

ارزیابی سناریوهای ترکیبی الگوی کشت و تأمین نیاز زیست محیطی از منظر شاخص های اقتصادی، اجتماعی و منابع آبی در پایین دست سد کرخه

چکیده

مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک با چالش هایی چون محدودیت منابع، نیازهای زیست محیطی، فشارهای اجتماعی و اقتصادی مواجه است. تعادل میان تأمین نیاز زیست محیطی، عدالت اجتماعی و بهره وری اقتصادی اهمیت بالایی دارد. این پژوهش به شبیه سازی و ارزیابی عملکرد سناریوهای مختلف تأمین نیاز زیست محیطی و الگوی کشت پایین دست سد کرخه بر اساس شاخص های اقتصادی، اجتماعی و منابع آبی پرداخته است. دوره ی ۲۲ ساله ی بهره برداری از مخزن کرخه (۱۳۸۰-۱۴۰۲) به عنوان بازه زمانی مطالعه در نظر گرفته شد. در این تحقیق، سناریوهای مختلف تأمین آب پایین دست سد کرخه با استفاده از شبیه سازی نیازهای کشاورزی و زیست محیطی بررسی شده اند. برای بررسی اثر الگوهای کشت بر معیارهای ارزیابی منابع آب، سه سال آبی خشک (۱۳۹۶-۱۳۹۷)، نرمال (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و ترسالی (۱۳۹۹-۱۳۹۸) به ترتیب به عنوان حداقلی، نرمال و حداکثری در نظر گرفته شدند. همچنین تأمین نیاز زیست محیطی در سه سناریوی عالی، خوب و متوسط بررسی شد. نتایج نشان داد که در الگوی حداقلی، به دلیل سطح زیر کشت پایین تر، شاخص تأمین پذیری و ناعدالتی اجتماعی شرایط مطلوب تری داشتند. در سناریوی عالی، شاخص تأمین پذیری از ۱۰۰ به ۷۶.۳۳ درصد کاهش و کمبود از ۰ به ۲۰.۳۲ درصد افزایش یافت. با این حال، ارزش اقتصادی حدود ۲۵۶۰ همت کمتر از الگوی حداکثری بود. در همین سناریو با کشت حداکثری، تأمین پذیری به ۵۳.۹۱ درصد کاهش و کمبود به ۴۲.۰۴ درصد افزایش یافت. همچنین ناعدالتی اجتماعی بیشتر شد. با وجود تنش بیشتر، ارزش اقتصادی به ۷۴۴۱.۹۴ همت رسید. نتایج بر لزوم تعادل میان نیازهای زیست محیطی، بهره برداری اقتصادی و عدالت اجتماعی تأکید دارد.

کلید واژه : الگوی کشت، شاخص عدالت اجتماعی شبیه سازی منابع آب، نیاز زیست محیطی

Performance Evaluation of Combined Scenarios of Cropping Patterns and Environmental Water Supply from the Perspective of Economic, Social, and Water Resource Indicators in the Downstream of the Karkheh Dam

Water resources management in arid and semi-arid regions is confronted with challenges such as limited availability, environmental demands, and socio-economic pressures. Achieving a balance between environmental needs, social equity, and economic efficiency is of critical importance. This study simulates and evaluates the performance of various scenarios for supplying environmental

water demands and cropping patterns downstream of the Karkheh Dam, using economic, social, and water resource indicators. The 22-year operational period of the Karkheh reservoir (2001–2023) was selected as the study timeframe. In this research, various water supply scenarios downstream of the Karkheh Dam were examined through simulation of agricultural and environmental water demands. To assess the effect of cropping patterns on water resource evaluation criteria, three hydrological years—dry (2017–2018), normal (2020–2021), and wet (2019–2020)—were considered as minimum, normal, and maximum conditions, respectively. Environmental demand satisfaction was analyzed under three scenarios: optimal, favorable, and moderate. The results indicated that in the minimum cropping pattern, due to the smaller cultivated area, the supply reliability and social equity indicators showed more favorable outcomes. In the optimal environmental scenario, supply reliability decreased from 100 percent to 76.33 percent, and water deficit increased from 0 to 20.32 percent. However, the economic value was approximately 2,560 trillion IRR lower than in the maximum cropping pattern. Under the same scenario with maximum cropping, supply reliability dropped to 53.91 percent and the deficit rose to 42.04 percent, with increased social inequality. Despite greater stress, the economic value reached 7,441.94 trillion IRR. The findings highlight the necessity of balancing environmental requirements, economic productivity, and social justice.

Keywords: Cropping Pattern, Social Equity Index, Water Resources Simulation, Environmental Water Demand

۱. مقدمه

مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه پایدار به شمار می‌رود. آب به‌عنوان منبعی حیاتی و محدود، نقشی اساسی در تأمین امنیت غذایی، اقتصادی و اجتماعی ایفا می‌کند. با افزایش جمعیت، وقوع تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های موجود در منابع آبی، نیاز به رویکردهای کارآمد برای بهره‌برداری بهینه از این منابع، بیش از پیش احساس می‌شود (Mohammadian et al., 2008). مناطق پایین‌دست سدها، به دلیل وابستگی مستقیم به مدیریت منابع آبی و نقش کلیدی آن‌ها در تأمین نیازهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، نیازمند بررسی‌های دقیق‌تری هستند. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های مدیریت کشاورزی، طراحی الگوهای کشت است که بهره‌وری منابع را افزایش دهد و در عین حال، تأثیرات منفی زیست‌محیطی را کاهش دهد. الگوهای کشت بهینه که نیاز زیست‌محیطی اکوسیستم‌ها را در کنار اهداف اقتصادی و اجتماعی مدنظر قرار می‌دهند، می‌توانند گامی مهم در تحقق توسعه پایدار باشند. این رویکرد، به‌ویژه در مناطقی مانند پایین‌دست سد کرخه، با توجه به اثرات تغییرات اقلیمی و فشار فزاینده بر منابع آب، اهمیت دوچندانی دارد (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۲). تأمین نیازهای زیست‌محیطی رودخانه‌ها، همراه با مدیریت پایدار منابع آب برای کشاورزی، مستلزم اتخاذ راهکارهایی جامع و متعادل است. ارزیابی عملکرد سناریوهای ترکیبی الگوهای کشت، که در آن نیازهای زیست‌محیطی، شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی، و بهره‌وری منابع آبی به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند، می‌تواند راهنمای مؤثری برای تصمیم‌گیران باشد. پایین‌دست سد کرخه، به‌عنوان یکی از مناطق استراتژیک کشاورزی کشور، نیازمند سناریوهایی است که هم‌زمان بهره‌وری آب، پایداری زیست‌محیطی و توسعه اجتماعی-اقتصادی را تضمین کند (شیبانی، ۱۳۹۶).

طراحی و بهینه‌سازی الگوهای کشت با هدف بهره‌وری منابع آب و کاهش اثرات زیست‌محیطی یکی از موضوعات کلیدی در تحقیقات اخیر بوده است. در این راستا، مطالعات متعددی به بررسی و توسعه الگوهای کشت و مدیریت منابع آب پرداخته‌اند. (Femeena et al. (2018) با استفاده از مدل SWAT¹ و الگوریتم ژنتیک نشان دادند که حذف بقایای ذرت و کاشت گیاهان پایدار می‌تواند نیتрат و فسفر را کاهش داده و تولید بیوانرژی را تضمین کند. (Shaabani et al. (2024) نیز با بهره‌گیری از مدل‌های SWAT، WEAP² و MODFLOW³ به این نتیجه رسیدند که با کاشت گیاهان کم‌مصرف و بهبود راندمان آبیاری می‌تواند سطح آب زیرزمینی را پلیدارتر کند. (Yazdandoost et al (2022) با تمرکز بر نقش آب مجازی⁴ در بهینه‌سازی الگوی کشت نشان دادند که می‌توان کاهش ۵۴ درصدی مصرف آب کشاورزی، افزایش ۱۰ درصدی در کل ذخیره مخزن و کاهش ۳۰ درصدی کمبود را محقق کرد. رفیعی و همکاران (۱۳۹۶) نیز در تحقیق خود با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم جستجوی هارمونی⁵ توانستند مصرف آب را در طی دو سناریو به ترتیب ۲۸ درصد و ۴۹ درصد کاهش دهند و سود خالص را به ترتیب به ۳۱۴ درصد و ۲۳ درصد افزایش دهند. اسلامی و همکاران (۱۴۰۳) در دشت قادرآباد-مادرسلیمان نشان دادند که اصلاح الگوی کشت می‌تواند مصرف آب را ۲۶ درصد کاهش داده و بهره‌وری اقتصادی را ۳۹.۴ درصد افزایش دهد. مدیریت منابع آبی در مخازن سدها با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی از دیگر جنبه‌های مهم مطالعات اخیر است. (Ngamsert and Kangrang (2022) با استفاده از الگوریتم رفتار شکارچیان دریایی⁶ و شبیه‌سازی مخزن نشان دادند که مدیریت ته‌نشینی و قوانین رهاسازی آب می‌تواند کمبود آب را کاهش دهد. بشاورد و همکاران (۱۴۰۱) نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۷ و سیاست بهره‌برداری جیره‌بندی در سد جره توانستند شاخص کمبود اصلاح شده را پیش از ۴۰ درصد نسب به سیاست بهره‌برداری استاندارد کاهش داده و به بهبود شاخص اعتماد پذیری را بهبود بخشند. Hatamkhani and Moridi (2019) با استفاده از مدل‌های WEAP و MOPSO^۸، نشان دادند که منحنی پارتو بهترین تعادل را بین تولید انرژی برق آبی و توسعه کشاورزی در حوضه رودخانه کشکان برقرار می‌کند. این فرآیند سبب افزایش ۸ درصدی تولید انرژی برق آبی و افزایش ۵ برابری سطح زیر کشت نسبت به شرایط موجود شده است. Techarungruengsakul and Kangrang (2023) با استفاده از الگوریتم شاهین هریس^۹، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی باد محور^{۱۰}، کمبود آب متوسط سالانه به ترتیب به ۴.۸ درصد، ۴.۷ درصد و ۴.۵ درصد کاهش یافت. تحقیقات پیرامون شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی نیز نشان داد که تغییرات در الگوی کشت و مدیریت منابع می‌تواند اثرات مثبتی در بهبود پایداری منابع آب داشته باشد. Özcan

¹ Soil and Water Assessment Tool

² Water Evaluation and Planning

³ Modular Finite Difference Groundwater Flow Model

⁴ Virtual Water

⁵ Harmony Search Algorithm

⁶ Marine Predators Algorithm

⁷ Genetic Algorithm

⁸ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

⁹ Harris Hawk Optimization Algorithm

¹⁰ Wind-driven Optimization

(2023) چارچوبی جامع برای ارزیابی پایداری در ارتباط با آب، انرژی، غذا و اکوسیستم^{۱۱} ارائه کرد که بر اهمیت استراتژی‌های کشاورزی پایدار در مواجهه با تغییرات اقلیمی تأکید دارد. (Shrestha et al. (2021 در اسکاتلند، اثرات اقتصادی روش‌های مدیریت زیست‌محیطی را بررسی کردند و دریافتند که روش‌های کاهش مصرف نهاده‌ها و ایجاد مناطق اکولوژیکی سودآورتر هستند. (Darzi et al. (2023 با مدل چندهدفه^{۱۲} و ارزیابی چرخه عمر^{۱۳} به بهینه‌سازی الگوی کشت پرداختند و کاهش ۱۵.۲ درصد در مساحت کشت‌شده را همراه با بهبود شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی گزارش کردند. جعفری و همکاران (۱۴۰۲) در دشت کبودراهنگ نشان دادند که سیاست‌های اصلاح الگوی کشت با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی^{۱۴} باعث افزایش بهره‌وری آب و خودکفایی در تولید گندم می‌شود. نتایج نشان داده است که برای اجرای الگوی بهینه کشت، کاهش بهره‌برداری به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد ضروری است.

