



## 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

Amir Yazdani<sup>1</sup> | Ali Mohammad Akhondali<sup>2</sup> | Amin Khoramian<sup>3</sup> | Farshad Ahmadi<sup>4</sup>

1. Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [amir\\_yazdani98@yahoo.com](mailto:amir_yazdani98@yahoo.com)
2. Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [aliakh@scu.ac.ir](mailto:aliakh@scu.ac.ir)
3. Corresponding Author, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [a.khoramian@scu.ac.ir](mailto:a.khoramian@scu.ac.ir)
4. Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: [f.ahmadi@scu.ac.ir](mailto:f.ahmadi@scu.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 7 April 2025

Received in revised form

30 June 2025

Accepted 27 August 2025

Published online 17 March 2026

### ABSTRACT

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*

**Cite this article:** Yazdani, A., Akhondali, A. M., Khoramian, A., & Ahmadi, F. (2026). 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. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (4), 767-785. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.392990.1216>





## ارزیابی سناریوهای ترکیبی الگوی کشت و تأمین نیاز زیست‌محیطی از منظر شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و منابع آبی در پایین دست سد کرخه

امیر یزدانی<sup>۱</sup> | علی محمد آخوندعلی<sup>۲</sup> | امین خرمیان<sup>۳</sup> | فرشاد احمدی<sup>۴</sup>

۱. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [amir\\_yazdani98@yahoo.com](mailto:amir_yazdani98@yahoo.com)
۲. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [aliakh@scu.ac.ir](mailto:aliakh@scu.ac.ir)
۳. نویسنده مسئول، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [a.khoramian@scu.ac.ir](mailto:a.khoramian@scu.ac.ir)
۴. گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: [f.ahmadi@scu.ac.ir](mailto:f.ahmadi@scu.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌هایی چون محدودیت منابع، نیازهای زیست‌محیطی، فشارهای اجتماعی و اقتصادی مواجه است. تعادل میان تأمین نیاز زیست‌محیطی، عدالت اجتماعی و بهره‌وری اقتصادی اهمیت بالایی دارد. این پژوهش به شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد سناریوهای مختلف تأمین نیاز زیست‌محیطی و الگوی کشت پایین دست سد کرخه براساس شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و منابع آبی پرداخته است. دوره ۲۲ ساله بهره‌برداری از مخزن کرخه (۱۳۸۰-۱۴۰۲) به‌عنوان بازه زمانی مطالعه در نظر گرفته شد. در این پژوهش، سناریوهای مختلف تأمین آب پایین دست سد کرخه با استفاده از شبیه‌سازی نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی بررسی شده‌اند. برای بررسی اثر الگوهای کشت بر معیارهای ارزیابی منابع آب، سه سال آبی خشک (۱۳۹۷-۱۳۹۶)، نرمال (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و ترسالی (۱۳۹۸-۱۳۹۹) به ترتیب به‌عنوان حداقلی، نرمال و حداکثری در نظر گرفته شدند. همچنین تأمین نیاز زیست‌محیطی در سه سناریوی عالی، خوب و متوسط بررسی شد. نتایج نشان داد که در الگوی حداقلی، به دلیل سطح زیر کشت پایین‌تر، شاخص تأمین‌پذیری و ناعدالتی اجتماعی شرایط مطلوب‌تری داشتند. در سناریوی عالی، شاخص تأمین‌پذیری از ۱۰۰ به ۷۶/۳۳ درصد کاهش و کمبود از صفر 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، تأمین‌پذیری 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 زیست‌محیطی، بهره‌برداری اقتصادی و عدالت اجتماعی تأکید دارد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶

### کلیدواژه‌ها:

الگوی کشت

شاخص عدالت اجتماعی شبیه‌سازی منابع آب

نیاز زیست‌محیطی

**استناد:** یزدانی، امیر؛ آخوندعلی، علی محمد؛ خرمیان، امین و احمدی، فرشاد (۱۴۰۴). ارزیابی سناریوهای ترکیبی الگوی کشت و تأمین نیاز زیست‌محیطی از منظر شاخص‌های اقتصادی، اجتماعی و منابع آبی در پایین دست سد کرخه. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۴)، ۷۶۷-۷۸۵.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.392990.1216>



## ۱. مقدمه

مدیریت منابع آبی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه پایدار به‌شمار 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، به‌دلیل 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 پژوهش‌های 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 SWAT<sup>۱</sup> و الگوریتم ژنتیک نشان دادند که حذف بقایای ذرت و کاشت گیاهان پایدار می‌تواند نیترات و فسفر را کاهش داده و تولید بیوانرژی را تضمین کند. Shaabani *et al.* (2024) نیز با بهره‌گیری از مدل‌های SWAT، WEAP<sup>۲</sup> و MODFLOW<sup>۳</sup> به این نتیجه رسیدند که با کاشت گیاهان کم‌مصرف و بهبود راندمان آبیاری می‌تواند سطح آب زیرزمینی را پایدارتر کند. Yazdandoost *et al.* (2022) با تمرکز بر نقش آب مجازی<sup>۴</sup> 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 پژوهش خود با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>۵</sup> توانستند مصرف آب را در طی دو سناریو به‌ترتیب ۲۸ درصد و ۴۹ درصد کاهش دهند و سود خالص را به‌ترتیب به ۳۱۴ درصد و ۲۳ درصد افزایش دهند. اسلامی و همکاران (۱۴۰۳) در دشت قادریاب-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 دریایی<sup>۶</sup> 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<sup>۷</sup> و سیاست بهره‌برداری جیره‌بندی در سد جره توانستند شاخص کمبود اصلاح‌شده را پیش از ۴۰ درصد نسبت به سیاست بهره‌برداری استاندارد کاهش داده و به بهبود شاخص اعتمادپذیری را بهبود بخشند. Hatamkhani and Moridi (2019) با استفاده از مدل‌های WEAP و

