



Analysis of Tragedy of the Commons Theory Based on the Concept of Water Resources Carrying Capacity*

Research Article

Atiyeh Fatehifar¹, Mohammad Reza Goodarzi² , Ali Talebi³

DOI: [10.22067/jfcej.2026.96795.1390](https://doi.org/10.22067/jfcej.2026.96795.1390)

1. Introduction

A fundamental challenge of water management in river basins is that societies, in pursuing economic development and rapid growth, often neglect environmental capacity and ecological limits. Persisting in this pattern, as Hardin's "tragedy of the commons" suggests, leads to growing competition among users and gradual degradation of unowned, overused resources. The Zayandeh Rud basin, as a common-pool resource, has seen intensified competition among stakeholders, rising demand, diversified uses, and the emergence of formal and informal water reallocation patterns over the past two decades—a trend with significant socio-ecological consequences. Therefore, it is essential to examine "competition," "silent reallocation," and the potential for a "tragedy of the

commons" within a framework that integrates social and ecological dimensions.

2. Methodology

The modeling steps are summarized below (and illustrated in the flowchart):

1. This study employs a combined theoretical–quantitative approach to examine historical changes in the flow regime and the weakening of the Zayandeh-Rud River in past and recent periods.
2. Using the WEAP model (2006–2021), we then simulate the dynamics of competition, resource pressure, and conflict formation due to water scarcity.
3. Finally, the socio-ecological status of the basin is evaluated using the Water Resource Carrying Capacity Index (WRCC) across three time periods.

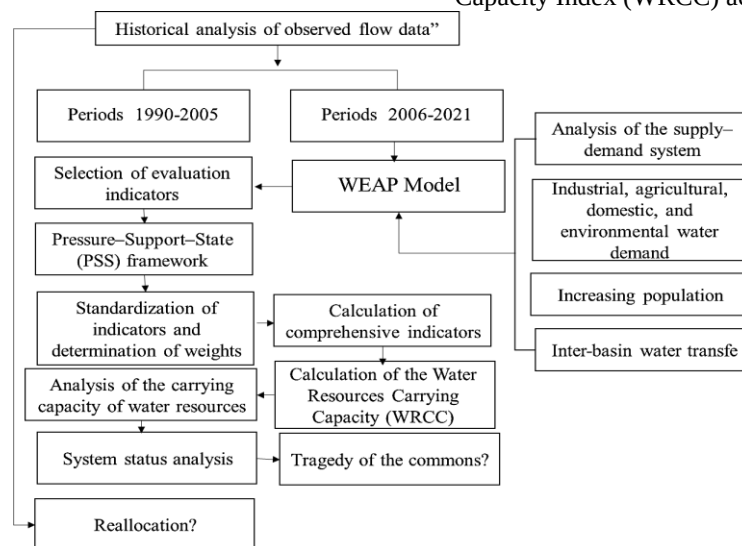


Figure 1: Flowchart of the overall research methodology

* Manuscript received December 01, 2025, Revised February 07, 2026, Accepted March 16, 2026.

¹ Ph.D student, Department of Civil Engineering, Water Resources Management Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

² Corresponding author. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Email: goodarzimr@yazd.ac.ir

³ Professor, Department of Watershed Management, School of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.

3. Results

The first part of the review presented the status of water reallocation (Table 1). The overall comparison between long-term and recent periods indicates that approximately 400 MCM have been withdrawn from downstream areas and transferred upstream of the Polekaleh station. Following calibration and based on the WEAP model results, Water Resources Carrying Capacity indices were calculated. Figure 2 reveals a gradual deterioration in the balance between pressure and support across three time periods, shifting from a "carrying" to a "overload" state. Concurrently, the comprehensive carrying capacity index has remained in the "poor" range in most years after an initial short period of favorable conditions. These results indicate that in recent years, particularly with increased withdrawals and growing demand, the basin has exceeded its natural and social capacity, demonstrating the occurrence of a tragedy of the commons.

4. Conclusions

This study employed a combined theoretical–quantitative approach, utilizing the WEAP model and the Water Resources Carrying Capacity Index (WRCC or WECCI), to examine the Zayandeh-Rud basin through the lens of the tragedy of the commons. The results revealed that human pressure and diminished natural support have shifted the system from a stable to an overloaded state, with the ecological index remaining in the poor range for most years. The phenomena of silent reallocation and hidden extraction have created a cycle of individually rational actions leading to catastrophic collective outcomes, which aligns with Hardin's theory. Nevertheless, governance structures and development policies have played a major role in intensifying competition and the water crisis.

Table 1: Comparison of average water consumption of Zayandeh-rud upstream and downstream of Polekaleh and review of reallocation (MCM)

Period/ Station	Average (2006-2021)	Average (1990-2005)	Long-term average (1970-2005)	Recent changes compared to the past	Recent changes relative to the long-term
Consumption from the regulating dam S. to PoleKalleh S.	474.2	195.3	65	+279	+409.2
Consumption from the PoleKalleh S. to Varzaneh S.	671.7	1137.1	1104.1	-465.4	-432.4
Sum	1145.9	1332.4	1169.1	-	-

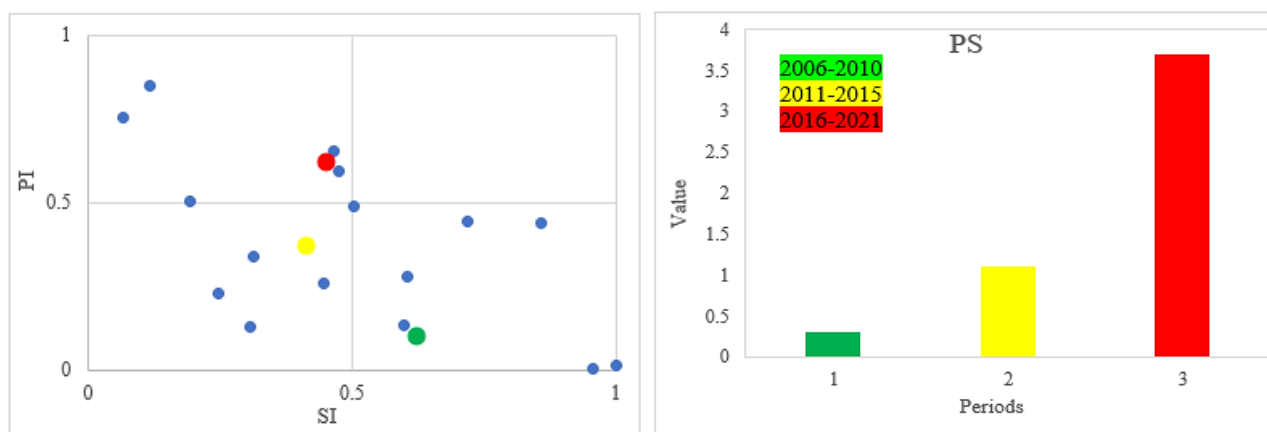


Figure. 2: Annual and period-averaged pressure-support index values and their classification grade change.



تحلیل نظریه تراژدی منابع مشترک مبتنی بر مفهوم ظرفیت برد منابع آب*

مقاله پژوهشی

آتیه فاتحی^(۱) محمدرضا گودرزی^(۲) علی طالبی^(۳)

DOI: 10.22067/jfpei.2026.96795.1390

چکیده مدیریت ناپایدار منابع آب به ویژه در حوضه‌های آبریز فروملی تحت تنش، نمونه‌ای عینی از تراژدی منابع مشترک است که در آن اولویت دادن به منافع اقتصادی کوتاه‌مدت، عملکرد سیستم‌های طبیعی را به نقطه شکست می‌رساند. شکل‌گیری رقابت از این توسعه در بلندمدت شرایط برگشت‌ناپذیری را برای منابع آب ایجاد می‌کند. حوضه زاینده‌رود به مثابه یک منبع مشترک اکنون بستر شکل‌گیری رقابت‌های ذی‌نفعان و بازتخصیص آب شده است. بنابراین در این پژوهش با اتخاذ یک رویکرد نظری-کمی، ابتدا روند تاریخی تغییرات جریان تحلیل، سپس با استفاده از مدل WEAP، پویایی رقابت و بهره‌برداری در حوضه زاینده‌رود شبیه‌سازی شد. در گام نهایی وضعیت اجتماعی-اکولوژیکی حوضه با استفاده از چارچوب شاخص ظرفیت برد منابع آب (WRCC) و دیدگاه هاردین در قالب ساختار فشار-پشتیبانی-وضعیت (PSS) ارزیابی شده است. نتایج در مقیاس سالانه و در سه دوره پنج ساله (۲۰۰۶-۲۰۱۰)، (۲۰۱۱-۲۰۱۵) و (۲۰۱۶-۲۰۲۱) نشان می‌دهد که تناسب میان فشار و پشتیبانی در سه دوره زمانی به تدریج به هم خورده و از وضعیت قابل تحمل به حالت اضافه‌بار شدید (از ۰٫۳ به ۱٫۱ و سپس ۳٫۸) تغییر پیدا کرده است. همزمان شاخص ظرفیت برد در اغلب سال‌ها به محدوده «ضعیف» و «بسیار ضعیف» نزول پیدا کرده است. روی هم رفته نتایج حاکی از آن است که در سال‌های اخیر به ویژه با افزایش برداشت‌ها و رشد تقاضا، حوضه از ظرفیت طبیعی و اجتماعی خود عبور کرده و تراژدی منابع مشترک در این حوضه به وقوع پیوسته است.

واژه‌های کلیدی آینده مشاعات، بازتخصیص آب، حوضه زاینده‌رود، WEAP، PSS.

Analysis of Tragedy of the Commons the Ory Based on the Concept of Water Resources Carrying

Atiyeh Fatehifar

Mohammad Reza Goodarzi

Ali Talebi

Abstract Unsustainable water resource management, especially in stressed basins, is a concrete example of the tragedy of the commons, where prioritizing short-term economics pushes the performance of natural systems to breaking points. The emergence of competition from this development creates irreversible conditions for water resources in the long term. The Zayandeh-Rud basin serves as a common-pool resource for stakeholder competition and water reallocation. Therefore, in this study, with a theoretical-quantitative approach the flow change process was first analyzed, then the dynamic competition and exploitation in the Zayandeh-Rud basin was simulated using the WEAP model. In the final step, the socio-ecological status of the basin was assessed using the Water Ecological Carrying Capacity Index framework and Hardin's perspective in the form of the Pressure-Support-Status (PSS) structure. The results on an annual scale and in three five-year periods (2006-2010), (2011-2015) and (2016-2021) show that the balance between pressure and support has gradually deteriorated in the three time periods and has changed from a carrying capacity state to an overload state (increasing from 0.3 to 1.1 and then 3.8). At the same time, the WECCI has fallen to the "poor" and "extremely poor" range in most years. The results indicate that in recent years, especially with the increase in abstractions and the growth of demand, the basin has exceeded its natural and social capacity and has revealed the occurrence of a tragedy of the common resources.

Key words Future of commons, Water reallocation, Zayandeh-Rud basin, WEAP, PSS.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۹/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۱/۲۵ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، یزد.

(۳) استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد.

مقدمه

منابع آب در کشورهای با اقلیم خشک و نیمه خشک، از اهمیت بالاتری نسبت به سایر اقلیم‌ها برخوردار است. زیرا در این مناطق، کمبود آب صرفاً سبب ایجاد یک چالش زیست محیطی نمی‌شود، بلکه می‌تواند یک عامل تعیین کننده اساسی در ایجاد چالش‌های اقتصادی - اجتماعی، امنیت غذایی و ثبات سیاسی شود [1]. کشور ایران نیز با اقلیم خشک و نیمه خشک در سال‌های اخیر وارد دوره‌ای جدید از بحران در زمینه کمبود آب و چالش‌های آن شده است. برای پاسخ به این چالش‌ها بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی در کشور افزایش پیدا کرده است. به طوری که طبق گزارش شورای عالی آب، کسری تجمعی مخزن آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۴ معادل ۲۰ میلیارد مترمکعب، در سال ۱۳۸۳ به ۶۰ میلیارد مترمکعب (سال خودکفایی در تولید گندم) و در سال ۱۳۹۸ به ۱۳۰ میلیارد مترمکعب رسیده است [2].

