

## Assessment of water security in the Metropolis of Mashhad in light of climate change and hydropolitical relations in the Harirud Basin

Fatemeh Bakhshi Shadmehri<sup>1</sup>
 , Seyyed Hadi Zarghani<sup>2\*</sup>
 , Abbasali Dadashi Roudbari<sup>3</sup>

1- PhD Student in political geography, Department of geography, Faculty of literature and humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: [fa.bakhshi@alumni.um.ac.ir](mailto:fa.bakhshi@alumni.um.ac.ir)

2- (\*Corresponding author) Associate professor of political geography, Department of geography, Faculty of literature and humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: [h-zarghani@um.ac.ir](mailto:h-zarghani@um.ac.ir)

3- Assistant professor of climatology, Department of geography, Faculty of literature and humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, Email: [dadashiabbasali@gmail.com](mailto:dadashiabbasali@gmail.com)

### Article Info

#### Date of receive:

2025/08/22

#### Date of last review:

2025/10/24

#### Date of accept:

2025/10/26

#### Date of online publication:

2025/10/26

### Keywords:

Water security,  
Hydropolitics,  
Climate change,  
Afghanistan,  
Mashhad,  
Harirud

### Extended Abstract

#### Introduction

Water, as the most vital element for human survival and socio-economic development, plays a pivotal role in ensuring national, regional, and human security. In recent decades, the continuous decline in freshwater resources—driven by population growth, industrialization, urban expansion, and climate change—has made water scarcity one of the most critical global challenges. Metropolises such as Mashhad, which are heavily dependent on shared transboundary water resources, have become increasingly vulnerable to water shortages and water insecurity, particularly due to their significant reliance on the Harirud river basin and water infrastructure projects like the Doosti Dam. Changes in neighboring countries' water policies (notably Afghanistan) and intensified global warming have further complicated the crisis, making comprehensive evaluation of water sustainability and security for Mashhad—with emphasis on hydro-political and climatic factors—an essential prerequisite for sustainable management and planning.

#### Materials and Methods

This study adopts an applied and mixed-methods approach (quantitative and qualitative) to provide a comprehensive assessment of Mashhad's water resources and the effects of upstream hydro-political policies. In the quantitative section, trends in climatic variables (temperature, precipitation, and drought) were analyzed using satellite imagery and calculation of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to evaluate the impacts of climate change and drought on regional water resources. ... ► Page 144

### How to Cite:

Bakhshi Shadmehri, F. Zarghani, S.H. Dadashi Roudbari, A. (2025). Assessment of water security in the Metropolis of Mashhad in light of climate change and hydropolitical relations in the Harirud Basin. Scientific-Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 34(135), 143-162.

The qualitative analysis involved document review, examination of treaties and policies, and geopolitical analysis of relationships between Afghanistan (upstream country) and downstream countries (Iran and Turkmenistan), in order to elucidate dimensions of water competition and cooperation. Water level data for the dams were also assessed using remote sensing and statistical tests to clarify the correlation between the operations of Salma and Doosti Dams.

### Discussion and Findings

Analysis of climatic trends over the past three decades (1991–2020) in the Harirud Basin reveals considerable annual precipitation variability and a persistent decline in rainfall, especially in downstream and urban areas such as Mashhad. Concurrently, annual temperature trends have shown an upward trajectory, with mean temperatures rising by over 2°C compared to the 1990s—a phenomenon that has increased evapotranspiration, reduced precipitation efficiency, intensified soil aridity, and put water resource sustainability at risk.

SPEI analysis indicates that drought episodes have become more frequent and severe in recent decades. During critical years such as 2000–2002, this has led to a noticeable reduction in inflow to the Salma and Doosti Dams. The consequences include decreased soil moisture, reduced river flow, and constrained dam storage and supply capacity. Field observations and satellite-based data confirm a continued declining trend in the water levels of these dams.

In the realm of transboundary and hydro-political relations, the findings show that Afghanistan, as the upstream country, has increasingly pursued the development of dam infrastructure (including Salma, Pashdan, and Kabdan) and maximum utilization of shared water resources. The absence of binding treaties, weak political will for cooperation, and Afghanistan's emphasis on national sovereignty have resulted in diminished water shares for Iran and Turkmenistan and heightened downstream vulnerability. Statistical analysis of Doosti Dam water levels confirms that the operation of Salma Dam exerts a significant and direct influence on Mashhad's water supply status.

Moreover, the lack of effective and multilateral cooperation frameworks has intensified a climate of competition, distrust, and even regional tension over water management. Iran's high dependence on shared water resources—compounded by climatic pressures—places it in a highly vulnerable position, highlighting the necessity for enhanced flexibility, improved risk management, investment in resource management technologies, and stronger efforts to achieve more effective agreements.

### Conclusions

Research on the Harirud Basin demonstrates that the combined impacts of climate change—particularly reduced rainfall and increased temperatures—have intensified drought trends and reduced available water in the region. Diminished average annual precipitation and higher evapotranspiration have weakened surface and groundwater resources, while drought indices underscore the growing severity and frequency of dry periods in recent decades. Both statistical analysis and field observations indicate that reservoir volumes behind key dams (Salma and Doosti) are influenced not only by annual precipitation but are highly dependent on upstream water management policies. The construction of Salma Dam and other water infrastructure projects have significantly reduced water deliveries to Iran and Turkmenistan, posing a serious threat to Mashhad's water security. In recent years, Iran's share of Harirud water has declined sharply, and in some years, only a negligible portion of the legally recognized allocation has been delivered.

Modeling results suggest that, if current trends and Afghanistan's increased water withdrawals continue, the Doosti Dam will, under optimistic scenarios, be able to meet Mashhad's potable water needs only until 2036 (1415 in the Iranian calendar); under severe drought scenarios, even less. Afghanistan, invoking national sovereignty and water securitization, and benefiting from foreign support, continues to expand its water infrastructure and restrict downstream flows, showing little inclination towards effective negotiation and binding agreements with Iran.

Despite these challenges, opportunities still exist to strengthen bilateral cooperation—with a focus on shared benefits and services (such as electricity exports, transfer of irrigation technologies, expanded trade, and leveraging historical and cultural ties like the Silk Road)—to build trust and achieve sustainable resource management. Global experiences in water governance demonstrate that multifaceted strategies—including enhanced water diplomacy, binding agreements, diversification of urban water supplies, increased efficiency, and scientific monitoring and modeling—can boost the resilience of cities such as Mashhad to climatic and hydro-political shocks. In summary, the long-term sustainability and security of Mashhad's water resources requires a comprehensive, interdisciplinary, and participatory governance approach that simultaneously addresses regional climatic, political, and social conditions, and recognizes the necessity of regional cooperation with upstream countries.



صفحات ۱۶۲ - ۱۴۳

فصلنامه علمی - پژوهشی

اطلاعات جغرافیایی (سپهر) دوره ۳۴، شماره ۱۳۵، پاییز ۱۴۰۴



مقاله پژوهشی

doi <https://doi.org/10.22131/sepehr.2025.2069413.3150>

## ارزیابی امنیت آب کلان شهر مشهد در پرتو تغییر اقلیم و مناسبات هیدروپلیتیکی حوضه آبریز هریرود

فاطمه بخشی شادمهری<sup>۱</sup>، سیدهادی زرقانی<sup>۲\*</sup>، عباسعلی داداشی رودباری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری جغرافیای سیاسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران [fa.bakhshi@alumni.um.ac.ir](mailto:fa.bakhshi@alumni.um.ac.ir)  
 ۲- (\*نویسنده مسئول) دانشیار جغرافیای سیاسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران [h-zarghani@um.ac.ir](mailto:h-zarghani@um.ac.ir)  
 ۳- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران [dadashiabbasali@gmail.com](mailto:dadashiabbasali@gmail.com)

### چکیده

امروزه با رشد جمعیت، تشدید تغییرات اقلیمی و گسترش تنش‌های منطقه‌ای، امنیت آب به یکی از چالش‌های راهبردی برای تحقق توسعه پایدار، به‌ویژه در کشورهایی که با بحران کم‌آبی روبه‌رو هستند، بدل شده است. کلان شهر مشهد، به دلیل جمعیت ساکن و میزبانی از حدود ۲۰ میلیون زائر، سالانه با تنگنای جدی آبی مواجه است و امنیت آب آن وابستگی شدیدی به منابع فرامرزی، به‌ویژه حوضه آبریز هریرود و سد دوستی دارد که ۶۰ درصد آب شرب این شهر را تأمین می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی امنیت آب کلان شهر مشهد، به تحلیل تأثیرات دوگانه «تغییر اقلیم» و «سیاست‌های هیدروپلیتیکی» بالادست (کشور افغانستان) نسبت به کشور پایین دست (کشور ایران) می‌پردازد. برای این منظور، با رویکردی ترکیبی، از تحلیل داده‌های CRU برای سنجش روند بارش، دما، تبخیر و شاخص خشکسالی SPEI و از تحلیل اسنادی و ژئوپلیتیکی به منظور بررسی سیاست‌های آبی بالادست استفاده شده است. یافته‌های اقلیمی نشان‌دهنده کاهش میانگین ۱۲/۳ میلی‌متر در بارش هر دهه، افزایش بیش از دو درجه‌ای میانگین دما و افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها است. در بُعد مناسبات هیدروپلیتیک، افغانستان با اتخاذ سیاست امنیتی‌سازی آب، پروژه‌های سدسازی متعددی را برای کنترل و بهره‌برداری حداکثری از منابع آبی خود دنبال می‌کند. این اقدامات که با فقدان چارچوب قانونی دوجانبه در حوضه هریرود همراه است، منجر به کاهش شدید جریان ورودی به سد دوستی شده است. نتایج نشان می‌دهد که امنیت آب مشهد به طور مستقیم تحت تأثیر هم‌زمان این دو عامل قرار گرفته و برای افزایش تاب‌آوری، نیازمند راهبردهای مدیریتی یکپارچه شامل تقویت دیپلماسی آب، تنوع‌بخشی به منابع (بازچرخانی و آب‌شیرین‌کن) و ارتقای بهره‌وری مصرف است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۳۱

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۴/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۰۴

تاریخ انتشار:

۱۴۰۴/۰۸/۰۴

### واژه‌های کلیدی:

امنیت آب؛

هیدروپلیتیک؛

تغییر اقلیم؛

افغانستان؛

مشهد؛

هریرود

### استناد به این مقاله:

بخشی شادمهری، ف؛ زرقانی، س.ه؛ داداشی رودباری، ع (۱۴۰۴) ارزیابی امنیت آب کلان شهر مشهد در پرتو تغییر اقلیم و مناسبات هیدروپلیتیکی حوضه آبریز هریرود؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۴(۱۳۵)، ۱۶۲ - ۱۴۳.

## ۱- مقدمه

امنیت انسانی و محیط زیست باشد. عصر حاضر را می‌توان سرآغاز بحرانی دانست که آب، عامل بنیادین آن را تشکیل می‌دهد. بحران کم‌آبی که امروزه گستره وسیعی از کره زمین را در بر گرفته، آسیب‌ها و تهدیدهای جدی را برای جوامع بشری به همراه داشته است. امنیت آب تحت فشار فزاینده عواملی چون رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی، آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی، بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و چالش‌های ناشی از تغییر اقلیم قرار دارد. در این میان، شهرها به مثابه کانون‌های تحولات جهان معاصر، در خط مقدم این چالش‌ها قرار گرفته‌اند. بر اساس ارزیابی پژوهشگران مؤسسه فناوری ماساچوست (MIT)، بیش از نیمی از جمعیت ۹/۷ میلیارد نفری جهان در سال ۲۰۵۰ در مناطقی با تنش آبی زندگی خواهند کرد؛ عاملی که در ترکیب با فقر، تخریب محیط زیست و ضعف‌های نهادی، وضعیت را بغرنج‌تر می‌سازد (Khosravani & Tohidfam, 2020).

