

Watershed sustainability assessment using the HELP approach case study: Atrak Watershed, Golestan

Omid Asadi Nalivan^{1*}, Gholamreza Khosravi² and Ehsan Alvandi³

¹ Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

² PhD graduate of Watershed Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

³ Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 22 October 2025

Accepted: 28 February 2026

Extended abstract

Introduction

Watersheds, as key units of water resources management, play a fundamental role in supporting ecological processes, regulating the hydrological cycle, providing water, conserving soil, and sustaining the livelihoods of human communities. These natural systems are exposed to increasing pressures from climate change, population growth, unsustainable exploitation, agricultural and industrial development, and land use changes. In such circumstances, the concept of watershed sustainability as the system's capacity to maintain optimal performance of ecological processes and environmental services in the long term has gained special importance. In addition to providing early warnings of environmental degradation, assessing the health and sustainability of watersheds can also identify the causes of existing problems. The Watershed Sustainability Index is one of the valid indicators that quantify the status of watershed sustainability. This index, due to its high flexibility and usability at different scales, is known as a suitable tool for planning and decision-making in sustainable watershed management. Therefore, the present study was conducted with the aim of assessing the sustainability of the Atrak River watershed and providing a comprehensive picture of its functional status and ecological sustainability. The strengths of the article include the breadth and comprehensiveness of the indicators used (four key dimensions of sustainability), the 10-year study period, which increases the validity of the results, and the spatial assessment of watersheds and prioritization of actions, which allows for targeted policymaking.

Materials and methods

The Atrak River watershed with an area of 819,000 hectares is located in Golestan Province. The watershed sustainability index, developed by developing the UNESCO-HELP model and using the PSR (pressure-state-response) causal model, is one of the few indicators designed specifically for watersheds, which evaluates the sustainability of the watershed in question numerically and using a formula in the form of four sub-indices of hydrology (qualitative and quantitative), environment, life (livelihood conditions and human development), and policy. In this method, taking into account the available information and data (10-year period), the values of the parameters in the three components of pressure, status, and response were collected to examine each of the sub-indices and converted into quantitative form in the scoring range from zero to one and in five categories (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). The indicators receive a score of one in the best condition and a score of zero in the worst condition. The final WSI value was classified into three categories of low, medium, and high through the arithmetic mean of the sub-indices.

Results and discussion

The results of the hydrology section showed that in all sub-watersheds, per capita available water decreased during the 10-year study period. Also, the three sub-watersheds of Chat, Dashli Borun, and Gomishan are in the weak category in terms of the pressure component, and only Maraveh Tapeh is in the medium category. This condition is also true for the status and response component. According to the results, the TDS level has increased in all sub-watersheds. The results indicate a critical situation in the water quality sector of the watershed. In general, the average results of the hydrological index varied between zero and 0.25. The environmental index showed that the trend of increasing agricultural land is visible in all four sub-watersheds. The highest increase in agricultural land occurred in the Chat sub-watershed and the lowest

* Corresponding author: o.asadi@maragheh.ac.ir

in the Gomishan sub-watershed. Also, the highest increase in population occurred in the Chat sub-watershed, which confirms the results of the increase in agricultural land. The results indicate a very bad situation of the EPI index in the two sub-watersheds of Maraveh Tapeh and Chat, and Dashli Borun is in the next rank, and the Gomishan sub-watershed has the best situation in this index. According to the final score results, the situation of Gomishan is better than other sub-watersheds in the environmental sector. In general, the average results of the environmental index varied between 0.33 and 0.5. The results of the life index showed that the status of this index in all sub-watersheds was average to high. In general, the average life index results varied between 0.75 and 0.83. The results of the Policy Index showed that based on the average scores, the status of this index in all sub-watersheds was poor. In general, the average Policy Index results for all sub-watersheds were 0.58. The final values of the WSI index showed that all sub-watersheds have a poor status in terms of sustainability in all four main indicators. According to the average scores (0.448), the Atrak watershed is in the low category in terms of sustainability.

Conclusions

Considering the results obtained and the low level of sustainability of the Atrak River watershed, it is necessary to take immediate and planned measures to improve the sustainability status. The most important management and applicable suggestions in the watershed include the following. Integrated water resources management, which will increase the efficiency of water use in the agricultural sector by using modern irrigation methods and consumption management in the drinking and industrial sectors. Improving the quality of water resources, including controlling and reducing the input of pollutants into surface and groundwater sources, can be done through the development of urban and rural wastewater treatment systems. Protecting and restoring natural vegetation by implementing projects to restore degraded rangelands and developing protected areas, which play a fundamental role in improving the sustainability status of the watershed. Strengthening environmental governance and policymaking and establishing coordination between organizations responsible for water, agriculture, and the environment to implement integrated watershed management are other important strategies for improving the sustainability of the Atrak watershed.

Keywords: Atrak river, Integrated water resources management, PSR approach, Watershed sustainability index

Cite this article: Asadi Nalivan, O., Khosravi, Gh., Alvandi, E., 2026. Watershed sustainability assessment using the HELP approach, case study: Atrak Watershed, Golestan. Watershed. Water. Eng. Manag.18(2), 148-169.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



ارزیابی پایداری حوزه آبخیز با استفاده از رویکرد HELP مطالعه موردی: حوزه آبخیز اترک، گلستان

امید اسدی نلیوان^{۱*}، غلامرضا خسروی^۲ و احسان الوندی^۳

^۱ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

^۲ فارغ‌التحصیل دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

^۳ استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

چکیده مبسوط

مقدمه

حوزه‌های آبخیز به‌عنوان واحدهای کلیدی مدیریت منابع آب، نقش اساسی در پشتیبانی از فرایندهای بوم‌شناختی، تنظیم چرخه هیدرولوژیکی، تأمین آب، حفظ خاک و تداوم معیشت جوامع انسانی ایفا می‌کنند. این سامانه‌های طبیعی در معرض فشارهای روزافزون ناشی از تغییر اقلیم، رشد جمعیت، بهره‌برداری ناپایدار، توسعه کشاورزی و صنعتی و تغییرات کاربری زمین قرار دارند. در چنین شرایطی، مفهوم پایداری آبخیز به‌عنوان ظرفیت سامانه برای حفظ عملکرد بهینه فرایندهای بوم‌شناختی و خدمات محیط‌زیستی در بلندمدت، اهمیت ویژه‌ای یافته است. ارزیابی پایداری آبخیزها علاوه بر این که می‌تواند هشدارهای اولیه تخریب محیط‌زیست را فراهم نماید، می‌تواند علت مشکلات موجود را شناسایی کند. شاخص پایداری آبخیز (Watershed Sustainability Index, WSI) یکی از شاخص‌های معتبر است که وضعیت پایداری آبخیز را کمی‌سازی می‌کند. این شاخص، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت استفاده در مقیاس‌های مختلف، به‌عنوان ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مدیریت پایدار آبخیزها شناخته شده است. از این رو، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی پایداری حوزه آبخیز رودخانه اترک و ارائه تصویری جامع از وضعیت عملکردی و پایداری بوم‌شناختی آن انجام شده است. از نقاط قوت این پژوهش می‌توان به گستردگی و جامعیت شاخص‌های مورد استفاده (چهار بعد کلیدی پایداری)، طول دوره مطالعاتی ۱۰ ساله که باعث افزایش اعتبار نتایج می‌شود و ارزیابی فضایی زیرآبخیزها و تعیین اولویت اقدامات که امکان سیاست‌گذاری هدفمند را فراهم می‌کند، اشاره کرد.

مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز رودخانه اترک با مساحت ۸۱۹۰۰۰ هکتار در استان گلستان واقع شده است. شاخص پایداری آبخیز با توسعه مدل UNESCO-HELP و با به‌کارگیری مدل علی- معلولی PSR (فشار- وضعیت- پاسخ) از معدود شاخص‌هایی است که مختص آبخیز طراحی شده است که در قالب چهار زیرشاخص هیدرولوژی (کیفی و کمی)، محیط‌زیست، حیات (شرایط معیشتی و توسعه انسانی) و سیاست‌گذاری به ارزیابی پایداری آبخیز موردنظر به‌صورت عددی و با استفاده از فرمول می‌پردازد. در این روش با در نظر گرفتن اطلاعات و داده‌های موجود (دوره زمانی ۱۰ ساله) برای بررسی هر کدام از زیرشاخص‌ها مقادیر فراسنجه‌ها در سه مؤلفه فشار، وضعیت، پاسخ گردآوری و در دامنه امتیازدهی از صفر تا یک (صفر،

۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، یک) به حالت کمی تبدیل شد. شاخص‌ها در بهترین وضعیت امتیاز یک و در بدترین وضعیت امتیاز صفر را کسب می‌کنند. مقدار WSI نهایی از طریق میانگین حسابی زیرشاخص‌ها در سه طبقه پایین، متوسط و بالا طبقه‌بندی شد.

نتایج و بحث

نتایج بخش هیدرولوژی نشان داد که در تمامی زیرآبخیزها سرانه آب قابل دسترس در طی دوره مطالعاتی ۱۰ ساله کاهش یافته است. همچنین سه زیرآبخیز چات، داشلی‌برون و گمیشان به لحاظ مؤلفه فشار در طبقه ضعیف قرار دارند و فقط مراوه‌تپه در طبقه متوسط قرار دارد. این شرایط برای مؤلفه وضعیت و پاسخ نیز صادق است. بر اساس نتایج، میزان TDS در همه زیرآبخیزها افزایش پیدا کرده است. نتایج بیانگر وضعیت بحرانی در بخش کیفیت آب است. در حالت کلی میانگین نتایج شاخص هیدرولوژی بین صفر تا ۰/۲۵ متغیر بود. شاخص محیط‌زیست نشان داد که روند افزایش زمین‌های کشاورزی در هر چهار زیرآبخیز نمایان است. بیشترین میزان افزایش اراضی کشاورزی در زیرآبخیز چات و کمترین نیز در زیرآبخیز گمیشان اتفاق افتاده است. همچنین بیشترین میزان افزایش جمعیت در زیرآبخیز چات اتفاق افتاده است که نتایج افزایش اراضی کشاورزی را تأیید می‌کند. نتایج بیانگر وضعیت خیلی بد شاخص EPI در دو زیرآبخیز مراوه‌تپه و چات است و داشلی‌برون در رتبه بعدی قرار دارد و زیرآبخیز گمیشان بهترین وضعیت را در این شاخص دارد. با توجه به نتایج امتیاز نهایی وضعیت گمیشان بهتر از سایر زیرآبخیزها در بخش محیط‌زیست است. در حالت کلی میانگین نتایج شاخص محیط‌زیست بین ۰/۳۳ تا ۰/۵ متغیر بود. نتایج شاخص حیات نشان داد که وضعیت این شاخص در کلیه زیرآبخیزها متوسط رو به بالا است. در حالت کلی میانگین نتایج شاخص حیات بین ۰/۷۵ تا ۰/۸۳ متغیر بود. نتایج شاخص سیاست‌گذاری نشان داد که بر اساس میانگین امتیازات وضعیت این شاخص در کلیه زیرآبخیزها ضعیف است. در حالت کلی میانگین نتایج شاخص سیاست‌گذاری برای همه زیرآبخیزها ۰/۵۸ بود. مقادیر نهایی شاخص WSI نشان داد که تمامی زیرآبخیزها به لحاظ پایداری در هر چهار شاخص اصلی وضعیت ضعیفی دارند. با توجه به میانگین امتیازات (۰/۴۴۸) حوزه آبخیز اترک به لحاظ پایداری در طبقه پایین قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و قرارگیری حوزه آبخیز رودخانه اترک در سطح پایین پایداری، اتخاذ اقدامات فوری و برنامه‌ریزی شده برای بهبود وضعیت پایداری ضروری است. مهم‌ترین پیشنهادها مدیریت و قابل اجرا در حوزه آبخیز اترک شامل ۱. مدیریت جامع منابع آب که سبب افزایش بازدهی مصرف آب در بخش کشاورزی با به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری و مدیریت مصرف در بخش شرب و صنعت خواهد شد. ۲. بهبود کیفیت منابع آب شامل کنترل و کاهش ورودی آلاینده‌ها به منابع سطحی و زیرزمینی از طریق توسعه سامانه‌های تصفیه فاضلاب شهری و روستایی قابل انجام است. ۳. حفاظت و احیای پوشش گیاهی طبیعی به‌صورت اجرای طرح‌های احیای مراتع تخریب‌شده و توسعه مناطق حفاظت‌شده که در ارتقای وضعیت پایداری آبخیز نقش اساسی دارند. ۴. تقویت حکمرانی محیط‌زیستی و سیاست‌گذاری و ایجاد هماهنگی بین سازمان‌های متولی آب، کشاورزی و محیط‌زیست برای اجرای مدیریت جامع حوزه آبخیز از دیگر راهکارهای مهم جهت ارتقای وضعیت پایداری در حوزه آبخیز اترک است.

