آینده‌پژوهی امنیت آبی در مدیریت آبیاری با روش آثار متقاطع متوازن (مطالعه موردی: حوضه آبریز کرخه)

محمد علی میری[1]، علی محمد آخوند علی[2*] و عادل دحیماوی[3]

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکده دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲*- نویسنده مسئول، استاد دانشکده دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز (aliakh@scu.ac.ir)
۳- دانش آموخته پسادکترا منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان

دریافت: بازنگری: پذیرش: انتشار:

چکیده

امنیت آبی به‌عنوان یکی از ارکان امنیت انسانی و توسعه پایدار، در حوضه‌های آبریز، معمولاً با چالش‌های فزاینده‌ای روبه‌رو است. این پژوهش با هدف تبیین آینده‌های ممکن امنیت آبی در مدیریت آبیاری حوضه آبریز کرخه، از روش سناریونویسی مبتنی بر تحلیل آثار متقاطع متوازن (CIB) بهره گرفته است. ابتدا براساس نظر خبرگان، ۷۶ پیشران شناسایی شد. نهایت ۱٤پیشران کلیدی امنیت آبی در بخش کشاورزی انتخاب و مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج تحلیل نشان داد پیشران‌های تغییرات اقلیمی، الگوی بهره‌برداری از منابع آب، توسعه فناوری‌های بازچرخانی و کشاورزی دانش‌بنیان، بیشترین نقش را در تعیین آینده امنیت آبی دارند. در مرحله بعد، برای پیشران‌های مزبور، ۳۸ وضعیت احتمالی تعریف و ماتریس اثرات متقاطع تهیه شد. تحلیل نرم‌افزار Scenario Wizardسه سناریوی سازگار و معتبر را برای آینده امنیت آبی حوضه کرخه استخراج کرد: سناریو اول) شاهراه تاب‌آوری و شکوفایی آبی که مبتنی بر حکمرانی محلی قوی، بازتخصیص عادلانه، کنترل آلایندگی و توسعه فناوری‌های نوین است؛ سناریو دوم) گرداب ناپایداری و تنش‌های فزاینده که حاصل تداوم مدیریت جزیره‌ای، محدودیت در مشارکت محلی و تشدید خشکسالی است؛ و سناریو سوم) برهوت بی‌بازگشت آبی که در آن بهره‌برداری بی‌رویه، افزایش آلودگی، ضعف حکمرانی و تشدید تغییرات اقلیمی به بحران عمیق منجر می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که آینده امنیت آبی حوضه کرخه تابعی از کنش متقابل عوامل اقلیمی، نهادی، فناورانه و اجتماعی است و اتخاذ رویکردهای مشارکتی، فناورانه و یکپارچه می‌تواند مسیر حوضه را به سوی تاب‌آوری و پایداری سوق دهد.

کلیدواژگان: مدیریت آبیاری؛ حوضه آبریز کرخه؛ آینده‌پژوهی؛ سناریونویسی؛ پیشران‌های کلیدی

مقدمه

امنیت آبی به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین مؤلفه‌های امنیت انسانی و زیربنای توسعه پایدار، طی دو دهه اخیر جایگاهی کانونی در ادبیات علوم محیطی، سیاست‌گذاری عمومی و حکمرانی منابع طبیعی یافته است (Mishra et al., 2021). این مفهوم، برخلاف برداشت‌های سنتی که آن را مترادف با دسترسی فیزیکی به آب می‌دانستند، اکنون درک گسترده‌تری شامل ابعاد کیفیت، تاب‌آوری، بهره‌وری اقتصادی، پایداری اکولوژیک و توانایی نظام حکمرانی برای مدیریت تعارضات و بحران‌ها را در برمی‌گیرد (Mehrab Ghoochani & Ghanian, 2025). از منظر امنیت انسانی، امنیت آبی به معنای آن است که انسان و جوامع در معرض تهدیداتی نظیر کمبود آب، آلودگی، فرو افت کیفیت منابع، ناپایداری عرضه، خشکسالی و بی‌ثباتی اکولوژیک قرار نگیرند و نظام اجتماعی بتواند در برابر این تهدیدها از خود دفاع، بازیابی و سازگاری نشان دهد. بنابراین امنیت آبی نه صرفاً یک مسئله فنی یا مهندسی، بلکه مسئله‌ای ساختاری، اقتصادی، اجتماعی و سیاسی است که با بنیان‌های حکمرانی ارتباط مستقیم دارد (Bogardi et al., 2016).

در ایران، که اقلیم خشک و نیمه‌خشک آن آسیب‌پذیری طبیعی در برابر بحران آب ایجاد کرده است، امنیت آبی طی دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های تصمیم‌گیران و محققان تبدیل شده است (Dahimavi et al., 2024). روندهای تاریخی مدیریت منابع آب کشور نشان می‌دهد که تمرکز نسبتاً بیشتر بر توسعه سازه‌های بزرگ آبی، اتکای بیش از حد به ظرفیت‌های مهندسی و غلبه نگاه متمرکز، نتوانسته‌اند پاسخگوی پیچیدگی‌های روزافزون و چالش‌های چندبعدی این حوزه باشند (Poorasghar sanghachin, 2001). بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، تخصیص‌های غیرکارا، عدم تعادل بین تولید و مصرف، غفلت از مدیریت تقاضا و بی‌توجهی به مشارکت بهره‌برداران و ذینفعان از جمله عوامل کلیدی هستند که وضعیت کنونی را رقم زده‌اند (Ghoochani, et al., 2023). در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور از جمله حوضه‌های کارون،

زهره ـ جراحی، دریاچه ارومیه و کرخه، نشانه‌های بحران شامل افت تراز آب، کاهش جریان‌های رودخانه‌ای، نشست زمین، تخریب اکوسیستم‌های آبی و گسترش کانون‌های گردوغبار به‌صورت فزاینده بروز کرده‌اند. چنین روندهایی گواه آن است که بحران آب در ایران، بیش از آنکه یک مسئله صرفاً طبیعی باشد، مسئله‌ای حکمرانی‌محور و ناشی از نارسایی ساختاری است (Mehrab & Ghoochani & Ghanian, 2025).

تحولات جهانی نیز این ضرورت را تأیید می‌کنند که مدیریت آب وارد دوره‌ای جدید شده است. در ادبیات جهانی، تغییر پارادایمی از «مدیریت فنی ـ متمرکز» به «حکمرانی مشارکتی ـ انعطاف‌پذیر» مشاهده می‌شود. در قرن بیستم، دولت‌ها نقش اصلی در طراحی، کنترل و اجرای طرح‌های آبی را بر عهده داشتند؛ اما در قرن بیست‌ویکم، تعامل چندسطحی، مشارکت جوامع محلی، حضور بخش خصوصی، همکاری بین‌بخشی و استفاده از روش‌های نوین تحلیل آینده جایگزین مدل‌های تک‌مرجع شده‌اند. مدیریت آب به‌عنوان یک سیستم اجتماعی ـ اکولوژیک، وابسته به کنش متقابل بازیگران متعدد و نیروهای بیرونی است و همین امر سبب شده است که شیوه‌های خطی و مبتنی بر پیش‌بینی قطعی کارایی خود را از دست بدهند (Gain et al., 2021).

در این میان، مفهوم امنیت آبی در حوضه‌های آبی ایران از جمله حوضه آبریز کرخه، پیچیدگی و اهمیت بیشتری یافته است. حوضه کرخه یکی از بزرگ‌ترین و حساس‌ترین حوضه‌های کشور است که چندین استان و صدها سکونتگاه انسانی را در بر می‌گیرد و نقش مهمی در کشاورزی، دامداری، معیشت روستایی، صنایع استان، محیط‌زیست و حتی پایداری اجتماعی منطقه دارد. این حوضه همچنین دارای اکوسیستم‌های آبی ارزشمند، اراضی وسیع کشاورزی و شبکه‌های آبیاری گسترده است. از طرفی، خشکسالی‌های پی‌درپی، تغییرات اقلیم، نوسانات بارش، افزایش تبخیر و توسعه ناهماهنگ زیرساخت‌ها منجر به کاهش تاب‌آوری طبیعی حوضه شده‌اند. فشارهای ناشی از توسعه کشاورزی آبی، برداشت‌های بالادستی، تعارض‌های بین‌بخشی میان محیط‌زیست، کشاورزی و صنعت، و شکل‌گیری کانون‌های گردوغبار از دیگر عواملی هستند که امنیت آبی حوضه کرخه را متزلزل کرده‌اند (Ralston & Wilson, 2006).

افزون بر آن، وابستگی شدید اقتصاد منطقه به کشاورزی آبی موجب شده است که هرگونه تغییر در رژیم آبی حوضه، مستقیماً بر امنیت غذایی، اشتغال، مهاجرت، عدالت اجتماعی و کیفیت زندگی اثر بگذارد. ناپایداری منابع آب در این حوضه تنها یک مسئله محیط‌زیستی نیست، بلکه پیامدهای ژئوپلیتیکی و اجتماعی ـ اقتصادی گسترده‌ای داشته و می‌تواند بر پویایی‌های جمعیتی، معیشتی و حتی امنیت اجتماعی تأثیرگذار باشد. در چنین شرایطی، ضرورت تقویت امنیت آبی نه‌تنها از منظر مدیریت منابع، بلکه از منظر حکمرانی و آینده‌نگری کاملاً محسوس است.