MOPSO<sup>۱</sup>، نشان دادند که منحنی پارتو بهترین تعادل را بین تولید انرژی برق آبی و توسعه کشاورزی در حوضه رودخانه کشکان برقرار می کند. این فرایند سبب افزایش ۸ درصدی تولید انرژی برق آبی و افزایش پنج برابری سطح زیر کشت نسبت به شرایط موجود شده است (Techarungruengsakul and Kangrang, 2023). با استفاده از الگوریتم شاهین هریس<sup>۲</sup>، الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی باد محور<sup>۳</sup>، کمبود آب متوسط سالانه به ترتیب به ۴/۸ درصد، ۴/۷ درصد و ۴/۵ درصد کاهش یافت. پژوهش های پیرامون شاخص های اقتصادی و اجتماعی نیز نشان داد که تغییرات در الگوی کشت و مدیریت منابع می تواند اثرات مثبتی در بهبود پایداری منابع آب داشته باشد. Özcan (2023) چارچوبی جامع برای ارزیابی پایداری در ارتباط با آب، انرژی، غذا و اکوسیستم<sup>۱۱</sup> ارائه کرد که بر اهمیت استراتژی های کشاورزی پایدار در مواجهه با تغییرات اقلیمی تأکید دارد. Shrestha et al. (2021) در اسکاتلند، اثرات اقتصادی روش های مدیریت زیست محیطی را بررسی کردند و دریافتند که روش های کاهش مصرف نهاده ها و ایجاد مناطق اکولوژیکی سودآورتر هستند. Darzi et al. (2023) با مدل چندهدفه<sup>۱۲</sup> و ارزیابی چرخه عمر<sup>۱۳</sup> به بهینه سازی الگوی کشت پرداختند و کاهش ۱۵/۲ درصد در مساحت کشت شده را همراه با بهبود شاخص های اجتماعی و اقتصادی گزارش کردند. جعفری و همکاران (۱۴۰۲) در دشت کبودراهنگ نشان دادند که سیاست های اصلاح الگوی کشت با استفاده از روش برنامه ریزی خطی<sup>۱۴</sup> باعث افزایش بهره وری آب و خودکفایی در تولید گندم می شود. نتایج نشان داده است که برای اجرای الگوی بهینه کشت، کاهش بهره برداری به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد ضروری است.

در این پژوهش، با هدف ارزیابی سناریوهای مختلف الگوی کشت و تأمین نیاز زیست محیطی شبیه سازی منابع آب برای الگوهای کشت موجود در سال های ۱۳۹۶، ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ به ترتیب به عنوان سال های خشک، نرمال و متوسط در پایین دست سد کرخه با استفاده از سیاست بهره برداری استاندارد (SOP) انجام گرفته است. همچنین، شاخص های 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 روش های پژوهش

این بخش به معرفی داده ها و روش های مورداستفاده برای ارزیابی منابع آب، نیازهای زیست محیطی و شاخص های اقتصادی و اجتماعی می پردازد. ابتدا منطقه مورد مطالعه، شامل پایین دست سد کرخه و شبکه های آبیاری پایین دست، توصیف شده و سپس داده های ورودی شامل جریان های آب، نیاز آبی گیاهان و اطلاعات کشاورزی ارائه می شود. همچنین، روش های شبیه سازی منابع آب، به ویژه سیاست بهره برداری SOP<sup>۱۵</sup> و شاخص های ارزیابی همچون ناعدالتی اجتماعی، ارزش اقتصادی کشت، اعتمادپذیری و برگشت پذیری مورد بحث قرار می گیرند. این روش ها و شاخص ها، امکان تحلیل جامع و دقیق تأثیر سناریوهای مختلف تأمین آب و مدیریت الگوی کشت را فراهم می کنند.

