Climate Change & Climate Disasters

Print ISSN: 2783-0551

University Zanjan

# The role of the Zagros mountain range in the future scenarios of drying up of the Zayanderud River

Esmaeil Dehghan [1] | Zakeyeh Aftabi [2] | Morad Kaviani Rad [3] ✉ | Hossein Rabeei [3]

1. Ph.D Student in Political Geography, Kharazmi University
2. Ph.D in Political Geography, Kharazmi University
3. Associated in Political Geography, Kharazmi University

**Article Info:**

**Article type:**

Research Article

**Date:**
**Received:**2024.01.18
**Received:** 2024.05.31
**Accepted:** 2024.07.31

**Keywords:**
Climate Change, Water Crisis, Zayanderud River, Zagros Mountain Range

**Abstract:** Rivers, as vital arteries of natural ecosystems, play a central role in maintaining environmental balance. Globally, river drying has become one of the most serious environmental challenges. Studies indicate that rivers located near mountainous areas are among the most vulnerable ecosystems due to their greater sensitivity to climate change. This applied research examines the factors affecting the drying up of the Zayanderud River, focusing on the Zagros mountain ecosystem. Data were collected through library and field methods, and the research problem was analyzed using a systems approach and futures studies tools. The findings show that precipitation systems, water extraction, Zagros topography, water allocation methods, and water resource management are the key factors influencing the river's drying. Considering different possible states of these key variables, the future of the Zayanderud River appears critical. As this crisis goes beyond a local issue, it should be regarded as a warning of potential ecological collapse in the region, requiring effective cooperation among government, researchers, and society.

**Cite this article:** Dehghan, E, Aftabi, Z, Kaviani Rad, M, Rabeei, R. (2024). The role of the Zagros mountain range in the future scenarios of drying up of the Zayanderud River. Climat Chenge and Climat Disasters, 3(6), 147-175.
© The Author(s).
**Homepage:** cccd.znu.ac.ir **Publisher:** University of Zanjan.

## Extended Abstract

### Introduction

Rivers, as the vital arteries of natural ecosystems, play a central role in environmental balance and sustaining human livelihoods. Globally, the crisis of river drying has become one of the most serious environmental challenges. This phenomenon is more pronounced in arid and semi-arid regions, particularly along the margins of mountainous areas that are more sensitive to climate change. The Zagros Mountain range, as the longest and most influential mountain system of the Iranian plateau, plays a dual role in the region's hydrology: on one hand, it serves as the primary source of water supply through orographic precipitation and snow reserves; on the other hand, its specific topography and morphology can exacerbate river desiccation. The Zayanderud River, as one of Iran's most vital water resources, has faced a drying crisis in recent years, and this issue extends beyond a local crisis to a serious warning for the sustainability of the natural ecosystem and economy of the entire central region of the country. Given the numerous uncertainties surrounding the future of water resources and the key role of the Zagros Mountain range, this research aims to identify the key variables affecting the drying of Zayanderud and to formulate the most probable future scenarios, with an emphasis on the role of this mountain range.

### Methodology

This applied research employs a descriptive-analytical method with a mixed (quantitative-qualitative) approach. Library and field data were collected through semi-structured interviews with experts and the distribution of cross-

impact questionnaires. The statistical population comprised 19 experts, including university faculty members (specializing in political geography, climatology, water resources engineering, and environmental hazards) and executive managers. Initially, 45 influential factors were identified, and after screening through interviews, 14 final factors were selected. Data analysis was conducted using Micmac software for structural analysis to identify key variables, and Scenario Wizard software for scenario development. The validity of the questionnaires was confirmed by the expert panel, and their reliability was assessed through cross-impact matrix analysis.

**Findings**

From among the 14 final factors, following structural analysis in Micmac and examining the variable dispersion diagram, five key variables were identified as the most influential factors on the drying of Zayanderud with emphasis on the role of the Zagros Mountain range: precipitation systems, methods of water allocation, water resource extraction in the Zayanderud basin, topography and geographical morphology of the Zagros Mountain range, and cultural practices of water use. Among these, two variables (precipitation systems and Zagros topography) were classified as natural factors, and the other three as human factors. Subsequently, possible states (ranging from favorable to critical) were defined for each key variable, totaling 18 states. The output of Scenario Wizard software revealed that among over two thousand possible scenarios, five scenarios with strong compatibility and high probability exist for the future of Zayanderud drying. The

distribution of states showed that 44.44% of the situations are critical, 22.22% are semi-favorable, 11.11% favorable, 11.11% semi-critical, and 11.11% static. The critical scenario, titled "*The Zagros Mountain Range: A Double-Edged Sword in the Crisis of Zayanderud Drying*," was identified as the strongest and most probable scenario, in which severe droughts, over-exploitation, water mismanagement, and geological changes caused by erosion in the Zagros have led to a significant reduction in river flow to the brink of complete drying. The semi-optimal scenario, titled "Hydrological Resilience Threshold," was also outlined, in which moderate precipitation during critical seasons only maintains acceptable water levels and falls short of meeting peak demand.

**Conclusion and Recommendations**

This research demonstrates that the drying of Zayanderud is less a direct consequence of natural factors such as reduced precipitation, and more a function of the complex interaction between climate change, Zagros topography, water allocation policies, and cultural practices of water utilization. The Zagros Mountain range plays a dual role in this context: on one hand, it acts as a vital source of water supply through orographic precipitation and snow reserves; on the other hand, its morphological characteristics, such as steep slopes and rapid drainage, exacerbate the crisis under water-scarce conditions. The critical scenario, toward which the current situation is leaning, serves as a serious warning of the potential collapse of the natural ecosystem, agricultural livelihoods, and the social fabric of the region. Based on this, the most important

proposed solutions are as follows: developing topographic and climate-oriented monitoring systems for precise measurement of changes in precipitation, temperature, and snow reserves at Zagros highlands; designing support programs for vulnerable communities (including agricultural insurance against drought and improving water supply infrastructure in nomadic areas); establishing interactive databases for integrating natural and human data to facilitate more accurate decision-making; designing resilient scenarios with the participation of local stakeholders based on futuristic analyses and dynamic system modeling; and finally, creating a joint executive platform comprising government, researchers, and local communities to prioritize research, implement water conservation practices, and promote sustainable agricultural development. In conclusion, the research emphasizes that without a fundamental overhaul of the water governance system and the precise implementation of laws, not only will the drying crisis of Zayanderud intensify, but the social and economic sustainability of all communities dependent on it will face a serious and irreversible threat.

**Key words:** climate change, water crisis, Zayanderud River, Zagros Mountain Range, scenario planning

دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی
شاپا چاپی: ۲۷۸۳-۰۵۵۱
دانشگاه زنجان

# نقش رشته کوه زاگرس در سناریوهای فراروی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود

اسماعیل دهقان [۱] | زکیه آفتابی [۲] | مراد کاویانی راد [۳] ✉ حسین ربیعی [۳]

۱. دانشجوی دکتری جغرافیای سیاسی دانشگاه خوارزمی
۲. دکتری جغرافیای سیاسی دانشگاه خوارزمی
۳. دانشیار جغرافیای سیاسی دانشگاه خوارزمی

**اطلاعات مقاله:**

**نوع مقاله: پژوهشی**

**تاریخ‌ها:**
**دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۸**
**بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱**
**پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۰**

**واژگان کلیدی:**
تغییر اقلیم، بحران آب، رودخانه زاینده‌رود، رشته کوه زاگرس.

**چکیده:** رودخانه‌ها به‌عنوان شریان‌های حیاتیِ اکوسیستم‌های طبیعی، نقش محوری در تعادل محیط زیست ایفا می‌کنند. در سطح جهانی، بحران خشکیدگی رودخانه‌ها به یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی تبدیل شده‌است. مطالعات نشان می‌دهند که رودخانه‌ها در حاشیه مناطق کوهستانی به‌دلیل حساسیت بیشتر به تغییرات اقلیمی، آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌ها محسوب می‌شوند. هدف پژوهش کاربردی حاضر، بررسی عوامل مؤثر بر خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود با تمرکز بر اکوسیستم رشته کوه زاگرس است. داده‌های پژوهش با روش کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری و با به‌کارگیری از رویکرد سیستمی و ابزارهای آینده پژوهی به تحلیل مساله پژوهش پرداخته است. نتایج پژوهش نشان داد عوامل سامانه‌های بارش‌زا، استحصال منابع آب، توپوگرافی زاکرس، شیوه‌های تخصیص منابع آب و مدیریت منابع آب عوامل کلیدی تاثیر گذار بر خشکیدگی رودخانه زاینده رود ناشی از اکوسیستم رشته کوه زاکرس هستند. با در نظر داشت حالت‌های مختلف برای متغیرهای کلیدی سناریوی فراروی رودخانه زاینده رود با تمرکز بر رشته کوه زاگرس بحرانی نمود یافت. از آنجا که رودخانه زاینده‌رود فراتر از بحران محلی، هشداری برای فروپاشی اکوسیستم طبیعی منطقه است. در این راستا پیشنهاد می‌شود پلتفرم کارا و اجرایی متشکل از دولت، محققان و پژوهشگران و جامعه ایجاد و به بررسی وضعیت موجود بپردازند.

