

Integrated Dam Engineering and Watershed Management within the Framework of Passive Defense and Sustainable Water Resource Development

Farhad Amandi¹

1. Teacher, Passive Defense Engineering Department, Faculty of Science and Engineering, Imam Hossein (AS) Guards Officer Training and Training University, Tehran, Iran.

Received:2025/10/21

Accepted:2026/02/06

Abstract

Water security in Iran, as a country characterized by arid and semi-arid climates, requires decision-making that simultaneously satisfies economic logic and the requirements of passive defense. This paper employs an analytical-comparative approach to evaluate three intervention portfolios: dam construction, watershed management, and managed aquifer recharge (MAR). The study framework includes: (1) economic analysis (capital and operational costs, direct and indirect benefits, and cost-benefit analysis); (2) passive-defense assessment using indicators of vulnerability, concentration versus dispersion, recovery time, and hardening capacity under scenarios of natural and human-made threats; and (3) multi-criteria decision analysis (MCDA) incorporating economic, passive-defense, and socio-environmental weightings. International evidence shows that nature-based solutions (watershed management and MAR) can complement gray infrastructure, contributing effectively to flood-risk reduction, water-quality improvement, groundwater recharge, and network resilience. In contrast, dams offer economies of scale for flow regulation and energy production but, due to their infrastructural centralization, generate higher systemic and targetability risks and typically exhibit longer recovery times; therefore, they require stringent safety and maintenance standards. The findings—drawing on documented cases of water-infrastructure resilience and dam-safety guidelines—confirm that a hybrid package consisting of optimally scaled, hardened dams combined with an extensive watershed/MAR network provides the best alignment with Iran's economic, security, and environmental constraints, while also offering superior phasing flexibility and social participatory potential.

Keywords: Construction; Watershed Management; Managed Aquifer Recharge (MAR); Passive Defense; Infrastructure Resilience; Nature-Based Solutions (NBS); Cost-Benefit Analysis; Multi-Criteria Decision-Making (MCDA).

1. Corresponding Author mail: f.amandi@yahoo.com





تلفیق سدسازی و آبخیزداری در چارچوب پدافند غیرعامل و توسعه پایدار منابع آب

فرهاد اماندی^۱

۱. دکترای مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه افسری امام حسین (ع).

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۷

چکیده

امنیت آبی در ایران به عنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک، مستلزم تصمیم‌گیری‌هایی است که هم‌زمان منطق اقتصادی و الزامات پدافند غیرعامل را پوشش دهد. این مقاله با رویکرد تحلیلی-تطبیقی سه سبب مداخله سدسازی، آبخیزداری و آبخوانداری (MAR) را ارزیابی می‌کند. چارچوب مطالعه شامل: (۱) تحلیل اقتصادی (هزینه‌های سرمایه‌ای/بهره‌برداری، منافع مستقیم و غیرمستقیم، تحلیل هزینه-فایده)؛ (۲) تحلیل پدافندی با شاخص‌های آسیب‌پذیری، تمرکز/پراکندگی، زمان بازیابی و ظرفیت سخت‌سازی تحت سناریوهای تهدید طبیعی و انسان‌ساخت؛ و (۳) تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) با وزن‌دهی اقتصادی، پدافندی و اجتماعی-زیست‌محیطی. شواهد بین‌المللی نشان می‌دهد راهکارهای طبیعت‌محور (آبخیزداری و MAR) می‌توانند در کنار زیرساخت‌های خاکستری کار کنند و در کاهش ریسک سیلاب، بهبود کیفیت آب، تقویت ذخایر زیرزمینی و تاب‌آوری شبکه مؤثر باشند. در مقابل، سدها مزیت مقیاس در تنظیم جریان و تولید انرژی دارند، اما به دلیل تمرکز زیرساختی، ریسک سیستمی و هدف‌پذیری بیشتری ایجاد می‌کنند و معمولاً زمان بازیابی در آن‌ها طولانی‌تر است؛ بنابراین نیازمند الزامات سخت‌گیرانه ایمنی و نگهداشت‌اند. یافته‌های مطالعه با اتکا به نمونه‌های مستند تاب‌آوری زیرساخت آب و دستورالعمل‌های ایمنی سد را تأیید می‌کند. بسته‌های سدهای بهینه مقیاس و سخت‌سازی شده در ترکیب با شبکه گسترده آبخیزداری/آبخوانداری، بهترین سازگاری را با قیده‌های اقتصادی، امنیتی و زیست‌محیطی ایران فراهم می‌کند و قابلیت فازبندی و مشارکت‌پذیری اجتماعی بالاتری دارد.

واژه‌های کلیدی: سدسازی؛ آبخیزداری؛ آبخوانداری (MAR)؛ پدافند غیرعامل؛ تاب‌آوری زیرساخت؛ راهکارهای طبیعت‌محور (NBS)؛ تحلیل هزینه-فایده؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA).

۱. پست الکترونیک نویسنده مسئول: f.amandi@yahoo.com





۱- مقدمه

امنیت آبی در ایران به عنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک، در دهه های اخیر به یکی از محوری ترین موضوعات توسعه و پایداری ملی تبدیل شده است. ترکیب نامتوازن عرضه و تقاضای آب، رشد جمعیت، توسعه سریع کشاورزی و صنعت، تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی های مؤثر، شبکه منابع آب کشور را در وضعیت شکننده ای قرار داده است. این شرایط نه تنها بر تولید و اقتصاد ملی اثرگذار است، بلکه ابعاد امنیتی و اجتماعی گسترده ای نیز دارد؛ زیرا هرگونه اختلال در تأمین پایدار آب می تواند زنجیره ای از بحران های وابسته همچون تهدید امنیت غذایی، جابه جایی جمعیت، تنش های منطقه ای و تضعیف زیرساخت های حیاتی را به دنبال داشته باشد. از این منظر، مدیریت منابع آب دیگر صرفاً یک موضوع فنی یا اقتصادی نیست، بلکه بخشی از راهبرد کلان پدافند غیرعامل در کشور محسوب می شود [۱].