واژه‌های کلیدی: رودخانه اترک، رویکرد PSR، شاخص پایداری آبخیز، مدیریت جامع منابع آب

مقدمه

حفظ خاک و تداوم معیشت جوامع انسانی ایفا می‌کنند
Hazbavi et al., Falkenmark and Rockström, 2004
Kamali et al., Sadehi et al., 2018, 2020
al., 2018
Fathi et al., 2025b; 2023). این سامانه‌های طبیعی در

حوزه‌های آبخیز به‌عنوان واحدهای کلیدی مدیریت
منابع آب، نقش اساسی در پشتیبانی از فرایندهای
بوم‌شناختی، تنظیم چرخه هیدرولوژیکی، تأمین آب،

است که در برابر اختلالات وضعیت بهینه موجود را حفظ کند، تعادل میان بهره‌برداری و حفاظت را برقرار سازد و خدمات بوم‌سازگانی را برای نسل‌های آینده تضمین نماید (Chaves and Alipaz, 2007; Ebrahimi, Gatgash and Sadeghi, 2023).

روش‌های ارزیابی پایداری آبخیزها در دهه‌های اخیر دستخوش تحول شده و از رویکردهای تک‌بعدی به رویکردهای تلفیقی و شاخص‌محور گرایش یافته‌اند (Liu et al., 2018). این رویکردها معمولاً بر چارچوب‌های مفهومی نظیر فشار-وضعیت-پاسخ (PSR¹) استوارند (OECD, 1993). از دیگر رویکردها در این زمینه می‌توان به رویکرد DPSIR² اشاره کرد که در مطالعات مختلف و با اهداف گوناگون شامل ارزیابی پایداری آبخیز، توسعه راهکارهای مدیریتی، اولویت‌بندی عوامل و اثرات سیل، مدیریت ریسک سیل، ارزیابی اقدامات حفاظت خاک، راهکارهای مدیریتی برای بهبود سلامت حوزه آبخیز، راهکارهای مدیریت ریسک فرونشست و تحلیل علت و معلولی روند طوفان‌های گردوغبار مورد استفاده قرار گرفته است (Mosaffaie et al., Salehpour Jam et al., 2021a,b; Karimi Sangchini et al., 2022a,b; 2021; Soleimanpour et al., 2023; Soltani et al., 2023).

یکی از رویکردهای نوین در این زمینه، استفاده از شاخص‌های ترکیبی برای سنجش وضعیت پایداری است که امکان ارزیابی جامع ابعاد مختلف هیدرولوژیک، بوم‌شناختی و اجتماعی-اقتصادی را فراهم می‌سازد. در این میان به‌کارگیری شاخص‌های ترکیبی همچون شاخص پایداری حوزه آبخیز³، امکان مقایسه‌پذیری آبخیزها و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی را فراهم ساخته است (Chaves and Alipaz, 2007; Núñez-Razo et al., 2024; Artimani and Zeinivand, 2024). شاخص پایداری آبخیز یکی از شاخص‌های معتبر در این زمینه است که وضعیت پایداری آبخیز را کمی‌سازی می‌کند. شاخص WSI با ترکیب اطلاعات چندمعیاره به مدیران منابع طبیعی این امکان را می‌دهد که نقاط بحرانی، عوامل مؤثر بر کاهش پایداری و اولویت‌های مدیریتی را شناسایی کنند (Chaves and

معرض فشارهای روزافزون ناشی از تغییر اقلیم، رشد جمعیت، بهره‌برداری ناپایدار، توسعه کشاورزی و صنعتی و تغییرات کاربری زمین قرار دارند، عواملی که نه تنها کارکردهای هیدرولوژیکی را مختل می‌کنند، بلکه به کاهش پایداری بوم‌سازگان‌ها منجر می‌شوند (Asadi Nalivan et al., Lu et al., 2015; OECD, 1993; Sadeghi and Hazbavi, 2017a,b; al., 2016, 2017; Hazbavi et al., Ahn and Kim, 2019; Liu et al., 2018; Zare Bidaki et al., Kamali et al., 2023; al., 2019a,b; Parkes and Horwitz, 2025; al., 2025).

در چنین شرایطی، مفهوم پایداری حوزه آبخیز به‌عنوان ظرفیت سامانه برای حفظ عملکرد بهینه فرایندهای بوم‌شناختی و خدمات محیط‌زیستی در بلندمدت، اهمیت ویژه‌ای یافته است (Liu et al., 2018). امروزه ارزیابی پایداری آبخیزها به یکی از اولویت‌های اساسی پژوهشگران و مدیران در سراسر جهان در راستای دستیابی به هدف‌های مدیریت سازگار و توسعه پایدار تبدیل شده است (Chavea and Firdaus; EPA, 2014; Council, 2006; Alipaz, 2007; Núñez-Razo et al., Sadeghi et al., 2017; et al., 2014; Fathi et al., 2025a; al., 2023).

از آنجایی که تخریب بوم‌سازگان‌های یک حوزه آبخیز پیامدهای اقتصادی و اجتماعی زیان‌باری را در پی دارد، طی دهه‌های اخیر یک گرایش عمومی نسبت به ارزیابی شرایط نسبی پایداری حوزه‌های آبخیز در مقیاس ملی و محلی دیده می‌شود (Fleming, 1999; Sadeghi; Asadi Nalivan et al., 2015; EPA, 2014; Hazbavi et al.; Witulski and Dias, 2020; et al., 2020; al., 2020). ارزیابی پایداری بوم‌سازگان علاوه بر این که می‌تواند هشدارهای اولیه تخریب محیط‌زیست را فراهم نماید، می‌تواند علت مشکلات موجود را شناسایی کند. بنابراین ارزیابی و پایش پایداری بوم‌سازگان آبخیز یک گام مهم و بنیادی برای حفاظت بوم‌شناختی و ارزیابی خدمات آن است (Liu et al., 2018; Moghadam and Malekmohammadi, 2025; Fathi et al., 2025a).

پایداری آبخیز مفهومی چندبعدی است که نه تنها وضعیت محیط‌زیستی، بلکه ابعاد اجتماعی، اقتصادی و نهادی را نیز در برمی‌گیرد. یک حوزه آبخیز زمانی پایدار

³ Watershed Sustainability Index (WSI)

¹ Pressure- State- Response

² Driver, Pressure, State, Impact, Response

Ebrahimi and Chezgi, (2023) در تحقیقی به ارزیابی پایداری حوزه آبخیز فورگ شهرستان درمیان با استفاده از روش^۱ HELP پرداختند. آنها در این تحقیق به ارزیابی پایداری حوزه آبخیز در یک دوره زمانی ۸ ساله و با استفاده از ۱۲ متغیر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مقدار نهایی پایداری آبخیز ۰/۴۴ است که در وضعیت ضعیف پایداری قرار می‌گیرد. آنها در انتها پیشنهاد دادند که سیاست‌های مدیریتی و اجرایی حوزه آبخیز مذکور در راستای حفظ شرایط فعلی و ارتقاء پایداری حوزه آبخیز متمرکز شود.

Heirany et al., (2022) در پژوهشی به ارزیابی پایداری بوم‌شناختی حوزه آبخیز توتلی در شمال استان خراسان شمالی با استفاده از چارچوب مفهومی (HELP) و محاسبه (WSI) پرداخت. در این فرآیند ارزیابی، ۱۴ متغیر مورد استفاده قرار گرفت که بر اساس ماهیت هر کدام از آنها در سه دسته شاخص فشار، حالت و پاسخ و معیارهای چهارگانه HELP دسته‌بندی شدند. میانگین امتیازات شاخص‌های P، S و R برای حوزه آبخیز توتلی به ترتیب ۰/۶۵، ۰/۸۵ و ۰/۳۵ به دست آمد. همچنین، میانگین امتیازات معیارهای هیدرولوژی (H) و محیط زیست (E) برابر با ۰/۵۸ و امتیازات معیارهای حیات (L) و سیاست‌گذاری (P) برابر با ۰/۶۶ محاسبه شد. نتایج حاصل از تلفیق کلیه معیارها و شاخص‌های مورد مطالعه نشان داد که امتیاز کلی WSI برابر ۰/۶۲ بوده و نشان‌دهنده سطح پایداری بوم‌شناختی متوسط است.

کاربرد WSI در مطالعات مختلف نشان داده است که این شاخص نه تنها قابلیت تطبیق با شرایط بومی حوزه‌های آبخیز را دارد، بلکه می‌تواند به عنوان ابزار مقایسه‌ای در سطوح منطقه‌ای و ملی مورد استفاده قرار گیرد (Chaves and Artimani and Zeinivand, 2024؛ Alipaz, 2007؛ Núñez-Razo et al., 2023). نتایج مطالعات انجام شده در ایران نیز حاکی از آن است که بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور در سطح متوسط یا پایین پایداری قرار دارند (Asadi Mehri, 2013؛ Hazbavi et al., 2019؛ Nalivan et al., 2015, 2016؛ Artimani and Ghabelnezam et al., 2023؛ Zeinivand, 2024؛ Zare Bidaki et al., 2025؛ Fathi

Alipaz, 2007). این شاخص، به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت استفاده در مقیاس‌های مختلف، به عنوان ابزاری مناسب برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مدیریت پایدار آبخیزها شناخته شده است (Núñez-Razo et al., 2023).

مطالعات مختلفی در زمینه پایداری انجام شده است. Fathi et al., (2025b) در تحقیقی پنج روش WAFI، RRV، PSR، WSI و WHAF را در آبخیزهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که هر یک از روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعف هستند و در شرایط مختلف برای اهداف متفاوت قابل استفاده هستند. همچنین بیان داشتند که چالش‌هایی مانند کمبود داده و عدم در نظر گرفتن تمامی جنبه‌های محیط‌زیست در برخی مدل‌ها قابل مشاهده بود و باید بر اساس شرایط خاص حوزه آبخیز و اهداف مدیریتی مورد نظر، مدل مناسب انتخاب شود.