**استناد:** دهقان, اسماعیل, آفتابی, زکیه, کاویانی راد, مراد, ربیعی, حسین. (۱۴۰۳). نقش رشته کوه زاگرس در سناریوهای فراروی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود . دگرگونی ها و مخاطرات آب و هوایی, ۳(۶), ۱۴۷-۱۷۵.

© **نویسندگان .**

**ناشر:** دانشگاه زنجان

**Homepage:** cccd.znu.ac.ir

**۱. مقدمه**

رودخانه‌ها اجزای حیاتی اکوسیستم ما هستند که به تنوع زیستی، کشاورزی و معیشت انسان کمک می‌کنند. با این حال، بسیاری از رودخانه‌ها در سراسر جهان با کاهش جریان آب یا خشک شدن کامل مواجه هستند(Islam, 2024:2). در حالی که فعالیت‌های انسانی، مانند برداشت بیش از اندازه از منابع آب (Khair et al, 2019: 340; Hussain et al, 2019: 221) و تغییرات اقلیمی (Mukherjee, 2018:145; Dai et al, 2018)، اغلب تاثیرگذار هستند؛ عوامل طبیعی، به‌ویژه توپوگرافی و وجود کوه‌ها، به‌طور قابل توجهی بر هیدرولوژی رودخانه‌ها نیز تأثیر می‌گذارند. در مناطق کوهستانی، ذوب برف نقش مهمی در حفظ جریان رودخانه(Huss et al, 2017: 418)، به‌ویژه در فصل بهار و اوایل تابستان دارد. با واپس نشینی یخچال‌ها به‌دلیل تغییرات آب و هوایی، عرضه آب ذوب کاهش می‌یابد و کاهش جریان رودخانه را تشدید می‌کند(Zhang et al, 2020: 1). این پدیده در مناطق مختلف جهان، از هیمالیا تا آند، مشاهده شده‌است که هم اکوسیستم‌های آبی و هم منابع آب انسان را تهدید می‌کند (Dimri et al, 2016: 98; Tenorio, 2018: 175). یخچال‌های طبیعی برای انباشت برف بسیار مهم هستند و به عنوان منبع حیاتی آب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، شناخته می‌شوند (Heusser et al, 2015: 243).یخچال‌ها منشا تعدادی از رودخانه‌های کشور در رشته کوه‌های البرز و زاگرس هستند که از این بین می‌توان به رودخانه سراب و رودخانه سه‌هزار(منطقه یخچال علم کوه)، رودخانه انارچای، قوری چای و درویش چای(منطقه یخچال سبلان)، رودخانه دلیچای از شعب رودخانه هزار(منطقه یخچال دماوند)، قاتان، ماربره،

تخت‌شاه و دره الوند(منطقه یخچال اشتران کوه) و کوهرنگ(منطقه یخچال زرد کوه) اشاره کرد(Morid, 2013: 19) کاهش ۳۰ درصدی پوشش برف تابستانی نسبت به وسعت فضاییِ دو دههِ قبل در این یخچال‌ها قابل مشاهده است (Motiee et al, 2024:1). زاینده‌رود، یکی از حیاتی‌ترین منابع آب ایران، طی سال‌های اخیر با بحران خشک شدن مواجه بوده است. این رودخانه با قرار گرفتن در بخش مرکزی کشور، نقش اساسی در حمایت از کشاورزی، تأمین آب شرب و حفظ اکوسیستم در مناطق خشکی از جمله استان اصفهان داشته است. رشته کوه زاگرس طولانی‌ترین رشته کوه فلات ایران است که از شمال شرق عراق تا جنوب ایران کشیده شده است (Noroozi et al, 2020: 185) و تأثیر عمیقی بر هیدرولوژی منطقه دارد. درک تأثیر متقابل بین کوه‌های زاگرس و زاینده‌رود برای درک عوامل مؤثر در کاهش جریان رودخانه زاینده رود ضروری است. نیمه غربی زاکرس مرطوب‌تر از نیمه شرقی است.(Jafari & Foladi, 2023: 104). این پدیده به خشکی کلی فلات مرکزی ایران کمک می‌کند. خشک شدن زاینده‌رود که یک معضل پیچیده است؛ تحت‌تأثیر عوامل متعددی قرار دارد و رشته کوه‌های زاگرس به‌عنوان یک عامل مهم جغرافیایی و اقلیمی نقش بسزایی دارند.

رشته کوه زاگرس به‌عنوان یک شکاف اقلیمی حیاتی در ایران عمل می‌کند و بر الگوهای آب و هوا، توزیع بارش و جریان آب تأثیر می‌گذارد. این رشته کوه با امتداد تقریباً ۱۵۰۰ کیلومتری، یک اثر سایه باران ایجاد می‌کند که به‌طور قابل توجهی بر دسترسی به منابع آب در مناطق اطراف تأثیر می‌گذارد. با این حال، عوامل انسانی، از جمله بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع آبی(Ye et al, 2014: 336)، جنگل‌زدایی

و روش‌های ضعیف کشاورزی، بحران رودخانه را تشدید کرده است( Aftabi et al, 2024: 52، ۱۴) .بحران منابع آب در حوضه آبریز زاینده رود پیامدهای مهمی برای کشاورزی، حیات وحش و سکونتگاه‌های انسانی در سراسر منطقه دارد.

در سال‌های اخیر، اصطلاح بحران خشک شدن رودخانه‌ها در بحث‌های پیرامون پایداری زیست محیطی و مدیریت منابع آب برجسته شده‌است. این پدیده به کاهش گسترده منابع آب طبیعی اشاره دارد که منجر به کمبود شدید آب و تأثیرات مخرب بر اکوسیستم، کشاورزی و جمعیت انسانی می‌شود. درک بحران خشک شدن رودخانه‌ها و پیامدهای آن برای توسعه راهبردهای مؤثر برای مبارزه با این موضوع ضروری و حیاتی است. بحران خشکی با خشک شدن تدریجی آب و خشکی و در نتیجه کاهش سطح آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و سفره‌های زیرزمینی مشخص می‌شود. این بحران توسط عوامل مختلفی از جمله تغییرات آب و هوایی، شیوه‌های مدیریت ناپایدار آب و افزایش تقاضا برای آب به‌دلیل رشد جمعیت و صنعتی‌شدن هدایت می‌شود. این معضل در مناطق خشک و نیمه‌خشک که منابع آب هم اکنون محدود است، شدیدتر است. یکی از شاخص‌ترین شاخص‌های بحران خشکی، پدیده تخریب زمین و بیابان زایی است. با کاهش منابع آب، پوشش گیاهی کاهش می‌یابد که منجر به فرسایش خاک، از بین رفتن تنوع زیستی و کاهش زمین‌های قابل کشت می‌شود (World Resources Institute, 2018). افزون بر این، بحران نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی موجود را تشدید می‌کند، به‌ویژه در کشورهای رو به پیشرفت، جایی که جوامع آسیب‌پذیر ممکن است منابع لازم برای انطباق با شرایط محیطی در حال تغییر را

نداشته‌باشند. چندین عامل مرتبط به‌هم در ظهور بحران خشک شدن نقش دارند. تغییر اقلیم یکی از محرک‌های اصلی است، زیرا افزایش دما و الگوهای بارندگی تغییر یافته منجر به افزایش نرخ تبخیر و کاهش بارندگی می‌شود (IPCC, 2021). این منجر به کاهش منابع آب، به‌ویژه در مناطقی می‌شود که هم اکنون مستعد خشک‌سالی هستند.

در حوضه آبریز زاینده رود، نابرابری‌های اجتماعی- اقتصادی به طور مضاعف بحران را تشدید می‌کنند. جوامع آسیب‌پذیر مانند کشاورزان خرد در شرق اصفهان و جوامع عشایر دامدار در ارتفاعات زاگرس با کاهش دسترسی به منابع آب، بیشترین فشار را متحمل می‌شوند. کمبود زیرساخت‌های تطبیقی، نبود بیمه کشاورزی در مقابل تنش‌های آبی و نابرابری درتخصیص منابع آبی، این جوامع را در برابر پیامدهای تغییر اقلیم بی‌دفاع باقی گذاشته است.

