



Research Paper

Environmental Security Implications of Reduced Harirud River Discharge in Iran: A Case Study of Sarakhs Count

Mahdi Orduni Doosti¹, Amir Hooshang Mirkooshesh^{*1}, Masoud Motallebi²

¹ Department of Political Science and International Relations, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

² Department of Political Science, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Keywords

Environmental security,
Transboundary
hydropolitics, Harirud
River discharge, PSR
framework, Salma Dam.

Scan me



A B S T R A C T

The persistent reduction in the discharge of the Harirud River entering Sarakhs County, located in the Khorasan Razavi Province of northeastern Iran primarily a consequence of the commencement of the Salma Dam project in Afghanistan in 2016, further exacerbated by regional climatic variations constitutes a measurable and escalating threat to Iran's environmental security at the sub-national level. Utilizing a quantitative descriptive-analytical approach grounded exclusively in secondary data from the years 2000 to 2023, this study employs Mann-Kendall trend analysis, Sen's slope estimation, Pettitt change-point detection, and bivariate correlation analysis within an integrated Pressure-State-Response (PSR) framework alongside the environmental security paradigm established by the Copenhagen School. An analysis of hydrometric, remote sensing (NDVI), piezometric, agricultural census, meteorological, and demographic data reveals statistically significant, multidimensional deterioration across all assessed security indicators following the alteration of the structural discharge regime in 2016. The annual discharge has decreased at a rate of 12.3 million m³ per year, resulting in the inflow to the Doosti Dam being reduced to approximately 70% of its pre-2016 baseline, while downstream impacts include an estimated 41% decline in NDVI, a 72% increase in annual dust storm occurrences, a 7.4-meter drop in groundwater levels, a 34% reduction in irrigated land, a 33% decrease in irrigated wheat production, and a reversal in rural demographic growth from +1.2% to -2.8% annually. Correlation analysis further demonstrates that annual discharge accounts for between 37% and 71% of the variability in key environmental security indicators. Collectively, these results corroborate the causal link between unilateral upstream water-infrastructure developments and multidimensional downstream environmental insecurity, thereby establishing a robust empirical basis for advocating a binding trilateral water-sharing agreement for the Harirud/Tejen Basin among Afghanistan, Iran, and Turkmenistan.

*Corresponding Author: Amir Hooshang Mirkooshesh

Email Address: m.ordunidoosti@iau.ir

Orduni Doosti, M., Mirkooshesh, A. H. & Motallebi, M. (2026). Environmental Security Implications of Reduced Harirud River Discharge in Iran: A Case Study of Sarakhs Count. *Human Ecology*, 5(14), 2499–2513.



DOI: <https://doi.org/10.22034/he.2026.592006.1247>



پیامدهای امنیت زیست‌محیطی کاهش دبی رودخانه هریرود در ایران: مطالعه موردی شهرستان سرخس

مهدی اردونی دوستی^۱ امیرهوشنگ میرکوشش*^۱ مسعود مطلبی^۲

^۱ گروه علوم سیاسی و روابط بین الملل، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

^۲ گروه علوم سیاسی، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

واژگان کلیدی

امنیت زیست‌محیطی،
هیدروپلیتیک فرامرزی،
دبی رودخانه هریرود، مدل
فشار-وضعیت-پاسخ
(PSR)، سد سلما.

اسکن کنید



چکیده

کاهش مستمر دبی رودخانه هریرود در ورودی شهرستان سرخس در استان خراسان رضوی، که عمدتاً در پی آغاز بهره‌برداری از سد سلما در افغانستان از سال ۲۰۱۶ و همچنین تحت تأثیر تغییرات اقلیمی منطقه‌ای رخ داده است، به یکی از تهدیدهای فزاینده برای امنیت زیست‌محیطی ایران در سطح منطقه‌ای تبدیل شده است. پژوهش حاضر با رویکردی کمی، توصیفی-تحلیلی و با اتکا به داده‌های ثانویه دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، از آزمون روند من-کندال، برآورد شیب سن، آزمون تشخیص نقطه تغییر پتیت و تحلیل همبستگی دو متغیره در چارچوب مدل فشار-وضعیت-پاسخ (PSR) و پارادایم امنیت زیست‌محیطی مکتب کپنهاگ بهره گرفته است. نتایج تحلیل داده‌های هیدرومتری، سنجش از دور (NDVI)، پیرومتری، سرشماری کشاورزی، هواشناسی و جمعیتی نشان داد که پس از تغییر رژیم جریان رودخانه در سال ۲۰۱۶، تمامی شاخص‌های امنیت زیست‌محیطی مورد بررسی دچار افتی معنادار و چندبعدی شده‌اند. دبی سالانه رودخانه با نرخ ۱۲۰۳ میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته و در نتیجه، ورودی آب به سد دوستی به حدود ۷۰ درصد سطح پیش از سال ۲۰۱۶ رسیده است. همچنین، کاهش حدود ۴۱ درصدی شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، افزایش ۷۲ درصدی وقوع سالانه طوفان‌های گردوغبار، افت ۷۰۴ متری سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش ۳۴ درصدی اراضی آبی، کاهش ۳۳ درصدی تولید گندم آبی و تغییر نرخ رشد سالانه جمعیت روستایی از ۱۰۲ درصد به منفی ۲۰۸ درصد از مهم‌ترین پیامدهای این روند بوده است. نتایج تحلیل همبستگی نیز نشان داد که دبی سالانه رودخانه بین ۳۷ تا ۷۱ درصد از تغییرات شاخص‌های کلیدی امنیت زیست‌محیطی را تبیین می‌کند. در مجموع، یافته‌های پژوهش وجود رابطه علی میان توسعه‌های یک‌جانبه زیرساخت‌های آبی در بالادست و تشدید ناامنی زیست‌محیطی در پایین‌دست را تأیید کرده و ضرورت تدوین و اجرای یک توافق‌نامه الزام‌آور سه‌جانبه برای مدیریت و تقسیم آب در حوضه هریرود-تجن میان ایران، افغانستان و ترکمنستان را نشان می‌دهد.

۱. مقدمه

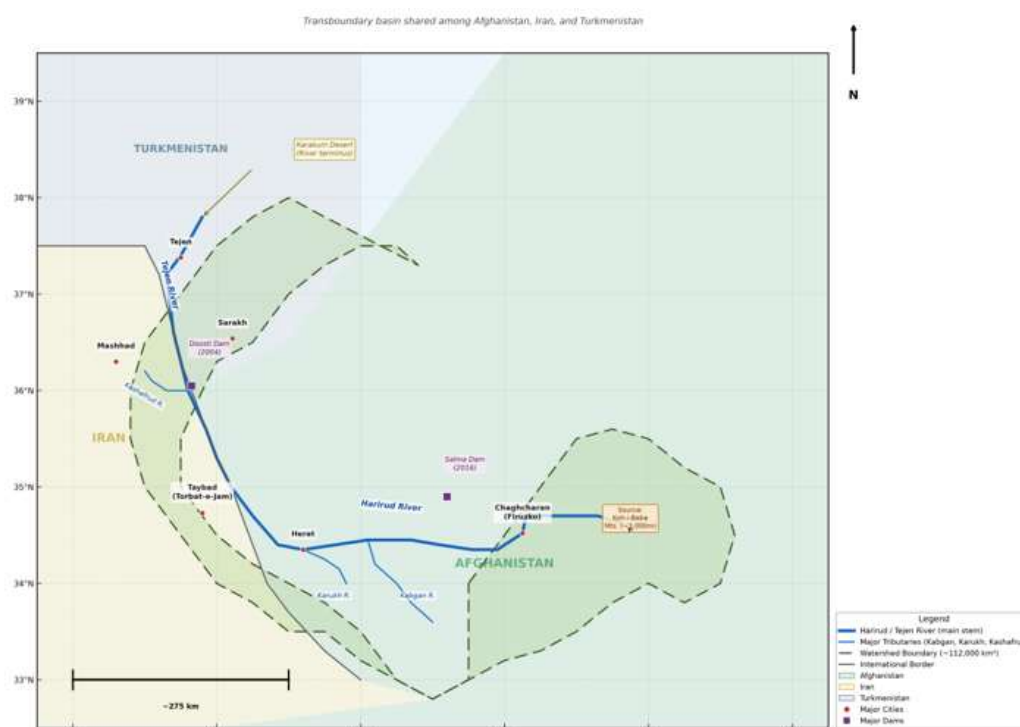
۱.۱ منابع آب فرامرزی و چالش جهانی امنیت زیست‌محیطی

کمبود آب و پیامدهای امنیتی ناشی از آن، امروزه به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است؛ چالشی که می‌تواند ثبات سیاسی کشورها و تعادل منطقه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد (کامران و همکاران، ۱۳۹۶). در این میان، کاهش منابع آب شیرین به یکی از مسائل اساسی قرن بیست‌ویکم در ابعاد زیست‌محیطی و ژئوپلیتیکی تبدیل شده است. این مسئله در حوضه‌های آبریز فرامرزی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا این حوضه‌ها هم‌زمان با چالش‌هایی همچون شکنندگی اکولوژیکی، تهدید امنیت غذایی و تعارضات مرتبط با حاکمیت ملی روبه‌رو هستند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، رودخانه‌های مرزی نه تنها شریان‌های حیاتی تأمین آب به شمار می‌روند، بلکه با کاهش جریان آب، به کانون بالقوه تنش میان کشورهای ساحلی نیز تبدیل می‌شوند؛ زیرا اهداف توسعه‌ای، ظرفیت‌های نهادی و موقعیت هیدرولوژیکی این کشورها معمولاً یکسان نیست و همین عدم توازن، رقابت بر سر منابع آب را تشدید می‌کند (Zeitoun & Warner, 2006, Thomas & Warner, 2015). در ادبیات امنیت زیست‌محیطی، پژوهشگران مکتب کپنهاگ و نظریه‌پردازان تعارضات زیست‌محیطی نشان داده‌اند که کمبود مداوم آب، خواه ناشی از تغییرات اقلیمی باشد، خواه نتیجه احداث سازه‌های آبی در بالادست یا مدیریت نادرست منابع آب زیرزمینی، می‌تواند به تهدیدی جدی برای امنیت تبدیل شود؛ تهدیدی که پیامدهای آن در تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش توان اقتصادی بخش کشاورزی و تضعیف معیشت جوامع روستایی نمایان می‌شود (Nagheeb & Warner, 2018; Azizi & Leandro, 2025). این وضعیت در کشورهای که برداشت آب در بخش کشاورزی از ظرفیت منابع تجدیدپذیر فراتر رفته است، شدت بیشتری دارد. ایران نمونه‌ای روشن از این شرایط است؛ به گونه‌ای که حدود ۹۰ درصد آب مصرفی کشور در بخش کشاورزی استفاده می‌شود، در حالی که منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی با روندی فزاینده در حال کاهش هستند (Maghrebi et al., 2020). همچنین، میزان برداشت تجمعی از آب‌های زیرزمینی غیرتجدیدپذیر در ایران از ۶۶ میلیون مترمکعب در سال ۱۹۶۵ به حدود ۱۳۳ هزار میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۹ افزایش یافته و تقریباً تمامی زیرحوضه‌های اصلی کشور با پدیده افت منابع آب زیرزمینی مواجه شده‌اند (Noori et al., 2021).

