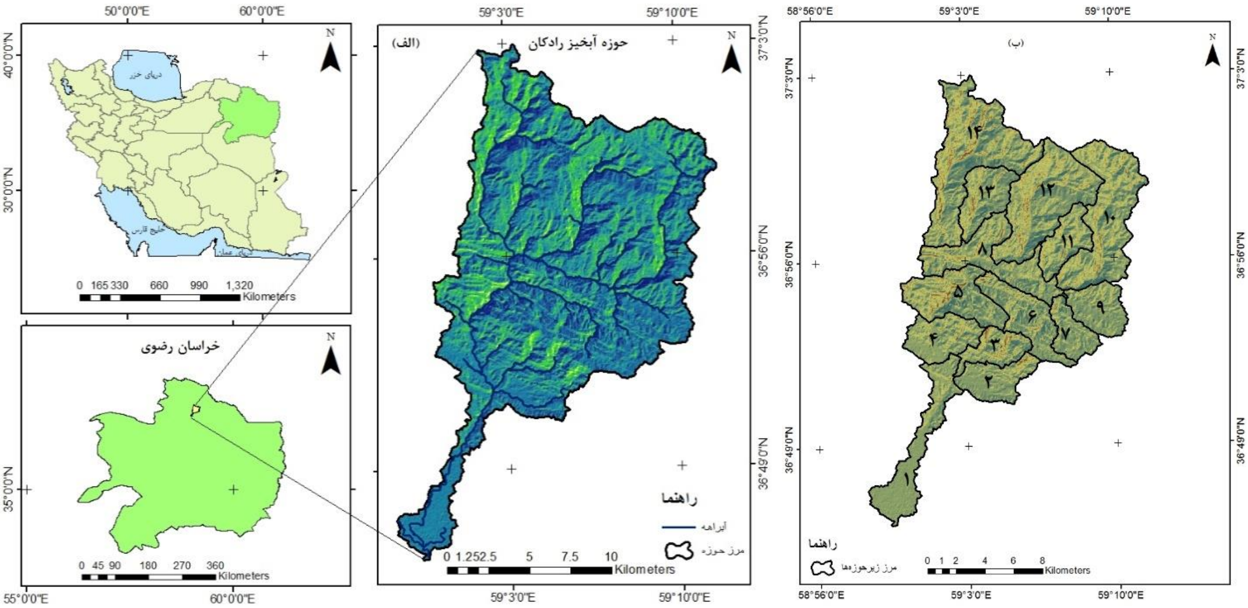
جمع‌آوری داده‌ها

جهت برآورد معیارهای تبخیر–تعرق پتانسیل و متوسط بارش سالانه، داده‌های دمای ماهانه ۸ ایستگاه اطراف منطقه مورد مطالعه (ارداک بند ساروج، اولنگ اسدی، زشک خراسان، سد طرق، سد کارده، قدیر آباد، مارشک و رادکان) و هم‌چنین داده‌های بارش ماهانه برای ۶ ایستگاه اطراف حوزه آبخیز (ارداک بند ساروج، سدکارده، امامزاده رادکان، چناران، دهانه اخلمد و گلمکان) که در شکل (۲) نشان داده شده است، برای دوره زمانی ۲۰۱۴–۱۹۹۰ از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شد. جهت بررسی معیارهای سیمای سرزمین، از نقشه کاربری اراضی و نرم‌افزار FRAGSTATES 4.2.1 استفاده شد. نقشه کاربری اراضی به کمک تصاویر شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، سامانه Google Earth Engine، Google Earth Pro، نرم‌افزار ArcMap10.6.1 و بازدیدهای میدانی صورت گرفته از منطقه، در ۷ کلاس (مناطق مسکونی، کشت آبی، کشت دیم، باغ، مرتع، مرتع مشجر و توده سنگی) تهیه شد. به کمک نقشه‌های زمین‌شناسی چناران، قوچان و درگز، نقشه سنگ‌شناسی تهیه شد. نقشه طبقه‌بندی فرسایش نیز به کمک نقشه سنگ‌شناسی و بازدید از منطقه تهیه شد. شکل (۳) نشان‌دهنده نقشه‌های کاربری اراضی، سنگ‌شناسی و طبقه‌بندی فرسایش است. به‌منظور برآورد شاخص

[1] Universal Transverse Mercator

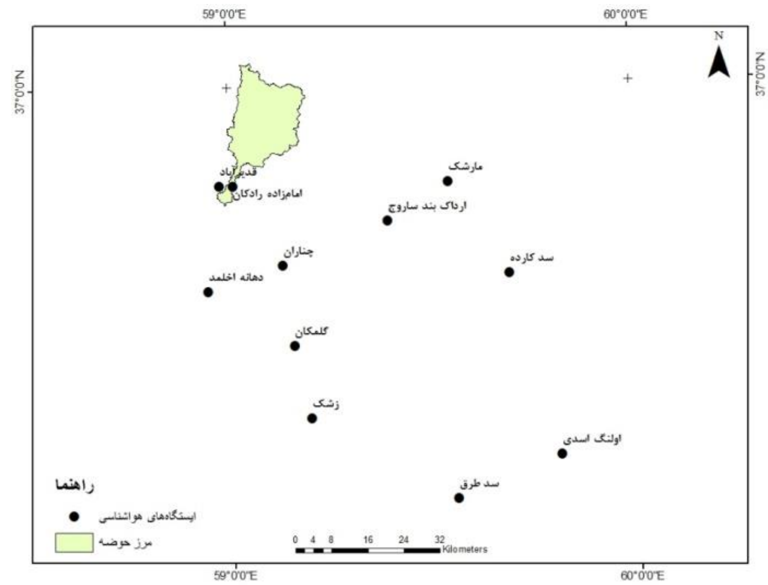
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]
[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی، تصاویر NDVI سنجنده MODIS برای دوره زمانی ۲۰۰۰–۲۰۱۴ از طریق سامانه Google Earth Engine دریافت شد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز رادکان در استان خراسان رضوی و ایران (الف) زیرحوزه‌های آبخیز رادکان (ب)

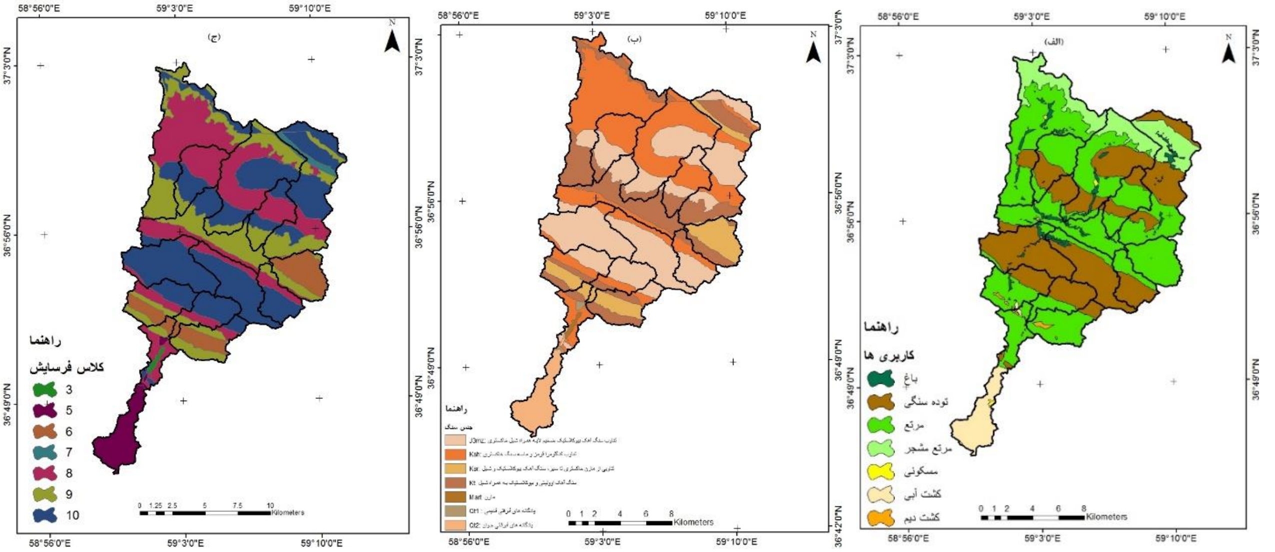
Figure 1- Location of the Radkan watershed in Khorasan Razavi province and Iran (a) Radkan sub-watersheds (b)



شکل ۲- نقشه پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی اطراف حوزه آبخیز رادکان

Figure 2- Distribution map of weather stations around Radkan watershed

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]
[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]



شکل ۳- نقشه کاربری اراضی (الف) سنگ‌شناسی (ب) و فرسایش (ج) حوزه آبخیز رادکان

Figure 3- Land use (a) Geological (b) and Erosion map (c) of the Radkan Watershed

استخراج داده‌های تغییر اقلیم

در این مطالعه از نسخه ۱.۲ مدل سامانه زمین MPI-ESM با پیکربندی و تفکیک افقی بالاتر یعنی مدل MPI-ESM1.2-HR استفاده شده است که یکی از مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده CMIP6 بوده (Eyring et al., 2016) و در پیش‌نگری‌های فصلی و دهه‌ای نیز مشارکت یافته است. مدل MPI-ESM1.2-HR مدل سامانه زمین موسسه پلانک آلمان با تفکیک افقی ۰.۵*۰.۵ درجه بوده که از سری مدل‌های تصحیح اریبی شده فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده است. مدل‌های سامانه زمین (ESM) می‌تواند تغییر اقلیم را در گذشته و آینده شبیه‌سازی و پیش‌نگری کند. با این حال، خروجی ESMها قادر به نمایش اقلیم در مقیاس محلی نیست. تصحیح اریبی یک فرآیند آماری است که در آن داده‌های شبکه‌های بزرگ مقیاس در یک دوره زمانی خاص به‌عنوان مبنایی برای استفاده از برونداد مستقیم داده‌ها در شبکه‌های مقیاس کوچک استفاده می‌شود (Fauzi et al., 2020). در این تحقیق، اریبی مدل MPI-ESM1.2-HR با روش تصحیح مرتبه متوالی (SEC[1]) (Weedon et al., 2011) با استفاده از داده‌های واحد تحقیقات اقلیمی (CRU[2]) انجام شده است. مجموعه داده CRU TS (سری‌های زمانی شبکه‌ای واحد تحقیقات اقلیمی) مجموعه داده اقلیمی پرکاربرد در تمام مناطق جهان به‌جز قطب جنوب است. این داده از درون‌یابی بی‌هنجاری‌های ماهانه اقلیم از شبکه‌های گسترده مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی همدید در سراسر جهان به‌دست می‌آید (Harris et al., 2020).

Zarrin و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات آینده بارندگی در ایران از طریق یک مجموعه مدل تصحیح شده از فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده، پرداختند. در این مطالعه دقت پنج مدل GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل MPI-ESM1-2-HR دارای دقت مناسب‌تری جهت شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در شرق ایران است. لذا در مطالعه حاضر نیز، از مدل مذکور تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 که به‌ترتیب سناریوهای میانه و خیلی بدبینانه هستند، استفاده شده است. SSP2-4.5 که جایگزین RCP4.5 در گزارش پنجم بوده و دنیایی را به تصویر می‌کشد دارای توسعه اقتصادی-اجتماعی به همراه سطح واداشت تابشی متوسط است. SSP5-8.5 که نسخه جدید RCP8.5 بوده و توصیف‌گر پیشرفت به کمک سوخت‌های فسیلی، مصرف زیاد انرژی و هم‌چنین حد بالای واداشت تابشی است (Estoque et al., 2020؛ Rogelj et al., 2018؛ O’Neill et al., 2017).

در این مطالعه داده‌های متوسط بارش و دمای روزانه مدل MPI-ESM1.2-HR مربوط به سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۱۴ به‌عنوان دوره تاریخی و ۲۰۲۶-۲۱۰۰ به‌عنوان دوره آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دریافت شد. به این ترتیب داده‌های بارش و دمای دریافت شده، جهت برآورد معیارهای تبخیر-تعرق پتانسیل، متوسط بارش سالانه و شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، به

[1] Sequential Elevation Correction
[2] Climate Research Unit

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

یک دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و سه دوره آینده شامل ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ تقسیم شدند. به‌منظور یکسان‌سازی بازه زمانی دوره پایه مدل اقلیمی با دوره مشاهداتی داده‌های بارش و دما، از داده‌های شبیه‌سازی شده مدل MPI-ESM1.2-HR برای دوره تاریخی استفاده شد.