افزون بر این، شیوه‌های کشاورزی ناپایدار به‌طور قابل توجهی به بحران کمک می‌کند. کشاورزی فشرده اغلب به آبیاری بیش از اندازه متکی است، که ذخایر آب زیرزمینی را سریع‌تر از اینکه بتوان دوباره پر کرد، تخلیه می‌کند. جنگل‌زدایی برای گسترش کشاورزی، احتباس آب در خاک را کاهش می‌دهد و وضعیت را بیشتر تشدید می‌کند (World Resources Institute, 2018).

به عنوان مثال امروزه در نقاط برفگیر در سرچشمه‌های زاینده رود باغ‌های میوه ایجاد کرده‌اند که سبب گرم شدن آن منطقه شده است. شهرنشینی و صنعتی‌شدن نیز نقش مهمی در بحران خشک شدن دارند. با گسترش شهرها، تقاضا برای آب افزایش می‌یابد و اغلب از عرضه موجود بیشتر می‌شود. فرآیندهای صنعتی اغلب آلاینده‌ها را به منابع آب محلی رها می‌کنند که باعث تشدید مشکلات کیفیت آب و کاهش بیشتر

دسترسی به آب تمیز می‌شود. پیامدهای بحران خشک شدن عمیق است.

برای بررسی دقیق این موضوع، یک سؤال پژوهشی اولیه را مطرح می‌کنیم: محتمل‌ترین و قوی‌ترین سناریو در مورد خشک شدن زاینده‌رود با توجه به نقش رشته کوه زاگرس چیست؟ برای حمایت از این تحقیق، یک سؤال فرعی را بررسی می‌کنیم که به متغیرهای اصلی مؤثر در خشک شدن رودخانه می‌پردازد و عبارت است از متغیرهای کلیدی (پیشران) موثر بر خشک شدن زاینده‌رود با توجه به نقش رشته کوه زاگرس کدامند؟

این تحقیق با هدف دستیابی به چندین هدف مرتبط با فرآیند خشک شدن رودخانه زاینده‌رود انجام شده‌است: هدف اول شناسایی متغیرهایی است که در خشک شدن رودخانه نقش دارند. این شامل بررسی عوامل اقلیمی، فعالیت‌های انسانی، فعالیت‌های کشاورزی و تغییرات هیدرولوژیکی مرتبط با رشته‌کوه‌های زاگرس است و با ترکیب یافته‌ها، تحقیق به‌دنبال طرح سناریوهای بالقوه آینده در مورد دسترسی به آب رودخانه، ارزیابی اثربخشی استراتژی‌های مختلف مدیریتی است. خشک شدن زاینده‌رود یک موضوع چندوجهی با تعاملات پیچیده بین عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی است. رشته کوه زاگرس نقش مهمی در این پویایی دارد و بر الگوهای بارش و فرآیندهای هیدرولوژیکی که در سلامت رودخانه نقش اساسی دارند، تأثیر می‌گذارد. هدف این تحقیق با پرداختن به محرک‌های کلیدی شناسایی‌شده و سناریوهای بالقوه، نه‌تنها تبیین تغییرات جاری تأثیرگذار بر رودخانه زاینده‌رود، بلکه تقویت تصمیم‌گیری آگاهانه برای مدیریت پایدار آب در منطقه است. این تحقیق با تأکید بر تحلیل سناریوهای آینده، گامی عملی در جهت ارائه راهبردهای قابل پیاده‌سازی برای

مدیریت پایدار منابع آب در زاینده‌رود برمی‌دارد. و با پیش‌بینی چالش‌های پیش روی منابع آبی، سناریوهای احتمالی را تحلیل می‌کند. تحلیل سناریوهای احتمالی بر اساس نرم‌افزار Scenario Wizard، امکان ارزیابی واکنش سیستم را در برابر چالش‌های بالقوه، مانند تداوم خشکسالی، کاهش بارندگی و افزایش مصرف انسانی فراهم می‌کند. بدین ترتیب، این سناریوها به پژوهشگران و مدیران کمک می‌کنند تا تأثیرات متنوع این چالش‌ها را شناسایی کنند و به راهکارهای به‌دست‌آمده در شرایط مختلف توجه نمایند. خروجی‌های این تحقیق می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های اجرایی در سطوح منطقه‌ای و ملی باشد. با استفاده از این خروجی‌ها، مقامات و تصمیم‌گیرندگان قادر به تهیه استراتژی‌های مؤثر خواهند بود که با شرایط آینده هم‌راستا باشد. این استراتژی‌ها می‌توانند شامل اجرای پروژه‌های مدیریتی، اتخاذ تصمیمات صحیح در خصوص کنترل مصرف آب و ایجاد طرح‌های حفاظتی برای منابع آب باشند. به این ترتیب، این تحلیل‌ها نه‌تنها به پیش‌بینی وضعیت آب در آینده کمک می‌کنند، بلکه به ایجاد آگاهی در مورد اهمیت مدیریت پایدار منابع آب و نیاز به اقدامات فوری در برابر تغییرات اقلیمی نیز می‌انجامند.

## ۲. داده‌ها و روش‌ها

### ۲. ۱. منطقه مورد مطالعه

زاینده رود، رودخانه‌ای با اهمیت فرهنگی و جغرافیایی در ایران، از قسمت غربی شهرستان زردکوه سرچشمه می گیرد و پس از طی مسیری منحنی به طول ۴۲۰ کیلومتر، در شرق به مرداب گاوخونی می‌ریزد(Roshandel et al, 2019:239). اهمیت حیاتی این رودخانه برای تداوم و تمدن انکار نشدنی و در عین حال مدیریت و تخصیص آن محل بحث بوده است.

**شکل۱: محدوده مورد مطالعه**

**منبع:** (Roshandel et al, 2019:239)

**۲. ۲. داده‌ها**

پژوهش حاضر ماهیت کاربردی دارد. داده‌های مورد نیاز پژوهش به‌روش کتابخانه‌ای و پیمایشی (مصاحبه و پرسش‌نامه) گردآوری و با رویکرد ترکیبی کمّی- کیفی و با بهره‌گیری از نرم افزارهای Micmac و Scenario wizard مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفته است.

**۲. ۳. روش‌ها**

در پژوهش پیشِ رو، ابتدا با مراجعه به منابع کتابخانه‌ای، مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر مساله پژوهش شناسایی و از طریق مصاحبه با خبرگان صحت آن‌ها بررسی شد. عوامل شناسایی‌شده در قالب پرسش‌نامه متقاطع کلیدی طراحی و در اختیار خبرگان قرار گرفت. خبرگان به تاثیر عوامل بر یکدیگر بین ۰ تا ۳ نمره دادند. نتایج پرسشنامه وارد نرم‌افزار Micmac شد و عوامل کلیدی (پیشران) مؤثر بر نقش

رشته کوه زاگرس در سناریوهای فراروی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود شناسایی شد عوامل کلیدی مؤثر شناسایی‌شده در قالب حالت‌های مختلف تنظیم و پرسش‌نامه پژوهشگر ساخته دیگری تنظیم و در اختیار جامعه آماری پژوهش قرار خواهد گرفت. پرسش‌نامه‌های تکمیل شده در نرم‌افزار Scenario wizard وارد شد .(Aftabi et al, 2023: 42)وزن‌دهی به پرسش‌نامه به‌صورت مقایسه‌ای زوجی و میزان ارتباط بین متغیرها با اعداد بین ۳- تا ۳ سنجیده می‌شود. سبد سناریوهای فرا روی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود با توجه به نقش رشته کوه زاگرس شناسایی و سناریوهای با سازگاری قوی تحلیل خواهند شد.