در این پژوهش، با هدف ارزیابی سناریوهای مختلف الگوی کشت و تأمین نیاز زیست‌محیطی شبیه‌سازی منابع آب برای الگوهای کشت موجود در سال‌های ۱۳۹۶، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به ترتیب به عنوان سال‌های خشک، نرمال و متوسط در پایین‌دست سد کرخه با استفاده از سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) انجام گرفته است. همچنین، شاخص‌های منابع آبی، اجتماعی و اقتصادی برای هر یک از سناریوها ارزیابی شده و یک تحلیل جامع از عملکرد این الگوهای کشت در بازه زمانی مذکور ارائه گردیده است.

۲. داده و روش‌ها

این بخش به معرفی داده‌ها و روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی منابع آب، نیازهای زیست‌محیطی و شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی می‌پردازد. ابتدا منطقه مورد مطالعه، شامل پایین‌دست سد کرخه و شبکه‌های آبیاری پایین دست، توصیف شده و سپس داده‌های ورودی شامل جریان‌های آب، نیاز آبی گیاهان و اطلاعات کشاورزی ارائه می‌شود. همچنین، روش‌های شبیه‌سازی منابع آب، به‌ویژه سیاست بهره‌برداری SOP^{۱۵} و شاخص‌های ارزیابی همچون نا عدالتی اجتماعی، ارزش اقتصادی کشت، اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری مورد بحث قرار می‌گیرند. این روش‌ها و شاخص‌ها، امکان تحلیل جامع و دقیق تأثیر سناریوهای مختلف تأمین آب و مدیریت الگوی کشت را فراهم می‌کنند.

¹¹ Nexus of Water, Energy, Food, and Ecosystems (WEFE Nexus)

¹² Multi-objective Model

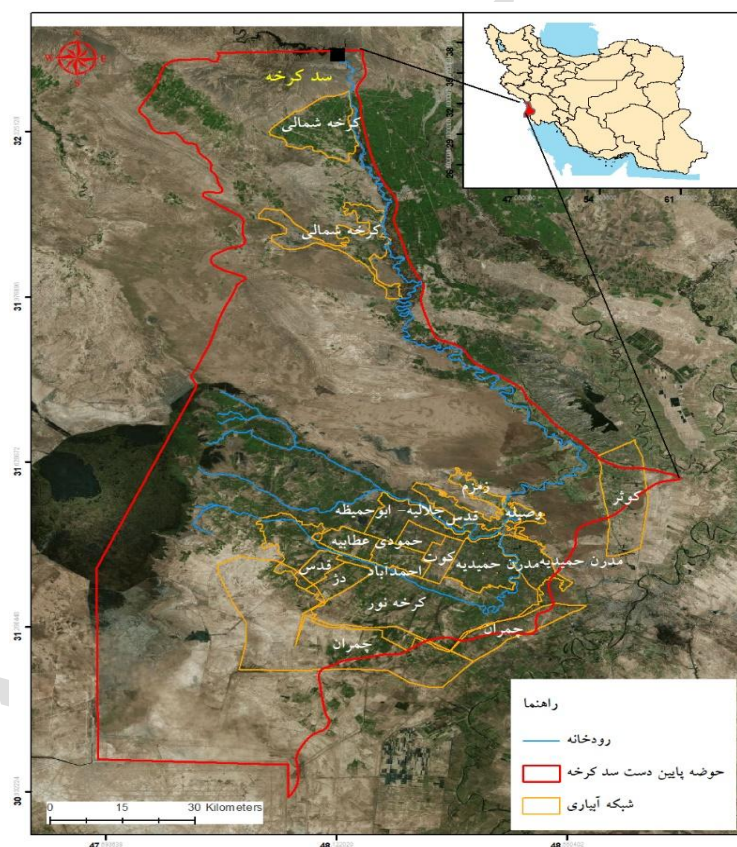
¹³ Life Cycle Assessment

¹⁴ Linear Programming

¹⁵ Standard Operating Procedure

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز پایین دست سد کرخه در بخش انتهایی رودخانه کرخه و حد فاصل خروجی سد کرخه تا هورالعظیم قرار دارد. این حوضه در مختصات جغرافیایی طول‌های ۴۷ تا ۴۹ شرقی و عرض‌های ۳۱ تا ۳۲ شمالی واقع شده و مساحتی معادل ۸۳۷۸ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. در شکل (۱) نمایی از منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.



شكل ١. منطقة مورد مطالعة

شبکه‌های آبیاری موجود در منطقه مورد مطالعه و مشخصات آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات شبکه های آبیاری حوضه پایین دست سد کرخه

شهرستان	مساحت (هکتار)	شبهه	شهرستان	مساحت (هکتار)	شبهه
هویزه	۹۵۵۴	قدس	هویزه	۵۳۳۰	احمد آباد
شوش	۲۸۱۴۶	کرخه شمال	دشت آزادگان	۴۱۱۶۲	تلفیقی کرخه
هویزه	۶۵۶۹۱	کرخه نور	دشت آزادگان	۸۸۰۳	جلالیه_ابرو حمیظه
دشت آزادگان	۴۴۵۲	کوت	اهواز	۹۳۵۲	چمران
اهواز	۱۷۴۶۳	کوثر	دشت آزادگان	۳۵۸۴	حمودی

حمیدیه	۱۸۶۷۰	مدرن حمیدیه	هویزه	۵۱۸۶	دژ
حمیدیه	۲۰۲۲	وصیله	دشت آزادگان	۲۶۸۷	زمزم
			هویزه	۴۹۹۳	عطابیه

۲.۲. داده

۱.۲.۲. جریان ورودی به حوضه

در این پژوهش، داده دبی ورودی و حجم ذخیره سد کرخه در بازه زمانی سال‌های آبی ۱۳۸۰-۱۴۰۲، با استفاده از روش بیلان معکوس مورد استفاده قرار گرفته است. این روش با در نظر گرفتن تغییرات حجم ذخیره و میزان خروجی اندازه‌گیری شده برآورد دقیقی از میزان ورودی به مخزن ارائه می‌دهد. این اطلاعات از سازمان آب و برق خوزستان دریافت شده است.

۲.۲.۲. نیاز آبی

نیاز آبی گیاهان از سند ملی آب کشور توسط سامانه نیاز آبی گیاهان استخراج شده و بر حسب Mm^3/h (میلیون متر مکعب بر هکتار) ارائه می‌شود. (سامانه نیاز آبی گیاهان کشور) این داده به صورت دوره‌های ۱۰ روزه برآورد شده است. این سامانه اطلاعات تبخیر و تعرق گیاهان را بر اساس داده ۳۰ ساله هواشناسی و با روش پنمن-مانتیث فائو^{۱۶} محاسبه می‌کند (Allen et al 1998).

۳.۲.۲. داده کشاورزی

شامل سطح زیر کشت (هکتار)، تولید (تن) و قیمت فروش محصولات کشاورزی در شهرستان‌های اهواز، شوش، دشت آزادگان، حمیدیه و سوسنگرد می‌باشد که از آمارنامه‌های کشاورزی سال ۱۴۰۱ گزارش شده است. همچنین داده سطح زیر کشت و نوع محصولات از سازمان آب و برق خوزستان برای سال آبی خشک (۱۳۹۷-۱۳۹۶)، نرمال (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و ترسالی (۱۳۹۸-۱۳۹۹) به ترتیب به عنوان الگوی کشت حداقلی، نرمال و حداکثری تهیه که برای بررسی الگوی کشت منطقه و شناسایی روند تغییرات استفاده شده است.

۴.۲.۲. زیست محیطی

مقدار جریان زیست محیطی تالاب هورالعظیم با استفاده از روش مونتانا (تنانت) اصلاح شده^{۱۷} و تحلیل فراوانی جریان، به صورت توزیع ماهانه و بر حسب میلیون متر مکعب (Mm^3) برآورد شده است. این مقدار، که در قالب چهار سناریوی بدونه نیاز زیست محیطی، خوب، متوسط و عالی به ترتیب برابر با ۰، ۱۴۶۷، ۱۶۴۷ و ۱۸۰۷ میلیون متر مکعب در سال تعیین شده

^{۱۶} FAO Penman-Monteith

^{۱۷} Modified Montana (Tennant) Method

است (قمشی و حمادی، ۱۴۰۳). در این مطالعه، از نتایج این برآورد به عنوان ورودی برای تحلیل های مرتبط با مدیریت منابع آبی استفاده شده است. نتایج این مطالعه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. مقدار نیاز زیست محیطی در سناریو های مختلف (میلیون متر مکعب)

شماره سناریو	سناریو	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
۱	بدون نیاز زیست محیطی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	خوب	۳۵	۵۷	۹۱	۹۰	۱۸۰	۲۴۶	۳۳۵	۲۳۹	۷۲	۴۷	۴۰	۳۶	۱۴۶۷
۳	متوسط	۳۹	۶۴	۱۰۲	۱۰۱	۲۰۳	۲۷۶	۳۷۶	۲۶۸	۸۱	۵۲	۴۴	۴۱	۱۶۴۷
۴	عالی	۴۳	۷۰	۱۱۲	۱۱۰	۲۲۲	۳۰۳	۴۱۳	۲۹۴	۸۹	۵۷	۴۹	۴۴	۱۸۰۷

