

Quantitative Analysis of Key Dynamic Variables of Health Indices in Third-Order Watersheds of Iran

Seyed Hamidreza Sadeghi^{1*}, Ali Nasiri Khiavi², Reza Chamani³, Negin Behnia¹, Vahid Moosavi¹,
Hamid Noori⁴, Padidehsaday Sadeghi¹, Mohammad Hossein Shoushtari⁵, Mehdi Vafakhah¹,
Abdulvahed Khaledi Darvishan¹, Hamidreza Moradi Rekabdarkolaei¹

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran

3. Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Birjand University, Birjand, Iran

4. Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Malayer University, Malayer, Iran

5. Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

* Corresponding author Email: sadeghi@modares.ac.ir

(Received: 20 July 2025

Revised: 27 August 2025

Accepted: 19 September 2025)

Extended Abstract

Introduction: The main goal of this study was to analyze and forecast the health condition of watersheds within third-order catchment basins across Iran, based on the variability of dynamic factors and their quantitative influence on future watershed health. The research takes a forward-looking approach, aiming to evaluate the state of watershed health for the years 2033, 2043, and 2053. The introduction highlights the importance of conserving and maintaining water and environmental resources for sustainable development, especially in a country facing diverse climates and significant human and environmental pressures. Watersheds play a vital role in water supply, flood control, and biodiversity conservation, making it crucial to understand the factors affecting their health.

Materials and Methods: In the study, key indicators and criteria influencing the health of priority watersheds in the country were collected and analyzed. These indicators were divided into two groups: static and dynamic. Initially, 173 indicators related to environmental, climatic, and human factors were selected as pressure indices, 331 indicators of similar factors were chosen as state indices, and 13 human and ecological factors were designated as response indices. After standardizing the averages of these indicators, the health status of watersheds for each targeted year was estimated by combining and weighting these indicators. To analyze the effects of independent variables on watershed health, multiple regression methods were used. These variables included maximum and minimum temperature parameters, land use, and vegetation cover levels.

Results and Discussion: The results showed that in 2033, watersheds in the northern regions—especially in Gilan and Mazandaran—are expected to remain in good to very good condition (about 60 to 70% of areas), owing to extensive forests and sufficient rainfall. Conversely, in the southern regions such as Hormozgan and Sistan and Baluchestan, conditions were assessed as weaker (around 40 to 50% in moderate to poor categories). By 2043, this trend continued in the north and northwest, mainly because of persistent dense vegetation cover and adequate rainfall. However, in eastern and southeastern areas, decreasing rainfall and human pressures resulted in an increase in unhealthy areas to roughly 50 to 60%. By 2053, regional differences became more prominent; in the north, especially in Gilan and Mazandaran, abundant rainfall and dense cultivation helped sustain relatively healthy conditions (about 40 to 50%). In contrast, in eastern and northeastern regions, reduced rainfall and increased human activities led to a decline in watershed health, with healthy areas falling to approximately 30 to 40%. Analysis indicates that temperature fluctuations, particularly changes in minimum temperatures, play a highly sensitive and significant role in altering watershed health. The impact of these fluctuations in each of the three years exceeds 47.66% on the health index. These findings emphasize the importance of managing climate change, land use modifications, and vegetation cover for the sustainability and health of watersheds in the country. The effects of dynamic variables related to land use and vegetation cover are steadily increasing, and by 2053, their influence on the health index is expected to surpass 33.5%.

Conclusion: This study highlights that future planning should focus on controlling and managing temperature fluctuations, human pressures, and land use changes, as these factors directly and significantly affect the health and sustainability of water resources and ecosystems. Management actions and policy decisions in climate management, including adherence to or modification of land use patterns and preservation of vegetation cover, can play a crucial role in improving and maintaining watershed health. These results highlight the need for ongoing monitoring, strategic planning, and the sustainable use of natural resources in the future.

Keywords: Sustainable Watershed, Watershed Health Prediction, Land Use Change Prediction, PSR Conceptual Approach, Integrated Watershed Management (IWM)

Citation: Sadeghi, S. H., Nasiri Khiavi, A., Chamani, R., Behnia, N., Moosavi, V., Noori, H., Sadeghi, P., Shoushtari, M. H., Vafakhah, M., Khaledi Darvishan, A., & Moradi Rekabdarkolaei, H. (2026). Quantitative Analysis of Key Dynamic Variables of Health Indices in Third-Order Watersheds of Iran. *Integrated Watershed Management*, 6(2), 1-22. doi= 10.22034/iwm.2025.2066419.1238

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





تحلیل کمی متغیرهای کلیدی پویای شاخص‌های سلامت در حوزه‌های آبخیز رده سوم ایران

سیدحمیدرضا صادقی^{۱*}، علی نصیری خیاوی^۲، رضا چمنی^۳، نگین بهنیا^۴، وحید موسوی^۱، حمید نوری^۴، پدیده‌السادات صادقی^۱، محمدحسین شوشتری^۵، مهدی وفاخواه^۱، عبدالواحد خالدی درویشان^۱، حمیدرضا مرادی رکابدار کلانی^۱

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، اردبیل، ایران

۳. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۴. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۵. مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: sadeghi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

چکیده مبسوط

مقدمه: هدف اصلی این مطالعه، تحلیل و پیش‌بینی وضعیت سلامت حوزه‌های آبخیز در آبخیزهای رده سه در سطح کشور، براساس تغییرپذیری عوامل پویا و تأثیر کمی آن‌ها بر سلامت آینده آبخیزها بوده است. این پژوهش با نگاهی آینده‌نگر، درصد ارزیابی وضعیت سلامت حوزه‌های آبخیز در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ برآمده است. در بخش مقدمه، بر اهمیت حفاظت و نگهداری از منابع آب و محیط‌زیست برای دستیابی به توسعه پایدار، به‌ویژه در کشوری با اقلیم‌های متنوع و تحت فشارهای قابل‌توجه انسانی و محیطی تأکید شده است. آبخیزها به‌عنوان ارکان تأمین آب، مهار سیلاب و حفظ تنوع‌زیستی، نقش حیاتی ایفا می‌کنند و از این‌رو، درک عوامل تأثیرگذار بر سلامت آن‌ها از اهمیتی راهبردی برخوردار است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، نخست معیارهای کلیدی تأثیرگذار بر سلامت حوزه‌های آبخیز اولویت‌دار کشور گردآوری و تحلیل و به دو گروه ایستا و پویا تقسیم شدند. در ابتدا ۱۷۳ شاخص مرتبط با عوامل محیطی، اقلیمی و انسانی به عنوان معیارهای فشار، ۳۳۱ معیار از عوامل مشابه به‌عنوان معیارهای حالت و ۱۳ عامل انسانی و بوم‌شناختی به‌عنوان معیارهای پاسخ انتخاب شدند. پس از استانداردسازی مقادیر میانگین این معیارها، وضعیت سلامت حوزه‌های آبخیز برای هر یک از سال‌های هدف با تلفیق و وزن‌دهی این معیارها برآورد شد. برای تحلیل اثرات متغیرهای مستقل بر سلامت حوزه‌های آبخیز، از روش‌های رگرسیون چندمتغیره استفاده شد. این متغیرها شامل پارامترهای دمای بیشینه و کمینه، کاربری اراضی و سطوح پوشش گیاهی بودند.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که در سال ۲۰۳۳، انتظار می‌رود حوزه‌های آبخیز در بخش‌های شمالی کشور، به‌ویژه در استان‌های گیلان و مازندران (حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد از مساحت)، در شرایط خوب تا بسیار خوب باقی بمانند. این امر ناشی از جنگل‌های غنی و بارش کافی است. در مقابل، در مناطق جنوبی مانند هرمزگان و سیستان و بلوچستان (حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد در رده‌های متوسط تا ضعیف)، شرایط ضعیف‌تر ارزیابی شد. تا سال ۲۰۴۳، این روند در شمال و شمال‌غرب کشور تداوم یافت که عمدتاً به‌دلیل پوشش گیاهی انبوه و بارندگی کافی بود. با این حال، در مناطق شرقی و جنوب‌شرقی، کاهش بارش و فشارهای انسانی منجر به افزایش مناطق ناسالم به‌حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد شد. تا سال ۲۰۵۳، اختلافات منطقه‌ای پررنگ‌تر شد؛ در شمال، به‌ویژه در گیلان و مازندران، بارش فراوان و کشت انبوه (حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد) به حفظ شرایط نسبتاً سالم کمک کرد. در مقابل، در مناطق شرقی و شمال‌شرقی، کاهش بارش و افزایش فعالیت‌های انسانی به افت سلامت حوزه‌های آبخیز انجامید، به‌طوری‌که سهم مناطق سالم به حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش یافت. تحلیل‌ها حاکی از آن است که نوسانات دما، به‌ویژه تغییرات دمای حداقلی، نقش بسیار حساس و تعیین‌کننده‌ای در تغییر سلامت حوزه‌های آبخیز ایفا می‌کنند. تأثیر این نوسانات در هر یک از سه سال مورد مطالعه بر شاخص سلامت، بیش از ۴۷/۶۶ درصد است. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت تغییرات آب‌وهوایی، اصلاحات کاربری اراضی و پوشش گیاهی برای پایداری و سلامت حوزه‌های آبخیز کشور تأکید می‌کنند. اثرات متغیرهای پویای مرتبط با کاربری اراضی و پوشش گیاهی به‌طور پیوسته در حال افزایش است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۳، تأثیر آن‌ها بر شاخص سلامت به بیش از ۳۳/۵ درصد برسد.

نتیجه‌گیری: در نتیجه، این مطالعه تأکید می‌کند که برنامه‌ریزی آینده باید بر مهار و مدیریت نوسانات دما، فشارهای انسانی و تغییرات کاربری اراضی متمرکز شود، چرا که این عوامل به‌طور مستقیم و معنی‌داری بر سلامت و پایداری منابع آب و بوم‌سازگان‌ها تأثیر می‌گذارند. اقدامات مدیریتی و تصمیم‌های سیاستی در حوزه مدیریت اقلیم، ازجمله پای‌بندی یا اصلاح الگوهای کاربری اراضی و حفاظت از پوشش گیاهی، می‌توانند نقشی حیاتی در بهبود و حفظ سلامت حوزه‌های آبخیز ایفا کنند. این نتایج، بر اهمیت پایش مستمر، برنامه‌ریزی راهبردی و بهره‌برداری خردمندانه از منابع طبیعی در آینده نزدیک صحنه می‌گذارند.

واژه‌های کلیدی: آبخیز پایدار، پیش‌بینی سلامت آبخیز، پیش‌بینی تغییر کاربری اراضی، رویکرد مفهومی PSR، مدیریت جامع آبخیز

استناد: صادقی، س.ج.، نصیری خیاوی، ع.، چمنی، ر.، بهنیا، ن.، موسوی، و.، نوری، ج.، صادقی، پ.الف.، شوشتری، م.ج.، وفاخواه، م.، خالدی درویشان، ع.؛ و مرادی رکابدار کلانی، ح.ر. (۱۴۰۵). تحلیل کمی متغیرهای کلیدی پویای شاخص‌های سلامت در حوزه‌های آبخیز رده سوم ایران. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۶(۲)، ۱-۲۲.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

رشد جمعیت و لزوم تأمین نیازهای زیستی انسان به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، منجر به استفاده‌های غیراصولی از منابع سرزمین شده است. راهبرد افزایش تولید با بهره‌کشی بیش از حد از منابع، امروز کشور را با بحران جدی، به‌ویژه در زمینه آب و محیط‌زیست، مواجه کرده است (Nasiri Khiavi et al., 2024). مدیریت ناصحیح منابع آب و سرزمین، امنیت آبی و غذایی کشور به‌عنوان اصلی‌ترین اهداف کلان ملی را در معرض تهدید قرار داده است (Hazavi et al., 2018; Ebrahimi et al., 2025). ارزیابی و مدیریت جامع آبخیزها، در مجامع علمی بین‌المللی به‌عنوان رویکردی مؤثر و کارا برای مدیریت آب، سرزمین و منابع وابسته به آن‌ها و ایجاد تعادل بین نیازهای اقتصادی- اجتماعی جوامع آبخیزنشین و سلامت و پایداری بوم‌سازگان‌ها محسوب می‌شود (Hazbavi et al., 2018). بنابراین، بازنگری و اصلاح نظام فکری و مدیریتی منابع آب و خاک کشور و ایجاد یک نظام جامع ارزیابی و مدیریت آبخیز بر اساس اصول توسعه پایدار، امروز بیش از هر زمان دیگر ضرورت دارد. ارزیابی جامع حوزه‌های آبخیز از برنامه‌های غیرقابل‌انکار برای دستیابی به پایداری و سلامت سامانه‌های مختلف موجود در آبخیز است (Xia et al., 2014). همچنین آگاهی از سلامت آبخیزها، یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین بخش‌ها در مدیریت پایدار حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود (Yu et al., 2013). در این راستا می‌توان سلامت را به‌عنوان یک معیار (سنجه) نسبی از انحراف فرآیندهای آبخیز نسبت به شرایط مرجع (حالت طبیعی بدون دخالت انسان یا با دخالت بسیار کم انسان) تعریف کرد و آن را از طریق اندازه‌گیری و پایش متغیرها و معیارهای گوناگون ارزیابی کرد (Singh et al., 1999; Zhang et al., 2015; Nasiri Khaivi et al., 2024).