یکی از متغیرهای کلیدی در بحرانی‌تر شدن وضعیت امنیت آب، تغییر اقلیم است. مطالعات Hsiang et al (۲۰۱۳) ارتباط قوی میان تغییرات آب‌وهوایی و تنش‌های انسانی را در سطوح زمانی و مکانی مختلف اثبات کرده‌اند. همچنین تحقیقات McDonald et al (۲۰۱۱) با مدل‌سازی تأکید می‌کند که حدود ۱۵۰ میلیون نفر در شهرهای در حال توسعه به دلیل کمبود دائمی آب در معرض تنش‌های بالقوه قرار خواهند گرفت. در جنوب غرب آسیا با توجه به حساسیت‌های سیاسی و منابع مشترک، مطالعاتی مانند پژوهش مشفق و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی دکترین‌های تقسیم آب‌های مرزی در حوضه آبریز هریرود پرداخته‌اند که نشان می‌دهد کاهش جریان ورودی به سد دوستی تهدید جدی برای تأمین آب مشهد است. همچنین گزارش‌های بین‌المللی مانند گزارش مؤسسه صلح خاورمیانه و برنامه توسعه سازمان ملل متحد نشان می‌دهند تغییر اقلیم به عنوان ضریب تهدید، فشار بر منابع آبی خاورمیانه را تشدید نموده و نبود توافق‌های پایدار، احتمال درگیری‌های منطقه‌ای را

در مفهوم گسترده‌ی خود، به مثابه‌ی یکی از بنیادی‌ترین حقوق بشر، همواره مورد توجه جوامع بین‌المللی بوده است. در این میان، تأمین آب پایدار برای بخش‌های مختلف یک واحد جغرافیایی، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی، نقشی تعیین‌کننده در امنیت واحدهای سیاسی و فضاهای انسانی ایفا می‌کند. آب، به‌عنوان حیاتی‌ترین و محوری‌ترین عنصر برای بقای بشر، نه تنها منبعی راهبردی و محدودکننده برای توسعه‌ی اقتصادی و اجتماعی محسوب می‌شود، بلکه به مثابه‌ی عاملی مهم و گران‌بها، در شکل‌دهی به مناسبات و اگراییانه یا همگرایانه میان دولت‌ها و کشورها نیز نقش‌آفرینی می‌کند. داده‌ها نشان می‌دهند که منابع محدود آب شیرین در واحدهای سیاسی-فضایی با روندی کاهنده مواجه هستند. این در حالی است که عواملی چون فرایند صنعتی‌شدن، تلاش برای تأمین امنیت غذایی، افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، به طور فزاینده‌ای بر میزان تقاضا و مصرف آب افزوده‌اند (Movlaie et al, 2021). کمبود منابع آب و نزدیک‌شدن این چالش به نقطه‌ی بحران، کشورهای مختلف، به‌ویژه آن دسته از کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان را بر آن داشته است تا در سیاست‌گذاری‌ها و تصمیم‌گیری‌های راهبردی خود، توجهی ویژه به مسئله‌ی منابع آبی مبذول دارند (Deanat et al, 2019). افزون بر این، در دهه‌های اخیر، تغییر اقلیم نیز بر شدت تنگناهای موجود در عرصه‌ی منابع آب دامن زده است. مجموعه‌ی این عوامل و چالش‌ها، زمینه‌ساز ظهور و گسترش مفهوم هیدروپلیتیک و توسعه‌ی ابعاد روش‌شناختی و معرفت‌شناختی آن شده است (Movlaie et al, 2021). درک این پویایی‌ها برای ارزیابی امنیت آب، به‌ویژه در مقیاس‌های شهری که با تمرکز جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی روبه‌رو هستند، از اهمیت بسزایی برخوردار است. آب، به‌عنوان عنصری حیاتی، پیوندی ناگسستنی با امنیت غذایی، انرژی، رشد اقتصادی و امنیت انسانی دارد و کمبود آن می‌تواند زمینه‌ساز منازعات و جنگ‌هایی با پیامدهای وخیم برای

کوتاه مدت به مفهوم آب و عدم اتخاذ راهبردهای اساسی در کنار تحولات بین‌المللی و افزایش تقاضا، تهدیدی جدی برای امنیت آب این کلان‌شهر محسوب می‌شود. از این منظر، ضرورت توجه به ارزیابی و سنجش دقیق‌تر امنیت آب، با تأکید بر دو مؤلفه اثرگذار تغییر اقلیم در حوضه آبریز هریرود (به‌عنوان منبع تأمین آب سد دوستی) و سیاست‌های آبی کشورهای همسایه ایران و افغانستان، به وضوح قابل درک است. تضمین امنیت آب شهری، چالشی فوری است که در صورت عدم توجه کافی، می‌تواند امنیت غذایی، اقتصادی، اکولوژیکی و ملی را به مخاطره اندازد. امنیت آب به یکی از اولویت‌های اصلی سیاستگذاران و دولت‌ها تبدیل شده و به‌عنوان یک مفهوم کلیدی، طی دو دهه گذشته در مجموعه گسترده‌ای از مطالعات و مباحثات مورد توجه فزاینده قرار گرفته و به الگویی رایج در میان محققان، شرکای توسعه و سیاستگذاران متمرکز بر ارزش افزوده به مدیریت آب شهری بدل شده است (Vorosmarty, 2010). هدف اصلی این پژوهش، مطالعه و ارزیابی جامع امنیت آب شهری مشهد با تأکید بر تحلیل نظام‌مند تأثیرات متقابل تغییر اقلیم و سیاست‌های هیدروپلیتیکی افغانستان بر پایداری منابع آب این کلان‌شهر است.

تضمین امنیت آب شهری چالشی فوری است که در صورت عدم توجه کافی، می‌تواند امنیت غذایی، اقتصادی، اکولوژیکی و ملی را به مخاطره اندازد. با توجه به اینکه امنیت آب به یکی از اولویت‌های اصلی سیاستگذاران تبدیل شده و این اولویت‌بندی در زمینه منابع مشترک بین‌المللی با حساسیت و پیچیدگی بیشتری مطرح است، پرداختن به این مسئله پژوهش‌های بین‌رشته‌ای با در نظر گرفتن تعامل و بازخورد مؤلفه‌های گوناگون را می‌طلبد.

## ۲- داده و روش

### ۲-۱- روش تحقیق

روش تحقیق پژوهش حاضر از منظر هدف، یک تحقیق کاربردی است که برای ارزیابی جامع وضعیت منابع آب

افزایش می‌دهد (Ecopeace Middle East, 2022, UNDP, 2020). شواهد متعددی نشان می‌دهد که تغییرات اقلیم، پیامدهای نامطلوبی برای بخش وسیعی از جهان به همراه خواهد داشت. تأثیرات تغییر اقلیم به شیوه‌ای یکسان یا همزمان پدیدار نمی‌شوند؛ برخی ناگهانی و برخی دیگر به تدریج و به‌طور مداوم ظاهر می‌شوند و حتی ممکن است تأثیرات متعددی به‌طور همزمان و در ترکیبات مختلف رخ دهند. کلان‌شهرها، به‌عنوان نقاط گرهی در سیستم جهانی، تحت تأثیر مجموعه‌ای از تحولات کلان در مقیاس‌های محلی، ملی، منطقه‌ای و جهانی قرار دارند. تغییر اقلیم جهانی، ویژگی‌های جغرافیایی خاص کلان‌شهرها، مسائل زیست‌محیطی و کمبود آب‌های زیرزمینی از یک سو، و سیاست‌های بین‌المللی و دیپلماسی آب با کشورهای همسایه از سوی دیگر، شرایط ویژه‌ای را برای امنیت آب در کلان‌شهرهایی نظیر مشهد رقم زده است. در حوزه منابع آب مشترک و فرامرزی، همکاری و توافق میان کشورهای همسایه از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا بدون چنین فرایندی، تداوم صلح و امنیت منطقه‌ای با تهدید مواجه خواهد شد. کلان‌شهر مشهد، با میزان بارندگی ۸۷/۶ میلی‌متر در سال ۱۴۰۲ و قرارگیری در منطقه‌ای خشک و کم‌آب، و همچنین با توجه به نرخ بالای جمعیت ساکن، مهاجر و میزبانی از حدود ۲۰ میلیون زائر داخلی و خارجی در سال، با تنگنای جدی آبی مواجه است. پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی، افزایش جمعیت، شتاب رشد تقاضای آب، خشکسالی و تغییر اقلیم، تأمین آب کشور را بیش از پیش به منابع آب برون‌سرزمینی و حوضه‌های مشترک با همسایگان وابسته بنماید. سد دوستی، به‌عنوان یکی از منابع آب خارجی، ۶۰ درصد از آب شرب مشهد را تأمین می‌کند (Mohamadi et al, 2023). با توجه به ویژگی‌های خاص جغرافیایی کلان‌شهر مشهد، مسائل زیست‌محیطی ناشی از تغییر اقلیم، وابستگی به تأمین آب از منابع مشترک مرزی، تنش‌های بالقوه بر سر این منابع، عدم تضمین پایداری منابع آبی و رشد جمعیتی، زمینه برای بروز کشمکش‌ها فراهم‌تر خواهد کرد. نگرش خطی به مدیریت منابع آب، رویکردهای

کلان‌شهر مشهد از یک رویکرد ترکیبی (کمی و کیفی) بهره

جسته است. انتخاب این رویکرد امکان تحلیل چندوجهی مسئله و دستیابی به نتایج عمیق‌تر و قابل اتکاتر را فراهم می‌کند.

از آنجایی که این تحقیق مناسبات هیدروپلیتیکی و تغییر اقلیم را مورد بررسی قرار می‌دهد لازم است تا اطلاعاتی درست از وضعیت اقلیمی گذشته داشت. از آنجایی که حوضه‌های آبریز مشترک ایران و افغانستان از نظر هیدروپلیتیکی بسیار پیچیده هستند و بیشتر منطقه مورد مطالعه این تحقیق در کشور افغانستان و مناطق کویری ایران قرار گرفته است، داده‌های ایستگاهی چندانی در دسترس نیست. بر این اساس در تحقیق حاضر، برای فائق آمدن بر مشکل ذکر شده، از داده‌های CRU<sup>۱</sup> که در بسیاری از مطالعات اقلیمی این داده را به‌عنوان داده مشاهداتی در نظر می‌گیرند استفاده شد.

از داده‌های CRU با تفکیک افقی ۰/۵×۰/۵ درجه قوسی برای بررسی وردایی اقلیم منطقه مورد مطالعه در سه دهه گذشته (۲۰۲۰-۱۹۹۱) استفاده شد و در بررسی خشکسالی از شاخص استاندارد بارش تبخیر-تعرق (SPEI) که به ارزیابی دقیق‌تر روندهای خشکسالی و تأثیرات آن بر منابع آبی کمک کرده است در دوره زمانی ۲۰۲۰-۱۹۹۱، بهره جسته‌ایم.

برای پایش تغییرات سطح آب دریاچه سدهای سلما و دوستی، از داده‌های لندست ۸ و ۹ در باندهای ۳ و ۵ لندست که محاسبه شاخص همانند  $NDWI = (Band\ 3 - Band\ 5) / (Band\ 3 + Band\ 5)$  است، استفاده شد. تفکیک مکانی باندها ۳۰ متری بوده و میانگین باندها در طول سال مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با بهره‌گیری از شاخص‌های NDWI<sup>۲</sup> و MNDWI<sup>۳</sup>، که این شاخص‌ها به‌صورت پهنه‌های آبی است و این پهنه را با دقت بسیار بالایی از سایر پدیده‌های زمینی تفکیک می‌نماید، نتایجی قابل اعتماد در محاسبه حجم آب پشت سد دوستی و سلما در قالب

تفسیر و همبستگی به‌دست آورده‌ایم.