**جدول ۱: مشخصات خبرگان پژوهش**

| | تخصص | | درجه | تعداد |
|---|---|---|---|---|
| | | | پژوهشگر پسا دکتری | ۱ |
| ۱ | جغرافیا | جغرافیای سیاسی | دکتری | ۵ |
| | | | دانشجو دکتری | ۶ |
| | | مخاطرات محیطی آب و هواشناسی | کارشناسی ارشد | ۳ |
| | | | دانشجو کارشناسی ارشد | ۲ |
| | | | دکتری | ۶ |
| | | | دانشجو دکتری | ۴ |
| ۲ | مهندسی منابع آب | | دکتری | ۴ |

## ۳. یافته‌های پژوهش

برای تحلیل دقیق‌تر، عوامل انسانی و طبیعی مؤثر بر خشکیدگی به صورت دو دسته مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند. تغییرات اقلیمی، مانند افزایش دما، کاهش بارش و تغییر الگوی فصلی بارش، در دسته عوامل طبیعی قرار می‌گیرند. از سوی دیگر،

عوامل انسانی شامل بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی، توسعه شهری، جنگل‌زدایی و سوء مدیریت منابع آبی طبقه‌بندی می‌شوند. بررسی تفکیکی این عوامل نشان می‌دهد که اثرگذاری متقابل آن‌ها، به‌ویژه در نقاط همپوشانی مانند بهره‌برداری از منابع در مناطق حساس اقلیمی، بسیار چشمگیر و پیچیده است. از آن‌جا که عوامل انسانی و طبیعی به یکدیگر وابسته هستند، تغییرات یک عامل می‌تواند تأثیرات گسترده‌ای بر دیگری داشته باشد. به عنوان مثال، افزایش دما و کاهش بارش که از عوامل طبیعی هستند، می‌تواند باعث افزایش نیاز به منابع آبی شود و در نتیجه بهره‌برداری بیش از حد از این منابع را به همراه داشته باشد. توسعه شهری به نوبه خود می‌تواند سبب از بین رفتن پوشش‌های گیاهی و جنگل‌زدایی شود که این موضوع خود به کاهش ظرفیت جذب آب در زمین و افزایش رواناب منجر خواهد شد. از آن‌جا که بسیاری از این عوامل در مناطق حساس اقلیمی همپوشانی دارند، نیاز به مدیریت یکپارچه و پایدار منابع آبی احساس می‌شود تا تأثیرات منفی ناشی از این تغییرات کاهش یابد. بررسی دقیق این روابط می‌تواند به فهم بهتری از روندهای خشکسالی و ارائه راهکارهای مؤثر در جهت کاهش اثرات آن کمک کند.

### ۳. ۱. عوامل مؤثر ناشی از تاثیر رشته کوه زاگرس بر بحران خشکیدگی زاینده‌رود

در این مرحله نخست از طریق مطالعات کتابخانه‌ای ۴۵ عامل موثر بر مساله پژوهش شناسایی و از طریق مصاحبه و تحلیل محتوای مصاحبه با خبرگان، ۱۴ عامل نهایی از بین عوامل انتخاب شده به عنوان عوامل تاثیرگذار بر مساله پژوهش انتخاب شدند.

**جدول ۲: عوامل مؤثر ناشی از تاثیر رشته کوه زاگرس بر بحران خشکیدگی زاینده‌رود**

| عوامل اصلی | متغیرهای تأثیرگذار کلیدی (پیشران) | کد |
|---|---|---|
| تغییر اقلیم | افزایش دما | X1 |
| | تغییر الگوهای بارش | X2 |
| | سامانه‌های بارش زا | X3 |
| جنگل‌زدایی و تغییر کاربری اراضی | گسترش اراضی کشاورزی | X4 |
| | توسعه شهری | X5 |
| | چرای دام | X6 |
| سیاست‌های مدیریت آب | ساخت سد | X7 |
| | شیوه‌های تخصیص آب | X8 |
| | استیحصال منابع آب | X9 |
| عوامل زمین‌شناسی | توپوگرافی زاگرس | X10 |
| | کیفیت آب زیرزمینی | X11 |
| نفوذ اجتماعی و اقتصادی | رشد جمعیت | X12 |
| | تقاضاهای صنعتی | X13 |
| | شیوه‌های فرهنگی به‌کارگیری آب | X14 |

**۳.۱.۱. تفکیک عوامل انسانی و طبیعی مؤثر ناشی از تاثیر رشته کوه زاگرس بر بحران خشکیدگی زاینده‌رود**

بحران خشکیدگی زاینده‌رود، یکی از مسائل اساسی محیط زیست و منابع آبی در این حوضه آبریز به شمار می‌آید. این بحران به دلایل مختلفی از جمله عوامل طبیعی و انسانی بروز می‌کند که تأثیرات متقابل آن‌ها بر شدت این مشکل نقش بسزایی دارد. برای درک بهتر نحوه اثرگذاری این عوامل بر بحران خشکیدگی زاینده‌رود، جدول زیر تطبیق بین عوامل انسانی و طبیعی و تأثیرات آن‌ها را به تصویر می‌کشد. این جدول به وضوح نشان می‌دهد

که چگونه تغییرات اقلیمی و کارکردهای انسانی می‌توانند به کاهش منابع آبی و افزایش فشار بر آن‌ها در دوران‌های بحرانی منجر شوند.

**جدول۳: تفکیک عوامل انسانی و طبیعی مؤثر ناشی از تاثیر رشته کوه زاگرس بر بحران خشکیدگی زاینده‌رود**

| نوع عامل | مثال‌ها |
|---|---|
| **طبیعی** | افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، کاهش ذخایر برف، سامانه‌های بارش‌زا، توپوگرافی زاگرس |
| **انسانی** | گسترش اراضی کشاورزی، توسعه شهری، چرای دام، ساخت سد، شیوه‌ای تخصیص آب، استیحصال منابع آب، رشد جمعیت، تقاضای صنعتی، شیوه‌های فرهنگی به کار گیری منابع آب |

**۳. ۱. ۲. وضعیت ماتریس اثرات متقابل یا تأثیرگذار (MDI)**

بر پایه جدول شماره ۴، ابعاد ماتریس ۱۴ *۱۴ و درجه پرشدگی ماتریس ۸۷/۲۴ درصد است که نشان‌می‌دهد عوامل انتخاب شده تأثیر کمابیش زیاد و پراکنده‌ای بر همدیگر داشته و سیستم از وضعیت ناپایداری برخوردار است. از مجموع ۱۷۱ رابطه قابل ارزیابی در این ماتریس، ۲۵رابطه با ارزش عددی صفر است که بیان می‌کند متغیرها بر همدیگر تأثیر نداشته یا از همدیگر تأثیر نپذیرفته‌اند. ۵۶ رابطه تأثیر کم متغیرها بر همدیگر را نشان‌می‌دهد. ۶۵ رابطه نمایانگر تأثیرگذاری نسبتاً قوی متغیرها بر یکدیگر است. ۳۷رابطه عددشان سه است؛ بدین معنی که روابطِ متغیرهای کلیدی، بسیار زیاد و از تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بالایی برخوردار است. در پایان نیز ۱۳ رابطه نشان‌دهنده رابطه پتانسیلی و غیرمستقیم و بالقوه متغیرها بر یکدیگر را نشان می‌دهد.

**جدول ۴: تحلیل اولیه داده‌های ماتریس متقابل**

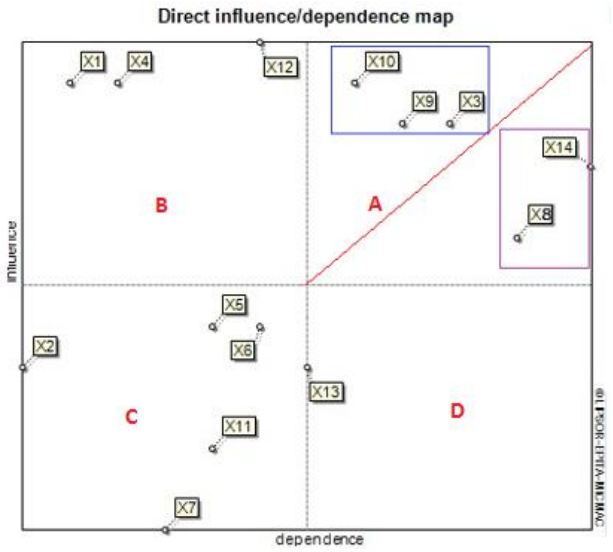
| شاخص | ابعاد ماتریس | تکرار | صفر | یک | دو | سه | p | جمع |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقدار | ۱۴*۱۴ | ۲ | ۲۵ | ۵۶ | ۶۵ | ۳۷ | ۱۳ | ۱۷۱ |

### ۳. ۱. ۳. تحلیل سیستم و تعیین تأثیرگذاری تأثیرپذیری متقابل متغیرها بر یکدیگر

متغیرهای کلیدی متغیرهایی هستند که هم قابل دست‌کاری و کنترل باشند و هم بر پویایی و تغییر سیستم تأثیرگذارند. با این توصیف، متغیرهایی را که تأثیر بسیار بالایی دارند اما مهارشدنی نیستند، نمی‌توان متغیر کلیدی به‌شمار آورد. با نگرش به شکل ۲ متغیرهای قرار گرفته در ناحیه B چنین وضعیتی دارند. بنابراین، برنامه‌ریزان به‌ندرت قادر به تغییر این متغیرها هستند. متغیرهای قرار گرفته در ناحیه C شبکه مختصات، تأثیرگذاری و تأثیرپذیری بسیار کمی دارند و نمی‌توانند متغیرهای کلیدی به‌شمار آیند (مستقل). متغیرهای قرار گرفته در ناحیه D به‌دلیل وابستگی به دیگر متغیرها خاصیت راهبردی و کلیدی ندارند و بیشتر نتیجه دیگر متغیرها هستند (تأثیرپذیر). اما متغیرهای ناحیه A راهبردی و کلیدی هستند چراکه هم قابلیت کنترل توسط سیستم مدیریتی را دارند و هم در سیستم، تأثیرگذاری قابل قبولی دارند و به دو دسته متغیرهای ریسک و هدف می‌شوند. متغیرهای ریسک که بالای خط قطری قرار دارند، قابلیت بیشتری برای تبدیل شدن به متغیرهای کلیدی سیستم را دارند.