یکی دیگر از ابعاد پیچیدگی امنیت آبی، نقش عدم‌قطعیت‌ها است (Bakker & Morinville, 2013). لذا برنامه‌ریزی خطی و مبتنی بر پیش‌بینی ثابت در چنین شرایطی نه‌تنها ناکارآمد بلکه گمراه‌کننده است. بنابراین، نیاز به رویکردی که بتواند با عدم‌قطعیت‌ها مواجه شود و دامنه‌ای از آینده‌های ممکن و محتمل را پیش‌روی تصمیم‌گیرندگان قرار دهد، امری حیاتی به شمار می‌رود. در ادبیات جهانی مدیریت منابع آب، «آینده‌پژوهی و سناریونویسی» به‌عنوان ابزارهای مؤثر برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها معرفی شده‌اند. سناریوها با ترسیم مجموعه‌ای از آینده‌های بدیل، تلاش می‌کنند زنجیره رویدادهای احتمالی را نشان داده و امکان تفکر راهبردی، تصمیم‌سازی انعطاف‌پذیر و طراحی سیاست‌هایی که در برابر تغییرات مقاوم باشند را فراهم کنند (Miles & Keenan, 2002). سناریو آینده را پیش‌بینی نمی‌کند، بلکه آن را «می‌کاود»؛ به عبارت دیگر، سناریوها چشم‌اندازهای بدیل را آشکار و مسیرهای ممکن را ترسیم می‌کنند تا مدیران و تصمیم‌گیرندگان در برابر شرایط پیش‌رو غافلگیر نشوند. یکی از معتبرترین روش‌های سناریو نویسی، «تحلیل آثار متقاطع متوازن (CIB: Corss Impact Balance)» است که بر مبنای قضاوت خبرگان، تحلیل شبکه‌ای عوامل و استنتاج ترکیبات سازگار آینده عمل می‌کند (Weimer-Jehle, 2006). این روش به‌دلیل قابلیت آن در تحلیل سیستم‌های پیچیده اجتماعی ـ اکولوژیک، در مدیریت منابع آب کاربرد فراوان یافته است.

بنابراین، با توجه به مجموعه چالش‌ها، عدم‌قطعیت‌ها و فشارهای موجود در حوضه آبریز کرخه، نیاز به تحلیل آینده و تدوین سناریوهای سازگار برای امنیت آبی و مدیریت آبیاری آن کاملاً محسوس است. پژوهش حاضر در پاسخ به این ضرورت، تلاش می‌کند با بهره‌گیری از رویکرد آینده‌پژوهی و روش سناریونویسی مبتنی بر CIB، آینده مدیریت آبیاری حوضه کرخه را واکاوی کند. هدف اصلی این پژوهش، ایجاد بستری برای تصمیم‌سازی راهبردی، افزایش تاب‌آوری حوضه، ارتقای امنیت آبی و فراهم کردن چشم‌اندازهای قابل اتکا برای مدیران و سیاست‌گذاران است. این مطالعه می‌کوشد از طریق شناسایی عدم‌قطعیت‌های کلیدی، تحلیل کنش‌های متقابل عوامل و تدوین سناریوهای معتبر و سازگار، تصویری روشن، چندبعدی و کاربردی از آینده امنیت آبی در حوضه کرخه ارائه کند؛ تصویری که بتواند در سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و مدیریت یکپارچه منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، «مدیریت آبیاری» نه به معنای مدیریت فنی شبکه‌های انتقال آب، بلکه در قالب حکمرانی تخصیص آب کشاورزی در مقیاس حوضه آبریز در نظر گرفته شده است. تمرکز مطالعه بر مدیریت تقاضا، بازتخصیص بین‌بخشی، ارتقای بهره‌وری مصرف آب در مزرعه، سازوکارهای مشارکتی، و سیاست‌های نهادی مؤثر بر مصرف آب کشاورزی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از حیث ماهیت، از رویکرد آمیخته (کیفی ـ کمی) بهره می‌گیرد. در این مطالعه برای تحلیل سناریو از الگوریتم «تحلیل متوازن تأثیر متقابل» استفاده شده است. الگوریتم CIB گونه‌ای پیشرفته از تحلیل تأثیر متقابل است که از خصائصی چون سهولت فهم، شفافیت و انعطاف‌پذیری بالا در کاربرد و ارزیابی برخوردار است (Mehrab Ghoochani et al., 2020). مقصد اصلی تحلیل CIB ، تولید مجموعه‌هایی فرضی و از درون هم‌ساز (internally consistent) از حالات ممکن در چارچوب تحلیل سناریو است؛ از این رو لازم است چینش‌های باور پذیر شبکه عوامل مؤثر، همراه با مفروضات حمایتی دوسویه میان آن‌ها، مشخص و تعیین گردد. در چارچوب این پژوهش، عوامل کلیدی و پیشران‌های مؤثر بر امنیت آبی در بخش کشاورزی مبتنی بر مرور منابع معتبر و با اتکاء بر روش مرور سیستماتیک استخراج شده‌اند. در این پژوهش، واژه‌ی پیشران (Driver) به عواملی اشاره دارد که موجب تغییر در وضعیت یا رفتار سیستم‌های مرتبط با امنیت آبی می‌شوند؛ مانند تغییرات اقلیمی، سیاست‌های مدیریت منابع آب، یا الگوهای مصرف در بخش کشاورزی. این تعریف مطابق با رویکرد IPBES (2019) و OECD (2017) در مطالعه‌های تحلیل پیشران‌هاست. مرور سیستماتیک ابزاری توانمند برای گردآوری و تحلیل جامع مطالعه‌های مرتبط به‌منظور پاسخ‌گویی منظم و قابل اتکا به پرسش‌های پژوهش است (Rabie & Curtis, 2006). در این مطالعه، مرور سیستماتیک بر پژوهش‌های کاربردی در حوزه مدیریت منابع آب کشاورزی اعمال شد؛ چرا که مطالعه‌های پراکنده تنها بخشی از یک تصویر کلان را آشکار می‌سازند، در حالی که ارزش مرور سیستماتیک در تلفیق شواهد گسسته و ایجاد هم‌افزایی میان نتایج در قالبی سازمان‌یافته نهفته است (Paz García-Vera et al., 2016). به‌منظور افزایش شفافیت روش‌شناختی، فرآیند مرور سیستماتیک بر اساس یک رویه چندمرحله‌ای ساختارمند و با الهام از منطق PRISMA انجام شد. جست‌وجوی منابع علمی در پایگاه‌هایGoogle Scholar، SID و Magiran در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ صورت گرفت. ترکیبی از کلیدواژه‌هایی نظیر «امنیت آبی»، «مدیریت آبیاری»، «حکمرانی آب کشاورزی»، «تاب‌آوری آب» و «مدیریت حوضه آبریز» مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام غربالگری اولیه، مقالات واجد شرایط به‌منظور افزایش دقت بررسی‌های بعدی مورد ارزیابی قرار گرفتند و در نهایت از تحلیل عمیق آن‌ها، مهم‌ترین و پرتکرارترین پیشران‌های گزارش‌شده در مطالعه‌های پیشین استخراج گردیدند. جست‌وجوی اولیه منجر به شناسایی ۲۱۴ منبع شد. پس از حذف موارد تکراری (۳۶ مورد)، تعداد ۱۷۸ مطالعه بر اساس عنوان و چکیده غربالگری شدند. در این مرحله، مطالعه‌های نامرتبط با مدیریت آب کشاورزی، فاقد شفافیت روش‌شناختی یا صرفاً مبتنی بر مدل‌سازی هیدرولیکی حذف شدند (۱۰۹ مورد). در نهایت ۶۹ مقاله به‌صورت متن کامل بررسی شد که از میان آن‌ها ۵۲ مطالعه واجد معیارهای ورود تشخیص داده شدند. این مطالعه‌های مبنای استخراج فهرست اولیه ۷۶ پیشران قرار گرفتند.