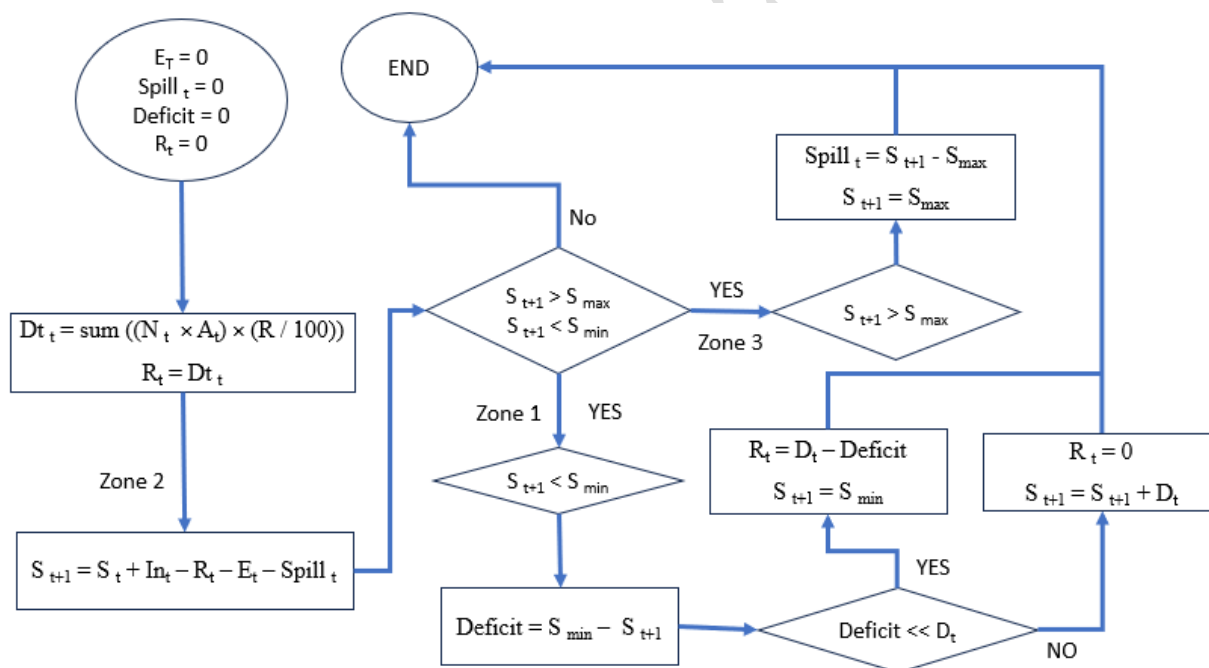
۳.۲. روش شناسی

۱.۳.۲. شبیه سازی منابع آب

در این پژوهش، از سیاست بهره برداری استاندارد (SOP) به عنوان یک روش ساده و مؤثر برای مدیریت مخازن آب استفاده شده است. روش SOP با استفاده از یک فلوچارت ساده، فرآیند تصمیم گیری برای ذخیره سازی و رهاسازی آب را در هر دوره زمانی شبیه سازی می کند. این مدل مخزن را به سه Zone عملیاتی تقسیم می کند: Zone 1 ناحیه ای که در آن کمبود آب وجود دارد و به دلیل عدم تأمین نیازها، این دوره به عنوان دوره شکست شناخته می شود. Zone 2 ناحیه ای که شرایط عادی در مخزن برقرار است و نیازهای آبی به صورت معمول تأمین می شود. Zone 3 ناحیه ای که سطح آب مخزن از حد مجاز بالاتر رفته و سرریز رخ می دهد (Ahamad and Simonvic 2000).

در شکل (۲)، نمایی از نحوه عملکرد این سیاست به تصویر کشیده شده است. فرآیند به شرح زیر است: فرض اولیه بر این اساس است که مخزن سد خالی می باشد. در ابتدا، برای دوره های ۱۰ روزه (t) میزان نیاز آبی کل محصولات (D_t) بر اساس مقدار نیاز گیاهان (N_t) و سطح زیر کشت (A_t) محاسبه می شود. به منظور اطمینان از تأمین این مقدار آب برای گیاهان، ۶۰ درصد راندمان سیستم انتقال و توزیع در نظر گرفته شده و این راندمان در محاسبه مقدار کل نیاز آبی لحاظ می شود و حال ذخیره دوره بعدی (S_{t+1}) با توجه به آب ورودی (In_t) و میزان خروجی (O_t) تعیین می گردد. خروجی شامل مواردی مانند رهاسازی، تبخیر از سد، و سرریز از سد است. در ابتدا، فرض می شود که سد در Zone 2 قرار دارد، یعنی حجم ذخیره بین حداقل ذخیره (S_{min}) و حداکثر ذخیره (S_{max}) است. مقدار رهاسازی (R_t) برابر با نیاز آبی (D_t) در نظر گرفته می شود و سپس ذخیره دوره بعد (S_{t+1}) بررسی می شود، اگر S_{t+1} بین S_{min} و S_{max} باشد، فرض اولیه صحیح است و فرآیند در این مرحله به

پایان می‌رسد. اگر S_{t+1} کمتر از S_{min} باشد، مخزن در Zone 1 قرار می‌گیرد. در این حالت، کمبود (Deficit) محاسبه شده و R_t کاهش می‌یابد. اگر کمبود بسیار زیاد باشد، ممکن است R_t حتی به صفر برسد تا ذخیره تنظیم شود. اگر S_{t+1} بیشتر از S_{max} باشد، مخزن در Zone 3 قرار می‌گیرد. در این حالت، مقدار سرریز ($Spill_t$) محاسبه شده و حجم ذخیره به سطح مجاز S_{max} کاهش می‌یابد. این فرآیند تا زمانی که شرایط ذخیره‌سازی پایدار شود، تکرار می‌شود.



E_t = تبخیر در دوره t (میلیون متر مکعب)	Dt_t = نیاز آبی کل محصولات در دوره t (میلیون متر مکعب)
$Spill_t$ = سرریز در دوره t (میلیون متر مکعب)	N_t = نیاز آبی هر گیاه در دوره t (میلیون متر مکعب بر هکتار)
R_t = رها سازی در دوره t (میلیون متر مکعب)	A_t = سطح زیر کشت هر گیاه در دوره t (هکتار)
Deficit = کمبود	R = راندمان سیستم انتقال و توزیع (۶۰ درصد)
S_{min} = حداقل حجم ذخیره سد (میلیون متر مکعب)	t = دوره زمانی (هر ۱۰ روز)
S_{t+1} = حجم ذخیره سد در دوره $t+1$ (میلیون متر مکعب)	S_{max} = حداکثر حجم ذخیره سد (میلیون متر مکعب)

شکل ۲. عملکرد سیاست SOP

در شکل (۳)، پیکربندی منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. در این شکل، یک گره اجباری در پایین دست منطقه (هورالعظیم) برای تأمین نیازهای زیست محیطی تعریف شده است. این گره نیاز زیست محیطی ماهانه را دریافت می‌کند، اما برای انطباق با گام‌های زمانی ۱۰ روزه، مقدار ماهانه به‌طور مساوی بین سه دوره ۱۰ روزه تقسیم می‌شود. سیستم ابتدا مکلف

به تأمین این نیاز در انتهای شبکه است و سپس به تأمین سایر نیازها می‌پردازد. هدف از این رویکرد، ارزیابی تأثیر سناریوها بر پایداری منابع آب و حفظ شرایط زیست‌محیطی رودخانه است.



شکل ۳. پیکره بندی منطقه مورد مطالعه

۲.۳.۲. شاخص‌های ارزیابی

در این بخش، شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی عملکرد سیستم مدیریت منابع آب معرفی شده‌اند. این شاخص‌ها شامل نا عدالتی اجتماعی، ارزش اقتصادی کشت، اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، و انحراف از نیاز است. هدف از این شاخص‌ها، بررسی تأثیر سناریوهای مختلف بر توزیع عادلانه منابع، سودآوری، حفظ شرایط زیست‌محیطی، و پایداری سیستم است.

* اعتمادپذیری

اعتمادپذیری به احتمال تأمین نیاز آبی پایین‌دست بدون شکست اشاره دارد. این شاخص بیانگر درصد تأمین نیاز آبی در طول دوره‌های زمانی مختلف است. اعتمادپذیری به دو مقدار رضایت‌بخش (S) و نارضايت‌بخش (F) تقسیم می‌شود، که در حالت مطلوب نیازها به طور کامل برآورده می‌شود.

$$\alpha_Q = \frac{\sum_{t=1}^T R_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱)، α_Q نشان‌دهنده نسبت تأمین آب به کل نیازهاست و به عنوان معیاری برای سنجش کارایی سیستم مدیریت منابع آب به کار می‌رود. در این فرمول، R_t حداقل مقدار تخصیص داده شده در دوره t ، D_t مقدار نیاز در دوره t و T نمایانگر

افق برنامه ریزی شامل تعداد دوره‌های زمانی $(t=1,2,...,T)$ است.

* برگشت پذیری

برگشت‌پذیری توانایی یک سیستم برای بازگشت از حالت شکست به وضعیت رضایت‌بخش است. در این تحلیل، سیستم از دو حالت مطلوب (S) و نامطلوب (F) تشکیل می‌شود. اگر سیستم به‌طور پیوسته در وضعیت S باشد، عملکرد آن رضایت‌بخش است. نرخ برگشت‌پذیری، معیاری از احتمال بازگشت سیستم از حالت نامطلوب به مطلوب در طی یک دوره زمانی معین است و با نماد γ تعریف می‌شود.

$$\gamma = \frac{\text{prob}\{X_t \in S \text{ and } X_{t+1} \in S\}}{\text{prob}\{X_t \in F\}} = \text{prob}\{X_{t+1} \in S \mid X_t \in F\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه (۲)، X_t نشان‌دهنده حالت سیستم منابع آب در دوره زمانی t و X_{t+1} نشان‌دهنده حالت سیستم منابع آب در دوره زمانی $t+1$ می‌باشد.

* مجموع نسبی یکطرفه مربع انحرافات از نیاز

این شاخص Φ برای سنجش انحراف نسبی تخصیص آب از نیاز واقعی است و به‌طور خاص به مواقعی توجه دارد که تخصیص کمتر از نیاز باشد.

$$\Phi = \left(\sum_{t=1}^T (D_t - R_t)^2 \right) \div \left(\sum_{t=1}^T D_t^2 \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)، هرچه مقدار Φ کمتر باشد، انحراف تخصیص از نیاز کمتر و عملکرد سیستم بهتر است.