**جدول ۵: درجه مطلوبیت و بهینه‌شدگی ماتریس**

| محدوده | تأثیرپذیری | تأثیرگذاری | چرخش |
|---|---|---|---|
| زاینده رود | ۹۵ درصد | ۹۶ درصد | ۱ |
| | ۹۶ درصد | ۹۴ درصد | ۲ |




**شکل۲: نمودار پراکندگی متغیرهای مستقیم و جایگاه آن در محور تأثیرگذاری-تأثیرپذیری**

بر بنیاد مطالب پیش گفته و شکل ۲ پنج متغیر ورود سامانه‌های بارش زا (X3)، شیوه‌های تخصیص آب(X8)، استیحصال منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود (X9) ، توپوگرافی و ریخت شناسی جغرافیایی رشته کوه زاگرس (X10) و شیوه‌های فرهنگی به کارگیری آب به‌عنوان متغیرهای کلیدی بر نقش رشته کوه زاگرس در سناریو فرا روی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود شناسایی شدند.

از بین عوامل کلیدی؛ دو متغیر ورود سامانه‌های بارش‌زا، توپوگرافی و

ریخت‌شناسی جغرافیایی رشته کوه زاگرس مربوط به عوامل طبیعی و سه متغیر شیوه‌های تخصیص آب، استیحصال منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود و شیوه‌های فرهنگی به کارگیری آب به عنوان عوامل انسانی موثر بر نقش رشته کوه زاگرس در سناریوهای فراروی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود شناسایی شدند.

**۳. ۴. حالت‌های احتمالی متغیرهای کلیدی**

حالت‌های مختلفی پیشروی پنج متغیر کلیدی قابل‌تصور است که در مدیریت آینده سیستم اهمیت به سزایی دارد. مطابق وضعیت‌های احتمالی نقش رشته کوه زاگرس در سناریو فرا روی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود در مجموع۱۸ حالت برای پنج متغیر کلیدی طراحی شده است.

**۳. ۵. شناسایی الگوهای پیش روی نقش رشته کوه زاگرس در سناریو فرا روی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود**

پس از تهیه فهرست حالت‌های احتمالی مربوط به پنج متغیر کلیدی، به طراحی پرسش‌نامه در قالب ماتریس متقاطع کلیدی پرداخته شد و در اختیار جامع آماری پژوهش قرار گرفت. نتایج پرسشنامه داده‌های لازم برای شناسایی الگوهای ممکن، توسط نرم‌افزار Scenario wizard را فراهم کرد. با نگرش به این مسئله که در اینجا هدف تهیه الگوهای ممکن از۱۸ حالت احتمالی مربوط به پنج متغیر کلیدی است، پیش بینی می‌شود بیش از دو هزار الگوی تلفیقی محتمل از میان این حالات احتمالی ممکن استخراج شود که دربرگیرنده همه وضعیت‌های پیش روی مساله پژوهش باشد.

نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار Scenario wizard نشان داد که پنج سناریو با سازگاری قوی و محتمل، پیش روی نقش رشته کوه زاگرس در سناریوهای فرا روی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود وجود دارد.

**جدول۶: شرح حالت‌های احتمالی ممکن برای متغیرهای کلیدی**

| کد | متغیر کلیدی | حالت | شرح حالت‌های احتمالی | وضعیت |
|---|---|---|---|---|
| **A** | سامانه‌های بارش زا | A1 | افزایش چشم‌گیر سامانه‌های بارش‌زا | مطلوب |
| | | A2 | افزایش نسبی سامانه‌های بارش‌زا | نیمه مطلوب |
| | | A3 | ادامه روند موجود | ایستا |
| | | A4 | کاهش نسبی سامانه‌های بارش‌زا | نیمه بحرانی |
| | | A5 | کاهش سامانه‌های بارش‌زا | بحرانی |
| **B** | شیوه‌های تخصیص منابع آب | B1 | تخصیص بهینه منابع آب | مطلوب |
| | | B2 | فرهنگ‌سازی برای تخصیص بهینه منابع آب | نیمه مطلوب |
| | | B3 | ادامه روند موجود | ایستا |
| | | B4 | تخصیص بدون برنامه ریزی منابع آب | بحرانی |
| **C** | استیحصال منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود | C1 | استحصال منابع آب با نرخ تجدید رودخانه زاینده‌رود مطابقت دارد | مطلوب |
| | | C2 | ادامه روند موجود | ایستا |
| | | C3 | استخراج بیش از ظرفیت زاینده رود | بحرانی |
| **D** | توپوگرافی زاکرس | D1 | مورفولوژی با ویژگی‌هایی که ذخیره آب و زهکشی را افزایش داده و جریان رودخانه را افزایش می‌دهد. | مطلوب |
| | | D2 | ادامه روند موجود | ایستا |
| | | D3 | فرسایش شدید یا تغییرات زمین‌شناسی | بحرانی |
| **E** | شیوه‌های فرهنگی به کارگیری آب | E1 | فرهنگ بهینه در بهره‌برداری از منابع آب | مطلوب |
| | | E2 | ادامه روند موجود | ایستا |
| | | E3 | عدم فرهنگ‌سازی در بکارگیری منابع آب | بحرانی |

شکل ۳ تابلوی الگوهای با سازگاری قوی را نشان‌می‌دهد. در این تابلو رنگ سبز وضعیت بهینه، آبی نشان دهنده وضعیت نیمه بهینه و رنگ قرمز نشان دهنده وضعیت بحرانی، رنگ صورتی نیمه بحرانی و رنگ زرد نشان دهنده وضعیت ایستا است. تابلوی الگوهای با سازگاری قوی از ۹وضعیت احتمالی مربوط به پنج الگو با سازگاری قوی و محتمل تشکیل شده‌است.

همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تعداد وضعیت‌های بحرانی بر دیگر وضعیت‌های ممکن برتری دارد. از این

وضعیت‌های احتمالی۴۴/۴۴درصد بحرانی، ۲۲/۲۲ درصد نیمه مطلوب، ۱۱/۱۱درصدمطلوب، ۱۱/۱۱ درصد نیمه بحرانی و ۱۱/۱۱ درصد ایسا هستند.

**۳. ۶. تدوین سناریو**

**۳. ۶. ۱. سناریوی اول: سناریوی بحرانی: رشته کوه زاگرس شمشیر دو لبه معضل خشکیدگی زاینده‌رود**

زاینده‌رود که زمانی شریان حیاتی، حیات و رزق اقتصادی در ایران بود، به‌دلیل سناریوهای بحرانی متعددی که اکوسیستم آن و جوامع متکی به آن را به خطر می‌اندازد، با تهدید وجودی مواجه است. همگرایی خشک‌سالی‌های شدید، بهره‌برداری بیش از حد و سوء مدیریت منابع آب؛ خبر از کاهش سریع جریان رودخانه تا مرز خشکیدگی کامل می‌دهد و هشدارهایی را در مورد سقوط بالقوه اکولوژیکی ایجاد می‌کند. نقش رشته کوه زاگرس، یک ساختار زمین‌شناسی مهیب که هیدرولوژی، اقلیم و فعالیت‌های انسانی در منطقه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، در کانون این بحران قرار دارد. خشک‌سالی شدید چندین فصل را در بر می‌گیرد و به‌طور قابل توجهی بر سطح آب زاینده‌رود تأثیر می‌گذارد. بر پایه داده‌ها کشور دچار خشکسالی‌های مکرر شده‌است که منجر به کاهش شدید بارش و متعاقب آن جریان رودخانه شده‌است. این خشکی طولانی مدت به‌طور قابل توجهی به زهکشی تقریباً کامل زاینده‌رود کمک کرده و منابع اولیه آب را از جوامع سلب کرده است. فراتر از عوامل طبیعی مانند خشک‌سالی، مسائل برآمده از انسان‌مانند استخراج بیش از اندازه، بحران را تشدید می‌کند. برداشت بیش از اندازه از آب‌های زیرزمینی و جریان رودخانه برای مصارف کشاورزی، صنعتی و خانگی منجر به کاهش قابل توجه سلامت رودخانه شده‌است. توازن اکولوژیکی در خطر است زیرا زیستگاه‌های آبی رو به

