

Quantitative Revelation of Regime Shifts in the Social-Ecological System of Zayandeh-Rud: Application of the Ball in the Basin Metaphor

Majid Rahimi¹, Mehdi Ghorbani²

1. Social Business Institute, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: rahimi74@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mehghorbani@ut.ac.ir

Article Info

Research Article: Research Paper

Article history:

Received: 15 January 2025
Received in revised form:
11 March 2025
Accepted: 1 May 2025
Available online: 10 June
2025

Keywords:

*Alternative Stable States,
Critical Thresholds,
Ecological Balance,
Resilience,
System Dynamics.*

ABSTRACT

Objective: Interactions between human societies and natural ecosystems characterize social-ecological systems (SES), which, in turn, illustrate the dynamic interconnections among resources, land use, and water management. The goal of this research was to analyze and quantitatively disclose regime shifts in the social-ecological system of Zayandeh-Rud, which is one of Iran's important water sources, through the ball in the basin metaphor.

Method: The research method involves the collection and analysis of time series data on surface water flow, water quality, groundwater levels, and agricultural land area. Using the sequential t-test method, regime shifts in the data were identified, and the obtained results and identification of critical thresholds assisted in this process. These critical threshold points were used to numerically calculate the depth of the basins in the ball in the basin metaphor. Then, through visualizing the regime shifts using this metaphor, different states of the studied systems and alternative stable states in these systems were analyzed.

Results: The findings indicated that in the surface water subsystem regime, shifts were not identified in the Eskandari and Qaleh Shahrokh stations. In five other stations, at least one instance of regime shift was observed in the time series of surface water flow. Additionally, the analysis of Gavkhuni Wetland indicated the occurrence of regime shift in this wetland. In the surface water quality subsystem, no shifts were identified in the three upstream stations, while at least one regime shift was recognized in five other stations. Groundwater analysis showed the occurrence of regime shift with a decline in static levels in all 16 studied aquifers. Moreover, in the agricultural system, an increase in land areas was observed in the upstream region of the Zayandeh-Rud dam, accompanied by a decrease downstream and east of Isfahan. The results of applying the ball in the basin metaphor demonstrated that in the initial regime of all time series, resilience erosion led to shifts to other regimes. Additionally, the decline in resilience in some current regimes also indicated the system's movement toward another innovative regime.

Conclusions: Regime shifts in the Zayandeh-Rud River Basin social-ecological systems arise from the complex interactions of human factors, together with natural factors, whose effects are majorly felt in the ecosystem and the local community; hence, a comprehensive analysis is vital. The excessive exploitation of natural resources resulting from human activity, particularly population growth and increased urbanization, has caused significant water quality degradation. It is also important to add that climate change and the increasing incidences of drought have further aggravated declining groundwater levels, which, in turn, have diminished the resilience of these ecosystems. Identification of threshold points and analysis of regime shifts enable managers to formulate effective management strategies and conserve the resilience of ecosystems.

Cite this article: Rahimi, M., & Ghorbani, M. (2025). Quantitative Revelation of Regime Shifts in the Social-Ecological System of Zayandeh-Rud: Application of the Ball in the Basin Metaphor. *Journal of Environmental Studies*, 51 (1), 75- 95. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.388271.1008570>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.388271.1008570>

Introduction

Social-ecological systems (SES) capture the relationships between human societies and the ecosystems that support them, integrating to some extent the relationships among resources, land use, and water management. Recognizing these interactions is important for assessing the impacts of human activities on the state of the environment and the way it, in turn, affects people's ways of life. If given ample time, the interplay among these systems can bring about drastic changes to their structure and function, particularly with growing external stresses like climate change, urban sprawl, and other anthropogenic activities. Some of the important concepts under these previously stated frameworks are termed regime shifts, which represent the significant change, often not smooth, in the state variables of SES. These changes can occur as a result of many drivers, such as changes in climate or weather, changes in population, and different styles of resource use.

The phenomena of socio-economic interactions usually transform aquifers and rivers, like the Zayandeh Rud River in Iran, which is fundamental to freshwater supply, the economy, and biodiversity conservation. Its flowing systems, like any natural entity, still suffer immense threats, including dwindling water inflow, habitat fragmentation, and ecological degradation due to climate change phenomena, fewer rainfall amounts, higher temperatures, and anthropogenic activities of over-utilization of hydrologic resources and substantial land cover modifications.

These negative impacts are affecting the balance between the freshwater ecosystems and the people depending on the river's resources. As a result, the situation calls for urgent action to analyze in detail systemic breaks and the resilience of the Zayandeh Rud SES water system. Emerging effective and proactive management strategies are necessary to confront these issues and sustainably integrate socio-economic and ecological activities vital to the river's future.

Method

This study investigates regime shifts in the social-ecological system of the Zayandeh-Rud watershed, focusing on four critical subsystems: surface water flow, surface water quality, groundwater levels, and agricultural land area. To achieve this goal, seasonal time-series data from 1986 to 2018 were analyzed. The analysis utilized river discharge data from eight hydrometric stations, satellite imagery, and various indicators such as the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Total Dissolved Solids (TDS). Groundwater levels were examined across 16 aquifers, while agricultural land areas were assessed using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

To identify significant change points within the data, a sequential t-test method was employed, allowing for the segmentation of data into distinct periods for comparison of means and variances. The threshold levels indicative of regime shifts were established through annual moving averages, and a metaphorical "basin" depth was calculated to represent system resilience in relation to these thresholds. Diagrams illustrating the metaphorical basin for each subsystem were created to visualize regime shifts within the watershed. The objective of this methodology was to increase understanding in order to better manage ecological resources and watershed integrity, thus providing significant insight into their function and dynamics.

Results

In the surface water subsystem, relative stability was identified at the Eskandari and Qaleh Shahrokh stations, where no regime shifts were found, implying these locations are being reasonably managed for water flow. These results provided a preliminary estimate of the instances of regime changes within the Zayandeh-Rud watershed subsystems and showed the interactions among them, which are indeed worthwhile for study. Conversely, significant regime shifts were observed at five other stations and within the Gavkhuni wetland, indicating that broader hydrological changes were substantially impacting wetland dynamics. When assessing

water quality, the analysis revealed no shifts at three upstream stations, while five downstream stations experienced significant deterioration in quality.

This phenomenon draws attention to water monitoring and management efforts concerning declining water quality, particularly in the downstream hotspot regions. Groundwater analysis of 16 aquifers uncovered dramatic and uniform regime changes identified by declining water levels. Undoubtedly, the utilization of water resources beyond the available supply or the impacts of changing climate conditions dictate shifts that require a primacy focus on urgent groundwater rescue. Declining water resources endangers water-dependent ecosystems, local agriculture, and productivity alike.

In the agricultural sector, an increase in land area was detected upstream of the Zayandeh-Rud dam, while downstream and in eastern Isfahan, a reduction in agricultural land was noted. These changes are likely driven by varying irrigation practices and market pressures. The research implicates that the ball-in-the-basin metaphor sheds light on the unfit for resilience, causing regime shifts into alternate states. Increased caution needs to be exercised due to an increased risk of other possible forms of stability coming into existence, which could cause further ecological damage in the absence of urgent measures. The overall results disclose the complex nature and interconnectedness of the Zayandeh-Rud watershed subsystem. They proclaim a dire necessity for the management of water resources for the preservation of the environment while allowing the agricultural activities in the area.

Conclusions

Shifts in regimes within social-ecological systems (SES), such as the Zayandeh-Rud watershed, affect both the ecosystems and local societies in profound ways. These changes stem from an intricate web of anthropogenic and biophysical interactions. As the population continues to grow, so does urbanization, which leads to a tendency for people to use more and more water. The increase in demand has led to the overexploitation of both the surface and groundwater resources, and as a result, water availability and quality have suffered tremendously. Hence, additional unsustainable management practices aggravate the problem. Coupled with climate change, these issues are further exacerbated by high temperatures and lack of rain, leading to inflating water dependence, which is economically detrimental for most communities. A causal loop diagram effectively illustrates how the escalating water demand from population growth and agricultural practices leads to resource depletion, which in turn compels farmers to over-extract groundwater.

This over-extraction contributes to a continuous cycle of degradation in water resources. This economic turmoil will only worsen if critical boundaries around the problem are not addressed. Meeting these boundaries, which could decrease or eliminate the negative impacts of the mentioned issues by providing definite water and conserving the ecosystems, is crucial. Understanding and recognizing these shifts is important to take effective measures in water management and biodiversity conservation. We can thus gain a proper understanding of such dynamics and offer advice on management strategies that will build ecological resilience to address the water crises of the Zayandeh-Rud watershed with metaphoric tools, for instance, the "ball-in-the-basin" metaphor.

Author Contributions

Conceptualization, Mehdi Ghorbani and Majid Rahimi; methodology, Majid Rahimi; software, Majid Rahimi; validation, Majid Rahimi; formal analysis, Majid Rahimi; investigation, Majid Rahimi; resources, Mehdi Ghorbani and Majid Rahimi; data curation, Mehdi Ghorbani and Majid Rahimi; writing—original draft preparation, Majid Rahimi; writing—review and editing, Mehdi Ghorbani; visualization, Majid Rahimi; supervision, Mehdi Ghorbani; project administration, Mehdi Ghorbani; funding acquisition, Mehdi Ghorbani. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Iran Water Resources Management Company for providing the data used in this study.

Ethical considerations

This research adhered to ethical standards concerning data collection and analysis. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

There was no funding received for this research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest related to this study.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

دوره ۵۱، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

شاپای چاپی: ۸۶۲۰-۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

آشکارسازی کمی تغییرات رژیم نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده رود: کاربرد استعاره گوی در حوضچه

مجید رحیمی^۱، مهدی قربانی^۲

^۱. موسسه کسب و کار اجتماعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: rahimi74@ut.ac.ir

^۲. نویسنده مسئول، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mehghorbani@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰ کلیدواژه‌ها: آستانه‌های بحرانی، پویایی سیستم‌ها، تاب‌آوری، تعادل اکولوژیک، حالت‌های پایدار جایگزین.	هدف: نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک (SES) شامل تعاملات پیچیده بین جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی است که منعکس‌کننده ارتباطات متقابل پویا بین منابع، کاربری زمین و مدیریت آب است. هدف این پژوهش، تحلیل و آشکارسازی کمی تغییرات رژیم نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود، که یکی از منابع آبی مهم ایران است، به‌وسیله استعاره گوی در حوضچه بوده است. روش پژوهش: روش پژوهش شامل جمع‌آوری و تحلیل داده‌های سری زمانی از جریان آب سطحی، کیفیت آب، تراز آب زیرزمینی و سطح اراضی کشاورزی است. با استفاده از روش آزمون t ترتیبی، تغییرات رژیم در داده‌ها شناسایی و نتایج به‌دست آمده به شناسایی آستانه‌های بحرانی کمک کرد. این نقاط آستانه بحرانی به‌منظور محاسبه عددی عمق حوضچه‌ها در استعاره گوی در حوضچه استفاده گردید. سپس از طریق تصویرسازی تغییرات رژیم با استفاده از این استعاره، حالت‌های مختلف سیستم‌های مورد مطالعه و حالت‌های پایدار جایگزین در این سیستم‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها: یافته‌ها نشان داد که در زیرسیستم آب سطحی، تنها در ایستگاه‌های اسکندری و قلعه شاهرخ تغییر رژیم شناسایی نشد. در پنج ایستگاه دیگر حداقل یک بار تغییر رژیم در سری زمانی جریان آب سطحی مشاهده گردید. همچنین، تحلیل سطح تالاب گاوخونی نشان‌دهنده وقوع تغییر رژیم در این تالاب بود. در زیرسیستم کیفیت آب سطحی، در سه ایستگاه بالادست شناسایی نشد و حداقل یک بار در پنج ایستگاه دیگر تغییر رژیم شناسایی شد. تحلیل آب زیرزمینی نیز در تمامی ۱۶ آبخوان مورد بررسی، وقوع تغییر رژیم را با افت سطح ایستابی نشان داد. به‌علاوه در سیستم کشاورزی، افزایش سطح اراضی در منطقه بالادست سد زاینده‌رود و کاهش آن در پایین‌دست و شرق اصفهان تجربه گردید. نتایج کاربرد استعاره گوی در حوضچه نشان داد که در رژیم نخستین تمامی سری‌های زمانی، فرسایش تاب‌آوری باعث تغییر به رژیم‌های دیگر شده است. همچنین، افت تاب‌آوری در برخی رژیم‌های کنونی نیز نشان‌دهنده حرکت سیستم به رژیم بدیع دیگری بوده است. نتیجه‌گیری: تغییرات رژیم در نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک حوزه آبخیز زاینده‌رود ناشی از تعامل پیچیده عوامل انسانی و طبیعی است و تأثیرات عمیق آن بر اکوسیستم و جوامع محلی نیاز به تحلیل‌های جامع دارد. فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه افزایش جمعیت و شهرنشینی، باعث برداشت بی‌رویه از منابع آب و افت کیفیت آن شده است. همچنین، تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های مکرر بر کاهش سطح آب زیرزمینی تأثیر گذاشته و موجب کاهش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها گردیده است. شناخت نقاط آستانه و تحلیل تغییرات رژیم به مدیران در توسعه راهکارهای مدیریتی مؤثر و حفظ تاب‌آوری اکوسیستم‌ها کمک می‌کند.