در چنین شرایطی، شمال شرق ایران به دلیل قرار گرفتن در منطقه‌ای خشک تا نیمه‌خشک و واقع شدن در پایین‌دست یک رودخانه فرامرزی با اهمیت سیاسی، از آسیب‌پذیرترین مناطق کشور به شمار می‌رود. جوامع ساکن استان خراسان رضوی هم‌زمان با پیامدهای توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست، آثار تغییرات اقلیمی بر منابع آب و نبود یک چارچوب حقوقی الزام‌آور برای تقسیم آب میان کشورهای ذی‌نفع مواجه هستند. از این رو، امنیت زیست‌محیطی در این منطقه صرفاً یک مفهوم نظری نیست، بلکه واقعیتی ملموس است که زندگی روزمره ساکنان را تحت تأثیر قرار داده است. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف تبیین سازوکارها، ابعاد و پیامدهای این ناامنی زیست‌محیطی در سطح محلی انجام شده است.

۱.۲ حوضه آبریز هریرود؛ منبعی راهبردی با حکمرانی ناکارآمد

رودخانه هریرود که در بخش میانی مسیر خود «هریرود» و در بخش پایانی فرامرزی «تجن» نامیده می‌شود، یکی از مهم‌ترین و راهبردی‌ترین رودخانه‌های آسیای مرکزی و جنوب غربی آسیاست؛ با این حال، از نظر حکمرانی و مدیریت فرامرزی، از ضعف‌های نهادی قابل توجهی رنج می‌برد (Azizi & Leandro, 2025). این رودخانه از ارتفاعات برف‌گیر رشته‌کوه هندوکش در افغانستان سرچشمه می‌گیرد و پس از طی حدود ۱۱۰۰ کیلومتر، از قلمرو سه کشور عبور کرده و در نهایت در دشت‌های بیابانی مجاور مرز ایران و ترکمنستان پایان می‌یابد (شکل ۱). هریرود در نزدیکی شهرستان تایباد به مرز ایران و افغانستان می‌رسد و تا گذرگاه ذوالفقار بخشی از مرز مشترک دو کشور را تشکیل می‌دهد. سپس در پل خاتون با رودخانه کشف رود تلاقی کرده و از آن نقطه با نام «تجن» شناخته می‌شود. این رودخانه در ادامه بخشی از مرز ایران و ترکمنستان را نیز مشخص کرده و در نهایت در دشت قره‌قوم پراکنده می‌شود. میانگین دبی آن در ایستگاه پل خاتون حدود ۳۸ مترمکعب بر ثانیه و رواناب سالانه آن نزدیک به ۱۰۲ میلیارد مترمکعب برآورد شده است (کامران و همکاران، ۱۳۹۶).



شکل ۱- پیکربندی جغرافیایی حوضه آبریز هریرود-تجن، شامل مرز حوضه آبریز (با مساحت تقریبی ۱۱۲ هزار کیلومتر مربع)، زیرساخت‌های اصلی شامل سد سلما در افغانستان (بهره‌برداری در سال ۲۰۱۶) و سد دوستی در مرز ایران-ترکمنستان (بهره‌برداری در سال ۲۰۰۴)، شبکه رودخانه‌ای و مراکز عمده شهری در کشورهای افغانستان، ایران و ترکمنستان. سیستم مختصات: WGS 84. منابع: Nazari Mejdari و همکاران (۲۰۲۳)، Azizi و Leandro (۲۰۲۵)

۱.۳ توسعه بالادست، تغییرات اقلیمی و فشار مضاعف بر مناطق پایین‌دست ایران

چالش امنیت زیست‌محیطی در شمال شرق ایران، به‌ویژه در حوضه آبریز هریرود، حاصل یک عامل واحد نیست، بلکه از برهم‌کنش توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست و تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از تغییرات اقلیمی شکل گرفته است. ارزیابی‌های اقلیمی منطقه نشان می‌دهد که از سال ۱۹۸۰ تاکنون، میانگین دمای منطقه حدود ۱٫۷ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و میزان بارش سالانه نیز حدود ۱۵۰ میلی‌متر کاهش یافته است. این تغییرات موجب جابه‌جایی زمان ذوب برف، کاهش دبی اوج جریان‌های بهاره و برهم خوردن تعادل بلندمدت منابع آب حوضه شده است (Azizi & Leandro, 2025). همچنین، پیش‌بینی‌های مبتنی بر مدل‌های چندگانه اصلاح‌شده در سناریوهای مسیرهای غلظت نماینده (RCP) نشان می‌دهد که تا پایان قرن بیست‌ویکم، دمای منطقه بین ۱٫۵ تا ۳٫۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و میزان بارش در سطح حوضه بین ۱۹ تا ۲۴ درصد کاهش خواهد یافت. هم‌زمان با کاهش منابع آب ناشی از تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری از سد سلما نیز تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش جریان آب ورودی به سد دوستی داشته است؛ به‌گونه‌ای که ورود آب به این سد مشترک ایران و ترکمنستان در پایین‌دست حوضه هریرود-تجن حدود ۷۰ درصد کاهش یافته است. سد دوستی مهم‌ترین زیرساخت تأمین امنیت آبی شهرستان سرخس به شمار می‌رود و علاوه بر آن، بخش قابل‌توجهی از نیاز آبی شهرهای بزرگی همچون مشهد را نیز تأمین می‌کند (Nazari Mejdari et al., 2023). این سد در اوایل دهه ۱۳۸۰ و در شرایطی احداث شد که افغانستان هنوز توان نهادی لازم برای اعمال حقوق خود بر منابع آب بالادست را نداشت و هدف اصلی از ساخت آن، تنظیم و تثبیت عرضه فصلی آب بر اساس شرایط هیدرولوژیکی مطلوب آن دوره بود (Azizi & Leandro, 2025). با این حال، تغییرات هیدرولوژیکی سال‌های اخیر موجب شده است که کارایی و قابلیت بهره‌برداری این سد با محدودیت‌های جدی روبه‌رو شود.

نتایج مدل‌سازی در سناریوی انتشار بالای RCP 8.5 نیز نشان می‌دهد که احتمال تأمین پایدار آب مورد نیاز بخش کشاورزی از سامانه سد دوستی به کمتر از ۳ درصد کاهش می‌یابد؛ وضعیتی که عملاً به معنای شکست ساختاری در تأمین آب محسوب می‌شود (Nazari Mejdari et al., 2023). از این رو، توسعه یک‌جانبه زیرساخت‌های آبی در بالادست، همراه با کاهش منابع آب ناشی از تغییرات اقلیمی، فشار مضاعفی را بر مناطق پایین‌دست ایران وارد کرده است. در این میان، شهرستان سرخس نمونه‌ای شاخص برای بررسی هم‌زمان هیدروپلیتیک فرامرزی، کمبود آب و ناامنی زیست‌محیطی به شمار می‌آید.

حوضه آبریز هریرود با وسعتی در حدود ۳۰۹ میلیون هکتار، نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی، آب شرب مراکز عمده شهری و تولید برق آبی در منطقه‌ای خشک با نرخ بالای تبخیر و تعرق و نوسانات شدید هیدرولوژیکی ایفا می‌کند (Mazloun Yar et al., 2023). با وجود این اهمیت زیست‌محیطی و اقتصادی، تاکنون هیچ توافق‌نامه الزام‌آور سه‌جانبه‌ای برای تقسیم آب میان افغانستان، ایران و ترکمنستان در این حوضه وجود ندارد. این وضعیت، حوضه هریرود را از نظر حقوقی در موقعیتی مبهم قرار داده است؛ در حالی که حوضه هیرمند دست‌کم از معاهده سال ۱۹۷۳ میان ایران و افغانستان به‌عنوان یک چارچوب حقوقی اولیه برخوردار است، در حوضه هریرود هیچ سازوکار الزام‌آوری برای تعیین حقوق و تعهدات کشورهای بالادست و پایین‌دست وجود ندارد (Azizi & Leandro, 2025; Thomas & Warner, 2015). این خلأ حکمرانی، پس از سقوط طالبان در سال ۲۰۰۱ و با ورود منابع مالی بین‌المللی برای بازسازی افغانستان، زمینه را برای اجرای سیاست توسعه گسترده زیرساخت‌های آبی در بالادست فراهم کرد. مهم‌ترین نمود این سیاست، احداث سد سلما در نزدیکی منطقه چشت شریف در استان هرات است؛ پروژه‌ای که با حمایت مالی و فنی هند اجرا شد. ایده اولیه ساخت این سد در دوره ریاست‌جمهوری محمد داوود خان مطرح شده بود، اما به دلیل جنگ و بی‌ثباتی متوقف شد و سرانجام پس از سقوط طالبان و با کمک‌های بلاعوض دولت هند تکمیل و به بهره‌برداری رسید (عزتی و همکاران، ۱۳۹۱). بهره‌برداری از این سد، رژیم جریان آب در پایین‌دست و به‌ویژه در قلمرو ایران را به‌طور اساسی دگرگون کرده است (Nagheebby & Warner, 2018). در سال‌های اخیر، مطالعات هیدروپلیتیکی افغانستان را به‌عنوان یک «هیدروهمژمون نوظهور» در حوضه هریرود معرفی کرده‌اند؛ کشوری بالادست که با اتکا به موقعیت جغرافیایی، دسترسی به منابع مالی خارجی و نبود سازوکارهای حقوقی الزام‌آور برای حمایت از حقوق کشورهای پایین‌دست، توانسته است کنترل قابل‌توجهی بر منابع آب مشترک اعمال کند (Thomas & Warner, 2015). همچنین، نتایج مدل‌های مبتنی بر نظریه بازی‌های تعاونی نشان می‌دهد که در صورت اعمال اصول تخصیص منصفانه، سهم ایران از جریان رودخانه هریرود باید حدود ۴۰ درصد باشد؛ در حالی که به دلیل مهار آب در بالادست، میزان آب ورودی به ایران به‌مراتب کمتر از این مقدار است (Mirzaei-Nodoushan et al., 2022).