خشکسالی و کمبود آب واقعیت عینی کشور ایران است که با رشد جمعیت و به دنبال آن ضرورت تأمین نیازهای جمعیتی، افزایش سطح زیرکشت و گسترش صنایع به اهمیت و چالش این موضوع اضافه شده است. از طرفی احتمال وقوع تغییرات اقلیمی و عدم قطعیت‌های آن علی‌رغم افزایش بارش بر شاخص‌های کمبود آب اثر می‌گذارد و چالش‌های مدیریتی را تشدید می‌کند [3]. برخی از مشکلات کمبود آب در ایران باعث ایجاد چالش‌های امنیتی و سیاسی - اجتماعی شده، که در افزایش شمار اعتراضات طی سال‌های خشک مشهود بوده است. رقابت فزاینده بین بخشی و بین منطقه‌ای بر سر سهم بیشتر از منابع آب رودخانه، منجر به بهره‌برداری بیش از ظرفیت آبی و به دنبال آن، شکاف اجتماعی و ایجاد تنش و کشمکش میان ذی‌نفعان شده است [4]. یکی از چالش‌های ساختاری حکمرانی آب در حوضه‌های آبریز این است که جوامع انسانی در مسیر دستیابی به توسعه اقتصادی و رشد سریع، اغلب از ظرفیت طبیعی محیط و محدودیت‌های اکولوژیک غفلت می‌کنند [5]. تداوم این الگو، همان گونه که هاردین در نظریه تراژدی منابع مشترک بیان می‌کند، منجر به شکل‌گیری رقابت فزاینده میان بهره‌برداران و تخریب تدریجی منابعی می‌شود که مالکیت فردی ندارند و در معرض استفاده بیش از حد قرار می‌گیرند [6]. همان طور که مقدم‌منش و لنگرودی (۲۰۲۰) طی پژوهشی با بهره بردن از نظریه تراژدی منابع مشترک، وضعیت منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی ایران را با استفاده از رویکرد پویایی سیستم مورد بررسی قرار دادند و دریافتند رفتار کشاورزان برای حداکثر کردن سود، منجر

به افزایش سطح زیر کشت و کاشت محصولات پرآب‌بر شده است. محققان تأکید می‌کنند راهبرد ترکیبی افزایش بازدهی آبیاری به همراه کنترل اثر ارتجاعی برای به پایداری رساندن سیستم ضروری است [7].

حوضه آبریز زاینده‌رود، طی دو دهه اخیر شاهد افزایش رقابت میان ذی‌نفعان، تشدید تقاضا، تنوع بخشی به مصارف، و بروز الگوهای بازتخصیص رسمی و غیررسمی آب بوده است؛ روندی که پیامدهای اجتماعی - اکولوژیکی قابل توجهی ایجاد کرده است. این رودخانه به عنوان یک منبع مشترک، زمانی از طریق سیستم‌های آبیاری مبتنی بر جامعه، کشاورزی محلی را پشتیبانی می‌کرد. با این حال، با صنعتی شدن سریع، شهرنشینی و سیاست‌های تخصیص مجدد آب توسط دولت، این منبع بیش از حد مورد بهره‌برداری قرار گرفت. افزایش کاربران متنوع صنایع، جمعیت شهری و بخش‌های کشاورزی، بدون هماهنگی مؤثر یا مشارکت محلی منجر به فروپاشی اکولوژیکی رودخانه شد. رویکرد مدیریت از بالا به پایین دولت، با اولویت دادن به استفاده صنعتی بر نیازهای سنتی کشاورزی، وضعیت را تشدید کرد و منجر به خشک شدن چاه‌ها، فرونشست زمین و کاهش کیفیت آب شد [8]. این مورد نشان‌دهنده یک تراژدی کلاسیک از منابع مشترک است: وقتی یک منبع مشترک توسط چندین بازیگر بدون قوانین یا پاسخگویی جمعی مورد دسترسی قرار می‌گیرد، تمام می‌شود و به همه کسانی که به آن وابسته هستند، به ویژه آسیب‌پذیرترین افراد، مانند کشاورزان در مناطق نیمه خشک آسیب می‌رساند.

احمدی‌نژاد (۲۰۲۲) [9] در پژوهشی به بررسی ارتباط بین کمبود آب و مهاجرت کشاورزان در روستای کفران در اصفهان می‌پردازد. در واقع آن‌ها از طریق رویکرد نظری چارچوب سامانه‌های اجتماعی - بوم‌شناختی و تحلیل نهادی به تحلیل دلایل مهاجرت پرداخته‌اند. نتایج نشان داد کمبود آب در منطقه که ناشی از مدیریت نادرست (توسعه صنعتی بی‌رویه، تغییر مرزهای مدیریت آب و اولویت دادن به صنعت) و تغییرات اقلیمی است، زندگی کشاورزان را از جنبه‌های اقتصادی، محیط زیستی، سلامتی و اجتماعی تحت تأثیر قرار داده و در نهایت منجر به مهاجرت آنان شده است. از بین این عوامل، دلایل اقتصادی مهم‌ترین انگیزه برای مهاجرت شناسایی شده است. نتایج این پژوهش نمود عینی تراژدی مهاجرت در پایین دست حوضه و پیامدهای جبران‌ناپذیر برای جامعه محلی و اکوسیستم منطقه می‌باشد. از سوی دیگر، طالبی اسکندی و میرنظامی (۲۰۲۰) [10] نیز وقوع بازتخصیص

وضعیت حوضه در مدل سازی ها و بررسی های نظری و تحلیل های اجتماعی گزارش شده است، در این پژوهش از نزدیک ترین مفهوم در چهارچوب ظرفیت برد منابع آب استفاده می شود تا بتوان وقوع تراژدی منبع مشترک را در وضعیت بیش بارگذاری تحلیل کرد. بنابراین روش پژوهش به صورت ترکیبی (کمی و نظری) است. در واقع هدف اصلی پژوهش، بررسی وقوع باز تخصیص، تحلیل نشانه های تراژدی منابع مشترک هاردین، و تبیین وضعیت اجتماعی - اکولوژیکی حوضه زاینده رود است تا درک بهتری از وضعیت موجود و ضرورت اصلاحات حکمرانی آب در آینده فراهم شود. از این رو ابتدا روند تاریخی جریان در ایستگاه های هیدرومتری تحلیل می شود، سپس رفتار رقابتی ذی نفعان و پویایی تخصیص آب در مدل WEAP شبیه سازی گردید و در نهایت شاخص WECCI محاسبه و ارزیابی شده است.

مواد و روش ها

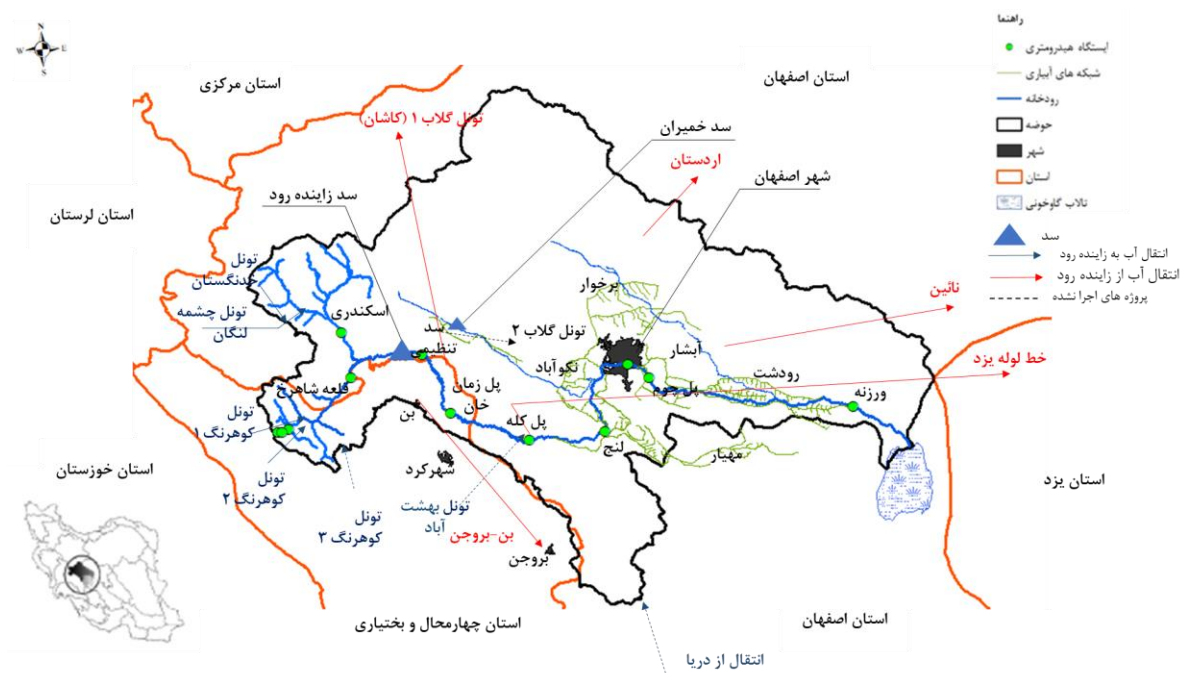
منطقه مطالعه

حوضه آبریز زاینده رود با مساحتی نزدیک به ۲۶۹۷۲ کیلومتر مربع، بیش از دو سوم حوضه آبریز گاوخونی را تشکیل می دهد. این حوضه بر اساس شرایط توپوگرافی و هیدروژئولوژیکی به ۱۶ منطقه مطالعاتی تقسیم شده است که مناطق کوهستانی (۳۶،۶٪) و دشت ها و کوهپایه ها (۶۳،۴٪) را در بر می گیرد. متوسط بارش حوضه زاینده رود ۲۴۴ میلی متر است. در سراب حوضه میزان بارش بیش از ۱۲۰۰ میلی متر، و در پایاب حوضه (ورزنه) و تالاب گاوخونی تا ۱۰۰ میلی متر و کمتر کاهش پیدا می کند. منابع آب سطحی حوضه با در نظر گرفتن تونل های انتقال آب عمدتاً از سد زاینده رود تأمین می گردد [17]. متوسط خروجی از سد ۱۱۹۳ میلیون مترمکعب در سال های ۱۴۰۰-۱۳۸۴ و متوسط حجم ذخیره مخزن ۴۲۶ میلیون مترمکعب بوده است [18]. منابع آب زیرزمینی در حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است و به دلیل بهره برداری از آب سطحی به خصوص بعد از سد چم آسمان فشار بیشتری به منابع آب زیرزمینی وارد می شود. مطابق با داده های کارگروه سازگاری با کم آبی میزان آب زیرزمینی قابل برنامه ریزی برای حوضه حدود ۱۸۷۹ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است. شکل (۱) موقعیت حوضه و تونل های انتقال آب را نشان می دهد.

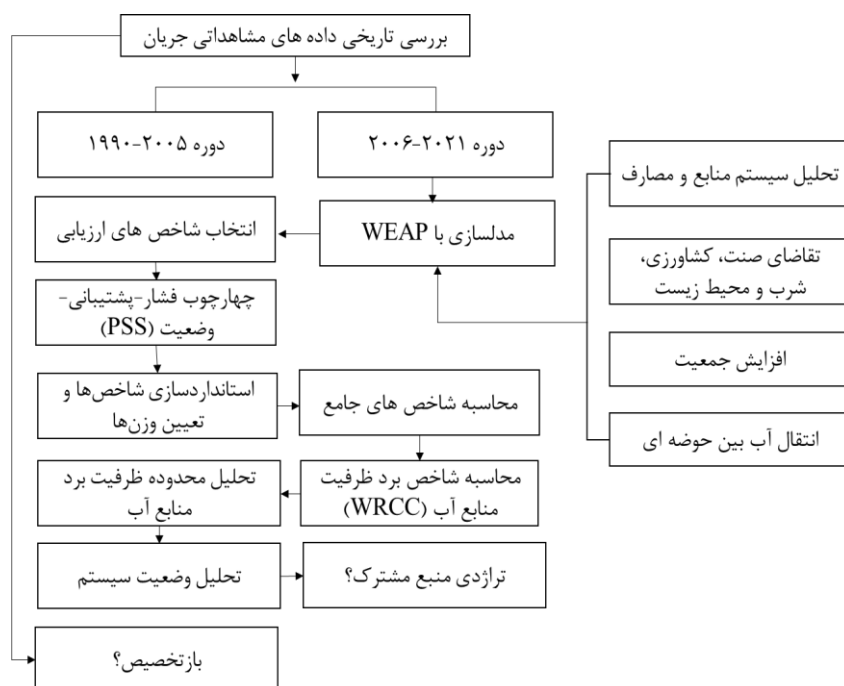
خاموش را در زاینده رود مستند کرده اند؛ پدیده ای که طی آن بدون تصمیم گیری رسمی، جریان آب از بخش های سنتی و پایین دست به مصارف جدید (شهری، صنعتی و انتقال بین حوضه ای) تغییر مسیر می دهد و منجر به تشدید نابرابری در دسترسی به آب و افزایش تنش اجتماعی می شود.

