



## 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<sup>1</sup>, Ali Golkarian<sup>\*</sup>, Azar Zarrin<sup>3</sup>

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	ABSTRACT
<b>Article type:</b> Research Paper	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.
<b>Article history</b>	
<b>Received:</b> 19 September 2023	
<b>Revised:</b> 15 October 2023	
<b>Accepted:</b> 12 November 2023	
<b>Published online:</b> 06 June 2024	
<b>Keywords:</b> Climate change, Pressure-State-Response framework, watershed health, watershed management, watershed sustainability.	

Citation: Nezhadrahim, A., Golkarian, 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: 10.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5

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

## 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<sup>1</sup>, Ali Golkarian<sup>\*</sup><sup>2</sup>, Azar Zarrin<sup>3</sup>

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-Reliability (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 (NDVI) was used to calculate NDVI 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:** The 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

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.

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

آتنا نژادر حیم<sup>۱</sup>، علی گلکاریان<sup>۲</sup><sup>\*</sup>، آذر زرین<sup>۳</sup>

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 چگرایی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.  
zarrin@um.ac.ir

مشخصات مقاله	نوع مقاله:
چکیده	پژوهشی
جزوه‌های آبخیز سیستم‌های اجتماعی-بوم‌شناختی هستند که به طور 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 جزوه‌های آبخیز شود، لذا شناخت اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و سایر جنبه‌های مختلف در سطح جزوه 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 ۱۴۰۰-۱۴۹۰ 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 ۱۶ زیروحش مورد مطالعه، استانداردسازی معیارها انجام و سپس از طریق فرآیند تحلیل سلسه مراتبی (AHP) تعیین وزن شدند. در نهایت سلامت آبخیز مورد مطالعه از طریق چهارچوب PSR برای ۱۶ زیروحش تعیین و در پنج کلاس سالم، نسبتاً سالم، متوسط، نسبتاً ناسالم و ناسالم طبقه‌بندی شد. سپس به منظور بررسی تاثیرات تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز، از داده‌های مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-HR تحت دو سناریو ۸.۵ و ۴.۵ SSP5-8.5 و SSP2-4.5 و برای سه دوره زمانی آینده ۲۰۵۰-۲۰۷۵، ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ استفاده شد. نتایج نشان داد در دوره تاریخی غیر از یک زیروحش که در طبقه سالم و دو زیروحش که در طبقه نسبتاً ناسالم قرار داشتند، مابقی زیروحش‌ها 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 بهترتبیب در دوره‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۷۵، ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ ترتیب ۸.۴/۸/۴۹، ۱۱/۱۱ و ۸/۴۹ درصد و در سناریو ۸.۵ SSP5-8.5 بهترتبیب برابر با ۳/۳۰۴، ۷/۷۰۴ و ۹/۸۵ درصد است.	تاریخچه مقاله
دریافت: ۲۸ شهریور ۱۴۰۲	بازنگری: ۲۳ مهر ۱۴۰۲
پذیرش: ۲۱ آبان ۱۴۰۲	انتشار برخط: ۱۷ خرداد ۱۴۰۳

**استناد:** نژادرخیم، آتا، گلکاریان، علی، و زربن، اذر (۱۴۰۳). بررسی اثر تغییر اقلیم در روند سلامت حوزه آبخیز از طریق چهار چوب فشار-وضعیت-پاسخ مطالعه موردي: حوزه آبخیز رادکار، استان خراسان رضوی. سامانه های سطوح آبگیر بازار، ۱۲(۱)، ۴۶-۲۰.

**DOI:** 10.1001.1.24235970.1403.12.1.2.5



© نہیں دکان

ناشر: انجمن علم سیستمهای سطوح آنگ، بیان ایران

نویسنده مسئول: علی گلکاریان

**نشانی:** گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تلفن: ۰۹۱۳۱۵۷۶۹۱۲

Golkarian@um.ac.ir : سمت الکترونیک

## 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 به عنوان خدمات آبخیز تعریف می‌شود (Hamel et al., 2018). در اوخر قرن بیستم، رشد جمعیت منجر به افزایش محدودیت‌ها در دسترسی به خدمات آبخیز شد. متاسفانه، حوزه‌های آبخیز به دلیل فعالیت‌های انسانی و تغییر اقلیم در حال تخریب هستند یا پتانسیل تخریب را دارند (Hazbavi & Mosaffaei et al., 2015; Sadeghi, 2017; Mosaffaei et al., 2020). در این راستا می‌توان سلامت را به عنوان 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., 2021; Mosaffaei et al., 2020). امروزه زیست‌بوم‌های آبخیز به دلیل 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 پایابی، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری<sup>۱</sup> (RRV)، مدل مفهومی بنیه، ساختار و انعطاف‌پذیری<sup>۲</sup> (VOR) و مدل مفهومی فشار، وضعیت و پاسخ<sup>۳</sup> (PSR) و مدل‌های DPSIRM<sup>۴</sup>، DPSRC<sup>۵</sup>، PSIR<sup>۶</sup>، DSR<sup>۷</sup> که بر پایه مدل PSR به وجود آمداند.

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 نسبتاً سالم و سالم قرار داشت. Sadeghi و همکاران (۲۰۱۹)، مطالعه‌ای با هدف ارزیابی جامع سلامت آبخیز با استفاده از چهارچوب پایابی، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری (RRV) برای ۲۴ زیرحوزه آبخیز شازند در استان مرکزی ایران به انجام رساندند. نتایج نشان داد که هیچ یک از زیروحشهای 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. Mosaffaei و همکاران (۲۰۲۱)، در پژوهشی با استفاده از چهارچوب نیروی محركه-فشار-وضعیت-برخورد-پاسخ (DPSIR) به تحلیل مشکلات زیست محیطی اصلی سلامت آبخیز گرگان رود پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که به جز شاخص S، سایر شاخص‌ها در طول دوره مورد مطالعه، روند صعودی دارند. این بدان معناست که سلامت آبخیز گرگان رود به مرور زمان به دلیل 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 ۱۹/۸۹ درجه سانتی‌گراد بیشتر از میانگین دوره پایه ناسا (۱۹۵۱-۱۹۸۰) بوده است. لذا این سال به عنوان 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 تحت تاثیر 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).

<sup>1</sup> Reliability-Resilience-Vulnerability

<sup>2</sup> Vigor-Organization-Resilience

<sup>3</sup> Pressure-State-Response

<sup>4</sup> Drive force-State-Response

<sup>5</sup> Pressure-State-Impact-Response

<sup>6</sup> Driving force-Pressure State- Response-Control

<sup>7</sup> Driving force-Pressure-State- Impact-Response

<sup>8</sup> Driving force-Pressure-State-Impact-Response-Management

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 (۲۰۳۰-۲۰۹۹ و ۲۰۹۹-۲۰۵۹) 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 Nepal را با استفاده از رویکرد یکپارچه ارزیابی نمودند. از طرفی تاثیر تغییر اقلیم بر سلامت رودخانه طبق اقلیم پیش‌بینی شده (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، Zhaiai 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 ۷/۳-۷/۸ درصد برای RCP4.5 و ۵/۵-۷/۷ درصد برای RCP8.5 تایید می‌کند.