در روش تحلیل متوازن تأثیر متقابل، پنلی از متخصصان موضوعی با طیف گسترده‌ای از دانش مرتبط تشکیل شد. معیار اصلی عضویت در این پنل، داشتن حداقل پنج سال سابقه اجرایی در حوزه مدیریت منابع آب یا برخورداری از سابقه پژوهشی مستمر حداقل پنج‌ساله در زمینه مدیریت آب بود. برای انتخاب اعضا، از روش نمونه‌گیری هدفمند و شناسایی افراد برجسته و شناخته‌شده در حوزه مورد نظر استفاده شد. در مجموع ۳۴ نفر از متخصصان در مرحله ارزیابی آثار متقاطع مشارکت داشتند. انتخاب خبرگان بر اساس نمونه‌گیری هدفمند و معیار برخورداری از حداقل پنج سال سابقه اجرایی یا پژوهشی در حوزه مدیریت منابع آب انجام شد. برای تجمیع قضاوت‌ها، از میانگین‌گیری امتیازات استفاده شد. موارد دارای اختلاف شدید در امتیازدهی در یک مرحله بازخورد تکمیلی مورد بررسی مجدد قرار گرفت تا همگرایی نظرات افزایش یافته و از تأثیر داده‌های پرت کاسته شود. مشخصات اعضای پنل در جدول (۱) ارائه شده است. در این مطالعه، نظرات متخصصان از همان مراحل ابتدایی پژوهش تا تدوین نهایی سناریو مورد استفاده قرار گرفت؛ به‌گونه‌ای که پیشران‌ها بر اساس دیدگاه آنان بازنگری شدند و طراحی حالت‌های مختلف هر متغیر نیز با مشارکت فعال آنان انجام گرفت. در گام بعدی، متخصصان درباره وابستگی میان سطوح مختلف عوامل پیشران در شرایط وقوع سطوح سایر عوامل، قضاوت‌های متقابل ارائه کردند. برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای MICMAC و Scenario Wizard بهره گرفته شد. نرم‌افزار MICMAC به‌طور خاص برای انجام محاسبات پیچیده ماتریس اثرات متقابل و تسهیل فرایند تحلیل ساختاری سیستم طراحی گردیده است. در این نرم‌افزار، ابتدا متغیرها و مؤلفه‌های حوزه مورد نظر شناسایی و در ماتریس تحلیل اثرات گنجانده می‌شوند و شدت ارتباط میان آن‌ها توسط پنل متخصصان تعیین می‌گردد؛ بدین صورت که متغیرهای سطر بر متغیرهای ستون اثر می‌گذارند. مجموع مقادیر سطرها نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری و مجموع مقادیر ستون‌ها بیانگر میزان تأثیرپذیری است. این ارتباط با مقادیر صفر تا سه سنجیده می‌شود: صفر به معنای «بدون تأثیر»، یک «تأثیر ضعیف»، دو «تأثیر متوسط» و سه «تأثیر زیاد» است؛ در نتیجه برای متغیر x، یک ماتریس X×X تشکیل می‌شود. خروجی این مدل، روابط ساختاری میان متغیرها را به نمایش می‌گذارد و نرم‌افزار MICMAC با قابلیت تبدیل این روابط به نمودارهای ویژه، تحلیل ساختار سیستم را به شکلی مؤثر تسهیل می‌کند. به‌طور کلی، خروجی‌های نرم‌افزار شامل ماتریس و نمودارهای آثار مستقیم و نیز ماتریس و نمودارهای آثار غیرمستقیم متغیرهاست. افزون بر این، در صورتی که در ماتریس اولیه، روابط بالقوه نیز تعیین شده باشد، نرم‌افزار ماتریس بالقوه مستقیم و غیرمستقیم را نیز ارائه می‌دهد. بر این

اساس، متغیری که بر تعداد محدودی از متغیرها اثر مستقیم دارد، در کل سیستم تأثیرگذاری اندکی خواهد داشت. نهایتاً، کلیه متغیرها و محیط پیرامونی آن‌ها را می‌توان در قالب نمودار مفهومی یا محور مختصات (تأثیرگذاری ـ تأثیرپذیری) نمایش داد.

نرم‌افزار Scenario Wizard نیز بر پایه روش تحلیل متوازن اثرات متقابل به بررسی سیستم‌های مورد مطالعه می‌پردازد. این نرم‌افزار علاوه بر نمایش ماتریس اثرگذاری و اثرپذیری و شبکه روابط مستقیم و غیرمستقیم عوامل ـ که ویژگی‌هایی مشترک با MICMAC است ـ سناریوهایی با بالاترین هم‌افزایی و همبستگی را نیز شناسایی می‌کند. بر همین اساس، پس از گردآوری عوامل پیشران، ماتریس آثار متقابل تشکیل شد. ساختار این ماتریس به گونه‌ای است که هر یک از پیشران‌ها و سطوح آن‌ها در سطر و ستون قرار می‌گیرند. سپس همه سطوح بر اساس طیف هفت‌قسمتی کیفی (از اثر محدودکننده قوی تا اثر تسریع‌کننده قوی) توسط متخصصان ارزیابی شدند. با امتیازدهی به حالت‌های مختلف هر عامل، ترکیب‌های گوناگون بررسی و سناریوهای برتر معرفی می‌شوند. از دیگر ویژگی‌های سناریوویزارد نسبت به میک‌مک، امکان تنظیم سطح پذیرش ناهمخوانی میان عناصر است که به حذف سناریوهای دارای اجزای ناهمگون ـ حتی با وجود هم‌افزایی بالا میان سایر اجزا ـ کمک می‌کند. نرم‌افزار سناریو ویزارد، هیچ تاکیدی بر اینکه سناریوها از طیف‌های گوناگون انتخاب شوند، ندارد و فقط بر اساس روابط منفی تأثیرگذار و مثبت تأثیرگذار سناریو را طراحی می‌کند. بنابراین، سناریوهای انتخاب شده می‌توانند کاملاً مطلوب یا کاملاً بحرانی باشند. بر این اساس منطقی است که از میان تعداد زیاد سناریوهای معرفی شده، آن سناریوهایی به عنوان مبنای برنامه‌ریزی و سیاستگزاری قرار بگیرند که دارای سازگاری بالا و همچنین امتیاز بالایی باشند.

یافته‌ها

پیش‌ران‌های امنیت آبی در بخش کشاورزی

از طریق تفحص در منابع معتبر و پژوهش‌های انجام گرفته شده تعداد ۷۶ پیشران مدیریت آب در بخش کشاورزی شناسایی شدند که این کلان‌پیشران‌ها در دو مرحله در اختیار خبرگان و متخصصان مدیریت آب بخش کشاورزی قرار گرفت و تلخیص شدند. در نهایت تعداد ۱۴ عامل به عنوان پیش‌ران‌های امنیت آبی در بخش کشاورزی کشور مورد تأیید تمامی متخصصان قرار گرفت (جدول ۲). در نهایت این ۱۴ پیشران کلیدی امنیت آبی در کشاورزی که حاصل دو مرحله بررسی پیشران‌های استخراج شده از طریق مرور منابع به وسیله‌ی خبرگان و متخصصان می‌باشد، در ماتریسی با پهنای ۱۴×۱۴ تنظیم شد.

جدول ۱- مشخصات اعضای پنل متخصصان

Table 1- Profile of the expert panel members

		(Frequency /People)
Field of expertise	Agricultural Extension and Education	2
	Rural Development	2
	Water Resources Management	8
	Agricultural Economics	6
	Climate and Meteorology	6
	Hydraulic Structures	10
Ministry/ Organization	Agricultural Jihad	4
	Science, Research and Technology	6
	Environmental Protection Organization	5
	Water and Power organization	15
	Forests, Rangelands and Watershed Management Organization	4
Gender	Male	27
	Female	7
Education	M.Sc.	13
	Phd.	21
Average work experience		10/15(year)

جدول ۲-فهرست پیشران‌های امنیت آبی در بخش کشاورزی

Table 2- List of driving forces of water security in the agricultural sector

Driving force	Label	Driving force	Label	Driving force	Label
Infrastructure capacity for volumetric delivery & optimized agricultural water distribution	J	Empowerment and participation of local communities and NGOs	F	Upstream surface and groundwater exploitation status	A
Oil field development and impacts on water resources	K	Watershed water reallocation management	G	Climate change and drought conditions	B
Incentive and punitive policies for optimal water management	L	Strengthening of local water governance & integrated water management	H	Development of water recycling and recovery systems	C
Review and optimization of watershed cropping pattern	M	Pollution control (chemical, human, oil-related, etc.)	I	Optimal allocation of environmental water (wetlands & ecosystems)	D
Officials' perspective on social hydrology & support for community-based management	N			Agricultural improvement via knowledge-based cultivation patterns	E

پس از قضاوت متقابل متخصصان، ماتریس با استفاده از نرم‌افزار MicMac مورد تجزیه و تحلیل قرار گفت. درجه پرشدگی ماتریس ۵۷/۶ بود، که نشان از آن دارد، پیش‌ران‌های انتخاب شده در بیش از ۵۵ درصد از موارد بر یکدیگر تأثیرگذاشته‌اند (جدول ۳). از مجموعه ۱۹۶ رابطه ماتریسی قابل ارزیابی، هشت رابطه، معادل ۴/۰۸ درصد پیش‌ران‌ها از هم تأثیر پذیرفته‌اند و یا بر روی هم تأثیر گذاشته‌اند. ۳۸ رابطه معادل ۱۹/۳۸ درصد دارای اثرات متقاطع دو بود، یعنی نقش تقویت‌کننده داشته‌اند. ۶۷ رابطه معادل ۳۴/۱۸ درصد دارای اثرات متقاطع یک بوده، یعنی بر روی دیگر شاخص‌ها تأثیر بیشتری گذاشته‌اند. ۸۳ رابطه معادل ۴۲/۳۴ درصد از اثرات متقاطع نه از هم تأثیر پذیرفته‌اند و نه بر روی هم تأثیر گذاشته‌اند. به بیان دیگر، درجه پرشدگی ۵۷.۶ درصد نشان‌دهنده تراکم نسبتاً بالای تعاملات میان پیشران‌هاست که بیانگر ساختار سیستمی پیچیده است. سهم پایین روابط با شدت سه نشان می‌دهد که وابستگی‌های بسیار قوی محدود بوده و سیستم بیشتر متکی بر تعاملات متوسط و ضعیف اما گسترده است؛ ویژگی‌ای که معمولاً در سیستم‌های اجتماعی ـ اکولوژیک مشاهده می‌شود.

ماتریس نهایی برگرفته از پژوهش در برگیرنده پنج ناحیه مهم و اساسی می‌باشد که مشتمل بر موارد زیر هستند.