استناد: رحیمی، مجید؛ و قربانی، مهدی (۱۴۰۴). آشکارسازی کمی تغییرات رژیم نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود: کاربرد استعاره گوی در حوضچه.

نشریه محیط‌شناسی، ۵۱(۱)، ۷۵-۷۵. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.388271.1008570.95>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.388271.1008570>

۱. مقدمه

نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک^۱ (SES) به مجموعه‌ای از تعاملات پیچیده بین جامعه انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی اطلاق می‌شود که برهم‌کنش‌های پویا و چندبعدی دارند (Martinez-Fernandez et al., 2021; Biggs et al., 2021). این نظام‌ها شامل منابع طبیعی، کاربری زمین، مدیریت آب و دیگر عوامل محیطی و اجتماعی می‌شوند. تعاملات بین این عناصر می‌تواند به تغییرات اساسی در ساختار و عملکرد نظام منجر شود، به‌ویژه در مواقعی که عوامل خارجی مانند تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به‌شدت تأثیرگذار هستند (Preiser et al., 2018). یکی از مفاهیم کلیدی در این زمینه، تغییرات رژیم است که به تغییرات اساسی و غیرخطی در وضعیت یک نظام اجتماعی- اکولوژیک اشاره دارد که می‌تواند به دلیل تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی، تغییرات در مدیریت منابع و سایر عوامل محیطی و اجتماعی رخ دهد (Wang et al., 2024; Rahimi et al., 2024a). این تغییرات می‌توانند منجر به تغییرات پایدار در ساختار، عملکرد و خدمات اکوسیستم شوند. بنابراین شناسایی و تحلیل این تغییرات اهمیت بالایی دارند. (Zhao et al., 2023).

رودخانه زاینده‌رود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین در ایران، نقش حیاتی در تأمین آب شهرها و روستاهای مجاور، کشاورزی، صنعت و حفظ تنوع‌زیستی منطقه ایفا می‌کند (Rahimi et al., 2023; Hamidifar, 2024). در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، کاهش بارندگی، افزایش دما و فعالیت‌های انسانی مانند بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب، ساخت سدها و تغییرات کاربری زمین منجر به کاهش جریان آب و تخریب زیست‌بوم زاینده‌رود شده است (گل‌کرمی و کاویانی‌راد، ۱۳۹۶). این تغییرات نه‌تنها بر اکوسیستم‌های طبیعی بلکه بر جوامع انسانی و فعالیت‌های اقتصادی نیز تأثیرات منفی داشته است (تیموری و همکاران، ۱۴۰۲). ضرورت پژوهش در زمینه تغییرات رژیم و تاب‌آوری نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود از چند منظر قابل بررسی است. نخست، کاهش جریان آب و تخریب زیست‌بوم زاینده‌رود منجر به کاهش کیفیت زندگی جوامع محلی، کاهش تولیدات کشاورزی و تهدید تنوع‌زیستی منطقه شده است (Rahimi et al., 2024a). دوم، تحلیل تغییرات رژیم و شناسایی آستانه‌های بحرانی می‌تواند به مدیران و سیاست‌گذاران کمک کند تا راهبردهای مدیریتی مؤثری را برای حفظ و بازسازی پایداری این نظام‌ها توسعه دهند (Martin et al., 2020). سوم، استفاده از ابزارهای تحلیلی مانند استعاره گوی در حوضچه می‌تواند به تفهیم بهتر تغییرات و واکنش‌های سیستم به عوامل مختلف کمک کند از این‌رو به توسعه حکمرانی پایدار کمک می‌کند (Radosavljevic et al., 2023).

پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که تغییرات رژیم و شناسایی آستانه‌ها در نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک می‌تواند به بهبود مدیریت منابع طبیعی کمک کند. در مطالعه‌ای که توسط رحیمی و همکاران (۲۰۲۳) انجام شده است، سری‌های زمانی جریان آب سطحی در ۸ ایستگاه هیدرومتری در طول رودخانه زاینده‌رود و سطح تالاب گاوخونی به‌عنوان سیستم جریان آب سطحی، کیفیت آب سطحی در این ایستگاه‌ها، تراز آب زیرزمینی در ۱۶ آبخوان و سطح اراضی کشاورزی در سه منطقه بالادست سد زاینده‌رود، پایین‌دست سد تا شهر اصفهان و زیرحوزه کوهپایه سگزی (شرق اصفهان) از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ بررسی و تغییرات رژیم و آستانه‌های آن محاسبه شده است (Rahimi et al., 2023). این پژوهش نشان داد که تغییرات رژیم در زاینده‌رود نقش مهمی در کاهش جریان آب و تخریب زیست‌بوم داشته است. همچنین، آستانه‌های مشخصی برای این تغییرات شناسایی شدند که می‌توانند به‌عنوان نقاط هشدار برای مدیریت منابع آب استفاده شوند. در ادامه این پژوهش، استفاده از استعاره گوی در حوضچه به‌منظور تصویرسازی و تحلیل تغییرات رژیم شناسایی شده به‌صورت مکانی در طول رودخانه زاینده‌رود از اهمیت بالایی برخوردار است. این روش با کمک به تفهیم بهتر تغییرات و واکنش‌های سیستم به عوامل مختلف، می‌تواند به توسعه حکمرانی مؤثر و پایدار کمک کند. پژوهش‌های مرتبط دیگر نیز نشان داده‌اند که استفاده از ابزارهای تحلیلی مفهومی مانند استعاره گوی در حوضچه می‌تواند به بهبود درک تغییرات رژیم و واکنش‌های نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک کمک کند. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط جانکورا و همکاران (۲۰۲۴) انجام شده است، از این استعاره برای تحلیل تغییرات رژیم تولیدات کشاورزی در نظام‌های اکولوژیک مختلف استفاده شده و نتایج آن به توسعه مدیریت نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک کمک کرده است (Junquera et al., 2024). همچنین در پژوهش دیگری بیگز و همکاران (۲۰۱۵) به ایجاد پایگاه داده تغییرات رژیم در نظام‌های اجتماعی-

اکولوژیک جهانی پرداخته و به کمک استعاره گوی در حوضچه و تحلیل نمودارهای علت و معلولی وقوع تغییرات رژیم، به بررسی حلقه‌های بازخورد غالب در وقوع تغییرات رژیم مختلف پرداختند (Biggs et al., 2015).

استعاره گوی در حوضچه، تصویری از چندین حوضچه جذب ارائه داده و نشان می‌دهد که چگونه مداخلات یا شوک‌ها می‌توانند سیستم را از یک حوضچه به حوضچه‌ای دیگر منتقل کرده و باعث تغییر رژیم شوند. موقعیت گوی نمایانگر وضعیت کنونی سیستم است و کف حوضچه نماد رژیمی است که سیستم در صورت عدم وجود عوامل خارجی که وضعیت آن را بیش از حد تغییر دهد (یا شکل حوضچه را تغییر دهد)، در آن باقی خواهد ماند. با وارد شدن نیروی کافی، سیستم می‌تواند از یک حوضچه به حوضچه دیگری منتقل شود، یعنی به حوضچه جذب دیگری برسد و بدین ترتیب دچار تغییر رژیم شود (Radosavljevic et al., 2023). این مفهوم به‌وضوح نشان می‌دهد که چگونه تغییرات در سیستم‌ها می‌توانند به تغییرات عمده و ناگهانی در وضعیت آن‌ها منجر شوند و این تحلیل می‌تواند به شناخت بهتر و مدیریت مؤثرتر سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیک کمک کند. علاوه بر این، فرسایش تاب‌آوری نیز می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر واکنش‌های سیستم به شوک‌ها و مداخلات تأثیر بگذارد. فرسایش تاب‌آوری به معنای کاهش توانایی سیستم در تحمل شوک‌ها و بازیابی از تغییرات است. با کاهش تاب‌آوری، سیستم ممکن است به‌آسانی و با نیروی کمتری از یک حوضچه به حوضچه‌ای دیگر منتقل شود، که این موضوع بر اهمیت مدیریت تاب‌آوری و شناخت عوامل مؤثر بر آن تأکید می‌کند (Pelletier et al., 2020).

از این‌رو در پژوهش حاضر بر اساس تحلیل‌های قبلی و داده‌های جمع‌آوری شده، سعی شد با استفاده از استعاره گوی در حوضچه و تحلیل سری‌های زمانی، تغییرات رژیم و تاب‌آوری نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود به‌صورت کمی بررسی و آشکارسازی شوند. این پژوهش به دنبال توسعه دانش و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر برای حفظ و بازسازی پایدار نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود بوده است و همچنین به تحلیل تغییرات رژیم شناسایی شده در نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ با استفاده از سری‌های زمانی جریان آب سطحی، کیفیت آب سطحی، تراز آب زیرزمینی و سطح اراضی کشاورزی گزارش شده توسط رحیمی و همکاران (۲۰۲۳) پرداخته است (Rahimi et al., 2023). همچنین، آستانه‌های بحرانی برای تغییرات رژیم شناسایی و محاسبه شده در پژوهش مذکور جهت رسم نمودارهای گوی در حوضچه در نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود استفاده گردیدند. این آستانه‌ها به‌عنوان نقاط هشدار برای مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با استفاده از این استعاره، تغییرات رژیم شناسایی شده به‌صورت مکانی در طول رودخانه زاینده‌رود قابل تصویرسازی و تحلیل هستند. این روش به تفهیم بهتر تغییرات و واکنش‌های سیستم به عوامل مختلف کمک می‌کند. به‌علاوه این پژوهش به توسعه و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر و پایدار برای حفظ و بازسازی نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود پرداخته است. از طریق افزایش دانش و آگاهی در زمینه تغییرات رژیم و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود و توجه به اهمیت رودخانه زاینده‌رود در تأمین منابع آب، کشاورزی و حفظ تنوع زیستی منطقه، این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مفید برای مدیران و سیاست‌گذاران مورد استفاده قرار گیرد. تحلیل تغییرات رژیم و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک با استفاده از ابزارهای تحلیلی مفهومی می‌تواند به بهبود مدیریت منابع طبیعی و توسعه راهبردهای مدیریتی مؤثر کمک کند.