همچنین از داده‌های چندطیفی سنجنده MSI ماهواره Sentinel-2 استفاده شد. دلیل اصلی این انتخاب، توان تفکیک مکانی بالای ۱۰ متر این سنجنده است که امکان ترسیم دقیق خطوط ساحلی و شناسایی کوچک‌ترین تغییرات در وسعت دریاچه را فراهم می‌کند. علاوه بر این، توان تفکیک زمانی مناسب (حدود ۵ روز) به ما اجازه داد تا با ایجاد یک سری زمانی مترکم، تغییرات فصلی و ماهانه سطح آب را به‌طور مستمر رصد کرده و تصاویر بدون ابر را به راحتی انتخاب کنیم.

### ۳- منطقه مورد مطالعه

#### ۳-۱- کلان شهر مشهد

شهر مشهد، دومین کلان‌شهر ایران و از کانون‌های مهم زیارتی جهان، به‌واسطه موقعیت ژئوپلیتیکی و هیدروپلیتیکی خود، به ویژه در ابعاد امنیت ملی کشور، حائز اهمیت است. این شهر در شمال شرقی ایران و در گستره‌ای با اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده و با چالش کمبود منابع آب سطحی و زیرزمینی، که با تغییر اقلیم تشدید یافته، مواجه است. بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت شهر مشهد ۳۰۵۷۶۷۹ نفر در مساحتی بالغ بر ۳۵۱۴۷ هکتار بوده است. مصرف سالانه آب این کلان‌شهر حدود ۲۳۶ میلیون متر مکعب برآورد می‌شود. تا پیش از بهره‌برداری از سد دوستی، تأمین آب مشهد عمدتاً متکی بر منابع آب زیرزمینی و دو سد کارده و طوق، واقع در شمال و جنوب شهر بود. با تکمیل شبکه انتقال و توزیع آب سد دوستی در سال ۱۳۸۷، تحول قابل توجهی در سبد تأمین آب مشهد رخ داد. این سد که بر روی رودخانه مرزی هریرود احداث شده، حدود ۷۵ درصد از آب مورد نیاز شهر را تأمین می‌کند. در فاصله سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳، حدود ۵۰۰ میلیون مترمکعب آب از خارج از حوضه آبریز به این شهر منتقل شده است. این تغییر راهبردی منجر به کاهش ۴۶ درصدی وابستگی به منابع آب زیرزمینی و افزایش ۱۲۲ درصدی اتکا به منابع

1- <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/3f8944800cc48e1cbc29a5ee12d8542d/>

2- Normalized Difference Water Index

3- Modified Normalized Difference Water Index

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)  
 ارزیابی امنیت آب کلان شهر مشهد در پرتو تغییر اقلیم و مناسبات ... / ۱۴۹

سطحی و خارج از حوضه بین سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۲ ۱-۱-۳- حوضه آبریز هریرود  
 شد (Rahnama & Shaddel, 2015). همان‌طور که در جدول ۱ بیان  
 شده است منابع تأمین آب شهری مشهد در طی سال‌های  
 اخیر با کاهش حجم بسیار فاحشی روبه‌رو بوده است. سیستم‌های هیدرولوژیکی در غرب آسیا، توجه محققان  
 زیادی را به خود جلب کرده است. این حوضه با مساحت

جدول ۱: منابع تأمین آب شهری مشهد

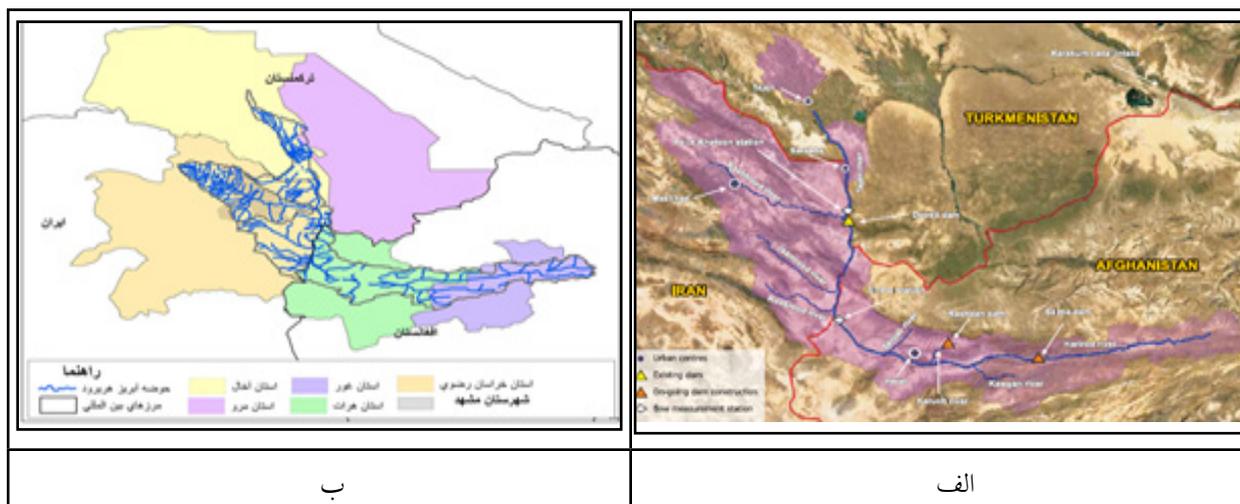
حجم آب ورودی و خروج سال ۱۴۰۱				متوسط حجم آب ورودی سالانه ۹۴ تا ۹۸ (میلیون متر مکعب)	مشخصات کلی سدها			
خروجی (میلیون متر مکعب)					حجم آب قابل تنظیم سالیانه (میلیون متر مکعب)	حجم مخزن در تراز نرمال (میلیون متر مکعب)	نام سد	ردیف
جمع	صنعت	شرب	کشاورزی	ورودی (میلیون متر مکعب)				
۳۱/۰۲	۰/۰۰	۳۱/۰۲	۰/۰۰	۱/۴۵	۶۸۳/۴۰	۱۲۱۱/۰۰	دوستی	۱
۱/۴۰	۰/۰۰	۱/۴۰	۰/۰۰	۰/۴۳	۲۴/۰۰	۳۳/۱۰	طرق	۲
۰/۹۴	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۸۷	۲/۷۲	۲۴/۰۰	۲۸/۱۰	کارده	۳
۲/۰۶	۰/۲۱	۰/۹۲	۰/۹۳	۳/۱۷	تازه تأسیس	۳۰/۳۰	ارداک	۴

منبع: (The Water Profile of Razavi Khorasan Province, 2023)

جدول ۲: داده‌های جمعیتی کشورهای حوضه آبریز هریرود

نام کشور	کل جمعیت ساکن در حوضه (نفر)	تراکم جمعیت داخل حوضه (کیلومتر مربع نفر)	سهم هر کشور از مساحت حوضه (درصد)
افغانستان	۱۲۷۵۷۲۲	۲۲/۱۹	۴۴
ایران	۳۴۱۰۰۰۰	۹۶	۳۸
ترکمنستان	۱۶۸۰۰۰	۱۰	۱۸

منبع: Sedraniya, 2018



نگاره ۱: الف) موقعیت حوضه آبریز هریرود در سه کشور ایران- افغانستان و ترکمنستان؛  
 ب) موقعیت‌های جمعیتی در حوضه آبریز هریرود به تفکیک استان

در افغانستان)، دیده می‌شود و کمینه بارش با حدود ۴۲/۶ میلی‌متر، نواحی شمال‌غربی و غربی حوضه (مناطق مرزی ایران و ترکمنستان) را دربر می‌گیرد. بارش سالانه در حوضه هریرود دارای نوسانات شدید بین‌ساله و دهه‌ای است. اختلاف میان کمینه و بیشینه بارش در طول سال‌ها به بیش از ۴۰۰ میلی‌متر می‌رسد. این نوسانات در دو دهه اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۰) شدیدتر شده و نشان‌دهنده افزایش ریسک خشکسالی‌های متوالی و بارش‌های مقطعی است.

#### ۴-۱-۲- تفسیر زمانی-مکانی دما در حوضه آبریز هریرود

طبق تحلیل نگاره (۳) دمای سالانه در کل بازه زمانی (۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰) با روند افزایشی پیوسته و افزایش میانگین ۱/۷۲ درجه سلسیوس حوضه هریرود در حال تجربه گرم‌شدن سریع است. سال‌های ابتدایی (۲۰۰۰-۱۹۹۱) دارای مقادیر پایین‌تر دما به‌ویژه در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی حوضه هستند. از سال ۲۰۰۱ به بعد، گسترش نواحی با دمای بالاتر به‌طور محسوس افزایش یافته است. در دهه آخر (۲۰۲۰-۲۰۱۱) شدت گرما در شمال و شمال‌غرب حوضه به حداکثر مقدار خود رسیده است. بخش شمالی و شمال‌غربی حوضه همواره گرم‌ترین نواحی بوده و بیشترین مقدار دما (حدود ۱۷ تا ۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد) در این مناطق رخ داده است. بخش جنوبی و جنوب‌شرقی حوضه خنک‌تر است؛ کمترین مقدار دما در این نواحی در اغلب سال‌ها کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. به‌طور کلی حوضه آبریز هریرود طی سه دهه گذشته روندی گرم‌شونده را تجربه کرده است. کمینه دما همواره در نواحی مرتفع جنوبی (۱/۳-۵ درجه سانتی‌گراد) و بیشینه در شمال‌غرب حوضه (۱۷-۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد) ثبت شده است. اختلاف مکانی دما حدود ۱۵ درجه سانتی‌گراد بوده است.

۸۴۳۸۷ کیلومتر مربع، سه کشور افغانستان، ایران و ترکمنستان را در برمی‌گیرد (Shoghi and Ahmadi, 2019). هریرود با پیوستن به کشف‌رود حدود ۱۷۰ کیلومتر از مرز سیاسی ایران و ترکمنستان را تشکیل می‌دهد (Nagheby et al, 2019).