### ۲.۱. منطقه مورد مطالعه

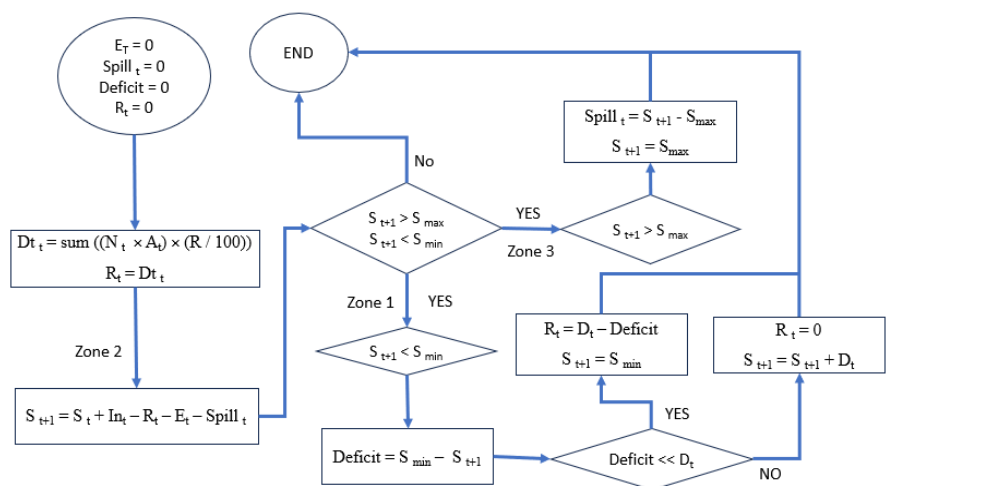
حوضه آبریز پایین دست سد کرخه در بخش انتهایی رودخانه کرخه و حد فاصل خروجی سد کرخه تا هورالعظیم قرار دارد. این حوضه در مختصات جغرافیایی طول های ۴۷ تا ۴۹ شرقی و عرض های ۳۱ تا ۳۲ شمالی واقع شده و مساحتی معادل ۸۳۷۸ کیلومتر مربع را پوشش می دهد. در شکل (۱) نمایی از منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.





در شکل (۲)، نمایی از نحوه عملکرد این سیاست به تصویر کشیده شده است. فرایند به شرح زیر است؛ فرض اولیه بر این اساس است که مخزن سد خالی می‌باشد. در ابتدا، برای دوره‌های ۱۰ روزه ( $t$ ) میزان نیاز آبی کل محصولات ( $D_t$ ) براساس مقدار نیاز گیاهان ( $N_t$ ) و سطح زیر کشت ( $A_t$ ) محاسبه می‌شود. 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 می‌شود و حال ذخیره دوره بعدی ( $S_{t+1}$ ) با توجه به آب ورودی ( $In_t$ ) و میزان خروجی ( $O_t$ ) تعیین می‌گردد. خروجی شامل مواردی مانند رهاسازی، تبخیر از سد و سرریز از سد است. در ابتدا، فرض می‌شود 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 می‌شود و سپس ذخیره دوره بعد ( $S_{t+1}$ ) بررسی می‌شود، اگر  $S_{t+1}$  بین  $S_{min}$  و  $S_{max}$  باشد، فرض اولیه صحیح است و فرایند 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 فرایند تا زمانی که شرایط ذخیره‌سازی پایدار شود، تکرار می‌شود.

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 زیست‌محیطی تعریف شده است. این گره نیاز زیست‌محیطی 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.



- |  |  |
|--|--|
| $E_t$ = تبخیر در دوره $t$ (میلیون مترمکعب)               | $D_t$ = نیاز آبی کل محصولات در دوره $t$ (میلیون مترمکعب)       |
| $Spill_t$ = سرریز در دوره $t$ (میلیون مترمکعب)           | $N_t$ = نیاز آبی هر گیاه در دوره $t$ (میلیون مترمکعب بر هکتار) |
| $R_t$ = رهاسازی در دوره $t$ (میلیون مترمکعب)             | $A_t$ = 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



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 نارضایت‌بخش (F) تقسیم می‌شود، که در حالت مطلوب نیازها به‌طور 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)،  $\alpha_Q$  نشان‌دهنده نسبت تأمین آب به کل نیازهاست و به‌عنوان 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 برنامه‌ریزی شامل تعداد دوره‌های زمانی  $(t=1, 2, \dots, T)$  است.

#### \* برگشت‌پذیری

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  $\gamma$  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 یک طرفه مربع انحرافات از نیاز

این شاخص  $\Phi$  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  $\Phi$  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.

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

در رابطه (۴)،  $T$  تعداد کل دوره‌های آماری است.

### \* درصد تأمین

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

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

در رابطه (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 مصرف‌کنندگان مختلف تعریف شده است. این شاخص میزان تفاوت در نسبت سطح زیر کشت بین شبکه‌های آبیاری مختلف را به‌عنوان شاخصی از برقراری عدالت اجتماعی نشان می‌دهد. در شرایط کم‌آبی، توزیع ناعادلانه منابع آبی می‌تواند منجر به ناعدالتی و تنش‌های اجتماعی شود. این شاخص به‌صورت 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  $\gamma$  شاخص ناعدالتی اجتماعی است. مقدار این شاخص بین صفر تا ۱۰۰ درصد می‌باشد. مقادیر بیشتر این شاخص نشان‌دهنده ناعدالتی بیشتر در منطقه مورد مطالعه خواهد بود.