۱.۴ ابعاد امنیت زیست‌محیطی در شهرستان سرخس

امنیت زیست‌محیطی، به‌ویژه در حوزه منابع آب، به مجموعه تهدیدهایی اشاره دارد که در نتیجه تخریب محیط‌زیست، کاهش منابع طبیعی و پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی، پایداری اکولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی را با مخاطره مواجه می‌سازد (Nagheebby & Warner, 2018; Azizi & Leandro, 2025). مکتب کپنهاگ با گسترش مفهوم امنیت، دامنه آن را از تهدیدهای صرفاً نظامی فراتر برده و ابعاد زیست‌محیطی و انسانی را نیز دربر گرفته است. بر این اساس، امنیت زیست‌محیطی به یکی از حوزه‌های مهم مطالعات امنیتی تبدیل شده که به بررسی پیامدهای ناشی از کمبود منابع طبیعی، تخریب محیط‌زیست و تأثیر آن‌ها بر پایداری زندگی انسان می‌پردازد. در این چارچوب، کمبود منابع آب شیرین یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان به شمار می‌رود (کامران و همکاران، ۱۳۹۶). در شهرستان سرخس، که در محل ورود رودخانه تجن از افغانستان به ایران قرار دارد، امنیت زیست‌محیطی صرفاً یک مفهوم نظری نیست، بلکه واقعیتی ملموس است که در قالب تخریب اکوسیستم‌ها، تشدید تنش آبی در بخش کشاورزی، افت سطح آب‌های زیرزمینی و مهاجرت اجباری جمعیت روستایی نمود پیدا می‌کند (Mazloun Yar et al., 2023; Azizi & Leandro, 2025). در پژوهش حاضر، امنیت زیست‌محیطی بر پایه چهار بعد به‌هم‌پیوسته شامل امنیت اکولوژیکی، امنیت آب، امنیت غذایی و امنیت انسانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، نتایج پژوهش‌های اخیر در حوضه‌های آبریز ایران نشان می‌دهد که به‌کارگیری چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR) و تلفیق شاخص‌های سلامت حوضه آبریز و امنیت اکولوژیکی، رویکردی مناسب برای سنجش امنیت زیست‌محیطی در سطح منطقه‌ای و محلی فراهم می‌کند (Sadeghi et al., 2022; Chamani et al., 2023).

۱.۵ اهمیت و نوآوری پژوهش

پژوهش حاضر با ارائه تحلیلی کمی در مقیاس شهرستان، سهمی مؤثر در ادبیات هیدروپلیتیک فرامرزی، امنیت زیست‌محیطی و حکمرانی منابع آب دارد و نشان می‌دهد که چگونه فشارهای کلان ژئوپلیتیکی و تغییرات اقلیمی در سطح محلی به اشکال عینی و قابل اندازه‌گیری ناامنی زیست‌محیطی منجر می‌شوند. اگرچه مطالعات پیشین درباره حوضه هریرود عمدتاً بر روابط قدرت میان دولت‌ها، هیدروپلیتیک و مدل‌سازی تخصیص آب در مقیاس حوضه متمرکز بوده‌اند (Nagheebby & Warner, 2018; Thomas & Warner, 2015; Mirzaei-Nodoushan et al., 2022)، اما تاکنون پیامدهای اکولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی این تحولات برای یک منطقه مشخص در پایین‌دست، مانند شهرستان سرخس، به‌صورت جامع و نظام‌مند بررسی نشده است. این پژوهش با تلفیق داده‌های هیدرومتری، اطلاعات سنجش از دور، اندازه‌گیری‌های آب‌های زیرزمینی، آمارهای کشاورزی، داده‌های هواشناسی و شاخص‌های جمعیتی در قالب یک چارچوب جامع امنیت زیست‌محیطی، علاوه بر ارائه تصویری دقیق از وضعیت موجود، مبنایی علمی برای تدوین سیاست‌ها و راهکارهای مدیریتی فراهم

می‌کند. افزون بر این، مطالعه حاضر از نظر مفهومی نیز نوآورانه است؛ زیرا کارآمدی یک چارچوب چندبعدی متشکل از امنیت اکولوژیکی، امنیت آب، امنیت غذایی و امنیت انسانی را در تبیین پیامدهای ناشی از کاهش منابع آب فرامرزی در سطح محلی مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Talaei et al., 2026).

۲. محدوده مطالعه

۲.۱ ویژگی‌های جغرافیایی و هیدرولوژیکی

شهرستان سرخس در شمال شرقی استان خراسان رضوی و در مختصات تقریبی $36^{\circ}33'$ عرض شمالی و $61^{\circ}10'$ طول شرقی، با ارتفاعی حدود ۲۷۰ متر از سطح دریا قرار دارد. این شهرستان از شمال با ترکمنستان و از شرق با افغانستان هم‌مرز است و از این نظر، در محل تلاقی قلمرو سه کشور و در پایین دست حوضه آبریز هریرود-تجن واقع شده است. رودخانه تجن، که پس از پیوستن هریرود به کشف‌رود در پل خاتون این نام را به خود می‌گیرد، مهم‌ترین منبع آب سطحی شهرستان برای مصارف کشاورزی و شرب محسوب می‌شود و پس از عبور از این منطقه، در دشت‌های بیابانی قره‌قوم در ترکمنستان پایان می‌یابد (کامران و همکاران، ۱۳۹۶؛ Azizi & Leandro, 2025). سد دوستی، که به صورت مشترک توسط ایران و ترکمنستان احداث شده و در سال ۲۰۰۴ به بهره‌برداری رسیده است، در فاصله حدود ۱۵ کیلومتری شمال شهرستان سرخس و در مرز ایران و ترکمنستان (مختصات $37^{\circ}20'$ عرض شمالی و $60^{\circ}41'$ طول شرقی) قرار دارد. این سد با ظرفیت ذخیره‌سازی حدود ۱۹۲۵۰ میلیون مترمکعب، مهم‌ترین زیرساخت تأمین امنیت آبی شهرستان سرخس محسوب می‌شود و علاوه بر آن، بخشی از آب شرب شهرهای بزرگی مانند مشهد را نیز تأمین می‌کند (Nazari Mejdari et al., 2023). در مقابل، سد سلما که در بالادست حوضه و در نزدیکی منطقه چشت شریف استان هرات افغانستان (مختصات $34^{\circ}19'$ عرض شمالی و $64^{\circ}14'$ طول شرقی) واقع شده است، در سال ۲۰۱۶ با ظرفیت ذخیره‌سازی حدود ۶۴۰ میلیون مترمکعب و شبکه آبیاری به وسعت ۷۵ هزار هکتار به بهره‌برداری رسید و مهم‌ترین عامل انسانی مؤثر بر کاهش جریان آب در پایین دست به شمار می‌رود (Nagheby & Warner, 2018; Thomas & Warner, 2015).

۲.۲ اقلیم و ویژگی‌های هیدرولوژیکی

منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک تا نیمه خشک بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن (BWk) است. میانگین بارش سالانه در این منطقه حدود ۱۷۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر بوده که عمدتاً در فصل زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد، در حالی که میانگین دمای سالانه بین ۱۷ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد متغیر است (Moshir Panahi et al., 2020). میزان تبخیر و تعرق در منطقه به طور قابل توجهی بیش از بارندگی است؛ از این رو، شهرستان سرخس با کمبود مزمن منابع آب روبه‌رو بوده و تأمین آب آن وابستگی زیادی به جریان رودخانه هریرود-تجن و ذخایر سد دوستی دارد. مطالعات اقلیمی منطقه نشان می‌دهد که از سال ۱۹۸۰ تاکنون، میانگین دمای منطقه حدود ۱۰۷ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و میزان بارندگی سالانه نیز حدود ۱۵۰ میلی‌متر کاهش یافته است. این تغییرات موجب تغییر زمان ذوب برف در ارتفاعات هندوکش و کاهش جریان‌های اوج بهاره شده است (Azizi & Leandro, 2025). همچنین، پیش‌بینی‌های مبتنی بر مدل‌های اقلیمی و سناریوهای مسیرهای غلظت نماینده (RCP) نشان می‌دهد که تا پایان قرن بیست و یکم، دمای حوضه بین ۱۰۵ تا ۳۰۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و میزان بارندگی بین ۱۹ تا ۲۴ درصد کاهش خواهد یافت (Nazari Mejdari et al., 2023).