#### ۴- یافته‌های پژوهش

##### ۴-۱- بررسی روند تغییرات اقلیمی سه دهه اخیر حوضه آبریز هریرود

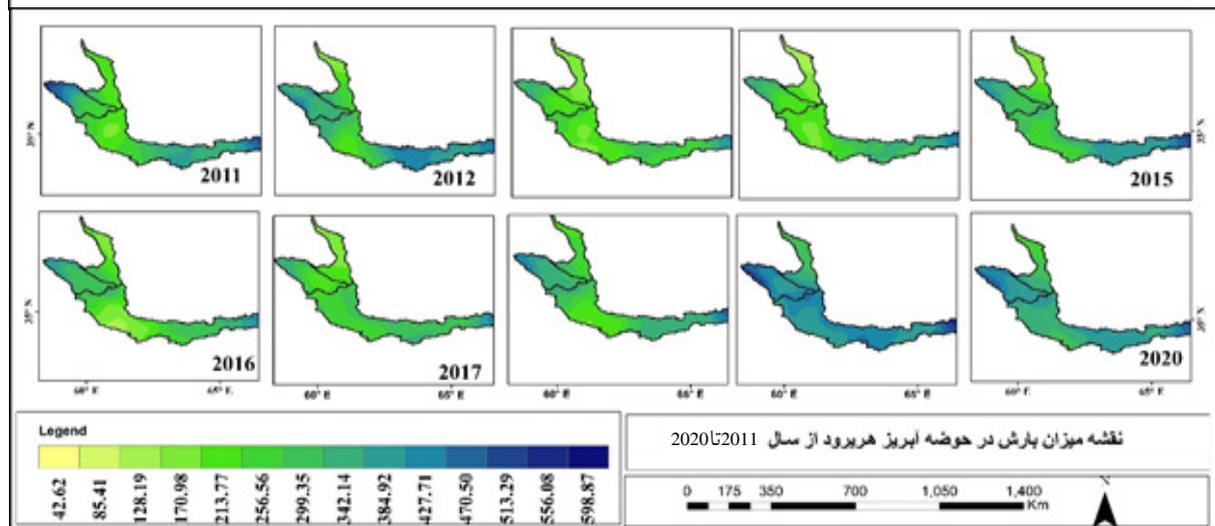
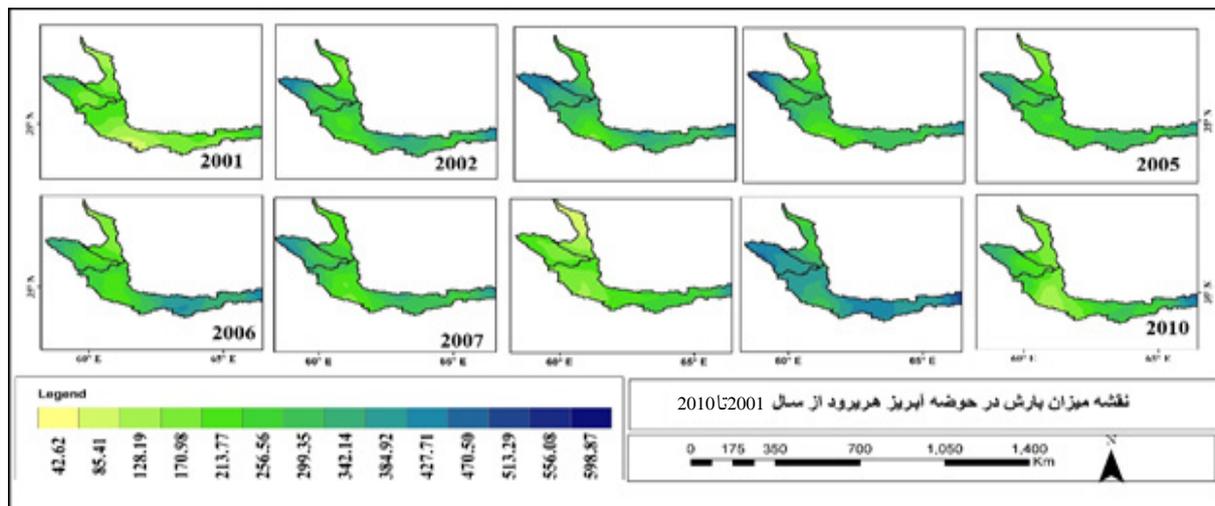
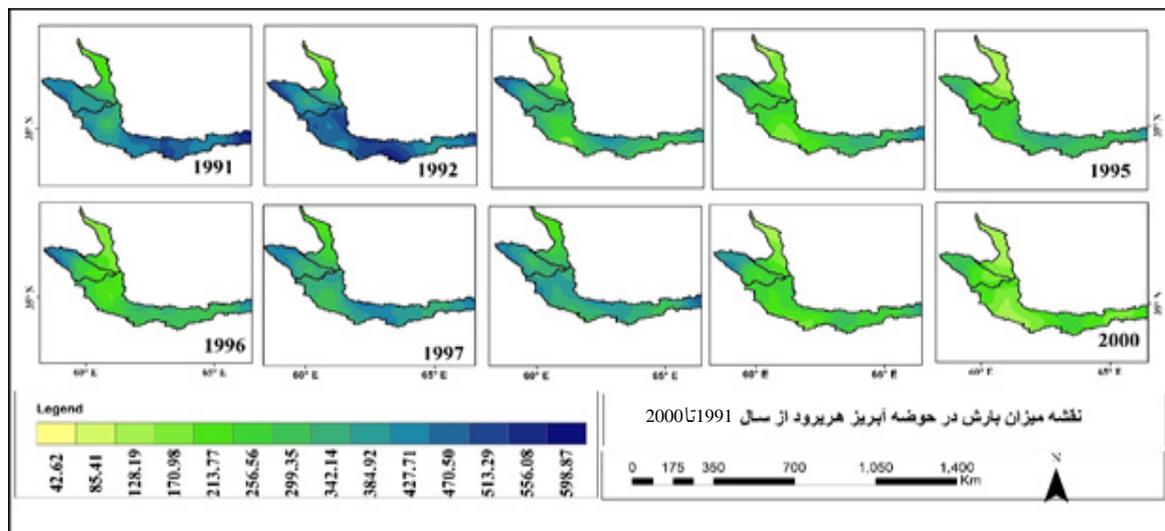
در مطالعه حاضر، با هدف بررسی و تبیین تجارب انباشته شده در حوضه آبریز هریرود تحت‌تأثیر این دگرگونی‌های اقلیمی، روند تغییرات سه متغیر کلیدی شامل دما، بارش و شاخص‌های خشکسالی مورد تجزیه و تحلیل دقیق قرار گرفته است. این بررسی به درک عمیق‌تری از چگونگی تأثیرپذیری این حوضه از نوسانات و تغییر اقلیم کمک شایانی خواهد نمود و می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری‌های آتی در زمینه مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم فراهم آورد.

##### ۴-۱-۱- تفسیر زمانی-مکانی بارش در حوضه هریرود

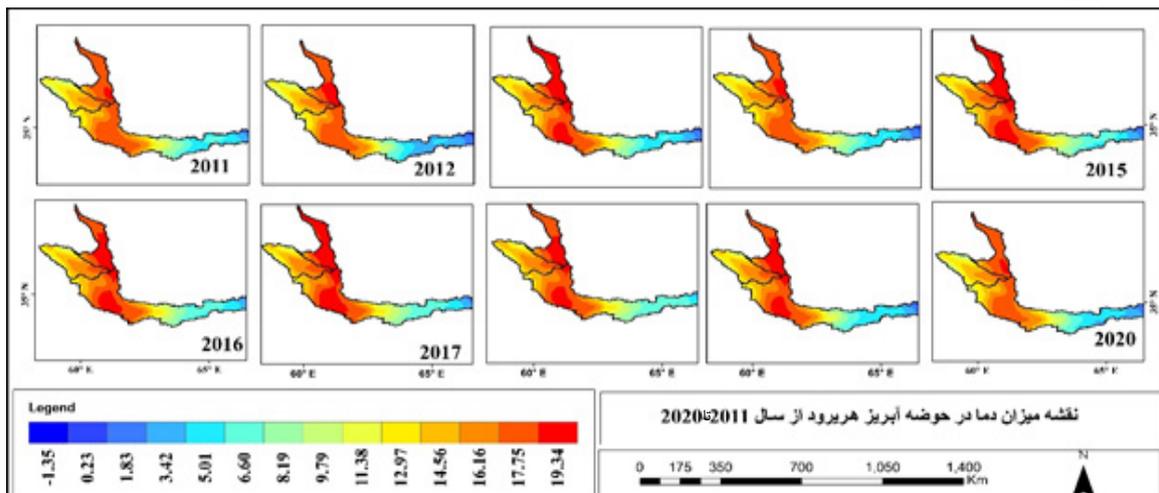
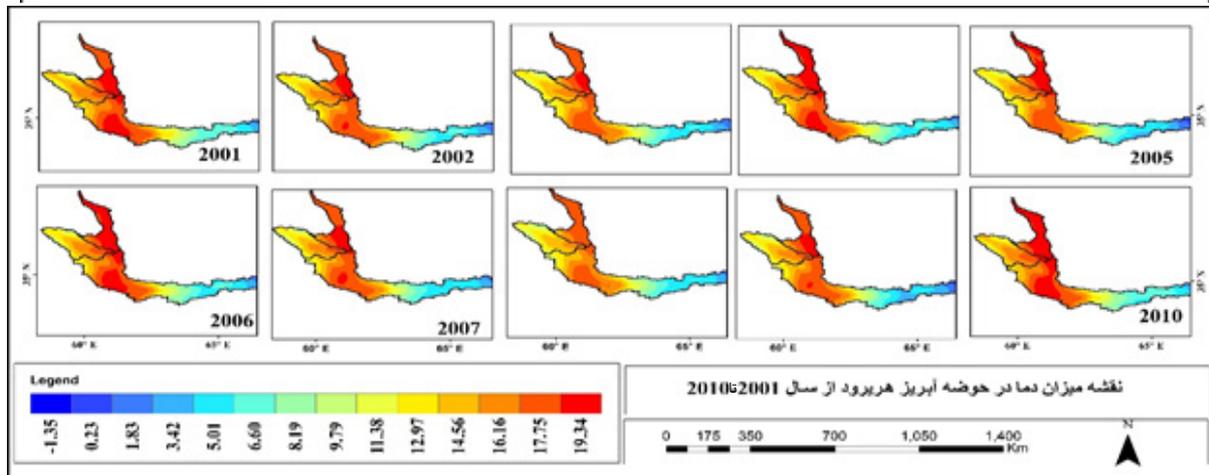
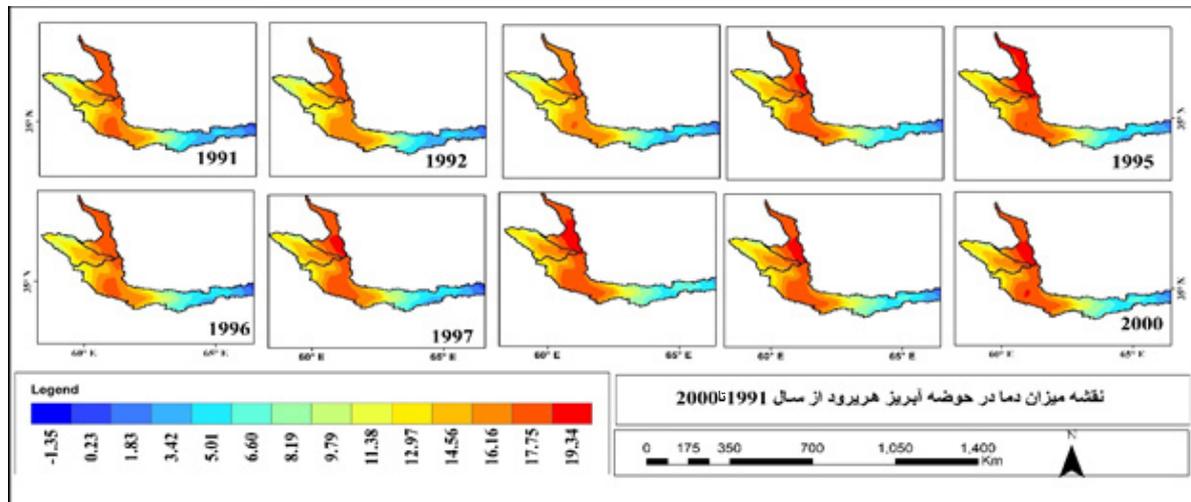
نگاره (۲) تغییرات زمانی-مکانی بارش سالانه را در حوضه آبریز هریرود نمایش می‌دهد. این نوسانات، با هدف افزایش دقت بررسی‌ها، به تفکیک سه دهه ارائه شده است. بر این اساس، در دهه اول (۲۰۰۰-۱۹۹۱)، بیشترین میزان بارش در حوضه آبریز هریرود طی سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ و کمترین میزان آن در سال ۲۰۰۰ مشاهده شد. طی دهه دوم (۲۰۱۰-۲۰۰۱)، سال ۲۰۰۹ به‌عنوان پربارش‌ترین سال و سال ۲۰۰۱ به‌عنوان کم‌بارش‌ترین سال این دوره شناخته می‌شود. در نهایت، در دهه سوم (۲۰۲۰-۲۰۱۱)، بیشترین حجم بارش در سال ۲۰۱۹ و کمترین آن در سال ۲۰۱۷ به ثبت رسیده است. به‌طور کلی بیشترین مقادیر بارش سالانه (بیشینه بارش) حدود ۵۹۸/۸ میلیمتر است که در مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی حوضه (ارتفاعات هندوکش

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سیر)

ارزیابی امنیت آب کلان شهر مشهد در پرتو تغییر اقلیم و مناسبات ... / ۱۵۱



نگاره ۲: تغییرات زمانی-مکانی میزان بارش سالانه در حوضه هریرود طی دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ (واحد: میلی‌متر)