### \* ارزش اقتصادی کشت

شاخص ارزش اقتصادی کشت ( $\alpha$ ) کل درآمد کشاورزی را براساس حاصل ضرب عملکرد هر محصول، قیمت واحد آن و سطح زیر کشت محاسبه می‌کند. این شاخص با جمع درآمد حاصل از تمامی محصولات کشت‌شده، به‌عنوان شاخصی

برای ارزیابی درآمد حاصل از کشاورزی، مورداستفاده قرار می‌گیرد. مقادیر این شاخص با واحد همت (هزار میلیارد تومان) گزارش می‌شود.

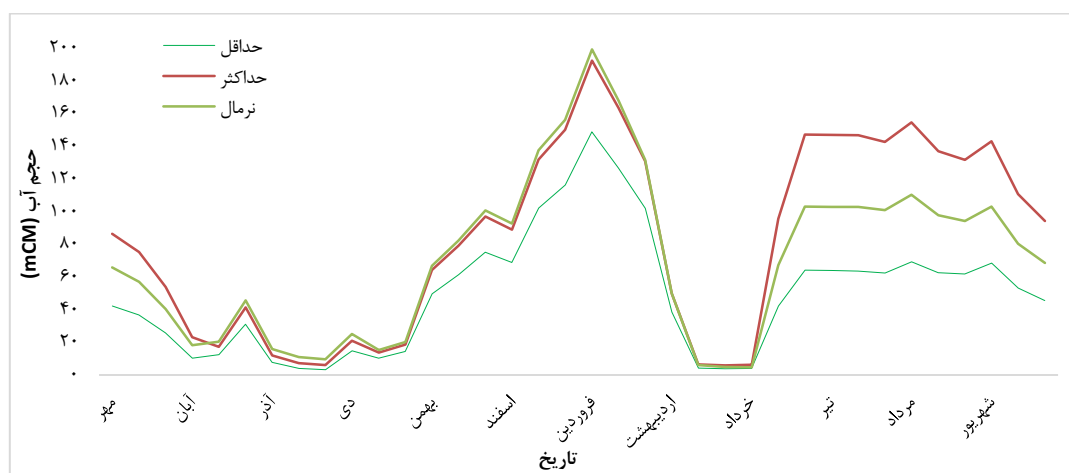
$$\alpha = \sum_{i=1}^n (A_i \times P_i \times Y_i) \quad \text{رابطه (۷)}$$

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

### ۳. نتایج و بحث

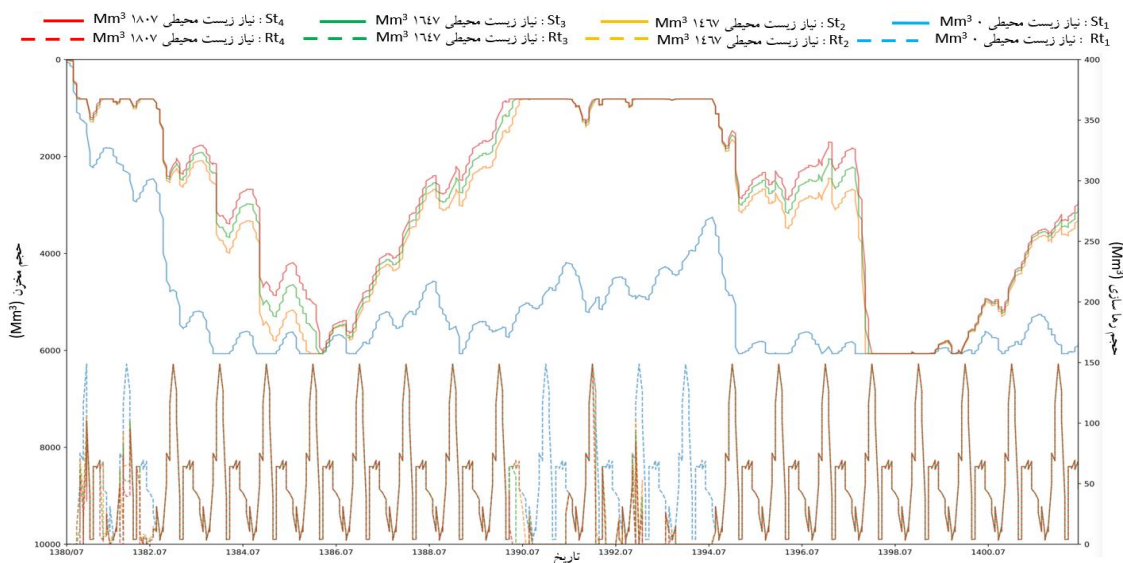
در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی‌ها چهار سناریوی زیست‌محیطی (جدول ۲) برای الگوی کشت‌های حداقلی، نرمال و حداکثری ارائه شده است. همچنین شبیه‌سازی مخزن سد کرخه از منظر رهاسازی، حجم ذخیره و نیاز آبی پایین‌دست برای هر سناریو برای دوره ۲۲ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۴۰۲) مورد ارزیابی گرفته است. تأثیر الگوهای کشت بر 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 موردبررسی 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 مترمکعب ( $Mm^3$ ) 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.