یکی از اجزای کلیدی و بنیادی در مدیریت پایدار آبخیزها، درک وضعیت سلامت آنهاست (Ebrahimi et al., 2023). برای سنجش سلامت آبخیزها، معیارها و نمایه‌های اصلی شامل عوامل انسانی، اقلیمی، هیدرولوژیک، زمین‌شناسی، خاک و پوشش گیاهی به‌عنوان نمایندگان وضعیت کنونی سلامت معرفی و توسعه یافته‌اند؛ اما به‌کارگیری هر یک از این معیارها به تنهایی نمی‌تواند به‌طور کامل نمایانگر وضعیت سلامت بوم‌سازگان مورد مطالعه باشد (Sadeghi et al., 2019; Sadeghi et al., 2022a). براین اساس، ترکیبی از معیارها موردتوجه قرار گرفته است، ولی شیوه ترکیب این معیارها بسته به شرایط مختلف پژوهش متفاوت است و یکی از چالش‌های عمده در ارزیابی سلامت منابع آب و خاک و به‌تبع آن بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌آید (Hazbavi et al., 2018; Hughes et al., 2023). بسیاری از عوامل مؤثر بر سلامت آبخیزها، ایستا^۱ و در طول زمان ثابت یا در نقاط مختلف تغییر می‌کنند که به‌وضوح ارزش نسبی این متغیرها در کنار یکدیگر را نشان می‌دهد (Zeraatpisheh et al., 2022). با این حال، بسیاری از عوامل آبخیز از قبیل متغیرهای هیدرواقلمی و کاربری اراضی نیز پویا^۲، از معیارهای کلیدی و تأثیرگذار بر سلامت حوزه‌های آبخیز هستند و تحلیل احتمال و پیش‌بینی تغییرات آینده و بررسی تأثیر آن بر سلامت آبخیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

در همین راستا، مدل مفهومی شاخص-محور فشار، وضعیت و پاسخ^۳ (PSR) برای ارزیابی جامعی از سلامت بوم‌سازگان معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته است. می‌توان بیان داشت که مدل مفهومی PSR با ساماندهی معیارها در قالب شاخص‌های جامع فشار، حالت و پاسخ توانسته است سلامت بوم‌سازگان با لحاظ کلیه شرایط حاکم بر یک سامانه را تعیین کند. در مدل مفهومی PSR منظور از شاخص فشار (P)، فشارهای

موجود بر محیط‌زیست است که از طریق فعالیت‌های انسانی و تغییرات آب‌وهوا بر یک آبخیز تحمیل می‌شود. همچنین شاخص حالت (S) در واقع توصیف‌کننده وضعیت موجود محیط طبیعی و عملکرد آبخیز است و شاخص پاسخ (R)، درجه‌ای را نشان می‌دهند که جامعه و یا برآیندهای مختلف آبخیز به تغییرات و نگرانی‌های تحمیل‌شده پاسخ می‌دهد (Liang et al., 2010; Sadeghi et al., 2023a). معیار^۱، ارزش خاصی را برای آبخیز بیان می‌کند و منعکس‌کننده خواص فیزیکی، زیستی، اجتماعی و عوامل اساسی مؤثر بر روند سلامت آبخیز است (Jat et al., 2008; Talampas et al., 2025).

مطالعات متعددی در داخل و خارج از کشور برای ارزیابی و کمی‌سازی سلامت آبخیز با ابزارهای مختلف انجام شده است. در همین ارتباط، Wang و همکاران (۲۰۱۹) نیز با ارزیابی پایداری منابع آب پکن در دوره زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶، نشان دادند که سطح بهره‌وری منابع آب در این شهر نسبتاً پایین بوده و تغییرات در این دوره اهمیتی نداشتند، که این نتایج می‌تواند راهنمای سیاست‌گذاری برای توسعه پایدار منابع آب باشد. همچنین، Rodriguez-Flores و همکاران (۲۰۲۵) روشی مبتنی بر منطق فازی برای ارزیابی سلامت رودخانه‌ها ارائه دادند که بدون نیاز به تعداد زیادی کارشناس، می‌تواند با تحلیل معیارهای محیطی، اجتماعی و اقلیمی، وضعیت رودخانه‌ها در زمان و مکان‌های مختلف را تعیین کند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات زمانی و مکانی می‌تواند وزن سلامت رودخانه‌ها در حوزه‌های آبخیز مختلف را به شدت تغییر دهد.

Hazbavi و همکاران (۲۰۱۸) با ارزیابی حوزه آبخیز شازند در چندین سال، نشان دادند که سلامت این حوزه آبخیز، نسبتاً ناسالم و تغییرات زمان‌بندی در آن یکنواخت نبوده است. Sadeghi و همکاران (۲۰۲۳) نیز اثر اقدامات سازه‌ای محدود، مانند سازه‌های سنگی و سیمانی، بر بهبود سلامت آبخیز در دروازه قرآن شیراز را

بررسی کردند که نتایج نشان داد این اقدامات، اثری قابل‌توجه نداشتند. در عین حال، Rajabi و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه شاخص سلامت در آبخیز صفارود استان مازندران، پیش‌بینی کردند که اگرچه در آینده‌ای نزدیک تغییر معنی‌داری در شاخص سلامت آبخیزها رخ نخواهد داد، اما وضعیت آن‌ها از ناسالم به متوسط تغییر خواهد کرد. آن‌ها خاطر نشان کردند که اگرچه عوامل طبیعی تعیین‌کننده اصلی وضعیت کلی هستند، اما فعالیت‌های انسانی عامل غالب در تغییر منفی شاخص‌ها و افزایش خطر ایجاد زیرآبخیزهای ناسالم محسوب می‌شوند. بنابراین، ضروری است که مدیریت حوزه‌های آبخیز با توجه به اثرات عوامل طبیعی و انسانی، به‌ویژه تغییر اقلیم و فعالیت‌های توسعه‌ای، برنامه‌ریزی‌های مؤثری برای حفظ و بهبود سلامت این منابع انجام دهند. در مجموع، این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ارزیابی صحیح سلامت منابع طبیعی نیازمند رویکردهای چندعاملی، تلفیق شاخص‌ها و بهره‌گیری از مدل‌های تطبیقی و فازی است تا بتوان مدیریت مؤثر و پایداری در حوزه‌های آبخیز مختلف را تضمین کرد.

جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که درحالی‌که بسیاری از مطالعات از مدل مفهومی PSR برای ارزیابی وضعیت سلامت فعلی حوزه‌های آبخیز استفاده کرده‌اند، گزارش‌هایی در مورد پیش‌بینی وضعیت سلامت آبخیزهای رده سوم ایران و نیز کمی‌سازی اثرات معیارهای پویا مستند نشده است. علاوه بر این، اکثر پژوهش‌های قبلی بر حوزه‌های آبخیز منفرد متمرکز بوده‌اند. در مقابل، این مطالعه یک اطلس سلامت آبخیز برای ۶۴۰ آبخیز رده سوم کشور معرفی می‌کند و پیش‌بینی‌هایی برای سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ ارائه می‌دهد. در مطالعات هیدرولوژی و مدیریت منابع آب، حوزه‌های آبخیز بر اساس وسعت و ترتیب انشعابات رودخانه‌ای به رده‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند. آبخیزهای رده سوم به آبخیزهایی اشاره دارند که شبکه زهکشی آن‌ها به حدی

از پیچیدگی رسیده است که دارای سه سطح انشعاب باشد. به بیان ساده‌تر، این آبخیزها نه کوچک‌ترین و نه بزرگ‌ترین رده هستند، بلکه دارای وسعت و ویژگی‌های هیدرولوژیکی میانه بوده و به‌عنوان واحدهای همگن و مناسبی برای برنامه‌ریزی و مدیریت جامع منابع آب و خاک در مقیاس ناحیه‌ای در نظر گرفته می‌شوند.

اجرای طرح پیش‌بینی تغییرات سلامت آبخیز تحت تأثیر متغیرهای پویا، به‌دلیل تأثیر مستقیم این تغییرات بر کیفیت منابع آبی و بوم‌سازگان‌های مرتبط، ضروری است. آبخیزها به‌عنوان سامانه‌های پیچیده و قابل برنامه‌ریزی مدون، با جزئیات متعددی نظیر تغییرات اقلیمی، کاربری اراضی و فرآیندهای طبیعی در ارتباط هستند. در دنیای امروز، با توجه به تغییرات سریع اقلیمی و فشارهای ناشی از توسعه شهری، تحلیل دقیق و پیش‌بینی نقاط قوت و ضعف آبخیزها می‌تواند در مدیریت منابع آب و بهبود کیفیت زندگی جوامع محلی مؤثر باشد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی سلامت آبخیز براساس تغییرپذیری متغیرهای پویا در حوزه‌های آبخیز رده سوم کشور به‌عنوان واحدهای کاری مناسب مدیریتی در سطح اجرایی کلان برنامه‌ریزی شده است.

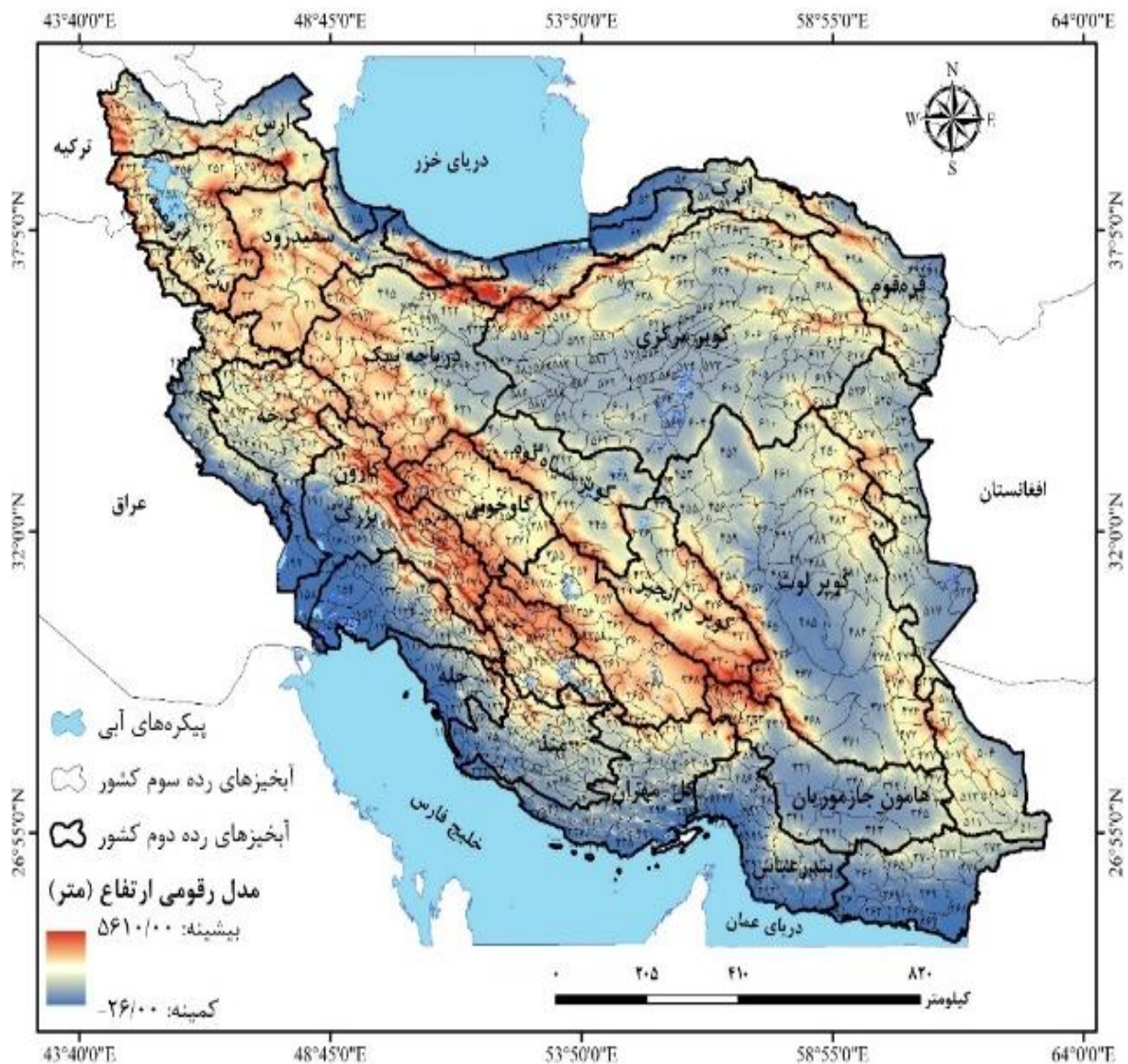
مواد و روش‌ها

آبخیزهای رده سوم کشور

گستره مطالعاتی در پژوهش حاضر شامل ۶۴۰ آبخیز رده سوم کل کشور به شرح مندرج در شکل (۱) است.