وخامت گذاشته و گونه‌های بومی به‌دلیل کاهش منابع آبی در معرض خطر انقراض یا انقراض قرار دارند. فرسایش شدید و تغییرات زمین‌شناسی در منطقه، وضعیت اسفبار زاینده‌رود را تشدید کرده است. کوه‌های زاگرس اگرچه برای جمع‌آوری آب از طریق بارش برف و باران ضروری است، اما ناپایداری زمین‌شناسی را نیز تجربه می‌کند که می‌تواند الگوی جریان آب را تغییر دهد. فرسایش سواحل رودخانه‌ها و جنگل زدایی در این مناطق کوهستانی می‌تواند رسوب‌گذاری را تسریع کند و منجر به کاهش بیشتر ظرفیت رودخانه شود. با وقوع تغییرات زمین‌شناسی، هیدرولوژی سنتی حوضه مختل می‌شود و آسیب پذیری رودخانه را تشدید می‌کند. ایران در سال‌های اخیر با خشکسالی‌های شدیدی مواجه شده‌است که منجر به کاهش بارش‌های سالانه و در پی آن کاهش قابل توجهی در جریان آب رودخانه‌ها شده‌است. این خشکی‌های مداوم به‌طور مستقیم به کاهش منابع آب شرب و کشاورزی جوامع محلی منجر شده است. علاوه بر عوامل طبیعی، انسان نیز سهم به سزایی در تشدید این بحران داشته است. برداشت بیش از اندازه از آب‌های زیرزمینی و کاهش جریان رودخانه برای مصارف کشاورزی و صنعتی به‌شکل قابل توجهی سلامت و توازن اکولوژیکی زاینده‌رود را تهدید کرده است. رشته کوه زاگرس، که نقش اساسی در هیدرولوژی و اقلیم منطقه دارد، خود با چالش‌های زمین‌شناسی خاصی مواجه است. این کوه‌ها برای جذب باران و برف و تأمین آب رودخانه زاینده‌رود ضروری هستند، اما تغییرات زمین‌شناسی ناشی از فرسایش و ناپایداری می‌تواند الگوهای جریان آب را تغییر دهد. تخریب زیستگاه‌های آبی و جنگل‌زدایی در این مناطق می‌تواند فرآیند رسوب‌گذاری را تسریع کند و ظرفیت رودخانه را به طرز

معناداری کاهش دهد. فرسایش سواحل و تغییرات در ساختار زمین‌شناسی می‌تواند به‌طور مستقیم بر آسیب‌پذیری زایندهرود تأثیر بگذارد. با وقوع این تغییرات، هیدرولوژی سنتی حوضه مختل می‌شود و در نتیجه، توانایی اکوسیستم در تحمل فشارهای محیطی کاهش می‌یابد. با تشدید تغییرات اقلیمی و ظهور الگوهای آب و هوایی شدیدتر، پیامدهای ناشی از این بحران به‌سمت غیرقابل پیش‌بینی بودن حرکت می‌کند. این تغییرات احتمالاً به تأثیرات منفی بر تأمین آب برای زندگی روزمره و کشاورزی منجر می‌شود و ثبات اجتماعی و اقتصادی جوامع را تهدید می‌کند. رشته کوه زاگرس در این سناریوی حساس نقشی دوگانه دارد. از یک طرف برای جذب بارندگی و ذخیره برف فصلی که تغذیه زاینده‌رود است ضروری است. از سوی دیگر، تغییرات زمین‌شناسی درون این کوه‌ها می‌تواند بر سلامت و پایداری حوزه آبخیز تأثیر بگذارند. با تشدید تغییرات اقلیمی و ظهور الگوهای آب و هوایی شدید، پیامدهای این متغیرها منجر به اثرات غیرقابل پیش‌بینی هم‌بر تأمین آب و هم‌بر یکپارچگی ساختاری رودخانه می‌ش

| Scenario No. 1 | Scenario No. 2 | Scenario No. 3 | Scenario No. 4 | Scenario No. 5 |
|---|---|---|---|---|
| سامانه بارش زا: کاهش نسبی سامانه بارش زا | سامانه بارش زا: کاهش سامانه بارش زا | | | سامانه بارش زا: ادامه روند موجود |
| استحصال منابع آب در حوضه آبریز زاینده رود: استخراج بیش از حد از ظرفیت زاینده رود | | شیوه تخصیص آب: تخصیص بدون برنامه‌ریزی | | سامانه بارش زا: افزایش نسبی سامانه بارش زا |
| شیوه تخصیص منابع آب: فرهنگ سازی برای تخصیص منابع آب | | توپوگرافی زاگرس: فرسایش شدید با تغییرات اقلیمی | | شیوه تخصیص: تخصیص بهینه |

**شکل۳: تابلوی سناریوهای با سازگاری قوی و محتمل**

**۳. ۶. ۲. سناریوی دوم: سناریوی نیمه بهینه: آستانه تاب آوری هیدرولوژیکی**

کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در بافت رودخانه زاینده‌رود که در دهه‌های اخیر با چالش‌های خشک شدن قابل توجهی مواجه بوده است، موضوعی فزاینده است. رشته کوه زاگرس که یکی از ویژگی‌های مهم جغرافیایی ایران است، نقش اساسی در هیدرولوژی این منطقه دارد. پیچیدگی الگوهای بارندگی، به‌ویژه بارندگی متوسط در فصول حساس، یک سناریوی نیمه بهینه را ایجاد می‌کند. این سناریو را می‌توان به‌درستی آستانه تاب آوری هیدرولوژیکی نامید. ماهیت سناریوی نیمه بهینه حول چند عامل کلیدی می‌چرخد. بارندگی متوسط در طول فصول بحرانی ممکن است سطح آب قابل قبولی را حفظ کند، اما از برآورده کردن اوج تقاضا کوتاه است. آستانه‌ای که در آن منابع آب تحت فشار قرار می‌گیرند، به‌ویژه در مناطقی که تقاضای کشاورزی در بالاترین حد خود است، مشهود است تشدید کننده این موضوع، تمایل سطوح تولید به تجاوز جزئی از میانگین تعیین شده توسط میزان بارندگی بالا است که منجر به وضعیتی می‌شود که در آن تخلیه تدریجی رخ می‌دهد. این وضعیت با ویژگی‌های مورفولوژیکی منطقه تشدید می‌شود، جایی که کوه‌های زاگرس مانع احتباس مؤثر آب می‌شوند و به افزایش زهکشی کمک می‌کنند. رشته کوه‌های زاگرس بر الگوهای اقلیمی و هیدرولوژیکی منطقه تأثیر به سزایی دارند. آنها به‌عنوان سدی در برابر بادهای پر از رطوبت عمل می‌کنند و بارندگی‌های کوه نگاری را تسهیل می‌کنند که می‌تواند به نفع زاینده‌رود باشد. در طول دوره‌های بارندگی متوسط، کوه‌های زاگرس ممکن است رطوبت اضافی را جذب کنند که امکان کاهش موقت تنش آبی را فراهم می‌کند. با این حال، ویژگی‌های

مورفولوژیکی محدوده به‌جای احتباس آب، زهکشی سریع را تشویق می‌کند. چرخه هیدرولوژیکی در این منطقه تا حد زیادی توسط تغییرات توپوگرافی که کوه‌های زاگرس ارائه می‌دهند، دیکته می‌شود. شیب‌های تند و شرایط زمین‌شناسی باعث افزایش رواناب سریع می‌شود، که در عین اینکه در رویدادهای بارندگی بسیار مفید است، چالش‌هایی را در حفظ سطح آب کافی در شرایط نیمه بهینه که با بارش متوسط مشخص می‌شود، ایجاد می‌کند. در دهه‌های اخیر، مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه حوضه زاینده‌رود، با چالش‌های جدی کمبود آب مواجه شده‌اند. این مشکل با توجه به تأثیرات تغییرات اقلیمی و الگوهای بارندگی متغیر، مشهودتر شده‌است. رشته کوه زاگرس که یکی از ویژگی‌های جغرافیایی عمده ایران به‌شمار می‌رود، در هیدرولوژی منطقه نقشی اساسی ایفا می‌کند. بارندگی در این منطقه غالباً با پیچیدگی‌هایی همراه است که سبب شکل‌گیری سناریویی نیمه بهینه می‌شود. این سناریو به‌عنوان آستانه تاب آوری هیدرولوژیکی شناخته می‌شود، جایی که بارندگی متوسط در فصل‌های حساس ممکن است تنها به حفظ سطح آب کافی کمک کند، اما به‌شدت در پاسخ به اوج تقاضا از کشاورزی ناکافی است. میزان تقاضا در این نواحی، به‌ویژه در زمان‌هایی که کشاورزی در اوج خود است، فشار زیادی بر منابع آب وارد می‌آورد. یکی از عوامل مهم در این سناریو، نقش مورفولوژیکی کوه‌های زاگرس است. شرایط توپوگرافی، شیب‌های تند و زمین‌شناسی خاص این کوهستان، سبب افزایش رواناب و در همان سان کاهش احتباس آب می‌شود. کوه‌های زاگرس به‌عنوان مانعی برای بادهای مرطوب عمل می‌کنند و بارندگی‌های کوه‌نگاری را تسهیل می‌کنند، اما این ویژگی‌ها در پایان منجر به زهکشی