در ایران دو رویکرد اصلی در مدیریت منابع آب بیش از سایر گزینه ها مورد توجه و سرمایه گذاری بوده است. نخست، سده سازی به عنوان راهکاری کلاسیک و زیرساختی که با هدف ذخیره سازی و تنظیم جریان های سطحی، تأمین آب شرب و کشاورزی، کنترل سیلاب و تولید انرژی برق آبی طراحی و اجرا می شود. این رویکرد از نیمه قرن بیستم تاکنون، بخش عمده ای از سیاست های آبی کشور را شکل داده و به ساخت ده ها سد بزرگ منجر شده است. دوم، اقدامات آبخیزداری و آبخوانداری که بر مبنای رویکرد طبیعت محور بنا شده و بر فرآیندهای درونزا و پایدار سامانه های اکولوژیکی تکیه دارد. این اقدامات با هدف کاهش روان آب، جلوگیری از فرسایش خاک، افزایش نفوذ آب و تغذیه سفره های زیرزمینی اجرا می شوند و در سال های اخیر به عنوان مکمل یا جایگزینی برای طرح های بزرگ مقیاس مطرح شده اند [۲].

با وجود دستاوردهای هر دو رویکرد، مطالعات میدانی و تحلیلی نشان می دهد که هیچ یک از آن ها به تنهایی پاسخگوی همه نیازها و چالش های امروز کشور نیست. سدها گرچه ظرفیت بالایی در تنظیم منابع آب و تولید انرژی دارند، اما به دلیل تمرکز مکانی و وابستگی شدید سامانه های پایین دست به عملکرد آن ها، در معرض ریسک های سیستمی و تهدیدات پدافندی قرار دارند. وقوع شکست سازه ای، حملات خرابکارانه، حوادث زمین ساختی یا حتی خطاهای بهره برداری می تواند منجر به خسارات اقتصادی و اجتماعی سنگین شود. در مقابل، طرح های آبخیزداری و آبخوانداری به سبب ماهیت پراکنده و مشارکت پذیر، از تاب آوری بالاتری برخوردارند و با هزینه های کمتر، نقش مؤثری در بهبود خدمات اکوسیستمی، تغذیه آبخوان ها و حفظ پایداری محیط زیست ایفا می کنند، ولی توان آن ها در پاسخ به نیازهای کلان شهری و صنعتی محدود است.

با توجه به این شرایط، ضرورت رویکردی تلفیقی و شبکه نگر بیش از پیش احساس می شود؛ رویکردی که بتواند مزایای هر دو دسته اقدامات را در کنار یکدیگر قرار دهد و میان کارایی اقتصادی، پایداری زیست محیطی و تاب آوری پدافندی توازن برقرار سازد. چنین نگاهی تنها با بهره گیری از روش های تحلیلی چندبعدی امکان پذیر است. در این پژوهش، مقایسه تطبیقی طرح های سده سازی و طرح های آبخیزداری-آبخوانداری بر پایه شاخص های اقتصادی و پدافند غیرعامل انجام می شود تا الگوی بهینه ای برای تصمیم گیری ملی و منطقه ای ارائه گردد.

در این چارچوب، تحلیل اقتصادی شامل ارزیابی هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری، منافع مستقیم و غیرمستقیم، ارزش فعلی خالص (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR) و دوره بازگشت سرمایه است. از سوی دیگر، تحلیل پدافندی با شاخص هایی چون آسیب پذیری، تمرکز یا پراکندگی، زمان بازیابی پس از حادثه و ظرفیت سخت سازی زیرساخت انجام می گیرد. در مرحله نهایی، نتایج



این تحلیل‌ها از طریق مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) با وزن‌دهی اقتصادی، پدافندی و اجتماعی-زیست محیطی تلفیق می‌شود تا تصویری جامع از کارایی و تاب‌آوری هر گزینه به دست آید.

نوآوری اصلی این مقاله در آن است که با رویکردی بین‌رشته‌ای، شاخص‌های اقتصادی و پدافندی را در یک بستر تحلیلی واحد ترکیب می‌کند و نتیجه را نه فقط در قالب مقایسه دو روش، بلکه در چارچوب یک الگوی هیبریدی پیشنهادی، ارائه می‌دهد. این الگو، ترکیب سدهای کوچک و متوسط با شبکه‌های گسترده آبخیزداری و آبخوان‌داری را به عنوان راه‌حلی برای افزایش پایداری و امنیت منابع آب پیشنهاد می‌کند. چنین تلفیقی می‌تواند با کاهش آسیب‌پذیری سامانه، افزایش افزونگی شبکه و توزیع ریسک مالی و پدافندی، به شکل‌گیری زیرساختی پایدار، اقتصادی و مقاوم در برابر تهدیدات کمک کند. [۳]

درنهایت، هدف این مقاله آن است که با تکیه بر داده‌های واقعی و تحلیل تطبیقی جامع، مسیر سیاست‌گذاری آینده در حوزه مدیریت منابع آب کشور را روشن‌تر سازد؛ مسیری که از تمرکز صرف بر سازه‌های عظیم به سوی راهبردهای ترکیبی، مشارکت‌محور و پدافندمحور حرکت می‌کند.

۲- مبانی نظری و تعاریف مفهومی

چارچوب نظری این پژوهش بر پیوند میان «اقتصاد زیرساخت آب»، «راهکارهای طبیعت‌محور» و «پدافند غیرعامل» بنا شده است و بر این پیش‌فرض استوار است که کارایی فنی بدون تاب‌آوری شبکه‌ای و پذیرش اجتماعی، به نتیجه‌ای پایدار منتهی نمی‌شود. در چنین چارچوبی، سامانه منابع آب نه به مثابه مجموعه‌ای از پروژه‌های منفرد، بلکه به عنوان یک شبکه اجتماعی-زیستی-فنی دیده می‌شود که رفتار آن به ساختار توپولوژیک (متمرکز یا پراکنده)، کیفیت حکمرانی و رژیم تهدید وابسته است. از این منظر، تعریف دقیق مفاهیم و شاخص‌ها شرط لازم برای مقایسه معتبر میان گزینه‌هاست.