تهیه اطلاعات پایه و نقشه‌های رقومی

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی سلامت آبخیز براساس تغییرپذیری متغیرهای پویا در حوزه‌های آبخیز رده سوم کشور به‌عنوان واحدهای کاری مناسب مدیریتی در سطح کلان و بخش‌های اصلی اجرایی برنامه‌ریزی شده است. در فرآیند این پژوهش، اطلاعات و داده‌های مورد استفاده موجود در تنها پیشینه موجود در مقیاس آبخیزهای رده دوم کشور (Sadeghi et al., 2023) در طرح خاتمه یافته بنیاد ملی علم ایران به شماره ۴۰۰۵۷۹۴ و همچنین اطلاعات در حال تکوین و تکمیل پروژه در جریان بنیاد به شماره ۴۰۲۷۵۰۹ و سایر پژوهش‌های در جریان و برنامه‌ریزی شده و مورد حمایت سازمان‌های متولی از قبیل سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، سازمان هواشناسی کشور، سازمان تحقیقات منابع آب ایران، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز ملی آمار ایران و بنیاد ملی علم ایران براساس مدل مفهومی فشار-وضعیت-پاسخ استفاده شد. از طرفی، برای انجام پژوهش حاضر، اطلاعات حاصل از بازدید از منطقه مورد مطالعه و نظرات کارشناسان و مسئولین ذی‌ربط تجزیه و تحلیل شد. اطلاعات و نقشه‌های پایه مورد نیاز برای متغیرها از جمله برنامه‌های توسعه‌ای شامل داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی، خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی/ پوشش اراضی از منابع و مراجع مربوطه تهیه و استخراج شد. علاوه بر آن، ذخیره‌گاه اطلاعاتی داده‌ها در محیط‌های مختلف Excel 2013، ArcGIS 10.8، TerrSet 2020، v19.0.6 (برای پیش‌بینی نقشه کاربری اراضی)، Fragstatev 4.2 (برای محاسبه سنج‌های سیمای سرزمین)، Google Earth Engine، SPSS 2016 و زبان برنامه‌نویسی Python برای انجام پژوهش آماده شد.



شکل ۱- آبخیزهای رده سوم مطالعاتی در ارزیابی سلامت در ایران
Figure 1- Third-order watersheds in health assessment study in Iran

روش‌شناسی پژوهش

تعیین معیارهای ایستا و پویای سلامت

ابتدا معیارها و نمایه‌های تأثیرگذار در وضعیت سلامت و امنیت آبخیزهای رده سوم کشور مبتنی بر مشکلات حاکم بر حوزه‌های آبخیز کشور با دقت مکانی مناسب زیرآبخیزها (Sadeghi *et al.*, 2023b) و همچنین کلیه متغیرهای مؤثر بر سلامت آبخیز و قابل حصول در مقیاس ملی مطابق با جدول‌های ۱ تا ۳ به روش‌های مختلف (Hazbavi & Sadeghi, 2015; Hazbavi *et al.*, 2018; Sadeghi *et al.*, 2019; Sadeghi *et al.*,

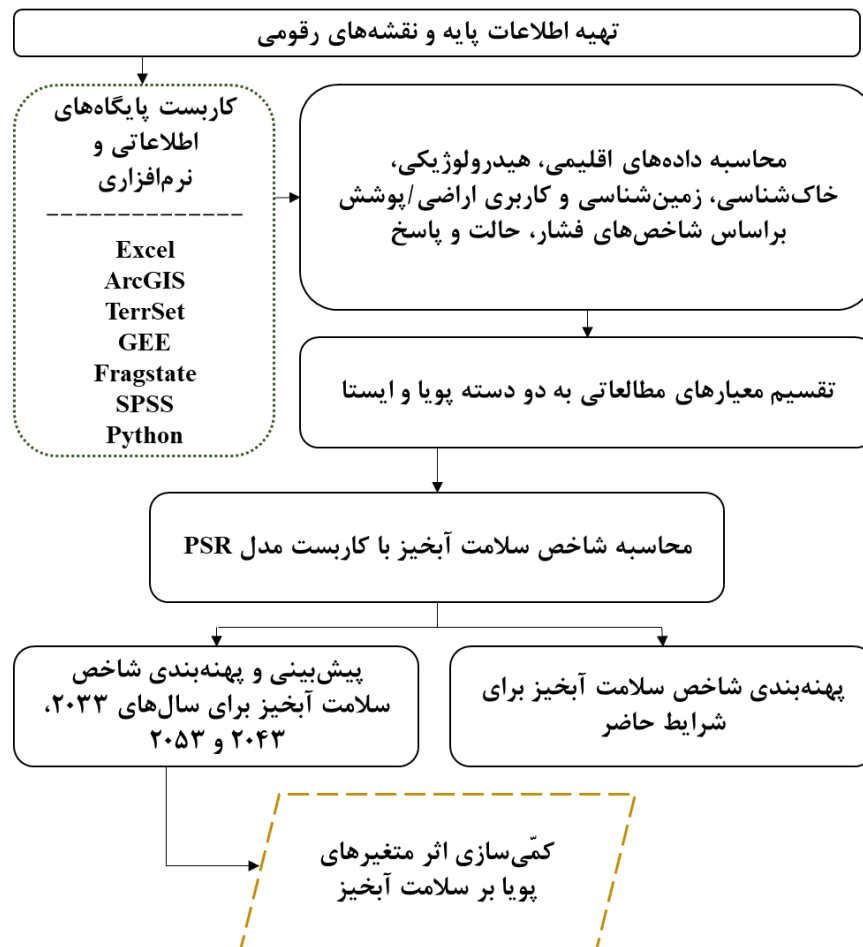
2020b) جمع‌آوری و در مدل PSR استخراج شد. نمودار جریانی روش‌شناسی پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است. نمایه‌ها و معیارهای مورد استفاده در این پژوهش در دو دسته ایستا یا ثابت در کوتاه‌مدت و پویا یا متغیر در کوتاه‌مدت طبقه‌بندی شدند. براساس گزارش‌های مربوط به طرح در حال تکوین و تکمیل پروژه در جریان بنیاد به شماره ۴۰۲۷۵۰۹، در مرحله مقدماتی، ۱۷۳ معیار از عوامل محیطی، اقلیمی و انسانی به‌عنوان شاخص فشار و ۳۳۱ معیار از عوامل محیطی، اقلیمی و انسانی به‌عنوان شاخص حالت و ۱۳ معیار از عوامل محیطی و انسانی به‌عنوان شاخص پاسخ انتخاب شدند.

در ادامه به دلیل وجود همبستگی بین برخی متغیرهای مورد استفاده، از آزمون تورم واریانس^۱ (VIF) برای کاهش داده‌ها و حذف متغیرهای با هم‌راستایی یا هم‌خطی^۲ استفاده و معیارهای نهایی مربوط به فشار، حالت و پاسخ به ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۳ و در دو دسته معیارهای ایستا و پویا متناسب با موجودیت و یا بازسازی سری زمانی ارائه شد.

محاسبه معیارهای ایستا و پویای سلامت

برای محاسبه معیارهای ایستا و پویای سلامت و پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور، از مجموعه‌ای از معیارها و داده‌های مکانی و اقلیمی برای ارزیابی شرایط آبخیزها بهره گرفته شده است. معیارهای ارتفاع، شیب و تراکم زهکشی از نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع با دقت ۱۲/۵ متر (از سامانه GEE) استخراج و مورد استفاده قرار گرفتند. معیارهای مرتبط با اقلیم شامل بارش سالانه، اختلاف دما، تبخیر و تعرق و تداوم گرد و غبار نیز از آمار سازمان هواشناسی و محصولات MODIS برای دوره ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۲ جمع‌آوری شدند. برای تخمین و توزیع معیار فرساینده‌گی باران، از نقشه‌ها و روابط منطقه‌ای موجود در سطح کشور و گزارش‌های طرح جامع مدیریت حوزه‌های آبخیز بهره‌برداری شد (Sadeghi & Hazbavi, 2015; Sadeghi & Tavangar, 2015). شاخص خشکسالی SPI بر اساس داده‌های سالانه بیش

از ۳۰ سال بارندگی و با روش‌های زمین‌آمار مانند روش معکوس وزنی فاصله محاسبه شد (Sadeghi et al., 2020b). اطلاعات مربوط به جمعیت، سطح بحران آب، تنش‌ها و سیلاب نیز از گزارش‌های ملی و مستندات تحقیقاتی مرتبط استخراج شد (Zakeri et al., 2022; Kabolizadeh et al., 2022). همچنین، تعداد زمین‌لغزش‌ها، نسبت اراضی حساس به فرسایش، سیل‌خیز، فرونشست، و مکان‌های آسیب‌دیده ناشی از سیل، فرسایش و فرونشست، از نقشه‌ها و گزارش‌های سازمان‌های مرتبط جمع‌آوری شد (Hatefi & Sadeghi, 2021). داده‌های مربوط به نسبت اراضی انسانی، کیفیت و تغذیه منابع آب زیرزمینی، حجم برداشت و تراکم چاه‌های غیرمجاز نیز از آمارهای شرکت مدیریت منابع آب ایران و نقشه‌های ماهواره‌ای MODIS با بهره‌گیری از سامانه Google Earth Engine استخراج شدند (Swenson, 2012). علاوه بر این، نمایه‌های پوشش گیاهی، سنجه‌های سیمای سرزمین شامل تکه‌تکه‌شدگی، تجمع، تنوع شانون و یکنواختی، از محصولات MODIS در آبخیزهای رده سوم کشور برداشت شد. تراکم گسل‌ها و جاده‌ها بر اساس نقشه‌های طرح مدیریت جامع آبخیزهای کشور (۱۳۹۶) مورد تحلیل قرار گرفت و اثرات فعالیت‌های انسانی، مانند تداخل جاده‌ها و شبکه‌های زهکشی، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 و روش تقاطع^۳ شناسایی شدند.