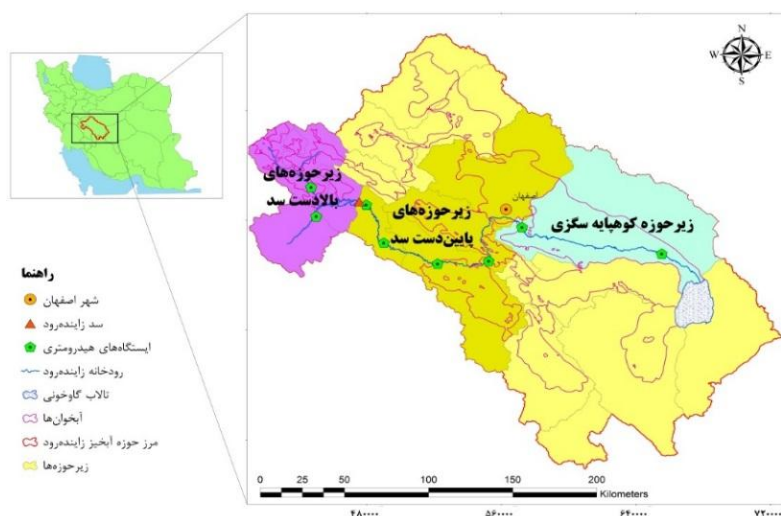
۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه پژوهش

حوزه آبخیز زاینده‌رود (شکل ۱) یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین حوزه‌های آبخیز در ایران است که نقش بسیار حیاتی در تأمین منابع آبی، کشاورزی، صنعت و محیط‌زیستی ایفا می‌کند (Karimi et al., 2018). این حوزه به دلیل ویژگی‌های طبیعی و جغرافیایی منحصر به فرد، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و مدیران منابع طبیعی قرار گرفته است. حوزه آبخیز زاینده‌رود در فلات مرکزی ایران و در محدوده استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری قرار دارد (Rahimi et al., 2023). این حوزه از زردکوه بختیاری در رشته‌کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد و پس از طی مسافتی حدود ۴۰۰ کیلومتر به تالاب گاوخونی در شرق اصفهان می‌ریزد. رودخانه زاینده‌رود به‌عنوان

طولانی‌ترین رودخانه دائمی فلات مرکزی ایران، به طول حدود ۲۰۰ کیلومتر از غرب به شرق استان اصفهان جریان دارد (Eslamian et al., 2010). اقلیم حوزه آبخیز زاینده‌رود به دلیل گستردگی جغرافیایی و تنوع ارتفاعی، بسیار متنوع است (Faramarzi et al., 2009). در بخش‌های غربی و کوهستانی این حوزه که شامل زردکوه بختیاری می‌شود، اقلیمی سرد و مرطوب حاکم است، در حالی که در بخش‌های مرکزی و شرقی، اقلیم گرم و خشک غالبیت دارد. میانگین بارش سالانه در این حوزه متفاوت است و از حدود ۵۰۰ میلی‌متر در مناطق کوهستانی تا کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در مناطق خشک و نیمه‌خشک متغیر است (Rahimi et al., 2024a). این تفاوت‌های اقلیمی موجب تنوع‌زیستی و اکوسیستمی منحصربه‌فردی در این حوزه شده است. رودخانه زاینده‌رود به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب در این حوزه، نقش حیاتی در تأمین آب کشاورزی، صنعتی و شرب دارد (Eslamian et al., 2017). این رودخانه از کوه‌های زاگرس سرچشمه گرفته و در مسیر خود، از مناطق مختلفی مانند فریدن، فلاورجان، نجف‌آباد، خمینی‌شهر و اصفهان عبور می‌کند (Zamani et al., 2019). همچنین، سد زاینده‌رود که در سال ۱۳۴۹ احداث شده است، نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آبی و تنظیم جریان آب رودخانه دارد (Saedpanah et al., 2021). این سد با ظرفیت مفید حدود ۱ میلیارد مترمکعب، تأمین آب کشاورزی و شرب مناطق مختلف را بر عهده دارد (Ebrahimnia & Jafari Bibalan, 2017).

حوزه آبخیز زاینده‌رود با چالش‌های متعددی در زمینه مدیریت منابع آبی مواجه است (Saedpanah et al., 2021). کاهش بارش، تغییرات اقلیمی، افزایش دما و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و سطحی، از جمله مهم‌ترین مشکلات این حوزه به شمار می‌روند. همچنین، تغییرات کاربری زمین، توسعه شهری و صنعتی و آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی نیز تأثیرات منفی بر کیفیت آب و زیست‌بوم این حوزه داشته‌اند (Rahmani Fazli et al., 2022). یکی از مهم‌ترین مسائل محیط‌زیستی حوزه زاینده‌رود، خشک شدن تالاب گاوخونی به دلیل کاهش جریان آب رودخانه و برداشت‌های بی‌رویه است که منجر به کاهش تنوع‌زیستی و ایجاد مشکلات محیط‌زیستی متعدد شده است (Pirali Zefrehei et al., 2023; Rahimi et al., 2024b). این حوزه به دلیل تنوع‌زیستی غنی و اکوسیستم‌های منحصربه‌فرد، زیستگاه بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری است. همچنین، از نظر اقتصادی، زاینده‌رود نقش مهمی در تأمین منابع آب برای کشاورزی و صنعت منطقه ایفا می‌کند. بسیاری از اراضی کشاورزی و باغات استان اصفهان وابسته به آب زاینده‌رود هستند و از این‌رو، مدیریت پایدار منابع آبی این حوزه از اهمیت بالایی برخوردار است (Saedpanah et al., 2021). حوزه آبخیز زاینده‌رود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین حوزه‌های آبخیز ایران، نیازمند توجه ویژه‌ای در زمینه مدیریت منابع آبی و حفاظت از زیست‌بوم‌های طبیعی خود است (Rahimi et al., 2024a). تحلیل و بررسی تغییرات رژیم و تاب‌آوری نظام اجتماعی-اکولوژیک این حوزه می‌تواند به توسعه حکمرانی مؤثر و پایدار کمک کند و به بهبود کیفیت زندگی جوامع محلی و حفظ تنوع زیستی منطقه بیانجامد (Mohajeri et al., 2016).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

۲-۲. روش پژوهش

در این پژوهش به منظور تحلیل وقوع تغییرات رژیم در نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده رود، چهار زیرسیستم آب سطحی، کیفیت آب سطحی، تراز آب زیرزمینی و سطح اراضی کشاورزی به صورت سری زمانی فصلی در بازه ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفتند. این زیرسیستم‌ها با توجه به داده‌های در دسترس متغیرهای کنترلی مورد مطالعه شامل دبی رودخانه، کیفیت رودخانه، تراز چاه‌های پیرومتری در آبخوان‌های مورد مطالعه و سطح اراضی کشاورزی به عنوان حالت این زیرسیستم‌ها جهت بررسی نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده رود انتخاب گردیدند. بدین منظور ابتدا داده‌های مربوط به هر زیرسیستم شامل دبی رودخانه در ۸ ایستگاه هیدرومتری در طول رودخانه زاینده رود و سطح تالاب گاوخونی توسط تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و محاسبه شاخص $NDWI^1$ برای زیرسیستم آب سطحی و شاخص کل جامدات محلول در آب TDS^2 در این ۸ ایستگاه برای زیرسیستم کیفیت آب سطحی، تراز آب ۱۶ آبخوان (آمار چاه‌های پیرومتری) در این حوزه برای زیرسیستم آب زیرزمینی و محاسبه شاخص $NDVI^3$ (تصاویر لندست ۵ و ۷) برای محاسبه سطح اراضی کشاورزی در زیرسیستم کشاورزی در سه منطقه بالادست سد زاینده رود، پایین دست سد تا شهر اصفهان و زیرحوزه کوهپایه- سگری (شرق اصفهان) جمع‌آوری گردیده و به صورت سری زمانی فصلی مرتب گردیدند (Rahimi et al., 2023).

سپس به منظور تحلیل وقوع تغییرات رژیم در این سری‌های زمانی، از روش آزمون t ترتیبی^۴ (Xie et al., 2021) استفاده شد. روش آزمون t ترتیبی برای تحلیل تغییرات رژیم در سری‌های زمانی به کار می‌رود. این روش ابتدا داده‌ها را به دوره‌های مختلف تقسیم کرده و سپس میانگین و واریانس داده‌ها را در هر دوره محاسبه می‌کند (Sumata et al., 2023). با مقایسه این میانگین‌ها از طریق آزمون t ، می‌توان نقاطی که تغییرات معنادار در داده‌ها رخ داده را شناسایی کرد. این ابزار به خصوص در مطالعات هیدرولوژی، اقتصاد و علوم اجتماعی برای شناسایی و تحلیل تغییرات رژیم قابل استفاده است (Rahimi et al., 2024b). این آزمون به دلیل سادگی و توانایی آن در تشخیص تغییرات معنادار بین میانگین‌های دو گروه از داده‌ها، به طور گسترده‌ای در مطالعات مربوط به تغییرات رژیم در حوزه‌های آبخیز، تغییرات اقلیمی و سایر پدیده‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعات هیدرولوژیکی، آزمون t به ویژه در شناسایی تغییرات ناگهانی یا تدریجی در سری‌های زمانی داده‌های جریان رودخانه، بارش و سایر متغیرهای مرتبط با منابع آب استفاده می‌شود. به عنوان مثال، مطالعات متعددی از این روش برای تحلیل تغییرات رژیم جریان رودخانه‌ها در پاسخ به تغییرات اقلیمی یا فعالیت‌های انسانی استفاده کرده‌اند (Xie et al., 2021; Camarero et al., 2022; Sumata et al., 2023; Deng et al., 2023; Rahimi et al., 2024b; Perez et al., 2024). این روش به محققان اجازه می‌دهد تا تغییرات معنادار در میانگین و واریانس داده‌ها را شناسایی کنند، که این امر برای درک رفتار سیستم‌های طبیعی و مدیریت منابع آب حیاتی است. علاوه بر این، آزمون t ترتیبی که در این تحقیق استفاده شده است، به دلیل توانایی آن در تقسیم داده‌ها به دوره‌های مختلف و مقایسه میانگین‌ها در هر دوره، ابزار مناسبی برای تحلیل تغییرات رژیم در سری‌های زمانی طولانی مدت است. این روش به ویژه در مطالعاتی که به دنبال شناسایی نقاط تغییر در رفتار سیستم‌های طبیعی هستند، بسیار مفید است (Rahimi et al., 2024b). همچنین مقدار آستانه وقوع تغییر رژیم نیز با محاسبه میانگین متحرک سالانه برای هر سری زمانی مورد مطالعه محاسبه شد (Rahimi et al., 2023). برای محاسبه آستانه‌های تغییر رژیم، میانگین متحرک داده‌های سری زمانی در بازه‌های ۸ تا ۳۲ فصل (بسته به شدت تغییر رژیم) محاسبه شد. سپس با روش سعی و خطا، عدد آستانه (T) تعیین گردید تا نقاط تغییر رژیم شناسایی شوند. اگر میانگین متحرک داده‌ها از T بیشتر باشد، رژیم ۱ غالب است و اگر کمتر باشد، رژیم ۲ غالب می‌شود که نشان‌دهنده وقوع تغییر رژیم است (Rahimi et al., 2023). پس از شناسایی تغییرات رژیم و آستانه‌های بحرانی محاسبه شده در هر سری زمانی مورد مطالعه، به منظور کاربرد استعاره گوی در حوضچه، ابتدا عمق هر حوضچه که نشان‌دهنده میزان تاب‌آوری سیستم مورد نظر در رژیم غالب خود است محاسبه شد. به منظور محاسبه عمق حوضچه از معادله رابطه ۱ استفاده گردید:

1. Normalized Difference Water Index
2. Total Dissolved Solids
3. Normalized Difference Vegetation Index
4. Sequential t-test

$$DB_{Ra} = \text{Average}(x_i - \bar{x}_{Ra})$$

رابطه (۱)