۲.۳ ویژگی‌های اجتماعی و اقتصادی

شهرستان سرخس دارای جمعیتی عمدتاً روستایی است که بخش عمده فعالیت‌های اقتصادی آن بر کشاورزی آبی استوار است. مهم‌ترین محصولات زراعی منطقه شامل گندم، پنبه و گیاهان علوفه‌ای هستند. بر اساس داده‌های سرشماری مورد استفاده در این پژوهش، پیش از سال ۲۰۱۶ حدود ۸۲ هزار هکتار از اراضی شهرستان به کشاورزی آبی اختصاص داشت و جمعیت روستایی منطقه در آن دوره از نرخ رشد سالانه مثبت حدود ۱۰۲ درصد برخوردار بود (Mazloun Yar et al., 2023). وابستگی گسترده اقتصاد محلی به منابع آب، در کنار محدود بودن فرصت‌های شغلی جایگزین و نبود منابع آب سطحی مکمل، موجب شده است که شهرستان سرخس در برابر نوسانات هیدرولوژیکی، کاهش جریان رودخانه و پیامدهای ناشی از توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست و تغییرات اقلیمی، آسیب‌پذیری بالایی داشته باشد.

۳.۳ پیشینه پژوهش

۳.۱ کاهش دبی رودخانه هریرود: مفهوم، اهمیت و پیشینه پژوهش

کاهش دبی رودخانه هریرود به کاهش مستمر و قابل اندازه‌گیری حجم جریان آب این رودخانه اطلاق می‌شود که بر حسب میلیون مترمکعب در سال اندازه‌گیری شده و در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در مسیر رودخانه، از ارتفاعات افغانستان تا دشت‌های مرزی ایران و ترکمنستان،

ثبت می‌شود (Azizi & Leandro, 2025). از دیدگاه هیدرولوژیکی، این پدیده تنها به کاهش حجم سالانه جریان محدود نمی‌شود، بلکه تغییر در الگوی زمانی جریان آب را نیز در بر می‌گیرد. به‌ویژه، کاهش سیلاب‌های بهاره ناشی از ذوب برف در ارتفاعات هندوکش، که در گذشته نقش اساسی در تأمین آب مخازن، کشاورزی آبی و حفظ تعادل اکولوژیکی مناطق پایین‌دست شمال شرق ایران داشت، از مهم‌ترین پیامدهای این تغییر محسوب می‌شود (Nazari Mejdari et al., 2023). پیامدهای کاهش دبی هریود صرفاً جنبه هیدرولوژیکی ندارد. این رودخانه یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین مشترک میان افغانستان، ایران و ترکمنستان است؛ منطقه‌ای که با اقلیم خشک، محدودیت منابع آب جایگزین و وابستگی شدید به کشاورزی آبی و ذخایر سدها مواجه است. از این‌رو، کاهش جریان رودخانه، نظامی را که پیش‌تر با وجود نوسانات طبیعی قابل مدیریت بود، به عرصه‌ای از رقابت فزاینده بر سر منابع آب تبدیل کرده است؛ رقابتی که در آن افزایش بهره‌برداری یک کشور، عملاً به کاهش سهم سایر کشورهای حوضه منجر می‌شود (Thomas & Warner, 2015; Nagheebby & Warner, 2018). به همین دلیل، پژوهش‌های موجود کاهش دبی هریود را صرفاً یک پدیده هیدرواقليمی نمی‌دانند، بلکه آن را فرآیندی ساختاری با پیامدهای حقوقی، سیاسی، زیست‌محیطی و توسعه‌ای گسترده تلقی می‌کنند.

۳.۲ عوامل کاهش دبی: توسعه زیرساخت‌های بالادست و تغییرات اقلیمی

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که کاهش دبی رودخانه هریود عمدتاً تحت تأثیر دو عامل به‌هم‌پیوسته قرار دارد: توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست و تغییرات اقلیمی. از منظر مداخلات انسانی، مهم‌ترین عامل، احداث سد سلما در افغانستان است که در سال ۲۰۱۶ با هدف آبیاری حدود ۷۵ هزار هکتار اراضی کشاورزی و تولید ۴۲ مگاوات برق آبی به بهره‌برداری رسید (Nagheebby & Warner, 2018; Thomas & Warner, 2015; Nazari Mejdari et al., 2023). ذخیره‌سازی آب در این سد، به‌ویژه در فصل بهار که بیشترین جریان رودخانه رخ می‌دهد، موجب کاهش ورودی آب به سد دوستی و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان سامانه تأمین آب در پایین‌دست شده است. بسیاری از مطالعات، این وضعیت را نمونه‌ای از اعمال برتری هیدروپلیتیکی کشورهای بالادست در بهره‌برداری از منابع آب مشترک می‌دانند. در کنار این عامل، تغییرات اقلیمی نیز با افزایش دما، کاهش بارندگی و تغییر الگوی ذوب برف در ارتفاعات، نقش مهمی در کاهش رواناب و دبی رودخانه ایفا کرده است (Azizi & Leandro, 2025; Moshir Panahi et al., 2020; Nazari Mejdari et al., 2023). این دو عامل به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه اثرات یکدیگر را تشدید می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که تغییرات اقلیمی ابتدا حجم پایه جریان رودخانه را کاهش می‌دهد و سپس توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست بخش بیشتری از همین جریان محدود را مهار می‌کند. در نتیجه، شدت کمبود آب در پایین‌دست بیش از حالتی است که هر یک از این عوامل به‌تنهایی عمل کنند و همین تعامل، زمینه‌ساز شکل‌گیری ناامنی زیست‌محیطی پیچیده‌تری می‌شود.

۳.۳ امنیت زیست‌محیطی در شهرستان سرخس و خلأ پژوهشی

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که ناامنی زیست‌محیطی در شهرستان سرخس در ابعاد مختلف اکولوژیکی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی قابل مشاهده است. مطالعات مبتنی بر سنجش از دور، کاهش قابل‌توجه پوشش گیاهی در شمال شرق ایران را گزارش کرده‌اند، در حالی که بررسی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی نیز از کاهش قابلیت اطمینان تأمین آب آبیاری، تغییر الگوی کشت و افزایش وابستگی به برداشت از منابع آب زیرزمینی حکایت دارند (Behling et al., 2022; Maghrebi et al., 2020; Noori et al., 2023). همچنین، مطالعات تطبیقی در حوضه‌های آبریز فرامرزی، از جمله حوضه هیرمند، نشان داده‌اند که تداوم نابرابری میان کشورهای بالادست و پایین‌دست می‌تواند موجب تغییر مورفولوژی رودخانه، تشدید تخریب محیط‌زیست و دگرگونی الگوهای استقرار جمعیت شود (Arfa et al., 2025). با وجود این، همچنان خلأ پژوهشی مهمی در ادبیات موضوع وجود دارد. اغلب مطالعات، مسئله هریود را در مقیاس کل حوضه آبریز، روابط میان دولت‌ها یا امنیت آب در سطح ملی بررسی کرده‌اند و کمتر به پیامدهای این تحولات در سطح یک شهرستان پایین‌دست پرداخته‌اند؛ جایی که آثار اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی کاهش جریان رودخانه به‌صورت مستقیم قابل مشاهده و اندازه‌گیری است. تاکنون شهرستان سرخس در قالب یک چارچوب یکپارچه امنیت زیست‌محیطی که بتواند ارتباط میان کاهش دبی رودخانه و پیامدهای اکولوژیکی، کشاورزی، افت منابع آب زیرزمینی و تغییرات جمعیتی را تبیین کند، به‌طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. این خلأ از نظر مقیاس مطالعه، رویکرد تلفیقی و شواهد تجربی، انگیزه اصلی انجام پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد.

۴. اهداف و پرسش‌های پژوهش

با توجه به مجموعه فشارهای ناشی از توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست، تغییرات اقلیمی و کاهش جریان رودخانه هریود، این پژوهش چهار هدف اصلی را دنبال می‌کند. نخست، ارزیابی و اندازه‌گیری روند بلندمدت کاهش دبی رودخانه هریود در مقطعی است که تأمین‌کننده

آب شهرستان سرخس هستند. دوم، بررسی پیامدهای این کاهش بر ابعاد اکولوژیکی، کشاورزی، منابع آب زیرزمینی و وضعیت اجتماعی-اقتصادی شهرستان سرخس است. سوم، تحلیل پیامدهای این تحولات برای امنیت زیست‌محیطی و امنیت ملی ایران در چارچوب هیدروپلیتیک حوضه هریرود و خلأهای موجود در نظام حکمرانی منابع آب میان ایران و افغانستان است. چهارم، ارائه پیشنهادها و سیاستی مبتنی بر یافته‌های پژوهش برای مدیران و تصمیم‌گیران حوزه آب در سطوح استانی و ملی و همچنین ارزیابی ضرورت تدوین و اجرای یک توافق‌نامه الزام‌آور سه‌جانبه برای تقسیم و مدیریت منابع آب حوضه هریرود با هدف ارتقای امنیت مناطق پایین‌دست است. بر این اساس، پژوهش حاضر در پی پاسخ به سه پرسش اصلی زیر است:

۱. عوامل اصلی کاهش دبی رودخانه هریرود در ورودی شهرستان سرخس چیست و این کاهش طی دوره مورد مطالعه از نظر کمی چه ابعادی داشته است؟
۲. کاهش دبی رودخانه هریرود چه تأثیری بر ابعاد اکولوژیکی، کشاورزی، منابع آب زیرزمینی و وضعیت اجتماعی-اقتصادی امنیت زیست‌محیطی شهرستان سرخس، بر اساس شاخص‌های کمی، داشته است؟
۳. یافته‌های این پژوهش چه دلالت‌هایی برای حکمرانی امنیت زیست‌محیطی ایران و توسعه همکاری‌های فرامرزی در مدیریت منابع آب حوضه هریرود دارند؟

۵. روش‌شناسی پژوهش

۵.۱ طرح پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کمی، توصیفی-تحلیلی است و بر پایه داده‌های ثانویه مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ انجام شده است. هدف اصلی این پژوهش، تبیین رابطه میان تغییرات بلندمدت دبی رودخانه هریرود و شاخص‌های مختلف امنیت زیست‌محیطی در شهرستان سرخس، بر اساس یک چارچوب تحلیلی منسجم است. برای این منظور، تحلیل‌های آماری روند با چارچوب مفهومی فشار-وضعیت-پاسخ^۱ و رویکرد امنیت زیست‌محیطی مکتب کپنهاگ تلفیق شده‌اند. در این چارچوب، کاهش دبی رودخانه فرامرزی هریرود و مداخلات آبی در بالادست به‌عنوان فشار، تغییرات اکولوژیکی، منابع آب و شرایط اجتماعی-اقتصادی شهرستان سرخس به‌عنوان وضعیت و پیامدهای مدیریتی و سیاستی حاصل از یافته‌های پژوهش به‌عنوان پاسخ در نظر گرفته شده‌اند.