Zare Bidaki et al., (2025) در مطالعه‌ای به بازآفرینی شاخص پایداری آبخیز بر اساس چارچوب DPSIR در حوزه آبخیز بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. آنها جهت انجام این تحقیق و ارزیابی پایداری آبخیز از ۲۵ زیرشاخص استفاده کردند. نتایج نشان داد که شاخص پایداری آبخیز متوسط در کل آبخیز بهشت‌آباد ۰/۶۲۵ است. آنها بیان داشتند که معیار محیط زیست دارای بیشترین امتیاز و معیار حیات دارای کم‌ترین امتیاز بوده است. Núñez-Razo et al., (2023) در تحقیقی توسعه شاخص پایداری حوزه آبخیز برای حوضه رودخانه سانتیاگو، مکزیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که WSI هر زیرآبخیز، پایین در منطقه حوزه بالا و پایین و متوسط در منطقه حوضه مرکزی قرار می‌دهد. مناطق با سطح پایداری پایین با تخریب محیط‌زیست به دلیل تغییرات در کاربری اراضی مشخص می‌شوند، در حالی که در منطقه با پایداری متوسط، عاملی با بیشترین تأثیر بر ارزیابی، دسترسی به آب است. امتیاز کلی پایداری WSI=0.36 برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد که کمتر از هر حوزه آبخیز دیگری است که به همین روش در سراسر جهان ارزیابی شده است.

^۱ Hydrology- Environment- Lief- Policy

که در قالب چهار زیرشاخص هیدرولوژی (کیفی و کمی)، محیط‌زیست، حیات (شرایط معیشتی و توسعه انسانی) و سیاست‌گذاری به ارزیابی پایداری آبخیز موردنظر به صورت کمی می‌پردازد (Chaves and Alipaz, 2007). در این روش با در نظر گرفتن اطلاعات و داده‌های موجود برای بررسی هر کدام از زیرشاخص‌ها مقادیر متغیرها در سه مؤلفه فشار، وضعیت، پاسخ تعیین و در دامنه امتیازدهی از صفر تا یک (صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، یک) به حالت کمی تبدیل می‌شوند (Branchi, 2022).

برنامه بین‌المللی هیدرولوژی^۲ یونسکو چارچوبی را که در آن به صورت تلفیقی به مسائل مربوط به هیدرولوژی، محیط‌زیست، حیات و سیاست‌گذاری می‌پردازد، به تصویب رسانده است (UNESCO-IHP, 2001). چارچوب HELP با هدف از بین بردن شکاف بین کارشناسان امور آب و محیط‌زیست و ذی‌نفعان و سیاست‌گذاران که مانع مؤثری برای اجرای اقدامات مدیریتی به صورت یکپارچه از طرف هر کدام از این گروه‌ها بود تشکیل شد (UNESCO, HELP, 2010). HELP با رویکردی جدید برای مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز در سراسر جهان طراحی شده است (UNESCO, HELP, 2010). زیرشاخص‌ها و متغیرهای استفاده شده در این روش در جدول ۱ ارائه شده است.

رویکرد مفهومی فشار-وضعیت-پاسخ (PSR): رویکرد مفهومی PSR مبتنی بر چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ است که برای تحلیل وضعیت بوم‌سازگان توسعه داده شده است. رویکرد مذکور بر مفهوم علیت استوار است. به این مفهوم که فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد و حالت آن را تغییر می‌دهد. پاسخ‌های جامعه به این تغییرات از طریق اعمال سیاست‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی منعکس می‌شود. فعالیت‌های حاصل از این سیاست‌ها نیز به نوبه خود فشارهایی را اعمال می‌کند و چرخه بازخورد PSR را کامل می‌کند (OECD, 1993; Chandniha et al., 2014).

بنابراین، رویکرد مفهومی PSR سه نوع مؤلفه فشار، وضعیت و پاسخ دارد (Heirany et al., 2022). مؤلفه اول، فشار محیط‌زیست حاصل از فعالیت‌های انسانی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. مؤلفه وضعیت شرایط محیط‌زیست را بیان می‌کند و مؤلفه پاسخ واکنش جامعه و طبیعت به فشارها و حالت‌های رخ داده را ارزیابی می‌کند (Hazbavi et al., 2020).

مدل^۱ UNESCO-HELP: شاخص پایداری آبخیز با توسعه مدل UNESCO-HELP و با به‌کارگیری مدل علی- معلولی PSR (فشار- وضعیت- پاسخ) از معدود شاخص‌هایی است که مختص آبخیز طراحی شده است

جدول ۱- زیرشاخص‌ها و فراسنجه‌های شاخص پایداری آبخیز

Table 1. Indicators and parameters of the Watershed Sustainability Index (Chaves and Alipaz, 2007)

Indicator	Pressure	State	Response
		Parameters	
Hydrology	- Variation in the watershed's per capita water availability in the last 5 years;	- Watershed per capita water availability	- Improvement in water-use efficiency (last 5 yrs.);
	- Variation in the watershed BOD5 (last 5 years)	- Watershed BOD5 (yearly average)	- Improvement in sewage treatment/ disposal (last 5 years.)
Environment	- Watershed's EPI (Rural & urban)	- % of watershed area with natural vegetation	- Evolution in watershed conservation (Protected areas, BMPs)
Life	- Variation in the watershed per capita GDP in the last 5 years	- Watershed HDI (weighed by county pop.)	- Evolution in the watershed HDI (Last 5 yrs.)
Policy	- Variation in the watershed HDI-Ed in the last 5 years	- Watershed institutional capacity in IWRM	- Evolution in the watershed's IWRM expenditures in the last 5 years

شیمیایی و فیزیکی منابع آب حوضه موردنظر را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Chavez and Alipaz, 2007).

شاخص پایداری آبخیز- محاسبه شاخص هیدرولوژی (H): زیرشاخص هیدرولوژی خصوصیات

Environment, Life and Policy

² International Hydrological Programme (IHP)

¹ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization- Hydrology for the

میلی گرم بر لیتر نشان می‌دهد و مؤلفه پاسخ، فراسنجه توصیفی است که با توجه به میزان بهبود در روش‌های تصفیه فاضلاب و هدایت هرزآب‌ها در حوزه طی مدت مطالعاتی در یکی از پنج سطح خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی قرار می‌گیرد. در هر دو بخش کمیت و کیفیت آب امتیاز به‌دست آمده میانگین امتیازات کسب شده مؤلفه‌های فشار- وضعیت و پاسخ است (Chavez and Alipaz, 2007).

محاسبه شاخص محیط‌زیست (E): مؤلفه فشار این زیرشاخص^۴ نسخه اصلاح‌شده شاخص فشار آنتروپیک^۵ (Sawyer, 1997) است و از طریق میانگین تغییرات مساحت زمین‌های کشاورزی در حوضه و تغییرات جمعیت شهری (به درصد) در طول دوره مطالعاتی به شکل رابطه (۲) قابل محاسبه است (Chavez and Alipaz, 2007).

$$EPI = \frac{(\% \text{ تغییر در جمعیت شهری حوضه} + \% \text{ تغییر در مساحت زمین‌های کشاورزی در حوضه})}{2} \quad (2)$$

(%) تغییر در جمعیت شهری حوضه + (%) تغییر در مساحت زمین‌های کشاورزی در حوضه
EPI می‌تواند مقادیر مثبت، منفی یا صفر را به خود اختصاص دهد. مقادیر مثبت EPI نشان‌دهنده فشار مضاعف بر روی پوشش گیاهی طبیعی باقی‌مانده در حوضه است (مؤلفه وضعیت موجود). مقادیر صفر وضعیت ثابت و عدم تغییر در جمعیت و زمین‌های کشاورزی و مقادیر منفی کاهش جمعیت شهری را نشان می‌دهد (Lowe et al., 2015). مؤلفه پاسخ محیط‌زیست، رشد و پیشرفت در عملیات‌های حفاظتی در حوضه شامل توسعه ذخایر جنگل ملی، پارک‌های ملی و بهترین روش برای ارزیابی آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد (Chavez and Alipaz, 2007).

به‌منظور بررسی تغییرات در مساحت زمین‌های کشاورزی در حوزه آبخیز اترک از نقشه کاربری اراضی آبخیز اترک در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۲۱ استفاده شد و همچنین از جمعیت حوضه در سرشماری‌های سال ۲۰۰۶ و ۲۰۱۶ برای بخش تغییرات جمعیت شهری حوضه استفاده شد. به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات در مورد مساحت مناطق حفاظت شده در آبخیز اترک برای محاسبه مؤلفه پاسخ محیط‌زیست به اداره کل

مقدار زیرشاخص هیدرولوژی خود از میانگین دو متغیر کمیت آب و کیفیت آب به‌دست می‌آید. متغیر کمیت آب از طریق محاسبه سرانه آب در دسترس به ازای هر نفر (WA^۱) در هر زیرآبخیز با استفاده از رابطه (۱) به‌دست آمد.

$$WA = \frac{\text{میانگین دراز مدت جریان رودخانه}}{\text{جمعیت آبخیز}} \quad (1)$$

از آنجایی که تنش آب زمانی رخ می‌دهد که آب در دسترس به کمتر از ۱۷۰۰ مترمکعب در سال به ازای هر نفر برسد، پنج سطح برای WA توسط Chavez and Alipaz, (2007) انتخاب شد: خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی. میانگین مقدار WA برای درازمدت تعیین‌کننده مؤلفه وضعیت موجود و نسبت تغییرات بلندمدت آب در دسترس به طول دوره مطالعاتی تعیین‌کننده مؤلفه فشار خواهد بود. مؤلفه پاسخ زیرشاخص هیدرولوژی برای متغیر کمیت آب به بررسی روند بهبود بازدهی مصرف آب طی دوره مطالعاتی می‌پردازد. جهت انجام محاسبات مربوطه در این بخش از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در حوزه آبخیز اترک و سرشماری‌های سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۶ (دوره ۱۰ ساله) استفاده شده است.

با توجه به اینکه در هر چهار زیرحوضه مورد بررسی ایستگاه هیدرومتری وجود دارد، از آمار مقادیر رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری زیرحوضه‌ها با دوره آماری ۱۰ ساله و تقسیم مقدار آن بر جمعیت زیرحوضه مقادیر WA به‌دست آمده است. کلیه اطلاعات نیز از شرکت آب منطقه‌ای دریافت شده است. آمار بهبود بازدهی مصرف آب نیز به صورت شفاهی از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان دریافت شد. در محاسبه متغیر کیفیت آب (Chavez and Alipaz, 2007) از مقدار اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی آب^۲ استفاده کردند، اما متأسفانه به‌دلیل فقدان داده مذکور، مقدار کل جامدات محلول^۳ برای ارزیابی کیفی حوزه آبخیز اترک جایگزین شد (Mehri, 2013). مؤلفه فشار کیفیت آب، تغییرات میانگین کوتاه‌مدت TDS (طول دوره مطالعاتی) نسبت به میانگین بلندمدت را به درصد بیان می‌کند. مؤلفه وضعیت موجود میانگین طولانی‌مدت مقدار TDS را به

⁴ Environmental Pressure Index (EPI)

⁵ Antropic Pressure Index (API)

¹ Water availability

² Biochemical Oxygen Demand (BOD)

³ Total Dissolved Solids (TDS)

قابل دریافت است که برای این آبخیز نیز به همین صورت بوده است. تولید ناخالص سرانه در سطح آبخیز مورد محاسبه قرار نمی‌گیرد که خود یکی از مشکلات مدیریت جامع حوزه آبخیز محسوب می‌شود. شاخص توسعه انسانی از میانگین هندسی مقادیر به دست آمده مطابق با گزارش سال ۲۰۱۰ سازمان ملل محاسبه شد.

$$HDI = (LEI \times EI \times Log II)^{1/3} \quad (4)$$

در این رابطه، LEI شاخص امید به زندگی، EI شاخص آموزش و II شاخص درآمد است (Chavez and Alipaz, 2007).