### ۱.۳. نتایج شبیه‌سازی

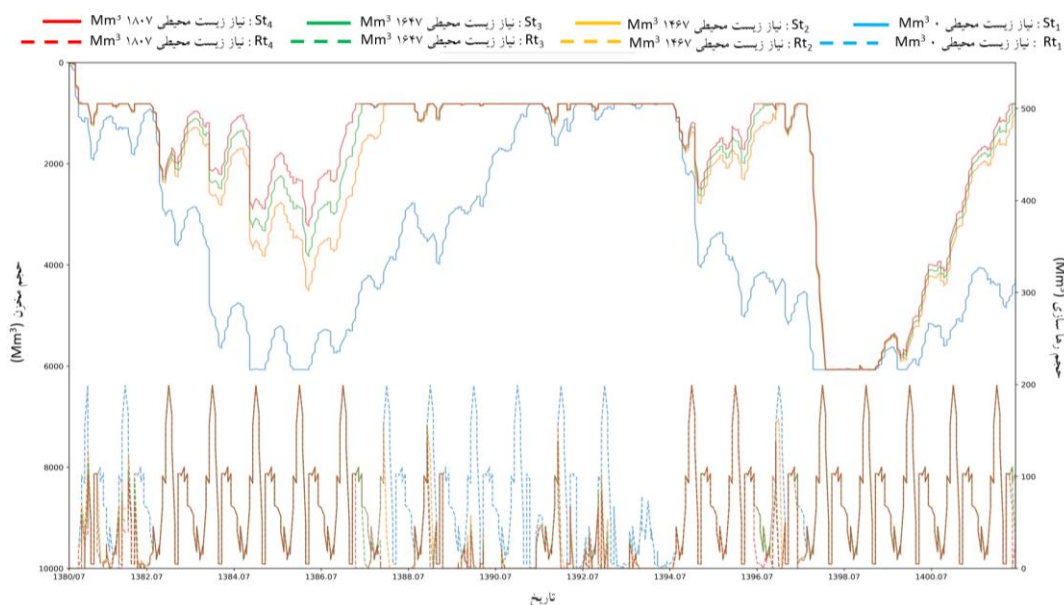
در شکل (۵)، نتایج شبیه‌سازی عملکرد مخزن سد کرخه برای الگوی کشت حداقلی در چهار سناریوی تأمین نیاز زیست‌محیطی نمایش داده شده است. مطابق نتایج، بیش‌ترین میزان کمبود آب در این الگو مربوط به سناریوی ۴ (با نیاز زیست‌محیطی حداکثری) است. در این سناریو، به‌دلیل تخصیص بخشی از آب به مصارف زیست‌محیطی، بخشی از تقاضای کشاورزی بی‌پاسخ مانده و کمبود ایجاد شده است. در مقابل، سناریوی ۱ (بدون نیاز زیست‌محیطی) با تأمین کامل کشاورزی، بالاترین سطح رهاسازی آب به پایین‌دست را در کل دوره شبیه‌سازی ثبت کرده است. به‌طور کلی، در الگوی کشت حداقلی، به‌دلیل کاهش سطح زیر کشت و به‌تبع آن نیاز آبی پایین‌دست، میزان کمبود در تمامی سناریوها نسبت به سایر الگوهای کشت کم‌تر بوده و شاخص تأمین‌پذیری در وضعیت بهتری قرار دارد. بررسی روند سالانه ذخیره مخزن نشان می‌دهد که در بازه ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۶، حجم ذخیره در تمامی سناریوها افزایش یافته و نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی به‌خوبی پاسخ داده شده‌اند. 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 حداقل‌های بحرانی نزدیک شده است. در این دوره، تأمین هم‌زمان 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، به‌دلیل 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، به‌دلیل کاهش مجدد ورودی‌ها، حجم ذخیره در حال کاهش بوده و این کاهش تا پایان دوره (شهریورماه ۱۴۰۲) ادامه یافته است.