معرفی چهارچوب PSR

مدل مفهومی PSR (Pressure-State-Response) یا فشار–وضعیت–پاسخ برای اولین بار توسط Rapport و Friend (۱۹۷۹) پیشنهاد شد. سپس، در سال ۱۹۹۲ پیرو توافق نمایندگان کشورهای هلند، نروژ و ایالت متحده و سایر کشورهای عضو سازمان توسعه و همکاری‌های اقتصادی (OECD) در خصوص عملکرد محیط زیست کشورها مطرح و تهیه شد. چارچوب PSR از سه دسته شاخص، یعنی شاخص‌های فشار، وضعیت و پاسخ تشکیل شده است. شاخص‌های فشار، فشارهای وارده بر سلامت بوم‌سازگان توسط فعالیت‌های انسانی، از جمله فشارهای منابع و فشارهای اجتماعی را توصیف می‌کنند. شاخص وضعیت، نشان‌دهنده وضعیت موجود در سلامت بوم‌سازگان، مانند بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری یک بوم‌سازگان است. شاخص‌های پاسخ، درجه پاسخ به تغییرات شرایط سلامتی بوم‌سازگان، از جمله تغییرات به وجود آمده توسط انسان و یا خود بوم‌سازگان را نشان می‌دهد (Liu & Hao, 2016). در این مطالعه با توجه به چهارچوب مفهومی فشار–وضعیت–پاسخ (PSR) جهت بررسی وضعیت سلامت حوزه آبخیز مطابق جدول (۱)، ۱۶ معیار انتخاب و در قالب چهارچوب مذکور دسته‌بندی شدند.

جدول ۱- معیارهای مورد استفاده در چهارچوب PSR حوزه آبخیز رادکان

Table 1- The criteria used in the PSR framework of the Radkan watershed

شاخص های اصلی	عوامل	معیارها	علائم اختصاری	واحد
فشار	طبیعی	متوسط بارش سالانه	X1	میلی‌متر
		تبخیر–تعرق پتانسیل	X2	میلی‌متر
	انسانی	تراکم جمعیت	X3	تعداد در هکتار
		مساحت زمین کشاورزی با شیب بالای 25 درصد	X4	درصد
وضعیت	طبیعی	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)	X5	بدون واحد
		حساسیت ذاتی واحدهای سنگ و خاک به فرسایش	X6	بدون واحد
		تراکم زهکشی	X7	کیلومتر
		شکل حوزه	X8	بدون واحد
		نسبت پستی و بلندی	X9	بدون واحد
		میانگین طول آبراهها	X10	نسبت طول به تعداد آبراهها
	انسانی	تنوع سیمپسون	X11	بدون واحد
پاسخ	طبیعی	فرسایش خاک	X12	بدون واحد
	انسانی	تراکم لکه	X13	بدون واحد
		میانگین اندازه لکه	X14	بدون واحد
		سنجه سرایت	X15	بدون واحد
		میانگین نسبت محیط به مساحت	X16	بدون واحد

معیارهای مورد استفاده جهت محاسبه شاخص فشار

متوسط بارش سالانه

جهت برآورد متوسط بارش سالانه، به کمک داده‌های بارش سالانه متعلق به ۶ ایستگاه اطراف حوزه آبخیز برای دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰، گرادیان بارندگی منطقه محاسبه (جدول ۲) و به کمک مدل رقومی ارتفاع و داده‌های بارش استخراج شده از مدل اقلیمی -MPI-ESM1.2 HR تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، توزیع متوسط بارش سالانه برای ۱۴ زیرحوضه در یک دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و سه دوره آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ انجام شد.

جدول ۲- رابطه بین داده‌های مشاهده‌ای بارش و ارتفاع

Table 2- Relationship between observational data of precipitation and altitude

پارامترها	رابطه	R^2	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
بارش و ارتفاع	y = 0.2837x - 131.89	0.9574	5	99%

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

تبخیر-تعرق پتانسیل

در تحقیق حاضر با دریافت داده‌های دمایی و تعیین دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۰، اقدام به محاسبه گرادیان دمایی منطقه شد (جدول ۳). سپس به کمک مدل رقومی ارتفاع[1] و داده‌های دمای استخراج شده از مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-HR تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، توزیع دمای ماهانه برای ۱۴ زیرحوضه در یک دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و سه دوره آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ انجام شد. در نهایت از طریق رابطه Thornthwaite (1948)، معیار تبخیر-تعرق پتانسیل برای هر زیرحوضه محاسبه شد (رابطه ۱ تا ۳).

رابطه (۱)
$$ETo = 1.6\left(\frac{10T_i}{I}\right)^a$$

که در آن

- ET_0، تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه (میلی‌متر)
- T_i، میانگین دمای ماهانه (درجه سانتی‌گراد)، (درصورتی‌که میانگین دمای ماهانه زیرصفر باشد، تبخیر-تعرق پتانسیل برابر صفر خواهد بود).
- I، شاخص گرما که از رابطه (۲) به‌دست می‌آید.
- α، تابع پیچیده شاخص گرما که از رابطه (۳) قابل حصول است.

رابطه (۲)
$$I = \sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$$

- T_i، دمای هوا ماهانه

رابطه (۳)
$$\propto = 6.75 \times 10^{-7}I^3 - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 1.7912 \times 10^{-2}I + 0.49239$$

- I، شاخص گرما سالانه

جدول ۳- رابطه بین داده‌های مشاهده‌ای دما و ارتفاع

Table 3- Relationship between observational data of temperature and altitude

پارامترها	رابطه	R^2	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
دما و ارتفاع	y = -0.0037x + 17.944	0.8227	7	99%

تراکم جمعیت

ابتدا به کمک نقشه کاربری اراضی، مناطق مسکونی و موقعیت مکانی آن‌ها از نظر قرارگیری در هر زیرحوضه، مشخص شد. در گام بعد، از طریق آخرین آمار سرشماری عمومی نفوس و مسکن متعلق به سال ۱۳۹۵، جمعیت مناطق روستایی به‌دست آمد. در نهایت از تقسیم جمعیت هر روستا به مساحت هر زیرحوضه، معیار تراکم جمعیت محاسبه شد.

مساحت زمین کشاورزی با شیب بالای ۲۵ درصد

ابتدا توسط نقشه کاربری اراضی، مساحت کل زمین‌های کشاورزی موجود در هر زیرحوضه محاسبه شد. سپس نقشه شیب توسط نرم‌افزار ArcMap10.6.1 تهیه و با نقشه کاربری اراضی تلفیق شد. در نهایت مساحت بخش‌هایی از زمین‌های کشاورزی هر زیرحوضه که دارای شیب بیش از ۲۵ درصد بود، مشخص شد.

معیارهای مورد استفاده جهت محاسبه شاخص وضعیت

شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)

برای برآورد NDVI از رابطه (۴) استفاده می‌شود (Tucker et al., 1979):

رابطه (۴)
$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

که در آن NDVI مقادیر شاخص پوشش گیاهی به‌دست آمده در مقیاس ماهانه، NIR و RED به‌ترتیب برای اندازه‌گیری بازتاب طیفی به‌دست آمده در مناطق نزدیک مادون قرمز و مرئی به‌کار می‌روند. مقادیر شاخص NDVI بین ۱- تا ۱+ متغیر است. یک طبقه‌بندی ۵ کلاسه جهت مقادیر NDVI بیان می‌کند که مقادیر بین ۱- تا ۰/۱- نشان‌دهنده پهنه‌های آبی و سطوح غیرگیاهی، ۰/۱- تا ۰/۱

[1] Digital Elevation Model (DEM)

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

نشان‌دهنده سطوح سنگی، ماسه‌ای یا برفی، ۰/۱ تا ۰/۲ نشان‌دهنده پوشش روی سنگ، ۰/۲ تا ۰/۴ نشان‌دهنده پوشش درختچه‌ای و علفزار و ۰/۴ تا ۱ نشان‌دهنده جنگل‌های بارانی مناطق گرم و استوایی است. در این تحقیق شاخص NDVI به کمک تصاویر سنجده MODIS و از طریق کدنویسی در سامانه Google Earth Engine تهیه شد. سپس با بررسی ارتباط بین شاخص NDVI و میزان بارش و دما، با توجه به معنی‌دار بودن رابطه بین بارش و NDVI طبق جدول (۴)، از این رابطه جهت برآورد مقادیر NDVI در بازه‌های زمانی آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد.

جدول ٤- رابطه بین داده‌های مشاهده‌ای بارش و NDVI

Table 4- Relationship between observational data of precipitation and NDVI

پارامترها	رابطه	R^2	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
بارش و NDVI	$y = 0.0003x + 0.1355$	0.6655	14	99%

حساسیت ذاتی واحدهای سنگ و خاک به فرسایش

از عوامل تعیین کننده در هوازدگی و فرسایش‌پذیری سنگ‌ها، ویژگی‌های ذاتی مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها شامل ترکیب کانی‌شناسی، بافت و مقاومت مکانیکی است که مستقل از محیط، عامل ایجاد مقاومت درونی ماده در برابر انفصال ذرات، تخریب و خاک‌سازی است. در این تحقیق از طبقه‌بندی Peyrowan و همکاران (۲۰۱۲) که مشتمل بر ۱۰ رده مقاومتی است، استفاده شد. با توجه به نقشه واحدهای سنگی، ۷ جنس سنگ مختلف وجود دارند که با توجه به جدول امتیازدهی، از امتیاز ۱ تا ۱۰، به عبارت دیگر از سست‌ترین جنس سنگ تا مقاوم‌ترین رتبه‌بندی شدند. سپس با توجه به مساحت هر زیرحوضه و به روش میانگین وزنی، این معیار به تفکیک برای هر زیرحوضه، کمی شد.

تراکم زهکشی، شکل حوزه، نسبت پستی و بلندی و میانگین طول آبراهه

نتیجه تعامل عوامل محیطی یک حوزه آبخیز، به‌صورت ویژگی‌های ژئومورفیک، قابل مشاهده و اندازه‌گیری است و شاخصی از فرآیند فرسایش و رسوب‌گذاری محسوب می‌شود که پایه و اساس بررسی‌های منابع‌طبیعی حوزه‌های آبخیز به‌شمار می‌رود (Ranjbar & Iranmanesh, 2007). برای این منظور به‌کمک مدل رقومی ارتفاع و نرم‌افزار ArcMap10.6.1 معیارهای مذکور محاسبه شد. رابطه‌های ۵ تا ۷ جهت محاسبه معیارهای تراکم زهکشی، شکل حوزه آبخیز و نسبت پستی و بلندی استفاده شد. همچنین برای محاسبه معیار میانگین طول آبراهه ابتدا به‌کمک نقشه شبکه آبراهه‌ها، آبراهه‌های متعلق به هر زیرحوضه به روش Strahler رتبه‌بندی شدند. سپس میانگین طول آبراهه، از طریق تقسیم مجموع طول آبراهه مورد نظر به تعداد آبراهه همان رتبه، برای ۱۴ زیرحوضه محاسبه شد (قادری و فاضلی ثانی، ۱۳۹۵).

رابطه (۵)
$$Dd = \frac{\sum X}{A}$$

که در آن $\sum X$ و A به‌ترتیب بیان‌گر مجموع طول آبراهه‌های هر زیرحوضه (کیلومتر) و مساحت هر زیرحوضه (کیلومترمربع) است (Horton, 1945).

رابطه (۶)
$$Ff = \frac{A}{Lb^2}$$

در این رابطه، A و Lb به‌ترتیب بیان‌گر مساحت هر زیرحوضه (km^2) و بلندترین طول زیرحوضه (کیلومتر) هستند (Horton, 1932).

رابطه (۷)
$$Rr = \frac{BF}{L_{SMAX}}$$

BF و L_{SMAX} به‌ترتیب بیان‌گر اختلاف ارتفاع هر زیرحوضه (کیلومتر) و بلندترین طول زیرحوضه (کیلومتر) است (Schumm, 1956).

تنوع سیمپسون

الگوهای چشم‌انداز ترکیبی از کاربری‌های اراضی در یک منطقه بوده که می‌تواند در قالب شاخص‌های مختلفی مورد بررسی قرار گیرد (Apan et al., 2002; Farina et al., 1988). تنوع سیمپسون نیز از جمله این شاخص‌ها به‌شمار می‌رود. این معیار، جنبه‌های مختلف ناهمگونی را در سطح چشم‌انداز نشان می‌دهد. به‌منظور محاسبه معیار تنوع سیمپسون، از نقشه کاربری اراضی و نرم‌افزار FRAGSTATES 4.2.1 استفاده شد و مقدار این معیار برای ۱۴ زیرحوضه به‌دست آمد.