برای اینکه بتوان از ترکیب شاخص‌های فوق (بهداشت، آموزش و سطح زندگی) که واحدهای متفاوت دارند به یک شاخص واحد رسید، هر یک از سه شاخص فوق با استفاده از رابطه شاخص پایه که مقدار آن بین صفر و یک است، تبدیل می‌شوند (رابطه ۵).

$$\text{شاخص پایه} = \frac{\text{کمترین مقدار} - \text{متوسط شاخص در کشور}}{\text{کمترین مقدار} - \text{بیشترین مقدار}} \quad (5)$$

با توجه به اینکه بعضی از شاخص‌ها در سطوح کلان‌تر از زیرآبخیز ارائه می‌شوند (سطح شهرستان، استان و یا ملی)، به اجبار اعداد شاخص آموزش یکسان در نظر گرفته شده است. اطلاعات مذکور از اداره آموزش و پرورش استان دریافت شده است.

محاسبه شاخص سیاست‌گذاری (P): مؤلفه فشار سیاست‌گذاری تغییر در زیرشاخص آموزش شاخص توسعه انسانی حوزه در طول مدت مطالعه را در نظر می‌گیرد. مؤلفه وضعیت موجود به وسیله توانایی حوضه در برقرار کردن اتحاد بین اهداف رسیدن به مدیریت جامع منابع آب^۵، در میان نهادها یا سازمان‌های مختلف تعیین می‌شود. مؤلفه پاسخ به برآورد سیر تکاملی هزینه‌هایی که صرف اعمال مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) طی دوره مطالعاتی شده است می‌پردازد که آن منعکس کننده عکس‌العمل ذی‌نفعان و تصمیم‌گیران در مقابله با مشکلات منابع آب است (Chavez and Alipaz, 2007).

پس از اینکه امتیازهای نهایی برای هر زیر شاخص از میانگین مؤلفه‌های فشار-وضعیت- پاسخ به دست آمد، مقدار WSI از طریق میانگین حسابی زیرشاخص‌ها

محیطزیست استان گلستان مراجعه شد و پس از مذاکره شفاهی با مسئولین بخش حفاظت مشخص شد که در هیچ برهه‌ای از زمان در این حوزه مناطقی که تحت حفاظت محیطزیست باشد وجود نداشته است.

محاسبه شاخص حیات (L): در این زیرشاخص، مؤلفه فشار بوسیله تغییرات درآمد سرانه در طول دوره مطالعه بیان می‌شود. این مؤلفه در واقع با محاسبه تغییر در زیرشاخص درآمد HDI طی دوره مطالعاتی به دست می‌آید. در مؤلفه وضعیت، شاخص توسعه انسانی حوضه با توجه به اطلاعات در دسترس برای آخرین سال از دوره مطالعاتی به کار می‌رود و مؤلفه پاسخ، تغییرات HDI (به درصد) در حوزه در طی دوره مطالعاتی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Chavez and Alipaz, 2007).

HDI معیار کلی از وضعیت توسعه انسانی است که دست‌آورد کشورها را در سه بعد اساسی توسعه شامل بهداشت و سلامت، آموزش و سطح استاندارد زندگی نشان می‌دهد (The World Bank, 2004). اما از آنجایی که این موضوعات کیفی و بسیار کلی هستند، لازم است برای کمی نمودن آن‌ها متغیرهای جانشین در هر موضوع در نظر گرفته شده و با استفاده از آمار و اطلاعات موجود در این زمینه و استفاده از روش‌های آماری مناسب به محاسبه شاخص کلی و ترکیبی HDI پرداخت.

موضوع بهداشت با شاخص امید به زندگی در بدو تولد اندازه‌گیری می‌شود. برای موضوع آموزش از دو شاخص متوسط طول دوره‌ای که صرف آموزش می‌شود و طول دوره مورد انتظار برای تحصیل کودکان در سن ورود به مدرسه استفاده شده است. بعد از آن از رابطه (۳) مقدار نهایی این زیرشاخص محاسبه شد (Chavez and Alipaz, 2007).

$$EI = \frac{(MYSI * EYSI)^{1/2}}{0.951} \quad (3)$$

که در آن، EI شاخص آموزش، MYSI^۲ شاخص میانگین سال‌های تحصیل، EYSI^۳ شاخص سال‌های مورد انتظار برای تحصیل هستند. برای موضوع سطح استاندارد زندگی از سرانه درآمد ناخالص ملی^۴ استفاده شده است. تولید ناخالص سرانه نیز در سطوح استانی

⁴ Gross National Income (GNI)

⁵ Integrated Water Resources Management (IWRM)

¹ Human Development Index

² Mean Years of Schooling Index

³ Expected Years of Schooling Index

آبی در آبخیز اترک (Sheikh et al., 2011) و کاهش بارندگی طی دوره مطالعاتی بوده است که با نتایج محققان (Ebrahimi؛ Lu et al., 2015؛ Mehri, 2013) and Chezgi, 2023) همسو است.

اثر تغییر اقلیم و کاهش بارندگی در حوزه آبخیز اترک در تحقیقات (Chamani et al., 2022) نیز تأیید شده است. در این میان زیرآبخیز چات بدترین وضعیت را نسبت به سایر زیرآبخیزها دارد و بیشترین میزان افزایش جمعیت و تغییر کاربری اراضی نیز در زیرحوضه چات بوده است که نتایج را تأیید می‌کند. اثرات تغییر کاربری اراضی بر رژیم هیدرولوژیکی در تحقیقات دیگران نیز تأیید شده است (Asghari Saraskanrood and Pourfarrash Zadeh, 2022) که همسو با نتایج این تحقیق است.

در تحقیقات (Asadi Nalivan et al., 2025) نیز وضعیت زیرآبخیز چات بر اساس شاخص‌های پایداری وضعیت مناسبی نداشته که نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند. لازم به ذکر است که کشاورزی حوزه آبخیز اترک بالغ بر ۹۵ درصد به صورت کاملاً سنتی انجام می‌شود که باعث هدررفت منابع آبی و کاهش سرانه آب در دسترس شده است که نتایج این بخش در تحقیقات (Zare Bidaki et al., 2025) نیز مورد تأکید بوده است. جدول ۴ امتیازات زیرشاخص کمی هیدرولوژی حوزه آبخیز اترک را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول سه زیرآبخیز چات، داشلی‌برون و گمیشان به لحاظ مؤلفه فشار در حالت ضعیف قرار دارند و فقط مراوه‌تپه در طبقه متوسط قرار دارد. این شرایط برای مؤلفه وضعیت و پاسخ نیز صادق است.

جدول ۵ وضعیت TDS زیرآبخیزها را در یک دوره ۱۳ ساله نشان می‌دهد. بر اساس نتایج میزان TDS در همه زیرآبخیزها افزایش پیدا کرده است که نشان‌دهنده آلودگی بیشتر منابع آب بر اثر افزایش بهره‌برداری از آب‌و خاک حوزه به واسطه افزایش جمعیت و نیاز به تأمین معیشت، خشکسالی‌های پی‌درپی و تغییر اقلیم، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و تغییر کاربری اراضی و عدم مدیریت منابع آب بوده است (Asghari Saraskanrood and Pourfarrash Zadeh, 2022).

به صورت رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$WSI = \frac{H+E+L+P}{4} \quad (6)$$

در این رابطه، H امتیاز هیدرولوژی، E امتیاز محیط‌زیست، L امتیاز حیات و P امتیاز سیاست‌گذاری است که محدوده امتیازات آن‌ها از بازه صفر تا یک به پنج رده تقسیم می‌شود (صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و یک)، به این صورت که در بهترین وضعیت امتیاز یک و در بدترین وضعیت امتیاز صفر را کسب می‌کنند. زیرشاخص‌ها با وزن یکسان امتیازبندی می‌شوند.

علاوه بر اینکه به کار بردن وزن‌های یکسان از ارزیابی در نتایج جلوگیری می‌کند، باعث ایجاد رابطه متقابل بین بخش‌های مختلف (هیدرولوژیست‌ها، جامعه‌شناسان، بوم‌شناسان، مصرف‌کنندگان آب و سیاست‌گذاران) که هر یک به گونه‌ای در مدیریت آبخیز دخیل هستند می‌شود (Chavez and Alipaz, 2007). همچنین خطی بودن ساختار رابطه شاخص پایداری و میانگین‌گیری در مراحل مختلف کار باعث کاهش تأثیر خطاها و جبران اشتباهات احتمالی در روند محاسبه فراسنجه‌ها می‌شود. پایداری آبخیز در سه طبقه پس از محاسبه WSI (بازه صفر تا یک) با استفاده از جدول ۲ به دست می‌آید (Chavez and Alipaz, 2007).

در بخش سیاست‌گذاری با توجه اینکه زیرآبخیزهای پژوهش حاضر بر اساس تقسیم‌بندی تماب انجام شده است، اعداد شاخص سیاست‌گذاری نیز بر اساس مصاحبه شفاهی با آب منطقه‌ای گلستان دریافت شده است.

جدول ۲- تعیین سطوح پایداری آبخیز به کمک WSI

Watershed Sustainability	WSI
Low	WSI < 0.6
Medium	0.6 < WSI < 0.8
High	WSI > 0.8

نتایج و بحث

شاخص هیدرولوژی: جدول ۳ سرانه آب قابل دسترس و تغییرات آن را طی دوره مطالعاتی نشان می‌دهد. بر اساس این جدول در تمامی زیرآبخیزها سرانه آب قابل دسترس در طی دوره مطالعاتی ۱۰ ساله کاهش یافته است. کاهش این شاخص به دلیل افزایش جمعیت (افزایش تقاضا برای تأمین نیازها و تشدید بهره‌برداری‌ها از منابع طبیعی (Chamani et al., 2022)، کاهش منابع

جدول ۳- محاسبه حجم آب و سرانه آب قابل دسترس حوزه آبخیز اترک

Table 3. Calculation of water volume and per capita available water in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Population (Person)	Water Volume (m ³)	Per capita available water (m ³ /pr.y)		Change in WA during the study period
			2006	2016	
			Maraveh Tapeh	76229	
Chat	149789	371000000	2987	2476	-17.1
Dashli Borun	124256	269000000	2481	2164	-12.77
Gomishan	44597	102000000	2527	2287	-9.5

جدول ۴- مقادیر امتیازات شاخص کمی هیدرولوژی در حوزه آبخیز اترک

Table 4. Quantitative hydrological index scores in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Pressure		State		Response		Mean scores
	Value	Score	Value	Score	Value	Score	
Maraveh Tapeh	-9.9	0.5	3870	0.5	Medium	0.5	0.5
Chat	-17.1	0.25	2476	0.25	Poor	0.25	0.25
Dashli Borun	-12.77	0.25	2164	0.25	Poor	0.25	0.25
Gomishan	-9.5	0.5	2287	0.25	Poor	0.25	0.33

زمین‌شناسی (وجود نهشته‌های لسی) منطقه نیز مزید بر علت است که در تحقیقات (Zare Bidaki et al., 2025) تاکید شده است و همسو با نتایج این پژوهش است. کاهش کمی و کیفی منابع آب و افزایش TDS که در این مطالعه مشاهده شد، در تحقیقات پیشین نیز به‌عنوان شاخص‌های اصلی افت پایداری معرفی شده‌اند (Mehri, Ebrahimi and Chezgi, 2023؛ Lu et al., 2015؛ 2013؛ Zare Bidaki et al., 2025). همچنین جدول ۶ امتیازات زیرشاخص کیفی هیدرولوژی حوزه آبخیز اترک را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر وضعیت بحرانی در بخش کیفیت آب آبخیز است.