* درصد کمبود

این شاخص نشان‌دهنده درصد دوره‌هایی می‌باشد که سیستم قادر به تأمین نیاز آبی نبوده است و همچنین پایداری سیستم را ارزیابی می‌کند.

$$\text{رابطه (۴)} \quad \text{درصد کمبود} = 100 \times \left(\frac{\text{تعداد کمبود}}{T} \right)$$

در فرمول (۴)، T تعداد کل دوره های آماری است.

* درصد تأمین

نسبت نیازهای آبی تأمین شده به کل نیازها. هرچه بالاتر باشد، سیستم کارآمدتر است.

$$\text{رابطه (۵)} \quad \text{درصد تأمین} = 100 \times \left(\frac{\sum_{t=1}^T D_t - De_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \right)$$

در فرمول (۵)، De_t مقدار کمبود در دوره t ، (Hashimoto et al., 1982)

* ناعدالتی اجتماعی

این شاخص با هدف بیان میزان برقراری عدالت اجتماعی در میان مصرف کنندگان مختلف تعریف شده است. این شاخص میزان تفاوت در نسبت سطح زیر کشت بین شبکه‌های آبیاری مختلف را به عنوان شاخصی از برقراری عدالت اجتماعی نشان می‌دهد. در شرایط کم‌آبی، توزیع ناعادلانه منابع آبی می‌تواند منجر به ناعدالتی و تنش‌های اجتماعی شود. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\gamma = \frac{100}{2n} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_i}{A_i} - \frac{a_j}{A_j} \right)^2 \right) \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)، a_i سطح زیر کشت زمین i ، A_i پتانسیل سطح زیر کشت زمین i ، n تعداد کل زمین‌ها و γ شاخص ناعدالتی اجتماعی است. مقدار این شاخص بین ۰ تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. مقادیر بیشتر این شاخص نشان دهنده ناعدالتی بیشتر در منطقه مورد مطالعه خواهد بود.

* ارزش اقتصادی کشت

شاخص ارزش اقتصادی کشت (α) کل درآمد کشاورزی را بر اساس حاصل ضرب عملکرد هر محصول، قیمت واحد آن و سطح زیر کشت محاسبه می‌کند. این شاخص با جمع درآمد حاصل از تمامی محصولات کشت شده، به عنوان شاخصی برای ارزیابی درآمد حاصل از کشاورزی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر این شاخص با واحد همت (هزار میلیارد تومان) گزارش می‌شود.

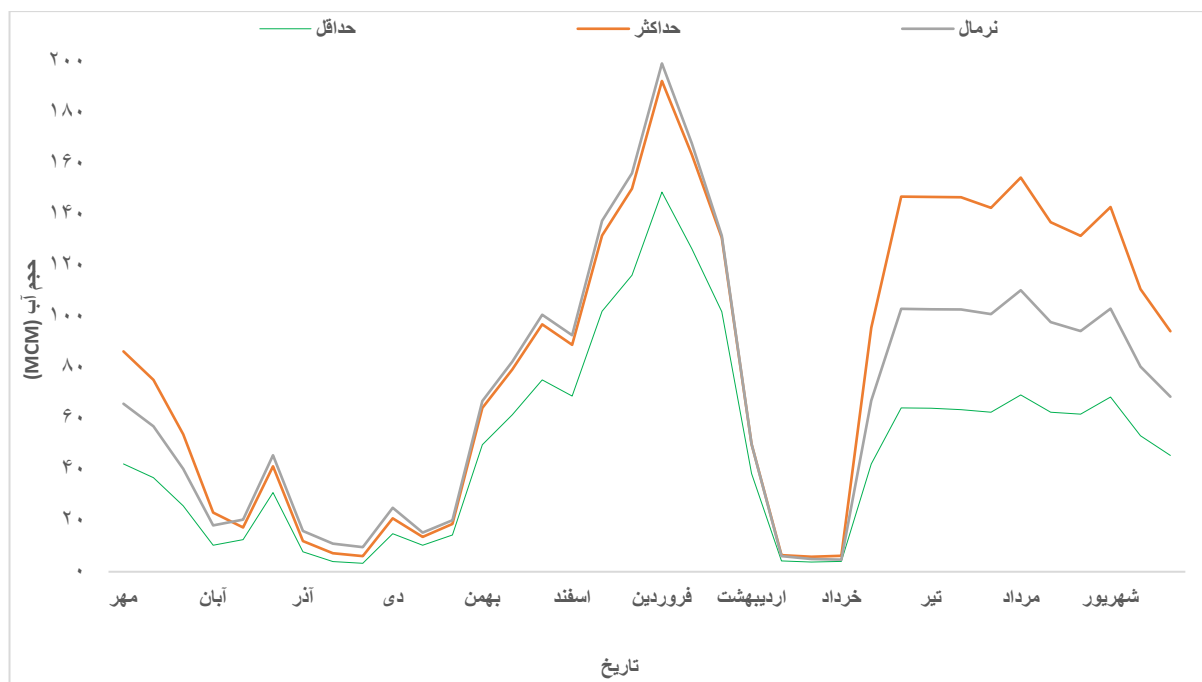
$$\alpha = \sum_{i=1}^n (A_i \times P_i \times Y_i) \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه (۷)، Y_i عملکرد محصول i (کیلوگرم در هکتار)، P_i قیمت واحد محصول i (ریال به ازای هر کیلوگرم)، A_i سطح زیر کشت محصول i (هکتار)، n تعداد محصولات مختلف و α شاخص ارزش اقتصادی کشت است.

۳. نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌ها چهار سناریوی زیست محیطی (جدول ۲) برای الگوی کشت های حداقلی، نرمال و حداکثری ارائه شده است. همچنین شبیه‌سازی مخزن سد کرخه از منظر رهاسازی، حجم ذخیره و نیاز آبی پایین‌دست برای هر سناریو برای دوره ۲۲ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲) مورد ارزیابی گرفته است. تأثیر الگوهای کشت بر شاخص‌هایی همچون درصد تأمین، اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، شاخص نا عدالتی اجتماعی و شاخص ارزش اقتصادی کشت ارائه گردیده است. در هر شبیه‌سازی میزان رهاسازی آب، حجم ذخیره سد، و نیاز آبی پایین‌دست محاسبه شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، الگوی کشت مربوط به هر سال به‌طور ثابت در طول دوره تکرار گردیده است. تغییرات شاخص‌های ارزیابی برای هر سال نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی این نتایج امکان شناسایی تفاوت‌ها و شباهت‌های میان سناریوهای مختلف را فراهم می‌کند. و به انتخاب بهترین استراتژی برای بهره‌وری بهینه و مدیریت منابع آبی کمک می‌کند. علاوه بر این، نتایج ارائه‌شده تأثیرات بلندمدت الگوهای کشت مختلف بر منابع آبی منطقه مورد مطالعه را مقایسه می‌کند.

نیاز آبی پایین‌دست برای الگوی کشت سال‌های حداقلی، نرمال و حداکثری در شکل (۴) ارائه شده است. مقایسه این سه الگو نشان می‌دهد که در الگوی کشت حداکثری و نرمال، نیاز پایین‌دست نسبت به الگوی حداقلی افزایش یافته و فشار بیشتری را بر منابع آب وارد می‌کند. همچنین بررسی الگوهای کشت حاکی از آن است که بیشترین حجم نیاز آبی ماهانه در الگوی کشت نرمال و در ماه فروردین، معادل ۲۰۰ میلیون متر مکعب (Mm^3) بوده است. با این حال، در مجموع سالانه، الگوی کشت حداکثری دارای بیشترین نیاز آبی است. همچنین لازم به ذکر است که به‌طور کلی، بیشترین نیاز آبی گیاهان در هر سه الگو در ماه فروردین و حداقل نیاز آبی در ماه خرداد (معادل صفر Mm^3) رخ داده است.