ناحیه اول: پیشران‌های ریسک و شرط یا شگفت‌انگیز: این پیشران‌ها مهم‌ترین و تأثیرگذارترین شاخص‌ها در زمینه امنیت آبی در بخش کشاورزی حوضه آبریز مورد مطالعه هستند و آینده آبیاری کشاورزی به این پیشران‌ها بستگی دارد. این پیشران‌ها هم نقش تأثیرگذار و هم نقش تأثیرپذیری در امنیت آبی حوضه آبریز مورد مطالعه دارند و عبارتند از: وضعیت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی در بالادست؛ تغییرات اقلیمی و خشکسالی؛ توسعه سیستم‌های بازچرخانی و بازیابی آب؛ و بهبود کشاورزی و الگوی کشت با بهره‌گیری از کشاورزی دانش‌بنیان.

ناحیه دوم: پیشران‌های تنظیم کننده یا حد واسط: این پیشران‌ها نقش تأثیرگذاری در روابط بین پیشران‌ها ایجاد می‌کنند و در آینده امنیت آبی در بخش کشاورزی حوضه آبریز مورد مطالعه نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این پیشران‌ها عبارتند از: توانمندسازی و مشارکت جامعه محلی و سازمان‌های مردم‌نهاد؛ مدیریت بازتخصیص منابع آبی حوضه؛ و توسعه و تحکیم حکمرانی محلی و مدیریت یکپارچه منابع آب.

ناحیه سوم: پیشران‌های نتیجه یا خروجی: این پیشران‌ها بیشتر تأثیرپذیر و کمتر تأثیرگذار هستند و به نوعی از روابط بین دیگر پیشران‌ها تأثیر می‌پذیرند. در حوضه آبریز مورد مطالعه توسعه و کنترل آلایندگی‌ها (شیمیایی، انسانی، نفتی و ...) در این ناحیه قرار گرفته است.

ناحیه چهارم: پیشران‌های هدایت‌کننده یا کم تأثیر: این پیشران‌ها به نوعی فاقد نقش کلیدی در امنیت آبی حوضه آبریز مورد مطالعه هستند اما نبایستی به‌طور کامل آن‌ها را فراموش کرد. این پیشران‌ها عبارتند از: توسعه ظرفیت زیرساختی تحویل حجمی و توزیع بهینه آب کشاورزی؛ رویکرد توسعه میادین نفتی و اثرات بر منابع آب؛ سیاست‌های انگیزشی و تنبیهی مدیریت بهینه منابع آب؛ بازنگری و بهینه‌سازی الگوی کشت حوضه؛ تخصیص بهینه منابع آب محیط‌زیست (تالاب‌ها و اکوسیستم‌ها)؛ و نگرش مسئولان نسبت به هیدرولوژی اجتماعی و پشتیبانی از مدیریت جامعه‌محور.

ناحیه پنجم: پیشران‌های تنظیم‌کننده یا ورودی: این پیشران‌ها در تنظیم روابط میان سایر پیشران‌ها در جهت امنیت آبی حوضه آبریز مورد مطالعه را بر عهده دارند. در واقع این

متغیرها می‌توانند با حفظ تعادل فضایی بین دیگر شاخص‌ها، کمک زیادی به بهبود سیستم امنیت آبی حوضه آبریز مورد مطالعه نمایند. همان‌طور که ماتریس سنجش ارتباط مستقیم میان پیشران‌ها در شکل (۱) نشان می‌دهد، هیچ‌یک از پیشران‌ها در این بخش قرار نگرفته است، اما پیشران توسعه و تحکیم حکمرانی محلی و مدیریت یکپارچه منابع آب به عنوان پیشران ورودی یا تنظیم‌کننده‌ی غیر مستقیم وارد ماتریس شده است (شکل۲).

لازم به توضیح است که طبقه‌بندی MICMAC بیانگر جایگاه ساختاری متغیرها در شبکه کلی سیستم است و لزوماً به معنای تعیین‌کنندگی مستقیم آن‌ها در هر سناریو نیست. در فرآیند CIB، سازگاری ترکیبی حالات متغیرها بررسی می‌شود و ممکن است برخی پیشران‌های کم‌تأثیر ساختاری، در تعامل با سایر متغیرها در یک سناریوی خاص نقش تقویت‌شده و تعیین‌کننده پیدا کنند. بنابراین تفاوت مشاهده‌شده ناشی از تفاوت منطق دو روش است و نشان‌دهنده پویایی سیستم است.

وضعیت احتمالی عوامل اصلی

نظر متخصصان در جدول (۴) آورده شده است. در نهایت، با بررسی نتایج، برای ۱۴ عامل اصلی، ۳۸ وضعیت احتمالی مشخص شد.

شناسایی سناریوهای مطلوب با روش CIB

همانند مرحله‌ی قبل (تعیین عوامل اصلی)، به صورت پرسشنامه مفصل در اختیار متخصصان قرار گرفت. با طرح این پرسش که اگر هریک از وضعیت‌های ۳۸ گانه در حوزه مدیریت آب کشاورزی کشور اتفاق بیفتد، چه تأثیری بر وقوع یا عدم وقوع سایر وضعیت‌ها خواهد داشت، پرسشنامه بر اساس ویژگی توانمندسازی، بی‌تأثیر و محدودیت‌سازی و با درج ارقام ۳ تا ۳- میزان تأثیرگذاری هریک از وضعیت‌ها را بر اساس قواعد کدگذاری شده در روش CIB، تکمیل شد.

وضعیت هر یک از عوامل به تفکیک هر سناریو در جدول (۵) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سه سناریو با احتمال وقوع بسیار بالا در شرایط پیش‌روی امنیت آبی حوضه آبریز مورد مطالعه کشور وجود دارد.

لازم به توضیح است که امتیاز سناریوها حاصل شاخص سازگاری درونی تولیدشده توسط الگوریتم CIB است. این امتیاز نشان‌دهنده میزان تقویت متقابل فرض‌ها در درون هر سناریو بوده و بیانگر مطلوبیت هنجاری آن نیست. سناریوی سوم علی‌رغم ماهیت بحرانی، به‌دلیل تقویت متقابل مؤلفه‌های منفی، از سازگاری ساختاری بالاتری نسبت به سناریوی دوم برخوردار شده است.

جدول ۳- ماتریس MDI

Table 3- MDI matrix

Total	Degree of filling	Empowering	Reinforcer	Influential	No effect	Repetition	Matrix dimensions
196	57.6	8	38	67	83	2	14×14