شکل ۲- نمودار جریانی روش شناسی پژوهش

Figure 2- Flowchart of research methodology

جدول ۱- عامل‌ها و معیارهای ایستا و پویای شاخص فشار (P) در ارزیابی سلامت و امنیت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 1- Static and dynamic factors and criteria of the Pressure index (P) in assessing the health and security of the country's third-order watersheds

عوامل	معیار	نوع معیار
اقلیمی	متوسط بارش سالیانه (mm)	پویا
	متوسط فرساینده‌گی باران ($Mj\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$)	پویا
	متوسط دمای سالیانه هوا ($^{\circ}C$)	پویا
	بیشینه دمای سطح زمین ($^{\circ}C$)	پویا
	انحراف معیار دمای سطح زمین ($^{\circ}C$)	پویا
	متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل سالیانه (mm)	پویا
	متوسط سرعت باد سالیانه در ارتفاع ۲ متر ($m\ s^{-1}$)	پویا
هیدرولوژی	متوسط فرسایش آبی ($t\ ha^{-1}\ y^{-1}$)	پویا
	وسعت مناطق با سیل شدید (km^2)	ایستا
	وسعت مناطق با سیل متوسط (km^2)	ایستا
	وسعت مناطق با سیل عادی (km^2)	ایستا
	وسعت دشت‌های مجاز آب زیرزمینی (km^2)	ایستا
	طول شبکه زهکشی (km)	ایستا
محیطی	خسارت ناشی از فرسایش آبی (میلیارد تومان)	پویا
	لغزش (تعداد)	ایستا
	طول گسل (km)	ایستا
	انحراف معیار شاخص خشکی دما-گیاه خاک	پویا

ادامه جدول ۱- عامل‌ها و معیارهای ایستا و پویای شاخص فشار (P) در ارزیابی سلامت و امنیت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 1- Static and dynamic factors and criteria of the Pressure index (P) in assessing the health and security of the country's third-order watersheds

عوامل	معیار	نوع معیار
محیطی	کمینه شاخص خاک لخت (بی‌بعد)	پویا
	بیشینه شاخص خاک لخت (بی‌بعد)	پویا
	انحراف معیار شاخص خاک لخت (بی‌بعد)	پویا
	کمینه شاخص شوری خاک (بی‌بعد)	پویا
	بیشینه شاخص شوری خاک (بی‌بعد)	پویا
	انحراف معیار شاخص شوری خاک (بی‌بعد)	پویا
	کمینه نیتروژن خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک)	ایستا
	انحراف معیار نیتروژن خاک (میلی گرم در کیلوگرم خاک)	ایستا
	کمینه شیب (درصد)	ایستا
	بیشینه شیب (درصد)	ایستا
	متوسط شیب (درصد)	ایستا
	انحراف معیار شیب (درصد)	ایستا
کاربری اراضی	اختلاف ارتفاع (m)	ایستا
	وسعت اراضی مرتعی (km^2)	پویا
	وسعت اراضی بایر (km^2)	پویا
	وسعت اراضی جنگلی (km^2)	پویا
	تالاب (تعداد)	ایستا
انسانی	وسعت اراضی زراعی دیم و آبی (km^2)	پویا
	وسعت مناطق مسکونی (km^2)	پویا
	متوسط فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری نامطلوب انسانی (cm y^{-1})	ایستا
	کمینه شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی (بی‌بعد)	پویا
	بیشینه شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی (بی‌بعد)	پویا
	متوسط شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی (بی‌بعد)	پویا
	انحراف معیار شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی (بی‌بعد)	پویا
	جمعیت کل (نفر)	پویا
	وسعت طرح‌های معدنی (km^2)	ایستا
	انقطاع هیدرولوژیک (تعداد)	ایستا

جدول ۲- عامل‌ها و معیارهای ایستا و پویای شاخص وضعیت (S) در ارزیابی سلامت و امنیت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 2- Static and dynamic factors and criteria of the State index (S) in assessing the health and security of the country's third-order watersheds

عوامل	معیار	نوع معیار
اقلیمی	ضریب تغییرات بارش سالیانه (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات بارش بیشینه (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات بارش کمینه (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات میانه بارش (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات فرساینده‌گی باران (درصد)	پویا
	تراکم فرساینده‌گی باران ($\text{Mj ha}^{-1} \text{h}^{-1}$)	پویا
	متوسط شاخص Palmer (بی‌بعد)	پویا
	ضریب تغییرات شاخص Palmer (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات دمای سطح زمین (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات سرعت متوسط باد (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات سرعت بیشینه باد (درصد)	پویا

ادامه جدول ۲- عامل‌ها و معیارهای ایستا و پویای شاخص وضعیت (S) در ارزیابی سلامت و امنیت آبخیزهای رده سوم کشور
Table 2- Static and dynamic factors and criteria of the State index (S) in assessing the health and security of the country's third-order watersheds

عوامل	معیار	نوع معیار
اقلیمی	ضریب تغییرات سرعت کمینه باد (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل سالیانه (درصد)	پویا
	نسبت متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل به متوسط بارش سالیانه (بی‌بعد)	پویا
	کمینه ضریب تغییرات دمای متوسط (درصد)	پویا
	کمینه ضریب تغییرات دمای بیشینه (درصد)	پویا
	بیشینه ضریب تغییرات دمای بیشینه (درصد)	پویا
	متوسط ضریب تغییرات دمای بیشینه (درصد)	پویا
	بیشینه ضریب تغییرات دمای کمینه (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات کمینه دمای کمینه (درصد)	پویا
	انحراف معیار ضریب تغییرات دمای بیشینه (درصد)	پویا
هیدرولوژی	انحراف معیار ضریب تغییرات دمای کمینه (درصد)	پویا
	کمینه تغییرات شیب دبی (بی‌بعد)	ایستا
	متوسط تغییرات شیب دبی (بی‌بعد)	ایستا
	ضریب تغییرات شیب دبی (درصد)	ایستا
	ذخیره آب زیرزمینی (Mm^3)	ایستا
	کمینه شاخص نرمال‌شده تفاضل برف (بی‌بعد)	پویا
	متوسط شاخص نرمال‌شده تفاضل برف (بی‌بعد)	پویا
	انحراف معیار شاخص نرمال‌شده تفاضل برف (بی‌بعد)	پویا
	ضریب تغییرات شاخص نرمال‌شده تفاضل برف (درصد)	پویا
	کمینه شاخص نرمال‌شده تفاضل آب (بی‌بعد)	پویا
	بیشینه شاخص نرمال‌شده تفاضل آب (بی‌بعد)	پویا
	متوسط شاخص نرمال‌شده تفاضل آب (بی‌بعد)	پویا
	انحراف معیار شاخص نرمال‌شده تفاضل آب (بی‌بعد)	پویا
	ضریب تغییرات شاخص نرمال‌شده تفاضل آب (درصد)	پویا
	متوسط تغییرات روزانه آب زیرزمینی (mm)	ایستا
	انحراف معیار رطوبت زیرسطحی (mm)	پویا
	ضریب تغییرات رطوبت زیرسطحی (درصد)	پویا
محیطی	ضریب تغییرات رطوبت سطحی (درصد)	پویا
	تراکم آبراهه ($km.km^{-2}$)	ایستا
	ضریب تغییرات ارتفاع (درصد)	ایستا
	ضریب تغییرات شیب (درصد)	ایستا
	نسبت وسعت شیب رو به شرق به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	ایستا
	نسبت وسعت دشت‌های مجاز آب زیرزمینی به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	ایستا
	بیشینه جرم مخصوص ظاهری خاک	ایستا
	انحراف معیار جرم مخصوص ظاهری خاک	ایستا
	ضریب تغییرات کربن آلی خاک (درصد)	ایستا
	ضریب تغییرات نیتروژن خاک (درصد)	ایستا
	ضریب تغییرات شاخص خاک لخت (%)	پویا
	ضریب تغییرات شوری خاک (درصد)	پویا
	ضریب تغییرات شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی خاک (درصد)	پویا
	کمینه شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی (بی‌بعد)	پویا
	بیشینه شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی (بی‌بعد)	پویا
	انحراف معیار شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی (بی‌بعد)	پویا
	ضریب تغییرات شاخص نرمال‌شده تفاضل پوشش گیاهی (درصد)	پویا

ادامه جدول ۲- عامل‌ها و معیارهای ایستا و پویای شاخص وضعیت (S) در ارزیابی سلامت و امنیت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 2- Static and dynamic factors and criteria of the State index (S) in assessing the health and security of the country's third-order watersheds

عوامل	معیار	نوع معیار
محیطی	کمینه فرسایش پذیری آبی خاک ($t\ h^{-1}m\ j^{-1}mm^{-1}$)	ایستا
	بیشینه فرسایش پذیری آبی خاک ($t\ h^{-1}m\ j^{-1}mm^{-1}$)	ایستا
	کمینه فرسایش پذیری بادی خاک	ایستا
	بیشینه فرسایش پذیری بادی خاک	ایستا
	متوسط فرسایش پذیری بادی خاک	ایستا
	انحراف معیار فرسایش پذیری بادی خاک	ایستا
	ضریب تغییرات فرسایش پذیری بادی خاک (درصد)	ایستا
	کمینه شاخص هواویز (بی‌بعد)	پویا
	متوسط شاخص هواویز (بی‌بعد)	پویا
کاربری اراضی	شاخص تنوع Shannon (بی‌بعد)	پویا
	طبیعت‌گرایی (بی‌بعد)	پویا
	نسبت وسعت اراضی جنگلی به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	پویا
	نسبت اراضی مرتعی به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	پویا
	نسبت وسعت مناطق با سیل شدید به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	ایستا
	نسبت وسعت مناطق با سیل متوسط به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	ایستا
	نسبت وسعت مناطق با سیل عادی به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	ایستا
	نسبت وسعت مناطق مسکونی به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	پویا
انسانی	ضریب تغییرات فرونشست ناشی از بهره‌برداری نامطلوب انسانی (درصد)	ایستا
	نسبت وسعت طرح‌های معدنی به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	ایستا
	نسبت وسعت دشت‌های ممنوعه آب زیرزمینی به وسعت آبخیز (بی‌بعد)	ایستا
	تراکم انقطاع هیدرولوژیک (تعداد بر km^2)	ایستا
	تراکم جاده ($km\ km^{-2}$)	ایستا
	ضریب تغییرات شاخص تفاضل نرمال شده خاک‌ورزی (درصد)	پویا
	شیب Sen شاخص تفاضل نرمال شده خاک‌ورزی (درصد)	پویا
	تراکم زراعی (نفر بر km^2)	پویا
	تراکم جمعیت کل (نفر بر km^2)	پویا
	ضریب تغییرات غلظت گاز دی اکسید نیتروژن ($mol\ m^{-2}$)	پویا
	حداقل غلظت گاز مونوکسید کربن ($mol\ m^{-2}$)	پویا
	حداکثر غلظت گاز مونوکسید کربن ($mol\ m^{-2}$)	پویا
	متوسط غلظت گاز مونوکسید کربن ($mol\ m^{-2}$)	پویا
	انحراف معیار غلظت گاز مونوکسید کربن ($mol\ m^{-2}$)	پویا
	ضریب تغییرات غلظت گاز مونوکسید کربن (درصد)	پویا

جدول ۳- عامل‌ها و معیارهای ایستا و پویای شاخص پاسخ (R) در ارزیابی سلامت و امنیت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 3- Static and dynamic factors and criteria of the Response index (R) in assessing the health and security of the country's third-order watersheds

عوامل	معیار	نوع معیار
انسانی	وسعت طرح‌های اجرایی حفاظتی محیط زیست (km^2)	ایستا
	وسعت دشت‌های محدود شده برداشت آب زیرزمینی (km^2)	ایستا
	حجم عملیات مهندسی آبخیزداری (m^3)	ایستا
(اقدامات یا طرح‌های انجام‌شده)	تعداد عملیات مهندسی آبخیزداری	ایستا
	وسعت عملیات زیستی آبخیزداری انجام‌نشده (ha)	پویا
	وسعت عملیات زیستی آبخیزداری انجام‌شده (ha)	پویا
	وسعت مطالعات آبخیزداری انجام‌شده (ha)	ایستا

پیش‌بینی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور

برای پیش‌بینی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در سه مقطع زمانی آینده، تنها از متغیرهای پویای مؤثر بر سلامت و کاربست مدل PSR استفاده شد. برای این منظور و پس از استانداردسازی متغیرهای نهایی ایستا و پویا، شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ بر اساس میانگین حسابی مقدارهای استاندارد شده معیارهای مورد مطالعه محاسبه شدند. در نهایت برای تعیین وضعیت نهایی سلامت آبخیزهای رده سوم کشور، از میانگین هندسی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ برای هر یک از زیرآبخیزها طبق رابطه (۱) استفاده شد (Hazbavi et al., 2018; Sadeghi et al., 2023b; (Rajabi et al., 2024).