که در آن DB_{Ra} عمق حوضچه در رژیم a ، x_i مقدار عددی مشاهده شده از سری زمانی مورد بررسی و $\bar{x}_{Ra}$ میانگین حسابی سری زمانی مورد مطالعه در رژیم a بوده است (Van Woessik, 2013; Dakos and Kéfi, 2022; Olsson and Moore, 2024). بدین ترتیب عمق حوضچه برای هر رژیم شناسایی شده محاسبه گردیده و سپس با تفریق آن از مقدار آستانه بحرانی، عمق نهایی حوضچه در هر رژیم شناسایی شده جهت نمایش بر روی نمودار محاسبه گردید. همچنین جایگاه قرارگیری گوی در حوضچه موردنظر، با در نظر گرفتن میانگین حسابی هر رژیم و جهت حرکت آن به صورت مفهومی مشخص گردید. در نهایت برای هر زیرسیستم مورد مطالعه، نمودارهای استعاره گوی در حوضچه به صورت عددی ترسیم گردیده و همچنین یک نمودار کلی نیز با محاسبه میانگین اعداد برای کل حوزه آبخیز زاینده رود در هر چهار زیرسیستم مورد مطالعه ترسیم و تحلیل گردید. نمودار گوی در حوضچه برای نمایش مفاهیم تاب‌آوری و تغییر رژیم در سیستم‌های پیچیده مانند سیستم‌های محیط‌زیستی یا هیدرولوژیکی استفاده شد. این نمودار از میان نمودارهای رایج انتخاب شد، زیرا توانایی نمایش بصری تاب‌آوری (عمق حوضچه)، تغییر رژیم (حرکت گوی به حوضچه دیگر) و پایداری سیستم (شکل حوضچه و موقعیت گوی) را دارد. این ویژگی‌ها باعث می‌شود نمودار گوی و حوضچه برای تحلیل پویایی سیستم‌ها و تغییرات رژیم مناسب باشد.

۳. یافته‌ها

نتایج مربوط به شناسایی وقوع تغییرات رژیم نشان داد که در زیرسیستم آب سطحی، تنها در دو ایستگاه بالادست رودخانه زاینده رود یعنی ایستگاه اسکندری و قلعه شاهرخ تغییری رژیمی در جریان رودخانه شناسایی نشده است. در پنج ایستگاه دیگر، یک بار و در ایستگاه پل کله دو بار، تغییر رژیم در سری زمانی جریان آب سطحی مورد مطالعه شناسایی شد. تحلیل سری زمانی سطح تالاب گاوخونی نیز نشان‌دهنده وقوع تغییر رژیم در این تالاب بوده است. در زیرسیستم کیفیت آب سطحی نیز در سه ایستگاه بالادست رودخانه شامل ایستگاه اسکندری، قلعه شاهرخ و سد تنظیمی زاینده رود، تغییر رژیمی شناسایی نشد؛ اما در ۵ ایستگاه دیگر تحلیل سری زمانی کل جامدات محلول در جریان آب رودخانه حداقل یک بار دچار تغییر رژیم بوده‌اند.

نتایج این تحلیل‌ها برای زیرسیستم آب زیرزمینی نشان‌دهنده وقوع تغییر رژیم در تمامی آبخوان‌های مورد بررسی (۱۶ آبخوان) در کل حوزه بوده است، به طوری که حداقل دو و حداکثر چهار بار در سری زمانی تراز آب زیرزمینی آبخوان‌های مورد مطالعه تغییر رژیم مشاهده شده است. تمامی این تغییرات رژیم به صورت تغییر به تراز آب پایین‌تر (افت سطح ایستابی) مشاهده شده است. این در حالی است که تحلیل سری زمانی سطح اراضی کشاورزی نیز در سه منطقه بالادست سد زاینده رود، پایین‌دست سد تا شهر اصفهان و شرق اصفهان نیز نشان‌دهنده وقوع تغییر رژیم در این داده‌ها بوده است، با این تفاوت که در بالادست سد میزان اراضی کشاورزی افزایش یافته و در دو منطقه دیگر سطح اراضی کشاورزی کاهش یافته است. در جدول ۱ نتایج مربوط به آستانه‌های شناسایی شده برای هر سری زمانی مورد مطالعه ارائه گردیده است.

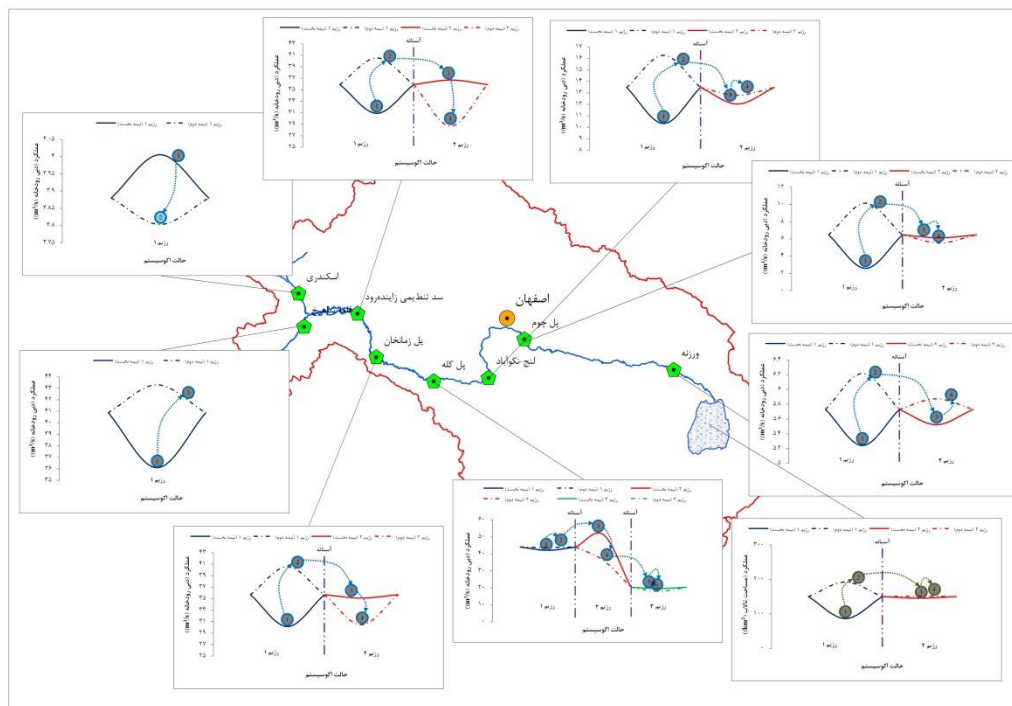
پس از شناسایی تغییرات رژیم در زیرسیستم‌های مورد مطالعه و محاسبه آستانه‌های این تغییرات رژیم، به منظور آشکارسازی این تغییرات در تمامی داده‌ها اقدام به محاسبه عمق حوضچه‌ها در هر رژیم شناسایی شده گردید. همچنین عملکرد سیستم در هر رژیم (حالت سیستم) نیز به عنوان جایگاه گوی در حوضچه مدنظر قرار گرفته و وضعیت تغییر جایگاه آن در طول زمان مشخص گردید. بدین ترتیب در شکل ۲، تغییرات رژیم در زیرسیستم آب سطحی در ایستگاه‌های مورد مطالعه و تالاب گاوخونی در قالب استعاره گوی در حوضچه ترسیم شده است. نتایج نشان داد که در دو ایستگاه بالادست حوزه یعنی ایستگاه اسکندری و قلعه شاهرخ که تغییر رژیمی شناسایی نشد، تغییر در عمق حوضچه، یعنی تغییر در میزان تاب‌آوری سیستم جریان آب سطحی در دو ایستگاه در دو دوره نیمه نخست و نیمه دوم رژیم غالب آن‌ها به صورت متفاوت تغییر نموده‌اند. به طوری که در ایستگاه اسکندری، که حجم رواناب کمتری نیز نسبت به ایستگاه قلعه شاهرخ دارد، در نیمه نخست رژیم غالب خود دارای تاب‌آوری کمی بوده (خط آبی)، اما در نیمه دوم رژیم غالب خود تاب‌آوری آن افزایش یافته (خط نقطه چین آبی)، به این معنی که جریان سطحی در این ایستگاه به سمت پایداری رفته است. اما در ایستگاه قلعه شاهرخ که حجم رواناب خیلی

بیشتری نسبت به ایستگاه اسکندری داشته و در تغذیه جریان آب رودخانه زاینده رود نقش مهم‌تری دارد، شرایط متفاوت بوده و در نیمه نخست رژیم غالب خود، تاب‌آوری به میزان قابل توجهی بوده است، در حالی که در نیمه دوم رژیم غالب خود تاب‌آوری آن به شدت کاهش پیدا کرده و عمق حوضچه به حالت برعکس درآمده است. این شرایط می‌تواند نشان‌دهنده آمادگی این سری زمانی به تغییر رژیم به حالتی دیگر باشد.

جدول ۱. آستانه‌های شناسایی شده برای زیرسیستم‌های مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق)

زیرسیستم	ایستگاه	آستانه	زیرسیستم	آبخوان/زیرحوزه	آستانه
سطحی (بی (m ³ /s))	اسکندری	بدون تغییر رژیم	زیرزمینی (آب از آب زیرزمینی (m))	اسفنداران	-۱۳/۸۴، -۱۴/۷، -۱۵/۴
	قلعه شاهرخ	بدون تغییر رژیم		اصفهان-برخوار	-۴۵/۱۱، -۴۸/۲، -۵۱/۴۲
	سد تنظیمی زاینده رود	۳۵/۹۲		بوئین-میاندشت	-۱۶/۴۶، -۱۷/۶۵، -۲۱/۴
	پل زمانخان	۳۵/۶۸		چادگان	-۲۵/۲۱، -۲۹/۲۶، -۳۵/۶۶
	پل کله	۲۰/۳۰، ۴۴/۰۲		چهل خانه	-۱۷/۳۷، -۲۰/۶۶
	لنج-نکوآباد	۱۳/۴۷		دامنه-داران	-۲۰/۳۰، -۳۱/۹۳، -۴۱/۷۷
	پل چوم	۶/۴۸		علویچه-دهق	-۲۷/۴۴، -۳۳/۳۱، -۳۷/۳۸، -۴۲/۸
	ورزنه	۵/۷۳		قمشه	-۳۰/۶۶، -۳۱/۸۷، -۳۴/۷۸
	سطح تالاب گاوخونی	۱۵۰/۴۸		کرون	-۱۲/۸۵، -۱۶/۴۲، -۲۲/۴۱
	اسکندری	بدون تغییر رژیم		کوهپایه-سگری	-۱۴/۱۴، -۱۶/۳۷، -۱۸/۴۳
کفیت سطحی (TDS (mg/l))	قلعه شاهرخ	بدون تغییر رژیم	کشاورزی (کشاورزی (سطح اراضی (km ²))	لنجانان	-۱۷/۵۳، -۲۱/۶۴
	سد تنظیمی زاینده رود	بدون تغییر رژیم		مورچه خورت	-۳۸/۳۷، -۴۳/۵۳، -۴۷/۶۲، -۵۲/۴۶
	پل زمانخان	۲۲۳/۲۶		مهیاری جنوبی	-۴۷/۲۴، -۵۰/۶۹، -۵۳/۵۴، -۵۷/۱۴
	پل کله	۲۹۹/۶۱		مهیاری شمالی	-۹۷/۷۵، -۱۰۱/۴۴، -۱۰۶/۶۲
	لنج-نکوآباد	۵۶۲/۱۲		میمه	-۵۴/۱۲، -۵۶/۱۷، -۵۷/۴۲، -۵۹/۵۶
	پل چوم	۲۲۳/۲۶		نجف آباد	-۲۵/۱۷، -۳۱/۱۵، -۴۰/۲۰
	ورزنه	۱۳۴۳۴/۸۸		بالادست سد	۴۵۹/۷۷
				پایین دست سد تا شهر	۹۱۰/۲۵
				اصفهان	
				شرق اصفهان	۲۵۷/۷۸، ۳۹۶/۲۵