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

معیارهای مورد استفاده جهت محاسبه شاخص پاسخ

فرسایش خاک

برای محاسبه این معیار به کمک نقشه سنگ‌شناسی و بازدیدهای میدانی صورت گرفته از منطقه، رخساره‌های فرسایشی منطقه طبق جدول (۵) که برگرفته از ضریب فرسایش به روش EPM[1] با توجه به شرایط منطقه است، از ۱ تا ۱۰ یا به عبارتی از ضعیف‌ترین تا مطلوب‌ترین وضعیت، رتبه‌بندی شدند. سپس از طریق نرم‌افزار ArcMap10.6.1 با توجه به مساحت هر زیرحوضه (هکتار) و به کمک میانگین وزنی، مقدار این معیار به تفکیک برای هر زیرحوضه، کمی شد.

جدول ۵- طبقه‌بندی فرسایش حوزه آبخیز رادکان

Table 5- Erosion classification of Radkan watershed

شرایط فرسایش حوزه آبخیز	رتبه
بدلند	1
بیش از ۸۰ درصد منطقه دارای فرسایش خندقی و یا عرصه‌هایی با فرسایش شیاری و آبراهه ی زیاد	2
۵۰ درصد منطقه دارای فرسایش خندقی یا فرسایش شیاری و آبراهه‌ای- کل منطقه دارای فرسایش سطحی	3
کل منطقه دارای فرسایش سطحی- فرسایش شیاری و آبراهه‌ای به صورت پراکنده	4
کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش عمیق (خندق ها، شیارها و واریزه‌ها)	5
۵۰ درصد منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش	6
۲۰ درصد منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش	7
فرسایش سطحی به صورت لکه لکه و جزئی (کمتر از ۲۰ درصد) – عرصه‌هایی با رخنمون بیرون‌زدگی سنگی به همراه واریزه	8
دامنه منظم از نوع کشت آبی و بدون آثار فرسایشی- عرصه‌هایی با رخنمون توده سنگی با واریزه‌های ریز و بلوکی	9
دامنه منظم- عرصه‌های فاقد فرسائی قابل‌رویت و دارای پوشش گیاهی مناسب با رخنمون توده سنگی بدون واریزه قابل مشاهده	10

شاخص‌های تراکم لکه، میانگین اندازه لکه، سنجه سرایت و میانگین نسبت محیط به مساحت

تراکم لکه یا شاخص تکه‌تکه‌شدگی بیانگر تعداد لکه در واحد سطح است. میانگین اندازه لکه بیانگر میزان یکنواختی لکه‌ها است. سنجه سرایت گرایش انواع لکه را به متراکم شدن نشان می‌دهد که بر حسب درصد بیان می‌شود و معیار نسبت محیط به مساحت، بیان‌کننده شکل لکه است و هر چه این نسبت کم‌تر باشد، شکل لکه بیش‌تر به سمت دایره میل می‌کند. در صورتی‌که تعداد لکه‌های انسان‌ساخت زیاد شود، میانگین نسبت محیط به مساحت لکه‌ها افزوده شده و مرز مشترک بیش‌تری با باقی‌مانده لکه‌های طبیعی خواهند داشت. جهت برآورد معیارهای مذکور از نقشه کاربری اراضی و نرم‌افزار FRAGSTATES 4.2.1 استفاده شد و مقادیر این معیارها برای ۱۴ زیرحوضه به‌دست آمد (معتمدی و همکاران، ۱۳۹۸).

استانداردسازی داده‌ها

لازم است که تمامی داده‌ها با توجه به سهم آن‌ها در سلامت بوم‌سازگان، به داده‌های استاندارد تبدیل شوند. در این مطالعه، از دو رابطه زیر استفاده شد:

$$X_i' = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \times 100$$ رابطه (۸)

$$X_i' = \frac{\max(X_i) - X_i}{\max(X_i) - \min(X_i)} \times 100$$ رابطه (۹)

i شماره معیارها و Xi و X'i به‌ترتیب داده‌های خام و داده‌های استاندارد معیار i هستند. هنگامی که سهم معیارها در سلامت بوم‌سازگان مثبت باشد، از رابطه (۸) و در صورت منفی بودن، از رابطه (۹) استفاده می‌شود (Liu & Hao, 2016).

تعیین وزن معیارها

یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره که کاربرد وسیعی در تعیین وزن شاخص‌ها دارد، روش AHP است. مراحل اصلی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به شرح زیر است:

(۱) تعیین هدف، معیارها و گزینه‌ها، (۲) ساختن نمایش گرافیکی سلسله مراتبی مسئله، (۳) انجام مقایسات زوجی، (۴) تعیین وزن‌ها و (۵) محاسبه نرخ سازگاری ماتریس‌های مقایسات زوجی (رضوی زاده و شاهدی، ۱۳۹۵)

[1] Erosion Potential Method

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

در این مطالعه نیز جهت تعیین وزن معیارها، از این روش استفاده شد.

محاسبه شاخص سلامت

در نهایت برای محاسبه شاخص سلامت حوزه آبخیز[1] (WHI) از رابطه زیر استفاده شد:

رابطه (۱۰)
$$WHI = PI + SI + RI$$

PI، SI و RI به‌ترتیب شاخص فشار، شاخص وضعیت و شاخص پاسخ هستند. روابط محاسباتی PI، SI و RI نیز به شرح زیر است:

رابطه (۱۱)
$$PI = \sum_{i=1}^{n=4} W_i \times X_i' \ (n = 1,2,3,4)$$

رابطه (۱۲)
$$SI = \sum_{i=5}^{n=11} W_i \times X_i' \ (n = 5,6,7,8,9,10,11)$$

رابطه (۱۳)
$$RI = \sum_{i=12}^{n=16} W_i \times X_i' \ (n = 12,13,14,15,16)$$

در روابط فوق، n دامنه شاخص ارزیابی است. Wi و X'i به‌ترتیب ضرایب وزن و داده‌های استانداردشده از معیار i هستند. با توجه به داده‌های استانداردشده از معیارها، امتیازات ارزیابی با استفاده از روابط فوق محاسبه خواهد شد. بر اساس نمرات ارزیابی و با استفاده از میانگین[2] (MV) و انحراف معیار[3] (SD) این نمرات، طبقه‌بندی سلامت آبخیز مودمطالعه به شرح زیر است:

نمره ارزیابی < (MV + 1.5 SD)، حوزه آبخیز در سطح سالم
نمره ارزیابی > (MV _ 1.5 SD)، حوزه آبخیز در سطح ناسالم
نمره ارزیابی < (MV + 1 SD)، حوزه آبخیز در سطح نسبتا سالم
نمره ارزیابی > (MV _ 1 SD)، حوزه آبخیز در سطح نسبتا ناسالم
و سایر نمرات ارزیابی در سطح متوسط سلامت هستند (Liu & Hao, 2016).

پس از محاسبه شاخص سلامت آبخیز، وضعیت سلامت در دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و روند تغییرات آن در سه دوره آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره تاریخی در ۱۴ زیرحوضه مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

متوسط بارش سالانه

در مطالعه حاضر نتایج جداول (۶) و (۷) نشان داد که روند تغییرات بارندگی در سناریوی SSP2-4.5 و بازه زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ به نسبت بازه زمانی تاریخی یعنی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ کاهش، در بازه زمانی ۲۰۷۵-۲۰۵۱ کمی افزایش و در نهایت در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۷۶ مجددا روند کاهشی را طی می‌کند. همچنین روند تغییرات بارندگی در سناریوی SSP5-8.5 و بازه زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ به نسبت بازه زمانی تاریخی یعنی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ افزایش، در بازه زمانی ۲۰۷۵-۲۰۵۱ کاهش و نهایتا در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۷۶ مجددا روند افزایشی را طی می‌کند. سرابی و همکاران (۱۳۹۹)، در پژوهش خود با موضوع بررسی تاثیر تغییر اقلیم آینده بر وضعیت دما و بارش حوزه آبخیز سد طرق مشهد، با استفاده از ترکیب وزنی چهار مدل AOGCM از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم از جمله مدل MPI-ESM1-2-HR تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 برای یک دوره پایه و چهار دوره آینده، پارامترهای دما و بارش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از بررسی پارامتر بارش، نشان‌دهنده وجود یک روند تغییر سینوسی در دوره‌های مختلف است، که با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.

جدول ٦- مقادیر استاندارد شده معیارهای مورد مطالعه در دوره تاریخی

Table 6- The standardized values of the studied criteria in the historical period

شاخص ها	فشار	وضعیت	پاسخ

[1] Watershed Health Index
[2] Mean Value
[3] Standard Deviation

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

X16	X15	X14	X13	X12	X11	X10	X9	X8	X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	زیرحوضه
0	0.50	0.04	0.20	1.00	0.24	1.00	0	0	0	0	0.77	0.99	0	0	0	1
0.79	0.51	0.40	0.80	0.50	0.56	0.03	0.61	0.16	0.40	0.48	0	1.00	0	0.29	0.23	2
0.05	0.41	0.28	0.69	0.25	0.33	0.15	0.65	0.15	0.71	0.84	0.34	1.00	0	0.53	0.45	3
0.38	0.53	0	0.02	0.50	0.24	0.11	1.00	1.00	0.54	0.63	0.26	0.99	0.99	0.30	0.23	4
0.14	0.72	0.03	0.13	0	0.70	0.25	0.67	0.81	0.47	1.00	0.65	0.49	0.96	0.51	0.42	5
0.90	0.44	0.91	0.98	0	0.50	0.15	0.24	0.02	0.77	0.96	0.76	0	0	0.68	0.61	6
0.96	0	0.70	0.93	0.25	0.30	0.02	0.42	0.34	0.45	0.84	0.54	1.00	0	0.78	0.72	7
0.25	0.46	0	0	0.25	0.37	0.17	0.34	0.30	0.57	0.63	0.63	0.72	0.92	0.58	0.49	8
1.00	1.00	1.00	1.00	0.75	1.00	0	0.34	0.41	0.90	0.32	0.36	1.00	0	0.77	0.70	9
0.13	0.15	0.04	0.19	0.25	0	0.56	0.38	0.11	0.80	0.71	0.72	0.14	0	1.00	1.00	10
0.53	0.41	0.23	0.64	0.25	0.33	0	0.55	0.18	0.34	0.70	0.72	0.62	0	0.86	0.81	11
0.47	0.28	0.11	0.41	0.25	0.02	0.44	0.40	0.17	0.80	0.71	0.87	0.51	0.90	0.90	0.87	12
0.25	0.45	0.32	0.73	0.25	0.37	0.06	0.62	0.26	1.00	0.68	0.81	0.13	0	0.81	0.75	13
0.07	0.45	0.05	0.23	0.25	0.24	0.61	0.28	0.10	0.73	0.52	1.00	0.33	0.94	0.91	0.88	14

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی:۲۴۲۳-۵۹۷۰

جدول ۷- مقادیر استاندارد شده معیارهای تحت اثر تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی آینده

SSP5-8.5			**SSP2-4.5**			**SSP5-8.5**			**SSP2-4.5**			**SSP5-8.5**			**SSP2-4.5**			سناریو
X5						**X2**						**X1**						معیار
2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	زیرحوضه
0.09	0	0.14	0	0.07	0.06	0	0.37	0.59	0	0.15	0.29	0.09	0	0.10	0	0.08	0.04	1
0.27	0.15	0.34	0.19	0.28	0.27	0.29	0.55	0.71	0.28	0.39	0.50	0.29	0.18	0.30	0.18	0.29	0.24	2
0.45	0.30	0.53	0.37	0.49	0.47	0.50	0.69	0.81	0.49	0.59	0.67	0.48	0.34	0.50	0.36	0.49	0.43	3
0.28	0.16	0.34	0.20	0.29	0.27	0.30	0.55	0.72	0.29	0.40	0.51	0.29	0.18	0.31	0.19	0.30	0.24	4
0.43	0.28	0.51	0.35	0.46	0.45	0.48	0.67	0.80	0.47	0.57	0.66	0.46	0.33	0.48	0.34	0.47	0.41	5
0.58	0.41	0.66	0.51	0.64	0.62	0.62	0.77	0.88	0.63	0.71	0.78	0.62	0.47	0.65	0.49	0.64	0.57	6
0.67	0.48	0.76	0.60	0.74	0.72	0.69	0.82	0.92	0.71	0.78	0.85	0.73	0.56	0.75	0.58	0.75	0.67	7
0.49	0.33	0.57	0.41	0.53	0.51	0.54	0.71	0.83	0.53	0.62	0.71	0.52	0.38	0.54	0.40	0.54	0.47	8
0.65	0.47	0.74	0.59	0.72	0.70	0.68	0.81	0.91	0.70	0.77	0.84	0.71	0.54	0.73	0.57	0.73	0.65	9
0.89	0.67	1.00	0.84	1.00	0.97	0.83	0.93	1.00	0.88	0.95	1.00	0.97	0.77	1.00	0.81	1.00	0.91	10
0.74	0.54	0.84	0.68	0.83	0.80	0.74	0.86	0.95	0.77	0.84	0.90	0.81	0.63	0.83	0.66	0.83	0.74	11
0.78	0.58	0.89	0.73	0.88	0.85	0.77	0.88	0.96	0.80	0.87	0.93	0.85	0.67	0.88	0.70	0.88	0.79	12
0.69	0.50	0.79	0.63	0.77	0.75	0.71	0.83	0.93	0.73	0.80	0.87	0.75	0.58	0.78	0.61	0.77	0.69	13
0.79	0.59	0.89	0.73	0.88	0.86	0.77	0.88	0.96	0.81	0.88	0.94	0.86	0.67	0.89	0.71	0.89	0.80	14