$$(1) \quad \frac{1}{k} \left[\prod_{n=1}^k X_n \right] = \text{میانگین هندسی}$$

که در آن، $\prod_{n=1}^k X_n$ به ترتیب برابر با حاصل ضرب شاخص‌ها و تعداد شاخص‌هاست. در ادامه، برای محاسبه شاخص سلامت جامع بوم‌سازگان (شاخص نهایی) در مقیاس آبخیزهای رده سوم، از میانگین هندسی استفاده شد. این روش به این دلیل انتخاب شد که میانگین هندسی به دلیل حساسیت بالا به تغییرات مقادیر هر متغیر، امکان اینکه کاهش شدید مقدار یک شاخص توسط مقادیر خوب سایر شاخص‌ها پنهان بماند را ایجاد نمی‌کند و در نتیجه تغییرات در وضعیت سلامت را به طور دقیق‌تر منعکس می‌کند. پس از محاسبه این شاخص جامع برای هر آبخیز در سال‌های هدف (۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳)، نقشه‌های پهنه‌بندی برای هر سال به صورت مجزا تهیه شد. در نهایت، برای مقایسه روند تغییرات در طول زمان، این نقشه‌ها در کنار یکدیگر قرار گرفتند و تحلیل مقایسه‌ای انجام شد. برای ایجاد امکان مقایسه پهنه‌بندی سلامت در زمان‌های مختلف، مبادرت به تهیه چهار نقشه جداگانه مربوط به حال حاضر و سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ و همچنین مداخله درصد نسبی تغییرات معیارهای پویا در شرایط کنونی و یا یک مقطع قبل شده و نهایتاً پهنه‌بندی جدید برای سال مطالعاتی آینده تهیه شد (Chamani et al., 2023).

کمی‌سازی اثر متغیرهای پویا بر سلامت آبخیز

پس از طبقه‌بندی شاخص سلامت آبخیز در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳، اقدام به تعیین میزان اثرات کمی متغیرهای پویا در تأثیرپذیری شاخص سلامت آبخیز در سال‌های مذکور با استفاده از رگرسیون چندمتغیره و درصد مشارکت هر معیار شد (Odemis & Evrendilek, 2008; Hazbavi et al., 2020).

نتایج و بحث

نتایج مربوط به مقادیر کمی آماره‌های خطا و صحت‌سنجی مربوط به مدل‌های بهینه در پیش‌بینی معیارهای پویا مربوط به شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین در جدول‌های ۴ و ۵، نتایج کامل مربوط به پیش‌بینی کاربری اراضی برای سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ ارائه شده است.

نتایج به دست آمده از ارزیابی مدل‌های بهینه در پیش‌بینی معیارهای پویای سلامت آبخیزها (جدول ۴) نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌ها بر اساس ویژگی‌های داده‌ها و روابط غیرخطی متفاوت است. در این میان، مدل‌های رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی با ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۶ در پیش‌بینی میزان جمعیت و شاخص TVDI (شاخص خشکی، دما، پوشش گیاهی) عملکرد برجسته‌ای داشته‌اند که تأکیدی بر قابلیت این مدل‌ها در برازش داده‌های مربوطه است. سایر پژوهش‌گران (Nasiri Khiavi et al., 2023a; Nasiri Khiavi et al., 2023b) نیز در مطالعات کیفیت آب در آبخیزهای مرکزی و شمال غربی ایران، این الگوریتم‌ها را تایید کرده‌اند. همچنین در مطالعه حاضر، مدل SARIMA در تحلیل داده‌های سری‌زمانی از قبیل تغییرات روزانه آب زیرزمینی، شاخص خشکسالی Palmer و مؤلفه‌های سرعت باد، با ضریب تعیین بین ۰/۷۸ و ۰/۸۵، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داد که بر اهمیت استفاده از مدل‌های مبتنی بر ساختار زمانی در تحلیل پدیده‌های هیدرواقليمی تأکید دارد. در مطالعه Rajabi و همکاران (۲۰۲۴)،

پیش‌بینی شاخص سلامت آبخیز در منطقه صفارود استان مازندران با بهره‌گیری از مدل SARIMA نتایج مناسبی داشته است. از طرف دیگر، الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان و K نزدیک‌ترین همسایه، در پیش‌بینی شاخص‌های سنجش از دور نظیر NDVI، NDWI و شوری خاک، با ضریب تعیین بالاتر از ۰/۸۴، نشانگر برتری و قابلیت بالای آن‌ها در مدل‌سازی داده‌های پیچیده و چندبعدی هستند. نتایج مطالعات مشابه نیز توسط دیگر پژوهش‌گران (Nasiri Khiavi et al., 2024) پشتیبانی شده است، که نشان می‌دهد این الگوریتم‌ها در پهنه‌بندی و ارزیابی سلامت آبخیز توانایی خوبی دارند. نقشه‌های پیش‌بینی کاربری اراضی در سال‌های آینده (۲۰۳۳ تا ۲۰۵۳) نیز نشان دادند که ضریب Kappa از

۰/۹۴ در کوتاه‌مدت به ۰/۷۸ در بلندمدت کاهش یافته است. این روند کاهش عمدتاً به دلیل افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های بلندمدت و تأثیر عوامل انسانی و محیطی است؛ اما دقت بالا در حدود ۰/۹۶ در کوتاه‌مدت، نشان‌دهنده قابلیت اطمینان مدل در این بازه زمانی است. بنابراین، توصیه می‌شود که برای حفظ دقت، به‌روزرسانی منظم مدل با داده‌های جدید و در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار ضروری باشد (جدول ۵). در نهایت، مطالعه Fathizad و همکاران (۲۰۱۴) در آبخیز دوبرج ایلام، با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و مدل Markov، نشان داد که نقشه‌های کاربری پیش‌بینی شده برای آینده می‌توانند به‌عنوان سامانه‌های هشدار برای پیامدها و تأثیرات آینده تغییرات کاربری، مورد استفاده قرار گیرند.

جدول ۴- آماره‌های خطا، صحت‌سنجی و مدل بهینه در پیش‌بینی معیارهای پویای شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 4- Error and precision statistics, and optimal model in predicting dynamic criteria of the health index of the third-order watersheds of Iran

معیار*	مدل بهینه	آماره R ²	آماره RMSE	آماره MAE
متوسط فرسایندگی باران	رگرسیون توانی	0.75	17.2	16.04
خسارات ناشی از فرسایش	رگرسیون خطی	0.81	9.08	5.98
تغییرات روزانه آب زیرزمینی	SARIMA	0.78	0.99	0.78
شاخص خشک‌سالی Palmer	SARIMA	0.81	0.97	0.79
تبخیر- تعرق پتانسیل	جنگل تصادفی	0.82	0.99	0.81
جمعیت	رگرسیون خطی	0.98	1.24	0.98
متوسط فرسایش آبی	رگرسیون خطی	0.89	0.91	0.82
مؤلفه‌های بارش	SVM	0.88	0.91	0.79
مؤلفه‌های دما	جنگل تصادفی	0.86	0.65	0.55
شاخص BSI	SARIMA	0.83	1.56	0.97
شاخص LST	SARIMA	0.9	0.91	0.72
شاخص NDSI	SARIMA	0.91	0.83	0.69
شاخص NDTI	ماشین بردار پشتیبان	0.87	0.98	0.86
شاخص NDVI	جنگل تصادفی	0.84	1.22	0.92
شاخص NDWI	جنگل تصادفی	0.93	0.78	0.67
شاخص شوری خاک	ماشین بردار پشتیبان	0.95	0.66	0.52
شاخص TVDI	K نزدیک‌ترین همسایه	0.96	0.55	0.45
مؤلفه‌های باد	SARIMA	0.85	3.21	2.12

* BSI (شاخص خاک لخت)، LST (دمای سطح زمین)، NDSI (شاخص نرمال شده تفاضل برف)، NDTI (شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی)، NDVI (شاخص نرمال شده تفاضل گیاهی)، NDWI (شاخص نرمال شده تفاضل آب)، TVDI (شاخص خشکی، دما، پوشش گیاهی).

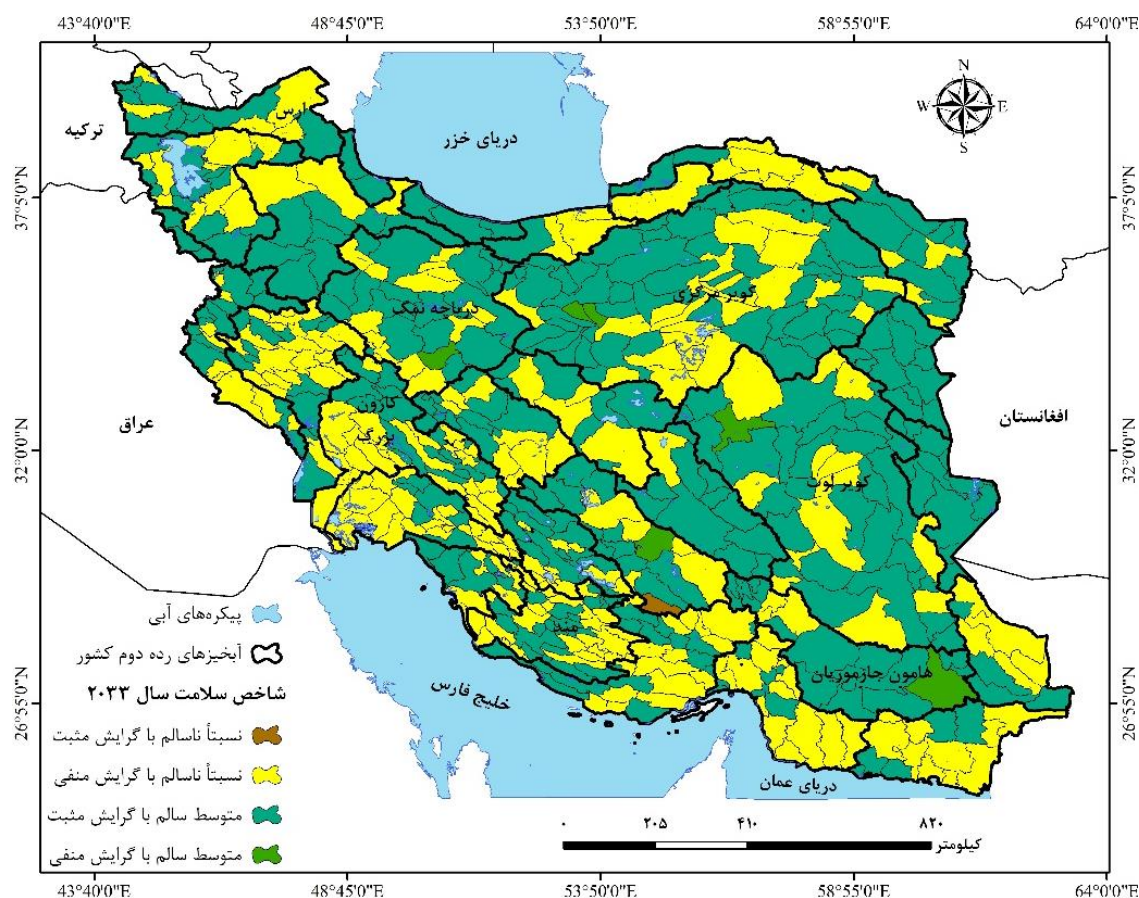
جدول ۵- ضریب Kappa و دقت تولیدی کلی مربوط به پیش‌بینی کاربری اراضی

Table 5- Kappa coefficient and overall production accuracy related to land-use prediction

سال پیش‌بینی	ضریب Kappa	تفسیر کیفی ضریب Kappa	صحت تولیدی
۲۰۳۳	0.94	توافق عالی	0.96
۲۰۴۳	0.84	توافق عالی	0.91
۲۰۵۳	0.78	توافق قابل توجه	0.87