به طور کلی، مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی پایداری و سلامت بومسازگان‌ها، به روش‌های مختلف و اکثراً 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 بومسازگان‌ها 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 وارد 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

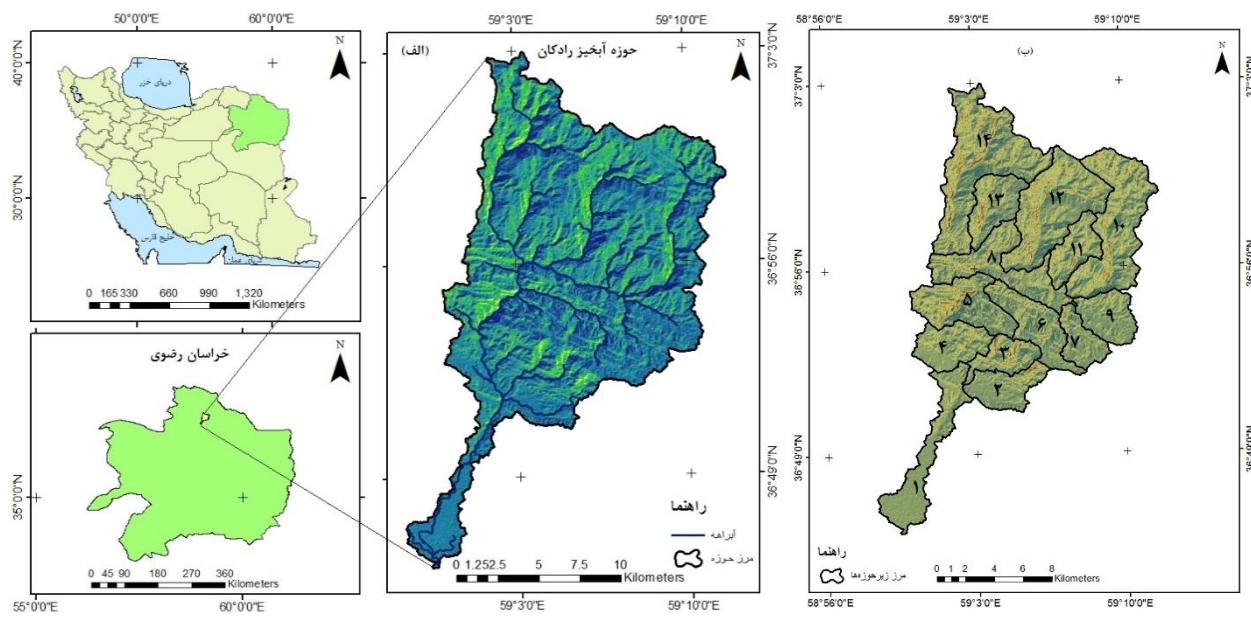
حوزه آبخیز رادکان در شمال شرقی ایران، استان خراسان رضوی، شهرستان چنان، در بخش مرکزی و در ۷۵ کیلومتری شمال غربی مشهد واقع شده است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در زون ۴۰ UTM<sup>۱</sup> و در محدوده ۶۷۵۸۷۶ تا ۶۹۴۲۹۸ متر طول شرقی و ۴۰۰۸۷۵ تا ۴۱۰۳۶۱ متر عرض شمالی قرار دارد. این منطقه در دامنه‌های جنوبی سلسله جبال هزارمسجد و در حاشیه دشت کشف‌رود قرار دارد. رودخانه رادکان از ارتفاعات قره‌لکه و مریچگان شروع و در حوالی روستاهای رادکان و مغان، وارد دشت مشهد می‌شود (صدقی 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، شبی متوسط ۳۳ درصد و میانگین بارندگی سالانه، ۲۱۵ میلی‌متر است.

## روش کار جمع آوری داده‌ها

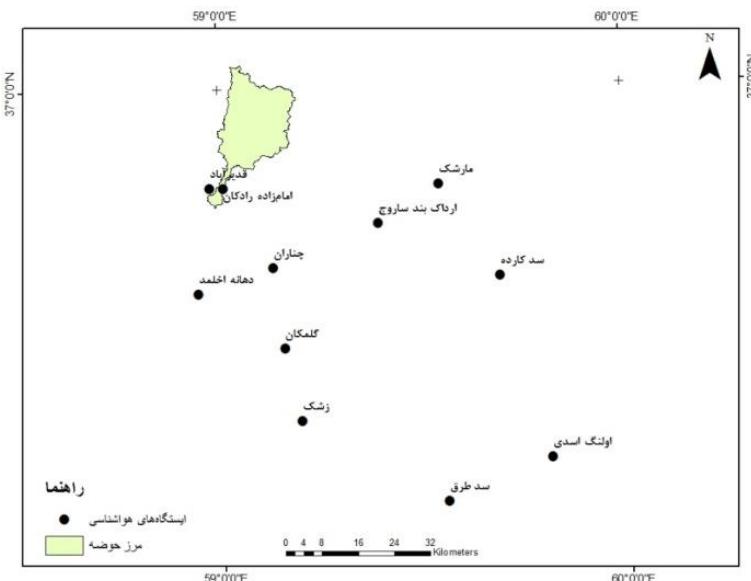
جهت برآورد معیارهای تبخر-تعرق پتانسیل و متوسط بارش سالانه، داده‌های دمای ماهانه ۸ ایستگاه اطراف منطقه مورد مطالعه (رادکان بند ساروج، اولنگ اسدی، زشك خراسان، سد طرق، سد کارده، قدری آباد، مارشك و رادکان) و همچنین داده‌های بارش ماهانه برای ۶ ایستگاه اطراف حوزه آبخیز (رادکان بند ساروج، سد کارده، امامزاده رادکان، چنان، 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 نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، سامانه Google Earth Engine، نرم‌افزار ArcMap10.6.1، Google Earth Pro، Google Earth Engine، 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 چنان، 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

<sup>۱</sup> Universal Transverse Mercator

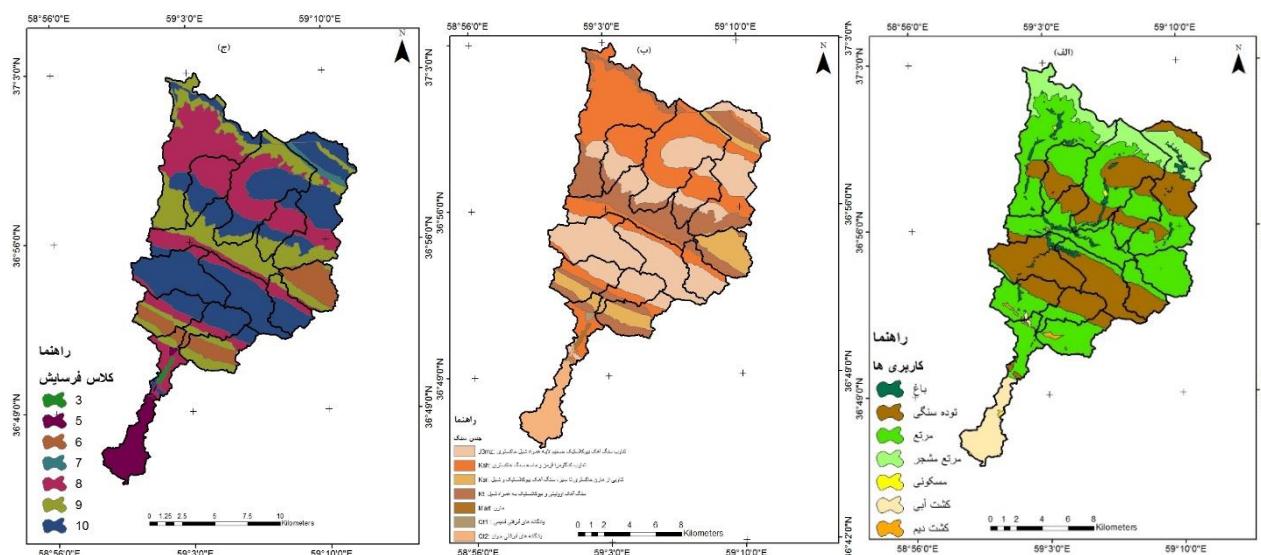
نرم‌الشده تفاوت پوشش گیاهی، تصاویر NDVI سنجنده MODIS برای دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۴ از طریق سامانه Engine دریافت شد.