در کنار این شواهد، پژوهش های مدل سازی WEAP نیز پیش تر شکنندگی این حوضه را نشان داده اند. صفوی و همکاران (۲۰۱۶) [11] با استفاده از مدل WEAP نشان دادند که عدم تعادل مزمن بین عرضه و تقاضا، پایداری سیستم را تهدید می کند. جوادی نژاد (۲۰۱۶) [12] نیز در تحلیل تغییرات تقاضا و سناریوهای توسعه، وقوع تنش فزاینده بین ذی نفعان و افزایش وابستگی به منابع انتقالی را گزارش کرده است. افزون بر این، بررسی های اخیر زهتابیان و همکاران (۲۰۲۳) [13] نشان می دهد که کمبود آب، افزایش تقاضا و ناکارآمدی در مدیریت تخصیص، موجب رشد کسری تأمین در بخش های شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست شده و شکاف عرضه - تقاضا در بخش پایین دست گاوخونی را تشدید کرده است. علی رغم این مطالعات، بررسی جامع پویایی رقابت، باز تخصیص خاموش و احتمال وقوع تراژدی منبع مشترک در چهارچوبی که همزمان ابعاد اجتماعی و اکولوژیکی را لحاظ کند، هنوز در ادبیات حوضه زاینده رود محدود است.

در چنین شرایطی، استفاده از شاخص های یکپارچه برای سنجش وضعیت اجتماعی - اکولوژیکی حوضه ها ضروری است. یکی از چهارچوب های مناسب در این زمینه، شاخص ظرفیت برد منابع آب است [14]. اخیراً این مفهوم اساس سیاست های استفاده شده از منابع منطقه ای، توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط زیست شده است [15]. برای این مفهوم تعاریف متعددی به دلیل پیچیدگی منابع آب ارائه شده است اما به طور کلی حداکثر فشار یا باری را که یک سیستم می تواند به راحتی قبل از فروپاشی تحمل کند، ظرفیت برد تعریف می کنند [16]. این شاخص با ساختار فشار - پشتیبانی - وضعیت، امکان ارزیابی همزمان فشار انسانی، توان طبیعی اکوسیستم، و سلامت محیط را فراهم می کند. در این شاخص، برخلاف رویکردهای صرفاً هیدرولوژیک، می توان مسائل اجتماعی مانند مناقشات آب را نیز در نظر گرفت. از آنجایی که در پژوهش های مرتبط با تراژدی منبع مشترک از شاخص خاصی استفاده نشده است و این مفهوم تنها با بررسی



شکل ۱ موقعیت حوضه زاینده‌رود و انتقال‌های آب



شکل ۲ فلوچارت روش‌شناسی کلی پژوهش

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، یک رویکرد ترکیبی نظری - کمی برای تحلیل وضعیت تراژدی منبع مشترک و بازتخصیص آب در حوضه زاینده‌رود به کار گرفته شده است. در گام نخست، روند تاریخی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری از سد تنظیمی تا ورزنه در دو

بازه زمانی تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۰۵) و اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱) با هدف آشکارسازی تغییرات الگوی جریان و نحوه تضعیف تدریجی رژیم رودخانه تحلیل شد. در گام دوم، برای بررسی پویایی رقابت و رفتار بهره‌برداری ذی‌نفعان، مدل WEAP در دوره اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱) اجرا شد تا میزان فشار بر منابع، نحوه

کالیبره شد. داده‌های ورودی در جدول (۱) آورده شده است. به منظور ارزیابی نتایج مدل‌سازی از چهار معیار ضریب تبیین (R^2) [20] و ضریب تأثیر ناش - ساتکلیف (NSE) [21]، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) [22] و شاخص کارایی کلینگ و گوپتا (KGE) [23] استفاده شده است. در همه مقادیر به جز RMSE هر چه به یک نزدیک‌تر باشد عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد [20-23]. معادلات مربوط به معیارهای ارزیابی عملکرد در زیر آورده شده است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\alpha-1)^2} \quad (4)$$

که در آن‌ها، $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، $\bar{S}$ میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده، O_i داده‌های مشاهداتی هر ماه در کل دوره و S_i داده‌های شبیه‌سازی شده هر ماه در کل دوره می‌باشند. در معادله KGE، r ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، α نسبت انحراف معیار شبیه‌سازی شده به مشاهده شده و β نسبت میانگین شبیه‌سازی شده به مشاهده شده است.

جدول ۱ لیست داده‌های ورودی به مدل در حوضه زاینده‌رود

منابع	سطحی	رودخانه، سد، انتقال، تصفیه‌خانه
	زیرزمینی	حجم ذخیره، حجم اولیه، ماکزیمم برداشت، شارژ طبیعی
مصارف	شرب (شهری و روستایی)	جمعیت و نرخ رشد، سرانه مصرف آب، میزان مصرف
	صنعت	سرانه مصرف آب، میزان مصرف
	کشاورزی	مساحت زیر کشت، میزان مصرف سالانه آب، تغییرات ماهانه، میزان مصرف
	محیط زیست	حداقل نیاز
	انتقال	انتقال به خارج از حوضه

توزیع آب و شکل‌گیری مناقشه‌های ناشی از کمبود شبیه‌سازی گردد. از آنجا که شاخص مستقلی برای ارزیابی وضعیت تراژدی منبع مشترک وجود نداشت، در گام نهایی از شاخص جامع ارزیابی ظرفیت برد منابع آب (WECCI) بر پایه ساختار فشار - پشتیبانی - وضعیت (PSS) استفاده شده است تا وضعیت اجتماعی - اکولوژیکی حوضه با تأکید بر منطق هاردین ارزیابی شود. محاسبات شاخص WECCI در مقیاس سالانه و برای سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۱۰، ۲۰۱۱-۲۰۱۵ و ۲۰۱۶-۲۰۲۱ انجام گرفت و نتایج آن به منظور تبیین چرخه فشار، پویایی رقابت و میزان عبور حوضه از ظرفیت طبیعی و اجتماعی تفسیر گردید. شکل (۲) فلوچارت روش‌شناسی پژوهش را نشان می‌دهد.

ساختار مدل WEAP

مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب WEAP به عنوان یک ابزار جامع مدل‌سازی منابع آب، بر پایه معادلات بنیادی و محاسبات تعادل جرمی آب عمل می‌کند. این مدل قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های متنوعی از جمله شبکه‌های شهری، کشاورزی، حوضه‌های مستقل و رودخانه‌های مرزی پیچیده را دارد. مدل WEAP با تقسیم سیستم آبی به مؤلفه‌های مختلف مانند رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی، مخازن و تصفیه‌خانه‌ها، امکان بررسی دقیق تأمین منابع، انتقال آب، تصفیه فاضلاب و نیازهای اکولوژیک را فراهم می‌کند. این مدل از یک برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تأمین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر قیود است [19].

در این پژوهش مدل WEAP بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده پس از ترسیم شماتیک حوضه زاینده‌رود در دوره شبیه‌سازی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ (برابر با سال آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹) تعریف شده است. گام زمانی ماهانه و شروع از اکتبر سال ۲۰۰۵ (معادل شمسی مهر ۱۳۸۴) و سال پایه ۲۰۰۶ تعریف شده است. بر اساس اطلاعات استخراج شده از مطالعات به‌هنگام‌سازی طرح جامع آب کشور و شرکت آب منطقه‌ای اصفهان منابع و مصارف، جریان‌های ورودی، الویت‌های تخصیص و درصد آب برگشتی، مدل تخصیص در ۴ ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی، پل زمان خان، پل کله، لنج، پل چوم

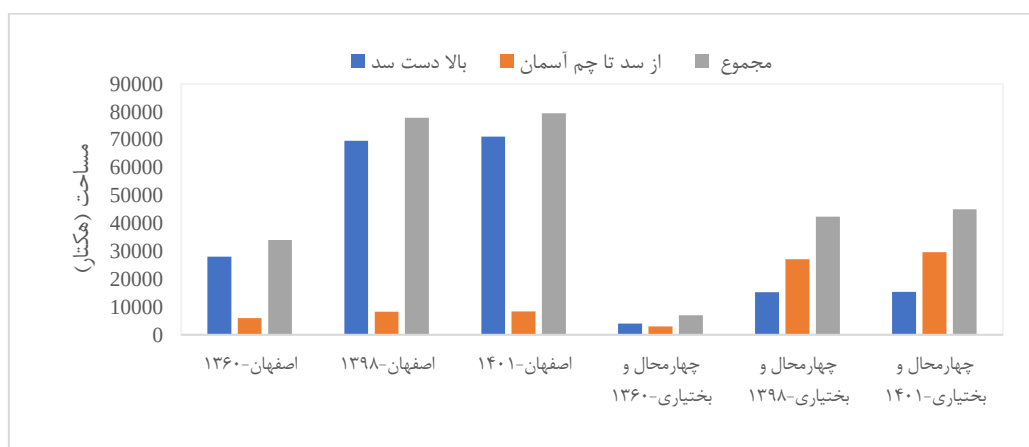
سناریوی رقابتی شکل گرفته

در طی چند دهه گذشته، حوضه زاینده‌رود مسیری از توسعه شتابان را تجربه کرده که در آن سیاست‌های افزایش عرضه و گسترش زیرساخت‌های انتقال و ذخیره‌سازی آب بر مدیریت تقاضا غلبه داشته است. ایجاد سد زاینده‌رود، توسعه شبکه‌های آبیاری و اجرای طرح‌های انتقال بین‌حوضه‌ای در کنار گسترش نواحی صنعتی و رشد جمعیت شهری، موجب افزایش بارگذاری بر منابع آب و تشدید ناپایداری بیلان شده است. این روند، چرخه‌ای از اتکا به توسعه بیشتر برای پاسخ‌گویی به تقاضاهای فزاینده ایجاد کرده که در نهایت به کاهش جریان‌های طبیعی، افت آبخوان‌ها، تضعیف تاب‌آوری اکولوژیکی و شکل‌گیری تعارضات اجتماعی در پایین‌دست انجامیده است [24]. پس از سال ۱۳۸۰ به دلیل رشد تقاضای آب در بخش‌های اصلی یعنی کشاورزی، شرب و صنعت و افزوده شدن تقاضاهای جدید، رقابت بین مصرف‌کنندگان آب تشدید گرفت.

در بخش شرب با افزایش جمعیت مصرف آب در سال پایه (۲۰۰۶) از ۳۳۱٫۵ به ۴۳۶٫۶۲ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۰۰ (۲۰۲۱) رسید. اگر چه مصرف کلی در بخش کشاورزی کاهش داشته است (به طور کلی از ۴۷۲۸ به ۱۷۸۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۰۰ رسیده است) اما تغییرات رقابتی از پایین‌دست به بالادست شکل گرفته است؛ به طوری که تغییر سطح زیر کشت در مطالعات سنجش از دور توسط شرکت تحقیقات منابع آب نشان می‌دهد سطح زیر کشت از بالادست سد تا چم آسمان در سال ۱۳۶۰ از ۴۱۰۰۰ هکتار به حدود ۱۲۰۰۰۰ هکتار در سال

۱۳۹۸ و ۱۲۴۵۵۰ هکتار در سال ۱۴۰۱ رسیده است. این آمار در خلاصه نتایج جلسه کارگروه تخصصی کاربری اراضی و مصارف آب حوضه آبریز زاینده‌رود در سال ۱۴۰۱ گزارش شده است [18]. این مقدار افزایش برای اصفهان در بالادست سد بیشتر بوده و در پایین دست سد تا چم آسمان برای چهارمحال و بختیاری بیشتر بوده است. این یک نمونه بارز شکل‌گیری رقابت توسط سیاست‌های حاکم در آن زمان بوده است. شکل (۳) تغییرات سطح زیر کشت را نشان می‌دهد.

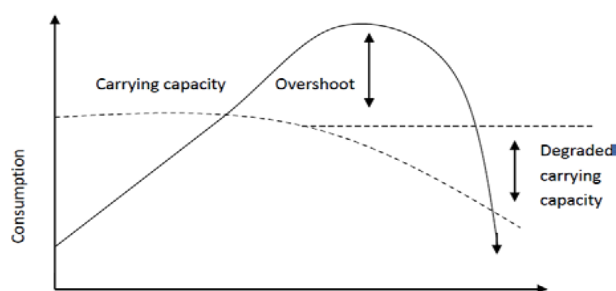
از طرفی طبق آمار سال ۱۳۸۵ در حوضه زاینده‌رود از تعداد ۳۱۹۷۲ منابع آب زیرزمینی حدود ۳ میلیارد مترمکعب سالانه آب برای مصارف مختلف تخلیه می‌گردید [25]. این تعداد چاه در سال ۱۳۹۴ به ۴۲۹۹۰ عدد و تخلیه‌ای حدود ۳ میلیارد مترمکعب رسید [26]. در صورتی که قبلاً برداشت از منابع زیرزمینی در بازه سال‌های ۸۵ تا ۹۵ از حدود ۴۰۰۰ میلیون مترمکعب به ۲۵۰۰ میلیون مترمکعب رسیده است [10]. طبق آمار سال ۹۶-۹۷ در حوضه حدود ۵۲۸۱۲ حلقه چاه (تخلیه ۱۳۸۹٫۴ میلیون مترمکعب)، ۲۲۳۹ رشته قنات (تخلیه ۹۴٫۵ میلیون مترمکعب) به طور کلی ۱۴۸۳٫۹ میلیون مترمکعب تخلیه می‌شود. مطابق با آمار سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ ۵۲۱۹۸ حلقه چاه و تخلیه کل ۱۶۸۸٫۷۹ میلیون مترمکعب به ثبت رسیده است [18]. افزایش تعداد چاه‌ها در کنار کاهش تخلیه آبخوان‌ها، نمایانگر فشار مضاعف بر منابع زیرزمینی و نمونه‌ای از تراژدی منابع مشترک است که در بلندمدت قابلیت پایداری حوضه را تهدید می‌کند.