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

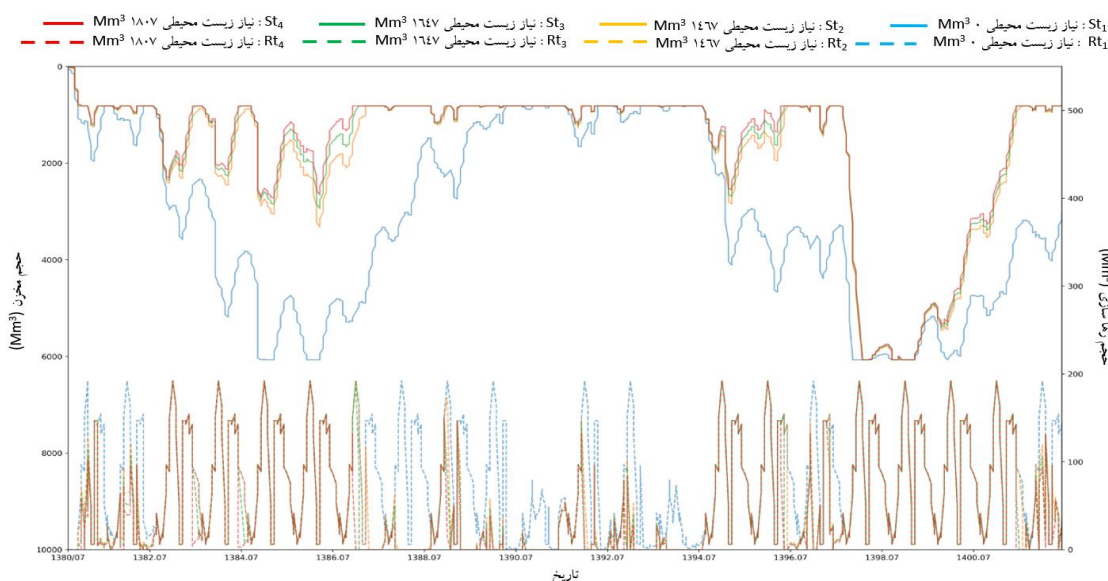
در شکل (۶)، عملکرد سد کرخه در شرایط الگوی کشت نرمال و تحت چهار سناریوی مختلف زیست‌محیطی نمایش داده شده است. مطابق نتایج، سناریوی ۴ (نیاز زیست‌محیطی حداکثری) بیش‌ترین کمبود آب را در مقایسه با سایر سناریوها تجربه کرده است. دلیل این موضوع، هم‌زمانی دو عامل فشارزا یعنی افزایش تقاضای پایین‌دست ناشی از سطح 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 دوباره 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، درحالی‌که سایر سناریوها پس از یک بهبود کوتاه‌مدت، دوباره 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، به‌دلیل افزایش رهاسازی آب پس از سیل و کاهش ورودی، حجم مخزن در سناریوهای زیست‌محیطی سخت‌گیرانه دوباره به کف رسید. در این میان، سناریوی ۱ به‌دلیل حذف نیاز زیست‌محیطی، وضعیت باثبات‌تری را حفظ کرد. این مقایسه نشان می‌دهد که در الگوی کشت نرمال، تأثیر سیاست‌های زیست‌محیطی بر کمبود آب و ذخیره مخزن بسیار پررنگ‌تر از حالت حداقلی است و افزایش نسبی نیاز پایین‌دست در این الگو، سیستم را آسیب‌پذیرتر می‌کند، به‌ویژه در سناریوهای زیست‌محیطی سخت.



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

شبیه‌سازی عملکرد سد برای الگوی کشت سال حداکثر در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور 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، به‌طوری‌که در الگوی حداکثری به‌دلیل افزایش نیاز پایین‌دست، میزان ذخیره مخزن کاهش یافته و در برخی بازه‌های زمانی، افت شدیدتری را تجربه کرده است.