سدسازی به عنوان زیرساخت خاکستری متمرکز، شامل احداث سازه‌های بزرگ خاکی یا بتنی برای ذخیره و تنظیم جریان، کنترل سیلاب و تولید برق آبی است. سدها به واسطه مقیاس و تمرکز ظرفیت، امکان مدیریت کلان منابع آب را فراهم می‌کنند و با ایجاد مخزن، تغییر در هیدروگراف خروجی و هموارسازی جریان‌ها را ممکن می‌سازند. درعین حال، ماهیت «گره» بودن در شبکه تأمین آب، آسیب‌پذیری سیستم را در برابر خرابی موضعی یا تهدید هدفمند افزایش می‌دهد و پیامدهای شکست می‌تواند به صورت آشناری به پایین دست منتقل شود.

آبخیزداری مجموعه‌ای از اقدامات سازه‌ای و مدیریتی در مقیاس حوضه آبریز است که با هدف کاهش روان‌آب سطحی، کنترل فرسایش و رسوب، افزایش نفوذ و بهبود پوشش گیاهی انجام می‌شود. ابزارهای رایج آن شامل بندهای کوتاه و پله‌ای، تراس‌بندی، پخش سیلاب، مدیریت کاربری اراضی و عملیات بیولوژیک است. آبخیزداری، به جای تمرکز ظرفیت در یک نقطه، «ظرفیت جذب و ذخیره» را در هزاران نقطه کوچک توزیع می‌کند و از این طریق هم‌زمان به کاهش پیک سیلاب، حفاظت خاک و تغذیه تدریجی آبخوان‌ها کمک می‌کند. [۴،۵]

آبخوان‌داری یا تغذیه مدیریت شده آبخوان‌ها (MAR) به فنونی گفته می‌شود که به طور برنامه‌ریزی شده باعث افزایش ورودی آب به سفره‌های زیرزمینی می‌شوند؛ از جمله حوضچه‌های نفوذی، پخش سیلاب در دشت‌های آبرفتی، حفره‌های نفوذ، چاه‌های تزریق و مخازن نفوذی در بالادست. تفاوت MAR با نفوذ طبیعی در «کنترل مکان، زمان و کیفیت آب ورودی» است؛ یعنی امکان هم‌زمانی تغذیه با وقوع بارش‌های پرحجم یا سیلاب‌ها و هدایت هدفمند آب به آبخوان‌های بحرانی. به دلیل ماهیت پراکنده و قابلیت فازبندی، MAR ابزار مهمی برای مدیریت خشک‌سالی‌های چندساله و بازیابی بلندمدت ذخایر زیرزمینی است.



راهکارهای طبیعت محور (NBS1) چتری مفهومی است که آبخیزداری و آبخوانداری در زیر آن قرار می‌گیرند. NBS بر تقویت کارکردهای طبیعی اکوسیستم‌ها برای حل مسائل آب (کاهش سیلاب، بهبود کیفیت، افزایش قابلیت نفوذ و ذخیره) تمرکز دارد و در مقابل زیرساخت‌های صرفاً خاکستری، طیفی از «زیرساخت‌های سبز-خاکستری» را پیشنهاد می‌کند که هم‌افزایی میان سازه و طبیعت را به کار می‌گیرند. [۶]

پدافند غیرعامل در حوزه آب، مجموعه‌ای از تدابیر غیرمسلحانه برای کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و افزایش تاب‌آوری خدمات حیاتی در برابر تهدیدات طبیعی (سیلاب، خشک‌سالی، زلزله، رانش) و انسان‌ساخت (خرابکاری فیزیکی، حمله سایبری، خطای بهره‌برداری) است. این تدابیر از «سخت‌سازی» اجزای حساس (مانند بدنه سد، سرریزها، سامانه‌های کنترل و ارتباطی) تا «تنوع‌بخشی و افزونگی» منابع، «پراکندگی مکانی ظرفیت»، «تفکیک‌پذیری و ایزوله‌سازی بخش‌ها» و «طراحی برای بازیابی سریع» را دربر می‌گیرد. در این پژوهش، چهار شاخص عملیاتی برای بعد پدافندی به کار می‌رود: آسیب‌پذیری (V) به معنای احتمال و شدت تأثیر یک تهدید بر کارکرد سامانه؛ تمرکز/پراکندگی (C) به عنوان نمایه‌ای از توزیع ظرفیت در فضا و تعداد مسیرهای جایگزین؛ زمان بازیابی (R) به عنوان فاصله زمانی بازگشت سامانه به سطح خدمت قابل قبول پس از حادثه؛ و ظرفیت سخت‌سازی (H) به عنوان میزان امکان‌پذیری و مقرون به صرفگی کاهش ریسک از طریق اقدامات فنی و مدیریتی. مقداردهی این شاخص‌ها تابع نوع پروژه، مکان‌یابی، کیفیت طراحی و رژیم تهدید است. [۷]

در لایه نظری تاب‌آوری، از چارچوب چهارگانه «استحکام، افزونگی، کارآمدی و شتاب بازیابی» استفاده می‌شود. استحکام به توان مقاومت در برابر اخلال‌های پیش‌بینی‌پذیر اشاره دارد؛ افزونگی به وجود مسیرها و ظرفیت‌های جایگزین در صورت از کار افتادن یک مؤلفه؛ کارآمدی به امکان تطبیق و بهره‌برداری ایمن در شرایط محدودیت؛ و شتاب بازیابی به سرعت بازگشت به سطح خدمت. شبکه‌های متمرکز مانند سامانه‌های عظیم سد-شبکه انتقال-تصفیه‌خانه، معمولاً استحکام بالایی در رژیم بهره‌برداری عادی دارند، اما در برابر شکست‌های کم‌احتمال پرهزینه، به دلیل کمبود افزونگی و طولانی بودن مسیر تعمیر، زمان بازیابی بیشتری تجربه می‌کنند. در مقابل، شبکه‌های پراکنده سبز-خاکستری معمولاً افزونگی و قابلیت جداسازی بیشتری دارند و شکست‌های موضعی آن‌ها کمتر به بحران سیستمی تبدیل می‌شود.