شکل ۳ مقایسه مساحت اراضی آبی از بالادست سد زاینده‌رود تا چم آسمان در سال‌های ۱۳۶۰-۹۸-۱۴۰۱ [18]

می‌شود؛ یعنی مصرف و برداشت بیش از توان تجدید یا پشتیبانی محیط است. قسمت بالای خط ظرفیت نشان‌دهنده وضعیتی است که منابع با سرعتی بیش از تجدیدپذیری مصرف می‌شوند، ذخایر کاهش می‌یابد، و توان آینده محیط افت می‌کند. این بخش از نمودار نماد آغاز تنش‌های اکولوژیک، اقتصادی و اجتماعی است [28].

نظریه تراژدی منابع مشترک (Tragedy of the commons) نخستین بار توسط گرت هاردین در مقاله‌ای کلاسیک در مجله Science در سال ۱۹۶۸ مطرح شد و از آن زمان به یکی از تأثیرگذارترین چارچوب‌های نظری در تحلیل مسائل مربوط به مدیریت مشاعات و سیاست‌گذاری عمومی تبدیل شده است [2]. هاردین نشان داد که در یک سیستم منابع مشترک، هنگامی که افراد به طور مستقل و مبتنی بر منطق عقلانیت فردی تصمیم‌گیری می‌کنند، تمایل دارند میزان برداشت خود را تا حد امکان افزایش دهند؛ رفتاری که در سطح فردی «عقلانی» است اما در سطح جمعی باعث تخریب تدریجی منبع و کاهش رفاه همه کاربران می‌شود. از این رو، تضاد میان عقلانیت فردی و عقلانیت جمعی در نهایت به فروپاشی منبع منتهی می‌شود [6]. تحقیقاتی که این نظریه را گسترش و نقد کردند نشان دادند که تراژدی منابع مشترک تنها نتیجه رفتار کاربران نیست، بلکه محصول ترکیبی از فشارهای جمعیتی، سیاست‌های ناکارآمد دولتی، ضعف نهادها، و ساختارهای قدرت نابرابر است و در غیاب سازوکارهای نهادی و اجتماعی به ویژه در نظام‌هایی که سیاست‌گذاری‌های کلان، تخصیص آب، یا توسعه اقتصادی از بالا هدایت می‌شود، شکل‌گیری الگوی تراژدی بسیار محتمل است [29,30,31].



شکل ۴ ظرفیت برد و فزون‌باری در سیستم‌های جمعیتی و منابع طبیعی [28]

مفهوم ظرفیت برد شباهت بنیادینی با ایده تراژدی منابع مشترک هاردین دارد. هاردین نیز دنیا را به یک مرتع مشترک تشبیه می‌کند که تعداد مشخصی دام را می‌تواند پشتیبانی کند، اما

رقابت در بخش صنعت نیز از آمار موجود قابل بررسی است. اگر چه طبق آمار شرکت آب منطقه‌ای اصفهان [18] میزان مصرف صنایع کاهش داشته است و از ۱۷۲ به ۷۰ میلیون مترمکعب رسیده است، اما در این حوضه تعداد صنایع فعال تا سال ۱۳۹۷ به ۹۳۸۵ واحد صنعتی رسیده است (رشد دو برابری از سال پایه ۱۳۸۵) (۴۵۹۷) که ۳۰ واحد بزرگ صنعتی هر یک با بیش از ۰,۵ میلیون مترمکعب حدود ۷۵ درصد مصرف صنعت در حوضه را به خود اختصاص داده است [18, 27].

مفهوم تراژدی منابع مشترک و ظرفیت برد

ظرفیت برد (Carrying Capacity) به عنوان حداکثر سطح جمعیت، مصرف یا فعالیتی تعریف می‌شود که یک محیط می‌تواند بدون کاهش توان پشتیبانی خود در بلندمدت تحمل کند. ریشه این مفهوم به اکولوژی بازمی‌گردد و نخستین بار در ۱۸۸۶ در نیویورک وارد ادبیات مدیریت مرتع شد، زمانی که واژه carrying از معنای لغوی حمل کردن به معنای مدیریتی توان زیستگاه برای حمایت از دام تغییر یافت. تا ۱۸۸۹ ظرفیت برد مبنای اصلی سنجش و برنامه‌ریزی ظرفیت مراتع شد. پس از جنگ جهانی دوم، مفهوم ظرفیت برد همزمان وارد زیست‌شناسی جمعیت و مناقشه‌های مربوط به رشد جمعیت انسانی شد. دانشمندانی مانند اودوم این مفهوم را صورت‌بندی علمی کردند و نشان دادند هر انحراف جمعیت از حد ظرفیت، بازتاب محدودیت‌های واقعی محیط است [28]. شکل (۴) این مفهوم را نشان می‌دهد. منحنی کلاسیک ظرفیت برد شامل سه بخش است: (۱) ناحیه پایداری که مصرف کمتر از ظرفیت است، (۲) ناحیه overshoot که مصرف از ظرفیت فراتر می‌رود، و (۳) ناحیه تخریب ظرفیت که در آن توان طبیعی و اجتماعی سیستم برای حمایت از مصرف کاهش می‌یابد. مطابق تصویر، خط افقی یا خط‌چین بالای نمودار نمایانگر ظرفیت برد ثابت محیط است؛ یعنی سقفی که محیط می‌تواند در بلندمدت پشتیبانی کند. منحنی صعودی که در نمودار دیده می‌شود بیانگر رشد مصرف انسان از منابع محدود است. در بخش ابتدایی نمودار، مصرف کمتر از ظرفیت است و سیستم در ناحیه پایدار عمل می‌کند. اما با افزایش جمعیت یا شدت مصرف، منحنی به خط‌چین نزدیک می‌شود و به نقطه آستانه یا threshold می‌رسد. لحظه‌ای که منحنی مصرف از خط‌چین عبور می‌کند، سیستم وارد Overshoot یا «فزون‌باری»

در کنار فاکتورهای منابع آب وجود ندارد. از این رو شاخص ظرفیت برد منابع آب شاخصی با انعطاف پذیری بالا و مناسب برای بررسی هدف مقاله است. در این پژوهش، ظرفیت برد منابع آب بر اساس چارچوب فشار - پشتیبانی - وضعیت (PSS) تعریف شد. این ساختار در مطالعات مختلف مدیریت آب [16, 32] به عنوان چارچوبی انعطاف پذیر معرفی شده است که شاخص های آن می توانند متناسب با وضعیت هر حوضه انتخاب شوند. در سایر پژوهش ها شاخص اقتصادی تعریف شده است ولی از آنجایی که در این پژوهش مناقشات آبی به عنوان نمادی از تراژدی در نظر گرفته شده، این فاکتور در ارزیابی ها به جای شاخص اقتصادی در نظر گرفته شده است. شاخص های به کار رفته در جدول (۲) نوشته شده است.

وقتی هر بهره بردار برای کسب منفعت فردی، مصرف را افزایش دهد، مجموع رفتارها باعث فراتر رفتن از ظرفیت و تخریب مرتع می شود. این دقیقاً همان چیزی است که در ادبیات ظرفیت برد با اصطلاح Overshoot شناخته می شود. همان گونه که یک مرتع نمی تواند بیش از ظرفیت طبیعی خود دام پشتیبانی کند، یک حوضه آبریز، شهر، یا حتی کل سیاره نیز در صورت عبور از ظرفیت، دچار کاهش کارکرد، تنش اجتماعی و تخریب اکولوژیک می شود. بنابراین ظرفیت برد و نظریه هاردین دو صورت بندی مکمل از یک مسئله واحد هستند: محدودیت منابع و پیامدهای عبور از آن.

شاخص های ارزیابی مدل در چهارچوب ظرفیت برد
به طور کلی شاخصی برای بررسی وضعیت مناقشات اجتماعی

جدول ۲ شاخص های مورد استفاده در ارزیابی ظرفیت برد منابع آب [16,33]

دسته بندی	شماره/وزن	شاخص	واحد	نوع شاخص	توضیح / تعریف	استخراج
فشار (Pressure) (۰,۳۳)	۱ (۰,۲۵)	اطمینان پذیری حجمی	-	طبیعی - انسانی	نسبت حجم آب تأمین شده به نیاز کل در حوضه [34]	خروجی از WEAP
	۲ (۰,۲۵)	بیشینه کمبود	Mm ³ /yr	طبیعی - انسانی	بیشترین نیاز برطرف نشده *	خروجی از WEAP
	۳ (۰,۲۵)	جمعیت	Persons/yr	اجتماعی	جمعیت سالانه	آمار نفوس و مسکن
	۴ (۰,۲۵)	اعتراضات یا مناقشات مرتبط با آب	-	اجتماعی - سیاسی	در صورت وجود مناقشه آب عدد یک در نظر گرفته می شود *	سایت های معتبر خبری
پشتیبانی (Supportive) (Force) (۰,۳۳)	۵ (۰,۴)	بارش	mm/yr	طبیعی - اقلیمی	متوسط بارش سالانه در کل حوضه	آب منطقه ای
	۶ (۰,۶)	حجم آب خروجی از سد زاینده رود	Mm ³ /yr	طبیعی - اقلیمی	حجم سالانه خروجی از سد زاینده رود	آب منطقه ای
وضعیت (Health) (state) (۰,۳۳)	۷ (۰,۳)	جریان زیست محیطی به تالاب	m ³ /s	زیست محیطی	دبی ایستگاه ورزنه	آب منطقه ای
	۸ (۰,۷)	افت آبخوان	Mm ³ /yr	زیست محیطی	میزان افت حجم آبخوان در حوضه *	خروجی از WEAP

*نویسندگان این شاخص ها را در نظر گرفته اند.

اهمیت یکسان (وزن‌های مساوی) در نظر گرفته شد. شاخص‌های فشار نیز اهمیت برابر و در شاخص پشتیبانی اهمیت دبی رهاسازی شده از سد بیشتر از مقدار بارش در نظر گرفته شد. مؤلفه اکولوژیک نیز دو زیرشاخص تعریف شد. از آنجایی که تالاب در بیشتر مواقع آبی دریافت نمی‌کند وزن بیشتری به افت آبخوان داده شد.

گام سوم محاسبه شاخص تجمعی با استفاده از روابط زیر است [16, 36]:

$$PI = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i \quad i=1,2, \dots, n \quad (6)$$

$$SI = \sum_{i=1}^n S_i \cdot W_i \quad i=1,2, \dots, n \quad (7)$$

$$HSI = \sum_{i=1}^n S_i \cdot W_i \quad i=1,2, \dots, n \quad (8)$$

$$PS = \frac{PI}{SI} \quad (8)$$

$$WECCI = (1 - PI) \times W_{PI} + SI \times W_{SI} + HSI \times W_{HSI} \quad (9)$$

که PI شاخص تجمعی فشار اجتماعی - سیاسی (به جای اجتماعی - اقتصادی در سایر پژوهش‌ها)، و PI بیانگر زیرشاخص نام این بخش؛ SI شاخص تجمعی پشتیبانی منابع آب و SI بیانگر زیرشاخص نام و W_i وزن متناظر با هر شاخص؛ PS شاخص درجه فشار - پشتیبانی؛ $WECCI$ شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب (همان شاخص جامع ظرفیت برد اکولوژیک آب)، HSI شاخص تجمعی وضعیت سلامت محیط زیست و W وزن‌های متناظر به هر مؤلفه است، که در این پژوهش یکسان در نظر گرفته شده است.