جدول ۵ وضعیت TDS زیرآبخیزها را در یک دوره ۱۳ ساله نشان می‌دهد. بر اساس نتایج میزان TDS در همه زیرآبخیزها افزایش پیدا کرده است که نشان‌دهنده آلودگی بیشتر منابع آب بر اثر افزایش بهره‌برداری از آب‌و‌خاک حوزه به واسطه افزایش جمعیت و نیاز به تأمین معیشت، خشکسالی‌های پی‌درپی و تغییر اقلیم، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و تغییر کاربری اراضی و عدم مدیریت منابع آب بوده است (Asghari Saraskanrood and Pourfarrash, Zadeh, 2022). وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی در حوزه آبخیز اترک در تحقیقات (Mofidipoor et al., 2012) تأیید شده است. لازم به ذکر است وضعیت سازندهای

جدول ۵- وضعیت TDS حوزه آبخیز اترک

Table 5. TDS status of Atrak Watershed

Sub-Watershed	TDS (mg/l)		TDS change during the study period (%)
	2006	2019	
Maraveh Tapeh	1205	1423	15.3
Chat	2850	3473	17.93
Dashli Borun	3715	5158	27.97
Gomishan	7471	9173	18.55

جدول ۶- امتیاز شاخص کیفی هیدرولوژی در حوزه آبخیز اترک

Table 6. Hydrological quality index score in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Pressure		State		Response		Mean scores
	Value	Score	Value	Score	Value	Score	
Maraveh Tapeh	15.3	0.25	1423	0.5	Very Poor	0	0.25
Chat	17.93	0.25	3473	0.25	Very Poor	0	0.17
Dashli Borun	27.97	0	5158	0	Very Poor	0	0
Gomishan	18.55	0.25	9173	0	Very Poor	0	0.084

سرانه آب قابل دسترس و افزایش قابل توجه TDS در تمامی زیرآبخیزها بیانگر تشدید تنش آبی کمی و کیفی است. این موضوع همسو با نتایج (Fathi et al. 2025b)

در این پژوهش، زیرشاخص هیدرولوژی بیشترین سهم را در کاهش پایداری به واسطه کاهش سرانه آب در دسترس و کاهش کیفیت آب ایفا کرده است. کاهش

در سایر آبخیزهای نیمه‌خشک کشور نیز گزارش شده است (Zare Bidaki et al., 2025; Mehri, 2013).

شاخص محیط‌زیست: مؤلفه وضعیت این زیرشاخص درصد مساحت پوشش طبیعی حوضه را نشان می‌دهد که دارای پنج سطح است. درصد مساحت پوشش طبیعی حوضه از نقشه‌های کاربری اراضی تهیه شد. جدول ۷ نتایج بررسی مساحت پوشش طبیعی حوزه آبخیز اترک را نشان می‌دهد. بر اساس این بخش تمامی زیرآبخیزها وضعیت خوبی دارند. لازم به ذکر است که بیشتر مراتع حوضه از نوع ضعیف و کم تراکم هستند.

جدول ۷- درصد مساحت پوشش طبیعی حوزه آبخیز اترک

Table 7. Percentage of natural cover area of the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Area (ha)	Natural cover area (ha)	Area (%)	Score
Maraveh Tapeh	138833	90863	65.4	1
Chat	146561	131485	89.7	1
Dashli Borun	148605	135688	91.3	1
Gomishan	382929	234204	61.2	1

جمعیت در زیرآبخیز چات اتفاق افتاده است که نتایج افزایش اراضی کشاورزی را تا حدودی تأیید می‌کند. بدین معنی که افزایش اراضی کشاورزی متناسب با افزایش جمعیت بوده است و کاهش منابع آب در دسترس را نیز تأیید می‌کند. در این بین زیرآبخیز مراوه‌تپه با اینکه افزایش جمعیت زیاد نبوده است، ولی روند افزایش اراضی کشاورزی بالا بوده است که نشان‌دهنده افزایش فشار و بهره‌برداری بی‌رویه است.

Zare; Hazbavi et al., 2019a; Sadeghi et al., 2025; Branchi; Heirany et al., 2022; Bidaki et al., 2025; Artimani and Zeinivand, 2024, 2022) است که تأکید کرده‌اند مؤلفه‌های مرتبط با کمیت و کیفیت آب در ارزیابی پایداری نقش کلیدی دارند و نخستین بخش‌هایی‌اند که در برابر فشارهای انسانی و تغییر اقلیم دچار آسیب می‌شوند.

همچنین افزایش شوری و مواد محلول در پایین دست حوضه (به‌ویژه گمیشان) را می‌توان ناشی از کاهش جریان پایه رودخانه، تمرکز آلاینده‌ها در شرایط کم‌آبی و اثرات زمین‌شناسی منطقه دانست؛ الگویی که

جدول ۸ تغییرات مساحت اراضی کشاورزی و درصد تغییرات را نشان می‌دهد. روند افزایش زمین‌های کشاورزی در هر چهار زیرآبخیز نمایان است. بیشترین میزان افزایش اراضی کشاورزی در زیرآبخیز چات و کمترین نیز در زیرآبخیز گمیشان اتفاق افتاده است. همچنین جدول ۹ تغییرات جمعیت و درصد تغییرات جمعیت را نشان می‌دهد.

روند افزایش جمعیت نیز در هر چهار زیرآبخیز نمایان است. در این بخش نیز بیشترین میزان افزایش

جدول ۸- میزان تغییرات مساحت اراضی کشاورزی در دوره ۲۰۱۱-۲۰۲۱

Table 8. Changes in agricultural land area during the period 2011-2021

Sub-Watershed	Area 2011 (ha)	Area 2021 (ha)	Change Area (ha)	Change Area (%)
Maraveh Tapeh	9722	30798	21076	68.4
Chat	1446	7951	6505	81.8
Dashli Borun	6929	9940	3011	30.3
Gomishan	103474	113294	9820	8.6

جدول ۹- میزان تغییرات جمعیت در دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۶

Table 9. Population changes in the period 2006-2016

Sub-Watershed	Population (2006)	Population (2016)	Change Population (ha)	Change Population (%)
Maraveh Tapeh	68954	76229	7275	9.54
Chat	122870	149789	26919	17.9
Dashli Borun	118100	124256	6156	4.95
Gomishan	39598	44597	4999	11.2

به‌واسطه افزایش جمعیت را تأیید می‌کند و داشلی‌برون در رتبه بعدی قرار دارد و زیرآبخیز گمیشان بهترین وضعیت را در این شاخص دارد.

جدول ۱۰ میزان تغییرات EPI حوزه آبخیز اترک را طی یک دوره ۱۰ ساله نشان می‌دهد. نتایج بیانگر وضعیت خیلی بد شاخص EPI در دو زیرآبخیز مراوه‌تپه و چات است که نتایج افزایش زمین‌های کشاورزی

جدول ۱۰- میزان تغییرات در EPI حوضه طی دوره ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶

Table 10. The rate of change in the EPI of the area during the period 2006 to 2016

Sub-Watershed	Change Population (%)	Change agricultural land area (%)	EPI	Score
Maraveh Tapeh	9.54	68.4	38/99	0
Chat	17.9	81.8	49.9	0
Dashli Borun	4.95	30.3	17.6	0.25
Gomishan	11.2	8.6	9.9	0.5

جدول ۱۱ امتیازات زیرشاخص محیط‌زیست حوزه آبخیز اترک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج امتیاز نهایی وضعیت گمیشان بهتر از سایر زیرآبخیزها در بخش محیط‌زیست است.

جدول ۱۱- امتیاز شاخص محیط‌زیست در حوزه آبخیز اترک

Table 11. Environmental index score in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Pressure		State		Response		Mean scores
	Value	Score	Value	Score	Value	Score	
Maraveh Tapeh	38.99	0	65.4	1	0	0	0.33
Chat	49.9	0	89.7	1	0	0	0.33
Dashli Borun	17.6	0.25	91.3	1	0	0	0.41
Gomishan	9.9	0.5	61.2	1	0	0	0.5

نشان داد که بیانگر افزایش سریع اراضی کشاورزی و رشد جمعیت است. این ناهمخوانی بین «کمیت پوشش طبیعی» و «کیفیت و پایداری آن» بیانگر آن است که صرف وجود پوشش طبیعی، بدون مدیریت چرای دام، کنترل تغییر کاربری و حفاظت مؤثر، نمی‌تواند به بهبود واقعی پایداری بوم‌شناختی منجر شود. در حوضه اترک، افزایش شدید اراضی کشاورزی در زیرآبخیزهای چات و مراوه‌تپه با کاهش سرانه آب و تشدید فشار بر منابع طبیعی همزمان بوده و بیانگر وجود چرخه معیوب «افزایش تقاضای معیشتی - تخریب محیط‌زیست» است.

شاخص حیات: زیرشاخص سلامت: امید به زندگی در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۱۶ برای حوزه آبخیز اترک در جدول ۱۲ ارائه شده است که از گزارش نفوس و مسکن مرکز آمار و اطلاعات کشور استخراج شد. مقدار شاخص پایه برای امید به زندگی با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر در جدول ۱۲ ارائه شده است.

در بعد محیط‌زیست نیز افزایش گسترده زمین‌های کشاورزی و تغییرات کاربری اراضی به‌واسطه افزایش جمعیت، خصوصاً در زیرآبخیزهای چات و مراوه‌تپه که در شاخص EPI نشان داده شد، فشار قابل توجهی بر پوشش طبیعی وارد کرده است. چنین روندی در مطالعات (Núñez-Razo et al., Ahn and Kim, 2019; Zare Bidaki, Ebrahimi and Chezgi, 2023; et al., 2025) نیز گزارش شده که تغییر کاربری اراضی را یکی از مؤثرترین عوامل تنزل پایداری عنوان می‌کنند. هرچند درصد پوشش طبیعی در برخی زیرآبخیزها بالا بوده، اما کیفیت این پوشش (مراتع ضعیف) و فقدان مناطق حفاظت شده، سبب شده شاخص محیط‌زیست نتواند اثر مثبت قابل توجهی بر پایداری کلی داشته باشد. در حالت کلی افزایش فشار بر منابع طبیعی و مراتع در این حوضه به‌صورت تغییر کاربری نمایان شده است که تنزل پایداری را سبب شده است. همچنین شاخص فشار آنتروپیک (EPI) وضعیت نامطلوبی را

جدول ۱۲- شاخص سلامت (امید به زندگی) حوزه آبخیز اترک

Table 12. Health index (life expectancy) of the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Maximum	Minimum	Life expectancy (Years)		Life expectancy index	
			2006	2016	2006	2016
Maraveh Tapeh	83.2	20	71.5	73.5	0.815	0.847
Chat	83.2	20	70.5	72	0.799	0.823
Dashli Borun	83.2	20	69	71	0.775	0.807
Gomishan	83.2	20	67.5	69	0.752	0.775

فراسنجه طول دوره مورد انتظار برای تحصیل کودکان

زیرشاخص آموزش: شاخص آموزش با استفاده از دو

در سن ورود به مدرسه و متوسط طول دوره‌ای که صرف آموزش شده است محاسبه شد. دو فراسنجه نام‌برده و شاخص آموزش در حوزه آبخیز اترک محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱۳ ارائه شده است. میانگین شاخص سال ۲۰۱۶ و ۲۰۰۶ به ترتیب ۰/۸۶۳ و ۰/۷۶۳ به دست آمد.