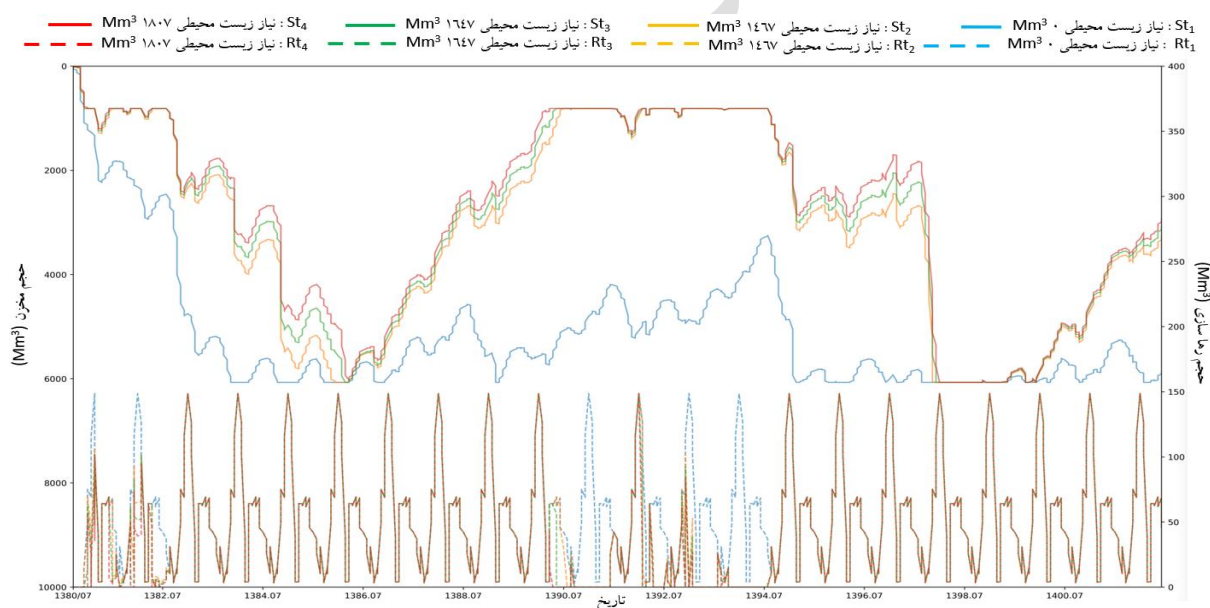


شکل ۴. نیاز پایین دست برای یک سال آبی در الگوی های کشت حداقل، نرمال و حداکثر

۱.۳ نتایج شبیه سازی

در شکل (۵)، نتایج شبیه سازی عملکرد مخزن سد کرخه برای الگوی کشت حداقلی در چهار سناریوی تأمین نیاز زیست محیطی نمایش داده شده است. مطابق نتایج، بیشترین میزان کمبود آب در این الگو مربوط به سناریوی ۴ (با نیاز زیست محیطی حداکثری) است. در این سناریو، به دلیل تخصیص بخشی از آب به مصارف زیست محیطی، بخشی از تقاضای کشاورزی بی پاسخ مانده و کمبود ایجاد شده است. در مقابل، سناریوی ۱ (بدون نیاز زیست محیطی) با تأمین کامل کشاورزی، بالاترین سطح رهاسازی آب به پایین دست را در کل دوره شبیه سازی ثبت کرده است. به طور کلی، در الگوی کشت حداقلی، به دلیل کاهش سطح زیر کشت و به تبع آن نیاز آبی پایین دست، میزان کمبود در تمامی سناریوها نسبت به سایر الگوهای کشت کمتر بوده و شاخص تأمین پذیری در وضعیت بهتری قرار دارد. بررسی روند سالانه ذخیره مخزن نشان می دهد که در بازه ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۶، حجم ذخیره در تمامی سناریوها افزایش یافته و نیازهای کشاورزی و زیست محیطی به خوبی پاسخ داده شده اند. این وضعیت ناشی از جریان ورودی مناسب به مخزن در آن سالها بوده است. اما از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰، کاهش چشمگیر حجم ورودی باعث افت محسوس ذخیره مخزن شده و در اکثر سناریوها، سطح ذخیره به حداقل های بحرانی نزدیک شده است. در این دوره، تأمین هم زمان نیازها با چالش مواجه شده و در سناریوهای سطح بالا (۳ و ۴)، کمبودها

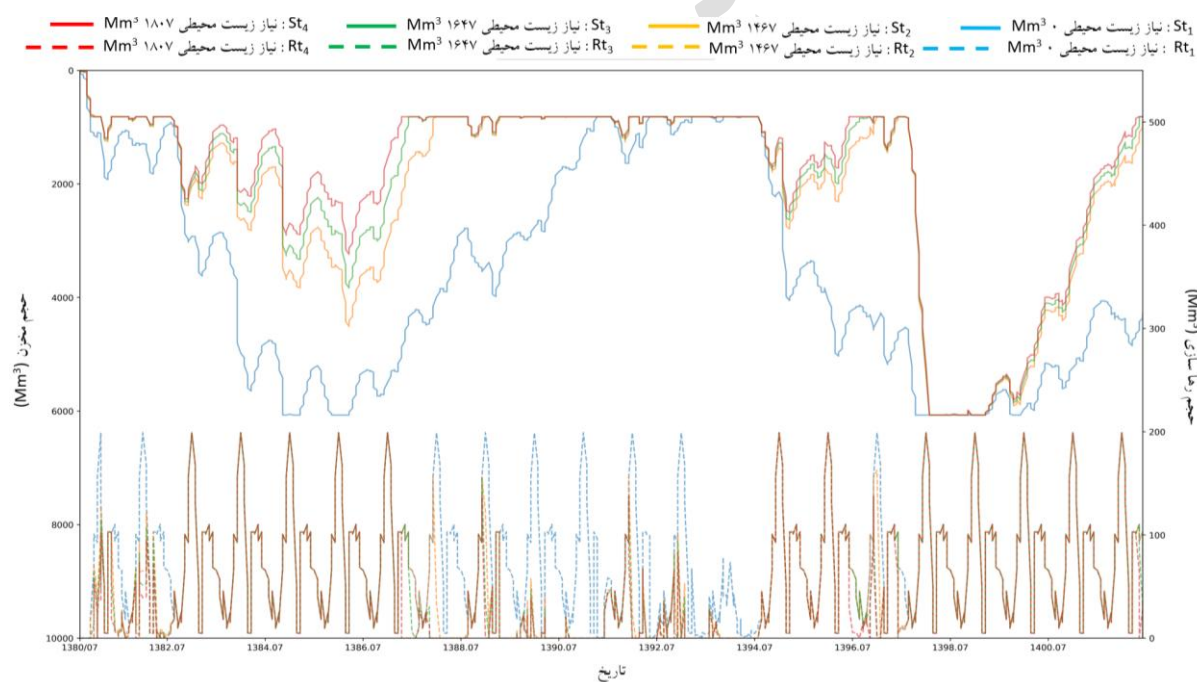
افزایش یافته‌اند. از سال ۱۳۹۴ به بعد، هم‌زمان با بهبود شرایط هیدرولوژیکی، حجم ذخیره مخزن افزایش یافته و به اوج خود در سال ۱۳۹۸ رسیده است. در این سال، به دلیل وقوع سیلاب، همه نیازها به‌طور کامل تأمین شده و مخزن حتی دچار سرریز نیز شده است. این روند مطلوب تا سال ۱۴۰۰ ادامه داشت، اما از آن پس، به دلیل کاهش مجدد ورودی‌ها، حجم ذخیره در حال کاهش بوده و این کاهش تا پایان دوره (شهریور ۱۴۰۲) ادامه یافته است.



شکل ۵. شبیه‌سازی حجم مخزن و رها سازی برای سناریوهای ۱ تا ۴ در الگوی کشت حداقلی

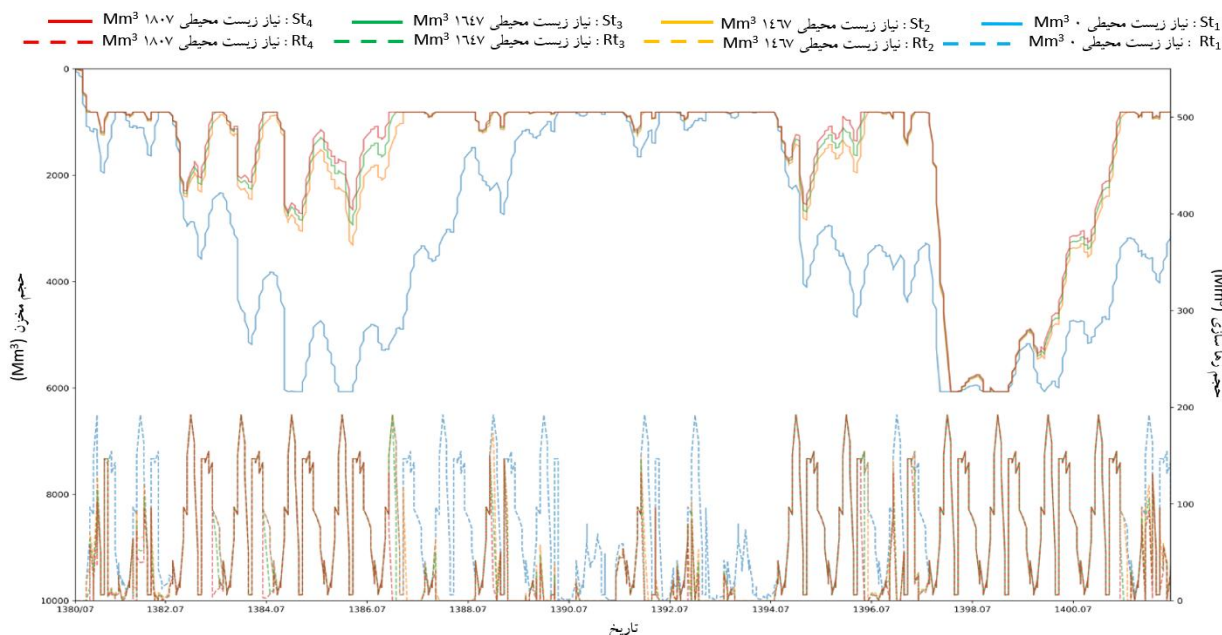
در شکل (۶)، عملکرد سد کرخه در شرایط الگوی کشت نرمال و تحت چهار سناریوی مختلف زیست‌محیطی نمایش داده شده است. مطابق نتایج، سناریوی ۴ (نیاز زیست‌محیطی حداکثری) بیشترین کمبود آب را در مقایسه با سایر سناریوها تجربه کرده است. دلیل این موضوع، هم‌زمانی دو عامل فشارزا یعنی افزایش تقاضای پایین‌دست ناشی از سطح زیر کشت نرمال و افزایش نیاز زیست‌محیطی بوده است که منجر به رقابت شدید بین مصارف کشاورزی و محیط زیست، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی شده است. در ابتدای دوره (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲)، کاهش جریان ورودی به مخزن موجب بروز کمبود آب در هر چهار سناریو شد. اما در دوره ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۷، با وجود نوسانات ورودی، حجم ذخیره سد افزایش یافت و نیازهای پایین‌دست در همه سناریوها به‌طور کامل تأمین گردید. این نشان‌دهنده نقش تعدیل‌کننده مخزن در شرایط نیمه‌مرطوب است. از سال ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۴، وضعیت مخزن مجدداً بحرانی شد. در این بازه، سه سناریوی زیست‌محیطی ۲، ۳ و ۴ به کف مخزن رسیدند و تأمین کامل نیازها در این شرایط با مشکل مواجه شد. تنها سناریوی ۱ (بدون نیاز زیست‌محیطی) توانست تا سال ۱۳۹۰ تأمین کامل داشته باشد، اما آن نیز پس از این سال دچار افت شد. بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۶، تنها سناریوی ۱ روند افزایش ذخیره را ادامه داد، در حالی که سایر سناریوها پس از یک بهبود کوتاه‌مدت، مجدداً دچار افت شدید ذخیره شدند. در سال ۱۳۹۸، وقوع سیلاب موجب سرریز سد در هر چهار سناریو شد و تمامی نیازها به‌طور کامل تأمین گردید. اما در سال‌های پس از آن، به‌ویژه

از ۱۴۰۰ به بعد، به دلیل افزایش رهاسازی آب پس از سیل و کاهش ورودی، حجم مخزن در سناریوهای زیست محیطی سخت گیرانه مجدداً به کف رسید. در این میان، سناریوی ۱ به دلیل حذف نیاز زیست محیطی، وضعیت باثبات تری را حفظ کرد. این مقایسه نشان می دهد که در الگوی کشت نرمال، تأثیر سیاست های زیست محیطی بر کمبود آب و ذخیره مخزن بسیار پررنگ تر از حالت حداقلی است و افزایش نسبی نیاز پایین دست در این الگو، سیستم را آسیب پذیرتر می کند، به ویژه در سناریوهای زیست محیطی سخت.