Table 7- Standardized values of criteria under the effect of climate change in future time periods

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

Iranian Journal of
Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی:۲۴۲۳-۵۹۷۰

تبخیر-تعرق پتانسیل

طبق نتایج به‌دست آمده از محاسبه معیار تبخیر-تعرق پتانسیل در بازه‌های زمانی مورد بررسی تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه در دوره‌های زمانی آینده به نسبت دوره تاریخی افزایش داشته و این افزایش مخصوصا در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۷۶ متعلق به سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریو SSP2-4.5 بیش‌تر بوده است. از طرفی با توجه به رابطه میان دو پارامتر ارتفاع و دما، در تمامی دوره‌های زمانی، در زیرحوضه ۱ که ارتفاع کم‌تری نسبت به سایر زیرحوضه‌ها دارد، مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل، بیشینه است (جداول ۶ و ۷). نتایج مطالعه Adugna Gurara و همکاران (۲۰۲۱) که در آن به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر روند تبخیر-تعرق پتانسیل و نیاز آبی محصولات زراعی در حوزه آبخیز Wabe Bridge اتیوپی پرداخته‌اند نیز با نتایج تحقیق حاضر سازگار است، زیرا این‌چنین بیان کرده‌اند که میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه به آرامی افزایش پیدا کرده و در سال ۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 در همه ایستگاه‌ها بسیار تشدید می‌شود. Lu و همکاران (۲۰۲۳) نیز در تحقیق خود به روند صعودی تبخیر-تعرق در آینده تحت مدل CMCC ESM2 از فاز ششم تغییر اقلیم اشاره دارند.

تراکم جمعیت

مطابق نتایج جدول (۶)، تراکم جمعیت در زیرحوضه ۱ بیش از سایر زیرحوضه‌هاست. تراکم جمعیت در این زیرحوضه می‌تواند بیانگر استفاده بیش‌تر انسان از منابع و ایجاد تغییرات در کاربری این زیرحوضه باشد. مساحت زمین‌های کشاورزی نیز در این زیرحوضه در مقایسه با سایر زیرحوضه‌ها بیش‌تر است که بر نتیجه مذکور صحه می‌گذارد. Liu و Hao (۲۰۱۶) و حزباوی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در مطالعه خود جهت برآورد سلامت آبخیز از طریق چهارچوب فشار-وضعیت-پاسخ، این معیار را به‌عنوان یکی از عوامل انسانی موثر در شاخص فشار، معرفی نموده اند.

مساحت زمین کشاورزی با شیب بالای ۲۵ درصد

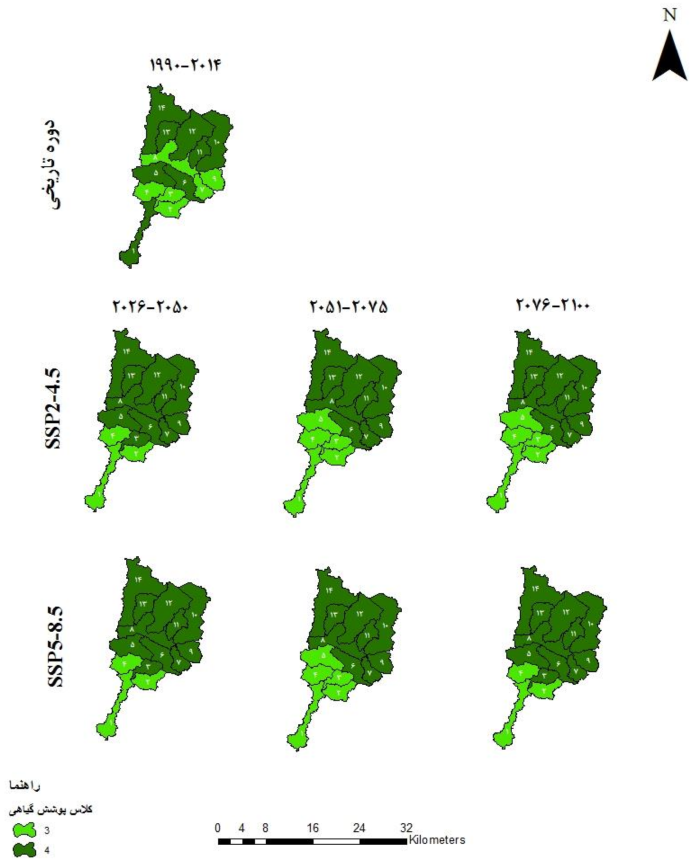
نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که زیرحوضه ۶ در مقایسه با سایر زیرحوضه‌ها دارای درصد بیش‌تری از زمین‌های کشاورزی با شیب بیش از ۲۵ درصد است. Hazbavi و همکاران (۲۰۱۹) و صادقی و همکاران (۱۳۹۷) نیز این معیار را به‌عنوان یک معیار انسانی موثر در شاخص فشار معرفی کرده و تاثیر آن را در سلامت آبخیز مورد بررسی قرار داده‌اند. مقادیر زمین کشاورزی با شیب بیش‌تر از ۲۵ درصد در تمامی زیرحوزه‌های آبخیز مورد مطالعه اندک بوده، که این امر سبب کاهش سهم این معیار در تعیین وضعیت سلامت حوزه آبخیز است.

شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)

نتایج حاصل از محاسبه این معیار در دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ طبق جدول (۶) نشان می‌دهد مقادیر شاخص NDVI، در دو کلاس ۳ و ۴، یعنی پوشش روی سنگ‌ها و پوشش درختچه‌ای و علفزار، قرار گرفته است. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر NDVI به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۱۴ و ۲ است. با توجه به برقراری رگرسیون بین مقادیر مشاهده‌ای NDVI و بارش و وجود رابطه معنی‌دار بین این دو پارامتر، مقادیر NDVI برای دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، توسط این رابطه برآورد شد. Eskandari Damaneh و همکاران (۲۰۲۱) نیز در مطالعه خود جهت بررسی روند تغییرات NDVI در آینده، از طریق برقراری رابطه بین این شاخص با دو پارامتر بارش و دما استخراج شده از مدل اقلیمی CanESM2 تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند که نتایج آن‌ها نشان داد میان NDVI و بارش رابطه مستقیم و معنی‌دار و میان NDVI و دما رابطه معکوس وجود دارد.

در مطالعه حاضر در تمامی دوره‌های آینده تحت هر دو سناریو میانه و خیلی‌بدبینانه، کلاس پوشش کل منطقه تغییری نداشته و شاخص NDVI در کلاس ۳ و ۴ دسته‌بندی شد، اما مقادیر NDVI زیرحوضه‌ها در دوره‌های مختلف زمانی آینده و تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، متغیر بوده است (جدول ۷). زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۴ که در طبقات پایین‌تر ارتفاعی قرار دارند، از گذشته به سمت آینده و در هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌دلیل کاهش بارندگی و افزایش دما از نظر پوشش گیاهی در کلاس ۳ قرار گرفتند. زیرحوضه‌های ۳، ۵ و ۶ نیز مقادیر متغیری از شاخص NDVI را در دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو میانه و خیلی بدبینانه به خود اختصاص دادند. زیر حوزه‌های ۷، ۸ و ۹ که در طبقات متوسط ارتفاعی قرار دارند و در دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ در کلاس ۳ پوشش گیاهی دسته‌بندی شده بودند، در هر دو سناریو میانه و خیلی‌بدبینانه و در تمامی بازه‌های زمانی آینده، شرایط بهتری از نظر پوشش پیدا کرده و در کلاس ۴ قرار گرفتند. زیرحوضه‌های ۱۰ تا ۱۴ که در طبقات بالای ارتفاعی قرار دارند، در دوره تاریخی و دوره‌های آینده تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از نظر پوشش در کلاس ۴ قرار داشتند که دلیل آن میزان بارش بیش‌تر و دمای کم‌تر در این زیرحوضه‌هاست (شکل ۴). اخوان و همکاران (۱۳۹۷) نیز در مطالعه خود چنین بیان کردند که تغییرات NDVI تیپ‌های گیاهی یکسان در ماه‌های مختلف سال، با افزایش ارتفاع و تغییر طبقات دمایی در یک منطقه کوهستانی، می‌تواند تحت تاثیر افزایش دما، کاهش یابد.

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5] [Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]



شکل ٤- تغییرات NDVI در دوره تاریخی و دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو میانه و خیلی‌بدبینانه

Figure 4- NDVI changes in the historical period and future time periods under two medium and very pessimistic scenarios

حساسیت ذاتی واحدهای سنگ و خاک به فرسایش

مطابق جدول طبقه‌بندی حساسیت ذاتی سنگ‌ها نسبت به فرسایش، به مقاوم‌ترین جنس سنگ امتیاز ۱۰ و به سست‌ترین جنس سنگ امتیاز ۱ تعلق گرفت. بر اساس نتایج جدول (۶)، زیرحوضه ۱ دارای سست‌ترین و زیرحوضه‌های ۵ و ۶ دارای مقاوم‌ترین جنس سنگ‌ها هستند. ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی با توجه به نقش آن‌ها در فرسایش و تولید رسوب، در بررسی‌های مربوط به فرسایش و حفاظت خاک از اهمیت زیادی برخوردار هستند.

تراکم زهکشی

طبق نتایج جدول (۶)، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تراکم زهکشی به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۱ و ۱۴ است. تراکم زهکشی بالا بیانگر وجود آبراهه‌های تکتونیکی (سنگی) و یا آبراهه‌های فرسایشی (خاکی) در زیرحوضه‌های مورد مطالعه است. آبراهه‌های تکتونیکی می‌تواند سبب تخلیه سریع رواناب و افزایش پیک هیدروگراف سیل شود و از اثرات منفی آبراهه‌های فرسایشی می‌توان به فرسایش زیاد زیرحوضه اشاره کرد. در تحلیل وضعیت شبکه زهکشی زیرحوضه ۱ که بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده است می‌توان به جنس سنگ‌های حساس موجود در این زیرحوضه نیز اشاره کرد، زیرا وجود مواد زیرسطحی ضعیف با نفوذپذیری کم، باعث ایجاد آبراهه‌های فرسایشی و در نهایت تراکم زهکشی بالا می‌شود. Alilou و همکاران (۲۰۱۹) و صادقی و همکاران (۱۴۰۱) نیز در مطالعه خود تراکم زهکشی را به‌عنوان یک معیار مورفومتری موثر در تعیین وضعیت سلامت حوزه آبخیز معرفی کرده‌اند.

شکل حوزه

طبق نتایج به‌دست آمده از این معیار در جدول (۶)، کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۱ و ۴ است. از آن‌جایی که هرچه مقدار فاکتور شکل کم‌تر باشد، حوزه آبخیز کشیده‌تر خواهد بود، در مطالعه حاضر زیرحوضه ۱ کشیده‌ترین و زیرحوضه ۴ به‌عنوان

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

گردترین زیرحوضه در نظر گرفته شده است. این ضریب تاثیر مستقیمی بر زمان تمرکز و سرعت انتقال جریان به خروجی حوزه آبخیز دارد. بنابراین حوزه‌های گرد دارای جریان‌های اوج بالاتر با مدت‌زمان کم‌تر و حوزه‌های کشیده دارای جریان اوج کم‌تر با مدت‌زمان بیش‌تری هستند. می‌توان گفت زیرحوضه ۴ که به‌عنوان گردترین زیرحوضه شناخته شده است، بیش‌تر در معرض خطر سیلاب‌های شدید و مخرب قرار دارد.