نگاره ۳: تغییرات زمانی-مکانی میزان دمای سالانه در حوضه هریرود طی دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ (واحد: درجه سلسیوس)

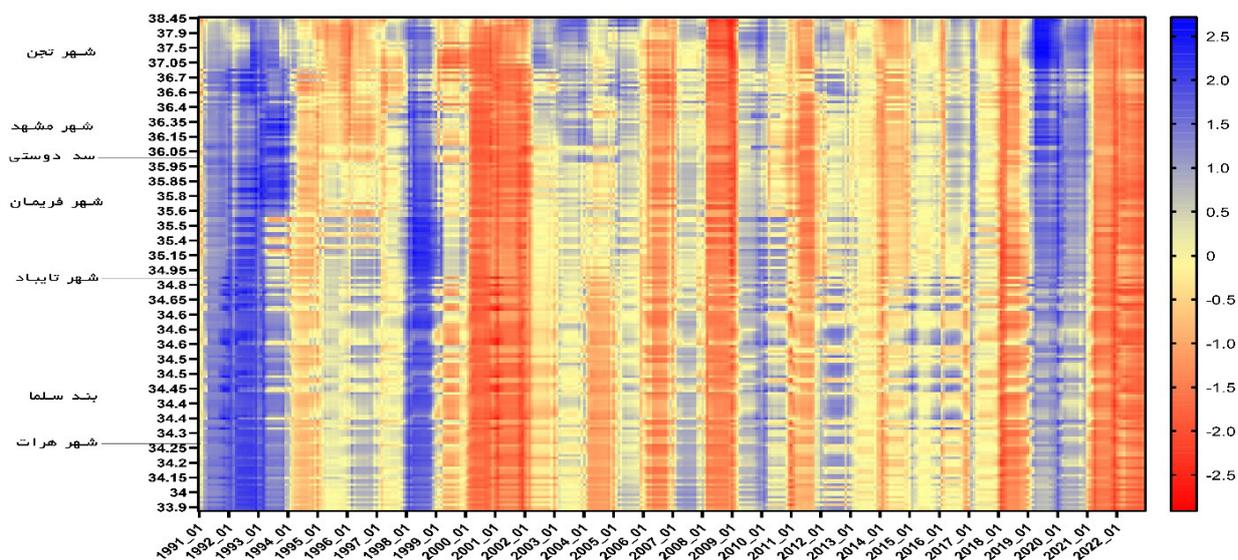
تغییرات نشان‌دهنده تأثیر تغییرپذیری اقلیمی و حضور دوره‌های متناوب خشک و تر در منطقه است. نوسانات خشکسالی و ترسالی در طول دوره مورد مطالعه بسیار بالا هست. چرخه‌های کوتاه‌مدت (۲ تا ۴ سال) از ترسالی و خشکسالی پشت سر هم دیده می‌شوند.

در نیمه اول (۱۹۹۵-۱۹۹۱) بیشتر شرایط نزدیک به نرمال و ترسالی مشاهده می‌شود. اما از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ دوره‌های خشکسالی شدید و طولانی مشاهده می‌شود (به‌ویژه سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۰). دو دهه اخیر یکی از بحرانی‌ترین بازه‌ها در نمودار است. در همین دوره زمانی نوسانات شدیدتر شده‌اند؛ دوره‌هایی از ترسالی (مثلاً حوالی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۹) به سرعت با دوره‌های خشکسالی جایگزین می‌شوند. در سال‌های پایانی (۲۰۱۹-۲۰۱۸) بار دیگر خشکسالی شدید رخ داده است و سریعاً در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با رخداد ترسالی قابل توجهی همراه بودند. طی این دو سال، که مصادف با وقوع سیلاب‌های گسترده بهار ۱۳۹۸ در منطقه بود، حوضه هریرود شرایط بارشی بسیار مطلوبی را تجربه کرد ولی پس از این رخداد حوضه

#### ۴-۱-۳- تحلیل تغییرات خشکسالی و ترسالی در حوضه

##### آبریز هریرود با استفاده از شاخص SPEI

پدیده خشکسالی چالشی حیاتی برای کشورهای واقع در حوضه آبریز هریرود، شامل افغانستان، ایران و ترکمنستان، محسوب می‌شود. نمودار ارائه شده (نگاره ۴) تغییرات زمانی شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر-تعرق (SPEI) را طی یک دوره از سال ۱۹۹۱ تا سال ۲۰۲۲، در محدوده جغرافیایی شهرهای کلیدی نظیر هرات (افغانستان)، تایباد، فریمان، مشهد (ایران) و تجن (ترکمنستان) به تصویر می‌کشد. این منطقه به دلیل در بر گرفتن حوضه آبریز رودخانه هریرود و استقرار دو سد مهم سلما و دوستی، از اهمیت استراتژیک برخوردار است. تحلیل نمودار SPEI، نوسانات قابل توجهی را در وضعیت هیدرولوژیکی حوضه هریرود طی دوره مورد بررسی آشکار می‌نماید. به‌طور کلی، حوضه آبریز هریرود طی این دوره با نوسانات شدید خشکسالی و ترسالی مواجه بوده است. مقاطع زمانی متعددی از خشکسالی‌های شدید (شاخص کمتر از ۲-) و همچنین ترسالی‌های شدید (شاخص بالاتر از ۲۲) در نمودار قابل مشاهده است. این



نگاره ۴: نمودار تغییرات زمانی-مکانی رخداد ترسالی و خشکسالی در حوضه هریرود طی دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۲ بر اساس شاخص خشکسالی SPEI؛ محور افقی هر ماه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد و محور عمودی عرض جغرافیایی حوضه هریرود از بالا دست حوضه در افغانستان تا پایین دست آن در کشور ترکمنستان را نشان می‌دهد

اجرا کرده است. تا اواخر دهه ۱۹۷۰، سه سیستم کنترل آب در مقیاس بزرگ اجرا شده بود: دره‌های هیرمند-ارغنداب در جنوب غربی (یعنی سدهای کجکی و دله و کانال بوغرا)؛ منطقه جلال‌آباد در شرق؛ و کندز-خان‌آباد در شمال شرق (Favre & Kamal, 2004). اگر چه در طی جنگ افغانستان و شوروی و شورش طالبان مأموریت‌های هیدرولیکی افغانستان با توقف و آسیب جدی روبه‌رو شد ولی از سال ۲۰۰۱، سرمایه‌گذاری مالی برای کمک به بازسازی افغانستان و راه‌اندازی برنامه‌های زیرساخت‌های آبی جدید ارائه شده است. محرک‌های سیاسی پشت این پروژه تقویت مشارکت‌های دوجانبه با هند و رقابت هند و پاکستان در افغانستان در چارچوب منافع ژئوپلیتیکی گسترده‌تر است. هند با برنامه ریزی برای ساخت ۶۲ بند در افغانستان، جاه‌طلبی‌های هژمونیک خود را علیه پاکستان پیش می‌برد.

۴-۲-۱- پایش تغییرات سطح آب دریاچه سدهای سلما و دوستی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای  
نتایج ساخت سد سلما نشان می‌دهد ساخت این سد، سیل‌های فصلی ورودی به سد دوستی را حذف

آبریز هریرود به طور گسترده وارد دوره خشکسالی بسیار شدیدی شده است.  
از نظر تغییرات مکانی بالادست حوضه (افغانستان) خشکسالی‌ها معمولاً شدت بیشتری داشته و دامنه زمانی آن‌ها گسترده‌تر است. این موضوع به علت وابستگی زیاد این ناحیه به بارش‌های کوهستانی و حساسیت بیشتر به تغییرات اقلیمی است. پایین دست (ایران) نیز تحت تأثیر بالادست و شرایط اقلیمی محلی است و تغییرات شدیدی هم در خشکسالی و هم در ترسالی مشاهده می‌شود.

#### ۴-۲- مأموریت‌های هیدرولیکی کشور بالادست حوضه آبریز هریرود

افغانستان فاقد زیرساخت‌های کنترل آب نیست؛ کشور افغانستان حداقل ۶۲ سد (تقریباً ۲۰ سد بزرگ)، حداقل ۱۰۹ طرح انحرافی و پیشنهاد برای حداقل ۱۰۴ سد دیگر دارد. زیرساخت‌های سد موجود بیش از ۹۰۰۰ متر طول تاج را شامل می‌شود و عمدتاً بر حمایت از نیازهای آب و برق کابل متمرکز است. در واقع، این کشور از دهه ۱۹۳۰ تا دهه ۱۹۷۰ در سراسر کشور پروژه‌های توسعه قابل توجهی را



نگاره ۵: موقعیت سدهای احداث شده در حوضه آبریز هریرود منبع (Loodin & Warner, 2022)

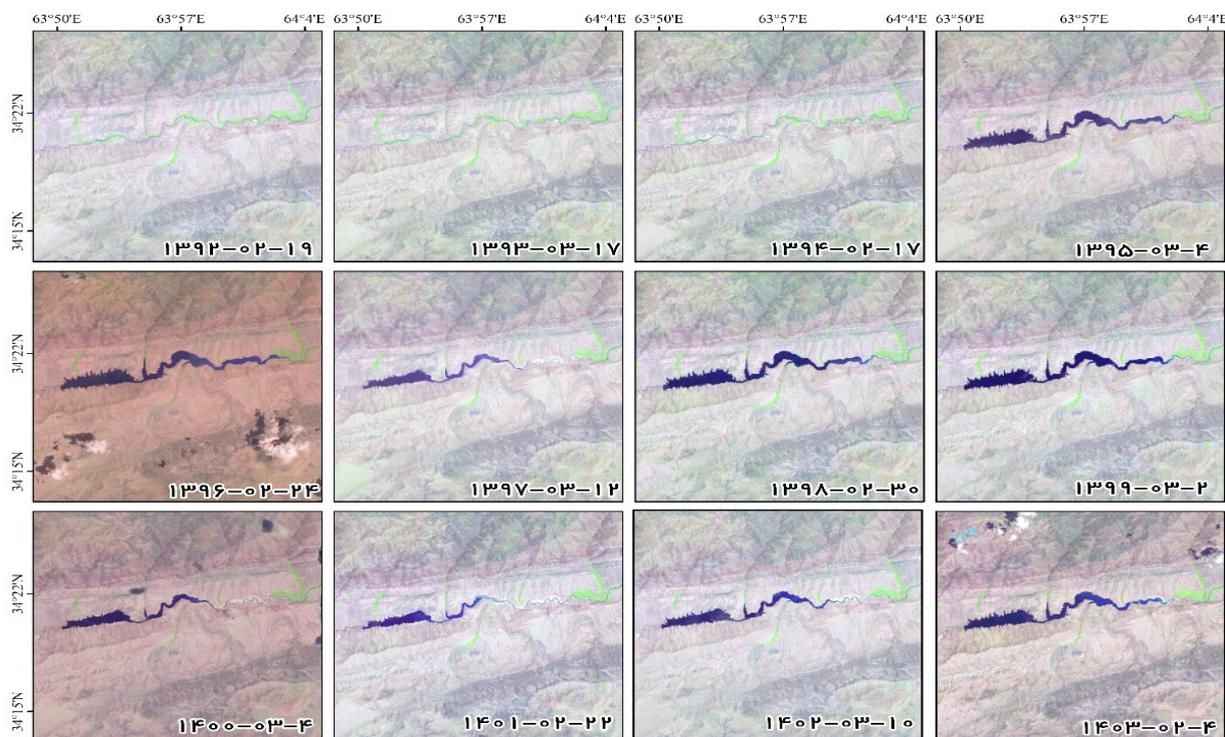
## فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۱۵۵)

ارزیابی امنیت آب کلان شهر مشهد در پرتو تغییر اقلیم و مناسبات ... / ۱۵۵

اواخر تابستان و فصل پاییز، کاهش بارش و افزایش تبخیر منجر به افت سطح آب می‌شود.