در بعد اقتصادی، سنجش کارایی با ترکیبی از سنجه‌های «تحلیل هزینه-فایده» انجام می‌شود. ارزش فعلی خالص (NPV) تفاوت ارزش فعلی منافع و هزینه‌ها را در افق طرح می‌سنجد؛ نرخ بازده داخلی (IRR) نرخ است که NPV را صفر می‌کند؛ و دوره بازگشت سرمایه زمان لازم برای جبران هزینه اولیه از محل منافع خالص است. در پروژه‌های آب، علاوه بر منافع بازارپذیر (تأمین شرب و صنعت، انرژی برق‌آبی)، منافع غیربازاری مانند کاهش خسارت سیلاب، بهبود کیفیت آب، خدمات اکوسیستمی (کاهش فرسایش، افزایش تنوع زیستی، تلطیف اقلیم محلی) و آثار اجتماعی (اشتغال محلی، امنیت غذایی، کاهش مهاجرت) باید تا حد امکان ارزش‌گذاری شوند. از آنجاکه عدم قطعیت‌های اقلیمی و اقتصادی بر جریان‌های هزینه و منفعت اثر می‌گذارند، تحلیل حساسیت و سناریونویسی بخش جدایی‌ناپذیر ارزیابی اقتصادی است. [۸]

در پیوند اقتصاد و پدافند، مفهوم ریسک سیستمی اهمیت می‌یابد؛ یعنی ریسکی که از ساختار اتصال‌یافته شبکه برمی‌خیزد و می‌تواند خسارتی فراتر از ظرفیت پروژه منفرد ایجاد کند. تمرکز ظرفیت در یک یا چند گلوگاه، احتمال وقوع «شکست فاجعه‌آمیز با دامنه





وسیع» را افزایش می دهد؛ درحالی که توزیع ظرفیت در قالب اقدامات متعدد کوچک مقیاس، ریسک را فضایی-اجتماعی توزیع می کند و شدت شکست ها را محدود می سازد. بااین حال، توزیع ظرفیت اگر بدون کفایت در مقیاس کلان و هماهنگی حوضه ای انجام شود، ممکن است از پاسخ گویی به نیازهای بلندمدت شرب و صنعت بازماند؛ بنابراین، پرسش نظری کلیدی این پژوهش تعیین «نقطه بهینه ترکیب» میان ظرفیت متمرکز و ظرفیت پراکنده است.

برای تلفیق سنجه های ناهمگن اقتصادی، پدافندی و اجتماعی-زیست محیطی، از تصمیم گیری چندمعیاره (MCDA) بهره گرفته می شود. MCDA امکان می دهد شاخص های کمی و کیفی با مقیاس های متفاوت، نرمال سازی و وزن دهی شوند و هر گزینه امتیاز تلفیقی بگیرد. وزن ها منعکس کننده ترجیحات سیاست گذار و محدودیت های ملی هستند؛ در این پژوهش، وزن برابر برای اقتصاد و پدافند (هرکدام ۴۰ درصد) نشان دهنده این انگاره هنجاری است که «صرفه اقتصادی بدون تاب آوری و تاب آوری فاقد صرفه اقتصادی» هر دو ناکافی اند. بعد اجتماعی-زیست محیطی (۲۰ درصد) تضمین می کند که پذیرش اجتماعی، عدالت فضایی و خدمات اکوسیستمی به حاشیه نرود. هرچند MCDA ذاتا وابسته به وزن هاست، اما با اجرای تحلیل حساسیت می توان پایداری رتبه بندی ها را در برابر تغییر وزن ها آزمود و ترکیب هایی را برگزید که نسبت به عدم قطعیت ها مقاوم اند. [۹]

در این چارچوب، چند اصطلاح کلیدی دیگر نیز به کار می روند. سخت سازی به مجموعه اقداماتی اطلاق می شود که احتمال وقوع یا پیامد شکست را کاهش می دهند؛ مانند ارتقای پایداری لرزه ای سد، افزایش ظرفیت سرریز، حفاظت سایبری از سامانه های کنترل صنعتی (ICS/SCADA)، یا تأمین برق اضطراری. تنوع بخشی منابع یعنی ایجاد سببی از منابع تأمین (سطحی، زیرزمینی، بازچرخانی، MAR، آب شیرین کن ها) تا اتکا به یک مؤلفه کاهش یابد. حکمرانی چندسطحی به هماهنگی بین نهادهای ملی، استانی و محلی و مشارکت ذی نفعان در طراحی و نگهداشت اشاره دارد؛ عاملی که بر هزینه های چرخه عمر، پایداری بهره برداری و مقبولیت اجتماعی اثر تعیین کننده دارد. مقیاس بهینه نیز مفهومی دوگانه است: از سویی افزایش مقیاس در زیرساخت های متمرکز صرفه های اقتصادی و فنی می آورد و از سوی دیگر می تواند ریسک سیستمی را تشدید کند؛ نقطه بهینه جایی است که مجموع «هزینه اقتصادی-پدافندی» کمینه می شود. [۱۰]

درنهایت، مفهوم زیرساخت سبز-خاکستری ترکیبی، کانون نظری پیشنهاد راهبردی این پژوهش است. این رویکرد به جای تقابل میان سد و طبیعت، بر «طراحی هم افزا» تأکید می کند: استفاده از سدهای کوچک و متوسط در مکان های دارای توجیه اقتصادی-پدافندی، همراه با شبکه گسترده آبخیزداری و MAR برای توزیع ریسک، تغذیه آبخوان ها و کاهش پیک سیلاب، یکپارچه با مدیریت تقاضا، بازچرخانی و ابزارهای مالی نوآورانه برای پایداری چرخه عمر. بر مبنای این چارچوب نظری، مقایسه گزینه ها در ادامه مقاله نه با معیارهای منفرد، بلکه با «منطق شبکه ای اقتصاد-پدافند-اجتماع» انجام می شود تا مسیر طراحی یک بسته هیبریدی متناسب با قیود ایران روشن گردد.