نسبت پستی و بلندی

مطابق نتایج جدول (۶)، بیش‌ترین مقدار این معیار متعلق به زیرحوضه ۴ و کم‌ترین مقدار متعلق به زیرحوضه ۱ است. افزایش مقادیر این معیار می‌تواند نشان‌دهنده احتمال وجود مناطق با ارتفاع بیش‌تر و به‌دنبال آن دمای کم‌تر و بارش بیش‌تر باشد. زنگنه اسدی و ناعمی تبار (۱۴۰۰) جهت بررسی رابطه بین ویژگی‌های ژئومورفیک و بار رسوبی معلق و مددی و همکاران (۱۳۹۹) نیز به‌منظور مطالعه رابطه بین ویژگی‌های ژئومورفیک و تولید رسوب، از معیار نسبت پستی و بلندی به‌عنوان یکی از ویژگی‌های ژئومورفیک موثر بهره برده‌اند.

میانگین طول آبراهه

طبق نتایج جدول (۶)، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار این معیار به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۱ و ۹ است. این معیار غالبا در ارتباط با شبکه زهکشی حوزه آبخیز است. میانگین طول آبراهه با افزایش رتبه، افزایش می‌یابد. این مورد در مطالعه قادری و فاضلی ثانی (۱۳۹۵) نیز گزارش شده است.

تنوع سیمپسون

بیش‌ترین مقدار این معیار متعلق به زیرحوضه ۱۰ و کم‌ترین آن مربوط به زیرحوضه ۹ آبخیز مورد مطالعه است (جدول ۶). این معیار تنوع، بیانگر میزان ناهمگونی در سطح سرزمین است و هرچه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده یکنواختی و تنوع و تعدد کم‌تر لکه‌هاست. می‌توان نتیجه گرفت زیرحوضه ۹ به نسبت سایر زیرحوضه‌ها یکپارچه‌تر بوده و تخریب کم‌تری در آن اتفاق افتاده است.

فرسایش خاک

طبق جدول (۶)، بیش‌ترین میزان فرسایش به زیرحوضه ۱ و کم‌ترین میزان فرسایش به زیرحوضه‌های ۵ و ۶ تعلق گرفت. این نتیجه با نتیجه حاصل از معیار حساسیت ذاتی واحدهای سنگ و خاک به فرسایش، هم‌خوانی دارد. زیرحوضه ۱ دارای حساس‌ترین جنس سنگ‌ها است که این عامل در ایجاد فرسایش بیش‌تر این زیرحوضه نقش مهمی دارد. Mosaffaie و همکاران (۲۰۲۱) و Sadeghi و همکاران (۲۰۱۹) نیز در مطالعه خود فرسایش خاک را به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مشکلات موثر بر سلامت آبخیز معرفی نموده‌اند.

تراکم لکه

بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار این معیار به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۸ و ۹ است (جدول ۶). مقادیر بالای معیار تراکم لکه، نشان‌دهنده میزان تکه‌تکه‌شدگی بیش‌تر اراضی موجود در زیرحوضه‌های مورد مطالعه است، که این امر افزایش نرخ فرسایش و رسوب را به همراه خواهد داشت. نتایج تحقیق Ouyang و همکاران (۲۰۱۰) نیز با نتیجه فوق هم‌خوانی داشت. به این صورت که آن‌ها نتیجه گرفتند تراکم لکه به عنوان یک از سنجه‌های مهم سیمای سرزمین، همبستگی قابل توجهی با فرسایش خاک دارد.

میانگین اندازه لکه

طبق نتایج جدول (۶)، بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر این معیار به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۹ و ۸ است. هر چه مقدار این معیار کم‌تر باشد، بیانگر یکنواختی کمتر و تنوع بیش‌تر لکه‌ها در سطح سیمای‌سرزمین است که تخریب و فرسایش بیش‌تری به دنبال خواهد داشت. اسمعلی‌عوری و کاتب (۱۳۹۹) نیز در مطالعه خود به نتیجه مشابه یعنی وجود رابطه معنی‌دار بین سنجه میانگین اندازه لکه و فرسایش خاک اشاره کردند.

سنجه سرایت

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار این معیار به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۹ و ۷ است. مقادیر بالای این معیار نشان‌دهنده وجود لکه‌های نزدیک بهم است. زمانی که لکه‌های بزرگ در فواصل دور از هم قرار دارند، مقدار این معیار کاهش می‌یابد. دهمرده بهروز و همکاران (۱۴۰۲) نیز در مطالعه خود این سنجه را مورد بررسی قرار داده‌اند.

میانگین نسبت محیط به مساحت

هر چه تعداد لکه‌های انسان‌ساخت موجود در منطقه بیش‌تر باشد، میانگین نسبت محیط به مساحت نیز افزایش می‌یابد. در این‌صورت لکه‌های انسان‌ساخت مرز مشترک بیش‌تری با لکه‌های طبیعی خواهند داشت که این امر می‌تواند سبب تخریب پوشش گیاهی طبیعی

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

موجود در منطقه شود. در مطالعه حاضر، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار این معیار به‌ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های ۱ و ۹ است (جدول ۶). این مورد در مطالعه معتمدی و همکاران (۱۳۹۸) نیز گزارش شده است.

تعیین وزن معیارها

در تعیین وزن معیارها به روش تحلیل سلسله مراتبی AHP، نتایج به شرح جدول (۸) حاصل شد. طبق نتایج حاصله در اولویت‌بندی معیارها، پوشش گیاهی و فرسایش خاک جزو مهم‌ترین عوامل موثر بر سلامت آبخیز رادکان شناخته شده‌اند. Mosaffaie و همکاران (۲۰۲۱) نیز از این روش جهت تعیین وزن معیارهای موثر در سلامت حوزه آبخیز استفاده کرده‌اند.

جدول ۸- وزن معیارهای مورد مطالعه

Table 8- The weight of the studied criteria

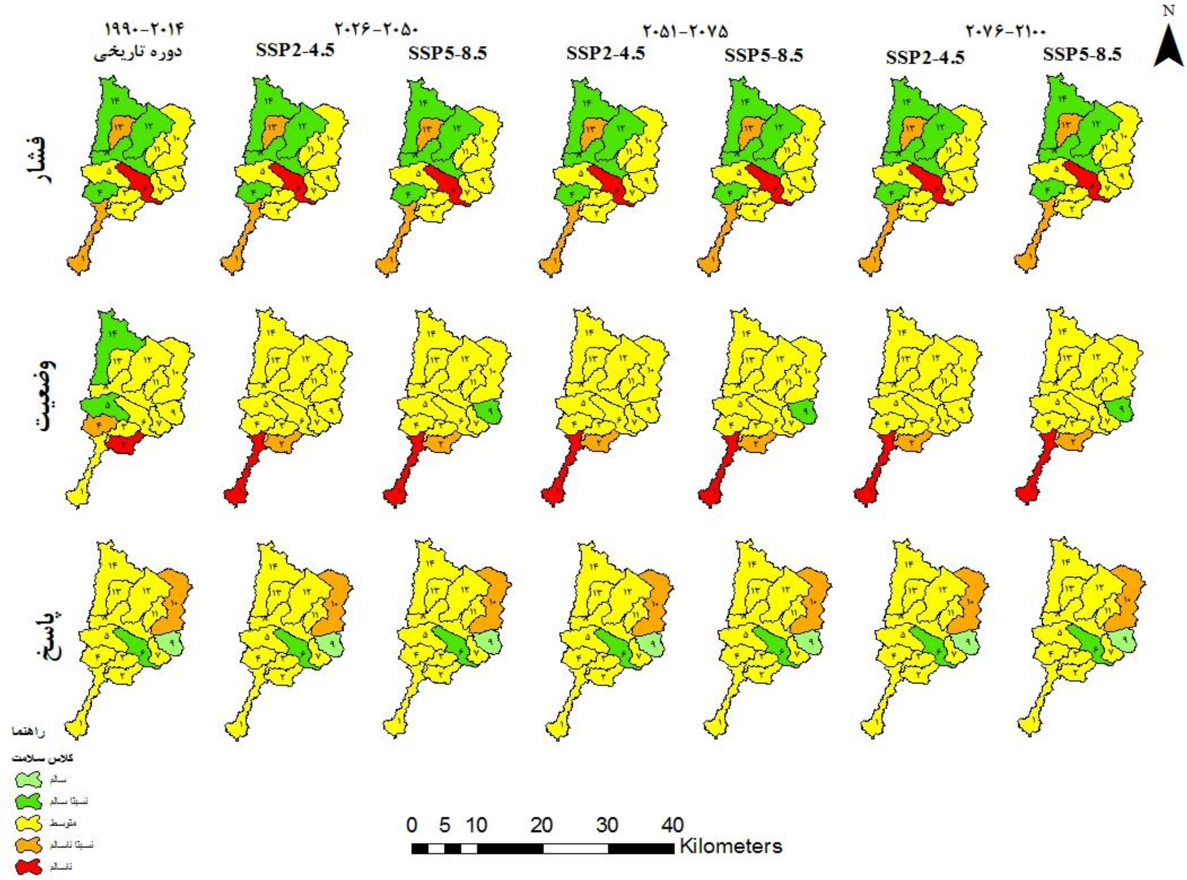
معیارها	وزن نهایی
شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)	0.3838
فرسایش خاک	0.1553
متوسط بارش سالانه	0.1543
سنجه‌های سیمای سرزمین	0.1482
حساسیت ذاتی واحدهای سنگ و خاک نسبت به فرسایش	0.0895
معیارهای ژئومورفیک	0.0343
تبخیر-تعرق پتانسیل	0.0345

بررسی شاخص سلامت

بررسی سلامت آبخیز در دوره تاریخی

مطابق نتایج جدول (۹)، زیرحوضه‌های ۱ و ۱۰ در وضعیت نسبتا ناسالم، زیرحوضه ۹ در وضعیت سالم و مابقی زیرحوضه‌ها در کلاس متوسط سلامت قرار دارند (شکل ۶). در توضیح زیرحوضه ۱ می‌توان بیان کرد با توجه به این‌که این زیرحوضه در پایین‌دست قرار گرفته و کم‌ترین ارتفاع را در بین تمامی زیرحوضه‌ها داراست، لذا بیش‌ترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل و کم‌ترین مقدار بارش را به خود اختصاص داده است. از آن‌جایی که حساس‌ترین جنس سنگ‌ها نیز در این زیرحوضه قرار دارند، بالاترین مقادیر تراکم زهکشی و فرسایش خاک نیز به این زیرحوضه تعلق گرفته است. هم‌چنین تراکم جمعیت و به دنبال آن میانگین نسبت محیط به مساحت لکه‌های انسان‌ساخت نیز در این زیرحوضه بیشینه است که این امر می‌تواند سبب تخریب پوشش گیاهی منطقه شود. به‌طور کلی این زیرحوضه از نظر شاخص فشار در طبقه نسبتا ناسالم و از نظر شاخص وضعیت و پاسخ در شرایط متوسطی قرار گرفته است (شکل ۵). این موضوع می‌تواند بیان کند زیرحوضه ۱ دستخوش تغییرات نسبتا زیادی شده است اما نتوانسته پاسخ مناسب یا به‌عبارت دیگر انعطاف‌پذیری مطلوبی در برابر فشارهای وارده ارائه دهد که نتیجه آن وضعیت سلامت نسبتا ناسالم این زیرحوضه است. این نتیجه با نتایج تحقیق Ahn و Kim (۲۰۱۷) که در مطالعه خود به کاهش درجه سلامت در مناطق پایین‌دست آبخیز به‌دلیل افزایش میزان دخالت‌های انسانی اشاره کرده‌اند و هم‌چنین نتایج Alaei و همکاران (۲۰۲۰) مبنی بر بالابودن حساسیت بوم‌شناختی در مناطق پایین‌دست به نسبت مناطق بالادست، هم‌خوانی دارد. زیرحوضه ۱۰ از نظر شاخص فشار و وضعیت در طبقه متوسط و از نظر شاخص پاسخ در طبقه نسبتا ناسالم قرار دارد. این موضوع بیانگر پاسخ نامناسب این زیرحوضه در برابر فشارهای وارده به آن است. وجود کاربری‌های مختلف در این زیرحوضه نیز عاملی از کاهش درجه سلامت بوده که این موضوع در معیار تنوع سیمپسون دیده می‌شود. این زیرحوضه بیش‌ترین مقدار تنوع سیمپسون یا به‌عبارت دیگر بیش‌ترین تنوع لکه‌های انسان‌ساخت و کم‌ترین یکنواختی را در میان تمامی زیرحوضه‌ها داراست. شاخص فشار و وضعیت زیرحوضه ۹ در طبقه متوسط و شاخص پاسخ این زیرحوضه در طبقه سالم قرار گرفته‌اند. این موضوع بیان می‌کند که زیرحوضه ۹ توانسته است در برابر فشارهای وارده عکس‌العمل مناسبی ارائه دهد. از نظر معیارهای سیمای‌سرزمین از جمله تراکم لکه، میانگین اندازه لکه، سنجه سرایت و میانگین نسبت محیط به مساحت، این زیرحوضه بهترین وضعیت را در مقایسه با سایر زیرحوضه‌ها داراست. در پژوهش مصطفی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز به این موضوع اشاره شده است که هرچه پیوستگی در سطح سیمای سرزمین بیش‌تر باشد، میزان شکاف بین لکه‌ها کاهش می‌یابد که نشان از شرایط مطلوب‌تر بوم‌سازگان است. لذا می‌توان نتیجه گرفت کم‌ترین تنوع لکه، کم‌ترین میزان تکه‌تکه‌شدگی و بیش‌ترین یکنواختی به این زیرحوضه تعلق دارد که این امر سبب شده است زیرحوضه ۹ از نظر وضعیت سلامت، در طبقه سالم قرار گیرد.