۵.۲ داده‌ها و شاخص‌های پژوهش

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش دارای ماهیتی چندبعدی بوده و شامل اطلاعات هیدرومتری مربوط به دبی رودخانه و ورودی آب به مخزن سد، داده‌های سنجش از دور برای پایش تغییرات پوشش گیاهی از طریق شاخص NDVI، داده‌های پیزومتری مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی، آمارهای سرشماری و تولیدات کشاورزی، داده‌های هواشناسی و شاخص‌های جمعیتی مرتبط با تغییرات جمعیت روستایی است. داده‌های NDVI از محصولات ماهواره‌ای MODIS MOD13A3 با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و Landsat 8 با قدرت تفکیک ۳۰ متر استخراج شده‌اند. اطلاعات هیدرومتری بر پایه داده‌های ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پل خاتون و آمار ورودی آب به سد دوستی در بخش پایین‌دست ایران تهیه شده است. تمامی داده‌های مورد استفاده از منابع معتبر داده‌های ثانویه گردآوری شده، بر اساس روش‌های تحلیلی مستند پردازش شده‌اند و به‌گونه‌ای ارائه شده‌اند که امکان بازتولید و تکرارپذیری نتایج پژوهش را فراهم کنند (Yu et al., 2025). منابع داده، شاخص‌ها و روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای ارزیابی پیامدهای امنیت زیست‌محیطی ناشی از کاهش دبی رودخانه هریرود در شهرستان سرخس در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

جدول ۱- منابع داده، شاخص‌ها و روش‌های تحلیلی مورد استفاده برای ارزیابی پیامدهای امنیت زیست‌محیطی ناشی از کاهش دبی

رودخانه هریرود در شهرستان سرخس طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳

ردیف	بعد امنیتی (PSR)	شاخص	واحد	منبع داده	روش تحلیل
۱	هیدرولوژیکی (وضعیت)	دبی سالانه رودخانه هریرود	میلیون مترمکعب در سال	داده‌های هیدرومتری (داده‌های ثانویه)	آزمون من-کندال؛ برآوردگر شیب سن
۲	هیدرولوژیکی (فشار)	تغییر ساختاری رژیم جریان رودخانه	سال	داده‌های هیدرومتری	آزمون نقطه تغییر پتیت
۳	اکولوژیکی (وضعیت)	شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)	شاخص (۰ تا ۱)	تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat	آزمون روند من-کندال

^۱ Pressure-State-Response: PSR

ردیف	بعد امنیتی (PSR)	شاخص	واحد	منبع داده	روش تحلیل
۴	اکولوژیکی (وضعیت)	فراوانی سالانه وقوع طوفان‌های گردوغبار	تعداد رخداد در سال	داده‌های هواشناسی	آزمون روند من-کندال
۵	آب‌های زیرزمینی (وضعیت)	عمق سطح آب زیرزمینی (آبخوان)	متر زیر سطح زمین	داده‌های پیزومتری	آزمون روند من-کندال
۶	کشاورزی / امنیت غذایی (وضعیت)	سطح اراضی کشاورزی آبی	هکتار	سرشماری کشاورزی	آمار توصیفی؛ آزمون من-کندال
۷	کشاورزی / امنیت غذایی (وضعیت)	عملکرد گندم آبی	تن در هکتار	آمار تولیدات کشاورزی	آمار توصیفی؛ آزمون من-کندال
۸	انسانی / اجتماعی-اقتصادی (وضعیت)	نرخ رشد جمعیت روستایی	درصد در سال	داده‌های سرشماری عمومی	تحلیل روند جمعیتی
۹	ارتباط هیدرولوژی و امنیت	همبستگی بین دبی رودخانه و شاخص‌های امنیت زیست‌محیطی (r)	ضریب همبستگی پیرسون	محاسبه‌شده از داده‌های فوق	تحلیل همبستگی دو متغیره

نکته: میلیون مترمکعب (MCM)، متر زیر سطح زمین (m bgl) و آزمون من-کندال (MK). دوره زمانی مطالعه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بوده و تمامی داده‌ها از منابع ثانویه استخراج شده‌اند. سال ۲۰۱۶ به‌عنوان نقطه تغییر ساختاری در نظر گرفته شده است که هم‌زمان با بهره‌برداری از سد سلما در استان هرات افغانستان است.

۵.۳ روش‌های تحلیل داده‌ها

در این پژوهش از چهار روش اصلی تحلیل کمی استفاده شده است. آزمون من-کندال (Mann-Kendall) برای بررسی روندهای یکنواخت در سری‌های زمانی به‌کار رفته و برآوردگر شیب سن (Sen's Slope) میزان تغییرات این روندها را برآورد می‌کند. همچنین، آزمون پتیت (Pettitt Test) برای شناسایی نقاط تغییر ساختاری در سری‌های زمانی، به‌ویژه تغییر رژیم جریان رودخانه در سال ۲۰۱۶ هم‌زمان با بهره‌برداری از سد سلما، مورد استفاده قرار گرفته است. افزون بر این، تحلیل همبستگی پیرسون برای سنجش میزان ارتباط میان دبی سالانه رودخانه و شاخص‌های اصلی امنیت زیست‌محیطی به‌کار گرفته شده است. تمامی آزمون‌های آماری در سطح معنی‌داری $\alpha = 0.05$ انجام شده‌اند. همچنین، در مواردی که سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۱ یا ۰/۰۰۱ بوده است، این مقادیر به‌منظور نشان دادن میزان اطمینان آماری بیشتر در متن و شکل‌ها گزارش شده‌اند؛ با این حال، ملاک پذیرش معنی‌داری آماری در سراسر پژوهش همان ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. مجموعه این روش‌ها امکان تحلیل روندهای زمانی، شناسایی نقاط تغییر و بررسی روابط آماری میان متغیرهای مورد مطالعه را فراهم می‌کند.

۵.۴ چارچوب مفهومی پژوهش

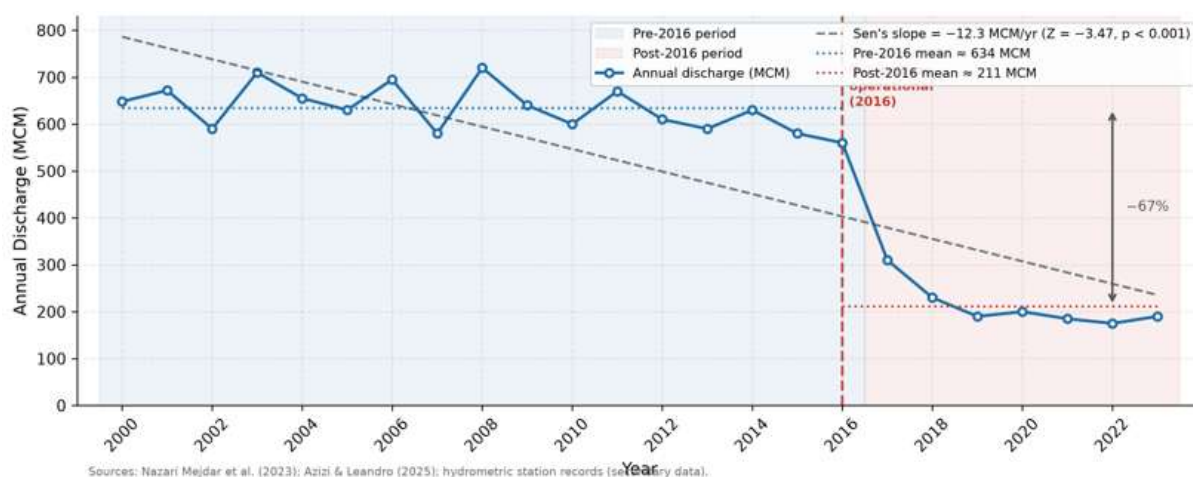
چارچوب مفهومی این پژوهش بر تلفیق دو رویکرد تحلیلی استوار است. نخست، مدل فشار-وضعیت-پاسخ (PSR) که تغییرات زیست‌محیطی را در قالب سه مؤلفه اصلی شامل فشارهای وارد بر محیط، وضعیت حاصل از این فشارها و پاسخ‌های مدیریتی و سیاستی طبقه‌بندی می‌کند. دوم، رویکرد امنیت زیست‌محیطی مکتب کپنهاگ که کمبود آب و تخریب محیط‌زیست را صرفاً مسائل زیست‌محیطی تلقی نمی‌کند، بلکه آن‌ها را تهدیدهایی برای امنیت غذایی، معیشت، ثبات جمعیتی و در نهایت تاب‌آوری و امنیت ملی می‌داند. ترکیب این دو چارچوب، امکان تحلیل جامع پیوند میان تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از عوامل فرامرزی و پیامدهای امنیتی آن در سطح محلی را فراهم می‌کند و از این‌رو، برای پژوهش حاضر که به بررسی آثار کاهش دبی رودخانه هریرود بر امنیت زیست‌محیطی شهرستان سرخس می‌پردازد، چارچوبی مناسب و منسجم به شمار می‌رود.