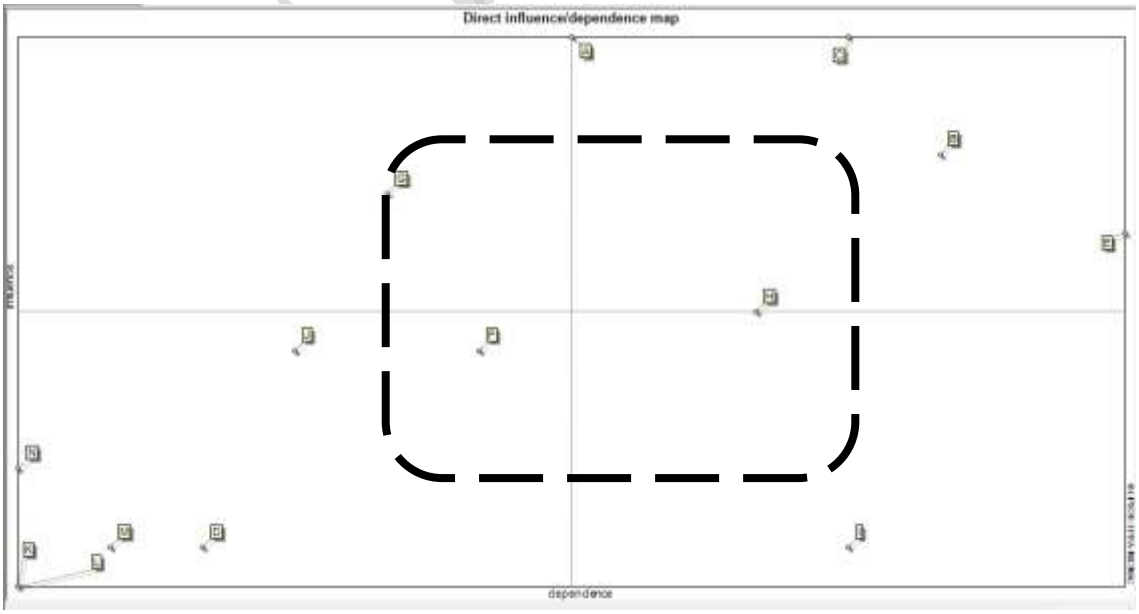


Fig. 1 - Direct effects map

شکل ۱- نقشه آثار مستقیم

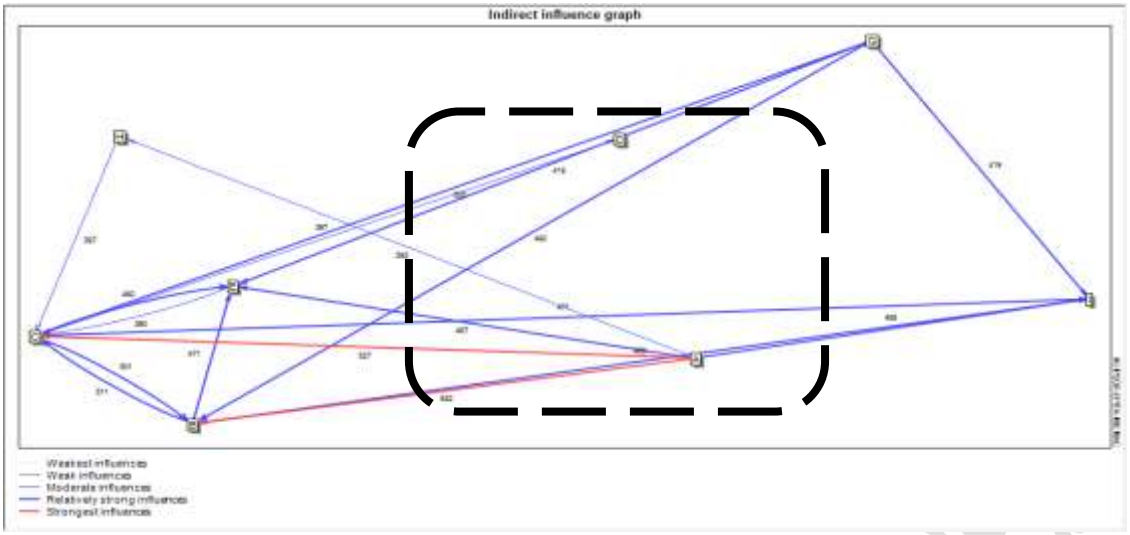


Fig. 2 - Indirect effects map

شکل ۲- نقشه آثار غیرمستقیم

جدول ٤-عوامل اصلی و وضعیت‌های احتمالی پیش‌روی آن در آینده‌ی امنیت آبی کشاورزی در حوضه آبریز کرخه

Table 4 - Main factors and possible future scenarios for agricultural water security in the studied watershed

Factor	Scenario	Label	Subcategory Description
Upstream surface and groundwater exploitation status	Optimistic	A1	Sustainable management and optimized use
	Intermediate	A2	Continuation of current trends
	Pessimistic	A3	Overexploitation and resource degradation
Climate change and drought conditions	Optimistic	B1	Reduced drought intensity and regular precipitation
	Intermediate	B2	Continuation of current trends
	Pessimistic	B3	Increased drought frequency and precipitation variability
Development of water recycling and recovery systems	Optimistic	C1	Full implementation with high efficiency
	Intermediate	C2	Partial development
	Pessimistic	C3	Limited or no development
Optimal allocation of environmental water (wetlands & ecosystems)	Optimistic	D1	Full and sustainable allocation
	Intermediate	D2	Insufficient allocation
	Pessimistic	D3	Neglect of ecosystem needs
Agricultural improvement via knowledge-based cultivation patterns	Intermediate	E1	Full optimization and increased water use efficiency
		E2	Partial or limited implementation
	Pessimistic	E3	Continuation of current practices without improvement
Empowerment and participation of local communities and NGOs	Optimistic	F1	Active and effective participation
	Intermediate	F2	Limited participation
	Pessimistic	F3	Neglect of local community involvement
Watershed water reallocation management	Optimistic	G1	Fair and sustainable reallocation
	Intermediate	G2	Insufficient reallocation
	Pessimistic	G3	No reallocation of resources

ادامه جدول ٤

Table 4- continued

Strengthening of local water governance & integrated water management	Optimistic	H1	Full and effective implementation
	Intermediate	H2	Partial development
	Pessimistic	H3	Fragmented and inefficient management
Pollution control (chemical, human, oil-related, etc.)	Optimistic	I1	Complete pollution control
	Intermediate	I2	Limited pollution control
	Pessimistic	I3	Increased pollution and resource degradation
Infrastructure capacity for volumetric delivery & optimized agricultural water distribution	Optimistic	J1	Full capacity development and stable water delivery
	Intermediate	J2	Partial development
	Pessimistic	J3	Continuation of current practices without development
Oil field development and impacts on water resources	Optimistic	K1	Controlled development with minimal impact
	Intermediate	K2	Development without complete control
	Pessimistic	K3	Unsustainable development and resource degradation
Incentive and punitive policies for optimal water management	Optimistic	L1	Comprehensive and effective policies
	Pessimistic	L2	No policy implementation
Review and optimization of watershed cropping pattern	Optimistic	M1	Optimized cropping pattern with reduced water consumption
	Intermediate	M2	Partial adjustment
	Pessimistic	M3	Continuation of current practices
Officials' perspective on social hydrology & support for community-based management	Optimistic	N1	Positive attitude and active support
	Intermediate	N2	Neutral attitude
	Pessimistic	N3	Negative attitude and neglect

Source: Calculations of the present research.

جدول ٥- وضعیت‌های هر یک از عوامل به تفکیک هر سناریو

Table 5- Scenario-specific Status of Each Driving force

Driver	Scenario 1: Water Resilience and Prosperity Corridor	Scenario 2: Vortex of Instability and Increasing Tensions	Scenario 3: Irreversible Water Desolation
Upstream surface and groundwater exploitation status	Sustainable and optimized utilization	Overexploitation and resource degradation	Overexploitation and resource degradation
Climate change and drought conditions	Reduced drought severity and regular precipitation	Increased drought severity and precipitation variability	Increased drought severity and precipitation variability
Development of water recycling and recovery systems	Full deployment with high efficiency	No development and limited use	No development and limited use
Optimal allocation of environmental water (wetlands & ecosystems)	Full and sustainable allocation	Insufficient allocation	Insufficient allocation
Agricultural improvement via knowledge-based cultivation patterns	Full optimization and increased water-use efficiency	Partial and limited implementation	Partial and limited implementation

ادامه جدول ۵

Table 5- continued

Empowerment and participation of local communities and NGOs	Active and effective participation	Limited participation	Limited participation
Watershed water reallocation management	Fair and sustainable reallocation	Insufficient reallocation	Insufficient reallocation
Strengthening of local water governance & integrated water management	Full and effective implementation	Partial development	Partial development
Pollution control (chemical, human, oil-related, etc.)	Complete pollution control	Increased pollution and water resource degradation	Increased pollution and water resource degradation
Infrastructure capacity for volumetric delivery & optimized agricultural water distribution	Full capacity development and stable delivery	Continuation of current non-developing practices	Continuation of current non-developing practices
Oil field development and impacts on water resources	Controlled development with minimal impact	Unsustainable development and resource degradation	Unsustainable development and resource degradation
Incentive and punitive policies for optimal water management	Comprehensive and effective policies	Comprehensive and effective policies	Lack of policy implementation
Review and optimization of watershed cropping pattern	Continuation of current pattern	Optimized cropping pattern with reduced water use	Optimized cropping pattern with reduced water use
Officials' perspective on social hydrology & support for community-based management	Positive attitude and active support	Neutral attitude	Neutral attitude
Score	874	789	809

Source: Calculations of the present research.

نتیجه‌گیری

تحلیل روندهای گذشته و وضعیت فعلی حوضه آبریز کرخه نشان می‌دهد که گذار از مدیریت سازه‌ای و جزیره‌ای، به حکمرانی یکپارچه، مشارکتی و مبتنی بر تاب‌آوری یک ضرورت ساختاری است. نتایج این پژوهش تصویری چندبعدی و آینده‌محور از امنیت آبی در بخش کشاورزی ترسیم می‌کند. نشان می‌دهد که آینده حوضه آبریز نه یک مسیر خطی، بلکه طیفی از آینده‌های ممکن و متاثر از کنش متقابل مجموعه‌ای از پیشران‌های اجتماعی، اقلیمی، زیست‌محیطی، نهادی و فناورانه است. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه‌های حوزه حکمرانی آب و امنیت آبی همسو است. همانند پژوهش‌های Gain et al. (2021) و Bakker & Morinville (2013)، نقش حکمرانی چندسطحی و مشارکت اجتماعی به‌عنوان عوامل کلیدی تاب‌آوری تأیید شد. همچنین مشابه نتایج (Baldassarre et al., 2017)، تعامل متقابل مؤلفه‌های اجتماعی و اقلیمی به‌عنوان تعیین‌کننده آینده سیستم – های آبی شناسایی گردید. با این حال، نوآوری این مطالعه در کاربرد روش CIB در مقیاس حوضه کرخه و تمرکز هم‌زمان بر امنیت آبی کشاورزی و سازگاری نهادی است.

تحلیل انجام‌شده بر ۱۴ پیشران کلیدی نشان می‌دهد که امنیت آبی در حوضه کرخه از سه مسیر عمده قابل‌تصور است: مسیر تاب‌آوری و شکوفایی، مسیر ناپایداری و مسیر بحران عمیق. این سه مسیر در قالب سه سناریوی «شاهراه تاب‌آوری و شکوفایی آبی»، «گرداب ناپایداری و تنش‌های فزاینده» و «برهوت بی‌بازگشت آبی» نمایش داده شدند. هر یک از این سناریوها به‌واسطه ترکیب خاصی از وضعیت پیشران‌ها شکل گرفته‌اند و از سوی دیگر، می‌توانند مبنای راهبردپردازی و برنامه‌ریزی کلان در سطوح محلی و ملی قرار گیرند.