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]



شکل ۵- تغییرات شاخص های فشار، وضعیت و پاسخ در دوره تاریخی و دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو

Figure 5- Changes in pressure, state and response indicators in the historical period and future time periods under two scenarios

بررسی سلامت آبخیز در سه دوره آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5

نتایج جدول (۹) نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ تحت سناریوی SSP2-4.5 نسبت به دوره تاریخی، وضعیت سلامت زیرحوضه ۱ از طبقه نسبتا ناسالم به ناسالم و زیرحوضه ۱۰ از طبقه نسبتا ناسالم به متوسط تغییر یافت و سایر زیرحوضه‌ها بدون تغییر باقی مانده‌اند (شکل ۶). از آن‌جایی که زیرحوضه ۱ در پایین‌دست قرار گرفته، در تمامی دوره‌های زمانی آینده تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از نظر شاخص فشار در طبقه نسبتا ناسالم قرار دارد و کم‌ترین میزان بارش و بیش‌ترین مقدار تبخیر–تعرق پتانسیل را به خود اختصاص داده است. از طرفی از نظر شاخص وضعیت نیز در طبقه ناسالم قرار گرفته است زیرا به نسبت دوره تاریخی، پوشش گیاهی نیز در این زیرحوضه به اندازه یک کلاس افت پیدا کرده است، لذا این زیرحوضه از نظر وضعیت سلامت، در طبقه ناسالم قرار دارد. Singh و همکاران (۲۰۲۲) نیز در مطالعه خود که به بررسی تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز رودخانه Marshyangdi در Nepal پرداخته‌اند نیز بیان کردند وضعیت سلامت رودخانه تحت سناریوها و دوره‌های آتی کاهش می‌یابد. هم‌چنین Ross و Randhir (۲۰۲۲) که اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت آب حوزه‌های آبخیز ساحلی خلیج Narragansett را مورد بررسی قرار دادند، نتیجه گرفتند که تغییر اقلیم در آینده اثرات منفی بر سیستم ساحلی خواهد داشت. در توضیح وضعیت زیرحوضه ۱۰ که از نظر سلامت در بازه زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۶ تحت سناریوی SSP2-4.5 یک طبقه ارتقا پیدا کرده است، می‌توان گفت چون این زیرحوضه بیش‌ترین ارتفاع را در بین ۱۴ زیرحوضه دارد، در تمامی دوره‌های زمانی آینده تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بیش‌ترین مقدار بارش و کم‌ترین میزان تبخیر–تعرق پتانسیل را به خود اختصاص داده است. این موضوع توانسته است شاخص فشار را در این زیرحوضه کاهش داده تا از نظر سلامت در طبقه متوسط قرار گیرد. در دو دوره ۲۰۷۵–۲۰۵۱ و ۲۱۰۰–۲۰۷۶ از SSP2-4.5 و هر سه دوره آینده SSP5-8.5، طبقه سلامت در تمامی زیرحوضه‌ها ثابت و بدون تغییر بود. دامنه مقادیر سلامت متغیر بوده اما طبقه کیفی آن بدون تغییر باقی مانده است. در این مطالعه جهت پیش‌نگری وضعیت سلامت در آینده تحت پارامترهای اقلیمی، از معیارهای متوسط بارش سالانه، تبخیر–تعرق پتانسیل و شاخص

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) استفاده شده است. نتایج نشان داد که میان سری داده‌های بارش روند معنی‌داری وجود نداشت، از طرفی با توجه به اینکه میان داده‌های دما روند معنی‌دار وجود داشت و معیار تبخیر-تعرق در آینده تحت هر دو سناریو میانه و خیلی بدبینانه، افزایش پیدا کرد اما چون در مرحله تعیین وزن معیارها به روش AHP، وزن کمی به این شاخص تعلق گرفت، می‌توان این‌چنین بیان کرد که این دو معیار یعنی متوسط بارش سالانه و تبخیر-تعرق پتانسیل در تعیین وضعیت سلامت آبخیز سهم زیادی نداشتند. از جنبه معیار NDVI نیز با توجه به این‌که پیش‌نگری آن در دوره‌های آینده تحت دو سناریو میانه و خیلی بدبینانه، از طریق رابطه این معیار با معیار بارش صورت گرفت و از طرفی بین مقادیر NDVI روند معنی‌دار وجود نداشت، این معیار نیز نقش زیادی در تغییرات سلامت آبخیز نداشت. ثابت ماندن طبقه کیفی سلامت آبخیز رادکان در دوره‌های آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می‌تواند نتیجه چنین تغییراتی باشد.

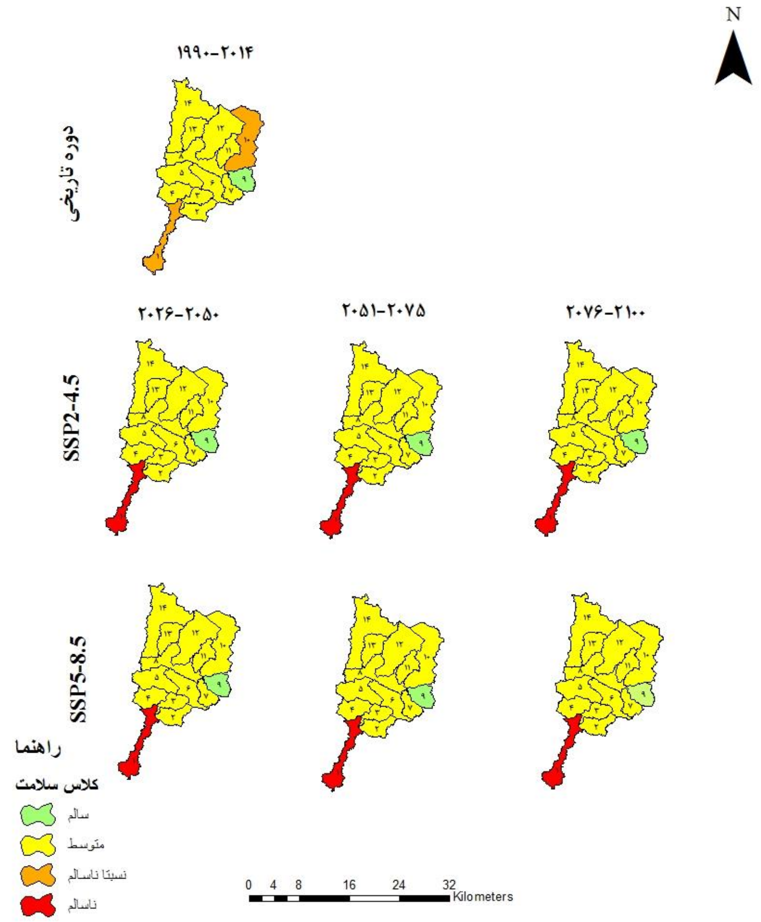
جدول ۹- مقادیر شاخص سلامت در دوره تاریخی و دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو

Table 9- Health index values in the historical period and future time periods under two scenarios

	دوره تاریخی		**SSP2-4.5**			**SSP5-8.5**	
زیرحوضه	1990-2014	2026-2050	2051-2075	2076-2100	2026-2050	2051-2075	2076-2100
1	0.78	0.52	0.53	0.48	0.57	0.49	0.53
2	0.81	0.92	0.93	0.87	0.96	0.87	0.92
3	0.80	0.85	0.86	0.80	0.89	0.77	0.84
4	0.84	0.85	0.86	0.81	0.90	0.80	0.86
5	0.96	0.89	0.90	0.84	0.93	0.82	0.89
6	1.09	1.03	1.05	0.97	1.07	0.94	1.02
7	1.08	1.14	1.16	1.08	1.17	1.03	1.13
8	0.88	0.84	0.85	0.78	0.88	0.76	0.83
9	1.36	1.49	1.51	1.43	1.52	1.38	1.47
10	0.73	0.81	0.83	0.74	0.83	0.67	0.78
11	0.98	1.00	1.02	0.94	1.03	0.88	0.98
12	1.06	1.05	1.07	0.98	1.07	0.92	1.02
13	0.95	0.92	0.94	0.86	0.95	0.81	0.91
14	1.04	0.97	0.99	0.90	1.00	0.85	0.95
میانگین	0.95	0.95	0.97	0.89	0.98	0.86	0.94
انحراف معیار	0.17	0.21	0.22	0.21	0.21	0.20	0.21

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]



شکل ٦- تغییرات شاخص سلامت آبخیز در دوره تاریخی و دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو

Figure 6- Changes in watershed health index in the historical period and future time periods under two scenarios

درصد تغییر شاخص سلامت آبخیز در دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره تاریخی

نتایج نشان می‌دهد به‌ترتیب در دوره‌های زمانی ۲۰۵۰–۲۰۲۶، ۲۰۷۵–۲۰۵۱ و ۲۱۰۰–۲۰۷۶ تحت سناریو SSP2-4.5، میانگین کاهش سلامت آبخیز در مقایسه با دوره تاریخی برابر با ۸.۸۴، ۸.۴۹ و ۱۱.۱۱ درصد است. نتایج حاصل از تغییرات دوره‌های زمانی آینده تحت سناریو SSP5-8.5 بیانگر این است که به‌ترتیب در سه دوره ۲۰۵۰–۲۰۲۶، ۲۰۷۵–۲۰۵۱ و ۲۱۰۰–۲۰۷۶ میانگین کاهش شاخص سلامت آبخیز برابر با ۷.۳۳، ۱۳.۰۴ و ۹.۸۵ درصد است. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین کاهش شاخص سلامت در دوره زمانی ۲۰۷۵–۲۰۵۱ تحت سناریو SSP5-8.5، در تعداد ۱۲ زیرحوضه اتفاق افتاده است. از طرفی بیش‌ترین کاهش شاخص سلامت در میان زیرحوضه‌ها، متعلق به زیرحوضه ۱ است. در یک مقایسه زیرحوضه‌ای نیز می‌توان چنین بیان کرد که از نظر شاخص سلامت، زیرحوضه‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۱۳ و ۱۴ در هر سه دوره آینده تحت سناریو SSP2-4.5 به نسبت دوره تاریخی روند کاهشی داشته‌اند. در سناریو SSP5-8.5 نیز شاخص سلامت در تمامی زیرحوضه‌های ذکر شده به جز زیرحوضه ۱۳ در هر سه دوره زمانی آینده کاهش می‌یابد. زیرحوضه‌های ۳، ۴، ۱۱ و ۱۲ در بازه‌های زمانی آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، روندهای متغیری از افزایش و کاهش را نشان می‌دهند. این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیق نیکویی و همکاران (۱۴۰۱) هم‌خوانی دارد. در پژوهش مذکور اثر تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز سد فریمان بررسی شده است، نتایج حاکی از کاهش شاخص سلامت در تعداد بیش‌تری از زیرحوضه‌ها به‌دلیل افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش دما، است. هم‌چنین در مطالعه حاضر در زیرحوضه‌های ۲، ۷، ۹ و ۱۰ در سه دوره آینده تحت سناریو میانه و زیرحوضه‌های ۲ و ۹ در هر سه دوره زمانی تحت سناریو خیلی بدبینانه، شاخص سلامت در مقایسه با دوره تاریخی افزایش یافته است (جدول ۱۰).