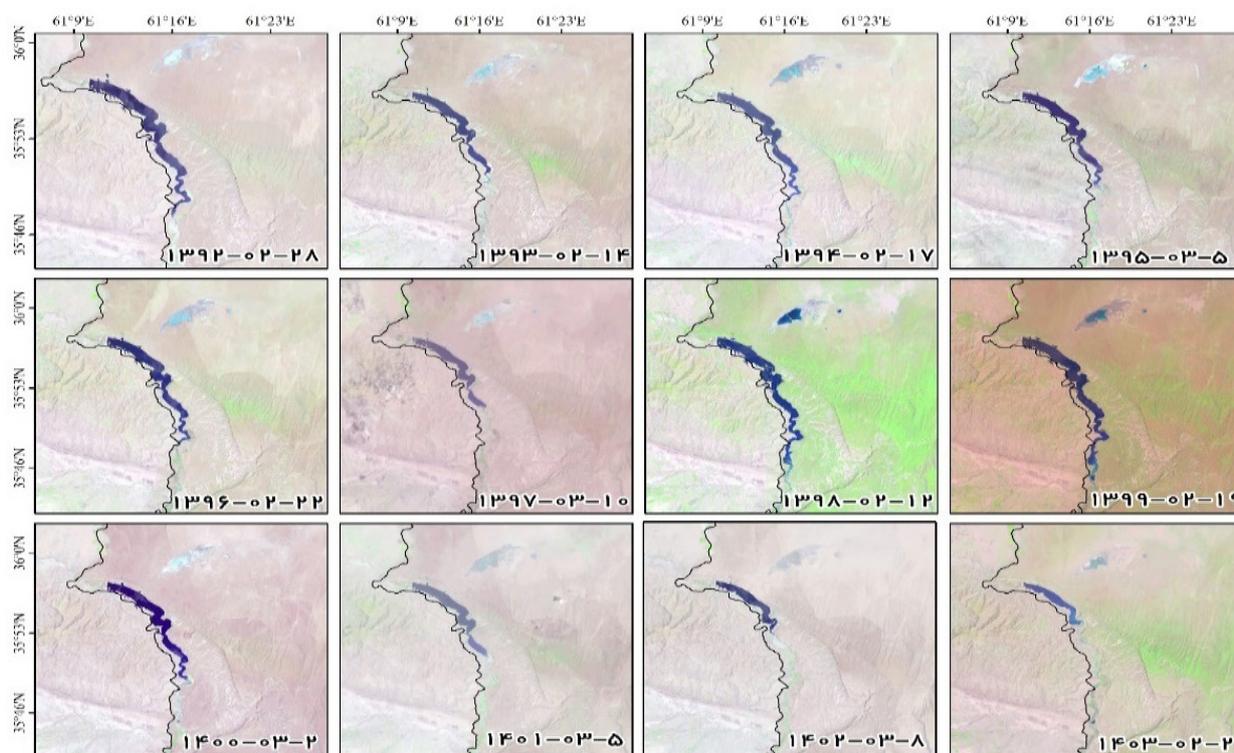
با وجود این نوسانات فصلی، یک روند کاهشی بلندمدت و نگران‌کننده در سطح آب سد دوستی قابل مشاهده است. این کاهش می‌تواند به دلایل متعددی از جمله کاهش آورد رودخانه هریرود به مخزن سد نسبت داده شود. تغییر در الگوهای بارش منطقه، افزایش برداشت آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی و صنعتی در مسیر جریان، و همچنین احداث و بهره‌برداری از سد سلما در بالادست، همگی در کاهش دبی ورودی رودخانه هریرود به سد دوستی مؤثر بوده‌اند. علاوه بر این، افزایش دمای هوا و کاهش رطوبت نسبی، منجر به افزایش میزان تبخیر از سطح وسیع دریاچه سد شده و بر شدت کاهش حجم آب افزوده است. در برخی سال‌ها، به‌ویژه سال‌های مواجهه با خشکسالی، همانطور که در نگاره (۷) نیز به تصویر کشیده

کرده و رواناب را ۷۰ درصد کاهش داده است. نقیعی و همکاران (۲۰۱۹) گزارش دادند که میانگین جریان سالانه پس از ساخت سد سلما ۳۰ درصد کاهش یافته و در فصل خشک به ۷۰ تا ۸۰ درصد رسیده است (Nazari et al, 2023). تحلیل تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹، همانگونه که در نگاره‌های ۶ و ۷ ارائه شده است، تغییرات چشمگیری را در سطح آب ذخیره شده در پشت سد دوستی طی دوره زمانی ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۳ شمسی آشکار می‌نماید. این نوسانات، معلول برهم‌کنش عوامل متعددی از جمله تغییرات در میزان آب ورودی به سد از رودخانه هریرود، نوسانات اقلیمی مؤثر بر بارش و تبخیر و شیوه مدیریت منابع آب در حوضه است. به طور کلی، تصاویر ماهواره‌ای بیانگر نوسانات فصلی بارزی در سطح آب هر دو سد دوستی و سلما هستند. در فصل بهار و اوایل تابستان، همزمان با افزایش بارش و ذوب برف در بالادست، سطح آب سدها افزایش می‌یابد. در مقابل، طی



نگاره ۶: تغییرات زمانی حجم آب پشت سد سلما در بالا دست حوضه هریرود در کشور افغانستان؛

تصاویر ارائه شده دارای تفکیک افقی ۳۰ متر و برای ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ هستند



نگاره ۷: تغییرات زمانی حجم آب پشت سد دوستی در پایین دست حوضه هریرود در مرز دو کشور ایران و ترکمنستان؛ تصاویر ارائه شده دارای تفکیک افقی ۳۰ متر و برای ماهواره‌های لندست ۸ و ۹ هستند

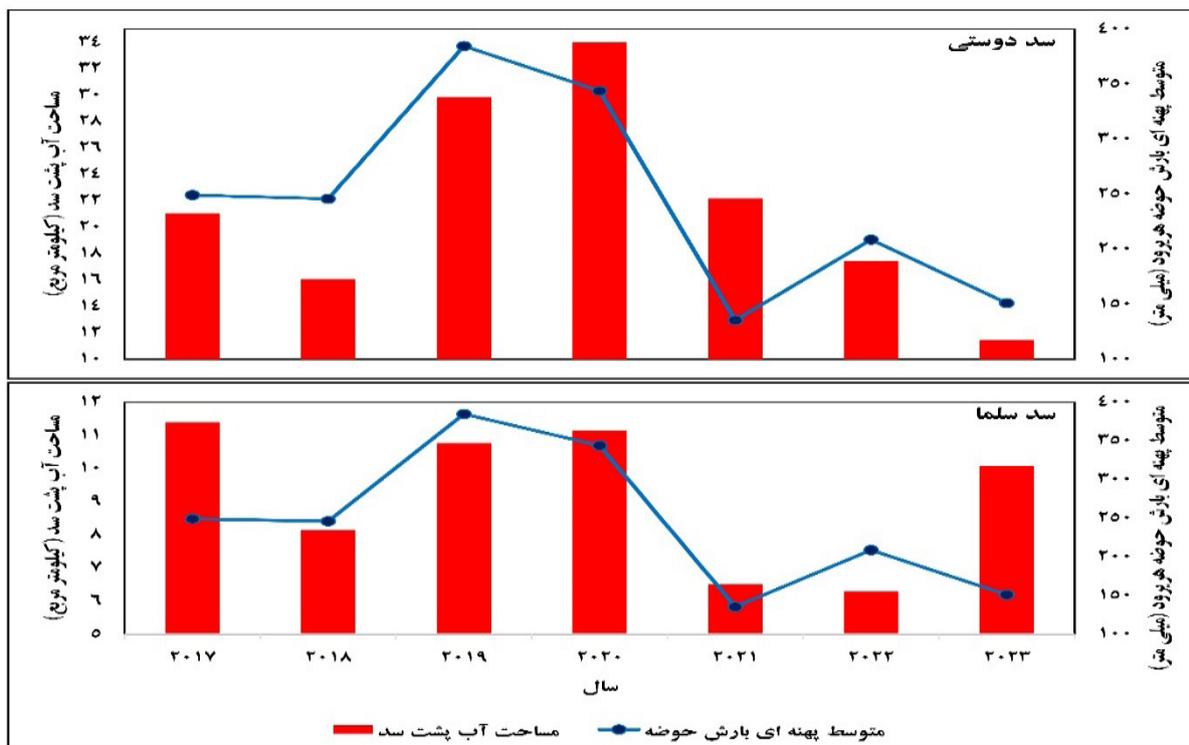
محل‌ی نظیر ویژگی‌های توپوگرافیک حوضه بالادست هر سد، نوع خاک، پوشش گیاهی و شیوه‌های مدیریت منابع آب در زیرحوضه‌های مختص به هر یک بازگردد. تصاویر ماهواره‌ای مربوط به سد سلما نیز مؤید آن است که این سد، مشابه سد دوستی، با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت پایدار منابع آب روبه‌رو است. تداوم روند کاهش سطح آب در این سدهای کلیدی می‌تواند پیامدهای نامطلوب و گسترده‌ای برای بخش‌های کشاورزی، صنعت و به‌ویژه تأمین آب شرب جمعیت قابل توجهی از ساکنان منطقه در پی داشته باشد.

#### ۴-۲-۲- بررسی تفسیر تغییرات آب پشت سدهای سلما و دوستی و ارتباط حجم آب دو سد

به‌منظور تحلیل دقیق‌تر تأثیرات سد سلما، تغییرات سطح آب در مخازن سدهای سلما و دوستی (واقع بر روی

شده، کاهش بسیار شدیدی در سطح آب سد دوستی به ثبت رسیده است. این امر نشان‌دهنده تأثیر مستقیم پدیده‌های خشکسالی بر وضعیت منابع آبی سطحی در منطقه است. در این میان، نباید نقش سد سلما، واقع در بالادست سد دوستی، را نادیده گرفت. واضح است که در سال‌های خشک، جریان پایه رودخانه به‌طور طبیعی کاهش می‌یابد. در چنین شرایطی، بخش عمده‌ای از جریان پایه کاهش‌یافته، توسط سد سلما مهار شده و در نتیجه، حجم آب ورودی به سد دوستی با کاهش قابل توجهی مواجه خواهد شد.

بررسی‌ها نشان می‌دهند که هر دو سد سلما و دوستی، روندی از کاهش بلندمدت در سطح آب را تجربه می‌کنند. این مسئله بیانگر تأثیر عوامل مشترک و فراگیری همچون تغییر اقلیم و الگوهای مدیریت کلان منابع آب بر هر دو سازه است. البته تفاوت‌هایی در شدت و زمان‌بندی این تغییرات بین دو سد مشاهده می‌شود که می‌تواند به عوامل



نگاره ۸: تغییرات زمانی مساحت آب پشت دو سد سلما و دوستی به همراه متوسط پهنه‌ای بارش بر اساس داده‌های ماهواره Sentinel-2؛ واحد بارش میلی‌متر و مساحت آب پشت سد کیلومتر مربع است

رودخانه هریرو (طی بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-2 مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، تغییرات متوسط بارش در حوضه آبریز هریرو در این تحلیل لحاظ شده است (نگاره ۸).