سریع آب و ایجاد تنش در توسعه پایدار منابع آبی می‌شود. ضرورت سازگاری استراتژی‌های مدیریتی با واقعیت‌های هیدرولوژیکی و جغرافیایی منطقه به روشنی احساس می‌شود. با توجه به تعادل ظریف بین بارش، روندهای آب و الزامات افزایش کشاورزی در این نواحی، نیاز به برنامه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب به‌شدت تأکید می‌گردد. تراتژی‌هایی که رویکردی جامع نسبت به عوامل توپوگرافی، اقلیمی و انسانی داشته‌باشند، ضرورت دارند تا ضمن حفاظت از منابع آبی، ظرفیت تاب آوری هیدرولوژیکی این مکان را حفظ کنند. بنابراین سناریوی نیمه بهینه ارائه شده توسط آستانه تاب آوری هیدرولوژیکی چارچوبی برای درک تعادل ظریف بین بارش، مدیریت آب و تأثیرات جغرافیایی بر هیدرولوژی رودخانه زاینده‌رود ارائه می‌دهد. رشته کوه زاگرس هم به‌عنوان یک دارایی و هم به‌عنوان یک محدودیت عمل می‌کند و نیاز به استراتژی‌های مدیریت یکپارچه منابع آب را که عوامل توپوگرافی، اقلیمی و انسانی را در نظر می‌گیرد، برجسته می‌کند.

## ۴. نتیجه‌گیری

عوامل طبیعی، به‌ویژه کوه‌ها، تأثیر عمیقی بر هیدرولوژی رودخانه‌ها دارند. تأثیر متقابل بارش کوه نگاری،[1] ذوب برف و دینامیک رسوب، تصویر پیچیده‌ای از روش عملکرد این سیستم‌های طبیعی ارائه می‌دهد. از آنجایی که تغییرات آب و هوا و تأثیرات انسانی به تغییر محیط‌زیست منجر می‌شود، درک نقش کوه‌ها در خشک شدن رودخانه‌ها برای مدیریت مؤثر و تلاش‌های حفاظتی حیاتی می‌شود. در جواب سؤال فرعی متغیرهای کلیدی (پیشران) موثر

[1] شاخه‌ای از زمین‌شناسی است که به بررسی وضعیت، مشخصات، نحوه شکل گیری و ساختارهای کوهستان‌ها، رشته‌کوه‌هاو سیستم‌های کوهستانی می‌پردازد.

برخشک شدن زاینده‌رود با توجه به نقش رشته کوه زاگرس چیست؟ متغیرهای سامانه‌های بارش زا، شیوه‌های تخصیص آب، استیحصال منابع آب در حوضه آبریز زاینده‌رود، توپوگرافی و ریخت شناسی جغرافیایی رشته کوه زاگرس و شیوه‌های فرهنگی به کارگیری آب به‌عنوان متغیرهای کلیدی بر نقش رشته کوه زاگرس در سناریو فرا روی خشکیدگی رودخانه زاینده‌رود شناسایی شدند. و همان طور که در سؤال محتمل‌ترین و قوی‌ترین سناریو در مورد خشک شدن زاینده‌رود با استفاده از نرم‌افزار Senario Wizard سناریو بحرانی با نام رشته کوه زاگرس شمشیر دو لبه معضل خشکیدگی زاینده‌رود استخراج شد. باید افزود، حفاظت از اکوسیستم‌های کوهستانی و سیستم‌های رودخانه‌ای آنها در تضمین منابع آب پایدار برای نسل‌های آینده حیاتی خواهد بود. رشته کوه زاگرس نقش محوری در پویایی اطراف زاینده‌رود، به‌ویژه در زمینه روند نگران کننده آن به‌سمت خشک شدن دارد. از این سوی رشته کوه‌های زاگرس هم به‌عنوان منبع آب حیاتی و هم به‌عنوان تهدیدی برای سلامت رودخانه عمل می‌کنند. تأثیر متقابل تغییرات آب و هوایی، افزایش تقاضای آب، دگرگونی‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژی پیچیده منطقه، شمشیری دو لبه را نشان‌می‌دهد که بر نیاز فوری به مداخله تأکید می‌کند. خشک شدن زاینده‌رود، آبراه حیاتی برای جوامع روستایی و شهری، حاکی از بحران زیست محیطی است. وابستگی متقابل رودخانه و اکوسیستم‌های اطراف آن نیاز به اقدام فوری برای جلوگیری از پیامدهای فاجعه‌بار دارد. درک ماهیت چند وجهی چالش‌های برآمده از خشکسالی‌های شدید، استخراج بیش از اندازه منابع آب و پیامدهای اکولوژیکی رشته‌کوه‌های زاگرس برای برنامه‌ریزی استراتژی‌های مؤثر و پایدار

مدیریت آب توسط ذی‌نفعان بایسته‌است. برای رفع این نگرانی‌ها، اتخاذ یک رویکرد جامع ضروری است. تلاش‌های مشترک بین سازمان‌های دولتی، دانشمندان و جوامع محلی برای توسعه استراتژی‌های مدیریت آب که حفاظت، استفاده کارآمد از منابع و بازیابی تعادل اکولوژیکی را ترویج می‌کند، ضروری است. همچنین باید تلاش‌ها به‌سمت احیای جنگل‌ها و شیوه‌های کشاورزی پایدار انجام شود که می‌تواند فرسایش را کاهش داده و محیط‌زیست حوضه آبخیز سالم‌تری را تقویت کند. افزون بر تحلیل متغیرهای کلیدی، بررسی تفکیکی عوامل انسانی و طبیعی و تحلیل تعامل آن‌ها نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب نمی‌تواند صرفاً به اقدامات فنی یا اقلیمی محدود شود. این به این معناست که صرفاً بهبود تکنیک‌های آبیاری یا بهینه‌سازی سیستم‌های جمع‌آوری بارش کافی نخواهد بود، بلکه نیاز به یک رویکرد جامع و چندجانبه در مدیریت منابع آب احساس می‌شود. برای مثال، بازنگری در شیوه‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری آب به‌ویژه در حوضه‌های آسیب‌پذیر مانند زاینده‌رود، امری اجتناب‌ناپذیر است. این نهادها باید به چالش‌های آینده و چگونگی سازگاری با تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی از جمله افزایش نیاز به آب و تغییرات کاربری زمین توجه داشته باشند. توپوگرافی زاگرس نه‌تنها نقش مؤثری در تأمین و توزیع منابع آب دارد، بلکه در صورت غفلت از ویژگی‌های مورفولوژیکی آن، می‌تواند منبع ناپایداری هیدرولوژیکی شود. به عبارت دیگر، عدم توجه به ساختارهای زمین‌شناسی و توزیع فضایی آب در این منطقه می‌تواند منجر به بحران‌های شدیدتری نظیر سیلاب‌ها، کمبود آب و فرسایش خاک شود.