شکل ۶. شبیه سازی حجم مخزن و رهاسازی برای سناریوهای ۱ تا ۴ در الگوی کشت نرمال

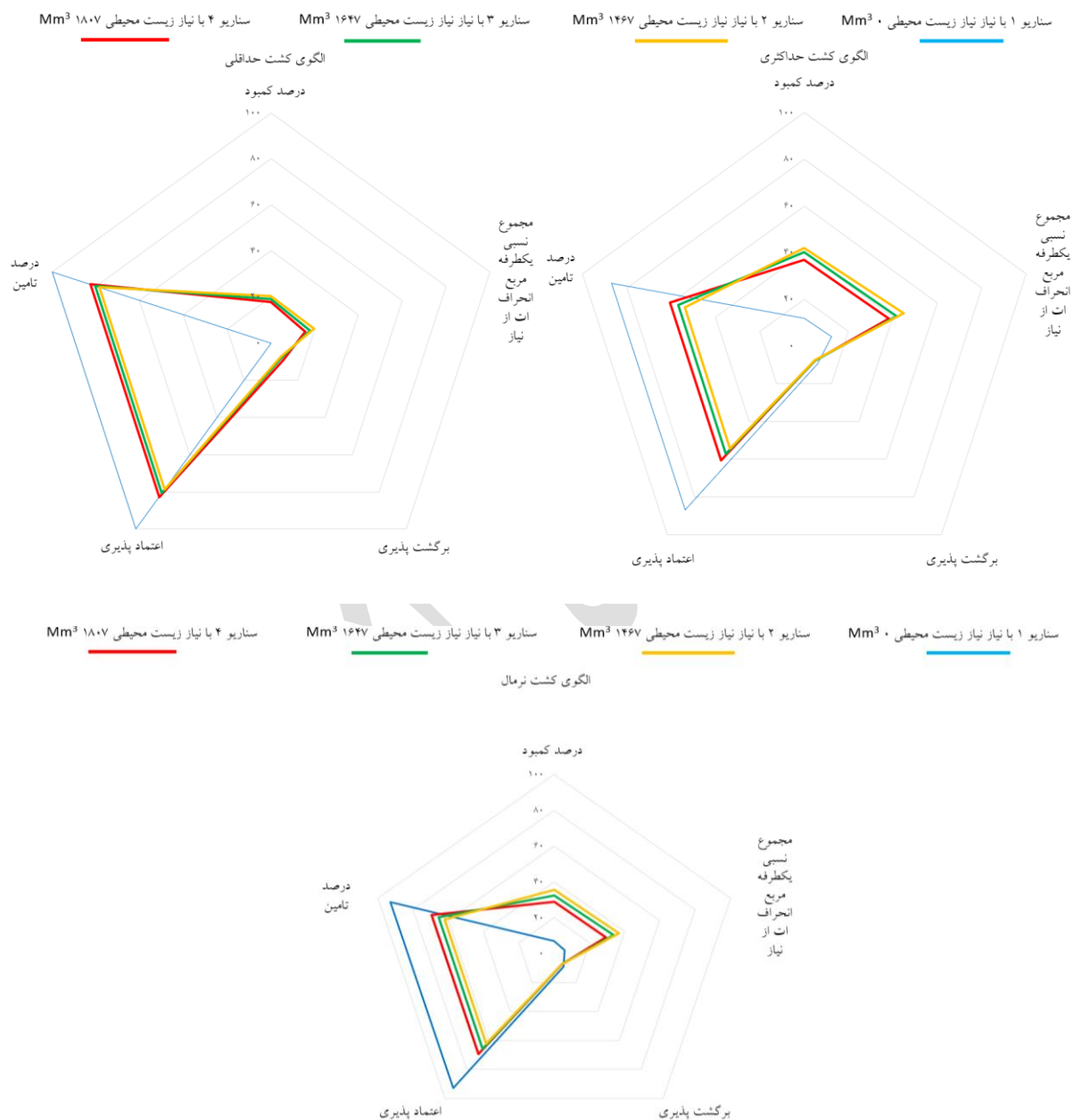
شبیه سازی عملکرد سد برای الگوی کشت سال حداکثر در شکل (۷) ارائه شده است. همان طور که از شکل مشخص است، رفتار مخزن در این الگوی کشت مشابه الگوی نرمال (شکل ۵) بوده و روند تغییرات حجم مخزن در سناریوهای مختلف تقریباً یکسان است. تفاوت اصلی این دو الگو در مقادیر عددی و حجم ذخیره مخزن است، به طوری که در الگوی حداکثری به دلیل افزایش نیاز پایین دست، میزان ذخیره مخزن کاهش یافته و در برخی بازه های زمانی، افت شدیدتری را تجربه کرده است.



شکل ۷. شبیه‌سازی حجم مخزن و رها سازی برای سناریوهای ۱ تا ۴ در الگوی کشت حداکثری

جدول (۳) و شکل (۸) شاخص‌های کلیدی عملکرد سامانه مدیریت آب پایین‌دست سد کرخه را در چهار سناریوی زیست‌محیطی و سه الگوی کشت مختلف نمایش می‌دهند. شاخص درصد کمبود در الگوی کشت حداقلی از ۰ درصد در سناریوی ۱ به ۲۰.۳ درصد در سناریوی ۴ افزایش یافته است، در حالی که شاخص درصد تأمین به‌طور معکوس از ۱۰۰ درصد به ۷۸.۳ درصد کاهش یافته است. این روند نشان‌دهنده افت تدریجی توان پاسخ‌گویی سیستم با افزایش نیاز زیست‌محیطی است. در الگوی کشت نرمال، شاخص درصد کمبود در سناریوی ۴ به ۳۵.۷ درصد و در الگوی حداکثری به ۴۲ درصد افزایش می‌یابد، که گویای آن است که با افزایش سطح زیر کشت، فشار مضاعفی بر منابع آبی وارد شده و شرایط بحرانی‌تر می‌شود. بنابراین، الگوی کشت نرمال از نظر کمبود، به الگوی حداکثری نزدیک شده و فاصله چندانی با آن ندارد. شاخص اعتمادپذیری نیز روندی مشابه شاخص تأمین دارد. در الگوی کشت حداقلی، اعتمادپذیری از ۱۰۰ درصد (سناریوی ۱) به ۷۸.۸ درصد (سناریوی ۴) کاهش یافته است. این کاهش برای الگوی کشت نرمال از ۹۲.۷ درصد به ۶۲.۳ درصد و برای الگوی حداکثری به ۵۴.۲ درصد رسیده است، که نشان‌دهنده کاهش پایداری عملکرد سیستم در سناریوهای زیست‌محیطی سخت‌گیرانه و با سطح کشت بالا است. در مقابل، شاخص برگشت‌پذیری در بین سناریوها و الگوهای مختلف تغییر معنی‌داری نشان نمی‌دهد و نسبتاً پایدار باقی مانده است. شاخص مجموع نسبی یک‌طرفه مربع انحرافات از نیاز نیز رفتاری مشابه درصد کمبود دارد و حداکثر آن در سناریوی ۴ و الگوی کشت حداکثری (۴۴.۹ درصد) و حداقل آن در سناریوی ۱ و الگوی کشت حداقلی (۱۹.۷ درصد) ثبت شده است. این نتایج به‌طور کلی تأکید می‌کنند که سخت‌گیری زیست‌محیطی در کنار افزایش سطح زیر کشت، عملکرد منابع آبی را به‌شدت تضعیف

می‌کند، در حالی که الگوهای کشت محدودتر (حداقلی) در سناریوهای سبک‌تر، امکان تأمین مطمئن‌تر، پایداری بیشتر و عدالت بالاتر را فراهم می‌سازند.

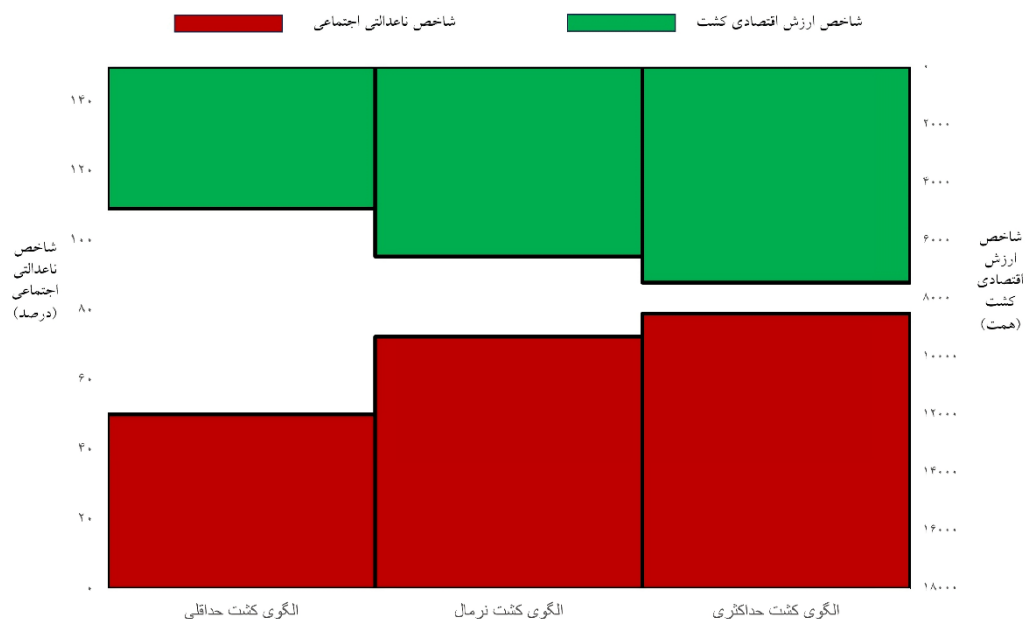


شکل ۸. مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای هر سناریو به تفکیک الگوهای کشت حداقل، نرمال و حداکثر

جدول ۳. مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای هر سناریو در الگوی های کشت حداقلی، نرمال و حداکثری

شاخص	سناریوها											
	حداقلی-۱	حداقلی-۲	حداقلی-۳	حداقلی-۴	نرمال-۱	نرمال-۲	نرمال-۳	نرمال-۴	حداکثری-۱	حداکثری-۲	حداکثری-۳	حداکثری-۴
درصد کمبود	۰	۱۷/۸	۱۹/۲	۲۰/۳	۷	۲۹	۳۲/۳	۳۵/۷	۱۱/۷	۳۶/۹	۴۰/۳	۴۲
درصد تامین	۱۰۰	۸۲/۶	۸۰/۳	۷۸/۳	۹۲/۷	۶۹/۳	۶۵/۵	۶۲	۸۶/۸	۶۰/۴	۵۶/۹	۵۳/۹
اعتماد پذیری	۱۰۰	۸۲/۸	۸۰/۶	۷۸/۸	۹۲/۷	۶۹/۵	۶۵/۷	۶۲/۳	۸۶/۸	۶۰/۵	۵۷/۱	۵۴/۲
برگشت پذیری	۰	۹/۲	۷/۹	۷/۴	۸/۹	۷/۴	۷/۴	۷/۴	۹/۷	۷/۹	۷/۸	۷/۵
مجموع نسبی یکطرفه مربع انحرافات از نیاز	۰	۱۵/۷	۱۷/۸	۱۹/۷	۶/۱	۲۹/۳	۳۳/۷	۳۶/۸	۱۲/۵	۳۸/۲	۴۱/۵	۴۴/۹