بررسی اولیه نمودار، همبستگی مثبتی را بین میزان بارش و سطح آب سدها نشان می‌دهد؛ به طوری که افزایش بارش عموماً منجر به افزایش سطح آب در مخازن سدها شده است. این ارتباط به‌ویژه در سال‌های پربارش نظیر ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، که پیشتر نیز در تحلیل‌های خشکسالی به آن‌ها اشاره شد، به وضوح قابل مشاهده است، جایی که هم میزان بارش و هم سطح آب سدها به مقادیر حداکثری خود رسیده‌اند. فراتر از تأثیر بارش، اثرگذاری مستقیم سد سلما بر رژیم هیدرولوژیکی سد دوستی نیز مشهود است. همان‌گونه که در نمودار (نگاره ۸) و همچنین نگاره‌های ۷ و ۶ نشان داده شده، تغییرات سطح آب سد سلما بر

#### ۴-۳- بررسی سیاست‌های هیدروپلیتیک فعال در حوضه آبریز هریرو

با عنایت به سیاست‌های هیدروپلیتیک و دیدگاه‌های حاکم در طی سه دهه، اقداماتی از سوی کشورهای بالادست و پایین دست حوضه آبریز هریرو رخ داده است که در جدول ۳ به اختصار شرح داده شده‌اند.

جدول ۳: اقدامات کشورهای بالادست و پایین دست حوضه آبریز هریرود

سال	اقدامات
۱۳۷۵	در سال ۱۹۷۴ فاش شد که افغانستان از فائو خواسته است تا پروژه جدید سد سلما را که در حال برنامه‌ریزی بود تجزیه و تحلیل کند
۱۳۷۸	ساخت سد دوستی در سال ۲۰۰۰ آغاز شد و افتتاح آن در سال ۲۰۰۴ بود
۱۳۸۴	در سال ۲۰۰۶ و دو بار در سال ۲۰۱۰ نامه رسمی به همراه دعوت به همکاری سه جانبه در مورد رودخانه هریرود به رئیس جمهور کرزی ارسال کردند اما این دعوت‌ها بی پاسخ ماند
۱۳۹۳	علی احمد عثمانی، وزیر وقت انرژی و آب افغانستان، در ۳ دسامبر ۲۰۱۵ بیان کرد: «پیام تکمیل بند سلما محدود به [این واقعیت] نیست که ما می‌توانیم برق و فقط برق تولید کنیم. یا زمین‌های مان را آبیاری کنیم، بلکه پیام بزرگ‌تری دارد «اکنون آب هریرود تحت کنترل افغانستان است».
۱۳۹۴	سد سلما که در ژوئن ۲۰۱۶ با هزینه تقریبی ۲۹۰ میلیون دلار (تجدیدنظر سوم بودجه‌ای) افتتاح شد، با ارتفاع ۱۰۷/۵ متر برای آبیاری و تولید برق آبی، ظرفیت ذخیره سازی ۶۵۰ میلیون متر مکعب دارد پس از افتتاح بند سلما، سهم افغانستان طبق گزارشات به ۷۴ درصد افزایش یافت، در حالی که سهم مناطق پایین ساحلی (ایران و ترکمنستان) هر کدام به ۱۳ درصد کاهش یافت
۱۳۹۵	یک دوره مذاکره در سال ۲۰۱۷ بین ایران و افغانستان با هدف شکل دادن به یک مشارکت استراتژیک بین دو کشور در زمینه آب و امنیت برگزار شد با این حال این مذاکرات نتوانست پیشرفت قابل توجهی را در زمینه اختلاف در مورد آب‌های مشترک در حوضه رودخانه هریرود به وجود آورد.
۱۴۰۱	مسئولان حوضه دریایی مرغاب - هریرود بیان کردند که با اختصاص یافتن بودجه در اولین قدم بند پاشدان ولایت هرات را تکمیل و بعد از آن بند جدید کبدان در این ولایت برای مدیریت آب‌ها اعمال خواهند کرد.
۱۴۰۲	مطبع الله عابد، سخنگوی وزارت انرژی و آب طالبان سال ۱۴۰۲ به رسانه‌های افغانستانی گفته بود که در حال حاضر کار بر روی پروژه سدسازی به شدت جریان دارد
۱۴۰۳	آبگیری سد پاشدان در حوضه مرزی و مشترک هریرود

انجام دهد کما اینکه در طی چند سال گذشته گزارش‌هایی از تلاش‌های این کشور برای ساخت سدهای کوچک و بزرگ بر رودخانه‌های مرزی و انشعابات آنان منتشر شد و زمینه برای تیرگی روابط با همسایگان مهیا شد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

پیامدهای تغییر اقلیم در سالیان اخیر به گونه‌ای فزاینده آشکار شده و منجر به تمرکز روزافزون بر ابعاد هیدروپلیتیکی منابع آب شده است. نقشه‌های زمانی- مکانی بارش نشان می‌دهند که میزان بارش سالانه در حوضه آبریز هریرود از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ به طور کلی روندی کاهشی داشته است، اما این کاهش به شکل پیوسته و

با توجه به اقدامات کشور افغانستان به‌عنوان بالادست حوضه آبریز هریرود الگوی هیدروپلیتیکی حاکم بر این حوضه شامل: الگوی رقابت که منافع اقتصادی، کمبود آب، عدم وجود سازوکارهای همکاری منطقه‌ای، عدم شفافیت در مدیریت منابع آب، وابستگی متقابل از جمله محرک‌های رقابت هیدروپلیتیکی در این حوضه آبریز فرامرزی محسوب می‌شود. علاوه بر این الگو، الگوی سلطه نیز در سایه هیدروهمژمون با بهره‌گیری از قدرت نرم، قدرت چانه زنی، قدرت مادی و موقعیت جغرافیایی بر مناسبات کشورها حاکم می‌شود. افغانستان به‌عنوان کشور بالادست رودخانه‌ها، معتقد است که این حق افغانستان است که با ایجاد سد و کانال، بهره‌برداری لازم را از آب‌های سطحی

همکاران بر اساس نتایج مدل‌سازی با احداث سد سلما، ۷۹ درصد منابع آب حوزه سهم کشور افغانستان و ۲۱ درصد مابقی سهم ایران و ترکمنستان خواهد شد. همچنین به موجب افزایش جمعیت و احداث سد سلما، سد دوستی در خوشبینانه‌ترین حالت امکان تأمین شرب شهر مشهد تا سال ۱۴۱۵ خواهد داشت. این نتایج مربوط به شرایطی است که دولت افغانستان برنامه توسعه رودخانه هریرود را در سال‌های آتی متوقف کند. در حالی که در شرایط خشکسالی شدید، مشابه سال‌های اخیر، حداکثر آب قابل تأمین برای شرب شهر مشهد در حدود ۱۵ میلیون متر مکعب است. در این میان، همکاری در حوزه آب می‌تواند از طریق هماهنگی در تخصیص منابع آبی، به شکل مؤثری با معضل کمبود آب مقابله نماید. بر همین اساس، تعارض و همکاری بر سر منابع آب به موضوعات کلیدی در پژوهش‌های هیدروپلیتیک تبدیل شده‌اند. در مورد حوزه آبریز هریرود، افغانستان به‌عنوان کشور بالادست، به‌ویژه در شرایط بازسازی و توسعه پس از جنگ، غالباً از ورود به مذاکرات رسمی با ایران (کشور پایین‌دست) امتناع ورزیده است. این کشور انگیزه محدودی برای مشارکت در گفتگوهای دارد که ممکن است به تهدید دسترسی‌اش به منابع آبی منجر شود. با این حال، دولت افغانستان رویکردی منفعلانه در پیش نگرفته و در راستای تقویت موقعیت چانه‌زنی خود در مذاکرات آبی و دستیابی به توافقی مطلوب‌تر، به تکمیل پروژه‌های زیرساختی آبی، نظیر سد سلما (که از آن به‌عنوان سد دوستی افغانستان و هند نیز یاد می‌شود و در بالادست سد دوستی ایران و ترکمنستان قرار دارد)، اقدام نموده است. با وجود این چالش‌ها، پتانسیل‌هایی برای توسعه همکاری‌های دوجانبه نیز وجود دارد. چنانکه سینایی و جمالی (۱۳۹۷) اشاره کرده‌اند، تأکید بر منافع و خدمات مشترک، از جمله افزایش صادرات متقابل، تسهیل ترانزیت کالا و خدمات، صادرات برق از ایران به افغانستان، انتقال طرح‌ها و فناوری‌های نوین آبیاری مکانیزه به افغانستان و مبادله فرآورده‌های نفتی، می‌تواند منافع هر دو کشور را در

یکنواخت نبوده و در برخی سال‌ها نوساناتی نیز مشاهده می‌شود. نقشه‌های دمایی حوزه هریرود افزایش میانگین دمای سالانه را تا حدود ۱/۷ درجه سلسیوس نسبت به اوایل دهه ۹۰ میلادی (۱۹۹۱) نشان می‌دهد. این افزایش عمدتاً پیوسته و منطقه‌ای بوده و روند گرم‌تر شدن، به‌ویژه در بخش‌های شمالی و مرکزی حوزه در بازه آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ به وضوح قابل مشاهده است. شاخص خشکسالی SPEI بیانگر افزایش فراوانی و شدت دوره‌های خشکسالی، به‌ویژه پس از سال ۱۹۹۸، در سراسر حوزه است که به‌طور مستقیم بر کاهش رواناب و منابع آب سطحی و زیرزمینی اثر گذاشته است. همچنین نتایج آماری و مشاهدات بصری (نگاره‌های ۷ و ۶) نشان می‌دهند که افزایش بارش به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، با افزایش حجم آب پشت سد سلما (افغانستان) و سد دوستی (ایران) همراه بوده است. این نتایج در مقاله صابری فر که تغییرات اقلیمی و بحران آب در مشهد را بررسی می‌کند، نیز مشاهده می‌شود و نتایج این مقاله نشان می‌دهد که ساخت سد سلما در افغانستان و کاهش آب ورودی رودخانه مرزی هریرود تأثیرات زیست‌محیطی قابل توجهی در پایین‌دست (منطقه ایران) داشته است. نتایج این مطالعه حاکی از کاهش جریان آب و کمبود آب زیست‌محیطی مورد نیاز برای حفظ اکوسیستم رودخانه هریرود است. ازسوی دیگر افغانستان با اتخاذ سیاست امنیتی‌سازی آب، پروژه‌های سدسازی (مانند سلما، پاشدان و کبدان) را با هدف کنترل و بهره‌برداری حداکثری از منابع آب داخلی خود دنبال می‌کند. این کشور با استناد به حق حاکمیت ملی و با حمایت مالی و فنی خارجی، عملاً جریان آب به پایین‌دست را محدود کرده است. پس از افتتاح سد سلما (۲۰۱۶)، سهم افغانستان از آب هریرود به ۷۴ درصد و سهم ایران و ترکمنستان هر کدام به ۱۳ درصد کاهش یافت. در سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، تنها ۱/۷۶ درصد از حبابه ایران از هریرود تأمین شد (۱۵ میلیون مترمکعب از ۸۴۰ میلیون مترمکعب) که تهدیدی جدی برای امنیت آب مشهد محسوب می‌شود. طبق پژوهش نظری مجدر و

### تشکر و سپاسگزاری

نگارندگان وظیفه خود می‌دانند از حمایت‌های معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد در انجام این پژوهش قدردانی نمایند.