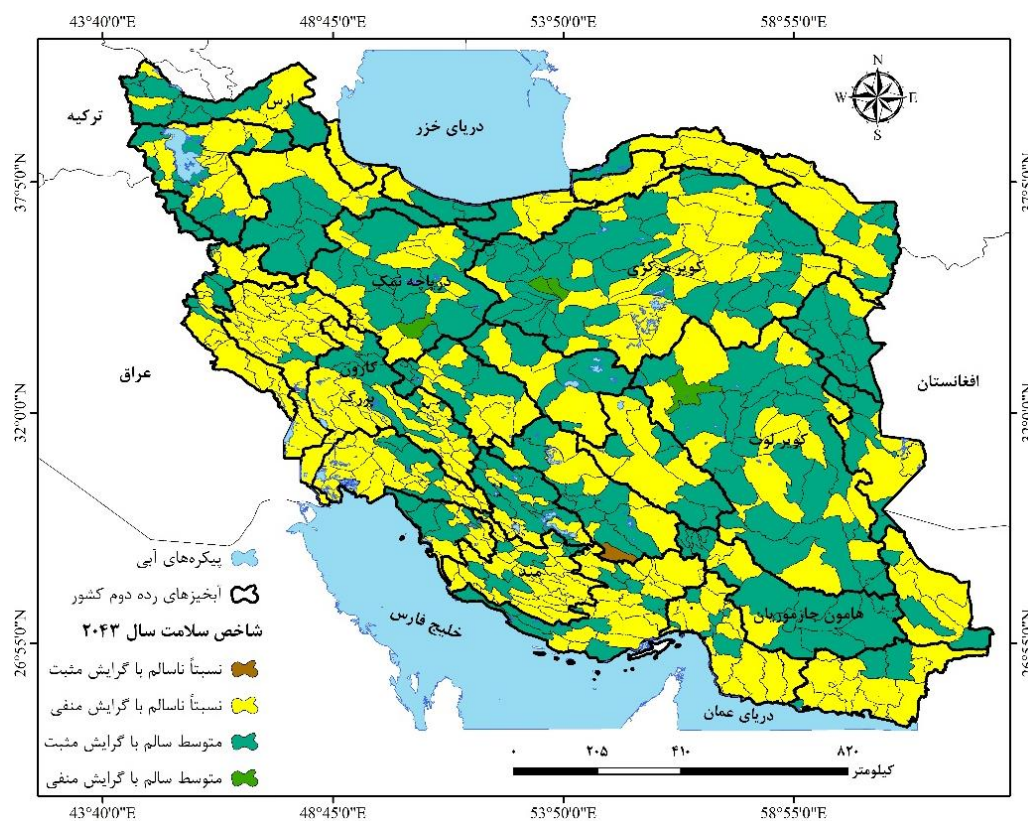
پس از کمی‌سازی و پهنه‌بندی شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ، اقدام به پهنه‌بندی شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های آینده شد. براین اساس،

نقشه‌های شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور برای سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ به‌ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است.



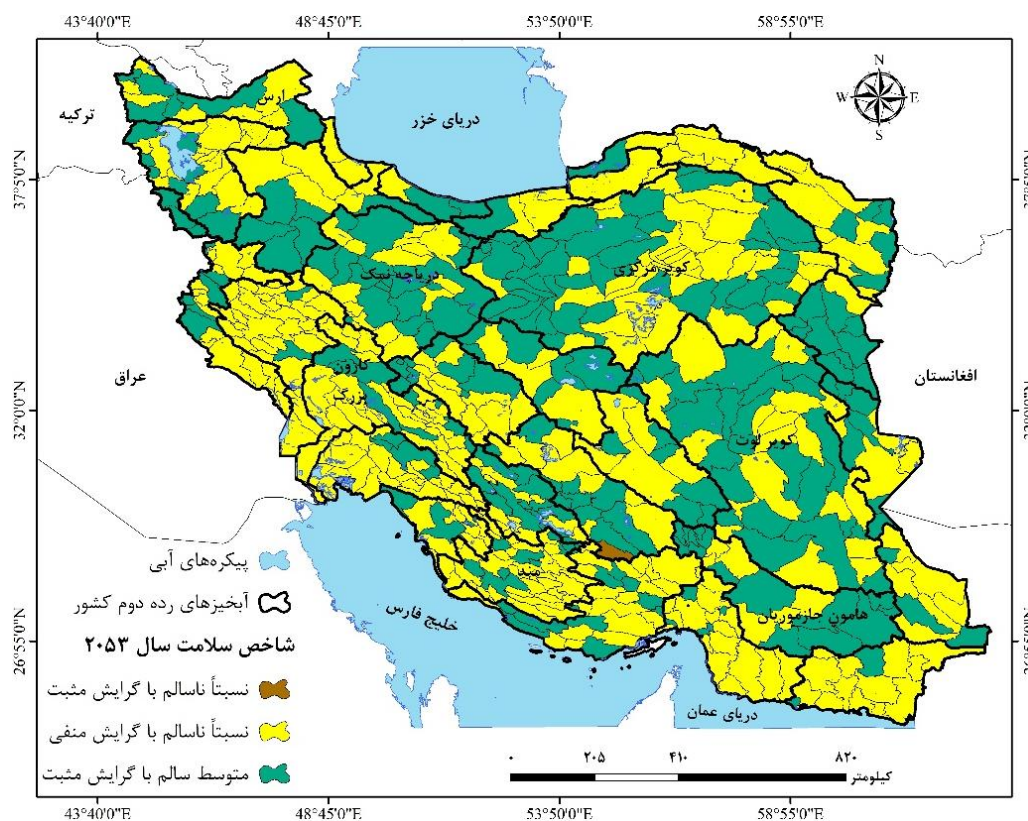
شکل ۳- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای ۲۰۳۳

Figure 3- Zoning of health status in Iran's third-order watersheds for 2033



شکل ۴- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای ۲۰۴۳

Figure 4- Zoning of health status in Iran's third-order watersheds for 2043



شکل ۵- پهنه‌بندی وضعیت سلامت در آبخیزهای رده سوم کشور برای ۲۰۵۳

Figure 5- Zoning of health status in Iran's third-order watersheds for 2053

در تحلیل وضعیت سلامت آبخیزهای کشور برای سال ۲۰۳۳ (شکل ۳)، توزیع جغرافیایی ناهمگن است. در شمال (دریای خزر)، وضعیت مطلوب است (۶۰ تا ۷۰ درصد در مناطق خوب و بسیار خوب)، به‌ویژه در گیلان و مازندران با پوشش گیاهی و بارندگی مناسب. در جنوب (دریای عمان و خلیج فارس)، وضعیت ضعیف‌تر است (۴۰ تا ۵۰ درصد در طبقات متوسط و ضعیف)، به‌ویژه در هرمزگان و سیستان و بلوچستان. در شرق (مناطق مرکزی و شرقی)، خشکسالی‌ها و مدیریت نادرست موجب ناسالم بودن بیش از ۵۰ درصد شده‌اند، به‌ویژه در خراسان رضوی و جنوبی. در غرب (زاگرس)، وضعیت نسبتاً بهتر است (۵۵ تا ۶۵ درصد خوب)، اما جنگل‌زدایی و فرسایش در استان‌های لرستان و کردستان آسیب‌زا بوده است. در نواحی فرعی، شمال‌غرب وضعیت متوسط تا خوب دارد، اما جنوب‌شرق به دلیل خشکی، نامطلوب است. در کل، تنها ۳۰ تا ۳۵ درصد آبخیزها در وضعیت متوسط و سالم قرار دارند، و بیش از ۴۰ درصد ناسالم هستند.

در سال ۲۰۴۳، وضعیت سلامت آبخیزهای کشور نشان‌دهنده تنوع جغرافیایی است. در شمال و شمال‌غربی (گیلان، مازندران، آذربایجان شرقی)، به‌دلیل جنگل‌های فراوان و بارندگی مناسب، وضعیت مطلوب (۶۰ تا ۷۰ درصد سالم و نسبتاً سالم) دارد و این یافته‌ها با نتایج مطالعات Parkes و همکاران (۲۰۱۰) و Nasiri Khiavi و همکاران (۲۰۲۴) در یک راستاست. در مناطق شرقی و جنوب‌شرقی مثل سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی، خشکسالی و فشارهای انسانی باعث افزایش نسبی مناطق ناسالم به حدود ۵۰ تا ۶۰ درصدی شده است. در غرب (کردستان)، وضعیت متوسط (۴۰ تا ۵۰ درصد) به‌دلیل توپوگرافی کوهستانی و مدیریت مناسب مشاهده شد. در جنوب و جنوب‌غربی (مثل استان‌های اصفهان، فارس)، کاهش منابع آب و فعالیت‌های کشاورزی غیراصولی باعث افزایش مناطق ناسالم به ۴۰ تا ۵۰ درصدی شده است. Sadeghi و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی و تغییرپذیری سیل‌محور سلامت حوزه آبخیز

دروازه قرآن شیراز از سازه‌های آبخیزداری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شاخص سلامت آبخیز در حد متوسط بوده است. در بعضی نواحی فرعی، اثر مثبت رطوبت دریای خزر و خشکی فلات مرکزی قابل مشاهده است. در مجموع، وضعیت سلامت آبخیزها در سال ۲۰۴۳ متفاوت است و نشان می‌دهد نیازمند برنامه‌ریزی منطقه‌ای برای بهبود مدیریت منابع آب و خاک است (شکل ۴).

در سال ۲۰۵۳، وضعیت سلامت آبخیزهای کشور نشان‌دهنده تفاوت‌های منطقه‌ای قابل توجه است. در شمال، شامل گیلان و مازندران، به‌دلیل بارش زیاد و پوشش گیاهی متراکم، وضعیت مطلوب است و حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد در طبقات سالم و نسبتاً سالم قرار دارند. در شمال‌شرقی و شمال‌غربی، با کاهش بارش و فعالیت‌های انسانی، سلامت کاهش یافته و به ۳۰ تا ۴۰ درصد رسیده است. در شرق و جنوب‌شرقی، مانند خراسان رضوی، خشکسالی و برداشت بی‌رویه باعث کاهش سلامت به زیر ۲۰ درصد و غلبه مناطق ناسالم شده است. در جنوب و جنوب‌غربی مانند خوزستان، آلودگی‌های صنعتی و کشاورزی، سلامت را به ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش داده و مناطق بحرانی دیده می‌شود. در غرب و در استان کردستان، وضعیت متوسط است. مجموعاً، وضعیت آبخیزهای کشور در ۲۰۵۳ بحرانی است، و فقط در مناطق محدود شمالی قابل قبول است، در حالی‌که در بیش‌تر مناطق شرق و جنوب، وضعیت بسیار نامناسب است (شکل ۵). در این راستا، Momenian و همکاران (۲۰۱۸) زیرحوزه‌های آبخیز قطورچای در شمال‌غرب ایران بر اساس درجه سلامت آبخیز را ارزیابی و اولویت‌بندی نمودند نشان دادند که وضعیت سلامت کلیه زیرآبخیزها متوسط است. جدول ۶، نشان‌دهنده میزان درصد تأثیر هر یک از متغیرهای پویا در شاخص سلامت آبخیز در سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ است.

تحلیل سهم اثر معیارهای پویا در شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور نشان داد که برخی معیارها تأثیر قابل‌توجهی بر سلامت این بوم‌سازگان‌ها داشتند.