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



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 (Eyring et al., 2016) بوده CMIP6 (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 ارجیبی شده فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده است. مدل‌های سامانه زمین (ESM) می‌توانند تغییر اقلیم را در گذشته و آینده شبیه‌سازی و پیش‌نگری کنند. با این حال، خروجی ESM‌ها قادر به نمایش اقلیم در مقیاس محلی نیست. تصحیح ارجیبی یک فرآیند آماری است که در آن داده‌های شبکه‌های بزرگ مقیاس در یک دوره زمانی خاص به عنوان مبنای برای استفاده از برونداد مستقیم داده‌ها در شبکه‌های مقیاس کوچک استفاده می‌شود (Fauzi et al., 2020). در این تحقیق، ارجیبی مدل ESM1.2-HR با روش تصحیح مرتبه متواالی (SEC<sup>1</sup>) (Weedon et al., 2011) با استفاده از داده‌های واحد تحقیقات اقلیمی (CRU<sup>2</sup>) (CRU TS) (سری‌های زمانی شبکه‌ای واحد تحقیقات اقلیمی) مجموعه داده اقلیمی پرکاربرد در تمام مناطق انجام شده است. هم‌چنان‌که در سراسر جهان به دست می‌آید (Harris et al., 2020).

Zarrin و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعه‌ای به بررسی تغییرات اینده بارندگی در ایران از طریق یک مجموعه مدل تصحیح شده از فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده، پرداختند. در این مطالعه دقت پنج مدل MPI-ESM1-2-, IPSL-CM6A-LR, GFDL-ESM4، UKESM1-0-LL و MRI-ESM2-0، HR 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 SSP5-8.5 و SSP2-4.5 و به ترتیب سناریوهای میانه و خیلی بدینانه هستند، استفاده شده است. RCP4.5 که جایگزین RCP2.6 در گزارش پنجم بوده و دنیاگیری را به تصویر می‌کشد دارای توسعه اقتصادی-اجتماعی به همراه سطح واحد تابشی متوسط است. SSP5-8.5 که نسخه جدید Estoque et al., 2017; Rogelj et al., 2018; O'Neill et al., 2020.

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

<sup>1</sup> Sequential Elevation Correction

<sup>2</sup> Climate Research Unit

یک دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ و سه دوره آینده شامل ۲۰۵۰، ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ تلقی شدند. به منظور 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 Friend و Rapport (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. چهارچوب PSR از سه دسته شاخص، یعنی شاخص‌های فشار، وضعیت و پاسخ تشکیل شده است. شاخص‌های فشار، فشارهای واردۀ 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 بنيه، 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

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

### 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 ۱۹۹۰-۲۰۱۴ گردایان بارندگی منطقه محاسبه (جدول ۲) و به کمک مدل رقومی ارتفاع و داده‌های بارش استخراج شده از مدل اقلیمی- HR تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5، توزیع متوسط بارش سالانه برای ۱۴ زیرحوضه در یک دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ و سه دوره آینده ۲۰۵۰-۲۰۷۵، ۲۰۲۶-۲۱۰۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ انجام شد.

جدول ۲- رابطه بین داده‌های مشاهده‌ای بارش و ارتفاع

Table 2- Relationship between observational data of precipitation and altitude

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

### تبخیر-تعرق پتانسیل

در تحقیق حاضر با دریافت داده‌های دمایی و تعیین دوره پایه ۱۹۹۰–۲۰۱۴، اقدام به محاسبه گردایان دمایی منطقه شد (جدول ۳). سپس به کمک مدل رقومی ارتفاع<sup>۱</sup> و داده‌های دمای استخراج شده از مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-HR تحت دو سناریو 4.5 و SSP2-4.5-8.5، توزیع دمای ماهانه برای ۱۴ زیرحوضه در یک دوره تاریخی ۱۹۹۰–۲۰۱۴ و سه دوره آینده ۲۰۲۶–۲۰۵۰ و ۲۰۵۱–۲۰۷۵ و ۲۰۷۶–۲۰۹۰ انجام شد. در نهایت از طریق رابطه (1948) Thornthwaite، معیار تبخیر-تعرق پتانسیل برای هر زیرحوضه محاسبه شد (رابطه ۱ تا ۳).

$$ET_0 = 1.6 \left( \frac{10T_i}{I} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

رابطه (۱)  
که در آن

$ET_0$ ، تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه (میلی‌متر)

$T_i$ ، میانگین دمای ماهانه (درجه سانتی‌گراد)، (درصورتی که میانگین دمای ماهانه زیرصفر باشد، تبخیر-تعرق پتانسیل برابر صفر خواهد بود).

$I$ ، شاخص گرما که از رابطه (۲) به دست می‌آید.

$\alpha$ ، تابع پیچیده شاخص گرما که از رابطه (۳) قابل حصول است.

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

رابطه (۲)  
دماهی هوا ماهانه

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

رابطه (۳)  
دما و ارتفاع

$I$ ، شاخص گرما سالانه

جدول ۳- رابطه بین داده‌های مشاهده‌ای دما و ارتفاع  
Table 3- Relationship between observational data of temperature and altitude

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

### 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 به دست 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 ArcMap 10.6.1 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 نرم‌الله شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)

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

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

رابطه (۴)

که در آن NDVI مقادیر شاخص پوشش گیاهی به دست آمده در مقیاس ماهانه، NIR و RED به ترتیب برای اندازه‌گیری بازتاب طیفی به دست آمده در مناطق نزدیک مادون قرمز و مرئی به کار 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 ۰/۵

<sup>۱</sup> Digital Elevation Model (DEM)

نشان دهنده سطوح سنگی، ماسه‌ای یا برفی، ۱/۰ تا ۰/۲ نشان دهنده پوشش روی سنگ، ۰/۲ تا ۰/۴ نشان دهنده پوشش درختچه‌ای و علفزار و ۰/۴ تا ۱ نشان دهنده جنگل‌های بارانی مناطق گرم و استوایی است. در این تحقیق شاخص NDVI به کمک تصاویر سنجیده 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 معنی دار بودن رابطه بین 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 ۴- رابطه بین داده‌های مشاهده‌ای بارش و NDVI

Table 4- Relationship between observational data of precipitation and NDVI

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

### حساسیت ذاتی واحدهای سنگ و خاک به فرسایش

از عوامل تعیین کننده در هوازدگی و فرسایش پذیری 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 انفال 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 سیستم‌ترین جنس سنگ تا مقاوم‌ترین رتبه‌بندی شدن. 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، به صورت ویژگی‌های ژئومورفیک، قابل مشاهده و اندازه‌گیری است و شاخصی از فرآیند فرسایش و رسوب‌گذاری محسوب می‌شود که پایه و اساس بررسی‌های منابع طبیعی حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود (Ranjbar & Iranmanesh, 2007). برای این منظور به کمک مدل رقومی ارتفاع و نرم‌افزار ArcMap10.6.1 ArcMap10.6.1 معيارهای مذکور محاسبه شد. رابطه‌های ۵ تا ۷ جهت محاسبه معيارهای تراکم زهکشی، شکل حوزه آبخیز و نسبت پستی و بلندی استفاده شد. همچنین برای محاسبه میانگین طول آبراهه ابتدا به کمک نقشه شبکه آبراهه‌ها، آبراهه‌های متعلق به هر زیرحوضه به روش Strahler رتبه‌بندی شدن. 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).

$$Dd = \frac{\sum X}{A} \quad (5)$$

که در آن  $X$  و  $A$  به ترتیب بیان گر مجموع طول آبراهه‌های هر زیرحوضه (کیلومتر) و مساحت هر زیرحوضه (کیلومترمربع) است (Horton, 1945).

$$Ff = \frac{A}{Lb^2} \quad (6)$$

در این رابطه،  $A$  و  $Lb$  به ترتیب بیان گر مساحت هر زیرحوضه ( $km^2$ ) و بلندترین طول زیرحوضه (کیلومتر) هستند (Horton, 1932).

$$Rr = \frac{BF}{L_{SMAX}} \quad (7)$$

به ترتیب بیان گر 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 به شمار می‌رود. این معیار، جنبه‌های مختلف ناهمگونی را در سطح چشم‌انداز نشان می‌دهد. به منظور محاسبه میار تنوع سیمپسون، از نقشه کاربری اراضی و نرم‌افزار FRAGSTATES 4.2.1 استفاده شد و مقدار این معیار برای ۱۴ زیرحوضه به دست آمد.