ارزیابی وضعیت سیستم و بررسی تراژدی

از آنجایی که شاخص $WECCI$ شامل سه مؤلفه اصلی است و امکان تبادل‌پذیری بین شاخص‌ها وجود دارد، ممکن است مقادیر کم یک شاخص با مقادیر زیاد شاخص دیگر جبران شود. بنابراین این حالت ممکن است وضعیت سیستم را به درستی بیان نکند. از طرفی اگر تنها پایداری محیط زیست را ملاک ارزیابی قرار دهیم اکثر سال‌ها در تقسیم‌بندی بیش‌بارگذاری قرار خواهند گرفت. زیرا آب ورودی به تالاب در محدوده دوره شبیه‌سازی بسیار کم است و تالاب در وضعیت خشک قرار دارد. بنابراین برای شاخص سلامت اکولوژیک دو پارامتر در نظر گرفته شده است. افت آبخوان، که سالانه حدود ۳۷۹ میلیون مترمکعب

فشار بیانگر عواملی است که سبب افزایش تقاضا، برداشت یا تنش بر سیستم می‌شود. در این مطالعه با توجه به شرایط خاص زاینده‌رود، شاخص‌ها انتخاب شده است. شاخص‌های اطمینان‌پذیری حجمی و بیشینه کمبود که از مدل $WEAP$ به دست می‌آیند، جمعیت نیز در هر سال از آمار موجود به دست آمده است. شاخص فشار اجتماعی - سیاسی که مناقشات آبی شکل گرفته در حوضه را نشان می‌دهد از سایت‌های خبری مستند شده است. به این منظور هر گونه اعتراض یا مناقشه‌ای که در حوضه چه برای کشاورزان اصفهان و یا اعتراض به انتقال‌های آب توسط چهارمحال و بختیاری و اصفهان بوده، در نظر گرفته شده است. در نتیجه سالی که مناقشه وجود داشته (۲۰۱۱، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱) عدد یک و غیر از آن عدد صفر در نظر گرفته شده است. پشتیبانی بیانگر ظرفیت طبیعی و مدیریتی تأمین آب است که حجم خروجی از سد زاینده‌رود توان مدیریتی تأمین را با در نظر گرفتن حجم آب و تونل‌های انتقال در نظر دارد. بارش نیز متغیر کلیدی اقلیمی است. شاخص‌های وضعیت، کیفیت کلی سیستم را نمایش می‌دهند که وضعیت تالاب و افت آبخوان بازتاب نهایی اثر فشار و پشتیبانی است.

محاسبه شاخص ارزیابی جامع

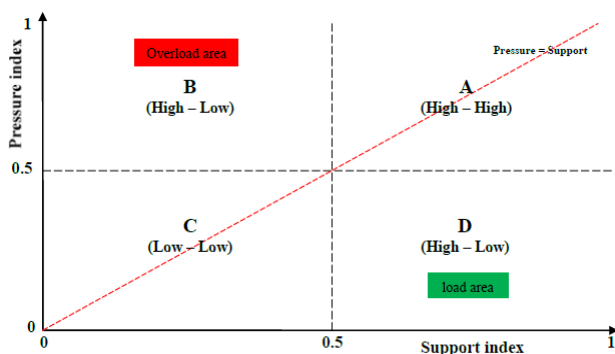
برای ارزیابی جامع شاخص ظرفیت برد حوضه از یک شاخص ترکیبی مطابق با جدول (۲) استفاده شده است که بر اساس مطالعات پیشین و با توجه به بومی‌سازی شاخص‌ها تعریف می‌شود [16]. برای این منظور اولین قدم نرمال‌سازی شاخص‌ها است که مطابق رابطه (۵) حاصل می‌شود:

$$XI = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

که XI مقدار استانداردسازی شده شاخص، X_i مقدار واقعی شاخص و حداقل و حداکثر شاخص می‌باشد. باید توجه داشت برای شاخص‌های منفی باید عدد حاصل منهای یک شود. به این معنی که مثلاً شاخص اول قابلیت اطمینان هر چه به یک نزدیک‌تر باشد شرایط بهتر است اما در تحلیل فشار باید آن را منهای یک کرد تا هرچه به یک نزدیک شود یعنی فشار بیشتر است.

گام دوم پس از یکسان‌سازی مقدار شاخص‌ها تعیین وزن شاخص‌ها هست که در این پژوهش از روش وزن‌دهی سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده است [35]. سه مؤلفه اصلی با

پژوهش همان وضعیت تراژدی در نظر گرفته شده است. حالت C وضعیتی است که هر دو شاخص کم هستند. سطح توسعه ضعیف و ظرفیت برد نیز در حالت ایدئال نیست. در این شرایط افزایش توانایی زیرسیستم پشتیبانی و انتقال تدریجی به حالت D و سپس حالت A است. در حالت D پشتیبانی بالا و فشار کم است و پتانسیل توسعه زیادی در منابع آب وجود دارد [36].



شکل ۵. حالت‌های اتصال فشار - پشتیبانی [36]

نتایج و بحث

بررسی تاریخی توسعه و تغییرات دبی ایستگاه‌ها در

رودخانه زاینده‌رود

در این قسمت برای مشخص کردن وضعیت تغییر در برداشت در حوضه با تحلیل داده‌های مشاهداتی میزان مصرف آب در فاصله هر ایستگاه به دست آورده شده است. به این منظور دبی سالانه هر ایستگاه منهای دبی ایستگاه قبل شده است تا میزان مصرف بین ایستگاه‌ها به دست آید. اعداد منفی نشان از برگشت آب در آن بازه است. نتایج متوسط سالانه در دوره گذشته و اخیر از ۱۹۹۰-۲۰۰۵ و ۲۰۰۶-۲۰۲۱ بررسی و مقایسه می‌شود. در ابتدا وضعیت ورودی به سد زاینده‌رود بررسی شده است. جدول (۴) نشان می‌دهد تقریباً به میزان ۲۷۰ میلیون مترمکعب حجم آب در بالادست سد کاهش یافته است که می‌توان آن را به خشک‌سالی و کاهش آورد سرچشمه‌ها یا برداشت غیرمجاز در آنجا یا افزایش سطح زیر کشت و برداشت‌های بیشتر در سرشاخه‌های پلاسجان نسبت داد. بنابراین برخی از کمبودها قبل از سد رخ داده است. نکات قابل توجه در جدول (۴) تغییرات مصرف از سد تا پل کله و از پل کله تا ورزنه می‌باشد. با دقت در اعداد می‌توان نتیجه گرفت تا قبل از سال ۲۰۰۵ (۱۳۸۳-۸۴) مصرف در بالادست بسیار کمتر بوده و با گذشت زمان مصرف بالادست حدود ۳۰۰

کسری آبخوان گزارش شده است [37]. بنابراین برای تعریف شاخص آبخوان حد آستانه بر اساس نصف مقدار گزارش شده در افت آبخوان (۲۰۰ میلیون مترمکعب) در نظر گرفته شده است. برای نیاز زیست‌محیطی تالاب نیز به منظور حفظ و بقای اکوسیستم ۱۴۰,۷۲ میلیون مترمکعب سالانه و تنها برای بقای پرندگان ۶۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است [17]. بنابراین در پژوهش برای حداقل آب ورودی به تالاب نصف نیاز برای بقای پرندگان (۳۰ میلیون مترمکعب) در نظر گرفته شد. در این پژوهش از بررسی تک‌بعدی سلامت اکولوژیک صرف نظر شده و تنها به شاخص جامع و تحلیل فشار - پشتیبانی پرداخته شده است. در این صورت مقدار بالای شاخص‌های فشار یا پشتیبانی می‌تواند ضعف شاخص اکولوژیک را پوشش دهد.

برای ارزیابی وضعیت سیستم از جدول (۳) طبق بازه‌های تعریف‌شده و شکل (۵) استفاده شده است [16, 32, 36]. همان طور که مشخص است در محدوده ۰,۴ تا ۰,۶ ظرفیت حمل در حالت آستانه قرار دارد.

جدول ۳ استاندارد ارزیابی شاخص ظرفیت برد منابع آب و شاخص درجه

فشار - پشتیبان [16, 32, 36]

شاخص	محدوده	تفسیر سطوح محدوده
WECCI	۰,۸-۱	ظرفیت حمل عالی (Excellent carrying)
	۰,۶-۰,۷۹	ظرفیت حمل خوب (Good carrying)
	۰,۴-۰,۵۹	ظرفیت حمل (General carrying)
	۰,۲-۰,۳۹	ظرفیت حمل ضعیف (Poor carrying)
	۰-۰,۱۹	ظرفیت حمل بسیار ضعیف (Very poor carrying)
PS	۰-۰,۹۹	محدوده حمل (Carrying)
	۱	وضعیت بحرانی (Critical situation)
	۱ +∞	بیش‌بارگذاری (Overload)

در کنار آن چهار حالت کلی نشان‌دهنده وضعیت سیستم بر مبنای دو شاخص اصلی فشار و پشتیبانی بر اساس شکل (۴) بررسی می‌شود. در حالت A هر دو شاخص بالا است که نشان‌دهنده سطح بالایی از توسعه منابع آب منطقه‌ای است، در نتیجه توجه به سیستم پشتیبانی مهم است در غیر این صورت سیستم وارد بیش‌بارگذاری خواهد شد. حالت B شاخص فشار بالا و پشتیبانی پایین است که بیانگر عدم توجه به حفاظت از منابع آب سیستم و توسعه ناپایدار است. این حالت برای این

کارخانه فولاد مبارکه (۱۳۷۱) احداث کانال و توسعه شبکه‌های برخوار، مهیار، جرقویه و کرون به تدریج افزایش بازیگران رقابتی را تشدید کرد [24]. طبق نمودار اگر چه میان‌دست حوضه (پل کله تا لنج-قرمز رنگ) همچنان بیش‌ترین مصرف‌کننده است اما پایین‌دست (خطوط آبی و مشکی) سهم آبی افزایشی را طی می‌کند که نشان از رقابت فردی بین ذی‌نفعان است. در این دوره تا اواخر دهه ۷۰ (۲۰۰۰) به تدریج جابه‌جایی مصرف رخ داده است و از میان‌دست (کاهش مصرف از پل کله تا لنج - قرمز) به پایین‌دست مصرف آب جابه‌جا می‌شود.

دهه ۷۰ تا ۸۰ (۱۹۹۱-۲۰۰۱) با افزایش اراضی قابل آبیاری شبکه رودشت از ۱۷۰۰۰ هکتار به حدود ۴۲۰۰۰ هکتار (شرکت زاینده آب، ۱۳۹۷)، اضافه شدن حق اشتراکی‌ها در بهره‌برداری از منبع موجود و تصویب طرح طوبی کم‌کم رقابت شروع به شکل‌گیری کرد [24]. مطابق با نمودار میان‌دست روند کاهشی (خط قرمز) و پایین‌دست (آبی و مشکی) روند افزایشی و منطبق با شرایط پرآبی و کم‌آبی نوسان دارد. در این دوره میزان مصرف در بالادست شروع به تغییر و افزایش می‌کند (سبز پررنگ). این روند همزمان با تونل‌های انتقال و افزایش شرب رشد می‌کند. به طوری که در سال‌های خشک ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱ (سال ۱۳۸۰ سال بسیار خشک) در بقیه بخش‌ها کاهش یافت اما در این بازه همچنان روند افزایشی بود.

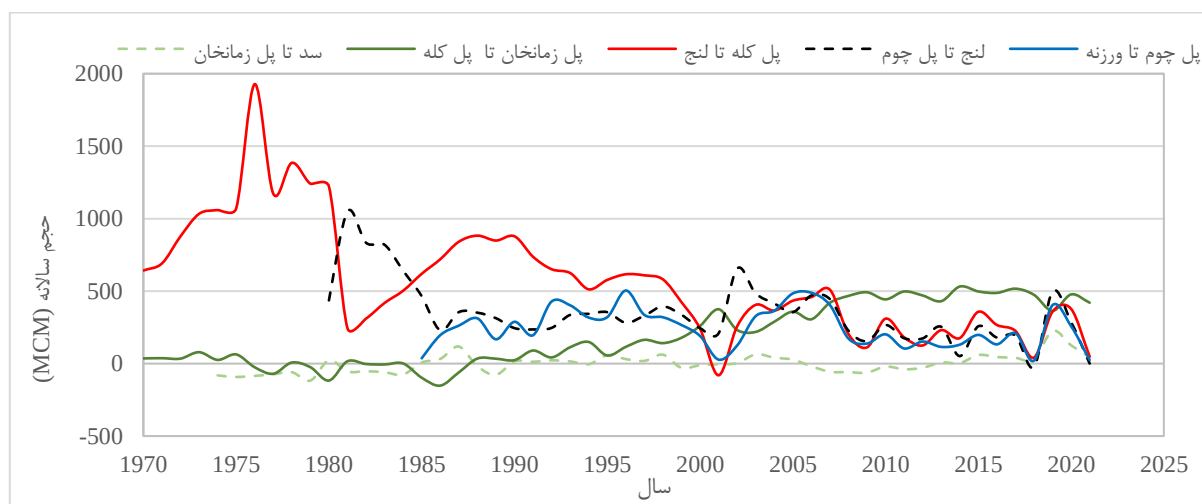
میلیون مترمکعب افزایش یافته است. مقایسه مجموع مصرف نشان می‌دهد تغییرات زیاد و معناداری در مصارف رخ نداده است ولی جابه‌جایی مصرف رخ داده است. بیشترین آسیب‌پذیری نیز در سال‌های خشک بوده و سال‌های خشک، تر و نرمال بالادست هیچ گونه تغییر معناداری را تجربه نکرده است.