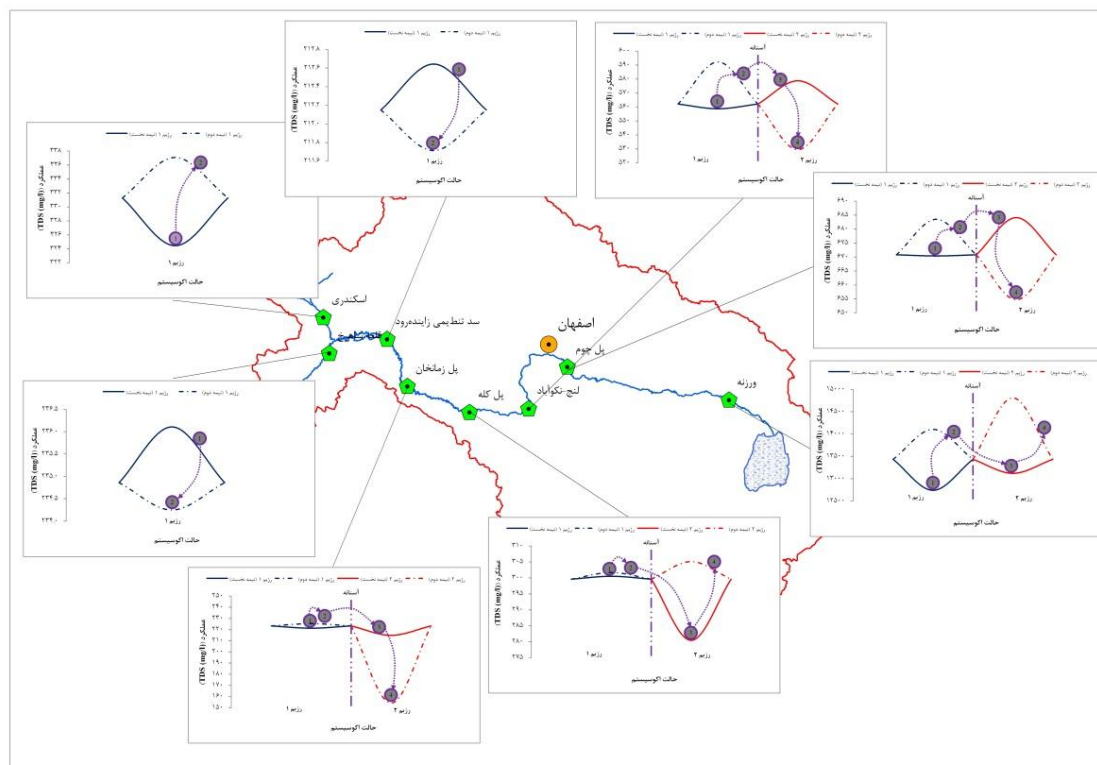
در ایستگاه‌های پایین دست سد زاینده رود شرایط متفاوت بوده و در تمامی ایستگاه‌ها تغییر رژیم مشاهده شده است. به طوری که در تمامی ایستگاه‌ها در رژیم اولیه خود، ابتدا عمق حوضچه (تاب‌آوری سیستم) به میزان مناسبی بوده، اما در ادامه رژیم نخست تاب‌آوری سیستم کاهش یافته است. در نتیجه تغییر رژیم در سیستم جریان آب سطحی در تمامی ایستگاه‌ها به صورت مشابهی رخ داده است (تغییر رژیم از جریان رودخانه دائمی به جریان رودخانه فصلی). به طوری که در نیمه نخست رژیم اول (خط آبی)، تاب‌آوری زیاد بوده، اما در نیمه دوم رژیم اول (خط نقطه چین آبی) تاب‌آوری کاهش یافته و در نتیجه گوی به حوضچه دوم، یعنی رژیم غالب دوم افتاده است. نیمه نخست و نیمه دوم رژیم در رژیم غالب دوم در ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت متفاوت عمل کرده است. به طوری که در بعضی ایستگاه‌ها، نیمه نخست رژیم دوم (خط آبی) دارای تاب‌آوری کمی بوده و در نیمه دوم رژیم (خط نقطه چین آبی) تاب‌آوری افزایش یافته است. اما در بعضی ایستگاه‌های دیگر برعکس بوده و ابتدا تاب‌آوری زیاد و سپس تاب‌آوری کاهش یافته است. این شرایط نشان‌دهنده این است که امکان وقوع تغییر رژیم دیگری در این ایستگاه‌ها همان طور که در ایستگاه پل کله قابل مشاهده است، وجود دارد. این مهم را می‌توان سیگنال هشدار اولیه وقوع تغییر رژیم در این سیستم معرفی کرد. این فرآیند در سیستم تالاب گاوخونی نیز که در پایین دست ترین نقطه حوزه قرار دارد قابل مشاهده است. تغییر رژیم در سیستم تالاب گاوخونی از نوع تغییر رژیم تالاب فصلی به تالاب کاملاً خشک بوده است.



شکل ۲. نمودارهای گوی در حوضچه تغییرات رژیم جریان آب سطحی حوزه آبخیز زاینده‌رود (منبع: یافته‌های تحقیق)

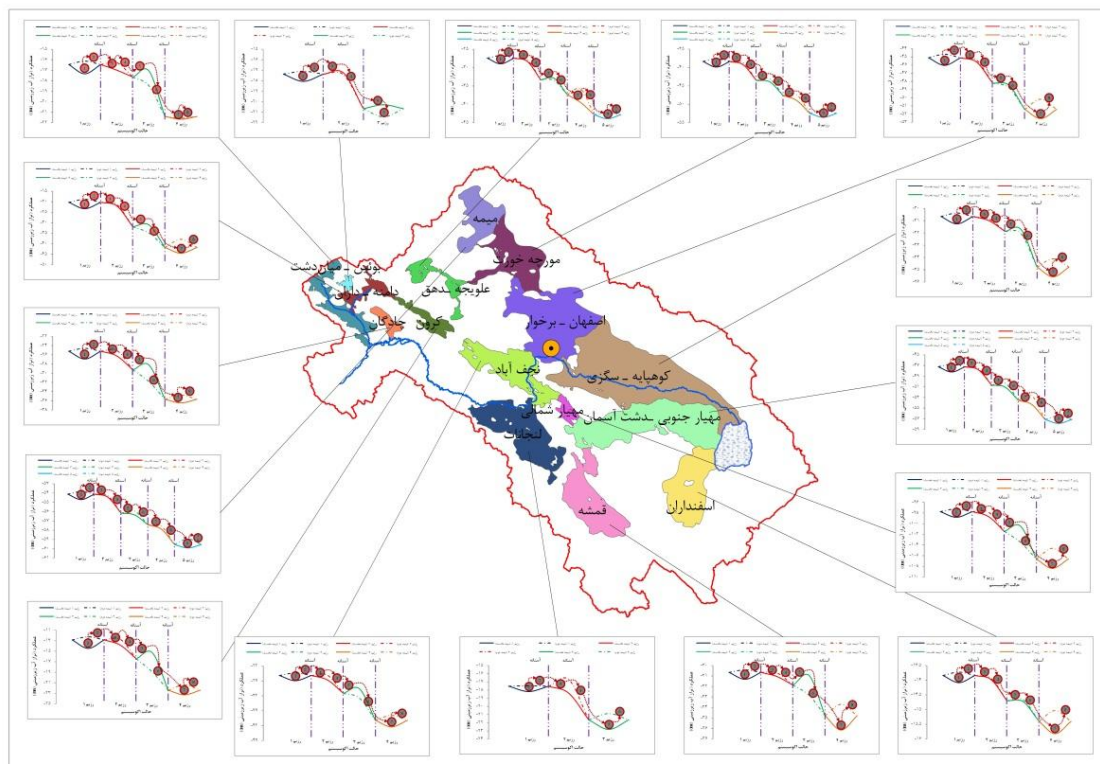
همانند سیستم جریان آب سطحی، در سیستم کیفیت آب سطحی نیز در سه ایستگاه بالادست حوزه آبخیز زاینده‌رود تغییر رژیمی قابل مشاهده نبود (شکل ۳). اما تغییر در میزان تاب‌آوری در هر سه این ایستگاه‌ها رخ داده است، به‌طوری‌که در دو ایستگاه قلعه شاهرخ و سد تنظیمی زاینده‌رود عمق حوضچه در نیمه دوم رژیم غالب (تاب‌آوری آن) افزایش یافته، اما در ایستگاه اسکندری برعکس بوده و تاب‌آوری کاهش یافته است. در پنج ایستگاه دیگر در طول رودخانه زاینده‌رود تغییر از رژیم غالب کیفیت مناسب آب رودخانه به کیفیت نامناسب آب رودخانه رخ داده است. به‌طوری‌که در تمامی این پنج ایستگاه، در رژیم ابتدایی فرسایش تاب‌آوری مشهود بوده و در نتیجه گوی به سمت رژیم غالب دوم حرکت کرده است. در ایستگاه‌های پل زمان‌خان، لنج-نکوباد و پل چوم در نیمه دوم رژیم غالب دوم افزایش تاب‌آوری رخ داده، به‌طوری‌که گوی به سمت عمق بیشتری حرکت نموده و پایداری سیستم در این رژیم را نشان می‌دهد. اما در دو ایستگاه پل‌کله و ورزنه شرایط متفاوت عمل نموده و تاب‌آوری در نیمه دوم رژیم غالب دوم کاهش یافته و در نتیجه با توجه به سری زمانی، تغییر رژیم دیگری در این دو ایستگاه قابل انتظار است.

در شکل ۴، تغییرات رژیم در سیستم آب زیرزمینی و تحلیل سری‌های زمانی تراز آب زیرزمینی در ۱۶ آبخوان مورد مطالعه در حوزه آبخیز زاینده‌رود ارائه شده است. نتایج نشان داد که در تمامی آبخوان‌های مورد مطالعه در پهنه حوزه آبخیز زاینده‌رود تغییرات از رژیم غالب آبخوان با سطح ایستابی بالا به رژیم غالب آبخوان با سطح ایستابی عمیق‌تر رخ داده است. به‌طوری‌که در تمامی این آبخوان‌ها این حداقل دو و حداکثر چهار بار تغییر رژیم قابل مشاهده است. در تمامی آبخوان‌ها، در رژیم ابتدایی کاهش تاب‌آوری سیستم مشاهده گردیده و در نتیجه گوی به حوضچه دوم (رژیم دوم) منتقل شده است. این فرآیند ادامه داشته و با فرسایش مجدد تاب‌آوری در رژیم‌های جایگزین، تغییر رژیم سوم و چهارم نیز در برخی آبخوان‌ها مشاهده شده است. این در حالی است که در رژیم غالب انتهایی نیز افت تاب‌آوری رخ داده و در نتیجه امکان رخ دادن تغییر رژیم مجدد در این آبخوان‌ها دور از انتظار نیست.