سناریوی نخست، «شاهراه تاب‌آوری و شکوفایی آبی»، تصویری از آینده‌ای ارائه می‌دهد که در آن مجموعه‌ای از اصلاحات ساختاری، فناورانه و نهادی در کنار هم قرار گرفته و موجب هم‌افزایی مثبت در کل سیستم شده‌اند. در این سناریو، بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی در بالادست به‌صورت پایدار مدیریت شده، شدت خشکسالی به‌دلیل بهبود نسبی شرایط اقلیمی و همچنین اقدامات سازگاری کاهش یافته و سیستم

بازچرخانی آب در سطوح مختلف کشاورزی استقرار یافته است. مهم‌تر از همه، حکمرانی محلی و مشارکت جامعه محلی کارآمد شده و تخصیص آب به محیط‌زیست به‌صورت کامل رعایت می‌شود. بر مبنای این سناریو، امنیت آبی نه تنها قابل تحقق، بلکه به عاملی برای رشد اقتصادی، پایداری اکولوژیک و تقویت همبستگی اجتماعی تبدیل می‌شود. این سناریو نشان می‌دهد که آینده مطلوب، نتیجه یک پیشران واحد نیست، بلکه حاصل انسجام و هم‌افزایی مجموعه‌ای از اقدامات هماهنگ در مدیریت تقاضا، ارتقای زیرساخت‌ها، اصلاح الگوی کشت، توانمندسازی اجتماعی و حکمرانی مشارکتی است.

در مقابل، سناریوی دوم، «گرداب ناپایداری و تنش‌های فزاینده»، وضعیتی بینابینی را نشان می‌دهد که در آن بخشی از اصلاحات صورت گرفته، اما این اقدامات پراکنده، نامنسجم و ناکافی‌اند. در این حالت، تغییرات اقلیمی و افزایش شدت خشکسالی همچنان تهدید جدی محسوب می‌شوند. توسعه سیستم‌های بازچرخانی به کندی پیش می‌رود و حکمرانی محلی نیز تنها به‌صورت جزئی تقویت شده است. اگرچه برخی سیاست‌های انگیزشی به‌صورت محدود اجرا می‌شوند و بخشی از نهادهای تصمیم‌گیر تلاش‌هایی برای کاهش آلایندگی‌ها انجام می‌دهند، اما ضعف هماهنگی میان دستگاه‌ها و عدم وجود برنامه‌ریزی بلندمدت سبب می‌شود که این اقدامات اثرگذاری لازم را نداشته باشند. پیامد این وضعیت، تداوم فشارهای ساختاری بر منابع آب، کاهش تدریجی تاب‌آوری اجتماعی و محیط‌زیستی و شکل‌گیری تنش‌های بین‌بخشی است. این سناریو بیش از هر چیز، «هشدار» می‌دهد که تداوم وضعیت کنونی نمی‌تواند نیازهای آینده حوضه را پاسخ دهد و شکاف میان عرضه و تقاضا افزایش خواهد یافت.

در نهایت، سناریوی سوم یعنی «برهوت بی‌بازگشت آبی» تصویر آینده‌ای است که در آن مجموعه‌ای از ناتوانی‌ها و ناکارآمدی‌ها در کنار تشدید تغییرات اقلیمی، سیستم را به نقطه‌ای بازگشت‌ناپذیر سوق می‌دهند. بهره‌برداری بی‌رویه در بالادست، عدم توسعه سیستم‌های بازچرخانی، بی‌توجهی به نیازهای محیط‌زیستی تالاب‌ها و اکوسیستم‌ها، افزایش آلایندگی‌ها، توسعه ناپایدار میادین نفتی و ناتوانی کامل در اصلاح الگوی کشت، از جمله عواملی هستند که این سناریو را شکل می‌دهند. در چنین شرایطی، امنیت آبی به‌شدت تضعیف شده، ناهنجاری‌های اجتماعی افزایش یافته و فشار بر منابع طبیعی حوضه فراتر از توان اکولوژیک می‌شود. نتیجه این فرآیند می‌تواند مهاجرت‌های گسترده، افت شدید کیفیت زندگی، کاهش تولید کشاورزی، تشدید کانون‌های گردوغبار، فرسایش سرمایه اجتماعی و حتی تعمیق تعارضات محلی و منطقه‌ای باشد. این سناریو بر اهمیت مداخله فوری و تصمیم‌سازی مبتنی بر آینده‌نگری تأکید می‌کند؛ چراکه تداوم روندهای بحرانی می‌تواند حوضه را در معرض فروپاشی اجتماعی ـ اکولوژیک قرار دهد.

مقایسه سه سناریو نشان می‌دهد که «پیشران‌های کلیدی» در شکل‌دهی آینده‌های متفاوت بیشترین نقش را دارند. چهار پیشران کلیدی، یعنی «وضعیت بهره‌برداری از بالادست، تغییرات اقلیمی، توسعه سیستم‌های بازچرخانی و سطح بهره‌گیری از کشاورزی دانش‌بنیان»، بیش از سایر عوامل می‌توانند آینده امنیت آبی را تغییر دهند. این نکته بیانگر آن است که سیاست‌گذاری در حوزه آب نیازمند رویکردی چندسطحی و شبکه‌ای است. به عنوان مثال، نمی‌توان با تمرکز صرف بر اصلاح الگوی کشت و بدون کنترل بهره‌برداری بالادست، به امنیت آبی دست یافت. به عنوان مثال حتی توسعه سیستم‌های بازچرخانی در شرایطی که حکمرانی محلی تقویت نشده باشد، عملاً اثربخش نخواهد بود. این یافته‌ها ضرورت هم‌افزایی نهادی، تصمیم‌گیری مشارکتی و یکپارچه‌سازی مدیریت آب در مقیاس حوضه آبریز را برجسته می‌کند.

نتایج پژوهش همچنین بیانگر آن است که توانمندسازی جامعه محلی و سازمان‌های مردم نهاد، حلقه مفقوده بسیاری از سیاست‌های آبی کشور بوده است. سناریوی مطلوب نشان می‌دهد که بدون مشارکت ذی‌نفعان، حتی سیاست‌های دقیق و مبتنی بر شواهد نیز قادر به ایجاد تغییرات پایدار نیستند. مشارکت مردم نوعی سرمایه اجتماعی برای مدیریت آب محسوب می‌شود که می‌تواند به افزایش پذیرش سیاست‌ها، کاهش تعارضات و بهبود رفتارهای مصرفی منجر شود.

در نهایت، یافته‌های این مطالعه پیام روشنی برای تصمیم‌سازان دارد: امنیت آبی آینده‌محور زمانی محقق خواهد شد که سیاست‌گذاری در حوزه آب از چارچوب‌های پراکنده، بخشی و کوتاه‌مدت خارج شده و به سمت حکمرانی شبکه‌ای، بین‌بخشی و بلندمدت حرکت کند. از سوی دیگر، آینده روشن و باثبات در گرو سرمایه‌گذاری در پژوهش، ارتقای فناوری، کنترل آلایندگی‌ها، سازگاری با تغییر اقلیم و اصلاح نهادی است. غفلت از این الزامات، می‌تواند حوضه آبریز کرخه و سایر حوضه‌های کشور را به سمت سناریوهای بحرانی و بی‌بازگشت سوق دهد.

این پژوهش با تبیین سه مسیر آینده، زمینه را برای تصمیم‌سازی آگاهانه فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که آینده مطلوب نه نتیجه شانس، بلکه حاصل مجموعه‌ای از کنش‌های هماهنگ، علمی، اجتماعی و مدیریتی است. ازاین‌رو، توصیه می‌شود سیاست‌گذاران در فرآیند طراحی برنامه‌ها و مداخلات، سناریوهای ارائه‌شده را به‌عنوان نقشه‌راه و چارچوب کلان تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار دهند تا تاب‌آوری حوضه کرخه و امنیت آبی منطقه در بلندمدت تضمین شود.

پیشنهادها

تحلیل سناریوهای آینده امنیت آبی در حوضه آبریز کرخه نشان می‌دهد که آینده این حوضه بیش از آنکه تابع یک متغیر منفرد باشد، محصول تعامل هم‌زمان نیروهای اقلیمی، فناورانه، اجتماعی و نهادی است. از همین‌رو سیاست‌گذاری در این حوزه باید فراتر از اقدامات تک‌بخشی یا مقطعی بوده و بر پایه یک نگاه

سیستمی و آینده‌محور طراحی شود. مهم‌ترین ضرورت در این چارچوب، شکل‌دهی به حکمرانی یکپارچه آب است؛ حکمرانی‌ای که بتواند تعارضات بین‌بخشی را مدیریت کرده، هماهنگی نهادی را افزایش دهد و ظرفیت تصمیم‌سازی مشارکتی را تقویت کند. پیشنهاد می‌شود یک «چارچوب یکپارچه حکمرانی آب در حوضه کرخه» مبتنی بر اصول مدیریت تقاضا، حفاظت اکولوژیک و مشارکت ذی‌نفعان تدوین شود و اجرای آن برای کلیه دستگاه‌های مرتبط الزام‌آور گردد.

در کنار این امر، مدیریت بهره‌برداری در بالادست باید به‌عنوان یکی از اولویت‌های سیاستی در نظر گرفته شود؛ زیرا تحلیل سناریوها نشان داد که شدت برداشت‌های بالادست، بیش از هر عامل دیگری می‌تواند آینده امنیت آبی را به سمت بهبود یا فروپاشی سوق دهد. اصلاح نظام تخصیص، بازنگری در پروانه‌های برداشت، توسعه ابزارهای نظارت هوشمند و اعمال سازوکارهای تشویقی و بازدارنده از جمله اقداماتی هستند که باید در دستور کار قرار گیرند. این اقدامات باید با برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم تکمیل شوند؛ برنامه‌هایی که بر کاهش حساسیت سیستم از طریق اصلاح تقویم زراعی، توسعه کشت‌های کم‌آب‌بر، کاهش تبخیر و ارتقای بهره‌وری متمرکز باشند.