شکل (۹) مقادیر دو شاخص کلیدی «ارزش اقتصادی کشت» و «ناعدالتی اجتماعی» را در سه الگوی کشت حداقلی، نرمال و حداکثری نمایش می‌دهد. در بعد اقتصادی، الگوی کشت حداکثری با مقدار ۷۴۴۱.۹ همت، بالاترین ارزش اقتصادی را ثبت کرده که نتیجه‌ی مستقیم افزایش سطح زیر کشت است. در مقابل، الگوی کشت حداقلی با ۴۸۸۱.۷ همت کمترین بازده اقتصادی را داشته است. الگوی نرمال با ۶۵۲۷.۵ همت عملکردی میانی داشته و از نظر اقتصادی به الگوی حداکثری نزدیک‌تر است. این اختلافات نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین توسعه سطح زیر کشت و افزایش بازده اقتصادی سیستم است. با این حال، شاخص ناعدالتی اجتماعی روندی معکوس نشان می‌دهد. در الگوی کشت حداقلی، به دلیل محدود بودن سطح زیر کشت و کاهش رقابت میان مصرف‌کنندگان، شاخص ناعدالتی ۵۰.۲ درصد محاسبه شده است. این مقدار در الگوی نرمال به ۶۲.۳ درصد و در الگوی حداکثری به ۷۹.۱ درصد افزایش یافته است. این روند نشان می‌دهد که افزایش سطح زیر کشت، اگرچه منجر به رشد اقتصادی می‌شود، اما هم‌زمان توزیع ناعادلانه‌تری از منابع در میان بهره‌برداران ایجاد می‌کند، به‌ویژه در شبکه‌های آبیاری با دسترسی محدود. به‌طور کلی، این نتایج بیانگر یک تناقض مهم در مدیریت منابع آب هستند: توسعه کشاورزی و رشد اقتصادی در سناریوهای کشت گسترده‌تر، به قیمت افزایش تبعیض اجتماعی و کاهش عدالت انجام می‌شود. بنابراین، سیاست‌گذار ناگزیر به انتخابی متوازن میان حداکثرسازی منفعت اقتصادی و حفظ عدالت اجتماعی است.

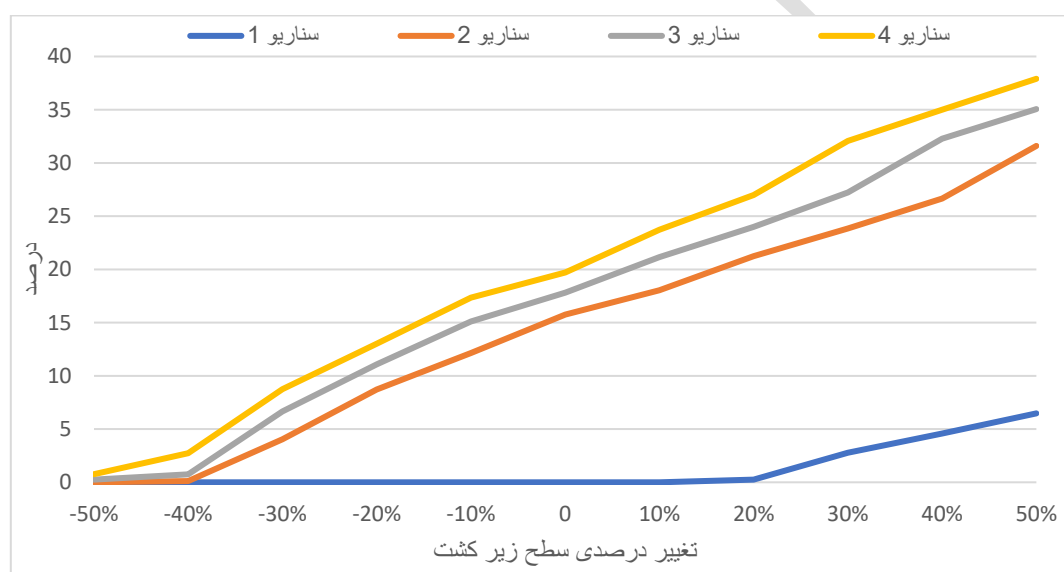


شکل ۹. مقدار شاخص‌های ارزش اقتصادی کشت و ناعدالتی اجتماعی برای الگوی های کشت حداقلی، نرمال و حداکثری

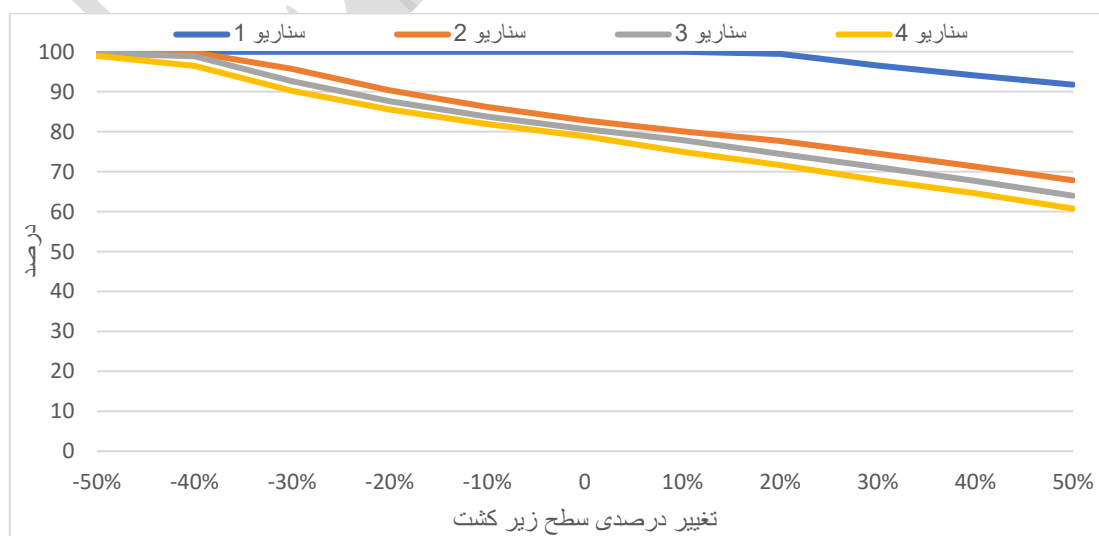
۲.۳ تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی پایداری عملکرد سامانه مدیریت منابع آب و بررسی میزان حساسیت شاخص‌های کلیدی نسبت به تغییرات سطح زیر کشت، تحلیل حساسیت برای چهار سناریو زیست‌محیطی تدوین شده در این پژوهش انجام گرفت. چهار شاخص اصلی مورد ارزیابی شامل درصد تأمین، درصد کمبود، شاخص اعتمادپذیری و شاخص مجموع نسبی یک‌طرفه مربع انحرافات از نیاز بوده است. نتایج این تحلیل در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ ارائه شده است. به‌طور کلی، در تمامی سناریوها، افزایش سطح زیر کشت باعث کاهش عملکرد سامانه و تشدید فشار بر منابع آب شده است. شاخص‌هایی مانند کمبود و انحراف از نیاز به شدت افزایش یافته و در مقابل، درصد تأمین و اعتمادپذیری کاهش یافته‌اند. این رفتار به‌ویژه در سناریوهای زیست‌محیطی سخت‌گیرانه (سناریوی ۳ و ۴) نمایان‌تر بوده و نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای سامانه در شرایط افزایش هم‌زمان تقاضا و محدودیت‌های زیست‌محیطی است. در مقابل، کاهش سطح زیر کشت در همه شاخص‌ها به بهبود شرایط سامانه منجر شده است. به‌طور خاص، در سناریو ۱ (فاقد نیاز زیست‌محیطی)، سامانه نسبت به تغییرات سطح زیر کشت انعطاف‌پذیری بیشتری از خود نشان داده و افت شاخص‌ها در آن کمتر بوده است. در این سناریو حتی با افزایش سطح زیر کشت، شاخص‌های تأمین و اعتمادپذیری در سطح نسبتاً بالایی حفظ شده‌اند. همچنین مقایسه بین شاخص‌ها نشان می‌دهد که شاخص مجموع نسبی یک‌طرفه مربع انحرافات از نیاز و درصد کمبود، بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات سطح زیر

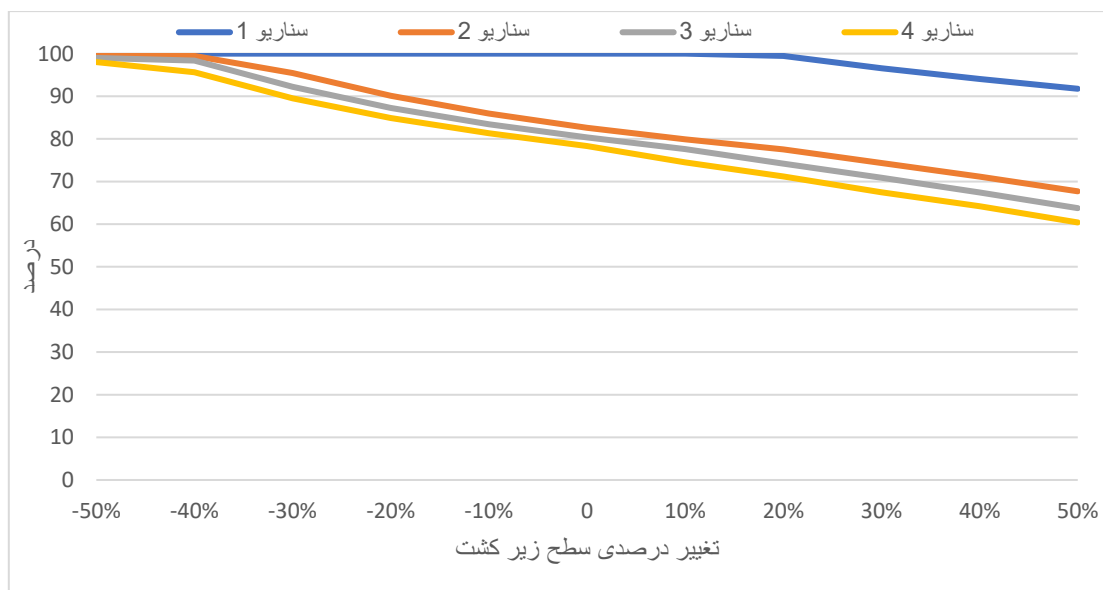
کشت داشته‌اند و به‌عنوان شاخص‌های هشدار اولیه برای مدیریت ریسک در شرایط بهره‌برداری شدید قابل استفاده هستند. نتایج تحلیل حساسیت به‌خوبی نشان می‌دهد که اتخاذ تصمیمات مربوط به توسعه کشت در دشت‌های پایین‌دست، باید با توجه به ظرفیت تأمین آب، محدودیت‌های زیست‌محیطی و پیامدهای اجتماعی و اقتصادی صورت گیرد. از این رو، یک سیاست‌گذاری منعطف و سناریومحور، با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی و سطح نیاز زیست‌محیطی، برای حفظ تعادل سامانه ضروری است.