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

جدول ۱۰- درصد تغییرات شاخص سلامت در دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مقایسه با دوره تاریخی
Table 10- Percentage change of health index in the future time periods under two SSP2-4.5 and SSP5-8.5 senarios compared to the historical period

زیرحوضه	SSP2-4.5 2026-2050	SSP2-4.5 2051-2075	SSP2-4.5 2076-2100	SSP5-8.5 2026-2050	SSP5-8.5 2051-2075	SSP5-8.5 2076-2100
1	-33.00	-32.27	-38.01	-26.46	-36.37	-31.68
2	13.77	15.00	8.15	19.23	7.33	14.16
3	6.46	8.20	-0.11	11.25	-3.23	5.84
4	1.75	2.96	-3.69	6.99	-4.55	2.10
5	-7.64	-6.24	-12.99	-3.62	-15.37	-8.06
6	-5.35	-3.83	-10.67	-2.22	-14.14	-6.41
7	5.7	7.49	0.05	8.68	-4.29	4.27
8	-4.98	-3.32	-11.09	-0.79	-14.34	-5.75
9	9.13	10.46	4.65	11.46	1.32	7.99
10	11.59	14.74	1.69	15.00	-7.77	7.68
11	2.47	4.50	-4.19	5.44	-9.73	0.39
12	-1.61	0.34	-7.91	0.99	-13.40	-3.74
13	-3.06	-1.07	-9.66	0.14	-14.85	-4.91
14	-6.22	-4.20	-12.71	-3.55	-18.41	-8.43

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر جهت ارزیابی شاخص سلامت آبخیز مورد مطالعه در دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ نشان داد که اکثر زیرحوضه‌های مورد مطالعه از نظر طبقه سلامت، در وضعیت متوسط قرار دارند. زیرحوضه ۱ از جهت بسیاری از معیارهای طبیعی و انسانی مورد مطالعه، در بدترین وضعیت بود که نتیجه آن قرارگیری این زیرحوضه در طبقه نسبتا ناسالم است. عوامل انسانی در کاهش سلامت زیرحوضه ۱۰ نقش بیش‌تری از عوامل طبیعی داشته‌اند. قرارگیری زیرحوضه ۹ در طبقه سالم نیز نشان داد که این زیرحوضه اغلب از جنبه معیارهای انسانی در شاخص پاسخ، وضعیت مطلوبی داشته است. نتایج حاصل از ارزیابی شاخص سلامت در هر سه دوره آینده تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، نیز نشان داد که در اکثر زیرحوضه‌ها، کاهش در مقادیر شاخص سلامت اتفاق افتاده است، اما کلاس سلامت اغلب زیرحوضه‌ها، متوسط است. به بیان دیگر در کل سطح حوزه آبخیز رادکان در دوره‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۶ تحت سناریو میانه به‌ترتیب ۶۲/۰۴، ۴۹/۷۹ و ۷۴/۸۱ درصد و در سناریو خیلی‌بدبینانه نیز به‌ترتیب ۴۴/۹۰، ۹۰/۹۷ و ۶۲/۰۴ درصد کاهش سلامت به نسبت دوره تاریخی، رخ خواهد داد.

تمامی مدل‌های ارائه شده در زمینه ارزیابی سلامت آبخیزها از جمله مدل PSR، تنها قابلیت برآورد شاخص سلامت به‌صورت نسبی برای یک منطقه را دارا هستند. یعنی در نهایت زیرحوضه‌های یک منطقه با یکدیگر مقایسه می‌شوند و یا تغییرات یک حوزه آبخیز در بازه‌های زمانی مختلف ارزیابی می‌شود اما امکان مقایسه شاخص سلامت یک منطقه با منطقه‌ای دیگر وجود ندارد. اگر استانداردی برای مدل‌ها تعریف شود، آن‌ها می‌توانند سلامت را به‌صورت مطلق بررسی نموده و امکان مقایسه بین حوزه‌های آبخیز در نقاط مختلف در مقیاس جهانی فراهم می‌شود.

علاوه‌بر این بهتر است نحوه امتیازدهی به معیارها با توجه به پتانسیل منطقه باشد. به‌عنوان مثال در پژوهش حاضر، منطقه از نظر شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، دارای مقادیر نسبتا کم یعنی پوشش نسبتا کم‌تراکم است این در حالی است که این حوزه آبخیز پتانسیل پوشش بیش‌تر از این مقدار را ندارد زیرا بیش از ۵۰٪ منطقه دارای رخنمون سنگی است و درصد کمی خاک وجود دارد. لذا شاید در بهترین حالت هم پوشش گیاهی منطقه از این مقدار فراتر نرفته و کلاس NDVI تغییری نداشته باشد اما نحوه امتیازدهی به معیارها باعث می‌شود پوشش این منطقه به نسبت سایر مناطق با پتانسیل بالای پوشش گیاهی، ضعیف به حساب آید.

ملاحظات اخلاقی

دسترسی به داده‌ها: دسترسی به داده‌های تحقیق از طریق ارتباط با نویسندگان مقاله قابل حصول است.

حمایت مالی: این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد و با کد ۵۶۵۲۲ انجام شده است.

مشارکت نویسندگان: آتنا نژاد رحیم به‌عنوان دانشجو و علی گلکاریان و آذر زرین به‌عنوان اساتید راهنما و مشاور در انجام تحقیق و نگارش مقاله نقش داشته‌اند.

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این تحقیق ندارند.

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]
[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

سپاس‌گزاری: نویسندگان این مقاله، از کلیه همکاران دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد که در اجرای این تحقیق همیاری نموده‌اند کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

۱. اخوان، حسان، عموشاهی، سولماز. و ستوده، احد (۱۳۹۷). بررسی تغییرات NDVI حاصل از تیپ پوشش گیاهی یکسان در طبقات مختلف دمایی کوهستان (مطالعه موردی: کوهستان شیرکوه استان یزد). *انسان و محیط زیست*، ۱۶(۱)، ۵۳–۶۴. **https://journals.srbiau.ac.ir/article_12383.html**

۲. اسمعلی‌عوری، اباذر. و کاتب، فاطمه (۱۳۹۹). بررسی پتانسیل فرسایش خاک با دخالت سنجه‌های سیمای‌سرزمین (مطالعه موردی: حوزه آبریز شریف بیگلو، استان اردبیل). *هیدروژئومورفولوژی*، ۶(۲۴)، ۱۶۴–۱۴۵. **doi: 10.22034/hyd.2020.41552.1543**

۳. 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*، ۶(۳)، ۱۲۱–۱۴۲. **https://www.sid.ir/paper/412661/fa**

۴. دهمرده بهروز، رضا، برهانی، محمد. و گنجعلی، مجتبی. (۱۴۰۲). واکاوی تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین در یک دوره ۳۰ ساله (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تجن). *مطالعات علوم محیط زیست*، ۸(۲)، ۶۶۰۳–۶۶۱۱. **doi: 10.22034/JESS.2023.365151.1888**

۵. رضوی‌زاده، سمانه. و شاهدی، کاکا. (۱۳۹۵). اولویت بندی سیل‌خیزی زیرحوزه‌های آبخیز طالقان با استفاده از تلفیق AHP و TOPSIS. *اکوسیستم‌های طبیعی ایران*، ۷(۴)، ۳۳–۴۶. **doi: 20.1001.1.22517480.1399.9.3.8.0**

۶. زنگنه اسدی، محمدعلی، ناعمی تبار، مهناز. (۱۴۰۰). ارتباط بین ویژگی‌های هیدروژئومورفیک و بار رسوبی معلق زیرحوضه‌های کشف‌رود. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۸(۱)، ۱۱۱–۱۲۸. **https://civilica.com/doc/1280006**

۷. سرابی، مجتبی، دستورانی، محمدتقی. و زرین، آذر (۱۳۹۹). بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد). *هواشناسی و علوم جو*، ۳(۱)، ۸۳–۶۳. **doi: 10.22034/JMAS.2021.278862.1129**

۸. صادقی، سیدحمیدرضا، ابراهیمی گت کش، زهرا، جعفری، فائزه. و فرضی، پریسا (۱۳۹۷). ارزیابی سلامت حوزه آبخیز آسیاب رود با مدل مفهومی فشار–حالت–پاسخ. *سیزدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران و سومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، ۱۰ و ۱۱ مهر ۱۳۹۷، دانشگاه محقق اردبیلی*. **https://civilica.com/doc/827403**

۹. صادقی، سیدحمیدرضا، طاوسی، محمد، زارع، سمیه، بیرانوندی، وحید، شکوهیده، هنگامه، اکبری امامزاده، فاطمه، بهلکه، مرجان، خورشید سخن‌گوی، فائزه. و چمنی، رضا. (۱۴۰۱). ارزیابی و تغییرپذیری سیل محور سلامت حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز از سازه‌های آبخیزداری. *آب و خاک*، ۳۶(۵)، ۵۶۱–۵۷۷. **doi: 10.22067/JSW.2022.78150.1190**

۱۰. صدیق، رضا، باقریان کلات، علی، نور، حمزه، رجایی، حسین، شیبانی‌زاده، زهره، واحدی طرقی، رضا. و واحدی طرقی، علی (۱۳۹۷). بررسی شاخص‌ها و عوامل موثر بر ضریب زبری مانینگ در رودخانه‌ها و تعیین مدل جدید جهت برآورد آن (مطالعه موردی رودخانه رادکان خراسان رضوی). *سومین کنفرانس ملی حفاظت خاک و آبخیزداری*، ۲۹ و ۳۰ خرداد ۱۳۹۷. **https://civilica.com/doc/908341**

۱۱. قادری، کمال. و فاضلی ثانی، ایمان (۱۳۹۵). آنالیز کمی پارامترهای مورفومتری حوزه آبخیز (مطالعه موردی: منجیز مازندران). *چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری. دانشگاه شید بهشتی تهران.*

۱۲. مددی، عقیل، قلعه، احسان، عبادی، الهامه، نظافت تکله، بهروز. و پاسبان، امیرحسام. (۱۳۹۹). بررسی ارتباط بین ویژگی‌های ژئومورفیک و میزان تولید رسوب در حوضه آبخیز نیرچای. *تحقیقات جغرافیایی*، ۳۶(۱)، ۲۳–۳۴. **http://georesearch.ir/article-1-933-fa.html**

۱۳. مصطفی‌زاده، رئوف‌زاده، جعفری، انیس. و کیوان‌بهجو، فرشاد. (۱۳۹۷). مقایسه ساختار اراضی مرتعی و میزان تخریب پیوستگی سیمای سرزمین در زیرحوزه‌های آبخیز ایریل، استان اردبیل. *بوم‌شناسی کاربردی*، ۷(۱)، ۴۱–۵۳. **URL: http://ijae.iut.ac.ir/article-1-858-fa.html**

۱۴. معتمدی، راضیه، آذری، محمود. و منصفی، ر (۱۳۹۸). ارتباط الگوی سیمای سرزمین و رسوب در برخی از زیرحوزه‌های آبخیز استان گلستان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۴)، ۹۵۵–۹۷۱. **doi: 10.22092/ijwmse.2018.120525.1456**

۱۵. نیکویی، حامد، آذری، محمود. و دستورانی، محمدتقی. (۱۴۰۱). اثر تغییر اقلیم بر سلامت حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل VOR. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۴)، ۱۲۱–۱۰۷. **doi: 10.22098/MMWS.2022.11685.1156**

References

1. Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environ Sci Pollut Res*, 29, 42539–42559. doi: 10.1007/s11356-022-19718-6
2. Adugna Gurara, M., Boru Jilo, N., & Debele Tolche, A. (2021). Impact of climate change on potential evapotranspiration and crop water requirement in Upper Wabe Bridge watershed, Wabe Shebele River Basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 180, 104223. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104223