۶. یافته‌های پژوهش

۶.۱ کاهش دبی رودخانه و تغییر رژیم هیدرولوژیکی

نتایج تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که دبی سالانه رودخانه هریرود طی دوره مورد مطالعه با روندی کاهشی و از نظر آماری معنادار مواجه بوده است. بر اساس نتایج آزمون من-کندال، مقدار آماره آزمون برابر با $Z = -۳/۴۷$ و سطح معنی‌داری $P < ۰/۰۰۱$ به دست آمد که بیانگر وجود روند کاهشی معنادار در دبی رودخانه است. همچنین، برآوردگر شیب سن نشان می‌دهد که دبی سالانه هریرود به‌طور متوسط سالانه ۱۲/۳ میلیون مترمکعب کاهش یافته است (Nazari Mejdari et al., 2023; Azizi & Leandro, 2025). نتایج آزمون پتیت نیز سال ۲۰۱۶

را به عنوان نقطه تغییر ساختاری در رژیم جریان رودخانه شناسایی کرد ($P = 0.003$). این تغییر زمانی با بهره برداری از سد سلما در افغانستان همزمان بوده و نشان دهنده تغییر اساسی در الگوی جریان آب در پایین دست است. همچنین، بررسی داده های ورودی سد دوستی نشان می دهد که حجم آب ورودی این سد پس از سال ۲۰۱۶ به حدود ۲۷ درصد مقدار پیش از این سال کاهش یافته است؛ به گونه ای که میانگین ورودی سالانه از حدود ۶۵۰ میلیون مترمکعب به حدود ۱۸۰ تا ۲۰۰ میلیون مترمکعب رسیده است. این کاهش چشمگیر بیانگر آن است که تغییرات مشاهده شده صرفاً ناشی از نوسانات طبیعی سالانه نبوده، بلکه حاکی از دگرگونی اساسی در شرایط هیدرولوژیکی پایین دست حوضه هریرود است. شکل (۲) روند تغییرات زمانی دبی رودخانه، خط روند کاهشی و نقطه تغییر ساختاری در سال ۲۰۱۶ را نشان می دهد.



شکل ۲- روند تغییرات دبی سالانه رودخانه هریرود در محل ورودی سد دوستی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، همراه با روند کاهشی برآوردشده با آزمون من-کندال (شیب سن = $-۱۲/۳$ - میلیون مترمکعب در سال؛ $Z = -۳/۴۷$ ؛ $P < 0.001$) و نقطه تغییر ساختاری شناسایی شده با آزمون پیت در سال ۲۰۱۶ ($P = 0.003$) که همزمان با بهره برداری از سد سلما در افغانستان است. ناحیه آبی نشان دهنده دوره پیش از سال ۲۰۱۶ و ناحیه قرمز نشان دهنده دوره پس از سال ۲۰۱۶ است. منابع: Nazari Mejdari و همکاران (۲۰۲۳)، Azizi و Leandro (۲۰۲۵) و داده های هیدرومتری ثانویه.

۶.۲ تخریب اکولوژیکی

نتایج بررسی شاخص های اکولوژیکی نشان می دهد که پس از کاهش دبی رودخانه هریرود در سال ۲۰۱۶، وضعیت محیط زیست منطقه به طور قابل توجهی رو به وخامت گذاشته است. شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در مجموع حدود ۴۰ تا ۴۱ درصد کاهش یافته است؛ به گونه ای که میانگین این شاخص از ۰/۲۲ در دوره پیش از سال ۲۰۱۶ به ۰/۱۳ در دوره پس از آن رسیده است. نتایج آزمون من-کندال نیز نشان می دهد که این روند کاهشی از نظر آماری معنادار است ($P < 0.001$) و بیانگر کاهش محسوس پوشش گیاهی در دشت سرخس است (Behling et al., 2022; Azizi & Leandro, 2025). همزمان، فراوانی سالانه وقوع طوفان های گردوغبار با افزایش چشمگیری همراه بوده است؛ به طوری که تعداد این رخدادها از ۱۸/۴ مورد در سال به ۳۱/۷ مورد در سال افزایش یافته که معادل ۷۲ درصد رشد است. نتایج آزمون آماری نیز معنی دار بودن این روند افزایشی را تأیید می کند ($Z = ۳/۱۴$ ؛ $P = 0.002$). در مجموع، این یافته ها نشان می دهد که کاهش منابع آب، علاوه بر کاهش پوشش گیاهی، موجب تضعیف پایداری اکولوژیکی منطقه و افزایش فرسایش بادی شده و در نتیجه، ساختار طبیعی اکوسیستم دشت سرخس را به طور اساسی تحت تأثیر قرار داده است. شکل (۳) روند تغییرات زمانی دو شاخص اکولوژیکی شامل NDVI و فراوانی سالانه طوفان های گرد و غبار را نشان می دهد.



شکل ۳-الف) شاخص‌های اکولوژیکی شهرستان سرخس طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳. الف) روند تغییرات شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) همراه با روند من-کندال ($P < 0.01$) که کاهش حدود ۴۱ درصدی پوشش گیاهی پس از سال ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد. ب) روند تغییرات سالانه فراوانی طوفان‌های گردوغبار با روند افزایشی معنادار $Z = 3.14$; $P = 0.002$ که بیانگر افزایش ۷۲ درصدی این پدیده پس از سال ۲۰۱۶ است. خط چین قرمز، نقطه تغییر ساختاری شناسایی شده توسط آزمون پتیت در سال ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد. منابع: داده‌های NDVI از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Landsat (Behling et al., 2022)؛ داده‌های طوفان گردوغبار از ایستگاه‌های هواشناسی. (Azizi & Leandro, 2025).

۶.۳ تنش منابع آب زیرزمینی

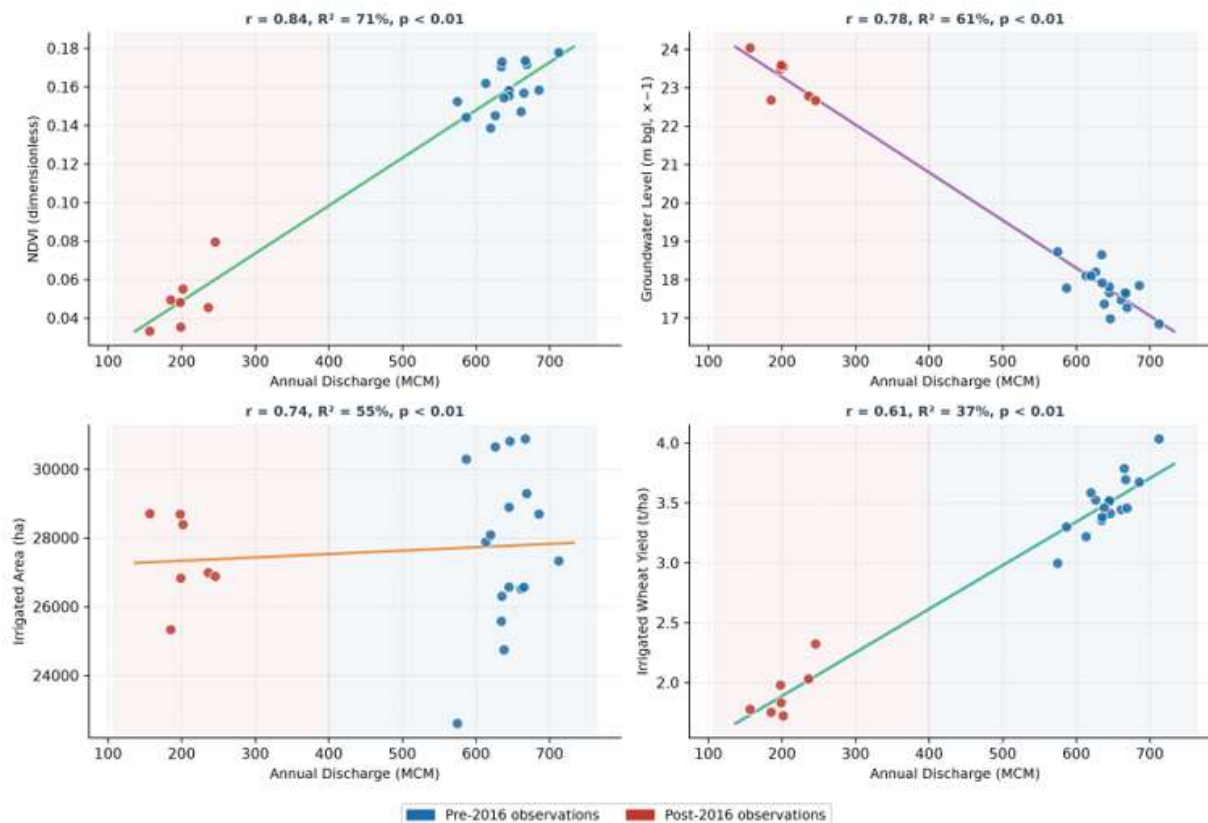
افت منابع آب زیرزمینی یکی دیگر از پیامدهای مهم کاهش دبی رودخانه هریرود در منطقه مورد مطالعه است. نتایج داده‌های پیژومتری نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی آبخوان سرخس طی دوره مطالعه ۷/۴ متر افت کرده است؛ به گونه‌ای که عمق سطح آب از حدود ۱۲/۴ متر به ۱۹/۸ متر زیر سطح زمین رسیده است. آزمون من-کندال نیز روند کاهشی معنادار این شاخص را تأیید می‌کند ($Z = -3.62$; $P < 0.001$) (Noori et al., 2023; Ashraf et al., 2021). این یافته‌ها نشان می‌دهد که کاهش جریان آب‌های سطحی، وابستگی به برداشت از منابع آب زیرزمینی را افزایش داده و در نتیجه، فشار مضاعفی بر آبخوان‌های منطقه وارد کرده است؛ وضعیتی که نه تنها به جبران کمبود آب کمک نکرده، بلکه موجب تشدید ناامنی زیست‌محیطی شده است.