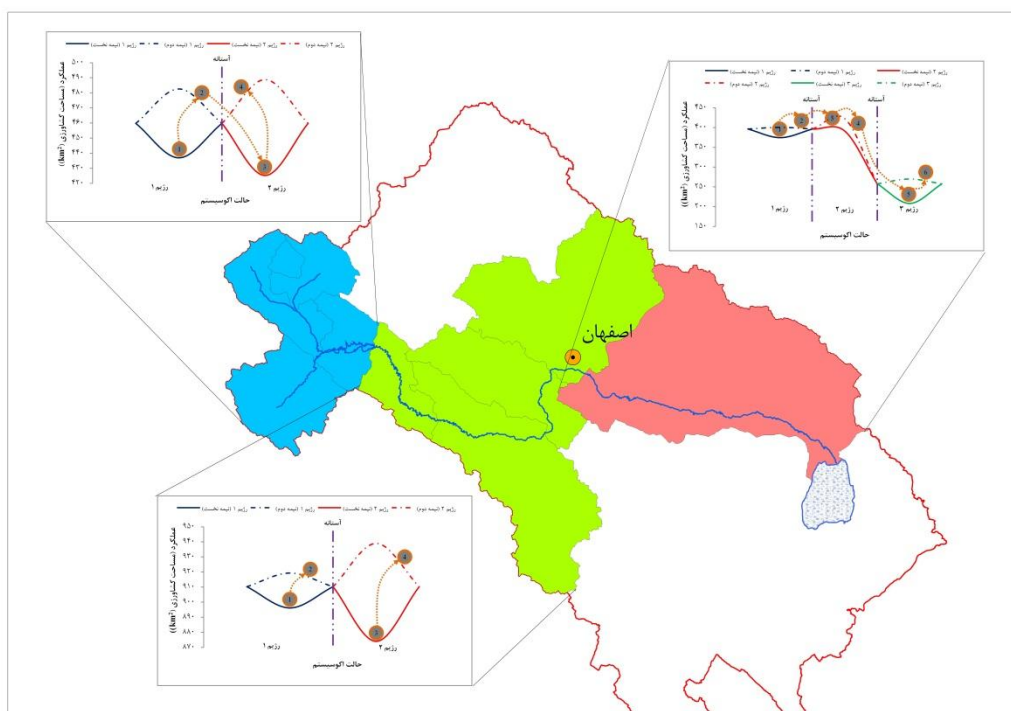


شکل ۳. نمودارهای گوی در حوضچه تغییرات رژیم کیفیت آب سطحی حوزه آبخیز زاینده‌رود (منبع: یافته‌های تحقیق)

نتایج مربوط به بررسی سری زمانی سطح اراضی کشاورزی (شکل ۵) نیز نشان داد که در سیستم کشاورزی منطقه بالادست سد زاینده‌رود (تغییر رژیم مشاهده شده از نوع افزایش سطح اراضی کشاورزی)، با فرسایش تاب‌آوری در رژیم غالب نخست، گوی (حالت سیستم) به رژیم غالب دوم انتقال یافته است. در رژیم غالب دوم نیز نتایج نشان داد که در طول زمان (نیمه دوم رژیم غالب)، افت تاب‌آوری مجدد رخ داده و با توجه به سری زمانی سطح اراضی کشاورزی بالادست سد، می‌توان انتظار بازگشت به رژیم نخستین را داشت. در منطقه پایین‌دست سد زاینده‌رود تا شهر اصفهان (تغییر رژیم مشاهده شده از نوع کاهش سطح اراضی کشاورزی) نیز تغییر رژیم با افت تاب‌آوری در رژیم نخست روی داده است. اما در رژیم دوم، با آن‌که افت تاب‌آوری مجدداً قابل مشاهده بوده است، اما روند موجود در سری زمانی سطح اراضی کشاورزی این منطقه نشان‌دهنده حرکت گوی (حالت سیستم) به رژیم سوم (یعنی افت بیشتر سطح اراضی کشاورزی) بوده است. به‌طوری‌که این امر در منطقه شرق اصفهان (زیرحوزه کوهپایه-سگری) قبلاً رخ داده (تغییر رژیم مشاهده شده از نوع کاهش سطح اراضی کشاورزی) و دو رژیم ابتدایی، با افت تاب‌آوری تغییر نموده‌اند و در حال حاضر رژیم سوم قابل مشاهده است. این در حالی است که در رژیم سوم نیز فرسایش تاب‌آوری سیستم قابل مشاهده بوده و در نتیجه می‌توان انتظار افت تغییر رژیم دیگری در این منطقه به‌صورت افت مجدد سطح اراضی کشاورزی را داشت.

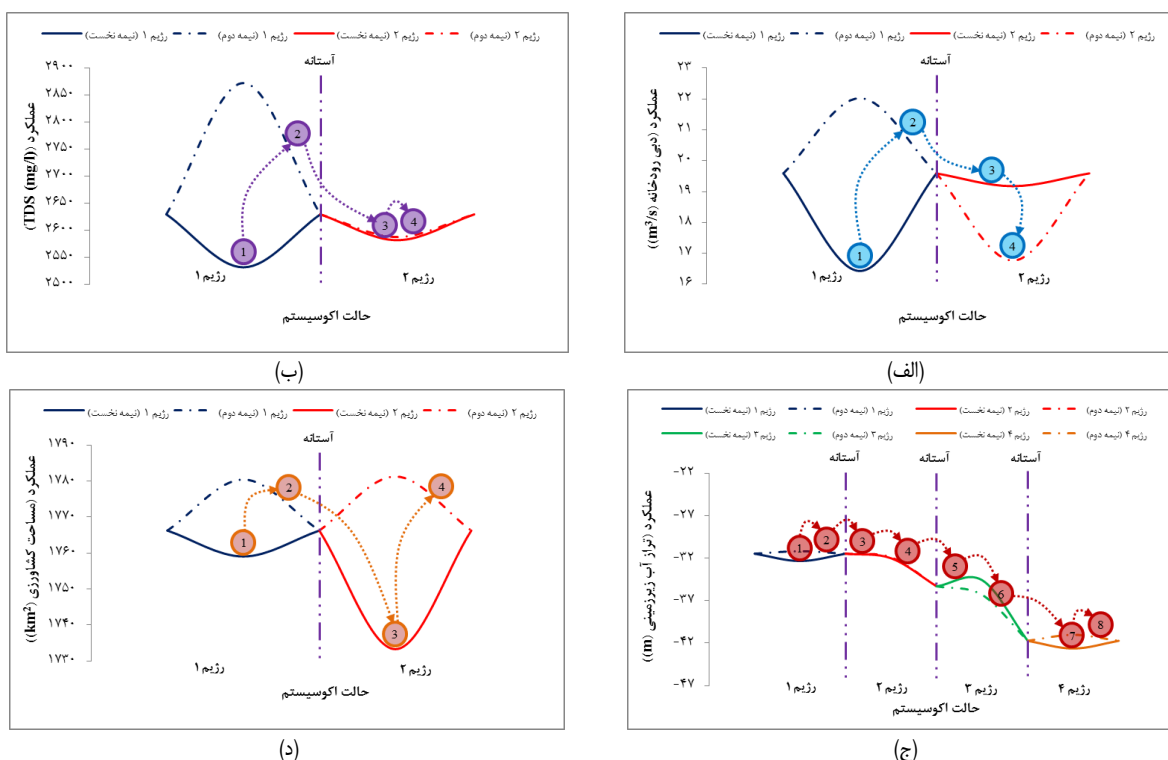


شکل ۴. نمودارهای گوی در حوضچه تغییرات رژیم تراز آب زیرزمینی حوزه آبخیز زاینده‌رود (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۵. نمودارهای گوی در حوضچه تغییرات رژیم سطح اراضی کشاورزی حوزه آبخیز زاینده‌رود (منبع: یافته‌های تحقیق)

اما اگر بخواهیم نتایج مربوط به تغییرات رژیم در چهار سیستم مورد مطالعه در کل حوزه آبخیز زاینده‌رود را بررسی کنیم، نتایج کاربرد استعاره گوی در حوضچه به صورت شکل ۶ قابل مشاهده است. به طوری که در شکل ۶ (الف) وضعیت گوی در حوضچه در دو رژیم غالب در سیستم آب سطحی کل حوزه آبخیز زاینده‌رود مشخص گردیده است. در این سیستم رژیم نخستین با افت تاب‌آوری (افت عمق حوضچه) روبه‌رو بوده و در نتیجه گوی به حوضچه دوم (رژیم دوم) انتقال یافته است. در رژیم دوم نیز ابتدا تاب‌آوری سیستم کم بوده، اما در طول زمان تاب‌آوری افزایش یافته و در نتیجه می‌توان انتظار ادامه رژیم غالب کنونی (جریان رودخانه فصلی و تالاب گاوخونی خشک) را داشت. در شکل ۶ (ب) سیستم کیفیت آب سطحی در استعاره گوی و حوضچه برای کل حوزه آبخیز زاینده‌رود ترسیم گردیده است. به طوری که در این سیستم نیز همانند سیستم قبلی، رژیم ابتدایی با افت تاب‌آوری همراه بوده و تغییر به رژیم دوم یعنی کیفیت آب نامناسب رخ داده است. در رژیم دوم نیز میزان تاب‌آوری تغییر زیادی نداشته، در نتیجه می‌توان انتظار ادامه رژیم غالب کنونی (کیفیت آب نامناسب) را داشت. در شکل ۶ (ج) سیستم آب زیرزمینی در استعاره گوی و حوضچه برای کل حوزه آبخیز زاینده‌رود مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد افت تاب‌آوری سیستم در تمامی رژیم‌های غالب مشاهده شده باعث تغییر به رژیم بعدی شده و به همین ترتیب در رژیم مشاهده شده انتهای نیز افت تاب‌آوری مشهود بوده و می‌توان انتظار تغییر رژیم دیگری (افت تراز آب زیرزمینی) را در این سیستم در طول زمان داشت. نتایج شکل ۶ (د) نیز تغییرات رژیم در سیستم سطح اراضی کشاورزی در کل حوزه آبخیز زاینده‌رود را نشان داد. به طوری که تغییر رژیم مشاهده شده در کل حوزه به صورت افت سطح اراضی کشاورزی بوده و همانند سیستم‌های دیگر فرسایش تاب‌آوری در رژیم نخست باعث تغییر به رژیم دوم شده است. در رژیم دوم نیز ابتدا تاب‌آوری قابل توجهی مشهود بوده است، اما در نیمه دوم این رژیم، تاب‌آوری کاهش یافته و در نتیجه می‌توان انتظار تغییر رژیم دیگری به رژیم با سطح اراضی کشاورزی کمتر در کل این حوزه را داشت.



شکل ۶. نمودارهای گوی در حوضچه و آشکارسازی تغییرات رژیم در کل حوزه آبخیز زاینده‌رود: (الف) جریان آب سطحی، (ب) کیفیت آب سطحی، (ج) تراز آب زیرزمینی، (د) سطح اراضی کشاورزی (منبع: یافته‌های تحقیق)

۴. بحث

تغییرات رژیم در نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک (SES) به‌ویژه در حوزه آبخیز زاینده‌رود، موضوعی است که به دلیل تأثیرات عمیق آن

بر اکوسیستم‌ها و جوامع محلی، نیاز به تحلیل دقیق و جامع دارد. این تغییرات ناشی از تعامل پیچیده‌ای بین عوامل انسانی و طبیعی است. تغییرات رژیم در حوزه آبخیز زاینده‌رود به‌طور عمده ناشی از فعالیت‌های انسانی است. با افزایش جمعیت و رشد سریع شهرنشینی در اطراف زاینده‌رود، تقاضا برای منابع آبی به‌شدت افزایش یافته است. از دهه ۱۹۵۰ به بعد، برداشت بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی به یک رویه رایج تبدیل شده است. این امر نه تنها باعث کاهش جریان آب سطحی شده بلکه کیفیت آب را نیز تحت تأثیر قرار داده است. بر اساس نتایج مطالعه رحیمی و همکاران (۲۰۲۳)، شواهدی از کاهش معنادار جریان آب سطحی در ۸ ایستگاه هیدرومتری در حوزه آبخیز زاینده‌رود مشاهده شده که نشان‌دهنده تأثیر منفی فعالیت‌های انسانی بر منابع آبی و زیست‌بوم منطقه است (Rahimi et al., 2023). به‌طور خاص، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب برای کشاورزی، ایجاد سدها، تغییر کاربری زمین و توسعه صنعتی از جمله عواملی هستند که به شدت بر اکوسیستم زاینده‌رود تأثیر گذاشته‌اند. این فعالیت‌ها نه تنها منجر به کاهش جریان آب می‌شوند بلکه باعث آلودگی منابع آبی نیز می‌گردند. برای مثال، افزایش استفاده از کودهای شیمیایی و سموم در کشاورزی، کیفیت آب را تحت تأثیر قرار داده و به آلودگی‌های محیط‌زیستی منجر شده است (Rahimi et al., 2024a).