شکل (۶) تغییرات حجم مصرف در بازه‌های ایستگاه‌های مطالعاتی طولانی‌تر و از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. بیشترین مصرف در بازه سال‌های ۵۰ تا ۶۰ (۱۹۷۱-۱۹۸۱) بوده است که همزمان با توسعه شبکه‌های مدرن نکوآباد و آبشار در ابتدای دهه ۵۰ و همزمان با احداث تونل اول و سد زاینده‌رود بوده است، توسعه صنایع به ویژه کارخانه ذوب آهن، و به دنبال آن توسعه جمعیت شهری شکل گرفت. در این دوره سهام‌آبه‌بران بازیگران رقابتی جدیدی بودند که بعد از حق‌آبه‌بران به بهره‌برداران حوضه اضافه شدند [38]. دقیقاً در مصرف در بازه پل کله تا لنج (خط قرمز) بیشترین و پس از آن لنج تا پل چوم (خط چین مشکی) بوده است. در این دوران برداشتی در بالادست وجود نداشته است.

در دهه بعد ۶۰ تا ۷۰ (۱۹۸۱-۱۹۹۱) با افزایش برداشت‌ها و کمبودها مجدد ایجادشده تونل دوم کوهرنگ به بهره‌برداری رسید. مدیریت عرضه محور و تعریف توسعه‌های جدید افزایش سطح زیر کشت اراضی کشاورزی با منابع آبی رودخانه و احداث

جدول ۴ مقایسه متوسط مصارف آب زاینده‌رود در بازه ایستگاه‌های مختلف و حجم دبی در بالادست سد زاینده‌رود (میلیون مترمکعب)

بازه/ سال	متوسط (۲۰۰۶-۲۰۲۱)	متوسط (۱۹۹۰-۲۰۰۵)	میزان تغییرات اخیر نسبت به گذشته	سال پرآب (۲۰۱۹)	سال نرمال (۲۰۱۷)	سال خشک (۲۰۲۱)
ورودی سد زاینده‌رود	۱۲۱۳	۱۴۸۳	-۲۷۰	۱۷۵۰	۱۲۲۷	۷۴۲
ایستگاه سد تنظیمی	۱۱۶۳	۱۴۴۳٫۸	-۲۷۹٫۹	۱۸۷۲٫۸	۱۱۸۸٫۸	۵۴۶٫۶
مصرف از سد تنظیمی تا پل زمانخان	۱۸٫۳	۱۹٫۹	-۱٫۶	۲۲۵٫۶	۴۰	۴۵٫۶
مصرف از پل زمانخان تا پل کله	۴۵۵٫۸	۱۷۵٫۳	+۲۸۰٫۶	۳۶۳٫۳	۵۱۶٫۷	۴۲۰
مصرف از پل کله تا لنج	۲۴۸٫۹	۴۸۹٫۵	-۲۴۰٫۶	۳۵۸٫۴	۲۲۵٫۳	۴۸٫۱
مصرف از لنج تا پل چوم	۲۲۵٫۶	۳۴۱٫۵	-۱۱۵٫۹	۴۹۷٫۵	۱۹۳٫۶	۰٫۵
مصرف از پل چوم تا ورزنه	۱۹۷٫۱	۳۰۶	-۱۰۸٫۹	۴۰۳٫۳	۲۰۹٫۹	۲۴٫۴
مصرف از سد تنظیمی تا پل کله	۴۷۴٫۲	۱۹۵٫۳	+۲۷۹	۵۸۹	۵۵۶٫۶	۴۶۵٫۷
مصرف از پل کله تا ورزنه	۶۷۱٫۷	۱۱۳۷٫۱	-۴۶۵٫۴	۱۲۶۰	۶۲۸٫۸	۷۳



شکل ۶ مقایسه حجم مصرف در بازه‌های ایستگاه‌های مطالعاتی از سال ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۱

مترمکعب در بازه پل زمانخان تا پل کله مصرف شده است. مطابق با آمار حدود ۳۵۰ میلیون مترمکعب شرب و ۳۴ میلیون برای صنعت از سد تخصیص یافته است و باقی برای مصارف کشاورزی بوده است. در دوره ترسالی ۹۸-۱۳۹۷ همه بازه‌ها مصرف خود را افزایش داده‌اند.

نتیجه توسعه افسارگسیخته و شکل‌گیری رقابت در سال‌های خشک به شدت نمایان می‌شود که شکست سیستم را افزایش می‌دهد. طبق نظریه تراژدی هاردین مرحله فرسایش منابع و فروپاشی جریان مشترک در سال‌های خشک (۱۳۸۷، ۱۳۹۷، ۱۴۰۰)، نمودار مشهود است حجم مصرف در پایین‌دست تقریباً صفر و تالاب گاوخونی (به عنوان گیرنده نهایی) کاملاً بی‌آب مانده است. با هر خشکسالی، این رقابت تشدید و نمودارها واگرا می‌شوند که نشان از نبود همکاری و تنظیم جمعی دارد. الگوی مصرف آب در نمودار به صورت عینی، نمودار تراژدی منابع مشترک است؛ خطوط بالادست پایدار و حتی گاهی افزایشی هستند، در حالی که پایین‌دست فرومی‌پاشد. برای پاسخ به بحران کاهش جریان پایین‌دست اتفاق افتاده است، نه صرفه‌جویی بالادست. به طور کلی هر بازه به جای مدیریت اشتراکی، سهم خود را حداکثر کرده است و فقدان نهادهای اثرگذار در تخصیص عادلانه، کنترل برداشت، حقوق محیط زیست موجب شده توازن بین بخش‌ها از بین برود.

دهه ۸۰ (۲۰۰۱ به بعد) آغازی برای رقابت بین منطقه‌ای شکل گرفت مخصوصاً از ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ رقابت منطقه‌ای به بالاترین حد خود رسید. پس از جدا شدن آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری (در سال ۱۳۸۴)، افزایش سطح زیرکشت و باغات در بالادست در اصفهان و چهارمحال و بختیاری و افزایش تقاضای حوضه رقابت در سال‌های خشک بیشتر خود را نشان داد. اگر چه رویکردهای عرضه‌محور همچنان با تونل چشمه‌لنگان و خدنگستان ادامه داشت اما نتوانست در بلندمدت اثر مثبتی بگذارد.

نتیجه رقابت‌های شکل‌گرفته در حوضه از سال ۱۳۹۰ (۲۰۱۱) به شکل مناقشات و تنش‌های اجتماعی خود را نشان داد. تالاب گاوخونی به خشکی کامل رفت. به عبارتی دیگر مطابق با نظریه هاردین می‌توان گفت رقابت از «پایین‌دست به بالادست» منتقل شد، نه از «فرد به فرد». با دقت به نمودار پس از دهه ۹۰ (۲۰۱۱) تقریباً مصرف در همه بازه‌ها با روند خشکسالی و ترسالی همگرایی مثبت دارند به طوری که در سال نسبتاً خشک ۱۳۹۲-۹۳ (۲۰۱۴) در همه بازه‌ها کاهش مصرف دیده می‌شود اما در بالادست همچنان میزان مصرف بالا بوده است. اگر چه در میان‌دست حوضه (پل کله تا لنج) همچنان از پایین‌دست آب بیشتری مصرف شده ولی در بالادست همچنان در این دهه روند ثابت و افزایشی بوده است. همچنین در خشک‌سالی شدید ۲۰۱۸ (۱۳۹۶-۹۷) با کل حجم مخزن حدود ۵۵۰ میلیون مترمکعب تقریباً به هیچ بازه‌ای آبی تعلق نگرفته است اما حدود ۴۷۰ میلیون

جدول ۵ مقایسه متوسط مصارف آب زاینده رود در بالادست و پایین دست پل کله و بررسی باز تخصیص (میلیون مترمکعب)

بازه/ سال	متوسط اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱)	متوسط گذشته (۱۹۹۰-۲۰۰۵)	متوسط بلندمدت (۱۹۷۰-۲۰۰۵)	میزان تغییرات اخیر نسبت به گذشته	میزان تغییرات اخیر نسبت به بلندمدت
مصرف از سد تنظیمی تا پل کله	۴۷۴,۲	۱۹۵,۳	۶۵	+۲۷۹	+۴۰۹,۲
مصرف از پل کله تا ورزنه	۶۷۱,۷	۱۱۳۷,۱	۱۱۰۴,۱	-۴۶۵,۴	-۴۳۲,۴
مجموع سد تا ورزنه	۱۱۴۵,۹	۱۳۳۲,۴	۱۱۶۹,۱	-	-

نمودار شکل (۶) و جدول (۵) کاملاً روند واژه باز تخصیص خاموش که توسط طالبی اسکندری و میر نظامی [10] بیان شد را اثبات می کند و به تصویر می کشد. این فرایند مطابق با پژوهش آن ها زمانی آغاز شد که با توسعه صنایع بزرگ، افزایش جمعیت شهری و اجرای طرح های انتقال بین حوضه ای، اولویت تخصیص آب از کشاورزی سنتی و حقابه داران پایین دست به مصارف جدید شهری و صنعتی تغییر یافت. همزمان، در بالادست حوضه، حفر چاه های مجاز و غیر مجاز و گسترش باغات باعث افزایش برداشت آب شد و عملاً جریان طبیعی رودخانه به سمت پایین دست کاهش یافت. در نتیجه، بدون اعلام رسمی یا جبران خسارت، بخشی از حقابه های تاریخی کشاورزان و تالاب گاوخونی به نفع مصارف جدید جابه جا شد؛ فرایندی که نویسندگان آن را باز تخصیص خاموش نامیده اند، زیرا در فضایی غیر شفاف و بدون رضایت حق آبه داران اتفاق افتاد [10]. همان طور که نتایج عددی در جدول (۶) تغییرات در اثر گذشت زمان را نشان می دهد، که اگر چه بین دوره اخیر و متوسط بلندمدت گذشته مجموع مصرف یکسان بوده (حدود ۲۳ میلیون مترمکعب اختلاف)، اما حدود ۴۰۰ میلیون مترمکعب مصرف از پایین دست کم شده و به بالادست اضافه شده است.

کالیبره مدل WEAP

به منظور بررسی شرایط تراژدی در دوره اخیر مدل از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۱ (۸۵-۱۳۸۴ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹) به صورت ماهانه (۱۹۲ ماه) شبیه سازی شده است. در ادامه الویت های تعریفی از ۱ با بیشترین اهمیت (شرب) تا ۹ کمترین اهمیت (محیط زیست) در مدل تعریف شد. شرب الویت یک، کشاورزی و صنعت با الویت های ۲ تا ۴ بسته به موقعیت جای گذاری با نظر کارشناسان حوضه تغییر کرده است. محیط زیست الویت آخر در شبیه سازی مطابق با آنچه اتفاق افتاده است تعریف شده است. نتایج پس از کالیبراسیون دستی دقت بسیار مناسبی داشتند که نشان دهنده ارزیابی درست در بالادست بوده است. اگر چه در مدل کامل دبی

در ایستگاه سد تنظیمی با ضرایب تبیین و نش ۰/۸۲ به دست آمد و قابل قبول بود، اما از آنجایی که مقادیر دبی در این قسمت بسیار بالا بود، این مقدار اختلاف خطای ۳۰ میلیون مترمکعبی را ایجاد می کرد که منجر به پایین آمدن دقت سایر ایستگاه ها می شد. به همین منظور مدل دوباره و با دبی خروجی از سد مدل سازی شد در نتیجه دقت شبیه سازی در این ایستگاه به ضرایب ۰/۹۹ و میزان خطا به حدود ۶ میلیون مترمکعب رسید. مدل با روش PEST کالیبره شد. در ایستگاه های مورد نظر نقاط برداشت انتخاب و پارامترهای حساس در شبیه سازی در بازه مشخصی تعریف شدند. برخی از پارامترهای حساس در روند کالیبره ایستگاه ها سطح زیر کشت، مصرف آب و نرخ مصرف آب بود. نتایج واسنجی در جدول (۶) آورده شده است که نشان از عملکرد خوب مدل دارد. ایستگاه ورزنه برای کالیبره از آنجایی انتخاب نشد که دبی در اکثر روزها صفر است و تنها مدت کوتاهی در سال برای پایین دست رهاسازی می شود که عملاً کالیبره ایستگاهی که اکثر روزهای آن دبی صفر است بسیار ضعیف است.