یکی دیگر از ارکان کلیدی امنیت آبی، گذار به کشاورزی دانش‌بنیان است. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در پایش آب، مدیریت مزرعه و بازچرخانی می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در کاهش فشار بر منابع آب ایفا کند. سیاست‌گذاری در این حوزه باید معطوف به ایجاد انگیزه‌های اقتصادی، حمایت از نوآوری و توسعه زیرساخت‌های فناورانه باشد. گسترش سامانه‌های آبیاری هوشمند، ارتقای توان تحلیل داده‌های اقلیمی و استقرار سامانه‌های بازچرخانی در بخش‌های کشاورزی و صنعتی از جمله اقدامات کلیدی است که می‌تواند امکان انتقال حوضه به سناریوی مطلوب را فراهم سازد.

نقش جامعه محلی و سازمان‌های مردم‌نهاد، به‌عنوان بازوی اجتماعی مدیریت آب، در تحلیل سناریوها برجسته بود. امنیت آبی زمانی پایدار خواهد بود که اقدامات مدیریتی از سوی جامعه پذیرفته شود و ذی‌نفعان نقش فعالی در سیاست‌گذاری و نظارت داشته باشند. در این راستا پیشنهاد می‌شود سازوکارهای مشارکت رسمی، مانند کمیته‌های محلی مدیریت آب، شوراهای بهره‌برداران و شبکه‌های نظارتی مردمی، تقویت و تثبیت شوند. این سازوکارها می‌توانند به افزایش سرمایه اجتماعی، کاهش تعارضات، بهبود رفتارهای مصرفی و ایجاد حس مالکیت نسبت به منابع آب کمک کنند.

از دیگر حوزه‌های ضروری برای مداخله سیاستی، کنترل آلایندگی‌ها و مدیریت اثرات فعالیت‌های نفتی و کشاورزی است. در صورتی که کنترل آلایندگی‌ها نادیده گرفته شود، کیفیت آب به‌سرعت افت خواهد کرد و حتی در صورت بهبود مدیریت کمی نیز، امنیت آبی قابل تحقق نخواهد بود. بنابراین اجرای سخت‌گیرانه استانداردهای زیست‌محیطی، تدوین پیوست‌های آبی برای پروژه‌های نفتی، مدیریت پساب‌های کشاورزی و ایجاد سامانه پایش کیفی از جمله اقدامات الزامی است.

در سطح اجرایی، توسعه زیرساخت‌های تحویل حجمی و مدیریت هوشمند شبکه‌های توزیع آب، نقشی تمام‌کننده در سیاست‌های کلان دستیابی به امنیت آبی را بر عهده دارد. زیرساخت‌های کنونی، به‌ویژه در بخش کشاورزی، امکان کنترل دقیق توزیع را فراهم نمی‌کنند و به همین دلیل، سیاست‌های طراحی‌شده به‌طور کامل اجرا نمی‌شوند. نوسازی شبکه‌ها، دیجیتالی‌سازی نقاط تحویل و ایجاد یک پایگاه داده یکپارچه می‌تواند زمینه اجرای سایر سیاست‌ها را فراهم سازد و مانع از ورود حوضه به مسیرهای بحرانی شود.

در نهایت، نتایج سناریوسازی تأکید می‌کند که سیاست‌گذاری در حوزه آب باید مبتنی بر آینده باشد و هر تصمیم باید از منظر سازگاری با سناریوهای مختلف ارزیابی شود. آینده مطلوب محصول اتفاق نیست، بلکه نتیجه انتخاب‌های آگاهانه، هماهنگ و پیوسته است. توجه به پیشران‌های اثرگذار، تقویت حکمرانی مشارکتی، سرمایه‌گذاری در فناوری، صیانت از اکوسیستم‌ها و مدیریت دقیق برداشت‌ها می‌تواند حوضه آبریز کرخه را از وضعیت ناپایدار کنونی خارج کرده و مسیر حرکت به سوی «شاهراه تاب‌آوری و شکوفایی آبی» را فراهم کند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: محمد علی میری، نگارش تحقیق، تکمیل پرسشنامه‌ها، جمع آوری داده‌ها و رفع ایرادات اعلامی اساتید راهنما و مشاور، جمع‌بندی نهایی نتایج.

نویسنده دوم: علی محمد آخوندعلی، تدوین چهارچوب نظری و طراحی متدولوژی تحقیق، هدایت و نظارت بر انجام تحقیق، بازنگری در فرآیندها و بررسی نتایج پایانی.

نویسنده سوم: عادل دحیماوی، ورود داده‌ها به نرم‌افزارهای تخصصی چهارگانه تحقیق و انجام تحلیل‌های آماری و طراحی مدل‌های مفهومی.

تقدیر و تشکر

از ریاست ، معاونت و کارشناسان محترم دانشکده مهندسی آب و محیط زیست بواسطه مساعدت و همکاری در انجام تحقیق، همچنین از مدیر عامل و مدیریت محترم نوآوری، توسعه فناوری و پژوهشهای کاربردی سازمان آب و برق خوزستان در همکاری به منظور دسترسی به اطلاعات علمی و سایر مساعدتها، تشکر و قدردانی می گردد.

References

1- Baldassarre, B., Calabretta, G., Bocken, N.M.P. and Jaskiewicz, T., 2017. Bridging sustainable business model innovation and user-driven innovation: A process for sustainable value proposition design. *Journal of cleaner production*, *147*, pp.175-186.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.081.

2- Bakker, K. and Morinville, C., 2013. The governance dimensions of water security: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *371*(2002), p.20130116.

3- Bogardi, J., Spring, Ú.O. and Brauch, H.G., 2016. Water security: Past, present and future of a controversial concept. In: *Handbook on Water Security.* Edward Elgar Publishing, pp. 38–58. https://doi.org/10.4337/9781782548010.00009.

4- Dahimavi, A., Akhoond-Ali, A.M., Modhej, D. and Ghoochani, O.M., 2024. Evaluating agricultural water resources resilience through good governance approach: Case of southwest Iran. *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1–20.

5- Di Baldassarre, G., Sivapalan, M., Rusca, M., Cudennec, C., Garcia, M., Kreibich, H. and Pande, S., 2019. Sociohydrology: Scientific challenges in addressing the sustainable development goals. *Water Resources Research*, 55(8), pp. 6327–6355. doi/abs/10.1029/2018WR023901.

6- Gain, A.K., Hossain, S., Benson, D., Di Baldassarre, G., Giupponi, C. and Huq, N., 2021. Social-ecological system approaches for water resources management. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 28(2), pp. 109–124. https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1780647.

7- Ghoochani, O.M., Eskandari Damaneh, H., Ghanian, M. & Cotton, M., 2023. Why do farmers over-extract groundwater resources? Assessing (un)sustainable behaviors using an integrated agent-centered framework. *Environments*, 10(12), p. 216.

8- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, I.P.B.E.S., 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services.

9- Mehrab Ghoochani, O. and Ghanian, M., 2025. Water and participatory governance: Elucidating the disparity between the ideal and existing conditions with an emphasis on social-ecological systems. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 21(1), pp. 165–184.

10- Mehrab Ghoochani, O., Dabiri, D. and Ghanian, M., 2020. Examination of major drivers of water resource management in the agricultural sector of Iran. *Quarterly Scientific-Research Journal of Public Policy*, 5(2), pp. 59-78.

11- Miles, I. and Keenan, M., 2002. *Practical Guide to Regional Foresight in the UK*. European Communities, Luxembourg.

12- Mishra, B.K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S. and Gautam, A., 2021. Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*, 13(4), p. 490.

13- OECD, 2017. *Water Governance in the OECD Countries: A Multi-Level Approach*. Available at: https://www.oecd.org/environment/water-governance-9789264261681-en.htm

14- Paz García-Vera, M., Sanz, J. and Gutiérrez, S., 2016. A systematic review of the literature on posttraumatic stress disorder in victims of terrorist attacks. *Psychological Reports*, 119(1), pp. 328–359.

15- Poorasghar Sanghachin, F., 2001. Economic and Planning Research. 6(7), pp. 85–122. Available at: http://eprj.ir/article-1-784-fa.html

16- Rabie, T. and Curtis, V., 2006. Handwashing and risk of respiratory infections: A quantitative systematic review. *Tropical Medicine & International Health*, 11(3), pp. 258–267.

17- Ralston, B. and Wilson, I., 2006. *The Scenario Planning Handbook: A Practitioner's Guide to Developing Strategies in Today's Uncertain Times*. Thomson South-Western, Mason, pp. 18–20.

18- Ramos Alvarez, A.N., Flores De la Mota, I. and Soler Anguiano, F.I., 2023. Complex networks for cross-sectoral water diagnosis. Paper presented at the International Conference on Computer Science and Health Engineering.

19- Weimer-Jehle, W., 2006. Cross-impact balances: A system-theoretical approach to cross-impact analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 73(4), pp. 334–361.