## معیارهای مورد استفاده جهت محاسبه شاخص پاسخ فرسایش خاک

برای محاسبه این معیار به کمک نقشه سنگ‌شناسی و بازدیدهای میدانی صورت گرفته از منطقه، رخسارهای فرسایشی منطقه طبق جدول (۵) که برگرفته از ضریب فرسایش به روش EPM<sup>۱</sup> با توجه به شرایط منطقه است، از ۱۰ تا ۱۰۰ یا به عبارتی از ضعیفترین تا مطلوب‌ترین وضعیت، رتبه‌بندی شدند. سپس از طریق نرم‌افزار ArcMap 10.6.1 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

رتبه	شرایط فرسایش حوزه آبخیز
1	بدلند
2	بیش از ۸۰ درصد منطقه دارای فرسایش خندقی یا عرصه‌هایی با فرسایش شیاری و آبراهه‌ی زیاد
3	درصد منطقه دارای فرسایش خندقی یا فرسایش شیاری و آبراهه‌ای - کل منطقه دارای فرسایش سطحی
4	کل منطقه دارای فرسایش سطحی - فرسایش شیاری و آبراهه‌ای به صورت پراکنده
5	کل منطقه دارای فرسایش سطحی ولی بدون آثار فرسایش عمیق (خندق‌ها، شیارها و واریزه‌ها)
6	۵۰ درصد منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش
7	۲۰ درصد منطقه دارای فرسایش سطحی و بقیه بدون فرسایش
8	فرسایش سطحی به صورت لکه و جزئی (کمتر از ۲۰ درصد) - عرصه‌هایی با رخمنون بیرون‌زدگی سنگی به همراه واریزه دامنه منظم از نوع کشت آبی و بدون آثار فرسایشی - عرصه‌هایی با رخمنون توده سنگی با واریزه‌های رسی و بلوكی
9	دامنه منظم - عرصه‌هایی فاقد فرساشی قابل رویت و دارای پوشش گیاهی مناسب با رخمنون توده سنگی بدون واریزه قابل مشاهده
10	دامنه منظم - عرصه‌هایی فاقد فرساشی قابل رویت و دارای پوشش گیاهی مناسب با رخمنون توده سنگی بدون واریزه قابل مشاهده

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

تراکم لکه یا شاخص تکه‌تکه‌شدن یکی از شاخص‌هایی است که در واحد سطح از 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، بیان کننده شکل لکه است و هر چه این نسبت کمتر باشد، شکل لکه بیشتر به سمت دایره میل می‌کند. در صورتی که تعداد لکه‌های انسان‌ساخت زیاد شود، میانگین نسبت محیط به مساحت لکه‌ها افزوده شده و مرز مشترک بیشتری با باقی مانده لکه‌های طبیعی خواهد داشت. جهت برآورد معیارهای مذکور از نقشه کاربری اراضی و نرم‌افزار FRAGSTATES 4.2.1 استفاده شد و مقادیر این معیارها برای ۱۴ زیرحوضه به دست 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:

$$X'_i = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \times 100 \quad (8)$$

$$X''_i = \frac{\max(X_i) - X_i}{\max(X_i) - \min(X_i)} \times 100 \quad (9)$$

شماره معیارها و  $X'_i$  و  $X''_i$  به ترتیب داده‌های خام و داده‌های استاندارد معیار است. 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 (رسوی زاده و شاهدی، ۱۳۹۵)

<sup>۱</sup> Erosion Potential Method

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

#### محاسبه شاخص سلامت

در نهایت برای محاسبه شاخص سلامت حوزه آبخیز<sup>۱</sup> (WHI) از رابطه زیر استفاده شد:

$$WHI = PI + SI + RI \quad (10)$$

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

$$PI = \sum_{i=1}^{n=4} W_i \times X'_i \quad (n = 1,2,3,4) \quad (11)$$

$$SI = \sum_{i=5}^{n=11} W_i \times X'_i \quad (n = 5,6,7,8,9,10,11) \quad (12)$$

$$RI = \sum_{i=12}^{n=16} W_i \times X'_i \quad (n = 12,13,14,15,16) \quad (13)$$

در روابط فوق،  $n$  دامنه شاخص ارزیابی است.  $W_i$  و  $X'_i$  به ترتیب 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<sup>۲</sup> ( $MV$ ) و انحراف معیار<sup>۳</sup> ( $SD$ ) این نمرات، طبقه‌بندی سلامت آبخیز مودمطالعه به شرح زیر است:

نموده ارزیابی  $< MV + 1.5 SD$ ، حوزه آبخیز در سطح سالم

نموده ارزیابی  $> MV - 1.5 SD$ ، حوزه آبخیز در سطح ناسالم

نموده ارزیابی  $< MV + 1 SD$ ، حوزه آبخیز در سطح نسبتاً سالم

نموده ارزیابی  $> MV - 1 SD$ ، حوزه آبخیز در سطح نسبتاً ناسالم

و سایر نمرات ارزیابی در سطح متوسط سلامت هستند (Liu & Hao, 2016).

پس از محاسبه شاخص سلامت آبخیز، وضعیت سلامت در دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ و روند تغییرات آن در سه دوره آینده ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ تحت دو سناریو 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 4.5 و بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ به نسبت بازه زمانی تاریخی یعنی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ کاهش، در بازه زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ کمی افزایش و در نهایت در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ مجدداً روند کاهشی را طی می‌کند. همچنین روند تغییرات بارندگی در سناریوی SSP5-8.5 و بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت بازه زمانی تاریخی یعنی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ افزایش، در بازه زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ کاهش و نهایتاً در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ مجدداً روند افزایشی را طی می‌کند. سرایی 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 2.6, 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 هم خوانی دارد.