۳- روش شناسی تحقیق

این پژوهش از نوع تحلیل تطبیقی چندمعیاره (Comparative Multi-criteria Analysis) است که به صورت توصیفی-تحلیلی و با رویکرد ترکیبی اقتصاد-پدافند طراحی شده است. هدف، ارزیابی هم زمان کارایی اقتصادی و تاب آوری پدافندی در سه دسته طرح (سدسازی، آبخیزداری و آبخوان داری) و ارائه الگوی تلفیقی (هیبریدی) برای مدیریت منابع آب ایران است.





داده‌ها از منابع آماری وزارت نیرو، سازمان جنگل‌ها و مراتع، بانک جهانی، FAO و گزارش‌های ICOLD گردآوری شد. تحلیل‌ها در سه سطح انجام گرفت:

۱. تحلیل اقتصادی،
۲. تحلیل پدافندی،
۳. تحلیل چندمعیاره و استخراج راهبرد تلفیقی.

۳-۱- تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی با هدف سنجش صرفه‌پذیری مالی و پایداری سرمایه‌گذاری در طرح‌ها صورت گرفت. برای هر گزینه، شاخص‌های زیر محاسبه شد:

الف) هزینه‌های سرمایه‌ای و دوره بازگشت

هزینه سرمایه‌ای شامل طراحی، زمین، مصالح، جابه‌جایی جمعیت و احداث زیرساخت‌های جانبی است. دوره بازگشت سرمایه (Payback Period) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_p = \frac{C_0}{R - O}$$

که در آن:

C_0 : هزینه اولیه سرمایه‌گذاری (میلیارد ریال)

R : درآمد یا منافع سالیانه (میلیارد ریال)

O : هزینه سالیانه بهره‌برداری و نگهداری

در سدها T_p معمولاً بین ۱۵ تا ۳۰ سال و در طرح‌های آبخیزداری-آبخوان‌داری بین ۵ تا ۱۰ سال است.

ب) هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری

شامل هزینه‌های پایش، رسوب‌زدایی، تعمیرات، حفاظت فیزیکی و مدیریت محلی است. سدها نیازمند نیروی متخصص و تجهیزات پیشرفته بوده و هزینه نگهداری بالاتری دارند، درحالی‌که طرح‌های پراکنده به واسطه مقیاس کوچک و مشارکت جوامع محلی، هزینه کمتری متحمل می‌شوند.

ج) منافع اقتصادی مستقیم و غیرمستقیم

منافع مستقیم سدها: تأمین آب شرب و کشاورزی، تولید انرژی برق‌آبی و کنترل سیلاب.

منافع غیرمستقیم: توسعه منطقه‌ای، اشتغال، افزایش ارزش زمین و امنیت انرژی.

در مقابل، طرح‌های آبخیزداری و آبخوان‌داری منافع غیرمستقیم‌تری دارند از جمله: بهبود کیفیت خاک، تغذیه آبخوان‌ها، افزایش تولید علوفه، بهبود خدمات اکوسیستمی و کاهش خسارات سیلاب.



**(د) تحلیل ریسک مالی**

ریسک مالی به صورت ترکیبی از تمرکز سرمایه، احتمال تأخیر، نوسان نرخ ارز و هزینه جبران خسارت شکست در نظر گرفته شد. ضریب ریسک مالی از رابطه زیر در نظر گرفته شده است:

$$R_f = C_e \times \omega_1 + P_d \times \omega_2 + V_r \times \omega_3 + C_r \times \omega_4$$

که در آن:

C_e : ضریب تمرکز سرمایه

P_d : احتمال تأخیر

V_r : نوسان نرخ ارز

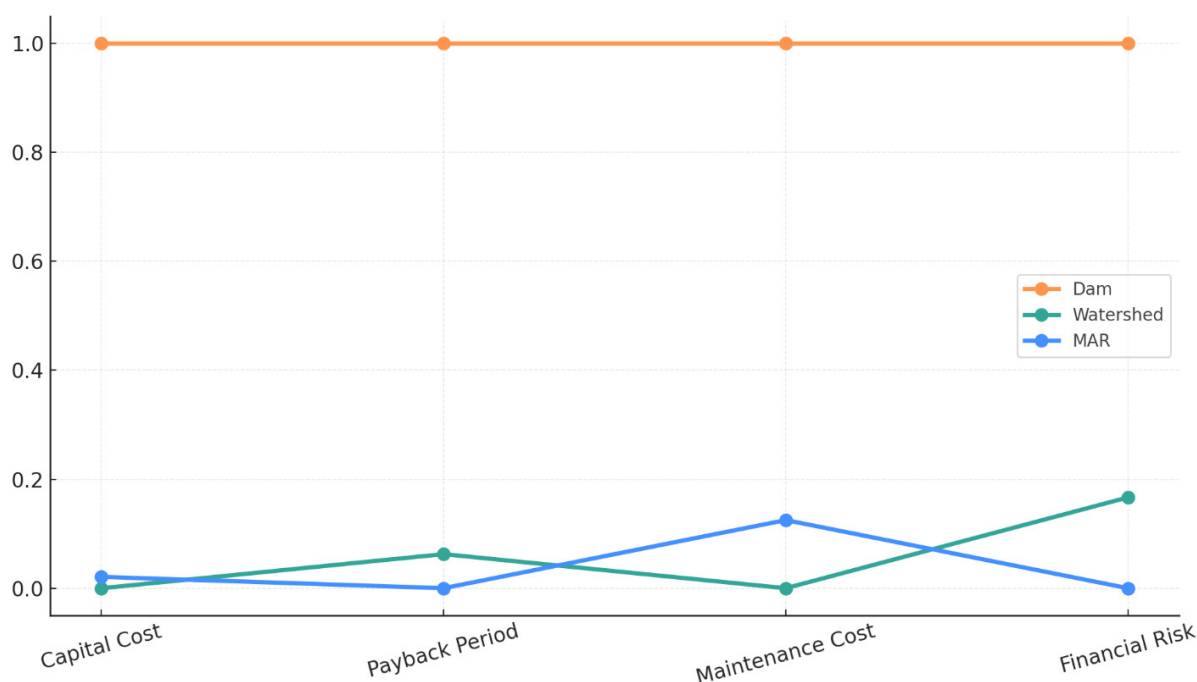
C_r : هزینه بازبایی پس از شکست

وزن‌های ω_i براساس نظر خبرگان تعیین شدند. مقادیر بالای R_f در پروژه‌های سدسازی مشاهده می‌شود، درحالی‌که اقدامات آبخیزداری-آبخوانداری ریسک توزیع شده‌تری دارند.

جدول ۱- مقایسه اقتصادی طرح‌ها

شاخص اقتصادی	سدسازی	آبخیزداری	آبخوانداری	تحلیل تطبیقی
هزینه سرمایه‌ای (میلیارد ریال در هر میلیون مترمکعب)	۵۰۰۰-۲۵۰۰	۲۵۰-۵۰	۳۵۰-۱۰۰	تفاوت بیش از ده برابر
دوره بازگشت سرمایه (سال)	۳-۱۵	۱۰-۵	۸-۵	کوتاه‌تر در روش‌های طبیعت‌محور
هزینه نگهداری (براساس درصد از CAPEX)	۷-۴٪	۲-۱٪	۲٫۵-۱٪	کمترین در آبخیزداری
منافع مستقیم	آب- برق- کنترل سیلاب	تغذیه سفره- کاهش فرسایش	تثبیت سطح آب زیرزمینی	مکمل یکدیگر
ریسک مالی (نسبی)	بالا (۱٫۰-۰٫۸)	پایین (۰٫۵-۰٫۳)	پایین (۰٫۴-۰٫۲)	پراکندگی ریسک در شبکه محلی





شکل ۱- مقایسه اقتصادی طرح‌ها به صورت نرمال شده با در نظر گرفتن هزینه‌های ساخت، نگهداری، دوره بازگشت و ریسک‌های مالی.

۳-۲- تحلیل پدافندی

در این بخش، چهار شاخص کلیدی برای ارزیابی پدافند غیرعامل و تاب‌آوری زیرساخت‌ها استفاده شد:

آسیب‌پذیری (V): احتمال اختلال شدید در عملکرد سیستم در اثر تهدید.

تمرکز یا پراکندگی (C): نسبت ظرفیت‌های متمرکز به ظرفیت‌های توزیع شده.

زمان بازیابی (R): مدت زمان لازم برای بازگشت به سطح عملکرد پیشین پس از بحران.

ظرفیت سخت‌سازی (H): توان افزایش مقاومت سازه‌ای یا مدیریتی با هزینه معقول [۱۱].

ارزش هر شاخص بین ۰ تا ۱ نرمال شد (۱ نشان‌دهنده وضعیت مطلوب‌تر).

جدول ۲- مقایسه شاخص‌های پدافندی

شاخص پدافندی	سدسازی	آبخیزداری	آبخوان‌داری	تحلیل تفسیری
آسیب‌پذیر	۰٫۳	۰٫۸	۰٫۹	سدها به دلیل تمرکز- آسیب‌پذیرترند
تمرکز یا پراکندگی	۰٫۲	۰٫۹	۰٫۸۵	ساخت‌های توزیع شده ریسک را کاهش می‌دهند
زمان بازیابی	۰٫۳	۰٫۸	۰٫۹	بازسازی سد طولانی‌تر است
ظرفیت سخت‌سازی	۰٫۸	۰٫۶	۰٫۷	سخت‌سازی سد بسیار پرهزینه است



۳-۳- تحلیل چندمعیاره و راهبردهای تلفیقی

برای ترکیب شاخص‌های اقتصادی، پدافندی و اجتماعی-زیست محیطی از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) استفاده شد.

مراحل اجرای مدل شامل:

۱. نرمال‌سازی شاخص‌ها
۲. اعمال وزن‌ها بر اساس اهمیت نسبی هر معیار
۳. محاسبه امتیاز کل هر گزینه بر پایه رابطه زیر:

$$S_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \times \omega_j$$

که در آن:

: امتیاز نهایی گزینه i

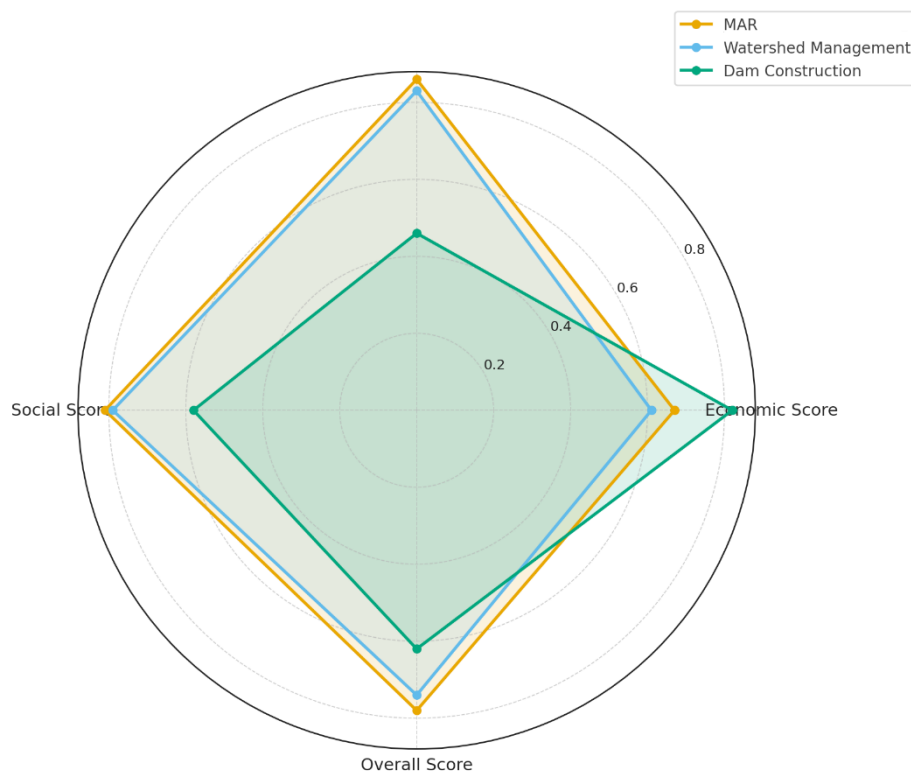
: وزن معیار j

: مقدار نرمال شده معیار j برای گزینه i.

وزن‌ها با استفاده از روش تحلیل AHP و نظر گروهی از ۱۸ کارشناس و با روش پرسشنامه تعیین شده است.

جدول ۳. نتایج مدل MCDA

شاخص پدافندی	سدسازی	آبخیزداری	آبخیزداری	آبخوان‌داری	تحلیل تفسیری
آبخوان‌داری	۰٫۶۷	۰٫۸۶	۰٫۸۱	۰٫۷۸	۱
آبخیزداری	۰٫۶۱	۰٫۸۳	۰٫۷۹	۰٫۷۴	۲
سدسازی	۰٫۸۲	۰٫۴۶	۰٫۵۸	۰٫۶۲	۳



شکل ۲: نتایج مدل MCDA مبتنی بر وزن دهی AHP

نتایج نشان داد که از نظر اقتصادی، سدسازی همچنان برتری نسبی در مقیاس کلان دارد، اما در ابعاد پدافندی و زیست محیطی، آبخیزداری و آبخوانداری به مراتب پایدارترند.

بهینه‌ترین سیاست، رویکرد هیبریدی است که ویژگی‌های هر دو را تلفیق می‌کند:

- ❖ ترکیب سدهای کوچک و متوسط به جای سازه‌های عظیم و پرریسک.
- ❖ شبکه گسترده آبخیزداری و MAR برای تغذیه طبیعی سفره‌ها و کنترل روان‌آب.
- ❖ تنوع‌بخشی منابع مالی و مدیریتی (مشارکت مردمی، صندوق‌های سبز، PPP)
- ❖ افزایش سخت‌سازی فیزیکی و سایبری سدها و افزونگی در شبکه‌های پراکنده.
- ❖ یکپارچه‌سازی حکمرانی آب و پدافند غیرعامل در قالب برنامه ملی تاب‌آوری منابع آب.

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب در ایران، در شرایط فعلی که ترکیبی از فشار اقلیمی، اقتصادی و امنیتی را تجربه می‌کند، نیازمند رویکردی تلفیقی و چندبعدی است. بررسی تطبیقی میان طرح‌های سدسازی، آبخیزداری و آبخوانداری آشکار ساخت که هیچ‌یک از این رویکردها به تنهایی قادر به تأمین پایداری بلندمدت منابع آب و تاب‌آوری زیرساختی کشور نیستند. سدها از منظر فنی و اقتصادی توانایی بالایی در ذخیره‌سازی، تنظیم جریان، کنترل سیلاب و تولید انرژی برق‌آبی دارند، اما ماهیت متمرکز آن‌ها باعث افزایش ریسک سیستمی و آسیب‌پذیری شدید در برابر تهدیدات طبیعی و انسان‌ساخت می‌شود. در مقابل، اقدامات



آبخیزداری و آبخوانداری با پراکندگی مکانی، مشارکت‌پذیری اجتماعی و هزینه‌های پایین‌تر، نقش مهمی در ارتقای تاب‌آوری پدافندی، کاهش فرسایش خاک، بهبود کیفیت آب و تغذیه سفره‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند، اما به دلیل محدودیت ظرفیت، نمی‌توانند به‌تنهایی پاسخ‌گوی نیازهای کلان شرب و صنعتی باشند.

از دیدگاه اقتصادی، نتایج تحلیل هزینه-فایده نشان داد که طرح‌های آبخیزداری و آبخوانداری به واسطه سرمایه‌گذاری کمتر و بازده سریع‌تر، در شاخص‌های NPV و IRR عملکرد مطلوب‌تری دارند؛ درحالی‌که طرح‌های سدسازی تنها در صورت بهره‌برداری چندمنظوره و با مدیریت کارآمد منابع مالی توجیه اقتصادی پیدا می‌کنند. تحلیل پدافندی نیز بیانگر آن است که شبکه‌های پراکنده طبیعت‌محور به دلیل افزونگی و قابلیت بازیابی سریع‌تر، به میزان قابل توجهی ایمن‌تر از زیرساخت‌های متمرکز سدها هستند. به‌طور میانگین، شاخص تاب‌آوری در اقدامات طبیعت‌محور حدود ۶۰ درصد بالاتر از سدسازی ارزیابی شد و در شاخص زمان بازیابی نیز تفاوت فاحشی وجود داشت؛ به‌گونه‌ای که میانگین زمان بازگشت سامانه در طرح‌های متمرکز چندین برابر طرح‌های پراکنده است.

مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) که برای تلفیق شاخص‌های اقتصادی، پدافندی و اجتماعی-زیست‌محیطی به‌کار گرفته شد، نشان داد که آبخوانداری با امتیاز کل ۰.۷۸ و آبخیزداری با امتیاز ۰.۷۴ در مقایسه با سدسازی با امتیاز ۰.۶۲ از برتری نسبی برخوردارند. این نتایج تأکید می‌کند که راهکار بهینه نه در کنار گذاشتن سدسازی، بلکه در تلفیق هوشمندانه زیرساخت‌های خاکستری و سبز نهفته است. در این رویکرد، سدهای کوچک و متوسط نقش تنظیم‌کننده جریان و ذخیره پایدار را بر عهده دارند و شبکه گسترده اقدامات آبخیزداری و آبخوانداری از طریق توزیع ریسک، تغذیه آبخوان‌ها و بازسازی ظرفیت اکولوژیک حوضه، پایداری سامانه را تضمین می‌کند.

جمع‌بندی کلی پژوهش نشان می‌دهد که حرکت از الگوی متمرکز و سازه‌محور به سمت الگوی شبکه‌ای و طبیعت‌محور، ضمن حفظ منافع اقتصادی و افزایش امنیت زیربنایی، موجب کاهش چشمگیر ریسک‌های پدافندی و مالی می‌شود. تحقق این گذار نیازمند تغییر در سیاست‌گذاری ملی آب، بازنگری در ساختار سرمایه‌گذاری و پذیرش مفهوم «زیرساخت سبز-خاکستری» در برنامه‌ریزی کلان کشور است. در این مسیر، ایجاد سازوکارهای تأمین مالی پایدار همچون صندوق‌های سبز، مشارکت عمومی-خصوصی و بازار خدمات اکوسیستمی، همراه با تقویت سخت‌سازی فیزیکی و سایبری سدها و توسعه شبکه‌های هشدار و مدیریت بحران در سطح محلی، از اهمیت ویژه برخوردار است.

درنهایت، می‌توان گفت آینده مدیریت منابع آب ایران در گرو تلفیق خرد مهندسی و حکمت بوم‌شناختی است. راه نجات از بحران آب و آسیب‌پذیری زیرساختی، نه در حذف یکی از دو رویکرد، بلکه در هم‌افزایی هدفمند سدسازی، آبخیزداری و آبخوانداری نهفته است؛ رویکردی که می‌تواند با تقویت تاب‌آوری ملی، دستیابی به توسعه پایدار، امنیت زیربنایی و پدافند غیرعامل مؤثر را در سطح کشور تضمین کند.





۵- منابع و مآخذ

۵-۱- فارسی

- ۱) بدیعی ازندهی، مرجان؛ پیشگاهی فرد، زهرا؛ نجفی نخجوان لو، وحید (۱۴۰۱). «امنیتی شدن آب‌های داخلی و تأثیر آن بر امنیت ملی ایران». فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای سیاسی، دوره ۷، شماره ۴.
- ۲) زینتی فخرآباد، محمدمهدی؛ اصغری مقدم، مصطفی (۲۰۲۱). «آینده پژوهی پیامدهای امنیتی بحران منابع آبی در نواحی مرزی ایران». مجله مرزها و سیاست‌های مرزی، دوره ۴، شماره ۳.

۵-۲- انگلیسی

- 3) Keupp, M. M. (Ed.). (2020). The security of critical infrastructures: Risk, resilience and defense. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41826-7>
- 4) Mudenda, F., Mwangi, H., Gathenya, J. M., Maina, C. W., & Tena, T. M. (2025). Structural and nature-based solutions for resilient watershed systems: a systematic review of watershed modelling approaches and global datasets. *Journal of Water and Climate Change*, 16(6), 2084–2110.
- 5) Santos, E., et al. (2025). Nature-based Solutions for Water Management in Europe: What Works, What Does Not, and What's Next?, *MDPI Water*, 17(15), 2193.
- 6) Hale, S., von der Tann, L., Rebelo, A. J., Esler, K. J., de Lima, A. P. M., Rodrigues, A. F., Latawiec, A. E., Ramírez-Agudelo, N. A., Bosch, E. R., Suleiman, L., ... & others. (2023). Evaluating Nature-Based Solutions for Water Management in Peri-Urban Areas. *MDPI Water*, 15(5), 893. <https://doi.org/10.3390/w15050893>
- 7) Yang, Z., Barroca, B., Mebarki, A., Laffréchine, K., Dolidon, H., & Lilas, L. (2024). Critical infrastructure resilience: a guide for building indicator systems based on a multi-criteria framework with a focus on implementable actions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 3723–3753. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-3723-2024>
- 8) Imig, A., Perosa, F., Hotta, C. I., Klausner, S., Welsh, K., Zheng, Y., & Rein, A. (2024). Technical assessment combined with an extended cost-benefit analysis for the restoration of groundwater and forest ecosystem services – an application for Grand Bahama. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28, 5459–5478. <https://doi.org/10.5194/hess-28-5459-2024>
- 9) Digkoglou, P., & Papathanasiou, J. (2024). Application of multiple criteria decision aiding in environmental policy-making processes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(10), 6967–6982. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06101-w>





- 10) Water sector infrastructure systems resilience: A social-ecological-technical system-of-systems and whole-life approach. Cambridge Prisms: Water, 1, e4. <https://doi.org/10.1017/wat.2023.3>
- 11) Yang, Z., Barroca, B., Mebarki, A., Laffréchine, K., Dolidon, H., & Lilas, L. (2024). Critical infrastructure resilience: a guide for building indicator systems based on a multi-criteria framework with a focus on implementable actions. Natural Hazards and Earth System Sciences, 24, 3723–3753. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-3723-2024>