در بین معیارهای بررسی‌شده، متوسط فرسایش آبی با سهم اثر مثبت و نسبتاً بالایی در تمام سال‌های مورد مطالعه (۷/۵۳ درصد در سال ۲۰۳۳، ۵/۳۰ درصد در ۲۰۴۳ و ۶/۲۴ درصد در ۲۰۵۳) به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی مؤثر بر سلامت آبخیزها شناسایی شده است. این نتایج حاکی از آن است که فرسایش آبی نقش تعیین‌کننده‌ای در تخریب آبخیزها ایفا می‌کند و نیاز به اجرای برنامه‌های مدیریتی فوری برای مهار آن وجود دارد. جمعیت کل نیز با سهم اثر بسیار بالا (۱۴/۵۰ درصد در ۲۰۳۳، ۱۲/۹۹ درصد در سال ۲۰۴۳ و ۱۶/۰۷ درصد در سال ۲۰۵۳) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل فشار بر سلامت آبخیزها ظاهر شده است. این یافته نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی و توسعه سکونت‌گاه‌ها بر تخریب بوم‌سازگان‌های آبخیز است. از سوی دیگر، معیارهای مرتبط با پوشش گیاهی مانند وسعت اراضی مرتعی (۵/۷۳ درصد در سال ۲۰۳۳ و ۵/۴۲ درصد در سال ۲۰۵۳) و جنگلی (۱/۳۰ درصد در سال ۲۰۳۳ و ۱/۴۲ درصد در سال ۲۰۵۳) تأثیر

مثبتی بر سلامت آبخیزها داشته‌اند که بر اهمیت حفظ، بازیابی و احیای این اراضی تأکید می‌کند (جدول ۶). همچنین بررسی متغیرهای پویای مرتبط با نوسانات دما تأکید بر حساسیت بالای سامانه به تغییرات اقلیمی است، به‌طوری‌که نوسانات در دمای بیشینه و کمینه تأثیر بسیار بالایی دارند و اثر آن‌ها در هر سه سال، به ویژه نوسان دمای کمینه، به بیش از ۴۷/۶۶ درصد می‌رسد که این موضوع نشان می‌دهد هرگونه تغییرات اقلیمی و دمایی می‌تواند اثرات قابل‌توجهی بر سلامت محیط و سامانه‌های زیستی داشته باشد. در نهایت، اثر متغیرهای پویای مربوط به کاربری اراضی و پوشش گیاهی نیز با روند فزاینده‌ای در سال‌های مورد مطالعه ظاهر می‌شود، به گونه‌ای که در سال ۲۰۵۳ اثر آن بیش از ۵/۳۳ درصد بر شاخص سلامت است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در برنامه‌ریزی‌های آینده، توجه ویژه به مهار و مدیریت نوسانات دما، فشارها و کاربری اراضی ضروری است، زیرا تغییرات در این عوامل تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی بر سلامت و پایداری سامانه خواهند داشت (جدول ۶).

جدول ۶- سهم اثر معیارهای پویا در شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 6- Contribution of dynamic criteria to the health index of Iran's third-order watersheds

سهم اثر در هر سال (درصد)			معیارهای پویا
2053	2043	2033	
0.064	0.005	0.012	متوسط بارش سالیانه
0.028	0.006	0.021	متوسط فرساینده‌گی باران
0.166	0.019	0.128	متوسط دمای سالیانه هوا
0.059	0.007	0.050	بیشینه دمای سطح زمین
0.001	0.002	0.009	انحراف معیار دمای سطح زمین
0.072	0.007	0.041	متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل سالیانه
0.029	0.006	0.038	متوسط سرعت باد سالیانه در ارتفاع ۲ متر
0.310	0.036	0.297	متوسط فرسایش آبی
0.019	0.000	0.001	خسارت ناشی از فرسایش آبی
0.164	0.011	0.150	انحراف معیار شاخص خشکی دما-گیاه خاک
0.171	0.022	0.108	کمینه شاخص خاک لخت
0.224	0.026	0.162	بیشینه شاخص خاک لخت
0.072	0.009	0.076	انحراف معیار شاخص خاک لخت
0.096	0.007	0.031	کمینه شاخص شوری خاک
0.015	0.003	0.011	بیشینه شاخص شوری خاک
0.122	0.009	0.032	انحراف معیار شاخص شوری خاک

ادامه جدول ۶- سهم اثر معیارهای پویا در شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 6- Contribution of dynamic criteria to the health index of Iran's third-order watersheds

سهم اثر در هر سال (درصد)			معیارهای پویا
2053	2043	2033	
0.269	0.033	0.226	وسعت اراضی مرتعی
0.095	0.010	0.064	وسعت اراضی بایر
0.071	0.007	0.051	وسعت اراضی جنگلی
0.019	0.000	0.003	وسعت اراضی زراعی دیم و آبی
0.187	0.022	0.151	وسعت مناطق مسکونی
0.113	0.014	0.088	کمینه شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی
0.004	0.004	0.021	بیشینه شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی
0.015	0.005	0.024	متوسط شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی
0.026	0.011	0.044	انحراف معیار شاخص نرمال شده تفاضل خاک‌ورزی
0.799	0.088	0.573	جمعیت کل
0.101	0.013	0.130	ضریب تغییرات بارش سالیانه
0.071	0.006	0.066	ضریب تغییرات بارش بیشینه
0.023	0.002	0.011	ضریب تغییرات بارش کمینه
0.078	0.008	0.082	ضریب تغییرات میانه بارش
0.016	0.003	0.026	ضریب تغییرات فرساینده‌گی باران
0.005	0.004	0.009	تراکم فرساینده‌گی باران
0.343	0.020	0.021	متوسط شاخص Palmer
0.009	0.002	0.009	ضریب تغییرات شاخص Palmer
0.087	0.014	0.097	ضریب تغییرات دمای سطح زمین
0.189	0.023	0.180	ضریب تغییرات سرعت متوسط باد
0.150	0.018	0.132	ضریب تغییرات سرعت بیشینه باد
0.000	0.000	0.000	ضریب تغییرات سرعت کمینه باد
0.002	0.002	0.024	ضریب تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل سالیانه
0.112	0.011	0.051	نسبت متوسط تبخیر و تعرق پتانسیل به متوسط بارش سالیانه
5.189	0.369	3.594	کمینه ضریب تغییرات دمای متوسط
10.953	1.344	11.367	کمینه ضریب تغییرات دمای بیشینه
2.753	0.375	2.492	بیشینه ضریب تغییرات دمای بیشینه
6.276	1.074	8.774	متوسط ضریب تغییرات دمای بیشینه
3.924	0.494	3.786	بیشینه ضریب تغییرات دمای کمینه
0.230	0.025	0.176	ضریب تغییرات کمینه دمای کمینه
30.538	47.654	31.062	انحراف معیار ضریب تغییرات دمای بیشینه
31.031	47.666	31.222	انحراف معیار ضریب تغییرات دمای کمینه
0.007	0.003	0.015	کمینه شاخص نرمال شده تفاضل برف
0.139	0.014	0.098	متوسط شاخص نرمال شده تفاضل برف
0.001	0.001	0.013	انحراف معیار شاخص نرمال شده تفاضل برف
0.007	0.000	0.008	ضریب تغییرات شاخص نرمال شده تفاضل برف
0.037	0.004	0.025	کمینه شاخص نرمال شده تفاضل آب
0.011	0.002	0.013	بیشینه شاخص نرمال شده تفاضل آب
0.015	0.002	0.023	متوسط شاخص نرمال شده تفاضل آب
0.136	0.012	0.070	انحراف معیار شاخص نرمال شده تفاضل آب
0.205	0.027	0.319	ضریب تغییرات شاخص نرمال شده تفاضل آب

ادامه جدول ۶- سهم اثر معیارهای پویا در شاخص سلامت آبخیزهای رده سوم کشور

Table 6- Contribution of dynamic criteria to the health index of Iran's third-order watersheds

سهم اثر در هر سال (درصد)			معیارهای پویا
2053	2043	2033	
0.013	0.004	0.007	انحراف معیار رطوبت زیرسطحی
0.004	0.001	0.021	ضریب تغییرات رطوبت زیرسطحی
0.056	0.006	0.043	ضریب تغییرات رطوبت سطحی
0.099	0.011	0.098	ضریب تغییرات کربن آلی خاک
0.054	0.001	0.014	ضریب تغییرات شاخص خاک لخت
0.022	0.006	0.038	ضریب تغییرات شوری خاک
0.153	0.011	0.155	ضریب تغییرات شاخص خشکی دما-پوشش گیاهی خاک
0.042	0.006	0.061	کمینه شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی
0.033	0.006	0.022	بیشینه شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی
0.032	0.003	0.002	انحراف معیار شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی
0.476	0.035	0.180	ضریب تغییرات شاخص نرمال شده تفاضل پوشش گیاهی
0.260	0.015	0.255	کمینه شاخص هواویز
0.063	0.001	0.132	متوسط شاخص هواویز
0.015	0.012	0.002	شاخص تنوع Shannon
0.432	0.012	0.331	طبیعت‌گرایی
0.061	0.029	0.068	نسبت وسعت اراضی جنگلی به وسعت آبخیز
0.340	0.007	0.252	نسبت اراضی مرتعی به وسعت آبخیز
0.205	0.006	0.160	نسبت وسعت مناطق مسکونی به وسعت آبخیز
0.192	0.004	0.053	ضریب تغییرات شاخص تفاضل نرمال شده خاک ورزی
0.248	0.005	0.034	شیب Sen شاخص تفاضل نرمال شده خاک ورزی
0.033	0.067	0.028	تراکم زراعی
0.635	0.082	0.446	تراکم جمعیت کل
0.677	0.109	0.558	وسعت عملیات زیستی آبخیزداری انجام‌نشده
0.000	0.000	0.733	وسعت عملیات زیستی آبخیزداری انجام‌شده

مدیریتی جامعی با تمرکز بر مهار فرسایش، مدیریت جمعیت و سکونت‌گاه‌های انسانی، حفظ پوشش گیاهی و سازگاری با تغییرات اقلیمی تدوین و اجرا شود. همچنین، توجه به معیارهای پویا با سهم اثر منفی مانند تبخیر و تعرق و شاخص‌های خشکی می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آینده مؤثر باشد (جدول ۶).

نتیجه‌گیری کلی

بررسی اثرات تغییرات زمانی متغیرهای هیدرواقليمی و پیش‌بینی تحولات کاربری اراضی برای سال‌های آینده برای ارزیابی سلامت آبخیز به‌شدت ضروری است. این امر کمک می‌کند تا در مدیریت آبخیز، تدابیر مناسبی اتخاذ شود. از این‌رو، تحلیل این مشخصه‌ها و تأثیر آن‌ها

برخی دیگر از معیارهای اقلیمی نیز نقش پررنگی در سلامت آبخیزها ایفا کرده‌اند. به‌عنوان مثال، متوسط دمای سالیانه هوا با سهم اثر مثبت (۳/۲۴) درصد در سال ۲۰۳۳ و ۳/۳۵ درصد در سال ۲۰۵۳ و تبخیر و تعرق پتانسیل با سهم اثر منفی (۱/۰۴- درصد در سال ۲۰۳۳ و ۱/۴۵- درصد در سال ۲۰۵۳) نشان‌دهنده تأثیر تغییرات اقلیمی بر این بوم‌سازگان‌ها بودند. همچنین، معیارهای مرتبط با خاک مانند شاخص خاک لخت و شوری خاک نیز سهم اثر قابل‌توجهی داشته‌اند که بیانگر حساسیت این سامانه‌ها به تغییرات کیفی خاک است. در مجموع، نتایج این تحلیل نشان داد که سلامت آبخیزهای رده سوم کشور تحت تأثیر ترکیبی از عوامل انسانی، اقلیمی و هیدرولوژیکی قرار دارد. برای بهبود وضعیت این بوم‌سازگان‌ها، لازم است راهبردهای

بر وضعیت سلامت حوزه آبخیز، همچنین پیش‌بینی تغییرات احتمالی و مقایسه آن با وضعیت کنونی سلامت، ازجمله اهداف کلیدی این پژوهش به‌شمار می‌رود. براین اساس، باید اقداماتی متناسب با این پیش‌بینی‌ها انجام گیرد. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی سلامت آبخیز براساس تغییرپذیری متغیرهای پویا در حوزه‌های آبخیز رده سوم کشور به‌عنوان واحدهای کاری مناسب مدیریتی در سطح کلان و بخش‌های اصلی اجرایی برنامه‌ریزی شده است. براساس نتایج، بررسی تطبیقی نقشه‌های سلامت آبخیز در بازه‌های زمانی سال‌های ۲۰۳۳، ۲۰۴۳ و ۲۰۵۳ نشان‌دهنده روند نگران‌کننده تخریب تدریجی آبخیزهای رده سوم در سطح کشور بود. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که شاخص سلامت آبخیزها تحت تأثیر ترکیب پیچیده‌ای از عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی دچار تحول خواهد شد. در شرایط فعلی، ناهمگونی شدید در توزیع سلامت آبخیزها مشاهده شد. بر اساس نتایج، در سال ۲۰۳۳، مناطق شمالی کشور در طبقه متوسط سالم، وضعیت نسبتاً مطلوبی داشتند. در حالی که مناطق جنوب‌شرقی در طبقه نسبتاً ناسالم، وضعیت بحرانی‌تری نشان دادند. این الگو عمدتاً متأثر از توزیع نابرابر بارش‌ها و فشارهای انسانی متفاوت بود. برای سال ۲۰۴۳، ظهور الگوهای جدید مشهود بود. مناطق شمال‌غربی دارای وضعیت سالم، اما مناطق مرکزی و جنوبی ناسالم بودند. از طرفی برای سال ۲۰۵۳، تشدید بحران در مقیاس ملی مشهود بود. حتی مناطق شمالی با کاهش درجه سلامت نسبت به سال ۲۰۴۳ مواجه بودند. گسترش طبقه‌های ناسالم در برخی استان‌های مرکزی، بیان‌گر تشدید روند بیابان‌زایی بود. مناطق شرقی و جنوب‌شرقی کشور، بیش‌ترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهند. این امر ناشی از ترکیب کاهش بارش، افزایش دما و فشارهای انسانی است. حتی مناطق شمالی با منابع آب نسبتاً کافی، با کاهش سلامت تا ۲۰۵۳ مواجه هستند که نشان‌دهنده کاهش ظرفیت جبران‌پذیری بوم‌سازگان‌هاست. به‌طور کلی، تعامل عوامل مختلف مانند کاهش بارش و افزایش