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

3. Ahn, S. R. & Kim, S. J. (2017). 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
4. Akhwan, H., Amoushahi, S., & Sotoudeh, A. (2017). Investigating NDVI changes resulting from the same vegetation type in different mountain temperature classes (case study: Shirkoh Mountain, Yazd Province). *Journal of Human and Environment*, 16(1), 53-64. https://journals.srbiau.ac.ir/article_12383.html. [In Persian]
5. Alaei, N., Mostafazadeh, R., Esmaliouri, A., Sharari, M., & Hazbavi, Z. (2020). Assessment and comparison of landscape connectivity in KoozehTopraghi watershed, Ardabil province. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 8(4), 19-34. 10.47176/ijae.8.4.2572 [In Persian].
6. Alilou, H., Rahmati, O., Singh, V.P., Choubin, B., Pradhan, B., Keesstra, S., Ghiasi, S. S., & Sadeghi, S. H. (2019). Evaluation of watershed health using Fuzzy-ANP approach considering geo-environmental and topo-hydrological criteria. *Journal of Environmental Management.* 232, 22-36. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.019.
7. Apan, A. A., Raine, S. R., & Paterson, M. S. (2002). Mapping and analysis of changes in the riparian landscape structure of the Lockyer Valley catchment, Queensland, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 59(1), 43-57. doi: 10.1016/S0169-2046(01)00246-8
8. Borhani, M., & Gangali, M. (2023). Analyzing the changes of land features in a 30-year period (case study: Tajen watershed). *Journal of Environmental Science Studies*, 8(2), 6603-6611. doi: 10.22034/JESS.2023.365151.1888. [In Persian]
9. Cabello, V., Willaarts, B., Aguilar, M., & Del Moral, L. (2015). River basins as social-ecological systems: linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed. *Ecology and Society*, 20(3), 20. doi:10.5751/ES-07778-200320.
10. Deshmukh, A., & Singh, R. (2016). Physio-climatic controls on vulnerability of watersheds to climate and land use change across the United States. *Water Resources Research*, 52, 8775–8793. doi: 10.1002/2016WR019189.
11. Eskandari Damaneh, H., Jafari, M., Eskandari Damaneh, H., Behnia, M., Khoorani, A. & J. P. Tiefenbacher (2021). Testing possible scenario-based responses of vegetation under expected climatic changes in Khuzestan Province. *Air, Soil and Water Research*, 14, 1–17. doi: 10.1177/11786221211013332.
12. Esmali Ouri, A., & Kateb, F. (2020). Study of Soil Erosion Potential Using Landscape Measurements (Case Study: Sharif Beiglou Watershed, Ardabil Province). *Hydrogeomorphology*, 6(24), 145-164. doi:10.22034/hyd.2020.41552.1543. [In Persian]
13. Estoque R. C. Ooba M. Togawa T., & Hijioka Y. (2020). Projected land-use changes in the shared socioeconomic pathways: Insights and implications. *Ambio.* 49(12), 1972-1981. Doi: 10.1007/s13280-020-01338-4
14. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. doi: 10.5194/ gmd-9-1937-2016.
15. Farina, A. (1998). Principles and methods in landscape ecology. Chapman and Hall, London, 235.
16. Fauzi, F., Kuswanto, H., & Atok, R. M. (2020). Bias correction and statistical downscaling of earth system models using quantile delta mapping (QDM) and bias correction constructed analogues with quantile mapping reordering (BCCAQ). *In Journal of Physics: Conference Series*, 1538, (1): IOP Publishing.
17. Gari, S. R., Guerrero, C. E. O., Bryann, A., Icely, J. D., & Newton, A. (2018). A DPSIR-analysis of water uses and related water quality issues in the Colombian Alto and Medio Dagua Community Council. *Water Science*, *32*(2), 318-337. doi: 10.1016/j.wsj.2018.06.001.
18. Hamel, P., Riveros-Iregui, D., Ballari, D., Browning, T., Célleri, R., Chandler, D., Chun, K.P., Destouni, G., Jacobs, S., Jasechko, S., Johnson, M., Krishnaswamy, J., Poca, M., Pompeu, P.V., & Rocha, H. (2018). Watershed services in the humid tropics: opportunities from recent advances in ecohydrology. *Ecohydrology*, 11(3), 1e42. doi: 10.1002/eco.1921. e1921.
19. Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific data*, 7(1), 109.
20. Hazbavi, Z., & Sadeghi, S.H.R., (2017). Watershed health characterization using reliability– resilience–vulnerability conceptual framework based on hydrological responses. *Land Degradation and Development,* 28(5), 1528–1537. doi: 10.1002/ldr.2680.
21. Hazbavi, Z., Parchami, N., Alaei, N., & Babaei, L. (2020). Assessment and analysis of the Koozeh Topraghi Watershed health status, Ardabil Province, Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 6(3), 121-142. https://www.sid.ir/paper/412661/en. [In Persian]
22. Hazbavi, Z., Sadeghi, S. H. R., Gholamalifard, M., & Davoudirad, A. A. (2020). Watershed health assessment using pressure-state- response (PSR) framework. *Land Degradation and Development*, 31, 3-19. doi: 10.1002/ldr.3420

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

23. Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350-361. doi: 10.1029/TR013i001p00350
24. Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275-370. doi: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2
25. Lian, Y., Sun, M., Wang, J., Luan, Q., Jiao, M., Zhao, X., & Gao, X. (2021). Quantitative impacts of climate change and human activities on the runoff evolution process in the Yanhe River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A/B/C*. 122, 102998. doi: 10.1016/j.pce.2021.102998
26. Liu, D., & Hao, Sh. (2016). Ecosystem Health Assessment at County-Scale Using the Pressure-State-Response Framework on the Loess Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14 (1). doi:10.3390/ijerph14010002.
27. Lu, T., Han, Y., Dong, L., Zhang, Y., Zhu, X., & Xu, D. (2023). Evapotranspiration responses to CO2 and its driving mechanisms in four ecosystems based on CMIP6 simulations: Forest, shrub, farm and grass. *Environmental Research*, 223, 115417. doi:10.1016/j.envres.2023.115417.
28. Madadi, A., Ghale, E., Ebadi, E., Nezafat, T. B., & Pasban, A. H. (2021). Investigation of the Relationship between Geomorphic Characteristics and Sediment Production in Nirchai Basin. *Geographical Research*, 36(1), 23-34. URL: http://georesearch.ir/article-1-933-fa.html. [In Persian]
29. Mosaffaie, J., Ekhtesasi, M. R., Dastorani, M. T., Azimzadeh, H. R., & Zare Chahuki, M. A. (2015). Temporal and spatial variation of the water erosion rate. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8), 5971–5979. doi: 10.1007/s12517-014-1628-z.
30. Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M. R., & Kousari, M. R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land Use Policy*, 100 (2021)104911. doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104911.
31. Mostafazadeh, R., Jafari, A., & Keivan, B. F. (2018). Comparing the rangelands structure and degradation of landscape connectivity in Iril sub-watersheds, Ardabil province. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 7(1), 41-53. URL: http://ijae.iut.ac.ir/article-1-858-fa.html. [In Persian]
32. Motamedi, R., Azari, M., & Monsefi, R. (2020). Relationship between landscape metrics and sediment yield in some watersheds of Golestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 955-971. doi: 10.22092/ijwmse.2018.120525.1456. [In Persian]
33. NASA. (2023). NASA Says 2022 Fifth Warmest Year on Record, Warming Trend Continues. Retrieved from NASA: https://climate.nasa.gov/news/3246/nasa- says-2022-fifth-warmest-year-on-record- warming-trend-continues./
34. Nikouei, H., Azari, M., & Dastorani, M. T. (2022). The effect of climate change on the Fariman dam watershed health using VOR model. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(4), 107-121. doi:10.22098/MMWS.2022.11685.1156. [In Persian]
35. O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., KempBenedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D.P., Birkmann, J., Kok, K., & Levy, M. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.
36. Ouyang, W., K. Skidmore, A., Hao, F. & Wang, T. (2010). Soil erosion dynamics response to landscape pattern. *Science of the Total Environment*, 408, 1358–1366. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.10.062.
37. Peyrowan, H., R. Bayat, R. Shariat jafari, M. Jafari A. & jafari Ardekani. (2012). Classification and studying of erodibility rates of geological formations of watershed basins of Iran, Watershed Basins Atlas Project. *Soil Conservation and Watershed Management Research Center of Iran*, 239 pages [in Persian].
38. Qadri, K., & Fazli Sani, I. (2015). Quantitative analysis of watershed morphometric parameters (case study: Manjiz Mazandaran). The 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development. Shahid Beheshti University of Tehran. [In Persian]
39. Qiu, J., Shen, Zh., Leng, G., Xie, H., Hou,X., & Wei, G. (2019). Impacts of climate change on watershed systems and potential adaptation through BMPs in a drinking water source area. *Journal of Hydrology*, 573, 123–135.doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.074.
40. Ranjbar, M., & Iranmanesh, F. (2007). Investigating the effective factors on geomorphologic characteristics and the extension of erosion forms using RS and GIS (Case study: Basin of Ghorandeh Viz, Kordestan). *Territorial Quarterly, Fourth Edition*. (14), 118-107. [In Persian].
41. Rapport, D., & Friend, A. (1979). Towards a Comprehensive Framework for Environmental Statistics: a Stress-Response Approach. Statistics Canada Catalogue. *Minister of Supply and Services Canada, Ottawa*, 11-510. Doi: CS11-510/1979-PDF
42. Razavizadeh, S., & Shahedi, K. (2015). Flood prioritization of Taleghan watershed sub-basins using AHP and TOPSIS integration. *Natural Ecosystems of Iran*, 7(4), 33-46. 20.1001.1.22517480.1399.9.3.8.0. [In Persian]

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]

43. Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., & Tavoni, M. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. *Nature Climate Change*, *8*(4), 325-332. Doi: 10.1038/s41558-018-0091-3.
44. 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.
45. Sadeghi, S. H, Ebrahimi Getkash, Z., Jafari, F., & Fadzi, P. (2017). Assessing the health of Asiab Rood watershed with the pressure-state-response conceptual model. *The 13th National Conference of Iran Watershed Science and Engineering and the 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment, October 10 and 11, 2017, University of Mohaghegh Ardabili*. https://civilica.com/doc/827403. [In Persian]
46. Sadeghi, S. H. R., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019). Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthropogenic activities on watershed health. *Science of the Total Environment* 648, 880–893. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.004.
47. Sadeghi, S. H., Tavoosi, M., Zare, S., Beiranvandi, V., Shekohideh, H., Akbari Emamzadeh, F., ... & Chamani, R. (2022). Evaluation and variability of flood-oriented health of Shiraz Darwazeh Quran watershed from watershed management structures. *Water and Soil*, 36(5), 561-577. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20084757.1401.36.5.3.3. [In Persian]
48. Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarrin, A. (2020). Investigating Impact of Future Climate Changes on Temperature and Precipitation condition (Case Study: Torogh Dam Watershed, Mashhad). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(1), 63-83. doi: 10.22034/jmas.2021.278862.1129. [In Persian]
49. Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey, Geological society of America bulletin, 67(5), 597-646. doi:10.1130/0016-7606(1956)67[597:eodsas]2.0.co;2
50. Sediq, R., Bagharian Kalat, A., Noor, H., Rajaei, H., Shibanizadeh, Z., Vahidi Taroghi, R., & Vahedi Torughi, A. (2017). Investigating indicators and factors affecting Manning's roughness coefficient in rivers and determining a new model to estimate it (case study of Radkan River, Khorasan, Razavi). *The Third National Conference on Soil Protection and Watershed Management, June 29 and 30, 2017*. https://civilica.com/doc/908341. [In Persian]
51. Singh, R., Pradhanang Kayastha, S., Prasad Pandey, V. (2022). Climate change and river health of the Marshyangdi Watershed, Nepal: An assessment using integrated approach. *Environmental Research*, 215, 114104. doi: 10.1016/j.envres.2022.114104.
52. Strahler A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks.In: V.T. Chow (Ed.), Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, pp.4.39-4.76.
53. Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94. doi:10.1097/00010694-194807000-00007
54. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations formonitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0
55. Weedon, G. P., Gomes, S., Viterbo, P., Shuttleworth, W. J., Blyth, E., Österle, H., & Best, M. (2011). Creation of the WATCH forcing data and its use to assess global and regional reference crop evaporation over land during the twentieth century. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 823-848. doi: 10.1175/2011JHM1369.1.
56. Yang, Y., Weng, B., Man, Z., Yu, Z., & Zhao, J. (2020). Analyzing the contributions of climate change and human activities on runoff in the Northeast Tibet Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100639. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100639.
57. Zanganeh Asadi, M. A., & Naemi Tabar, M. (2021). Relationship between hydrogeomorphic features and suspended sediment load under Kashfarud basins. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8(1), 111-128. https://civilica.com/doc/1280006. [In Persian]
58. Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. A., Hassani, S. (2022). Future Changes in Precipitation Extremes Over Iran: Insight from a CMIP6 Bias-Corrected Multi-Model Ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 441–464. doi: 10.1007/s00024-021-02904-x.
59. Zhai, X., Li, Y., Wang, H., Haung, G., & Li, Y. (2023). Assessment of the potential impacts of climate changes on Syr Darya watershed: A hybrid ensemble analysis method. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 47, 101415. doi:10.1016/j.ejrh.2023.101415.

[Downloaded from jircsa.ir on 2025-12-06]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5]