این وضعیت نیاز به مدیریت دقیق و علمی و استفاده از اطلاعات جغرافیایی و هیدرولوژیکی در برنامه‌ریزی منابع آب را ضروری می‌سازد. همچن، نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی به عنوان یک متغیر تشدیدگر بحران باید در هر راهکار مدیریتی مورد توجه ویژه قرار گیرد. این نابرابری‌ها می‌توانند به وضعیت نامناسب دسترسی به منابع آب و در نتیجه تشدید مشکلاتی مانند کمبود آب در نواحی فقیرتر منجر شوند. بنابراین، هر برنامه مدیریتی باید فرآیندهای مشارکتی را در بر گیرد و به نیازهای گروه‌های مختلف اجتماعی و اقتصادی توجه کند. این رویکرد نه‌تنها باعث افزایش عدالت در توزیع منابع آب می‌شود، بلکه به بهبود شرایط زندگی در منطقه و کاهش تنش‌های اجتماعی ناشی از کمبود آب کمک خواهد کرد. با قرار گرفتن زاینده‌رود در تقاطع بحرانی بین فشارهای طبیعی و انسانی، اقدام عاجل و قاطع برای جلوگیری از یک فاجعه زیست محیطی زود هنگام ضروری است. این مسئولیت بر دوش همه ذی‌نفعان است تا در تعهد خود نسبت به مدیریت منابع پایدار برای رودخانه متحد شوند. با انجام این کار، آنها می‌توانند نه‌تنها آینده زاینده‌رود، بلکه رفاه جوامع متکی بر آن را تضمین کنند و اطمینان حاصل کنند که هم رودخانه و هم اکوسیستم‌های اطراف آن برای نسل‌های آینده شکوفا می‌شوند. عدم اقدام ممکن است خطر محکوم کردن رودخانه و جوامع وابسته به آن را به آینده‌ای مملو از خشک‌سالی و ناامیدی داشته‌باشد.

**پیشنهاد**

برای ارتقای اثربخشی برنامه‌ریزی منابع آب در حوضه زاینده‌رود، ارائه چندین پیشنهاد به منظور مدیریت بهینه و پایدار منابع آبی ضروری است. نخست، توسعه سامانه‌های پایش توپوگرافی و اقلیم‌محور که امکان سنجش دقیق تغییرات بارش، دما و ذخایر

برف در ارتفاعات زاگرس را فراهم می‌کند، به عنوان ابزاری کلیدی در شناسایی الگوهای تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آبی عمل خواهد کرد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بهتر برنامه‌ریزی کنند. دوم، طراحی برنامه‌های حمایتی از جوامع آسیب‌پذیر، شامل بیمه کشاورزی در برابر خشکسالی، بهبود زیرساخت‌های آبرسانی در مناطق عشایری و حمایت معیشتی در دوره‌های تنش آبی، نقش حیاتی در کاهش آسیب‌پذیری جوامع محلی در برابر چالش‌های آب و هوایی دارند و به بهبود کیفیت زندگی آن‌ها کمک می‌کند. سوم، ایجاد پایگاه داده‌های تعاملی که به تلفیق داده‌های طبیعی (هیدرولوژیکی و اقلیمی) با داده‌های انسانی (الگوی مصرف، توسعه شهری و فقر آبی) می‌پردازد، می‌تواند به تصمیم‌سازی دقیق‌تر در سطوح محلی و ملی کمک کرده و باعث ارتقاء هم‌افزایی میان داده‌های تاریخی و اطلاعات جدید شود. نهایتاً، طراحی سناریوهای تاب‌آور با مشارکت ذی‌نفعان محلی، مبتنی بر تحلیل‌های آینده‌پژوهانه و مدل‌سازی پویای سیستم، برای سیاست‌گذاری انعطاف‌پذیر در برابر عدم قطعیت‌های اقلیمی و مدیریتی امری ضروری است. با ایجاد فضا برای همکاری و تبادل نظر میان ذی‌نفعان مختلف، می‌توان به برنامه‌های مدیریتی مؤثرتری دست یافت که تمامی ابعاد اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی را در نظر گرفته و به تقویت تاب‌آوری جوامع در برابر تغییرات اقلیمی و مؤثرتر کردن تقسیم منابع آب میان استفاده‌کنندگان کمک کند. برای تسهیل این اقدامات بایسته، باید یک پلتفرم متشکل از ذینفعان؛ دربرگیرنده نمایندگان دولت، دانشمندان محیط‌زیست، رهبران محلی و اعضای جامعه ایجاد شود. این پلتفرم برای اولویت‌بندی تحقیقات، اجرای شیوه‌های حفاظت از آب و ترویج توسعه‌های

کشاورزی پایدار به‌طور مشترک کار خواهد کرد. افزون بر این، برنامه‌های آموزش جامعه باید برای افزایش آگاهی در مورد اهمیت زیست محیطی زاینده‌رود و پیامدهای سوء مدیریت منابع آغاز شود. با تقویت همکاری و مسئولیت محلی، می‌توانیم حس سرپرستی مشترکی را پرورش دهیم که برای حفظ این رودخانه ضروری حیاتی است.

**ملاحظات اخلاقی**

**حامی مالی:** این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان های تأمین مالی دریافت نکرده است.
**تعارض منافع:** طبق اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.
**برگرفته از پایان نامه/رساله:** این مقاله برگرفته از پایان نامه اسماعیل دهقان بوده است.

## References

- Aftabi, Zakieh; Kaviani-Rad, Morad and Kardan-Moghaddam, Hamid (2014). Explanation of upstream scenarios of Zab River transfer to Lake Urmia. Geographical Studies of Coastal Areas, 5(1), 37-55 .
- Aftab, Zakieh; Yousefi-Shatouri, Mohammad and Kaviani-Rad, Morad (2014). Systematic analysis of factors affecting water flow in the Zayandeh-Rood watershed, Geographical Explorations of Desert Areas, 5(1), 17-32 .
- Jafari, Gholam-Hasan and Fouladi, Narges (2014). Analysis of precipitation changes in the east and west of the main Zagros thrust, Spatial Planning, 13(48), 97-116 .
- Murid, Saeed and Hosseini-Safa, Hamideh

(2014). The role of Iranian glaciers on river flow and estimates of their volume (2013). Geographical Research, 13(1), 17-32

- Dai, A., Zhao, T., & Chen, J. (2018). Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, *4*, 301-312.

- Dimri, A. P., Thayyen, R. J., Kibler, K., Stanton, A., Jain, S. K., Tullos, D., & Singh, V. P. (2016). A review of atmospheric and land surface processes with emphasis on flood generation in the Southern Himalayan rivers. *Science of the Total Environment*, *556*, 98-115.

- Heusser, L. E., Kirby, M. E., & Nichols, J. E. (2015). Pollen-based evidence of extreme drought during the last Glacial (32.6–9.0 ka) in coastal southern California. *Quaternary Science Reviews*, *126*, 242-253.

- Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J. J., ... & Winder, M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*, *5*(5), 418-435.

- Hussain, M. I., Muscolo, A., Farooq, M., & Ahmad, W. (2019). Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agricultural water*

- Motiee, S., Motiee, H., & Ahmadi, A. (2024). Analysis of rapid snow and ice cover loss in mountain glaciers of arid and semi-arid regions using remote sensing data. *Journal of Arid Environments*, *222*, 105153.
- Mukherjee, S., Mishra, A., & Trenberth, K. E. (2018). Climate change and drought: a perspective on drought indices. *Current climate change reports*, *4*, 145-163.
- Noroozi, J., Talebi, A., Doostmohammadi, M., & Bagheri, A. (2020). The Zagros mountain range. *Plant Biogeography and Vegetation of High Mountains of Central and South-West Asia*, 185-214
- Khair, S. M., Mushtaq, S., Reardon-Smith, K., & Ostini, J. (2019).Diverse drivers of unsustainable groundwater extraction behaviour operate in an unregulated water scarce region. *Journal of environmental management*, *236*, 340-350.
- Islam, S. T., Rahman, S. H., Matin, M. A., Dey, A., Talukder, B., Sanyal, N., ... & Akand, K. (2024). State of the World's Rivers. *Annual Review of Environment and Resources*, *49*.1-20
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Cambridge University Press.

- Roshandel, Arbatani T., S. Labafi, and M. Robati. "Effects of social media on the environmental protection behaviour of the public (Case study: Protecting Zayandeh-rood river environment)." (2016): 237-244.
- Tenorio, G. E., Vanacker, V., Campforts, B., Álvarez, L.,
- Zhiminaicela, S., Vercruysse, K., ... & Govers, G. (2018). Tracking spatial variation in river load from Andean highlands to inter-Andean valleys. *Geomorphology*, *308*, 175-189.
- World Resources Institute. (2018). *Aqueduct Water Risk Atlas.* Retrieved.
- Ye, Z., Chen, Y., & Li, W. (2014). Ecological water rights and water-resource exploitation in the three headwaters of the Tarim River. *Quaternary International*, *336*, 20-25.
- Zhang, Q., Chen, Y., Li, Z., Fang, G., Xiang, Y., Li, Y., & Ji, H. (2020). Recent changes in water discharge in snow and glacier melt-dominated rivers in the Tienshan Mountains, central Asia. *Remote Sensing*, *12*(17), 2704.