فرسایش، اثرات تشدیدکننده داشته و منجر به کاهش سلامت کلی آبخیزها شده است. بررسی تأثیر کمی معیارهای پویا در شاخص سلامت آبخیز نشان داد که معیارهای اقلیمی بیش‌ترین تأثیر را در میزان تغییرات شاخص سلامت آبخیز در آبخیزهای رده سوم کشور داشتند. از مهم‌ترین منابع خطا و عدم قطعیت در پژوهش حاضر می‌توان به خطاهای اندازه‌گیری در داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و سنجش از دور، داده‌های مفقود یا ناقص در برخی متغیرها (مانند رطوبت زیرسطحی و غلظت گازها)، عدم قطعیت در سناریوهای تغییر کاربری اراضی (به‌ویژه تحت تأثیر سیاست‌های انسانی) و خطاهای ناشی از مقیاس‌گذاری داده‌های اقلیمی جهانی به مقیاس محلی اشاره نمود. همچنین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی علاوه بر روش رگرسیون چندجمله‌ای، برای تعیین سهم اثرات معیارهای مختلف در سلامت آبخیز از سایر روش‌های بهینه مانند یادگیری ماشین و یادگیری عمیق استفاده شود. از طرفی پیشنهاد می‌شود با راه‌اندازی سامانه پایش برخط مبتنی بر اینترنت اشیاء برای جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای از متغیرهای پویای هیدرواقلمی و انسانی اقدام شود. درنهایت، تدوین برنامه‌های مدیریت مشارکتی با گرداران محلی (آبخیزنشینان محلی، کارشناسان و مدیران اجرایی و سیاست‌گذاران محلی)، ارائه سندهای سیاستی به سایر سازمان‌های اجرایی و نظارتی و تبیین راهبردهای ملی حفظ و بهبود سلامت آبخیزهای کشور و توسعه سامانه‌های پشتیبانی تصمیم برای کمک به مدیران در انتخاب راهکارهای بهینه برای پیشینه‌سازی سلامت و امنیت آبخیزهای کشور پیشنهاد می‌شود.

سپاس‌گزاری این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره "۴۰۳۹۰۲۹" انجام شده است.

References

- Chamani, R., Vafakhah, M., & Sadeghi, S. H. R. (2023). Changes in reliability–resilience–vulnerability-based watershed health under climate change scenarios in the Efin Watershed, Iran. *Natural Hazards*, 116(2), 2457–2476. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05774-1>
- Ebrahimi Gatgash, Z., & Sadeghi, S. H. R. (2023). Prioritization-based management of the watershed using health assessment analysis at sub-watershed scale. *Environment, Development and Sustainability*, 25(9), 9673–9702. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02455-8>
- Fathizad, H., Karimi, H., Tavakolli, M., Bzgir, M. (2014). *Investigating the trend of land use changes in the arid and semi-arid Doiraj watershed using remote sensing and GIS*, First International Conference on Landscape Ecology, November 29-30, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
- Hatefi, M., & Sadeghi, S. H. (2021). Perspective zoning of Iran provinces based on water stress, flood, drought, and rainfall erosivity indices. *Watershed Engineering and Management*, 13(1), 213–221. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.122235.1502> (In Persian)
- Hazbavi, Z., Jantien, B., Nunes, J. P., Keesstra, S. D., & Sadeghi, S. H. R. (2018). Changeability of Reliability, Resilience, and Vulnerability Indicators with Respect to Drought Patterns. *Ecological Indicators*, 87, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.054>
- Hazbavi, Z., Sadeghi, S. H. R., Gholamalifard, M., & Davudirad, A. A. (2020). Watershed health assessment using the pressure–state–response (PSR) framework. *Land Degradation & Development*, 31(1), 3–19. <https://doi.org/10.1002/ldr.3420>
- Hughes, H. M., Koolen, S., Kuhnert, M., Baggs, E. M., Maund, S., Mullier, G. W., & Hillier, J. (2023). Towards a farmer-feasible soil health assessment that is globally applicable. *Journal of Environmental Management*, 345, 118582. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118582>
- Jat, M. K., Khare, D., Garge, K., & Shankar, V. (2008). Remote Sensing and GIS-based assessment of urbanization and degradation of watershed health. *Urban Water Journal*, 6(3), 251–263. <https://doi.org/10.1080/15730620801971920>
- Kabolizadeh, M., Rangzan, K., & Mohammadi, Sh. (2022). Increasing the accuracy of monthly and annual estimates of soil loss in Iran by considering the effect of snow cover in reducing rainfall erosivity. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1344. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10592-7>
- Liang, P., Liming, D., & Guijie, Y. (2010). Ecological security assessment of Beijing based on PSR model. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 832–841. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.094>
- Momenian, P., Nazarnezhad, H., Miryaghoubzadeh, M., & Mostafazadeh, R. (2018). Assessment and prioritizing of subwatersheds based on watershed health scores (case study: Ghotorchay, Khoy, West Azerbaijan). *Journal of Watershed Management Research*, 9(17), 1–13. <https://doi.org/10.29252/jwmr.9.17.1> (In Persian)
- Nasiri Khiavi, A., Mostafazadeh, R., & Adhami, M. (2023a). Groundwater quality modeling and determining critical points: a comparison of machine learning to Best–Worst Method. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30530-8>
- Nasiri Khiavi, A., Tavoosi, M., & Kuriqi, A. (2023b). Conjunct application of machine learning and game theory in groundwater quality mapping. *Environmental Earth Sciences*, 82(17). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11059-y>
- Nasiri Khiavi, A., Tavoosi, M., Khodamoradi, H., & Kuriqi, A. (2024). Integration of Watershed Eco-Physical Health through Algorithmic Game Theory and Supervised Machine Learning. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101216. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101216>
- Odemis, B., & Evrendilek, F. (2008). Multivariate analysis of watershed health and sustainability in Turkey. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(3), 265–272. <https://doi.org/10.3843/SusDev.15.3.6>
- Parkes, M. W., Morrison, K. E., Bunch, M. J., Hallström, L. K., Neudoerffer, R. C., Venema, H. D., & Waltner-Toews, D. (2010). Towards integrated governance for water, health, and social-ecological systems: *The watershed governance prism*. *Global Environmental Change*, 20(4), 693–704. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.06.001>
- Rajabi, M. R., Vafakhah, M., & Sadeghi, S. H. R. (2024). Predicting the effect of hydro-climatic and land-use dynamic variables on watershed health status. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 44150–44168. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34071-6>
- Rodriguez-Floes, S., Munoz-Robles, C., Quevedo Tiznado, J. A., & Julio-Miranda, P. (2025). Assessment of watershed health, integrating environmental, social, and climate change criteria into a fuzzy logic framework. *Science of The Total Environment*, 960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178316>
- Sadeghi, S. H. R., Sadoddin, A., Asadi Neivan, O. A., Zarekarizi, A., & Moayeri, M. H. (2019). *Watershed health and sustainability (fundamentals, approaches, and assessment*

- methods). Tarbiat Modares University Press. (In Persian)
- Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019). Zonation of health dynamism for the Shazand Watershed based on low and high flow discharges. *Watershed Engineering and Management*, 11(3), 589–608. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120288.1427> (In Persian)
- Sadeghi, S. H., Tavoosi, M., Zare, S., Beiranvandi, V., Shekohideh, H., Emamzadeh, F. A., Bahlekeh, M., Sokhangoy, F. K., & Chamani, R. (2022a). Evaluation and variability of flood-oriented health of Shiraz Darwazeh Quran Watershed from watershed management structures. *Water and Soil*, 36(5), 561-577. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78150.1190> (In Persian)
- Sadeghi, S.H.R., & Hazbavi, Z. (2015). Trend analysis of the rainfall erosivity index at different time scales in Iran. *Natural Hazards*, 77, 383–404. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1607-z>
- Sadeghi, S.H.R., & Tavangar, S. (2015). Development of stational models for estimation of rainfall erosivity factor in different timescales. *Natural Hazards*, 77, 429-443. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1608-y>
- Sadeghi, S.H.R., Chamani, R., Silabi, M.Z., Tavosi, M., Katebikord, A., Darvishan, A.K., ... & Rekabdarkolaei, H.M. (2023b). Watershed health and ecological security zoning throughout Iran. *Science of the Total Environment*, 905, 167123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167123>
- Sadeghi, S.H.R., Vafakhah, M., Moosavi, V., Pourfallah Asadabadi, S., Sadeghi, P.S., Khaledi Darvishan, A., Bagheri Fahraji, R., Mosavinia, S.H., Majidnia, A., Gharemahmudli, S., & others. (2022b). Assessing the health and ecological security of a human-induced watershed in central Iran. *Ecosystem Health and Sustainability*, 8(1), 2090447. <https://doi.org/10.1111/nrm.12371>
- Sadeghi, S.H.R., Zabihi Silabi, M., Sarvi Sadrabad, H., Riahi, M., & Modarresi Tabatabaei, S. (2023a). Watershed health and ecological security modeling using anthropogenic, hydrologic, and climatic factors. *Natural Resource Modeling*, e12371. <https://doi.org/10.1111/nrm.12371>
- Singh, A., Dieye, A., & Finco, M. (1999). Assessing environmental condition of major river basins in Africa as Surrogates for watershed health. *Ecosystem Health*, 5(4), 265-274. <https://doi.org/10.1046/j.1526-0992.1999.09945.x>
- Talampas, S. I., Shrestha, S., Mohanasundaram, S., & Loc, H. H. (2025). Development of a watershed health assessment framework integrating ecological, social, cultural, economic, and policy attributes. *International Journal of River Basin Management*, 23(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15715124.2023.2242830>
- Wang, Q., Li, S., & Li, R. (2019). Evaluating water resource sustainability in Beijing, China: Combining PSR model and matter-element extension method. *Journal of Cleaner Production*, 206, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.057>
- Xia, J., Zhang, Y., Zhao, C., & Bunn, S. E. (2014). Bioindicator assessment framework of river ecosystem health and the detection of factors influencing the health of the Huai River Basin, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(8), 1-34. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000989](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000989)
- Yu, G., Yu, Q., Hu, L., Zhang, S., Fu, T., Zhou, X., He, X., Liu, Y., Wang, S., & Jia, H. (2013). Ecosystem health assessment based on analysis of a land-use database. *Applied Geography*, 44, 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.010>
- Zakeri, M. A., Mirnia, S. K., & Moradi, H. (2022). Assessment of water security in the large watersheds of Iran. *Environmental Science & Policy*, 127, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.10.009>
- Zeraatpisheh, M., Garosi, Y., Owliaie, H. R., Ayoubi, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Scholten, T., & Xu, M. (2022). Improving the spatial prediction of soil organic carbon using environmental covariates selection: A comparison of a group of environmental covariates. *Catena*, 208, 105723. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105723>
- Zhang, F., Zhang, J., Wu, R., Ma, Q., & Yang, J. (2015). Ecosystem health assessment based on DPSIRM framework and health distance model in Nansi Lake, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30, 1235-1247. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1109-2>