۶.۴ پیامدهای کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی

نتایج پژوهش بیانگر آن است که کاهش دبی رودخانه هریرود آثار قابل توجهی بر بخش کشاورزی و شرایط اجتماعی-اقتصادی شهرستان سرخس داشته است. سطح اراضی کشاورزی آبی حدود ۳۴ درصد کاهش یافته و از حدود ۸۲ هزار هکتار به حدود ۵۴ هزار هکتار رسیده است. همچنین، عملکرد گندم آبی نیز با کاهش ۳۳ درصدی، از ۳/۶ تن در هکتار به ۲/۴ تن در هکتار رسیده است (Maghrebi et al., 2020; Mazloun Yar et al., 2023). این نتایج نشان می‌دهد که کاهش دبی رودخانه، علاوه بر محدود کردن منابع آب، توان تولیدی بخش کشاورزی را نیز به طور جدی کاهش داده و معیشت جوامع روستایی را تحت تأثیر قرار داده است. هم‌زمان، داده‌های سرشماری نیز حاکی از آن است که نرخ رشد سالانه جمعیت روستایی از ۱/۲ درصد مثبت به ۲/۸ درصد منفی طی دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ تغییر یافته است. این تغییر بیانگر آن است که فشارهای زیست‌محیطی و کاهش توان اقتصادی بخش کشاورزی، به بی‌ثباتی جمعیت روستایی و افزایش احتمال مهاجرت منجر شده است.

۶.۵ ساختار همبستگی متغیرها

نتایج تحلیل همبستگی دو متغیره نشان می‌دهد که دبی سالانه رودخانه هریرود بین ۳۷ تا ۷۱ درصد از تغییرات شاخص‌های اصلی امنیت زیست‌محیطی را تبیین می‌کند. ضرایب همبستگی پیرسون بین ۰/۶۱ تا ۰/۸۴ متغیر بوده و تمامی آن‌ها در سطح $P < 0.01$ از نظر آماری معنادار هستند. بیشترین همبستگی بین دبی رودخانه و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) مشاهده شد ($r = 0.84$; درصد $R^2 = 71\%$) و پس از آن، رابطه بین دبی رودخانه و سطح آب زیرزمینی قرار دارد ($r = 0.78$; درصد $R^2 = 61\%$). اگرچه این روابط آماری به‌تنهایی برای اثبات رابطه علی کافی نیستند، اما مربوط به عملکرد گندم آبی است ($r = 0.61$; درصد $R^2 = 37\%$). اگرچه این روابط آماری به‌تنهایی برای اثبات رابطه علی کافی نیستند، اما شواهد تجربی محکمی ارائه می‌کنند که نشان می‌دهد کاهش دبی رودخانه هریرود یکی از عوامل اصلی بروز پیامدهای اکولوژیکی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی در شهرستان سرخس است. شکل (۴) نمودارهای پراکنش و روابط همبستگی بین دبی رودخانه و چهار شاخص اصلی امنیت زیست‌محیطی را نشان می‌دهد و خلاصه مهم‌ترین یافته‌های پژوهش بر اساس ابعاد امنیت زیست‌محیطی در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۴- نمودارهای پراکنش دو متغیره بین دبی سالانه رودخانه هریرود (میلیون مترمکعب) و چهار شاخص اصلی امنیت زیست‌محیطی در شهرستان سرخس طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (۲۴ مشاهده سالانه). نقاط آبی بیانگر مشاهدات مربوط به دوره پیش از سال ۲۰۱۶ و نقاط قرمز نشان‌دهنده دوره پس از سال ۲۰۱۶ هستند. تمامی روابط همبستگی در سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۱ از نظر آماری معنادار هستند. منابع: محاسبه‌شده بر اساس داده‌های ثانویه هیدرومتری، سنجش از دور، پیژومتری و آمارهای سرشماری کشاورزی (جدول ۲).

جدول ۲- خلاصه مهم‌ترین یافته‌های پژوهش بر اساس ابعاد امنیت زیست‌محیطی

بعد امنیتی	شاخص کلیدی	پیش از ۲۰۱۶	پس از ۲۰۱۶	میزان تغییر و معنی‌داری آماری
هیدرولوژیکی	ورودی سالانه سد دوستی (میلیون مترمکعب)	حدود ۶۵۰	حدود ۱۸۰ تا ۲۰۰	کاهش ۷۰٪، $P < 0.01$ ، آزمون من-کندال
اکولوژیکی	شاخص پوشش گیاهی (NDVI) دشت سرخس	۰/۲۲	۰/۱۳	کاهش ۴۱٪، $P < 0.01$ ، آزمون من-کندال
اکولوژیکی	تعداد سالانه طوفان‌های گردوغبار	۱۸/۴	۳۱/۷	افزایش ۷۲٪، $P < 0.01$ ، آزمون من-کندال
کشاورزی	سطح اراضی آبی (هکتار)	حدود ۸۲۰۰۰	حدود ۵۴۰۰۰	کاهش ۳۴٪، $P < 0.01$

کشاورزی	عملکرد گندم آبی (تن در هکتار)	۳/۶	۲/۴	کاهش ۳۳٪، $P < 0.05$
آب‌های زیرزمینی	عمق سطح آبخوان (متر زیر سطح زمین)	-۱۲/۴	-۱۹/۸	افت ۷۴ متر، $P < 0.01$
اجتماعی-اقتصادی	نرخ تغییر جمعیت روستایی	۱/۲٪ در سال	-۲/۸٪ در سال	تغییر روند رشد؛ بر اساس سرشماری ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱

نکته: MCM = میلیون مترمکعب؛ m bgl = متر زیر سطح زمین؛ MK = آزمون من-کندال. مقادیر هیدرولوژیکی و شاخص NDVI، مقادیر تقریبی استخراج‌شده از داده‌های ثانویه در مقیاس حوضه آبریز و منابع مورد استناد هستند.

۷. بحث

یافته‌های تجربی این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش دبی رودخانه هریرود صرفاً یک پدیده هیدرولوژیکی نیست، بلکه بازتابی از نابرابری‌های موجود در مدیریت منابع آب فرامرزی است که پیامدهای آن به‌صورت آسیب‌پذیری‌های زیست‌محیطی در مناطق پایین‌دست نمایان می‌شود. در این میان، تغییر ساختاری شناسایی‌شده در سال ۲۰۱۶ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا این تغییر با آغاز بهره‌برداری از سد سلما (شکل ۲) هم‌زمان بوده و شواهدی قوی ارائه می‌دهد که اقدامات توسعه‌ای یک‌جانبه در بالادست، شرایط هیدرولوژیکی پایین‌دست ایران را به‌طور اساسی دگرگون کرده است. افزون بر این، هنگامی که آثار این مداخلات با روند بلندمدت افزایش خشکی و گرمایش ناشی از تغییرات اقلیمی همراه می‌شود، فرآیندی مرکب از ناامنی زیست‌محیطی شکل می‌گیرد که نمی‌توان آن را صرفاً با عوامل اقلیمی یا سیاسی، به‌تنهایی، تبیین کرد. در بعد اکولوژیکی، کاهش هم‌زمان پوشش گیاهی (شکل ۳-الف) و افزایش فراوانی طوفان‌های گردوغبار (شکل ۳-ب) نشان می‌دهد که افت دبی رودخانه موجب تضعیف بنیان‌های اکولوژیکی دشت سرخس شده است. از سوی دیگر، افت منابع آب سطحی و افزایش وابستگی به برداشت از آبخوان‌ها، نمونه‌ای از الگوی متداول جایگزینی آب‌های زیرزمینی به‌جای منابع آب سطحی در مناطق خشک است؛ راهکاری که اگرچه در کوتاه‌مدت بخشی از کمبود آب را جبران می‌کند، اما در بلندمدت پایداری منابع آب را با تهدید جدی مواجه می‌سازد. در بخش کشاورزی نیز کاهش سطح اراضی آبی و افت عملکرد گندم نشان می‌دهد که تنش هیدرولوژیکی به‌تدریج به تهدیدی برای امنیت غذایی و معیشت ساکنان منطقه تبدیل شده است. پیامد نهایی این روند، کاهش جمعیت روستایی و افزایش احتمال مهاجرت از مناطق روستایی است که خود بیانگر گسترش آثار اجتماعی و جمعیتی بحران آب است.

مهم‌ترین دستاورد نظری این پژوهش، نشان دادن کارآمدی یک چارچوب چندبعدی امنیت زیست‌محیطی برای تحلیل بحران‌های آب فرامرزی در مقیاس محلی است. بخش عمده مطالعات پیشین درباره حوضه هریرود عمدتاً بر هیدروپلیتیک بین‌دولتی یا ارزیابی‌های هیدرولوژیکی در مقیاس کل حوضه تمرکز داشته‌اند؛ در حالی که پژوهش حاضر با پیوند دادن کاهش دبی رودخانه به تغییرات اکولوژیکی، منابع آب زیرزمینی، فعالیت‌های کشاورزی و تحولات جمعیتی در شهرستان سرخس، پیامدهای این بحران را در سطح یک واحد سرزمینی مشخص بررسی کرده است. این تغییر مقیاس تحلیلی نشان می‌دهد که ناکارآمدی‌های نظام حکمرانی در سطح کلان، چگونه به‌طور مستقیم در محیط‌زیست و زندگی جوامع محلی نمود پیدا می‌کند.

یافته‌های این پژوهش از منظر سیاست‌گذاری نیز حائز اهمیت است. اگر منشأ اصلی ناامنی زیست‌محیطی در شهرستان سرخس حاصل برهم‌کنش میان توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست و تشدید تنش‌های اقلیمی باشد، مقابله با این وضعیت صرفاً از طریق مدیریت تقاضای آب یا اقدامات فنی در داخل کشور امکان‌پذیر نخواهد بود. هرچند اقداماتی مانند افزایش بهره‌وری آبیاری، اصلاح الگوی کشت، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و اجرای برنامه‌های احیای اکولوژیکی ضروری است، اما دستیابی به پایداری بلندمدت مستلزم شکل‌گیری سازوکارهای همکاری فرامرزی در زمینه تخصیص منابع آب و تبادل اطلاعات میان کشورهای حوضه است. از این منظر، تدوین و اجرای یک توافق‌نامه الزام‌آور سه‌جانبه میان افغانستان، ایران و ترکمنستان برای مدیریت منابع آب حوضه هریرود، صرفاً یک پیشنهاد دیپلماتیک نیست، بلکه راهکاری مبتنی بر شواهد تجربی برای کاهش آسیب‌پذیری‌های زیست‌محیطی مناطق پایین‌دست به شمار می‌رود.