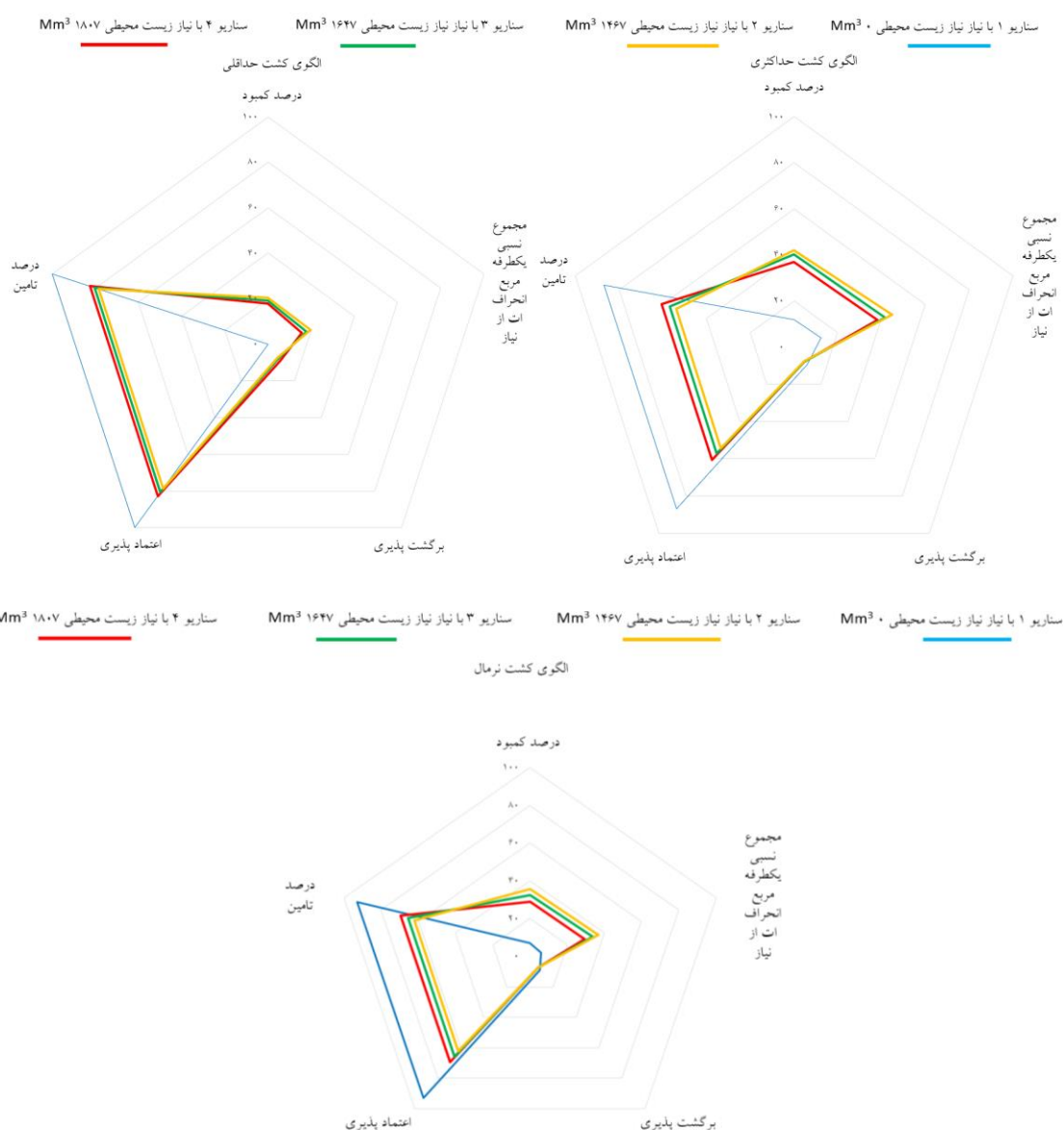


شکل ۷. شبیه‌سازی حجم مخزن و رهاسازی برای سناریوهای ۱ تا ۴ در الگوی کشت حداکثری

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 صفر درصد در سناریوی ۱ به ۲۰/۳ درصد در سناریوی ۴ افزایش یافته است، درحالی‌که 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، درحالی‌که الگوهای کشت محدودتر (حداقلی) در سناریوهای سبک‌تر، امکان تأمین مطمئن‌تر، پایداری بیش‌تر و عدالت بالاتر را فراهم می‌سازند.

شکل (۹) مقادیر دو شاخص کلیدی «ارزش اقتصادی کشت» و «ناعادلتی 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 نتیجه 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

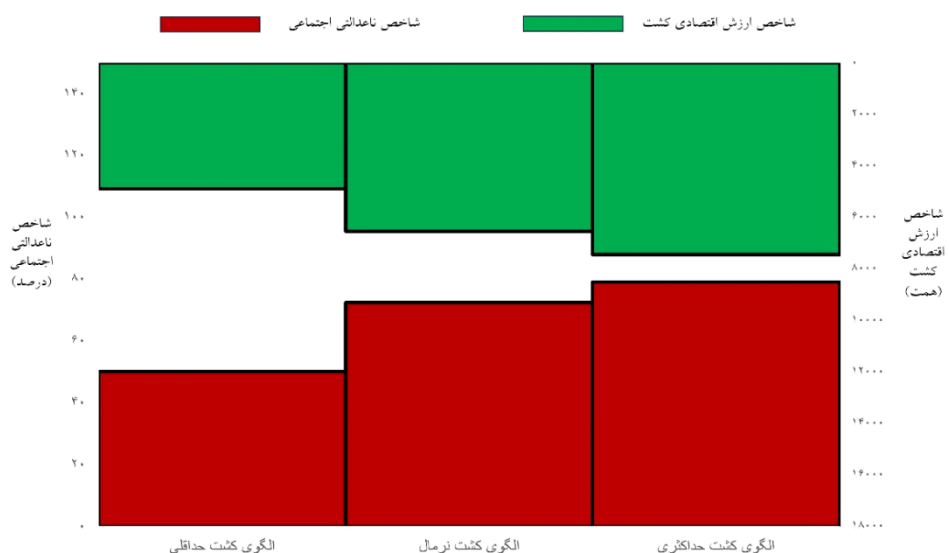
سیستم است. با این حال، شاخص ناعدالتی اجتماعی روندی معکوس نشان می‌دهد. در الگوی کشت حداقلی، به دلیل محدود بودن سطح زیر کشت و کاهش رقابت میان مصرف‌کنندگان، شاخص ناعدالتی ۵۰/۲ درصد محاسبه شده است. این مقدار در الگوی نرمال به ۶۲/۳ درصد و در الگوی حداکثری به ۷۹/۱ درصد افزایش یافته است. این روند نشان می‌دهد 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 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											
	حداکثری-۱	حداکثری-۲	حداکثری-۳	حداکثری-۴	نرمال-۱	نرمال-۲	نرمال-۳	نرمال-۴	حداقلی-۱	حداقلی-۲	حداقلی-۳	حداقلی-۴
درصد کمبود	۰	۸/۱۷	۲/۱۹	۳/۲۰	۷	۲۹	۳۲/۳	۳۵/۷	۷/۱۱	۹/۳۶	۳/۴۰	۴۲
درصد تأمین	۱۰۰	۶/۸۲	۳/۸۰	۳/۷۸	۹۲/۷	۶۹/۳	۶۵/۵	۶۲	۸/۸۶	۴/۶۰	۹/۵۶	۹/۵۳
اعتماد پذیری	۱۰۰	۸/۸۲	۶/۸۰	۸/۷۸	۹۲/۷	۶۹/۵	۶۵/۷	۶۲/۳	۸/۸۶	۵/۶۰	۱/۵۷	۲/۵۴
برگشت پذیری	۰	۲/۹	۹/۷	۴/۷	۸/۹	۷/۴	۴/۷	۷/۴	۷/۹	۹/۷	۸/۷	۵/۷
مجموع نسبی یک‌طرفه مربع انحرافات از نیاز	۰	۷/۱۵	۸/۱۷	۷/۱۹	۶/۱	۲۹/۳	۳۳/۷	۳۶/۸	۵/۱۲	۲/۳۸	۵/۴۱	۹/۴۴