جدول ۱۳- نتایج شاخص آموزش در حوزه آبخیز اترک

Table 13. Results of the education index in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Minimum	Maximum	Average duration of the course		Mean duration index	
			2006	2016	2006	2016
Maraveh Tapeh	0	13.2	10	11	0.758	0.833
Chat	0	13.2	10	11	0.758	0.833
Dashli Borun	0	13.2	10	11	0.758	0.833
Gomishan	0	13.2	10	11	0.758	0.833
Sub-Watershed	Minimum	Maximum	Expected duration		Expected duration index	
			2006	2016	2006	2016
Maraveh Tapeh	0	26.6	18.5	21.5	0.695	0.808
Chat	0	26.6	18.5	21.5	0.695	0.808
Dashli Borun	0	26.6	18.5	21.5	0.695	0.808
Gomishan	0	26.6	18.5	21.5	0.695	0.808

زیرشاخص درآمد سرانه: این زیرشاخص از سرانه درآمد ناخالص ملی (GNI) محاسبه شد. GNI سرانه در سال‌های موردنظر برای کشور ایران در جدول ۱۴ ارائه شده است.

جدول ۱۴- مقادیر تولید ناخالص سرانه و زیر شاخص درآمد HDI برای حوضه در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۲

Table 14. GDP per capita and HDI income sub-index values for the watershed in 2017 and 2022

Sub-Watershed	Minimum	Maximum	GNI Value		GNI Index	
			2017	2022	2017	2022
Maraveh Tapeh	163	21110	15180	18230	0.717	0.863
Chat	163	21110	15180	18230	0.717	0.863
Dashli Borun	163	21110	15180	18230	0.717	0.863
Gomishan	163	21110	15180	18230	0.717	0.863

بعد از محاسبه زیرشاخص‌های HDI، مقدار شاخص توسعه انسانی برای حوزه آبخیز اترک در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ محاسبه شد. نتایج محاسبه HDI به‌طور کامل در جدول ۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۱۵- مقادیر شاخص توسعه انسانی در حوزه آبخیز اترک

Table 15. Human development index values in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Life expectancy		Education		Income		HDI	
	2006	2016	2006	2016	2006	2016	2017	2022
	Maraveh Tapeh	0.815	0.847	0.763	0.863	0.717	0.863	0.446
Chat	0.799	0.823	0.763	0.863	0.717	0.863	0.437	0.613
Dashli Borun	0.775	0.807	0.763	0.863	0.717	0.863	0.424	0.601
Gomishan	0.752	0.775	0.763	0.863	0.717	0.863	0.411	0.577

به این ترتیب مقدار مؤلفه‌های فشار- وضعیت- پاسخ شاخص حیات محاسبه شد (جدول ۱۶). بر این اساس وضعیت این شاخص در کلیه زیرآبخیزها متوسط رو به بالا است.

جدول ۱۶- مقادیر و امتیازات شاخص حیات در حوزه آبخیز اترک

Table 16. Values and scores of the life index in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Pressure		State		Response		Mean scores
	Value	Score	Value	Score	Value	Score	
Maraveh Tapeh	16.9	1	0.63	0.5	29.3	1	0.83
Chat	16.9	1	0.613	0.5	28.7	1	0.83
Dashli Borun	16.9	1	0.601	0.5	29.4	1	0.83
Gomishan	16.9	1	0.577	0.25	28.8	1	0.75

به عاملی برای تشدید فشار بر منابع طبیعی تبدیل شود. به بیان دیگر، نبود پیوند مؤثر میان سیاست‌های توسعه محلی و ملاحظات حفاظتی سبب شده است که دستاوردهای اجتماعی نتوانند به بهبود پایداری کلی سامانه آبخیز منجر شوند.

چنین تضادی بین وضعیت اجتماعی-اقتصادی و محیطی در سایر حوزه‌های آبخیز کشور نیز گزارش شده است (Artimani and Zeinivand, 2024)؛ (Ghabelnezam et al., 2023).

شاخص سیاست‌گذاری: جدول ۱۷ مقادیر و امتیازات شاخص سیاست‌گذاری در حوزه آبخیز اترک را نشان می‌دهد. بر اساس میانگین امتیازات وضعیت این شاخص در کلیه زیرآبخیزها ضعیف است.

شاخص حیات با میانگین امتیاز مطلوب (۰/۸۱) نشان‌دهنده بهبود نسبی شاخص‌های توسعه انسانی است. با این حال، هم‌افزایی فشارهای محیطی و ضعف سیاست‌گذاری مانع از بازتاب مثبت آن در سطح کلی پایداری شده است. همچنین، تضاد میان وضعیت نسبتاً مناسب شاخص‌های اجتماعی-اقتصادی و شرایط نامطلوب محیط‌زیستی نشان می‌دهد که بهبود معیشت و شاخص‌های توسعه انسانی لزوماً به معنای ارتقای پایداری بوم‌شناختی نیست.

این یافته با نتایج مطالعات (Fathi et al., 2025a)؛ (Artimani and Zeinivand, 2024) هم‌راستا است که تأکید می‌کنند در بسیاری از آبخیزها، رشد اجتماعی-اقتصادی بدون ملاحظات زیست‌محیطی می‌تواند خود

جدول ۱۷- مقادیر و امتیازات شاخص سیاست‌گذاری حوزه آبخیز اترک

Table 17. Values and scores of the Policy Index in the Atrak Watershed

Sub-Watershed	Pressure		State		Response		Mean scores
	Value	Score	Value	Score	Value	Score	
Maraveh	11.55	1	Poor	0.25	Medium	0.5	0.58
Tapeh	11.55	1	Poor	0.25	Medium	0.5	0.58
Chat	11.55	1	Poor	0.25	Medium	0.5	0.58
Dashli Borun	11.55	1	Poor	0.25	Medium	0.5	0.58
Gomishan	11.55	1	Poor	0.25	Medium	0.5	0.58

دستگاه‌های متولی، تقویت مدیریت یکپارچه منابع آب و توسعه سازوکارهای اقتصادی-اجتماعی برای کاهش فشار بر منابع از جمله مواردی است که در مطالعات (Mosaffaie and Salehpour, Kamali et al., 2023)؛ (Jam, 2024) تأکید شده‌اند و در این حوضه نیز ضروری به نظر می‌رسند. مطالعات (Kamali et al., 2023)؛ (Mosaffaie and Salehpour, Kamali et al., 2024) نیز نشان داده‌اند که بدون تقویت ظرفیت نهادی، هماهنگی بین‌بخشی و تأمین مالی پایدار، حتی وجود برنامه‌های مدیریتی مصوب نیز به بهبود ملموس شاخص‌های پایداری منجر نخواهد شد.

در نهایت از تلفیق کلیه اطلاعات و جداول مورد بررسی، شاخص WSI برای حوزه آبخیز اترک به تفکیک زیرآبخیز در جدول ۱۸ ارائه شد. بر این اساس کلیه زیرآبخیزها به لحاظ پایداری در هر چهار شاخص اصلی وضعیت ضعیفی دارند که ضرورت اقدامات فوری جهت ارتقای وضعیت پایداری حوزه آبخیز اترک را نشان می‌دهد.

یکی از یافته‌های مهم این مطالعه ضعف شاخص سیاست‌گذاری (۰/۵۸) بود. این امر نشان می‌دهد که نبود حکمرانی جامع و کمبود ظرفیت نهادی از عوامل کلیدی در کاهش پایداری محسوب می‌شود، موضوعی که در ادبیات جهانی نیز به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی مدیریت آبخیز مطرح شده است (Chaves and Alipaz, 2007؛ Parkes and Horwitz, 2025).

این ضعف به‌ویژه در حوضه اترک که یک ناحیه مرزی، دارای مشکلات اجتماعی-اقتصادی خاص، دارای تعارض منافع بین بهره‌برداران (کشاورزی، دامداری و صنعت) و محدودیت منابع مالی برای اجرای طرح‌های آبخیزداری است، تأثیر بیشتری داشته و کارآمدی سیاست‌ها را کاهش داده و سبب شده روابط علی میان فشارهای انسانی، وضعیت محیط و واکنش نهادها به خوبی مدیریت نشود. در واقع، حتی در شرایطی که شاخص‌های اجتماعی یا پوشش طبیعی نسبی مطلوب باشند، ناکارآمدی در سیاست‌گذاری می‌تواند منجر به تداوم یا تشدید ناپایداری شود. ایجاد هماهنگی بین

جدول ۱۸- نتایج نهایی بررسی پایداری حوزه آبخیز اترک با استفاده از روش WSI

Table 18. Final results of the Atrak Watershed sustainability using the WSI method

Sub-Watershed	Hydrology	Environment	Life	Policy	Mean Score
Maraveh Tapeh	0.375	0.33	0.83	0.58	0.498
Chat	0.21	0.33	0.83	0.58	0.432
Dashli Borun	0.125	0.41	0.83	0.58	0.414
Gomishan	0.207	0.5	0.75	0.58	0.448
Mean	0.229	0.392	0.81	0.58	0.448

دارند. همچنین به لحاظ اولویت‌بندی زیرآبخیزها به ترتیب داشلی‌برون، چات، گمیشان و در نهایت مراوه‌تپه در اولویت اجرای اقدامات مختلف قرار دارند. این نتیجه با رویکردهای پیشنهادی در ادبیات که بر مدیریت هدفمند و مکانی اقدامات حفاظتی تأکید دارند، سازگار است. تمرکز اقدامات مدیریتی در زیرحوضه‌های بحرانی می‌تواند اثربخشی سرمایه‌گذاری‌ها را افزایش داده و به بهبود تدریجی پایداری در کل حوضه منجر شود. جدول ۱۹ اولویت‌بندی زیرآبخیزها در راستای اجرای اقدامات جهت ارتقای شاخص‌ها را به تفکیک زیرآبخیزها نشان می‌دهد.