جدول ۶ مقادیر معیارهای ارزیابی مدل در ایستگاه های هیدرومتری

ایستگاه	R ²	NSE	KGE	RMSE (MCM)
ورودی سد زاینده رود	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۵	۲۷
سد تنظیمی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۷	۶,۷
پل زمان خان	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۸۷	۱۲
پل کله	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۸	۱۸
لنج	۰/۸۹	۰/۸۹	۰/۹۳	۱۵
پل چوم	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۷۹	۱۳

ارزیابی شاخص های ظرفیت برد بر اساس خروجی مدل WEAP

پس از بررسی داده های مشاهداتی و تغییرات دبی ایستگاه ها در دوره های مورد بررسی و مدل سازی دوره اخیر (۲۰۰۶-۲۰۲۱)

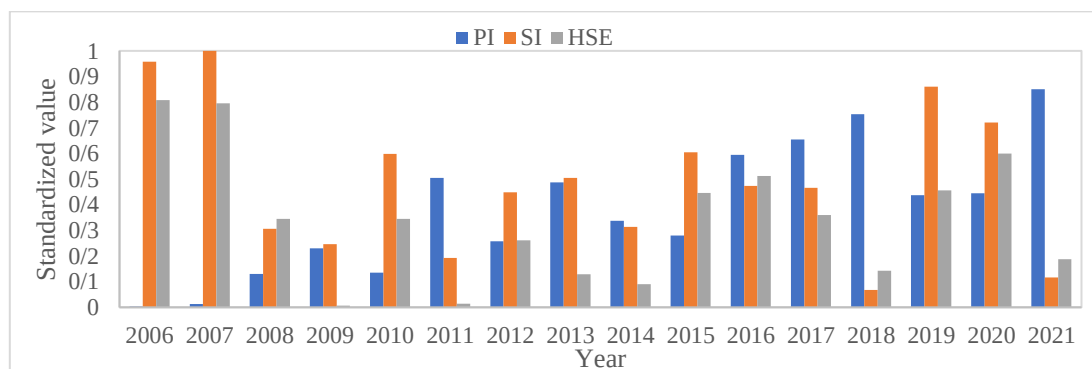
(الف) دوره اول ۲۰۱۰-۲۰۰۶ (سبز رنگ): SI بالاتر از سایر دوره‌ها و PI نسبتاً پایین‌تر است. این دوره نشان‌دهنده فشار کمتر و شرایط اکوسیستمی سالم‌تر است. در قسمت ب شکل (۸) PS بسیار پایین‌تر از ۱ است که این وضعیت به معنای آن است که توان پشتیبانی اکوسیستم در این دوره بیشتر از فشار وارده بوده؛ بنابراین سیستم در حالت carrying capacity قرار داشته است. این همان وضعیتی است که می‌توان گفت سال‌های با سلامت نسبی اکوسیستم وجود داشته است.

(ب) دوره دوم ۲۰۱۵-۲۰۱۱ (زرد رنگ): SI کاهش یافته و PI افزایش پیدا کرده است؛ این روند نشان‌دهنده تشدید فشار و کاهش توان طبیعی است. در قسمت ب شکل (۸)، PS حدوداً نزدیک ۱ می‌باشد. این دوره مانند critical state است. فشار و پشتیبانی تقریباً متوازنند، اما شرایط شکننده است. چنین وضعیتی آسیب‌پذیر و مستعد ورود به اضافه‌برداشت می‌باشد.

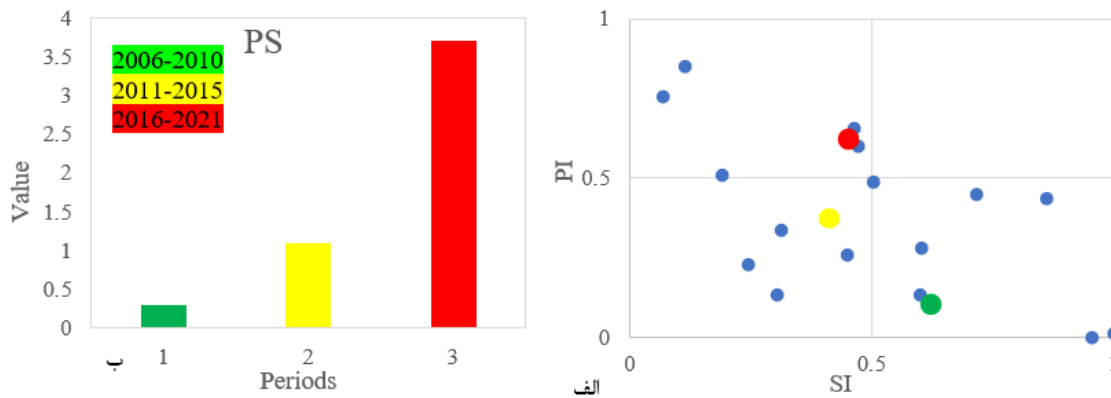
(ج) دوره سوم ۲۰۲۱-۲۰۱۶ (قرمز رنگ): نقطه قرمز بالاترین مقدار PI و یکی از کمترین SI‌ها را نشان می‌دهد. این دقیقاً همان الگوی تشدید تضاد فشار - پشتیبانی است که نشانه ورود سیستم به وضعیت overload می‌باشد. در قسمت ب شکل (۸) PS بسیار بالاتر از ۱ (بیش از ۳٫۵) می‌باشد. این مقدار بالا نشان‌دهنده غلبه شدید فشار بر توان پشتیبانی است. این وضعیت بدون ابهام به عنوان بیش‌بارگذاری شدید قابل تفسیر است و نشان می‌دهد که اکوسیستم در سال‌های اخیر قادر به تحمل سطح فعالیت انسانی نبوده است. این وضعیت دقیقاً همان شرایط تراژدی منبع مشترکی است که هدف مقاله آن را برای اثبات دنبال کرده است. در واقع این دوران فشار اجتماعی - سیاسی نیز بیشتر شده است.

با سناریو وضع موجود با رشد جمعیت و رقابت ذی‌نفعان شرب، صنعت و کشاورزی، ارزیابی نتایج انجام شد. همان طور که در قبل بیان شد در این پژوهش به منظور تصویرسازی و تحلیل وضعیت تراژدی منبع مشترک هاردین از چهارچوب مفهوم ظرفیت‌برد استفاده شده است. در ابتدا طبق چهارچوب PSS شکل (۷) شاخص فشار، پشتیبانی و وضعیت سلامت حوضه را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است شاخص فشار روند صعودی داشته و شاخص پشتیبانی اکثراً کاهشی ولی روند ثابتی نداشته و بسته به وضعیت بارش و شرایط ذخیره سد تغییر کرده است. اما وضعیت سلامت یعنی کاهش جریان به تالاب و افت آبخوان‌ها، روند نزولی داشته و در برخی از سال‌ها به شدت تحت تأثیر قرار گرفته است؛ مثلاً سال ۲۰۰۹ سال خشکی بوده و جبران آن از طریق فشار بر منابع آب زیرزمینی جبران شده است.

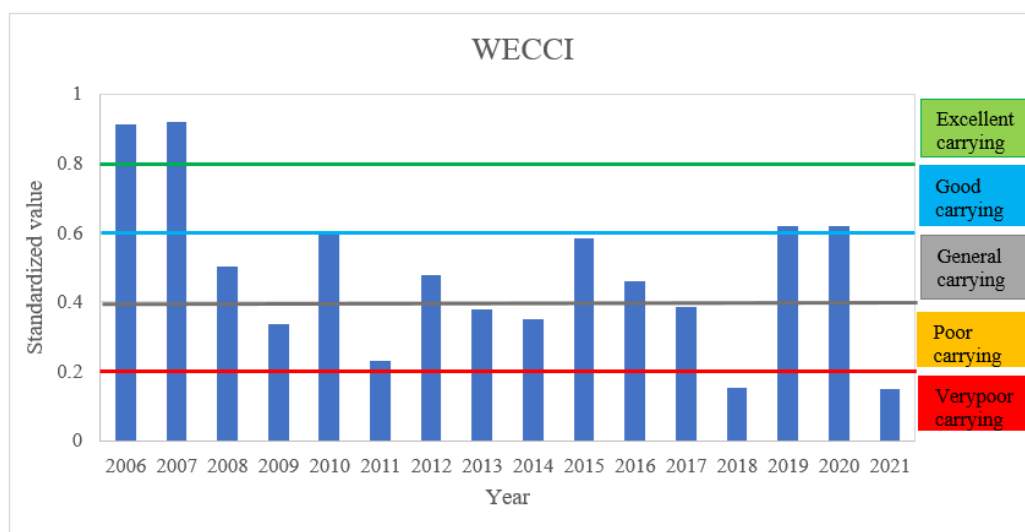
شکل (۸ - الف) حالت‌های اتصال فشار - پشتیبانی را سال به سال نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این هست که در این دوره هیچ سالی در حال A قرار نگرفته است یعنی سیستم هیچ گاه در وضعیت پیشرفت و توسعه نبوده است. سیستم بیشتر در حالت D و C است یعنی توانایی پشتیبانی گاهی زیاد و گاهی کم بوده است و برخی از سال‌ها در حالت B قرار گرفته که به معنی بیش‌بارگذاری در سیستم است. از آنجایی که از نتایج سال به سال به دلیل اختلافات زیاد نمی‌توان یک نتیجه واحد گرفت از این رو به صورت متوسط دوره ای نیز نتایج بررسی شد. دوره مطالعاتی به ۲۰۱۰-۲۰۰۶، ۲۰۱۵-۲۰۱۱ و ۲۰۲۱-۲۰۱۶ تقسیم شد. همچنین برای مشخص شدن بیشتر وضعیت فشار - پشتیبانی (PS) شکل (۸ - ب) نیز به صورت دوره ای بررسی شد:



شکل ۷ مقادیر سه مؤلفه اصلی فشار، پشتیبانی و وضعیت در سال‌های مورد مطالعه ۲۰۰۶-۲۰۲۱



شکل ۸ (الف) مقادیر شاخص فشار - پشتیبانی سالانه و میانگین دوره‌ای، (ب) میانگین تغییرات شاخص درجه فشار - پشتیبانی دوره‌ای



شکل ۹ تغییرات شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب در دوره ۲۰۰۶-۲۰۲۱

[16]، بیانگر ورود حوضه به وضعیت اضافه برداشت مزمن است که بدون کاهش فشار یا تقویت جدی منابع پشتیبان قابل ترمیم نیست.

این مسیر کلی از نظر مفهومی با تراژدی منابع مشترک هاردین سازگار است، که در آن تقاضاهای رقابتی متعدد بر روی یک منبع محدود، به تدریج ظرفیت اکولوژیکی آن را از بین می‌برد. در زمینه حوضه مورد مطالعه، فشارهای تجمعی - همراه با بازیابی محدود اکولوژیکی - نشان‌دهنده تغییر به سمت یک الگوی بهره‌برداری ناپایدار است و سامانه را به سوی ناپایداری و کاهش تاب‌آوری سوق می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با یک رویکرد ترکیبی نظری - کمی، به بررسی

در نهایت شاخص کلی ظرفیت برد منابع آب در شکل (۹) محاسبه و نشان داده شده است. اگر چه اکثر سال‌ها در محدوده General carrying یا مرز قابل تحمل قرار دارند (بالای خط طوسی رنگ) اما آسیب‌پذیری بسیار بالاست. بررسی ۱۶ ساله شاخص WECCI نشان می‌دهد که در سال‌های اولیه (۲۰۰۶-۲۰۰۷) در وضعیت ظرفیت برد مناسب قرار داشته، اما از ۲۰۰۸ به بعد با افت ناگهانی مواجه شده و در بخش عمده دوره در وضعیت ضعیف یا بسیار ضعیف ظرفیت برد باقی مانده است. دوره‌های کوتاه‌مدت بهبود (۲۰۱۰، ۲۰۱۵-۲۰۱۷ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰) پایدار نبوده‌اند و سیستم در سال‌های پایانی دوره (۲۰۱۸-۲۰۲۱) مجدداً وارد وضعیت بحرانی شده است. این رفتار نشان‌دهنده تضاد مداوم میان فشارهای انسانی و توان طبیعی اکوسیستم و مطابق تفسیر مقاله Yang و همکاران در سال ۲۰۱۵

تشدید کرده و بهره‌برداران را به سمت برداشت بیشتر سوق داده است. راه‌حل‌های دولت نیز عمدتاً ماهیت فنی داشته (سدسازی، انتقال آب، حفر چاه)، نه اصلاح حکمرانی، مشارکت اجتماعی، مدیریت تقاضا یا سازگاری با ظرفیت اکولوژیک. با این حال، نقدهای وارد به نظریه هاردین یعنی استروم بیان می‌کند که تراژدی سرنوشت محتوم حوضه‌های مشترک نیست؛ او تأکید می‌کند که نهادهای محلی، قواعد مشارکتی و حاکمیت چندسطحی می‌توانند از تخریب منابع مشترک جلوگیری کنند [28]. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده شاخص‌های بیشتر و تأثیرگذارتر جنبه‌های اقتصادی و سیاسی بیشتری به همراه تفکر استروم تحلیل شود.