پذیرش نهایی- قبل از چاپ

EXTENDED ABSTRACT

Futurology of Water Security in Irrigation Management Using Balanced Cross-Impact Analysis (A Case Study of the Karkheh River Basin)

Muhammad Ali Miri[1], Ali Mohammad Akhoond Ali[2]* and Adel Dahimavi[3]

1- PhD student in water resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz
2- Corresponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz (aliakh@scu.ac.ir).*
3- Postdoctoral graduate of Water Resources, Khuzestan Water and Power Authority

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received:
Revised:
Accepted:
Available online:

Keywords:
Water Management, Karkheh watershed, Futurology, Scenario writing, key driving forces.

TO CITE THIS ARTICLE:

Abstract

Water security, as a fundamental component of human security and sustainable development, faces increasing challenges in river basins. This study aims to elucidate potential futures of water security in irrigation management within the Karkheh River Basin by employing the scenario-writing method based on Balanced Cross-Impact Analysis (CIB). Initially, 76 drivers were identified based on expert opinions. Ultimately, 14 key drivers of water security in the agricultural sector were selected for analysis. The results indicated that climate change, water resource utilization patterns, and the development of recycling technologies, and knowledge-based agriculture play the most significant roles in shaping the future of water security. In the subsequent phase, 38 potential states were defined for these drivers, and a cross-impact matrix was constructed. The Scenario Wizard software analysis produced three coherent and robust scenarios for the future of water security in the Karkheh Basin: Scenario One) The Pathway to Resilience and Water Prosperity, characterized by strong local governance, equitable reallocation, pollution control, and the development of innovative technologies; Scenario Two) The Vortex of Unsustainability and Increasing Tensions, arising from the continuation of fragmented management, limited local participation, and exacerbating drought conditions; and Scenario Three) The Irreversible Water Wasteland, where excessive exploitation, rising pollution, weak governance, and intensified climate change lead to a profound crisis. The findings suggest that the future of water security in the Karkheh Basin is a function of the interplay between climatic, institutional, technological, and social factors. Adopting participatory, technological, and integrated approaches can steer the basin towards resilience and sustainability.

Introduction

Water security, as one of the fundamental pillars of human security and sustainable development, is facing increasing challenges in Iranian watersheds, particularly the Karkheh basin (Mishra et al., 2021). This research, with the aim of explaining possible future of water security in irrigation management of the Karkheh watershed, uses a futurology and scenario writing method based on cross-impact balanced (CIB) analysis. First, through a systematic review of sources and expert assessment, 76 key driving forces, and ultimately 14 key drivers of water security in the agricultural sector were selected and analyzed for Influence and influenceability in a 14x14 matrix. The results of the MICMAC analysis showed that drivers such as climate change, water resource utilization patterns, the development of recycling technologies, and knowledge-based agriculture play the greatest role in determining the future of water

security. In the next step, 38 possible conditions were defined for these drivers and a cross-effects matrix was prepared. The Scenario wizard Software Analysis identified three credible and compatible scenarios for the future water security of the Karkheh Basin:1)a water resilience and prosperity scenario driven by strong local governance, equitable reallocation, pollution control, and new technologies; 2) Vortex of Instability and Escalating Tensions from island governance, limited local participation, and extreme drought, and 3) Irreversible water desert caused by excessive exploitation, increasing pollution, weak governance, and intensifying climate change
The findings show that the future of water security in the Karkheh Basin is a function of the interaction of climatic, institutional, technological, and social factors, and adopting participatory, technological, and integrated approaches can lead the basin towards resilience and sustainability.

Methodology

This research is applied in purpose and employs a mixed (qualitative–quantitative) approach. In futures studies literature, scenarios refer to patterns and structures that enable the depiction of plausible futures; in other words, scenarios are the building blocks of future images. They provide a means to make possibilities clear. In other words, scenarios are elements that create an image of the future (Mehrab Ghoochani et al., 2020). The scenario was analyzed using the algorithm "Analysis Balanced Impact Mutual."
CIB is recognized as a proven method for qualitative systems analysis in interdisciplinary issues—including scenario-building processes—and involves a combination of expert judgment and algorithmic calculations. In the balanced impact analysis method, a panel of subject matter experts with a wide range of relevant knowledge was formed.

In this study, MICMAC and Scenario Wizard software were used to analyze the data. MICMAC software is specifically designed to perform complex calculations of the interaction matrix and facilitate the process of system structural analysis. In this software, first the variables and components of the desired area are identified and included in the impact analysis matrix, then the intensity of the relationship between them is determined by a panel of experts in the form of rows and columns of a matrix. The sum of the row values indicates the degree of influence and the sum of the column values indicates the degree of influence. The output of this model displays the structural relationships between the variables, and MICMAC software, with the ability to convert these relationships into special diagrams, effectively facilitates the analysis of the system structure.

The Scenario Wizard software also examines the systems under study based on the balanced interaction analysis method. In addition to displaying the influence and impact matrix and the network of direct and indirect relationships between factors - which are features shared with MICMAC - this software also identifies scenarios with the highest synergy and correlation. Accordingly, after collecting the driving factors, the interaction matrix was formed. The structure of this matrix is such that each of the drivers and their levels are placed in rows and columns. Then, all levels were evaluated by experts based on a seven-part qualitative spectrum (from strong limiting effect to strong accelerating effect). By scoring the different states of each factor, various combinations are examined and superior scenarios are introduced. Another feature of Scenario Wizard compared to MICMAC is the ability to adjust the level of acceptance of inconsistency between elements, which helps to eliminate scenarios with heterogeneous components - even despite high synergy between other components.

Results and Discussion

The analysis of 14 key drivers shows that water security in the Karkheh Basin can follow three major pathways: the path of resilience and prosperity, the path of instability, and the path of deep crisis. These three paths were presented in the form of three scenarios: “Highway of Water Resilience and Prosperity”, “Vortex of Instability and Escalating Tensions”, and “Irreversible Water Desert”. Each of these scenarios is shaped by a specific combination of the status of the drivers and, on the other hand, can be the basis for strategy-making and macro-planning at local and national levels.

The first scenario, “Highway of Resilience and Water Prosperity,” depicts a picture of a future in which a set of structural technological, and institutional reforms synergistically reinforce the entire system. Sustainable management of surface and groundwater in upstream areas is achieved, drought severity is reduced through improved climate conditions and adaptation measures, water recycling systems are widely implemented, local governance and community participation are effective, and environmental flow requirements are fully respected

The second scenario, “Vortex of Instability and Escalating Tensions,” represents an intermediate state where partial reforms occur but remain scattered, inconsistent, and insufficient. Climate change and intensifying drought continue to pose serious threats. Water recycling systems develop slowly, and local governance is only marginally strengthened. Although some incentive policies are partially implemented and certain institutions attempt to reduce pollution, lack of inter-agency coordination and long-term planning undermines their effectiveness.

The third scenario, “Irreversible Water Desert,” portrays a future in which a combination of failures and inefficiencies, coupled with worsening climate change, pushes the system past the point of no return. Overexploitation in upstream areas, absence of recycling systems, neglect of wetland and ecosystem needs, rising pollution, unsustainable oil field development, and failure to reform cropping patterns drive this scenario. Under such conditions, water security is severely compromised, social anomalies increase, and pressure on natural resources exceeds ecological capacity. Consequences may include mass migration, sharp decline in quality of life, reduced agricultural production, intensified dust storms, erosion of social capital, and deepening local and regional conflicts. This scenario underscores the urgent need for foresight-based intervention, as continuation of current trends risks socio-ecological collapse

Conclusion

The results of this study have a clear message for decision-makers: Future-oriented water security will be achieved when water policymaking moves away from fragmented, sectoral, and short-term frameworks and moves towards a networked, intersectoral, and long-term governance. On the other hand, a bright and stable future depends on investment in research, technology advancement, pollution control, climate change adaptation, and institutional reform. Neglecting these requirements could push the Karkheh basin and other basins in the country toward critical and irreversible scenarios.

By explaining three future paths, this study provides the basis for informed decision-making and shows that the desired future is not the result of chance, but rather the result of a set of coordinated, scientific, social, and managerial actions. Therefore, it is recommended that policymakers use the presented scenarios as a roadmap and macro-decision-making framework in the process of designing programs and interventions to ensure the resilience of the Karkheh Basin and the region's water security in the long term.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors’ contribution

First Author: Muhammad Ali Miri, Developing a theoretical framework and designing a research methodology, guiding and supervising the research, reviewing the process, and reviewing the final results.

Second Author: Ali Mohammad Akhoond Ali, Writing the research, completing questionnaires, collecting data, resolving issues raised by supervisors and advisors, and final summarizing the results

Third Author: Adel Dahimavi, Entering data into specialized research software, performing statistical analyses, and designing conceptual models

Acknowledgment

We would like to thank the esteemed dean, vice-chancellor, and experts of the Faculty of Water and Environmental Engineering for their assistance and cooperation in conducting the research, as well as the CEO and management of Innovation, Technology Development, and Applied Research of the Khuzestan Water and Electricity Organization for their cooperation in providing access to scientific information and other assistance.

References

1. Mehrab Ghoochani, O., Dabiri, D. and Ghanian, M., 2020. Examination of major drivers of water resource management in the agricultural sector of Iran. *Quarterly Scientific-Research Journal of Public Policy*, 5(2), pp. 59-78.

2. Mishra, B.K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S. and Gautam, A., 2021. Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*, 13(4), p. 490.