با توجه به میانگین امتیازات (۰/۴۴۸) حوزه آبخیز اترک به لحاظ پایداری در طبقه پایین یا ضعیف قرار می‌گیرد. این نتیجه با مطالعات مشابه در ایران و سایر کشورها همخوانی دارد که نشان داده‌اند بسیاری از حوزه‌های آبخیز در معرض فشارهای بوم‌شناختی، تغییرات کاربری اراضی و ضعف نهادی قرار دارند (Hazbavi et al., 2018; Asadi Nalivan et al., 2015; Ebrahimi and Chezgi, 2023; Núñez-Razo et al., 2023) و به لحاظ پایداری در طبقه پایین قرار دارند. به لحاظ اولویت‌بندی اقدامات جهت ارتقای شاخص‌ها به ترتیب شاخص‌های هیدرولوژی، محیط‌زیست، سیاست‌گذاری و در نهایت حیات قرار

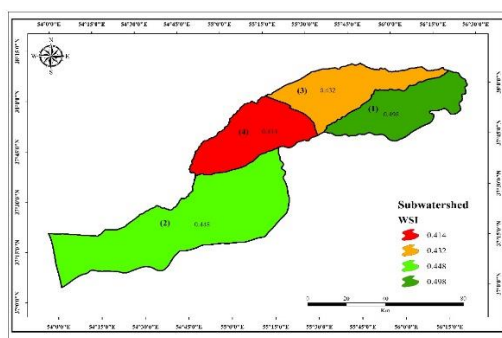
جدول ۱۹- اولویت‌بندی زیرآبخیزها بر اساس شاخص‌های چهارگانه

Table 19. Prioritization of Sub-Watershed based on four indicators

Sub-Watershed	Hydrology	Environment	Life	Policy
Maraveh Tapeh	4	1	2	1
Chat	3	1	2	1
Dashli Borun	1	2	2	1
Gomishan	2	3	1	1

است. این موضوع تأکید می‌کند که مدیریت پایدار حوضه نیازمند تمرکز اولویت‌دار بر شاخص‌های هیدرولوژی و محیط‌زیست است. همان‌گونه که (Chaves and Alipaz, 2007), Branchi, (2022) اشاره کرده‌اند، موفقیت در بهبود پایداری زمانی حاصل می‌شود که شاخص‌های بنیادی بوم‌شناختی پیش از شاخص‌های انسانی تقویت شوند. شکل ۲ مقادیر WSI و رتبه زیرآبخیزها را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه در ایران (Fathi; Hazbavi et al., 2019b; Mehri, 2013; et al., 2025a) نشان می‌دهد که روند عمومی، کاهش پایداری آبخیزها در اثر ترکیب فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی است. با این حال، شدت این روند در حوزه آبخیز اترک به دلیل موقعیت مرزی، چرای مفرط، ضعف حکمرانی، کاهش بارندگی و فقدان مناطق حفاظت‌شده، بیش از بسیاری از حوضه‌های دیگر بوده



شکل ۲- مقادیر WSI و رتبه زیرآبخیزها بر اساس پایداری

Fig 2. WSI values and Sub-Watershed rankings based on sustainability

نتیجه‌گیری

ارزیابی شاخص پایداری حوزه آبخیز در حوزه آبخیز رودخانه اترک نشان داد که وضعیت کلی پایداری این آبخیز با میانگین امتیاز ۰/۴۴۸ در طبقه «پایین» قرار دارد. نتایج حاکی از آن است که زیرشاخص هیدرولوژی با کمترین امتیاز (میانگین ۰/۲۲۹) بیشترین سهم را در کاهش پایداری حوضه داشته و بیانگر کاهش کمی و کیفی منابع آب در اثر فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی است. در مقابل، زیرشاخص حیات با میانگین ۰/۸۱ وضعیت نسبتاً مطلوبی را نشان داده است، هرچند این وضعیت به‌تنهایی قادر به جبران افت سایر شاخص‌ها نبوده است.

همچنین، شاخص‌های محیط‌زیست (میانگین ۰/۳۹۲) و سیاست‌گذاری (میانگین ۰/۵۸) نیز در سطحی پایین تا متوسط قرار دارند که بیانگر ضعف در مدیریت کاربری اراضی، افزایش فشارهای آنتروپیک و ناکارآمدی در حکمرانی یکپارچه منابع آب است. بر این اساس، ارتقای پایداری حوضه مستلزم اتخاذ رویکردهای مدیریتی جامع با اولویت بهبود شرایط هیدرولوژیک و محیط‌زیست است. اقدامات کلیدی شامل مدیریت بهینه منابع آب، کنترل تغییرات کاربری اراضی، افزایش بهره‌وری آبی، توسعه زیرساخت‌های حفاظت خاک و آب و تقویت ظرفیت نهادی برای اجرای سیاست‌های یکپارچه مدیریت منابع آب است. همچنین، نظارت مستمر بر شاخص‌های پایداری و به‌کارگیری ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند در بهبود وضعیت بوم‌شناختی حوضه و تحقق اهداف توسعه پایدار نقش مؤثری ایفا کند.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و قرارگیری حوزه آبخیز رودخانه اترک در سطح پایین پایداری، اتخاذ اقدامات فوری و برنامه‌ریزی شده برای بهبود وضعیت پایداری ضروری است. مهم‌ترین پیشنهادها مدیریتی و قابل اجرا در آبخیز شامل موارد زیر است. مدیریت جامع منابع آب که سبب افزایش بازدهی مصرف آب در بخش کشاورزی با به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری (آبیاری زیرزمینی و قطره‌ای) و مدیریت مصرف در بخش شرب و صنعت (صنایع آب‌بر زیادی در این آبخیز وجود دارد که بدون تصفیه فاضلاب فعالیت می‌کنند و اجبار به ایجاد تصفیه‌خانه و استفاده مجدد از پساب

راهکار قابل اجرایی است) خواهد شد. بهبود کیفیت منابع آب شامل کنترل و کاهش ورودی آلاینده‌ها به منابع سطحی و زیرزمینی از طریق توسعه سامانه‌های تصفیه فاضلاب شهری و روستایی قابل انجام است. حفاظت و احیای پوشش گیاهی طبیعی به‌صورت اجرای طرح‌های احیای مراتع تخریب‌شده و توسعه مناطق حفاظت‌شده که در ارتقای وضعیت پایداری حوضه نقش اساسی دارند. تقویت حکمرانی محیط‌زیستی و سیاست‌گذاری و ایجاد هماهنگی بین سازمان‌های متولی آب، کشاورزی و محیط‌زیست برای اجرای مدیریت جامع حوزه آبخیز از دیگر راهکارهای مهم جهت ارتقای وضعیت پایداری در حوزه آبخیز اترک است. بنابراین، نتایج این تحقیق ضمن تأیید کارایی شاخص WSI و رویکرد PSR در ارزیابی جامع پایداری آبخیز، بر ضرورت تقویت حکمرانی محیط‌زیست، مدیریت جامع منابع آب و کنترل تغییرات کاربری اراضی تأکید می‌کند. همچنین، این مطالعه نشان داد که برای ارتقای پایدار وضعیت آبخیز اترک، تمرکز بر بهبود شرایط هیدرولوژیک و محیط‌زیست اولویت بالاتری نسبت به ابعاد اجتماعی دارد.

بر اساس نتایج (ضعف شدید شاخص هیدرولوژی، فشار تغییر کاربری، ضعف حکمرانی و اولویت‌دار بودن زیرآبخیزهای داشلی‌برون و چات)، پیشنهادها مدیریتی کاربردی و قابل اجرا برای ارتقای پایداری حوزه آبخیز اترک ارائه می‌شود. در بعد کمیت آب اصلاح الگوی آبیاری کشاورزی (جایگزینی تدریجی آبیاری غرقابی با آبیاری قطره‌ای و کم‌فشار در زیرآبخیزهای بحرانی (چات و داشلی‌برون))؛ قیمت‌گذاری و سهمیه‌بندی آب کشاورزی در دوره‌های خشکسالی با اعمال تعرفه پلکانی برای جلوگیری از برداشت بی‌رویه؛ کنترل برداشت از منابع زیرزمینی با نصب کنترلر هوشمند روی چاه‌ها و مسدودسازی چاه‌های غیرمجاز و افزایش ذخیره طبیعی آب با اجرای سازه‌های آبخیزداری (بندهای خاکی، گابیونی و پخش سیلاب) برای تغذیه آبخوان‌ها. در بعد کیفیت آب الزام صنایع آب‌بر به تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد از پساب در همان واحد صنعتی؛ ایجاد تصفیه‌خانه‌های محلی در شهرها و روستاهای حاشیه رودخانه برای کاهش ورود آلاینده‌ها به منابع آب سطحی؛ مدیریت کود و سم در

مرزی سیل و خشکسالی. در بعد توانمندسازی جوامع محلی آموزش بهره‌برداران محلی درباره مدیریت مصرف آب، حفاظت خاک و پیامدهای تغییر کاربری اراضی؛ ایجاد مشوق‌های اقتصادی برای حفاظت (پرداخت برای خدمات بوم‌سازگان، یارانه برای آبیاری نوین، حمایت از مشاغل کم‌آب‌بر)؛ توسعه معیشت‌های جایگزین کم‌مصرف آب مانند گردشگری بومی، صنایع دستی و فعالیت‌های خدماتی محلی و مشارکت دادن مردم در پروژه‌های آبخیزداری برای افزایش پذیرش اجتماعی و پایداری اقدامات مدیریتی.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله نویسندگان از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، استانداری گلستان، اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان گلستان، سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان و شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان نهایت تشکر و قدردانی را به سبب در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات لازم جهت انجام این پژوهش دارند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

کشاورزی با آموزش کشاورزان برای کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و جایگزینی تدریجی با روش‌های زیستی و پایش دوره‌ای کیفیت آب و ایجاد سامانه هشدار سریع برای شوری و آلودگی آب در زیرآبخیزهای پایین‌دست (به‌ویژه گمیشان).

در بعد زیست‌محیطی توقف گسترش اراضی کشاورزی در مناطق حساس آبخیز و هدایت توسعه کشاورزی به سمت افزایش بهره‌وری اراضی موجود به‌جای توسعه افقی؛ احیای مراتع تخریب‌شده با کشت گونه‌های بومی مقاوم به خشکی و اجرای مدیریت چرا (چرای تناوبی و کاهش فشار دام)؛ توسعه مناطق حفاظت‌شده محلی یا «مناطق مدیریت‌شده مشارکتی» برای حفاظت از پوشش طبیعی باقی‌مانده و ایجاد کمربند سبز حفاظتی در حاشیه رودخانه‌ها برای کاهش فرسایش و ورود رسوبات و آلاینده‌ها به رودخانه. در بعد سیاست و حکمرانی تشکیل کارگروه دائمی مدیریت جامع حوزه آبخیز اترک با حضور کلیه نمایندگان؛ یکپارچه‌سازی برنامه‌های بخشی (آب، کشاورزی، محیط‌زیست) و جلوگیری از تصمیم‌گیری‌های جزیره‌ای؛ افزایش بودجه و شفافیت هزینه‌کرد در طرح‌های آبخیزداری و الزام به ارزیابی اثربخشی پروژه‌ها و تقویت همکاری فرامرزی با ترکمنستان برای مدیریت مشترک منابع آب حوضه اترک و کاهش پیامدهای

منابع مورد استفاده

- Ahn, S.R., Kim, S.J., 2019. Assessment of watershed health, vulnerability and resilience for determining protection and restoration Priorities. *Environ. Model. Soft.* 122, 103926. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.014>.
- Artimani, M.M., Zeinivand, H., 2024. Assessing watershed sustainability using watershed sustainability index, case study: Bujin Watershed in Hamadan Province. *Water Soil Manage. Model.* 4(2), 17-32. <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.12386.1235> (in Persian).
- Asadi Nalivan, O., Kornejady, A., Khosravi, G., 2025. Prioritizing sub watersheds based on health and sustainability indicators using VIKOR and TOPSIS-Mahalanobis methods. *J. Watershed Manage. Sci. Engin.* 19(69), 60-81. <https://doi.org/10.22034/19.69.4> (in Persian).
- Asadi Nalivan, O., Mohseni Saravi, M., Zahedi Amiri, G., Nazari Samani, A.A., 2016. Application of IUCN method in watershed sustainability condition assessment, case study: Talleghan-Zidasht1. *J. Range Watershed Manage.* 69(3), 543-559. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2016.61495> (in Persian).
- Asadi nalivan, O., Mohseni Saravi, M., Zahedi, G., Nazari Samani, A.A., 2015. Comparison of two methods of IUCN and watershed, range and forest management in assessing watershed sustainability (case study: Talleghan-Zeidast). *J. Watershed Manage. Res.* 6(11), 73-89 (in Persian).
- Asadi nalivan, O., Sadoddin, A., Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., 2017. Analysis of watershed health and sustainability assessment methods. 12th National Seminar on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran, Watershed Management and Environmental Crisis. Malayer, Hamedan, Iran. 7p.
- Asghari Saraskanrood, S., Pourfarrash Zadeh, F., 2022. Study the land use change and its effects on the hydrologic regime in main catchments of Binalood County. *J. RS GIS Nat. Resour.* 13(2), 84-106 (in Persian).
- Branchi, B.A., 2022. Watershed sustainability and composite index: Application and challenges. *Sociedade*