جدول ۶- مقدار استاندارد شده معیارهای مورد مطالعه در دوره تاریخی

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

شاخص ها	فشار	وضعيت	پاسخ

<sup>1</sup> Watershed Health Index

<sup>2</sup> Mean Value

<sup>3</sup> Standard Deviation

X1 6	X1 5	X1 4	X1 3	X1 2	X1 1	X1 0	X9	X8	X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	زیرحو ضه
0	0.5	0.0	0.2	1.0	0.2	1.0	0	0	0	0	0.7	0.9	0	0	0	1
	0	4	0	0	4	0				7	9					
0.7	0.5	0.4	0.8	0.5	0.5	0.0	0.6	0.1	0.4	0.4	0	1.0	0	0.2	0.2	2
9	1	0	0	0	6	3	1	6	0	8		0	9	3		
0.0	0.4	0.2	0.6	0.2	0.3	0.1	0.6	0.1	0.7	0.8	0.3	1.0	0	0.5	0.4	3
5	1	8	9	5	3	5	5	5	1	4	4	0	3	5		
0.3	0.5	0	0.0	0.5	0.2	0.1	1.0	1.0	0.5	0.6	0.2	0.9	0.9	0.3	0.2	4
8	3		2	0	4	1	0	0	4	3	6	9	9	0	3	
0.1	0.7	0.0	0.1	0	0.7	0.2	0.6	0.8	0.4	1.0	0.6	0.4	0.9	0.5	0.4	5
4	2	3	3		0	5	7	1	7	0	5	9	6	1	2	
0.9	0.4	0.9	0.9	0	0.5	0.1	0.2	0.0	0.7	0.9	0.7	0	0	0.6	0.6	6
0	4	1	8		0	5	4	2	7	6	6		8	1		
0.9	0	0.7	0.9	0.2	0.3	0.0	0.4	0.3	0.4	0.8	0.5	1.0	0	0.7	0.7	7
6		0	3	5	0	2	2	4	5	4	4	0	8	2		
0.2	0.4	0	0	0.2	0.3	0.1	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.9	0.5	0.4	8
5	6		5	7	7	4	0	7	3	3	2	2	8	9		
1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	1.0	0	0.3	0.4	0.9	0.3	0.3	1.0	0	0.7	0.7	9
0	0	0	0	5	0		4	1	0	2	6	0	7	0		
0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0	0.5	0.3	0.1	0.8	0.7	0.7	0.1	0	1.0	1.0	10
3	5	4	9	5		6	8	1	0	1	2	4	0	0	0	
0.5	0.4	0.2	0.6	0.2	0.3	0	0.5	0.1	0.3	0.7	0.7	0.6	0	0.8	0.8	11
3	1	3	4	5	3		5	8	4	0	2	2	6	1		
0.4	0.2	0.1	0.4	0.2	0.0	0.4	0.4	0.1	0.8	0.7	0.8	0.5	0.9	0.9	0.8	12
7	8	1	1	5	2	4	0	7	0	1	7	1	0	0	7	
0.2	0.4	0.3	0.7	0.2	0.3	0.0	0.6	0.2	1.0	0.6	0.8	0.1	0	0.8	0.7	13
5	5	2	3	5	7	6	2	6	0	8	1	3	1	5		
0.0	0.4	0.0	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.1	0.7	0.5	1.0	0.3	0.9	0.9	0.8	14
7	5	5	3	5	4	1	8	0	3	2	0	3	4	1	8	

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						سناریو
																														معیار
X5						X2						X1																		زیروحده
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	2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	سنا			
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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	0.80	14											

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

طبق نتایج به دست آمده از محاسبه معیار تبخیر-تعرق پتانسیل در بازه های زمانی مورد بررسی تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه در دوره های زمانی آینده به نسبت دوره تاریخی افزایش داشته و این افزایش مخصوصاً در دوره زمانی ۲۰۶۰-۲۱۰۰ متعلق به سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP2-4.5 بیشتر بوده است. از طرفی با توجه به رابطه میان دو پارامتر ارتفاع و دما، در تمامی دوره های زمانی، در زیر حوضه ۱ که ارتفاع کمتری نسبت به سایر زیر حوضه ها 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 اتیوبی پرداخته اند نیز با نتایج تحقیق حاضر سازگار است، زیرا این چنین بیان کرده اند که میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه به آرامی افزایش پیدا کرده و در سال ۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 در همه ایستگاهها بسیار تشدید می شود. Liu 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 زیر حوضه ۱ بیش از سایر زیر حوضه هاست. تراکم جمعیت در این زیر حوضه می تواند بیانگر استفاده بیشتر انسان از منابع و ایجاد تغییرات در کاربری این زیر حوضه باشد. مساحت زمین های کشاورزی نیز در این زیر حوضه در مقایسه با سایر زیر حوضه ها بیشتر است که بر نتیجه مذکور صحه می گذارد. Liu و Hao (۲۰۱۶) و حزاوی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در مطالعه خود جهت برآورد سلامت آبخیز از طریق چهار چوب فشار-وضعیت-پاسخ، این معیار را به عنوان یکی از عوامل انسانی موثر در شاخص فشار، معرفی نموده اند.

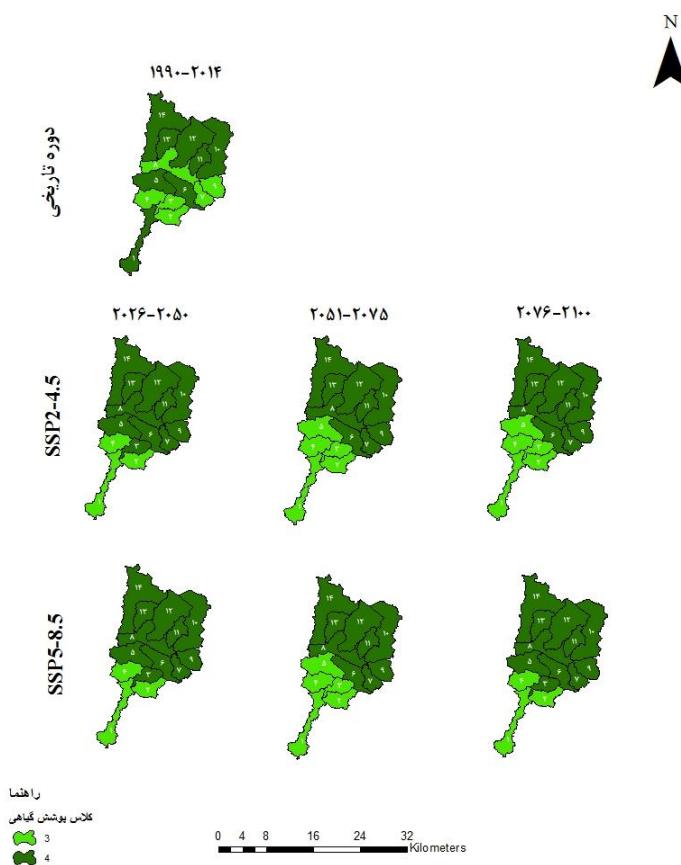
### مساحت زمین کشاورزی با شبیه بالای ۲۵ درصد

نتایج جدول (۶) نشان می دهد که زیر حوضه ۶ در مقایسه با سایر زیر حوضه ها دارای درصد بیشتری از زمین های کشاورزی با شبیه بیش از ۲۵ درصد است. Hazbavi و همکاران (۲۰۱۹) و صادقی و همکاران (۱۳۹۷) نیز این معیار را به عنوان یک معیار انسانی موثر در شاخص فشار معرفی کرده و تأثیر آن را در سلامت آبخیز مورد بررسی قرار داده اند. مقادیر زمین کشاورزی با شبیه بیشتر از ۲۵ درصد در تمامی زیر حوضه های آبخیز مورد مطالعه اند که بوده، که این امر سبب کاهش سهم این معیار در تعیین وضعیت سلامت حوزه آبخیز است.

### شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)

نتایج حاصل از محاسبه این معیار در دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ طبق جدول (۶) نشان می دهد مقادیر شاخص NDVI، در دو کلاس ۳ و ۴، یعنی پوشش روی سنگ ها و پوشش درختچه ای و علفزار، قرار گرفته است. بیشترین و کمترین مقادیر NDVI به ترتیب متعلق به زیر حوضه های ۱۴ و ۲ است. با توجه به برقراری رگرسیون بین مقادیر مشاهده ای NDVI و بارش وجود رابطه معنی دار بین این دو پارامتر، مقادیر NDVI برای دوره های زمانی آینده تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، توسط این رابطه برآورد شد. Eskandari 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 RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند که نتایج آنها نشان داد میان NDVI و بارش رابطه مستقیم و معنی دار و میان NDVI و دما رابطه معکوس وجود دارد.