۷.۱ محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

پژوهش حاضر با چند محدودیت روش‌شناختی مواجه است. مهم‌ترین محدودیت، نبود یا دسترسی بسیار محدود به داده‌های هیدرومتری بالادست در افغانستان، به‌ویژه اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان در بالادست سد سلما در بخش افغانستانی رودخانه هریرود است. این مسئله امکان تهیه یک تراز آبی جامع برای کل حوضه آبریز را فراهم نمی‌سازد. از این رو، برآورد میزان کاهش دبی در این پژوهش بر پایه داده‌های هیدرومتری پایین‌دست ایران و برآوردهای مبتنی بر مطالعات حوضه‌ای انجام شده است (Nazari Mejdari et al., 2023).

(Moshir Panahi et al., 2020). همچنین، استفاده از داده‌های استانی و ملی در برخی شاخص‌های کشاورزی و جمعیتی، ممکن است همه تفاوت‌های مکانی موجود در سطح شهرستان سرخس را به‌طور کامل منعکس نکند. با توجه به این محدودیت‌ها، چند مسیر پژوهشی برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود: نخست، گردآوری داده‌های اولیه در قالب مطالعات طولی و اجرای پیمایش‌های خانوار با تمرکز بر الگوی مصرف آب در کشاورزی و تصمیمات مرتبط با مهاجرت (Mazloun Yar et al., 2023). دوم، تلفیق سناریوهای اقلیمی CMIP6-SSP با مدل کالیبره شده SWAT به‌منظور پیش‌بینی احتمالی دبی رودخانه در ایستگاه سرخس (Nazari Mejdard et al., 2023). سوم، به‌کارگیری همین چارچوب تحلیلی در سایر حوضه‌های آبریز فرامرزی ایران، به‌ویژه حوضه‌های هیرمند و اترک، به‌منظور انجام مطالعات تطبیقی و ارزیابی تفاوت‌ها و شباهت‌های الگوهای ناامنی زیست محیطی (Arfa et al., 2025; Nagheeb & Warner, 2018).

۸. نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش دبی رودخانه هریرود در ورودی شهرستان سرخس، صرفاً یک مسئله هیدرولوژیکی نیست، بلکه بیانگر یک چالش چندبعدی در حوزه امنیت زیست محیطی است. تحلیل داده‌های کمی ثانویه مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان داد که کاهش دبی این رودخانه با تخریب اکولوژیکی، افزایش فراوانی طوفان‌های گرد و غبار، افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش اراضی کشاورزی آبی، افت عملکرد محصولات کشاورزی و کاهش پویایی جمعیت روستایی ارتباط دارد. همچنین، شناسایی نقطه تغییر ساختاری در سال ۲۰۱۶ که با آغاز بهره‌برداری از سد سلما (شکل ۲) هم‌زمان است، شواهد محکمی فراهم می‌کند که توسعه زیرساخت‌های آبی در بالادست، در کنار روند فزاینده خشکی ناشی از تغییرات اقلیمی، نقش مهمی در تشدید ناامنی زیست محیطی مناطق پایین‌دست ایفا کرده است. بر این اساس، وضعیت شهرستان سرخس نمونه‌ای روشن از آن است که چگونه نابرابری‌های هیدروپلیتیکی در حوضه‌های آبریز فرامرزی می‌تواند به آسیب‌پذیری‌های زیست محیطی در سطح محلی منجر شود و امنیت آب، امنیت غذایی، پایداری معیشت و در نهایت تاب‌آوری ملی را تحت تأثیر قرار دهد. مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، ارائه یک تحلیل تجربی در مقیاس شهرستان است که با تلفیق شاخص‌های هیدرولوژیکی، اکولوژیکی، کشاورزی و جمعیتی، تصویری جامع از ابعاد مختلف امنیت زیست محیطی ارائه می‌دهد. از منظر سیاست‌گذاری، نتایج پژوهش بر ضرورت اجرای راهبردهای سازگاری در سطح محلی، بهبود مدیریت منابع آب زیرزمینی، افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی و حفاظت از اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر تأکید دارد. با این حال، دستیابی به امنیت پایدار در پایین‌دست حوضه هریرود بدون شکل‌گیری سازوکارهای همکاری فرامرزی امکان‌پذیر نخواهد بود. از این‌رو، تدوین و اجرای یک توافق‌نامه الزام‌آور سه‌جانبه میان افغانستان، ایران و ترکمنستان برای مدیریت و تخصیص منابع آب حوضه هریرود-تجن، مهم‌ترین راهکار بلندمدت برای کاهش آسیب‌پذیری‌های ساختاری و تقویت امنیت زیست محیطی مناطق پایین‌دست به شمار می‌رود.

۹. منابع

- عزتی، عزت‌الله و خضری، محمدحسن و نیک فرجام، محبوبه. (۱۳۹۱). تحلیلی بر هیدروپلیتیک شرق ایران، نشریه نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی، ۴(۱)، ۹۵. magiran.com/p987202
- کامران، حسن، یاری، احسان، و عابدی، مرضیه. (۱۳۹۶). امنیت زیست محیطی و امنیت ملی ایران در بستر تحولات هیدروپلیتیک مرزی مطالعه موردی: هریرود. جغرافیا، ۱۵ (دوره جدید) (۵۲)، ۳۲۸-۳۰۵. <https://sid.ir/paper/150310/fa> SID.
- Arfa, A., Ayyoubzadeh, S. A., Shafizadeh-Moghadam, H., & Mianabadi, H. (2025). Transboundary hydropolitical conflicts and their impact on river morphology and environmental degradation in the Hirmand Basin, West Asia. *Scientific Reports*, 15(1), 2754. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84501-1>
- Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11, Article 9135. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y>
- Azizi, M., & Leandro, J. (2025). The significance of the Harirud River Basin: Sustainable development, climate change and unilateral action. *Geosciences*, 15(12), 459. <https://doi.org/10.3390/geosciences15120459>
- Behling, R., Roessner, S., Foerster, S., Saemian, P., Tourian, M. J., Portele, T. C., & Lorenz, C. (2022). Interrelations of vegetation growth and water scarcity in Iran revealed by satellite time series. *Scientific Reports*, 12, Article 20784. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24712-6>
- Chamani, R., Sadeghi, S. H., Zare, S., Shekohideh, H., Mumzaei, A., Amini, H., Hemmati, L., & Zarei, R. (2023). Flood-oriented watershed health and ecological security conceptual modeling using pressure, state, and response (PSR) approach for the Sharghonj Watershed, South Khorasan Province, Iran. *Natural Resources Modelling*, 36(3), e12385. <https://doi.org/10.1111/nrm.12385>

8. Maghrebi, M., Noori, R., Bhattarai, R., Mundher Yaseen, Z., Tang, Q., Al-Ansari, N., Danandeh Mehr, A., Karbassi, A., Omidvar, J., Farnoush, H., Torabi Haghighi, A., Kløve, B., & Madani, K. (2020). Iran's agriculture in the Anthropocene. *Earth's Future*, 8(10), e2020EF001547. <https://doi.org/10.1029/2020EF001547>
9. Mirzaei-Nodoushan, F., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2022). Evaluation of cooperative and non-cooperative game theoretic approaches for water allocation of transboundary rivers. *Scientific Reports*, 12, 4038. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07971-1>
10. Moshir Panahi, D., Kalantari, Z., Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S., & Destouni, G. (2020). Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. *Scientific Reports*, 10, Article 7450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64089-y>
11. Nagheeb, M., & Warner, J. (2018). The geopolitical overlay of the hydropolitics of the Harirud River Basin. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 19(2), 135–152. <https://doi.org/10.1007/s10784-018-9418-9>
12. Nazari Mejdari, H., Moridi, A., & Najjar-Ghabel, S. (2023). Water quantity–quality assessment in the transboundary river basin under climate change: A case study of the Harirud River Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 14(12), 4747–4764. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.098>
13. Noori, R., Maghrebi, M., Jessen, S., Bateni, S. M., Heggy, E., Javadi, S., Noury, M., Pistre, S., Abolfathi, S., & AghaKouchak, A. (2023). Decline in Iran's groundwater recharge. *Nature Communications*, 14, 6674. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2>
14. Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Torabi Haghighi, A., Kløve, B., & Madani, K. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(25), e2024221118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2024221118>
15. Sadeghi, S. H., Vafakhah, M., Moosavi, V., Pourfallah Asadabadi, S., Sadeghi, P. S., Khaledi Darvishan, A., Bagheri Fahraji, R., Mosavini, S. H., Majidnia, A., Gharemahmudli, S., & Moradi Rekabdarkolaei, H. (2022). Assessing the health and ecological security of a human induced watershed in central Iran. *Ecosystem Health and Sustainability*, 8(1), e2090447. <https://doi.org/10.1080/20964129.2022.2090447>
16. Talaei, E., Delavar, M., Salehi, Y. S., Eini, M. R., & Noori, R. (2026). Water-energy-food nexus assessment in the transboundary Harirud River Basin using the MuSIASEM framework. *Scientific Reports*, 16, Article 14464. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-43368-0>
17. Thomas, V., & Warner, J. (2015). Hydropolitics in the Harirud/Tejen River Basin: Afghanistan as hydro-hegemon? *International Journal of Water Resources Development*, 31(4), 593–613. <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1059164>
18. Yu, M., Fang, M., & Wang, B. (2025). Ethical frameworks for data-driven environmental health studies in the AI era. *Environmental Health Perspectives*, 133(2), 021001. <https://doi.org/10.1289/EHP15076>
19. Mazloum Yar, M., Qalandari, E., & Rahimi, S. (2023). Agricultural water use and rural livelihoods in the Harirud-Murghab Basin: A census-based assessment. *Journal of Arid Land Studies*, 33(1), 45–58. https://doi.org/10.14976/jals.33.1_45
20. Zeitoun, M., & Warner, J. (2006). Hydro-hegemony—a framework for analysis of trans-boundary water conflicts. *Water policy*, 8(5), 435–460. <https://doi.org/10.2166/wp.2006.054>