- Nat. 34, e63868.
- Chamani, R., Vafakhah, M., Tavosi, M., Zare, S., 2022. Assessment of the effect of climate change on the health status of Atrak watershed in Northeastern of Iran. *Arab. J. Geosci.* 15(24), 1745. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-11027-z>.
- Chandniha, S.K., Kansal, M.L., Anvesh, G., 2014. Watershed sustainability index assessment of a watershed in Chhattisgarh, India. *Current World Environ.* 9, 403-411.
- Chaves, H.M.L., Alipaz, S., 2007. An integrated indicator based on watershed hydrology, environment, life, and policy: The Watershed Sustainability Index. *Water Resou. Manage.* 21(5), 883-895. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9107-2>.
- Council, R.B.C., 2006. Watershed health factors assessment. Rogue River Watershed, Jackson, Josephine, and Curry Counties. Rogue Watershed Coordinating Council March, 31.
- Ebrahimi Gatgash, Z., Sadeghi, S.H.R., 2023. Prioritization-based management of the watershed using health assessment analysis at sub-watershed scale. *Environ. Develop. Sustain.* 25(9), 9673-9702. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02455-8>.
- Ebrahimi, S., Chezgi, J., 2023. Assessment the Forg Watershed sustainability in darmiyani county using HELP method. *J. Arid Biome.* 13(2), 125-138. <https://doi.org/10.29252/ARIDBIOM.2024.20841.1972>.
- EPA. 2014. Wisconsin integrated assessment of watershed health. Available at: <http://www.epa.gov/healthywatersheds>, 111 p.
- Falkenmark, M., Rockström, J., 2004. Balancing water for humans and nature: The new approach in ecohydrology. Published by Routledge, 272 p.
- Fathi, E., Talebi, A., Ekhtesasi, M.R., Mosaffaie, J., Akbari, Z., 2025a. Sustainability assessment of the Malekshahi Watershed based on ecological and socio-economic criteria in Iran. *Ecopersia.* 13(2), 165-181. <https://doi.org/10.22034/ECOPERSIA.13.2.165>.
- Fathi, E., Talebi, A., Ekhtesasi, M., Mosaffaie, J., 2025b. Comparative analysis of watershed health and sustainability assessment models and indicators with a focus on improving management decision-making. *Integ. Watershed Manage.* 5(1), 1-18. <https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2033191.1160> (in Persian).
- Firdaus, R., Nakagoshi, N., Idris, A., 2014. Sustainability assessment of humid tropical watershed: a case of Batang Merao watershed, Indonesia. *Procedia Environ. Sci.* 20, 722-731. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.086>.
- Fleming, B., 1999. Watershed health: An evaluation index for New Mexico. Rio Grande ecosystems: linking land, water, and people. Proceedings toward a sustainable future for the Middle Rio Grande Watershed. Albuquerque (NM): US Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RMRS-P-7, 93-96.
- Ghabelnezam, E., Babaei, L., Alaei, N., Hazbavi, Z., 2023. Development of an incorporative PSR-Fuzzy approach for health assessment of KoozehTopraghi Watershed. *Water Soil Manage. Model.* 3(4), 152-167. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11379.1125> (in Persian).
- Hazbavi, Z., Keesstra, S.D., Nunes, J.P., Baartman, J.E., Gholamalifard, M., Sadeghi, S.H.R., 2018. Health comparative comprehensive assessment of watersheds with different climates. *Ecol. Indic.* 93, 781-790. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.078>.
- Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R., Gholamalifard, M., 2019a. Dynamic analysis of soil erosion-based watershed health. *Geography, Environment, Sustain.* 12(3), 43-59. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-58>.
- Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R., Golamalifard, M., 2019b. Field efficiency assessment of Pressure-State-Response (PSR) model for watershed health characterization, case study: Shazand Watershed-Iran. International Conference on Soil and Water Resource Management for Climate Smart Agriculture, Global Food and Livelihood Security, New Delhi, India, Nov. 5 to 9, 331 p.
- 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. <https://doi.org/10.1002/ldr.3420>.
- Heirany, A.R., Behzadfar, M., Alaei, N., Hazbavi, Z., 2022. Ecological Sustainability Assessment in the Tutli Watershed, North Khorasan Province. *J. Geograph. Environ. Studies.* 11 (42), 152-169. <https://doi.org/10.1001.1.20087845.1401.11.42.10.9> (in Persian).
- Kamali, M., Azarnivand, H., Malekian, A., Mosaffaie, J., 2023. Developing management solutions for Alolak watershed in the Qazvin Province using the DPSIR approach. *J. Watershed Manage. Res.* 14(28), 148-162. <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.28.148> (in Persian).
- Karimi Sangchini, E., Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., 2022a. Prioritizing of causal-effect factors affecting flood occurrence in Khorramabad Watershed. *J. Watershed Manage. Res.* 13(25), 1-10 (in Persian).

- Karimi Sangchini, E., Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., 2022b. Flood risk management in Khorramabad Watershed using the DPSIR framework. *Nat. Hazards*. 114, 3101–3121. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05507-4>.
- Liu, J., Zhao, Y., Chen, X., Akrasha, S., 2018. Ecosystem-based management approaches for watershed conservation and geosustainability. *Helyon* 10(9), <https://doi.org/10.1016/j.helyon.2024.e29800>.
- Lowe, M., Whitzman, C., Badland, H., Davern, M., Aye, L., Hes, D., Butterworth, I., Giles-Corti, B., 2015. Planning healthy, livable, and sustainable cities: How can indicators inform policy? *Urban Policy Res.* 33, 131-144.
- Lu, Y., Wang, R., Zhang, Y., Su, H., Wang, P., Jenkins, A., Ferrier, R.C., Bailey, M., Squire, G., 2015. Ecosystem health towards sustainability. *Ecosys. Health Sustain.* 1(1), 1-15. <https://doi.org/10.1890/EHS14-0013.1>.
- Mehri, R., 2013. Development and application of sustainable sustainability (WSI) for Chehelchay watershed, Golestan Province. Master's Thesis in Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 130 p (in Persian).
- Moghadam, N., Malekmohammadi, B., 2025. Assessment of drought change trends and watershed health using a reliability-resilience-vulnerability framework in mountainous watersheds. *Current Res. Environ. Sustain.* 9, 100285. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2025.100285>.
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., 2024. Assessment of the Kalaji Watershed health based on hydrological and geomorphological criteria: relative and absolute approaches. *AQUA-Water Infrastruc. Ecosys. Society.* 73(9). 1854-1867. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.170>.
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M., Kousari, M., 2021. Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land Use Policy.* 100, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911>.
- Mofidipoor, N., Sheikh, V.B., Ownegh, M., Sadoddin, A., 2012. The analysis of relationship between meteorological and hydrological droughts In Atrak watershed. *J. Watershed Manage. Res.* 3(5), 16-26 (in Persian).
- Núñez-Razo, I., de Anda, J., Barrios-Piña, H., Olvera-Vargas, L.A., García-Ruiz-García, M., Hernández-Morales, S., 2023. Development of a watershed sustainability index for the Santiago River Watershed, Mexico. *Sustain.* 15(10), 8428. <https://doi.org/10.3390/su15108428>.
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). 1993. OECD core set of indicators for environmental performance reviews. OECD Environmental Directorate Monographs No. 83. OECD, Paris.
- Parkes, M.W., Horwitz, P., 2025. Attending to the mesoscale: Watersheds and Health. *PLOS Water.* 4(2), e0000347. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000347>.
- Sadeghi, S.H., Ghabelnezam, E., Ahmadinejad Baghban, F., Zabihi Silabi, M., Chamani, R., 2025. Variability in health zoning due to applying different methods for averaging pressure, state, and response indices in the Baladeh-e-Noor watershed, Iran. *Integrat. Watershed Manage.* 5(1), 19-36. <https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2035677.1163> (in Persian).
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., 2017a. Necessity of watershed health assessment in integrated soil and water resources management. Proceedings of 2nd IAHS Panta Rhei International Conference on Water System Knowledge Innovation and Its Practices in Developing Countries, Iran, Gorgan, Nov. 20-23.
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., 2017b. Spatiotemporal variation of watershed health propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought index, case study: Shazand Watershed in Iran. *Sci. Total Environ.* 587, 168-176. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.098>.
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., Cerda, A., 2017. Watershed health assessment to monitor land degradation. *EGU Assemb. Vienna Austria Apr.* 23-28, 19, 2p.
- Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., Gholamalifard, M., 2018. Accuracy of reliability-resilience-vulnerability framework in watershed health assessment. *Green Room, Podgorica Montenegro.* Nov, 1-3, 159.
- Sadeghi, S.H.R., Sadoddin, A., Asadi Nalivan, O., Hazbavi, Z., Zare, A., Moaeri, M.H., 2020. Watershed health and sustainability (necessities, approaches and assessment). *Tarbiat Modares University*, 218 p (in Persian).
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Tabatabaei, M., 2021a. Assessment of comprehensiveness of soil conservation measures using the DPSIR framework. *Environ. Monitor. Assess.* 193, 42. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08785-2>.
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Tabatabaei, M., 2021b. Management responses for Chehel-Chay Watershed health improvement using the DPSIR framework. *J. Agric. Sci. Technol.* 23(4), 797-811.
- Soleimanpour, S.M., Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Noroozie, K., 2023. Land subsidence risk management solutions in Seydan-Farooq Plain of Fars Province with the driving force-pressure-state-impact-response approach. *Watershed Manage. Res.* 36(1), 50-65. <https://doi.org/10.22092/wmrj.2022.358262.1465> (in Persian).

- Soltani M.J., Motamedvaziri B., Mosaffaie, J., Noroozi, A., Ahmadi, H., 2023. Cause and effect analysis of the trend of dust storms using the DPSIR framework in the Hendijan region. *Interna. J. Environ. Sci. Technol.* 20. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04882-0>.
- Sheikh, V.B., Bahreman, A., Mooshakhian, Y., 2011. A comparison of trends in hydrologic variables in the Atrak River basin using non-parametric trend analysis tests. *J. Water Soil Conserv.* 18(2), 1-21 (in Persian).
- Sawyer, D., 1997. Anthropic pressure index for savanna regions. Brasilia, Brazil, 1-20.
- The World Bank. 2004. Water resources sector strategy-Strategic directions for World Bank engagement.
- UNESCO. HELP. 2010. Hydrology for the environment, life, and policy. HELP Brochure. UNESCO, Paris, France.
- UNESCO-IHP. 2001. The design and implementation strategy of the HELP initiative. IHP Technical Doc. Hydrol. 44, 1-65.
- Witulski, N., Dias, J.D., 2020. The sustainable society index: its reliability and validity. *Ecol. Indic.* 114. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106190>.
- Zare Bidaki, R., Drakhshan, S., Kheybari, S., Marinho, L., Chaves, H., 2025. Recreating of Watershed Sustainability Index (WSI) based on driving force-pressure-state-impact-response framework in Beheshtabad Watershed. *Watershed Manage. Res.* 38(1), 96-112. <https://doi.org/10.22092/WMRJ.2024.365917.1586> (in Persian).