در مطالعه حاضر در تمامی دوره های آینده تحت هر دو سناریو میانه و خیلی بدینانه، کلاس پوشش کل منطقه تغییری نداشته و شاخص NDVI در کلاس ۳ و ۴ دسته بندی شد، اما مقادیر زیر حوضه ها در دوره های مختلف زمانی آینده و تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، متغیر بوده است (جدول ۷). زیر حوضه های ۱، ۲ و ۴ که در طبقات پایین تر ارتفاعی قرار دارند، از گذشته به سمت آینده و در هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به دلیل کاهش بارندگی و افزایش دما از نظر پوشش گیاهی در کلاس ۳ قرار گرفتند. زیر حوضه های ۳، ۵ و ۶ نیز مقادیر متغیری از شاخص NDVI را در دوره های زمانی آینده تحت دو سناریو میانه و خیلی بدینانه به خود اختصاص دادند. زیر حوزه های ۷، ۸ و ۹ که در طبقات متوسط ارتفاعی قرار دارند و در دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ در کلاس ۳ پوشش گیاهی دسته بندی شده بودند، در هر دو سناریو میانه و خیلی بدینانه و در تمامی بازه های زمانی آینده، شرایط بهتری از نظر پوشش پیدا کرده و در کلاس ۴ قرار گرفتند. زیر حوضه های ۱۰ تا ۱۴ که در طبقات بالای ارتفاعی قرار دارند، در دوره تاریخی و دوره های 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 زیر حوضه هاست (شکل ۴). اخوان و همکاران (۱۳۹۷) نیز در مطالعه خود چنین بیان کردند که تغییرات NDVI تیپ های گیاهی یکسان در ماه های مختلف سال، با افزایش ارتفاع و تغییر طبقات دمایی در یک منطقه کوهستانی، می تواند تحت تأثیر افزایش دما، کاهش باید.



شکل ۴- تغییرات NDVI در دوره تاریخی و دوره‌های زمانی آینده تحت دو سناریو میانه و خیلی بدینه

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 به ترتیب 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 زهکشی 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 به عنوان یک معیار مورفومتری موثر در تعیین وضعیت سلامت حوزه آبخیز معرفی کرده‌اند.

#### شکل حوزه

طبق نتایج به دست آمده از این معیار در جدول (۶)، کمترین و بیشترین مقادیر به ترتیب 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 به عنوان

گرددترین 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 <sup>۴</sup> که به عنوان گرددترین زیرحوضه شناخته شده است، بیشتر در معرض خطر سیالاب‌های شدید و مخرب قرار دارد.

### نسبت پستی و بلندی

مطابق نتایج جدول (۶)، بیشترین مقدار این معیار متعلق به زیرحوضه <sup>۴</sup> و کمترین مقدار متعلق به زیرحوضه <sup>۱</sup> است. افزایش مقادیر این معیار می‌تواند نشان‌دهنده احتمال وجود مناطق با ارتفاع بیشتر و بهدبیال آن دمای کمتر و بارش بیشتر باشد. زنگنه اسدی و ناعمی تبار (۱۴۰۰) جهت بررسی رابطه بین ویژگی‌های ژئومورفیک و بار سوپی معلق و مددی و همکاران (۱۳۹۹) نیز به منظور مطالعه رابطه بین ویژگی‌های ژئومورفیک و تولید رسوب، از معیار نسبت پستی و بلندی به عنوان یکی از ویژگی‌های ژئومورفیک موثر بفره برداشتند.

### میانگین طول آبراهه

طبق نتایج جدول (۶)، بیشترین و کمترین مقدار این معیار به ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های <sup>۱</sup> و <sup>۹</sup> است. این معیار غالباً در ارتباط با شیوه 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 <sup>۱۰</sup> و کمترین آن مربوط به زیرحوضه <sup>۹</sup> 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 <sup>۹</sup> به نسبت سایر زیرحوضه‌ها یکپارچه‌تر بوده و تخریب کمتری در آن اتفاق افتاده است.

### فرسایش خاک

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

### تراکم لکه

بیشترین و کمترین مقدار این معیار به ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های <sup>۸</sup> و <sup>۹</sup> است (جدول ۶). مقادیر بالای معیار تراکم لکه، نشان‌دهنده میزان تکه‌تکه‌شدنگی 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 به ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های <sup>۹</sup> و <sup>۸</sup> است. هر چه مقدار این معیار کمتر باشد، بیانگر یکنواختی کمتر و تنوع بیشتر لکه‌ها در سطح سیمای سرزمین است که تخریب و فرسایش بیشتری به دنبال خواهد داشت. اسنملی‌عوری و کاتب (۱۳۹۹) نیز در مطالعه خود به نتیجه فوق هم‌خوانی داشت. به این صورت که آن‌ها نتیجه گرفتند تراکم لکه اشاره کردند.

### سنجه سرایت

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین مقدار این معیار به ترتیب متعلق به زیرحوضه‌های <sup>۹</sup> و <sup>۷</sup> 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. دهمده بهروز و همکاران (۱۴۰۲) نیز در مطالعه خود این سنجه میانگین اندازه لکه و فرسایش خاک 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 این صورت لکه‌های انسان‌ساخت مرز مشترک بیشتری با لکه‌های طبیعی خواهند داشت که این امر می‌تواند سبب تخریب پوشش گیاهی طبیعی

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

### تعیین وزن معیارها

در تعیین وزن معیارها به روش تحلیل سلسه 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

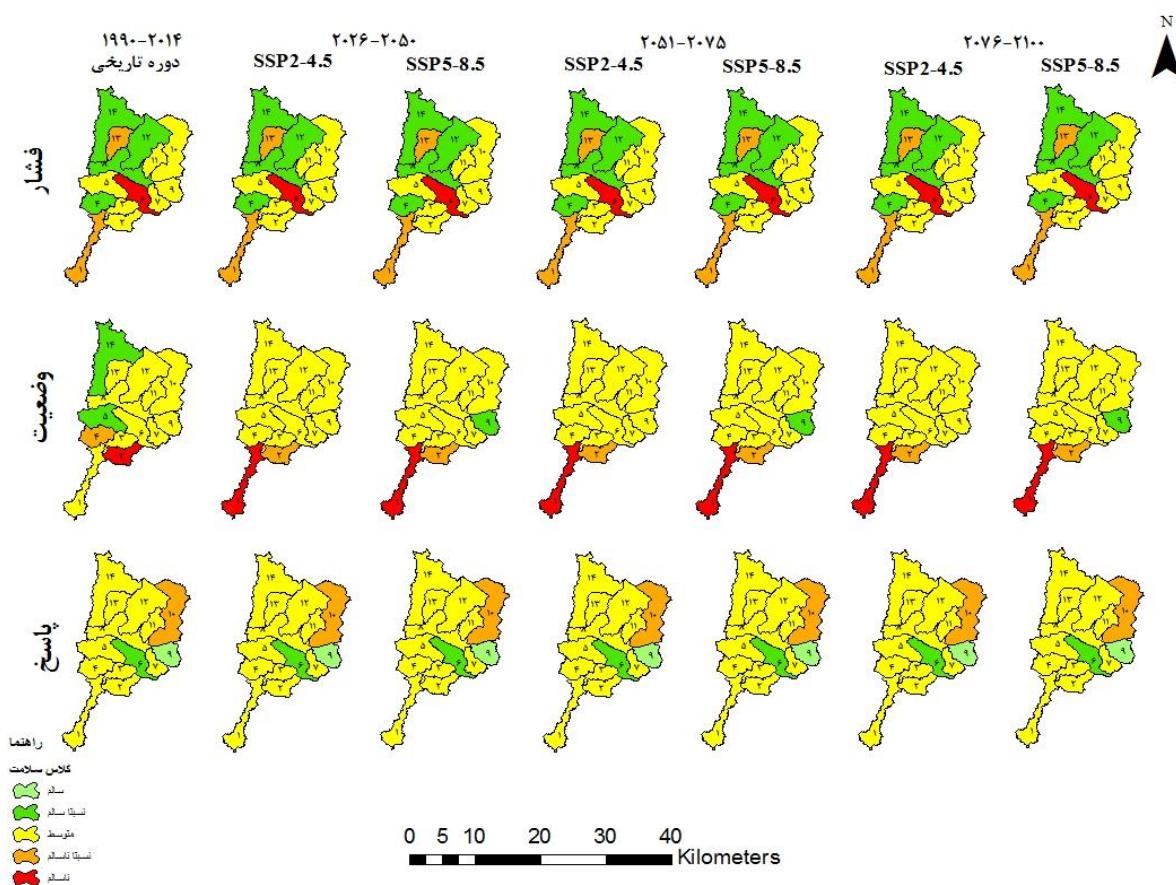
Table 8- The weight of the studied criteria