واژه‌نامه

Tragedy of the commons	تراژدی منابع مشترک
	ظرفیت برد منابع آب
Water Resources Carrying Capacity (WRCC)	
Carrying Capacity	ظرفیت برد
	شاخص ظرفیت برد اکولوژیک آب
Water Ecological Carrying Capacity Index (WECCI)	
	سیستم برنامه‌ریزی و ارزیابی آب
Water Evaluation And Planning System (WEAP)	
Pressure-Support-State (PSS)	فشار - پشتیبانی - وضعیت
Health state index (HSI)	شاخص وضعیت سلامت حوضه
Overload	بیش‌بارگذاری
Analytic Hierarchy Process (AHP)	تحلیل سلسله‌مراتبی
Coefficient of Determination (R^2)	ضریب تبیین
	ضریب تأثیر ناش - ساتکلیف
(NSE) Nash-Sutcliffe Efficiency	
Root Mean Square Error (RMSE)	ریشه میانگین مربع خطا
	شاخص کارایی کلینگ و گوپتا
Kling-Gupta Efficiency (KGE)	

سپاسگزاری

وضعیت حوضه زاینده‌رود با نظریه تراژدی منابع مشترک در چهارچوب شاخص ظرفیت برد منابع آب یا همان شاخص ظرفیت برد اکولوژیک آب (WECCI) پرداخته شد. تلفیق روش شبیه‌سازی با مدل WEAP و روش ارزیابی مبتنی بر شاخص برای محاسبه شاخص WECCI به کار گرفته شد. نتایج به دست آمده شاخص فشار - پشتیبانی (PS) از مقدار ۰,۳ در دوره اول (۲۰۰۶-۲۰۱۰) به ۱,۱ در دوره دوم (۲۰۱۱-۲۰۱۵) و نهایتاً به ۳,۸ در دوره سوم (۲۰۱۶-۲۰۲۱) رسیده است و بیانگر گذار سیستم از حالت پایدار به قابل تحمل و اضافه‌بار یا overload است. در همین حال، شاخص ظرفیت برد اکولوژیک (WECCI) نیز که در آغاز دوره وضعیت مطلوبی را نشان می‌داد، در بیشتر سال‌ها به محدوده ضعیف و بسیار ضعیف نزول کرده و تنها در چند سال به صورت موقتی بهبود یافته است. این الگوی کمی، تصویری روشن از تشدید فشار انسانی، کاهش پشتیبانی طبیعی و افت وضعیت اکولوژیک حوضه ارائه می‌دهد. حالت‌های رخ داده به خصوص در دوره آخر وضعیت تراژدی را تفسیر می‌کند.

پدیده بازتخصیص خاموش نیز یکی از ویژگی‌های مهم مدیریت آب در زاینده‌رود است. بخشی از آب مورد نیاز حقابه‌داران به بهانه کمبود بارش، تغییر اقلیم یا نیازهای جدید صنعتی در بالادست جذب شده، در حالی که برداشت پنهانی و پمپاژ گسترده در پهنه بالادست فشار مضاعفی بر سیستم وارد کرده است. نتیجه آن شده که حق‌آبه‌داران برای جبران کمبود، به برداشت از چاه‌های غیرمجاز روی آورده‌اند؛ راه‌حلی که در کوتاه‌مدت رضایت‌بخش است، اما در بلندمدت به فرسایش شدید آبخوان‌ها و گسترش مناقشات منجر شده است. این همان چرخه‌ای است که در نظریه هاردین توصیف می‌شود: مجموعه‌ای از کنش‌های عقلانی فردی که پیامدهای جمعی فاجعه‌بار به همراه دارد.

ذکر این نکته ضروری است که مطابق با تئوری هاردین، نمی‌توان تنها کشاورزان را به عنوان مسبب اصلی تراژدی معرفی کرد. کشاورزی در این حوضه سابقه‌ای چند هزار ساله دارد و رفتار کشاورزان، همچون سایر کنشگران عقلانی، متأثر از سیاست‌های تشویقی دولت، توسعه‌گرایی، خودکفایی، مجوزدهی گسترده به چاه‌ها، و اولویت‌دهی به صنایع آب‌بر بوده است. در واقع، این ساختار حکمرانی و تصمیم‌گیری است که رقابت را

مراجع

- [1] S. Nikpey, B. Rahimibadr, N. Nozari, and S. Rezaei, "The effect of water scarcity on Iran's food security," *Brazilian Journal of Biology*, vol. 85, p. e291705, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.291705>
- [2] B. Attarzadeh, "Tragedy of the commons: An explanation of the theory and its lessons for us," *Iranian Journal of Public Policy*, vol. 8, no. 3, pp. 147–161, 2022. (In Persian) [Online]. Available: <https://doi.org/10.22059/jppolicy.2022.89548>
- [3] M. Goodarzi and M. Sabaghzadeh, "Prediction and analysis of the probability of climate change and water scarcity in Yazd," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 29–48, 2025. (In Persian) [Online].
- [4] R. Sohrabi, "The politics of drought in the Middle East: Case study from Iran," *Discover Environment*, vol. 3, no. 1, p. 122, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00334-3>
- [5] H. P. Qin, Q. Su, and S. T. Khu, "An integrated model for water management in a rapidly urbanizing catchment," *Environmental Modelling & Software*, vol. 26, pp. 1502–1514, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.003>
- [6] G. Hardin, "The tragedy of the commons," *Science*, vol. 162, no. 3859, pp. 1243–1248, 1968. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.162.3859.1243>
- [7] M. Moghadam Manesh and S. Pour-Masoumi Langarudi, "Tragedy of the commons in using groundwater resources in agriculture sector," *Journal of Strategic Management Studies*, vol. 11, no. 42, pp. 77–98, 2020. (In Persian) [Online]. Available: https://www.smsjournal.ir/article_111610.html
- [8] K. Madani, "Water management in Iran: What is causing the looming crisis?" *Journal of Environmental Studies and Sciences*, vol. 4, no. 4, pp. 315–328, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- [9] Y. Ahmadinejad, "The relationship between water scarcity and farmer migration in Isfahan, Iran," M.S. thesis, Univ. of Twente, Enschede, Netherlands, 2022. [Online].
- [10] S. Talebi Eskandari and S. J. Mirnezami, "Silent reallocations in Zayandehrud River Basin," *Iran-Water Resources Research*, vol. 16, no. 2, pp. 292–311, 2020. (In Persian) [Online]. Available: https://www.iwrr.ir/article_114200.html
- [11] H. R. Safavi, M. H. Golmohammadi, and S. Sandoval-Solis, "Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin," *Journal of Hydrology*, vol. 539, pp. 625–639, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.073>
- [12] S. Javadinejad, "Integrated water resources management in the Zayandeh Rud Basin: Scenario analysis using WEAP," Ph.D. dissertation, Univ. of Birmingham, Birmingham, UK, 2016. [Online]. Available: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/7103/5/Javadinejad16PhD.pdf>
- [13] E. Zehtabian, R. Masoudi, F. Yazdandoost, M. Sedghi-Asl, and H. A. Loáiciga, "Investigation of water allocation using integrated water resource management approaches in the Zayandehroud River basin, Iran," *Journal of Cleaner Production*, vol. 395, p. 136339, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136339>
- [14] J. Peng, Y. Du, Y. Liu, and X. Hu, "How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems," *Ecological Indicators*, vol. 60, pp.

- 1017–1030, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.008>
- [15] Z. Guiyou, L. Shuai, J. Zhuowei, W. Shuo, and M. Youhua, “Evaluation and forewarning management of regional resources and environment carrying capacity: A case study of Hefei City, Anhui Province, China,” *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1637, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su12041637>
- [16] J. F. Yang, K. Lei, S. T. Khu, F. Qiao, and Q. Liu, “Assessment of water ecological carrying capacity using an indicator-based method applied to Tieling City, China,” *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 15, no. 5, pp. 940–947, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2166/ws.2015.051>
- [17] M. H. Golmohammadi, “Scenario analysis for integrated water resources planning and management (IWRPM) in the Zayandehrud Basin under uncertainty using fuzzy performance criteria and sustainability index,” M.S. thesis, Isfahan Univ. of Technology, Isfahan, Iran, 2015. (In Persian) [Online].
- [18] Regional Water Company of Esfahan, *Baseline Water Resources Studies — Protection and Exploitation Deputy*, Isfahan, Iran, 2022. (In Persian) [Online]. Available: <https://www.esrw.ir/>
- [19] D. Yates, J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber-Lee, “WEAP21—a demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 1: Model characteristics,” *Water International*, vol. 30, no. 4, pp. 487–500, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/02508060508691893>
- [20] M. Azizi and A. Abbasi, “Developing a robust data-driven model based on ground and satellite measured data for agricultural drought prediction in Iran,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 1, pp. 1–28, 2025. (In Persian) [Online]. Available: https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_45941.html
- [21] H. M. Yaqoubi, B. Keshtegar, and H. A. Rahdar, “Model-based analysis for ultimate axial load of circular CFST columns using artificial neural network,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 33–48, 2019. (In Persian) [Online]. Available: https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_32433.html
- [22] H. Fattahi, F. Malekmahmoudi, and H. Ghaedi, “Predicting the most important geomechanical parameter of rock mass using the harmony search and teaching learning based optimization algorithms,” *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 1–18, 2022. (In Persian) [Online]. Available: https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_42483.html?lang=en
- [23] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez, “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling,” *Journal of Hydrology*, vol. 377, no. 1–2, pp. 80–91, 2009. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- [24] S. Talebi Eskandari, *Five decades of silent reallocation and transformations in the Zayandeh-Rud water exploitation system*, Kerman, Iran: Iran Water Management Think Tank, Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agriculture of Kerman Province, 2021. (In Persian) [Online]. Available: <http://iwpri.ir/home/single/634>
- [25] Zayand-Ab Consulting Engineers, *Water resources and water-use assessment in the Zayandeh Rood Basin, Isfahan, Iran*, Isfahan, Iran: Esfahan Regional Water Company, 2009. (In Persian) [Online].
- [26] D. Salehi, “Sustainable management of water resources allocation in the Zayandehrood river basin using WEAP model and conflict resolution models for different climatic conditions,” M.S. thesis, Yasouj Univ., Yasouj, Iran, 2017. (In Persian) [Online].

- [27] S. Enteshari Najafabadi, "Codifying a framework for water resources management in the Zayandehrud Basin with emphasis on social, economic, and environmental aspects," Ph.D. dissertation, Isfahan Univ. of Technology, Isfahan, Iran, 2020. (In Persian) [Online].
- [28] F. J. Taiwo and O. O. Feyisara, "Understanding the concept of carrying capacity and its relevance to urban and regional planning," *Journal of Environmental Studies*, vol. 3, no. 1, pp. 1–5, 2017. [Online]. Available: <https://www.avensonline.org/wp-content/uploads/JES-2471-4879-03-0017.pdf>
- [29] J. M. Baland and J. P. Platteau, *Halting Degradation of Natural Resources: Is There a Role for Rural Communities?* Rome, Italy: Food and Agriculture Organization (FAO), 1996. [Online].
- [30] T. Dietz, E. Ostrom, and P. C. Stern, "The struggle to govern the commons," *Science*, vol. 302, no. 5652, pp. 1907–1912, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1126/science.1091015>
- [31] E. Ostrom, *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1990.
- [32] Z. Zhang, W. X. Lu, Y. Zhao, and W. B. Song, "Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process," *Ecological Modelling*, vol. 275, pp. 9–21, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.031>
- [33] H. Mohammadi Sedaran, M. Delavar, and M. Shahbazbegian, "Assessment of water resources carrying capacity of the river basins using the simulation approach and index-based evaluation method; case study: Zarrineh-Roud Basin," *Iran-Water Resources Research*, vol. 17, no. 2, pp. 154–173, 2021. (In Persian) [Online]. Available: https://www.iwrr.ir/article_135136.html?lang=en
- [34] S. Sandoval-Solis, "Water planning and management for large scale river basins: Case study of the Rio Grande/Rio Bravo transboundary basin," Ph.D. dissertation, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX, USA, 2011. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2152/ETD-UT-2011-08-3772>
- [35] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *International Journal of Services Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 83–98, 2008. [Online]. Available: https://www.sid.ir/EN/VEWSSID/J_pdf/95520020309.pdf
- [36] Y. W. Du and Y. C. Wang, "Evaluation of marine ranching resources and environmental carrying capacity from the pressure-and-support perspective: A case study of Yantai," *Ecological Indicators*, vol. 126, p. 107688, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107688>
- [37] S. Mohajeri, L. Horlemann, S. Sklorz, M. Kaltofen, S. Ghanavizchian, and T. Nuñez von Voigt, "Integrated water resource management in Isfahan: The Zayandeh Rud catchment," in *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*, Cham, Switzerland: Springer, pp. 603–627, 2016. [Online]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-25071-7_23
- [38] P. Mamasani, "Analyzing water conflicts in shared water resources systems based on relative deprivation theory; case study: Zayandeh-rud River Basin," M.S. thesis, Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran, 2023. (In Persian) [Online].