### تعارض منافع

این مقاله مستخرج از رساله دکتری خانم فاطمه بخشی شادمهری با عنوان: «تحلیل اثر تغییر اقلیم بر مناسبات هیدروپلیتیکی ایران و افغانستان (حوضه‌های آبریز هیرمند و هریرود)» در دانشگاه فردوسی مشهد است. در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

### References

- 1- Abbaszadeh, M. (2020). Climate change and its impact on border disputes with emphasis on shared water resources (Master's thesis). Ferdowsi University of Mashhad. <https://ganj.irandoc.ac.ir/> [in Persian]
- 2- Bastaminia A, Rezaie M R, Saraie M H. (2016). Explaining and Analyzing the Concept of Resiliency and its Indicators and Frameworks in Natural Disasters. *Disaster Prev. Manag. Know.* 6(1):32-46. [In Persian] <http://dpmk.ir/article-1-38-fa.html>.
- 3- Deanat, M., Dorj, H, Ghaderi, I. (2019). Influence of the hydro-polytechnic on the political relations between Iran and the Kurdistan region of Iraq, *Journal of Political Research in Islamic World*, 9(2), 131-158. [In Persian] <https://www.magiran.com/p2037362>
- 4- Ecopeace Middle East. (2022). Climate change as a threat multiplier: Water scarcity and conflict in the Middle East. Ecopeace Middle East Organization. <https://ecopeaceme.org/wp-content/uploads/2022/03/the-climate-crisis-and-the-changing-security-environment-of-the-middle-east.pdf>
- 5- Favre, R.; Kamal, G.M.(2004). Watershed Atlas of Afghanistan. Ministry of Irrigation: Kabul, Afghanistan. [http://www.cawater-info.net/afghanistan/pdf/afg\\_wat\\_atlas\\_part\\_1\\_2.pdf](http://www.cawater-info.net/afghanistan/pdf/afg_wat_atlas_part_1_2.pdf)
- 6- Ghandhari, A., Alavi Moghaddam, S., & Omranian khorasani, H. (2016). Water Resources Management in

حوزه‌های مختلف تأمین نموده و با ارتقای سطح دانش و اعتماد متقابل، به تفاهمی دوجانبه برای حل بحران آب منجر شود. افزون بر این، با توجه به پیوند تاریخی رودخانه هریرود با مسیر باستانی جاده ابریشم، که شبکه‌ای کهن برای تجارت و تبادلات فرهنگی میان شرق و غرب بوده است، ظرفیت قابل ملاحظه‌ای برای بهره‌گیری از دیپلماسی فرهنگی و افزایش نفوذ سیاسی ایران به منظور تأثیرگذاری مثبت بر رویکردهای افغانستان وجود دارد.

لازم به ذکر است طبق مطالعات Shroder در سال ۲۰۱۶ که در افغانستان، آب و مسائل مرتبط با آن، یک موضوع با ابعاد امنیتی تلقی می‌شود و بسیاری از نخبگان، به ویژه در مجامع دانشگاهی، از ورود و اظهارنظر صریح در این خصوص ابراز نگرانی می‌کنند. این حساسیت، فرآیند مذاکره و دستیابی به توافق را پیچیده‌تر می‌نماید. اجرای این چهار راهکار، با تکیه بر تجربه‌های موفق جهانی، می‌تواند تاب‌آوری و امنیت آب مشهد را در برابر شوک‌های اقلیمی و هیدروپلیتیک افزایش دهد و زمینه را برای مدیریت پایدار منابع آب مشترک با افغانستان فراهم کند: تقویت دیپلماسی آب و تلاش برای تدوین توافقنامه‌های الزام‌آور با افغانستان؛ تنوع‌بخشی به منابع آب شهری (بازچرخانی، آب شیرین‌کن، مدیریت تقاضا)؛ ارتقای بهره‌وری مصرف آب در بخش‌های مختلف؛ پایش مستمر منابع آب و مدل‌سازی سناریوهای آینده.

از بعد سیاسی و هیدروپلیتیک، مطالعات قندهاری و همکاران با استفاده از نظریه بازی، لزوم همکاری منطقه‌ای در مدیریت منابع آب هریرود را نشان داده‌اند که با توصیه پژوهش حاضر به تقویت دیپلماسی آب و تدوین توافقنامه‌های الزام‌آور منطبق است و بیانگر این است که تعارض‌ها می‌تواند به همکاری تبدیل شود اگر به منافع مشترک و مدیریت یکپارچه توجه شود. همچنین سینیایی و جمالی بر اهمیت همکاری دوجانبه در زمینه‌های مختلف اقتصادی و فناوری برای تقویت اعتماد و حل بحران آب تأکید کرده‌اند که مورد تأکید این پژوهش نیز هست.

10.22059/jhgr.2022.326813.1008340

16- Moshfegh, A., Moridi, A., Attari, J. (2018). Water resource planning based on the sovereignty doctrines in sharing of transboundary water resources. *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 80-91. [In Persian] [https://www.iwrr.ir/article\\_63362\\_58e4ed155b2c1803533e3b240b7eaebc.pdf](https://www.iwrr.ir/article_63362_58e4ed155b2c1803533e3b240b7eaebc.pdf)

17- Movlaie, A., Aviani Rad, M., Rabiee, H. and Ahmadi, V. (2021). The Effect of Water Shortage in South-West Asia on the Zionist Regime Territoriality. *Strategic Studies Quarterly*, 24(2), 105-141. [In Persian] 20.1001.1.17350727.1400.24.92.4.8

18- Nagheeb, M., Piri, M., & Faure, M. (2019). The legitimacy of dam development in international watercourses: a case study of the harirud river basin. *Transnational Environmental Law*, 8(2), 247-278. DOI: <https://doi.org/10.1017/S2047102519000128>

19- Nazari Mejdari, H., Moridi, A., Yazdi, J. and KhazaiePoul, A. (2019). Sustainability Outlook of Domestic and Agricultural Demand of Dusti Dam Considering Climate change Scenarios and Impact of Salma Dam. *Iran-Water Resources Research*, 15(3), 17-32. [In Persian] 20.1001.1.17352347.1398.15.3.2.3

20- Pahl-Wostl, C., Möltgen, J., Sendzimir, J. And Kabat, P. (2005). New methods for adaptive water management under uncertainty: The newwater project. EWRA 141A, Proc. 6th Intl Conf. European Water Resources Management, EWRA2005. [https://www.researchgate.net/publication/230557733\\_Transitions\\_to\\_Adaptive\\_Water\\_Management\\_The\\_NeWater\\_Project](https://www.researchgate.net/publication/230557733_Transitions_to_Adaptive_Water_Management_The_NeWater_Project)

21- Qureshi, S., Mianabadi, H., Parvaresh Rizi, A. (2021). Matrix Analysis of Transboundary Water Interactions in the Hirmand Basin. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 19(72), 22. [In Persian] DOI:10.18869/acadpub.jstnar.19.72.22.

22- Rahnama, M. R. and Shaddel, L. (2015). Evaluation of Sustainability and the Optimal Population based on Water Resources in Mashhad. *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 3(2), 123-143. [In Persian] doi: 10.22059/jurbangeo.2015.55345

23- Saberifar, Rostam (2023). Climate Change and Water Crisis (Case Study, Mashhad in Northeastern Iran,

the Harirud river basin based on game theory. *Journal of Water and Sustainable Development*, 3(1), 115-121. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v3i1.55039> [In Persian]

7- Hafeznia, M. R. (2011). Principles and concepts of geopolitics [Book]. Mashhad, Iran: Papoli Publications. [In Persian]

8- Hsiang, S. M., Burke, M., & Miguel, E. (2013). Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science*, 341(6151), 1235367. <https://doi.org/10.1126/science.1235367>

9- Julien, F. (2012). Hydropolitics is What Societies Make of it (or why we need a Constructivist Approach to the Geopolitics of Water). *Sustainable Society*, 4(1), 45-71. <https://doi.org/10.1504/IJSSOC.2012.044665>

10- King, M., & Sturtewagen, B. (2010). Making the Most of Afghanistan's River Basins: Opportunities for Regional Cooperation. EastWest Institute. [https://www.files.ethz.ch/isn/113057/2010-02\\_Making-the-most-of-Afghanistans.pdf](https://www.files.ethz.ch/isn/113057/2010-02_Making-the-most-of-Afghanistans.pdf)

11- Khosravani, A. and Tohidfam, M. (2020). Turkmenistan's Policy on Water Resources in Hydropolitics of Central Asia. *Central Asia and The Caucasus Journal*, 26(109), 1-31. [In Persian] [https://ca.ipisjournals.ir/article\\_45665.html?lang=en](https://ca.ipisjournals.ir/article_45665.html?lang=en)

12- Loodin, N.; Wolf, A.T. (2022). Will Islamic Water Management Principles Be Included If the Helmand River Treaty Is Revisited? *Water*, 14, 67. DOI:10.3390/w14010067

13- McDonald, R. I., Green, P., Balk, D., Fekete, B. M., Revenga, C., Todd, M., & Montgomery, M. (2011). Urban growth, climate change, and freshwater availability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(15), 6312-6317. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011615108>

14- Mianabadi, H., & Qureshi, S. Z. (2022). Explaining realism and liberalism paradigms in hydropolitical relations. *International Geopolitics Quarterly*. [in persian] 20.1001.1.17354331.1401.18.65.6.2

15- Mohamadi, H., Ahmadi, E., Ahmadi, S. & Hakimi Khoram, A. (2023). Analysis of the effects of Afghanistan Salma Dam on water stresses in Mashhad. *Human Geography Research*, 55(4), 53-70. [In Persian]

- Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., & Davies, P.M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- 30- Wang, C. H., Blackmore, J., Wang, X., Yum K.K., Zhou, M., Diaper, C., McGregor, G., Anticev, J. (2009). Overview of resilience concepts with application to water resource systems. Ewater Technical Report. September 2009. <http://ewatercrc.com.au/reports/ResilienceConcepts.pdf>
- 31- Warner, J., Mirumachi, N., Farnum, R. L., Grandi, M., Menga, F., & Zeitoun, M. (2017). Transboundary 'hydro-hegemony': 10 years later. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 4(6), 1221-1242. <http://doi.wiley.com/10.1002/wat2.1242>
- 32- Waterbury, J. (2017). *Hydropolitics*. Online. <https://archive.org/details/hydropoliticsofn0000wate>
- 33- Zahabiyou, B. (2002). Effects of climate change on water resources [Book]. Ministry of Energy – National Committee on Large Dams of Iran; Vojdnegareh Company. [in persian]
- 34- Zeitoun, M., & Mirumachi, N. (2008). Transboundary water interaction I: reconsidering conflict and co-operation. *Int Environ Agreements*, 8(4):297-316. <https://doi.org/10.1007/s10784-008-9083-5>
- 35- Zeitoun, M., & Warner, J. (2006). Hydro-hegemony – a framework for analysis of trans-boundary water conflicts. *Water Policy*, 8(5), 435-460. DOI:10.2166/wp.2006.054
- Pol. J. Environ. Stud. Vol. 32, No. 1. DOI: 10.15244/pjoes/151988
- 24- Schouten, Marleen A.H. & van der Heide, Martijn M. & Heijman, Wim J.M. (2009). Resilience of Social-Ecological Systems in European Rural Areas: Theory and Prospects, 113th Seminar, December 9-11, 2009, Belgrade, Serbia 57343, European Association of Agricultural Economists. DOI: 10.22004/ag.econ.57343.
- 25- Sedraniya, H. (2018). Analysis of hydro-political relations between Iran and Afghanistan and proposing an optimal management model for the shared Harirud watershed [Unpublished doctoral dissertation]. Kharazmi University, Tehran, Iran. [In Persian] <https://ganj.irandoc.ac.ir/>
- 26- Shoghi Javan, A. and Ahmadi, A. (2018). A Stability Analysis of Treaties in Transboundary Rivers Using Game Theory, a Case Study: Harirud River. *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 102-113. [In Persian] [https://www.iwrr.ir/article\\_63371\\_ff9960ed6a062ddf12cc9bbe42bf0f8b.pdf?lang=en](https://www.iwrr.ir/article_63371_ff9960ed6a062ddf12cc9bbe42bf0f8b.pdf?lang=en)
- 27- Shroder, J.(2016). Hydro-Hegemony in Afghanistan and Surrounding Countries. *Transboundary Water Resources in Afghanistan*; Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 2016; pp. 339-359. DOI:10.1016/B978-0-12-801886-6.00014-8
- 28- Sinayi, Vahid, and Jamali, Javad. (2018). Economic Diplomacy of the Islamic Republic of Iran in Afghanistan and the Management of Water Disputes between the Two Countries (Applying the Institutional Economics Approach). *Strategic Studies of Public Policy (Globalization Strategic Studies)*, 8(28), 69-93. SID. <https://sid.ir/paper/229883/fa>. [In Persian]
- 29- Vorosmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O.,

---

## COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)