معیارها	وزن نهایی
ساخت نرمال شده 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 این که این زیرحوضه در پایین دست قرار گرفته و کمترین ارتفاع را در بین تمامی زیرحوضه‌ها دارد، 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. به طور 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 زیادی شده است اما نتوانسته پاسخ مناسب یا به عبارت دیگر انعطاف‌پذیری مطلوبی در برابر فشارهای وارد 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 پایین دست آبخیز به دلیل افزایش میزان دخالت‌های انسانی اشاره کرده‌اند و همچنین نتایج Alaei و همکاران (۲۰۲۰) مبنی بر بالاودن حساسیت بوم‌شناختی در مناطق پایین دست به نسبت مناطق بالا دست، 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 وارد 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 به عبارت دیگر بیشترین تنوع لکه‌های انسان‌ساخت و کمترین یکنواختی را در میان تمامی زیرحوضه‌ها دارد. 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 نتوانسته است در برابر فشارهای وارد عکس‌العمل مناسبی ارائه دهد. از نظر معیارهای سیمای سرزمین از جمله تراکم لکه، میانگین اندازه لکه، سنجه سرات و میانگین نسبت محیط به مساحت، این زیرحوضه بهترین وضعیت را در مقایسه با سایر زیرحوضه‌ها دارد. در پژوهش مصطفی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) نیز به این موضوع اشاره شده است که هرچه بیوستگی 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 تکه‌تکه‌شدنگی 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.



شکل ۵- تغییرات شاخص های فشار، وضعیت و پاسخ در دوره تاریخی و دوره های 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 SSP5-8.5 و SSP2-4.5

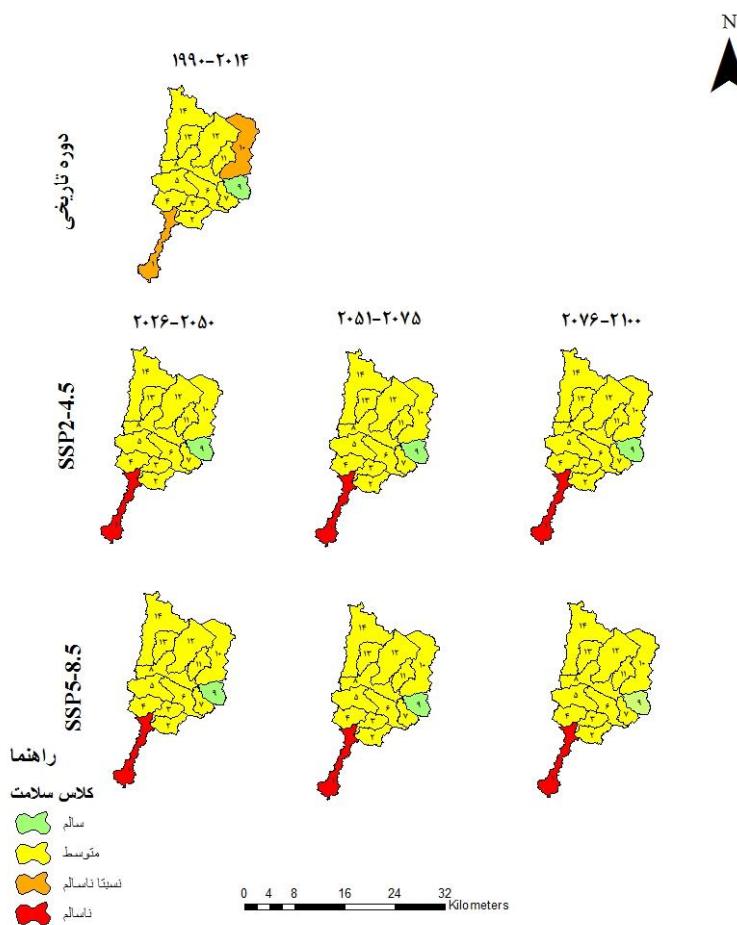
نتایج جدول (۹) نشان می دهد که در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ تحت سناریوی SSP2-4.5 نسبت به دوره تاریخی، وضعیت سلامت زیرحوضه ۱ از طبقه نسبتا ناسالم به ناسالم و زیرحوضه ۱۰ از طبقه نسبتا ناسالم به متوسط تغییر یافت و سایر زیرحوضه ها بدون تغییر باقی مانده اند (شکل ۶)، از آنجایی که زیرحوضه ۱ در پایین دست قرار گرفته، در تمامی دوره های 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-ترعق پتانسیل را به خود اختصاص داده است. از طرفی از نظر شاخص وضعیت نیز در طبقه نسبتا 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 نسبتا ناسالم قرار دارد. Singh و همکاران (۲۰۲۲) نیز در مطالعه خود که به بررسی تغییر اقلیم بر سلامت آبخیز روخدانه Marshyangdi در Nepal پرداخته اند نیز بیان کردند وضعیت سلامت روخدانه تحت سناریوها و دوره های آتی کاهش می یابد. همچنین Ross و Randhir (۲۰۲۲) که اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت آب حوزه های 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 ۲۰۲۶-۲۰۵۰ تحت سناریوی SSP2-4.5 یک طبقه ارتقا پیدا کرده است، می توان گفت چون این زیرحوضه بیشترین ارتفاع را در بین ۱۴ زیرحوضه دارد، در تمامی دوره های زمانی آینده تحت هر دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بیشترین مقدار بارش و کمترین میزان تبخیر-ترعق 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 ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ از SSP2-4.5 و هر سه دوره آینده SSP5-8.5، طبقه سلامت در تمامی زیرحوضه ها ثابت و بدون تغییر بود. دامنه مقادیر سلامت متغیر بوده اما طبقه کیفی آن بدون تغییر باقی مانده است. در این مطالعه جهت پیش نگری وضعیت سلامت در آینده تحت پارامترهای اقلیمی، از معیارهای متوسط بارش سالانه، تبخیر-ترعق پتانسیل و شاخص

نرمال شده 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 بدینانه، افزایش پیدا کرد اما چون در مرحله تعیین وزن معیارها به روش AHP، وزن کمی به این شاخص تعلق گرفت، می‌توان این چنین 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 این که پیش‌نگری آن در دوره‌های آینده تحت دو سناریو میانه و خیلی بدینانه، 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 را کان 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

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



شکل ۶- 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 بهترتبه در دوره‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۷۵، ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ 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 بهترتبه در سه دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ 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 ۲۰۷۶ تحت سناریو SSP5-8.5، در تعداد ۱۲ زیروحضه اتفاق افتاده است. از طرفی بیشترین کاهش شاخص سلامت در میان زیروحضه‌ها، متعلق به زیروحضه ۱ است. در یک مقایسه زیروحضه‌ای نیز می‌توان چنین بیان کرد که از نظر شاخص سلامت، زیروحضه‌های ۱، ۵، ۶، ۸ و ۱۴ در هر سه دوره آینده تحت سناریو SSP2-4.5 نسبت دوره تاریخی روند کاهشی داشته‌اند. در سناریو SSP5-8.5 نیز شاخص سلامت در تمامی زیروحضه‌های ذکر شده به جز زیروحضه ۱۳ در هر سه دوره زمانی آینده کاهش می‌یابد. زیروحضه‌های ۱۲، ۱۱ و ۱۰ 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) هم خوانی 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 زیروحضه‌ها بهدلیل افزایش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش دما، است. همچنین در مطالعه حاضر در زیروحضه‌های ۲، ۷، ۹ و ۱۰ در سه دوره آینده تحت سناریو میانه و زیروحضه‌های ۲ و ۹ در هر سه دوره زمانی تحت سناریو خیلی بدینانه، شاخص سلامت در مقایسه با دوره تاریخی افزایش یافته است (جدول ۱۰).