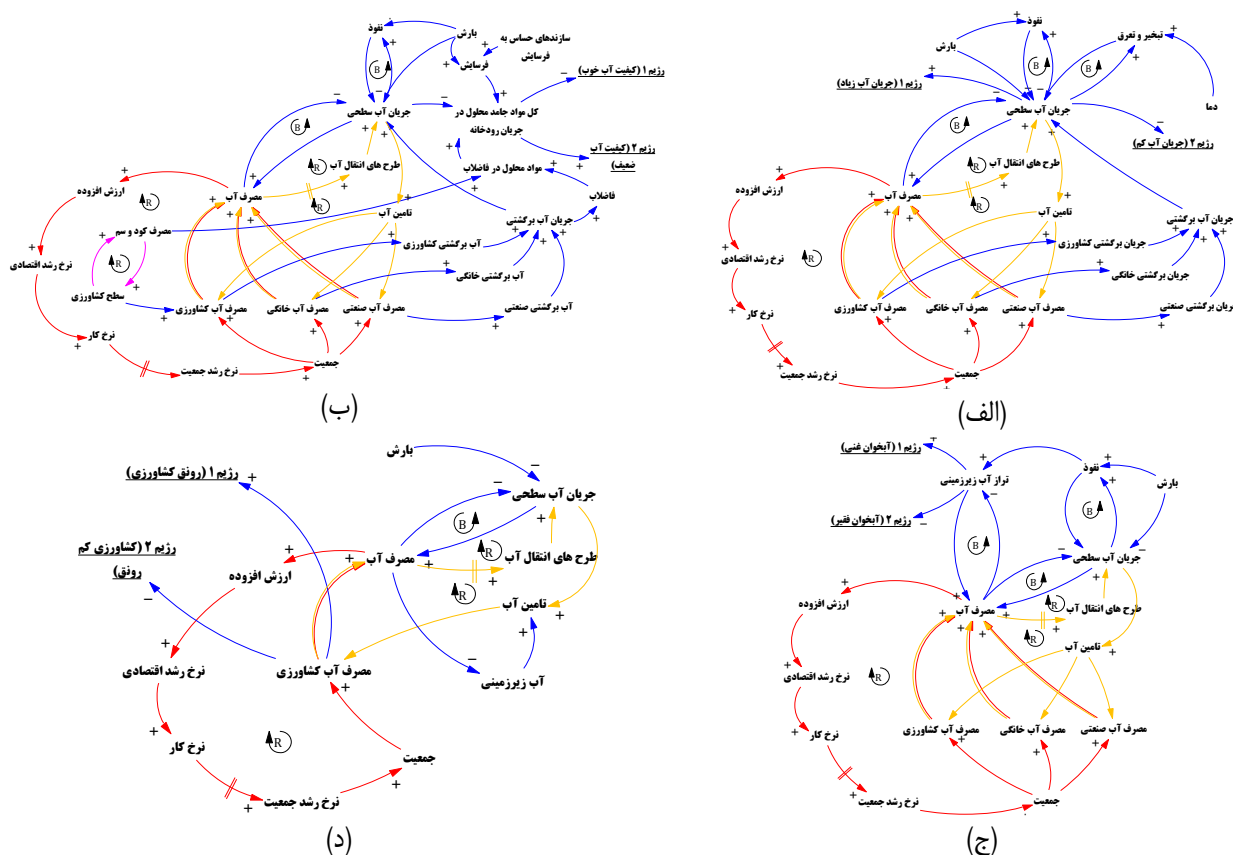
علاوه بر فعالیت‌های انسانی، تغییرات اقلیمی نیز به‌عنوان یک عامل کلیدی در وقوع تغییرات رژیم شناخته می‌شود. افزایش دما و کاهش بارندگی‌های سالانه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، تأثیر مستقیمی بر منابع آبی دارد. خشکسالی‌های مکرر که در سال‌های اخیر مشاهده شده، باعث کاهش سطح آب زیرزمینی و افت کیفیت آب شده‌اند (Wang et al., 2024). این شرایط می‌تواند به کاهش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها منجر شود و باعث گردد که سیستم‌های آبی به‌راحتی از یک حالت پایدار به حالت دیگر منتقل شوند. تحقیقات نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌توانند اثرات مضاعفی بر وضعیت منابع آبی داشته باشند؛ به‌عنوان مثال، وقوع بارش‌های شدید در برخی سال‌ها ممکن است باعث سیلاب‌ها شود که خود تهدیدی برای زیرساخت‌ها و اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود. همچنین، نوسانات شدید در الگوهای بارندگی می‌تواند باعث ایجاد عدم قطعیت در تأمین آب برای کشاورزی شود که خود منجر به مشکلات اقتصادی برای جوامع محلی خواهد شد (Zhao et al., 2023).

شکل ۷ که نمودار علت و معلولی تغییرات رژیم را نشان می‌دهد، نمایانگر حلقه‌های بازخورد غالب در نظام اجتماعی-اکولوژیک زاینده‌رود است. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه افزایش تقاضا برای آب ناشی از رشد جمعیت و توسعه کشاورزی می‌تواند منجر به کاهش جریان آب سطحی شود. این کاهش جریان آب نه تنها تأثیر منفی بر کیفیت آب دارد بلکه باعث افت تراز آب زیرزمینی نیز می‌شود. در نتیجه، کشاورزان برای جبران کمبود آب، بیشتر به برداشت از منابع زیرزمینی روی می‌آورند که این امر خود باعث تسریع در فرسایش منابع آبی می‌شود. حلقه‌های بازخورد تقویتی می‌توانند منجر به ایجاد نقاط آستانه شوند که اگر از آن‌ها عبور کنیم، تغییرات رژیم غیرقابل بازگشت خواهند بود. شناخت این نقاط آستانه بسیار مهم است زیرا می‌تواند به مدیران کمک کند تا راهبردهای مؤثری برای جلوگیری از وقوع تغییرات غیرقابل بازگشت اتخاذ کنند (Martin et al., 2020).

یکی دیگر از جنبه‌های مهم در تحلیل تغییرات رژیم، فرسایش تاب‌آوری اکوسیستم‌هاست. تاب‌آوری به معنای توانایی یک سیستم برای تحمل شوک‌ها و بازیابی از تغییرات است. با کاهش تاب‌آوری، سیستم ممکن است با نیروی کمتری از یک حوضچه به حوضچه‌ای دیگر منتقل شود؛ بنابراین، شناخت عوامل مؤثر بر تاب‌آوری بسیار حائز اهمیت است (Pelletier et al., 2020). فرسایش تاب‌آوری معمولاً ناشی از ترکیب عوامل مختلفی مانند فعالیت‌های انسانی نامناسب، تغییرات اقلیمی و عدم مدیریت صحیح منابع طبیعی است. این فرسایش می‌تواند موجب شود که سیستم نتواند به حالت پایدار قبلی خود بازگردد و دچار تغییرات دائمی گردد. شناسایی تغییرات رژیم و تحلیل آن‌ها نه تنها برای مدیریت منابع آبی بلکه برای حفاظت از تنوع‌زیستی نیز حیاتی است. با توجه به این که زاینده‌رود یکی از مهم‌ترین منابع آبی ایران محسوب می‌شود، هرگونه تغییر در وضعیت آن می‌تواند عواقب جدی برای اکوسیستم‌ها و جوامع محلی داشته باشد (Hamidifar, 2024). بنابراین، تحلیل دقیق وضعیت کنونی سیستم با استفاده از ابزارهایی مانند استعاره گوی در حوضچه می‌تواند کمک شایانی به فهم بهتر وضعیت موجود کند.

استعاره گوی در حوضچه نمایانگر وضعیت کنونی سیستم است؛ هر حوضچه نماد یک حالت پایدار است که سیستم ممکن است در آن باقی بماند یا با ورود شوک‌های کافی از آن خارج شود. این مفهوم کمک می‌کند تا بفهمیم چگونه مداخلات یا شوک‌ها می‌توانند سیستم

را تحت تأثیر قرار دهند و موجب انتقال آن از یک حالت پایدار به حالت دیگر شوند (Radosavljevic et al., 2023). با استفاده از داده‌های سری زمانی مربوط به جریان آب سطحی، کیفیت آب، تراز آب زیرزمینی و سطح اراضی کشاورزی، عمق هر حوضچه محاسبه شد. این عمق نشان‌دهنده میزان تاب‌آوری سیستم در رژیم غالب خود بوده است. به‌منظور محاسبه عمق حوضچه، معادله‌ای طراحی شد که میانگین مقادیر مشاهده شده را با میانگین کلی مقایسه می‌کند. سپس با تفریق عمق حوضچه از مقدار آستانه بحرانی، عمق نهایی حوضچه برای هر رژیم شناسایی شده محاسبه گردید. این اطلاعات به ترسیم نمودارهای استعاره گوی در حوضچه کمک کرد که تغییرات رژیم شناسایی شده را به‌صورت مکانی تصویرسازی کنند.



شکل ۷. نمودار علت و معلولی تغییرات رژیم در حوزه آبخیز زاینده‌رود؛ (الف) جریان آب سطحی، (ب) کیفیت آب سطحی، (ج) تراز آب زیرزمینی، (د) سطح اراضی کشاورزی (منبع: برگرفته از Rahimi et al., 2023)

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق، نتایج حاصل از استفاده از استعاره گوی در حوضچه نشان داد که تغییرات رژیم در زیرسیستم‌های مختلف زاینده‌رود به‌وضوح قابل شناسایی و تحلیل هستند. به‌عنوان مثال، در زیرسیستم آب سطحی، تغییرات معناداری در جریان آب در ایستگاه‌های مختلف شناسایی شد. همچنین، نتایج نشان داد که در زیرسیستم کیفیت آب نیز تغییرات قابل توجهی وجود دارد که با افزایش آلودگی‌ها و کاهش کیفیت آب همراه است. استفاده از استعاره گوی در حوضچه به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا نقاط آستانه بحرانی را شناسایی کنند که می‌تواند به‌عنوان نقاط هشدار برای مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. این نقاط آستانه، نمایانگر شرایطی هستند که اگر سیستم از آن‌ها عبور کند، ممکن است به تغییرات غیرقابل بازگشت دچار شود. کاربرد استعاره گوی در حوضچه نه تنها به تحلیل دقیق‌تر وضعیت کنونی زاینده‌رود کمک می‌کند بلکه زمینه‌ساز توسعه راهکارهای مدیریتی مؤثر نیز هست. با تفهیم بهتر تغییرات رژیم و واکنش‌های سیستم به عوامل مختلف، مدیران می‌توانند تصمیمات آگاهانه‌تری اتخاذ کنند که منجر به حفظ تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و جلوگیری از وقوع

بحران‌های آبی شود.