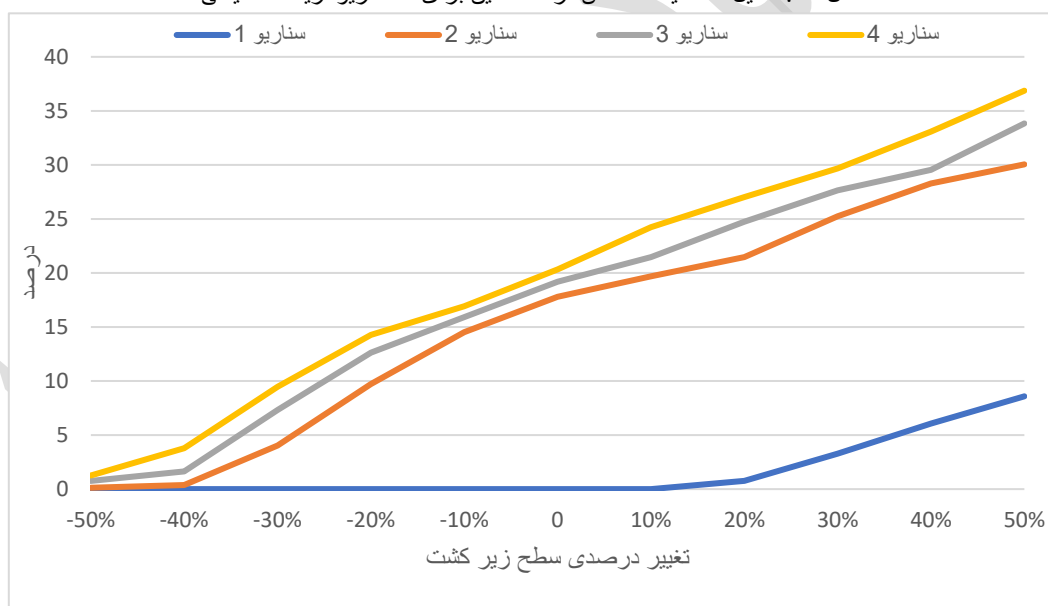
شکل ۱۰. تحلیل حساسیت شاخص مجموع نسبی یکطرفه مربع انحرافات از نیاز برای ۴ سناریو زیست محیطی



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت شاخص اعتماد پذیری برای ۴ سناریو زیست محیطی



شکل ۱۲. تحلیل حساسیت شاخص درصد تامین برای ۴ سناریو زیست محیطی



شکل ۱۳. تحلیل حساسیت شاخص کاهش کمبود برای ۴ سناریو زیست محیطی

۴. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که الگوهای مختلف کشت تأثیر چشمگیری بر عملکرد سامانه مدیریت منابع آب پایین دست سد کرخه دارند. الگوی کشت حداقلی، با کاهش سطح زیر کشت، موجب بهبود شاخص‌های تأمین‌پذیری، افزایش اعتمادپذیری و کاهش ناعدالتی اجتماعی گردید، اگرچه این شرایط با کاهش ارزش اقتصادی همراه بود. در مقابل، الگوی کشت حداکثری با بیشترین سطح زیر کشت، بالاترین ارزش اقتصادی را تولید کرد، اما به قیمت افزایش کمبود، کاهش

پایداری و تشدید ناعدالتی اجتماعی. تحلیل مقایسه‌ای شاخص‌ها در سناریوهای مختلف زیست‌محیطی نیز نشان داد که افزایش سطح نیاز زیست‌محیطی در کنار گسترش سطح زیر کشت، باعث کاهش توان پاسخ‌گویی سیستم و افزایش فشار بر ذخیره مخزن می‌شود. حتی در الگوی کشت نرمال، که از نظر سطح زیر کشت بین دو حالت دیگر قرار دارد، عملکرد منابع آبی در سناریوهای سخت‌گیرانه افت قابل توجهی را تجربه کرده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تعادل میان سه مؤلفه کلیدی - تأمین‌پذیری آب، عدالت اجتماعی و بازده اقتصادی - مستلزم انتخاب دقیق الگوی کشت و سیاست‌های زیست‌محیطی متناسب با ظرفیت آبی منطقه است. در شرایط کم‌آبی، گرایش به سمت الگوهای کشت حداقلی یا میان‌حدی می‌تواند پایداری سیستم را افزایش داده و از بروز ناعدالتی‌های اجتماعی جلوگیری کند، در حالی که توسعه‌ی بدون ملاحظه‌ی سطح زیر کشت، اگرچه ممکن است منفعت اقتصادی کوتاه‌مدت داشته باشد، در بلندمدت به کاهش کارایی و عدالت خواهد انجامید. بر این اساس، اتخاذ سیاست‌های منعطف، متناسب با شرایط هیدرولوژیکی و با رویکرد سازگاری و عدالت‌محوری، برای مدیریت منابع آب پایین‌دست سد کرخه ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

- اسلامی، شیروانیان، عبدالرسول، & زارعیان. (۱۴۰۳). تأثیر اصلاح الگوی کشت بر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب آبیاری محصولات زراعی در استان فارس (بررسی موردی: دشت قادرآباد-مادرسلیمان). تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۵(بهار)، ۱۷-۳۷.
- بشاورد، ادیب، & اشرفی. (۱۴۰۱). تأثیر استراتژی‌های مدیریت سیستم‌های منابع آب بر شاخص‌های خشکسالی در سد جره. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، ۱۶(۳)، ۸۷-۱۰۷.
- جعفری، نیکوئی، قدمی فیروزآبادی، شانازی، کاروان، & بختیاری. (۱۴۰۲). تأثیر سیاست‌های اصلاح الگوی کشت بر حفاظت منابع آب و خودکفایی گندم (مطالعه موردی: دشت کبودراهنگ). رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۲(۲)، ۱۷۰-۱۸۳.
- رفیعی وحید، شوریان مجتبی، & عطاری جلال. (۱۳۹۶). برنامه ریزی الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی با استفاده از ترکیب مدل شبیه سازی SWAT و الگوریتم بهینه سازی جستجوی هارمونی.
- قمشی & حمادی (۱۴۰۳). تعیین نیاز زیست محیطی تالاب‌های استان خوزستان و پیشنهاد نحوه تأمین آن. اولین همایش ملی هیدرولوژی و منابع آب ایران
- گودرزی، قدبیک لو، غدیری، عادل، & خودشناس. (۱۴۰۲). تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر هم بست آب، انرژی، غذا و ارزش اقتصادی کشت (مطالعه موردی استان مرکزی-دشت فراهان). آب و خاک، ۳۷(۲)، ۱۸۷-۲۰۲.

مؤسسه تحقیقات آب. (بدون تاریخ). نیاز آبی گیاهان کشور. پایگاه اطلاع رسانی مؤسسه تحقیقات آب. بازیابی شده از

<http://niwr.ir/Public/BookIR/Default.aspx>

شیبانی، (۱۳۹۶). بررسی پایداری الگوی کشت بر اساس عوامل عدم قطعیت بر فاکتورهای زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و منابع آب (پایان نامه دکتر Ph.D دانشکده کشاورزی دانشگاه زابل)

Ahmad, S., & Simonovic, S. P. (2000). "System dynamics modeling of reservoir operations for flood management." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 14(3), 190-198.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56(97), e156.

Darzi-Naftchali, A., Motevali, A., Layani, G., Keikha, M., Bagherian-Jelodar, M., Nadi, M., ... & Pirdashti, H. (2024). Optimizing cropping pattern through reducing environmental issues and improving socio-economic indicators. *Environment, Development and Sustainability*, 26(5), 13041-13068.

Femeena, P. V., Sudheer, K. P., Cebin, R., & Chaubey, I. (2018). Spatial optimization of cropping pattern for sustainable food and biofuel production with minimal downstream pollution. *Journal of environmental management*, 212, 198-209.

Hatamkhani, A., & Moridi, A. (2019). Multi-objective optimization of hydropower and agricultural development at river basin scale. *Water Resources Management*, 33, 4431-4450.

Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1), 14-20.

Mohammadian, F., Alizadeh, A., Neyrizi, S., & Arabi, A. (2008). Development of a sustainable cropping pattern based on virtual water trade.*

Ngamsert, R., & Kangrang, A. (2022). Applying of marine predators algorithm linked with reservoir simulation model considering sedimentation for reservoir operation. *Advances in Civil Engineering*, 2022(1), 1631914.

Özcan, Z. (2023). A Holistic Framework for Evaluating the Sustainability of the Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus Under Multiple Socioeconomic and Climate Change Conditions.

Shaabani, M. K., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S. S., & Gohari, S. A. R. (2024). Simulation of the effects of climate change, crop pattern change, and developing irrigation systems on the groundwater resources by SWAT, WEAP and MODFLOW models: a case study of Fars province, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 26(4), 10485-10511.

Shrestha, S., Thompson, B., Toma, L., Ferreira, J. G., & Barnes, A. P. (2021). An economic assessment of ecological practices in Scotland.

Techarungruengsakul, R., & Kangrang, A. (2022). Application of Harris Hawks optimization with reservoir simulation model considering hedging rule for network reservoir system. *Sustainability*, 14(9), 4913.

Yazdandoost, F., Razavi, H., & Izadi, A. (2022). Optimization of agricultural patterns based on virtual water considerations through integrated water resources management modeling. *International Journal of River Basin Management*, 20(2), 255-263

آمده انتشار