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 scenarios compared to the historical period

SSP5-8.5		SSP2-4.5				زیرحوضه
2076-2100	2051-2075	2026-2050	2076-2100	2051-2075	2026-2050	
-31.68	-36.37	-26.46	-38.01	-32.27	-33.00	۱
14.16	7.33	19.23	8.15	15.00	13.77	۲
5.84	-3.23	11.25	-0.11	8.20	6.46	۳
2.10	-4.55	6.99	-3.69	2.96	1.75	۴
-8.06	-15.37	-3.62	-12.99	-6.24	-7.64	۵
-6.41	-14.14	-2.22	-10.67	-3.83	-5.35	۶
4.27	-4.29	8.68	0.05	7.49	5.7	۷
-5.75	-14.34	-0.79	-11.09	-3.32	-4.98	۸
7.99	1.32	11.46	4.65	10.46	9.13	۹
7.68	-7.77	15.00	1.69	14.74	11.59	۱۰
0.39	-9.73	5.44	-4.19	4.50	2.47	۱۱
-3.74	-13.40	0.99	-7.91	0.34	-1.61	۱۲
-4.91	-14.85	0.14	-9.66	-1.07	-3.06	۱۳
-8.43	-18.41	-3.55	-12.71	-4.20	-6.22	۱۴

### نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر جهت ارزیابی شاخص سلامت آبخیز مورد مطالعه در دوره تاریخی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ 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 نسبتاً 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، ۲۱۰۰-۲۰۷۶ و تحت سناریو میانه به ترتیب نیز به ترتیب ۹۰/۹۷، ۴۴/۹۰ 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 به صورت 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 به صورت 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 معیارها باشد. به عنوان مثال در پژوهش حاضر، منطقه از نظر شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، دارای مقادیر نسبتاً کم یعنی پوشش نسبتاً کم تراکم 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 نویسنده‌گان 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 نویسنده‌گان:** آتنا نژاد رحیم به عنوان دانشجو و علی گلکاریان و آذر زرین به عنوان استادی راهنمای و مشاور در انجام تحقیق و نگارش مقاله نقش داشته‌اند.

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

**سپاس گزاری:** نویسنده‌گان 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

- اخوان، حسان، عموشاهی، سولماز. و ستوده، احمد (۱۳۹۷). بررسی تغییرات NDVI حاصل از تیپ پوشش گیاهی یکسان در طبقات مختلف دمایی کوهستان (مطالعه موردنی: کوهستان شیرکوه استان یزد). *انسان و محیط زیست*, ۱(۱)، ۵۳-۵۶. [https://journals.srbiau.ac.ir/article\\_12383.html](https://journals.srbiau.ac.ir/article_12383.html)
- اسمعلی عوری، اباذر. و کاتب، فاطمه (۱۳۹۹). بررسی پتانسیل فرسایش خاک با دلالت سنجه‌های سیمای سرزمین (مطالعه موردنی: حوزه آبریز شریف بیکلو، استان اردبیل). *هیدرولوژی و مورفولوژی*, ۲۴(۶)، ۱۴۵-۱۶۴. doi: 10.22034/hyd.2020.41552.1543
- حزبوی، زینب، پرچمی، ناهیده، عالیه، نازیلا. و بابایی، لیلا (۱۳۹۹). ارزیابی و تحلیل وضعیت سلامت آبخیز کوزه تپراقی، استان اردبیل. *حفاظت منابع آب و خاک*, ۶(۳)، ۱۲۱-۱۴۲.
- دهمرده بهروز، رضا، برهانی، محمد. و گنجعلی، مجتبی (۱۴۰۲). واکاوی تغییرات سنجه‌های سیمای سرزمین در یک دوره ۳۰ ساله (مطالعه موردنی: حوزه آبخیز تجن). *مطالعات علوم محیط زیست*, ۸(۲)، ۶۰۳-۶۱۱. doi: 10.22034/JESS.2023.365151.1888
- رضوی‌زاده، سمانه. و شاهدی، کاکا (۱۳۹۵). اولویت بندی سیل خیزی زیرحوزه‌های آبخیز طلاقان با استفاده از تلفیق AHP و TOPSIS. *اکوسیستم‌های طبیعی ایران*, ۴(۷)، ۳۳-۴۶.
- زنگنه اسدی، محمدعلى، ناعمی تبار، مهناز (۱۴۰۰). ارتباط بین ویژگی‌های هیدرولوژیک و بار رسوی معلق زیرحوضه‌های کشف‌رود. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*, ۸(۱)، ۱۱۱-۱۲۸. <https://civilica.com/doc/1280006.128-111>
- سرابی، مجتبی، دستورانی، محمد تقی. و زرین، آذر (۱۳۹۹). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردنی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد). *هوشناسی و علوم جو*, ۳(۱)، ۸۳-۹۳. doi: 10.22034/JMAS.2021.278862.1129
- صادقی، سید‌حیدرضا، ابراهیمی گش، 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>
- صادقی، سید‌حیدرضا، طاوی، محمد، زارع، سمیه، بیرون‌نی، وحید، شکوهی‌ده، هنگامه، اکبری امام‌زاده، فاطمه، پهله‌که، 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.
- صادقی، رضا، باقریان کلات، علی، نور، حمزه، رجایی، حسین، شیبانی‌زاده، زهرا، واحدی طرقی، رضا. و واحدی طرقی، علی (۱۳۹۷). بررسی شاخص‌ها و عوامل موثر بر ضربیت زبری مانینگ در رودخانه‌ها و تعیین مدل جدید جهت برآورد آن (مطالعه موردنی رودخانه رادکان خراسان رضوی). *سومین کنفرانس ملی حفاظت خاک و آبخیزداری*, ۲۹ و ۳۰ خرداد ۱۳۹۷. <https://civilica.com/doc/908341>
- قادری، کمال. و فاضلی ثانی، ایمان (۱۳۹۵). آنالیز کمی پارامترهای مورفومتری حوزه آبخیز (مطالعه موردنی: منجیز مازندران). *چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری*. دانشگاه شید بهشتی تهران.
- مدیدی، عقیل، قلعه، احسان، عبادی، الهامه، نظافت تکله، بهروز، پاسبان، امیرحسام (۱۳۹۹). بررسی ارتباط بین ویژگی‌های ژئومورفیک و میزان تولید رسموب در حوضه آبخیز نیرچای. *تحقیقات جغرافیایی*, ۳۶(۱)، ۲۳-۳۴.
- مصطفی‌زاده، رئوف‌زاده، جعفری، اینیس. و کیوان‌بهجو، فرشاد (۱۳۹۷). مقایسه ساختار اراضی مرنگی و میزان تخریب پیوستگی سیمای سرزمین در زیرحوزه‌های آبخیز ایرانی، استان اردبیل. *بوم‌شناسی کاربردی*, ۷(۱)، ۴۱-۵۳. URL: <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-858-fa.html>
- معتمدی، راضیه، آذری، محمود. و منصفی، ر (۱۳۹۸). ارتباط الگوی سیمای سرزمین و رسموب در برخی از زیرحوزه‌های آبخیز استان گلستان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*, ۱۱(۴)، ۹۵۵-۹۷۱.
- نیکویی، حامد، آذری، محمود. و دستورانی، محمد تقی (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.
- دوی: 10.22098/MMWS.2022.11685.1156

## References

- 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
- 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

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](https://journals.srbiau.ac.ir/article_12383.html). [In Persian]
5. Alaei, N., Mostafazadeh, R., Esmalouri, 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., Willarts, 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., Céller, 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

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 CO<sub>2</sub> 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 Irl 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]

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 13<sup>th</sup> National Conference of Iran Watershed Science and Engineering and the 3<sup>rd</sup> 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:eodsa]2.0.co;2
50. Sediq, R., Bagharian Kalat, A., Noor, H., Rajaei, H., Shibanizadeh, Z., Vahidi Taroghi, R., & Vahedi Toroghi, 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 for monitoring 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.