در نهایت، نتایج این پژوهش نشان‌دهنده اهمیت استفاده از ابزارهای تحلیلی مفهومی مانند استعاره گوی در حوضچه برای شناخت بهتر نظام‌های اجتماعی- اکولوژیک و توسعه حکمرانی پایدار است. این ابزارها می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های مؤثر در زمینه مدیریت منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرند (Pelletier et al., 2020). به‌طور کلی، تغییرات رژیم در حوزه آبخیز زاینده‌رود ناشی از تعامل پیچیده بین عوامل انسانی و طبیعی است که نیازمند توجه ویژه‌ای در مدیریت منابع آبی دارد. شناخت دلایل وقوع این تغییرات و تحلیل حلقه‌های بازخورد موجود می‌تواند به مدیران کمک کند تا راهبردهای مؤثری برای حفظ تاب‌آوری اکوسیستم‌ها توسعه دهند. استفاده از ابزارهای تحلیلی مانند استعاره گوی در حوضچه نیز می‌تواند زمینه‌ساز حکمرانی پایدار باشد. در نهایت، توجه به اهمیت رودخانه زاینده‌رود در تأمین منابع آبی برای کشاورزی و صنعت ضروری است تا بتوان اقدامات مؤثری برای مدیریت پایدار این نظام اجتماعی- اکولوژیک انجام داد. همچنین پیشنهاد می‌شود کاربرد کمی‌سازی استعاره گوی در حوضچه در سیستم‌های دیگر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود سیستم پایش یکپارچه و جامعی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مرتبط با آب‌های سطحی و زیرزمینی، کیفیت آب، کاربری اراضی کشاورزی و شرایط اقلیمی در منطقه ایجاد شود تا امکان شناسایی زود هنگام تغییرات و آستانه‌های بحرانی فراهم گردد. همچنین، توسعه و اجرای برنامه‌های مدیریت تقاضای آب از طریق تشویق به استفاده از روش‌های آبیاری نوین و تغییر الگوی کشت به سمت محصولات کم‌آبر ضروری است. بهبود حکمرانی آب با مشارکت تمامی ذی‌نفعان و احیای تالاب گاوخونی از طریق تأمین حقایق و کاهش آلودگی‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. علاوه بر این، تنوع‌بخشی به منابع آبی با استفاده از پساب تصفیه شده و جمع‌آوری آب باران و توسعه سازوکارهای مالی و اقتصادی تشویقی برای مدیریت پایدار منابع آب پیشنهاد می‌گردد. انجام تحقیقات بیشتر در زمینه شناسایی آستانه‌های بحرانی و ارزیابی اثربخشی راهکارهای مدیریتی و تقویت همکاری‌های بین‌المللی نیز می‌تواند به بهبود وضعیت نظام اجتماعی- اکولوژیک زاینده‌رود کمک کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌هاست.

مشارکت نویسندگان

مجید رحیمی: تهیه و آماده‌سازی و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

مهدی قربانی: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت مدیریت منابع آب ایران که داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را در اختیار آنان قرار داده است سپاسگزاری نمایند.

منابع

تیمری، حمیدرضا؛ حافظ‌نیا، محمدرضا، پاپلی یزدی، محمدحسین؛ و احمدی نوح‌دانی، سیروس (۱۴۰۲). تبیین پیامدهای هیدروپلیتیکی تغییرات اقلیمی در ایران (مطالعه موردی حوضه آبریز زاینده‌رود). *آمایش سیاسی فضا*، ۵(۳)، ۲۴۶-۲۶۹. <http://dorl.net/dor/> 20.1001.1.26455145.2023.5.3.1.2

رحمانی فضلی، عبدالرضا؛ و صالحیان، سعید (۱۴۰۱). اثرات تغییرات بارشی و دمایی بر وقوع ناپایداری منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۸(۲۹)، ۵۲-۶۸. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161451.html?lang=fa

گل‌کرمی، عابد؛ و کاویانی‌راد، مراد (۱۳۹۶). تأثیر محدودیت منابع آب بر تنش‌های هیدروپلیتیک (نمونه موردی: حوضه آبریز مرکزی ایران با تأکید بر حوضه آبریز زاینده‌رود). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۸(۱)، ۱۱۳-۱۳۴. <https://doi.org/10.22108/gep.2017.97903.0>

References

- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water resources research*, 45(10). <https://doi.org/10.1029/2008 WR007615>
- Biggs, R., Clements, H., de Vos, A., Folke, C., Manyani, A., Maciejewski, K., ... & Schlüter, M. (2021). What are social-ecological systems and social-ecological systems research?. In *The Routledge handbook of research methods for social-ecological systems* (pp. 3-26). *Routledge*. <https://doi.org/10.4324/9781003021339>
- Biggs, R., Peterson, G., & Rocha, J. C. (2015). The Regime Shifts Database: a framework for analyzing regime shifts in social-ecological systems. *BioRxiv*, 018473. <https://doi.org/10.5751/ES-10264-230309>
- Camarero, J. J., Shestakova, T. A., & Pizarro, M. (2022). Threshold Responses of Canopy Cover and Tree Growth to Drought and Siberian silk Moth Outbreak in Southern Taiga Picea obovata Forests. *Forests*, 13(5), 768. <https://doi.org/10.3390/f13050768>
- Dakos, V., & Kéfi, S. (2022). Ecological resilience: what to measure and how. *Environmental Research Letters*, 17(4), 043003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5767>
- Deng, Q., Dai, L., Yang, Z., Zhou, Z. G., Hussein, M., Chen, D., & Swartz, M. (2023). The impacts of regulation regime changes on ChiNext IPOs: Effects of 2013 and 2020 reforms on initial return, fair value and overreaction. *International Review of Financial Analysis*, 89, 102794. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.102794>
- Ebrahimnia, M., & Jafari Bibalan, B. (2017). Water resources in Iran and the reasons for establishing river basin organizations: review of the first experience for Zayandeh-Rud. *Reviving the Dying Giant: Integrated Water Resource Management in the Zayandeh-Rud Catchment, Iran*, 11-31. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54922-4_2
- Eslamian, S., Safavi, H. R., Gohari, A., Sajjadi, M., Raghbi, V., & Zareian, M. J. (2017). Climate change impacts on some hydrological variables in the Zayandeh-Rud River Basin, Iran. *Reviving the Dying Giant: Integrated Water Resource Management in the Zayandeh-Rud Catchment, Iran*, 201-217. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54922-4_13
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., & Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(3), 486-501. <https://doi.org/10.1002/hyp.7160>
- Golkarami, A., & Kaviani Rad, M. (2017). The effect of limited water resources on hydropolitic tensions (Case Study: Iran's central catchment with emphasis on Zayandehrood basin). *Geography and Environmental Planning*, 28(1), 113-134. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2017.97903.0>
- Hamidifar, H. (2024). Water Crisis in Iran: Causes, Consequences, and Solutions. In *Water Crises and Sustainable Management in the Global South* (pp. 85-109). Singapore: *Springer Nature* Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4966-9_3
- Junquera, V., Schlüter, M., Rocha, J., Wunderling, N., Levin, S. A., Rubenstein, D. I., ... & Meyfroidt, P. (2024). Crop booms as regime shifts. *Royal Society Open Science*, 11(6), 231571. <https://doi.org/10.1098/rsos.231571>
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Martin, R., Schlüter, M., & Blenckner, T. (2020). The importance of transient social dynamics for restoring ecosystems beyond ecological tipping points. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(5), 2717-2722. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817154117>
- Martinez-Fernandez, J., Banos-Gonzalez, I., & Esteve-Selma, M. A. (2021). An integral approach to address socio-ecological systems sustainability and their uncertainties. *Science of the Total Environment*, 762, 144457. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144457>
- Mohajeri, S., Horlemann, L., Sklorz, S., Kaltofen, M., Ghanavizchian, S., & Nuñez von Voigt, T. (2016). Integrated water resource management in Isfahan: the Zayandeh-Rud catchment. *Integrated water resources management: concept, research and implementation*, 603-627. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25071-7_23

- Olsson, P., & Moore, M. L. (2024). Transformations, agency and positive tipping points: A resilience-based approach. In *Positive Tipping Points Towards Sustainability: Understanding the Conditions and Strategies for Fast Decarbonization in Regions* (pp. 59-77). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50762-5_4
- Pelletier, M. C., Ebersole, J., Mulvaney, K., Rashleigh, B., Gutierrez, M. N., Chintala, M., ... & Lane, C. (2020). Resilience of aquatic systems: review and management implications. *Aquatic sciences*, 82, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s00027-020-00717-z>
- Perez, E., Andres, M., & Gawarkiewicz, G. (2024). Is the regime shift in Gulf Stream warm core rings detected by satellite altimetry? An inter-comparison of eddy identification and tracking products. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(10), e2023JC020761. <https://doi.org/10.1029/2023JC020761>
- Pirali Zefrehei, A. R., Kolahi, M., & Fisher, J. (2023). Modeling wetland restoration scenarios in Gavkhooni International Wetland. *Restoration Ecology*, 31(7), e13721. <https://doi.org/10.1111/rec.13721>
- Preiser, R., Biggs, R., De Vos, A., & Folke, C. (2018). Social-ecological systems as complex adaptive systems. *Ecology and Society*, 23(4). <https://doi.org/10.5751/ES-10558-230446>
- Radosavljevic, S., Banitz, T., Grimm, V., Johansson, L. G., Lindkvist, E., Schlüter, M., & Ylikoski, P. (2023). Dynamical systems modeling for structural understanding of social-ecological systems: A primer. *Ecological Complexity*, 56, 101052. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2023.101052>
- Rahimi, M., Ghorbani, M., & Ahmadaali, K. (2024a). Exploring the influence of regime shifts on ecosystem services in Iran's Zayandeh-Rud river basin. *International Journal of River Basin Management*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/15715124.2024.2325156>
- Rahimi, M., Ghorbani, M., & Ahmadaali, K. (2024b). How to manage regime shifts: insights from a dryland social- ecological system. *International Journal of Water Resources Development*, 1-27. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2421960>
- Rahimi, M., Ghorbani, M., Ahmadaali, K., Salajeghe, A., & Azadi, H. (2023). Dryland river regime shifts in Iran: Drivers and feedbacks. *River Research and Applications*, 39(6), 1173-1186. <https://doi.org/10.1002/rra.4138>
- Rahmani Fazli, A., & Salehian, S. (2022). The effects of Temperature and Precipitation changes on the occurrence of water resources instability in Zayandeh-Rud Basin. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 8(29), 52-68. [In Persian] https://jargs.hsu.ac.ir/article_161451.html?lang=en
- Saedpanah, M., Reisi, M., & Ahmadi Nadoushan, M. (2021). The effect of land use changes on water quality (Case study: Zayandeh- Rud Basin, Isfahan, Iran). *Pollution*, 7(4), 895- 904. <https://doi.org/10.22059/poll.2021.324387.1100>
- Sumata, H., De Steur, L., Divine, D. V., Granskog, M. A., & Gerland, S. (2023). Regime shift in Arctic Ocean sea ice thickness. *Nature*, 615(7952), 443-449. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05686-x>
- Teymouri, H., Hafeznia, M., Yazdi, P., & Hossein, M. (2023). Explaining the Hydropolitical Implications of Climate Change in Iran: Case Study of Zayandehrud Basin. *Political Organizing of Space*, 5(3), 246-269. [In Persian] <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26455145.2023.5.3.1.2>
- Van Woessik, R. (2013). Quantifying uncertainty and resilience on coral reefs using a Bayesian approach. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044051. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044051>
- Wang, S., Xue, J., Zhang, Z., Sun, H., Li, X., Chang, J., ... & Yao, L. (2024). An adaptive cycle resilience perspective to understand the regime shifts of social-ecological system interactions over the past two millennia in the Tarim River Basin. *Heliyon*, 10(14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34184>
- Xie, L., Xu, H., Xin, M., Wang, B., Tu, J., Wei, Q., & Sun, X. (2021). Regime shifts in trophic status and regional nutrient criteria for the Bohai Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112674. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112674>
- Zamani, O., Grundmann, P., Libra, J. A., & Nikouei, A. (2019). Limiting and timing water supply for agricultural production-The case of the Zayandeh-Rud River Basin, Iran. *Agricultural Water Management*, 222, 322-335. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.047>
- Zhao, J., Li, J., Zuo, L., Liu, G., & Su, X. (2023). Interaction dynamics of multiple ecosystem services and abrupt changes of landscape patterns linked with watershed ecosystem regime shifts. *Ecological Indicators*, 150, 110263. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110263>