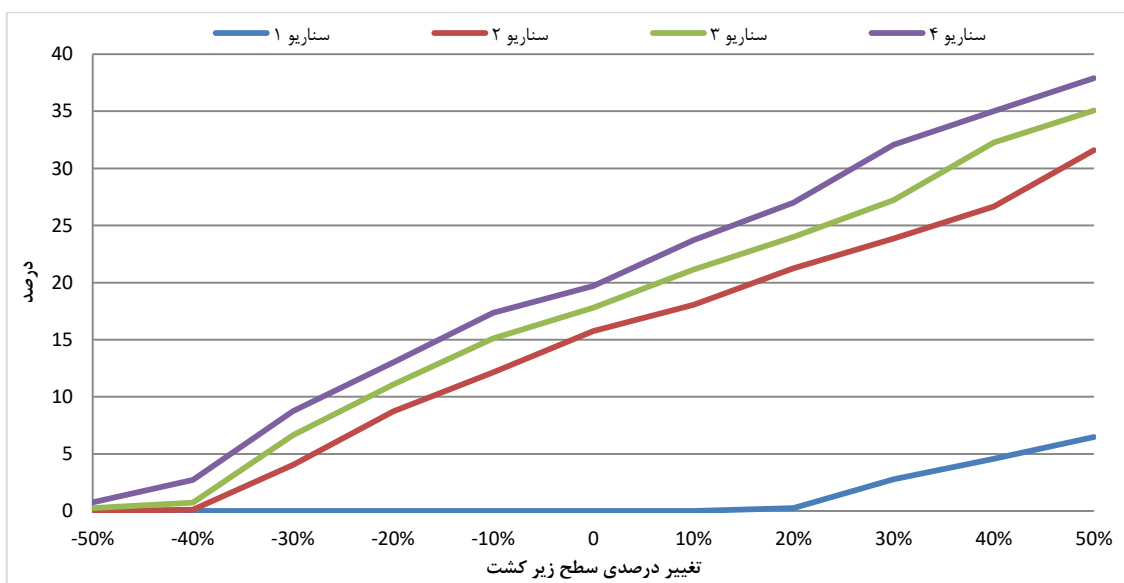


شکل ۹. مقدار شاخص‌های ارزش اقتصادی کشت و ناعدالتی اجتماعی برای الگوهای کشت حداقلی، نرمال و حداکثری

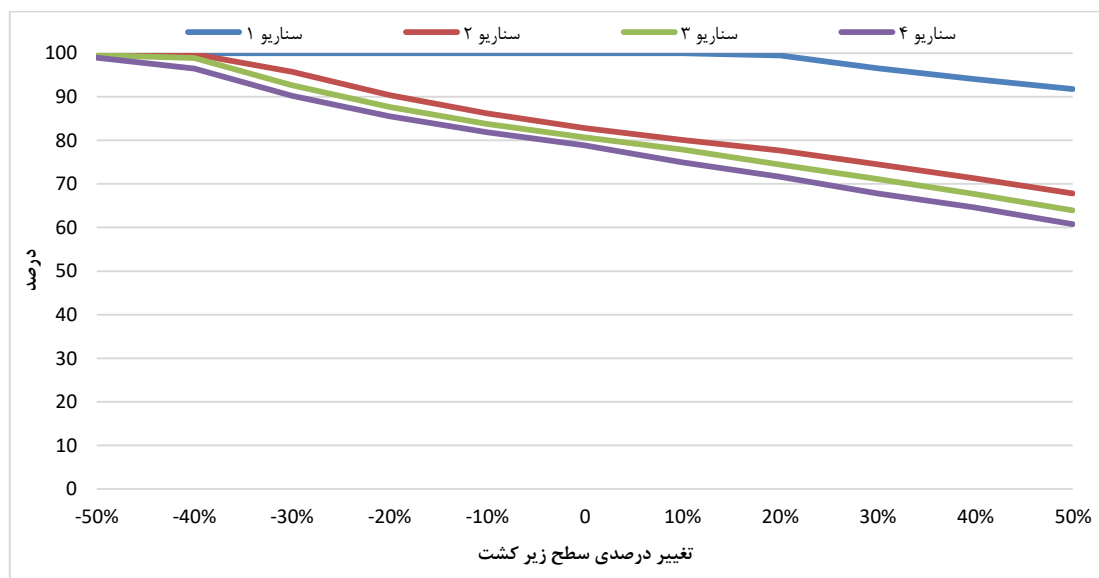
### ۲.۳. تحلیل حساسیت

به‌منظور 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 به‌شدت 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.

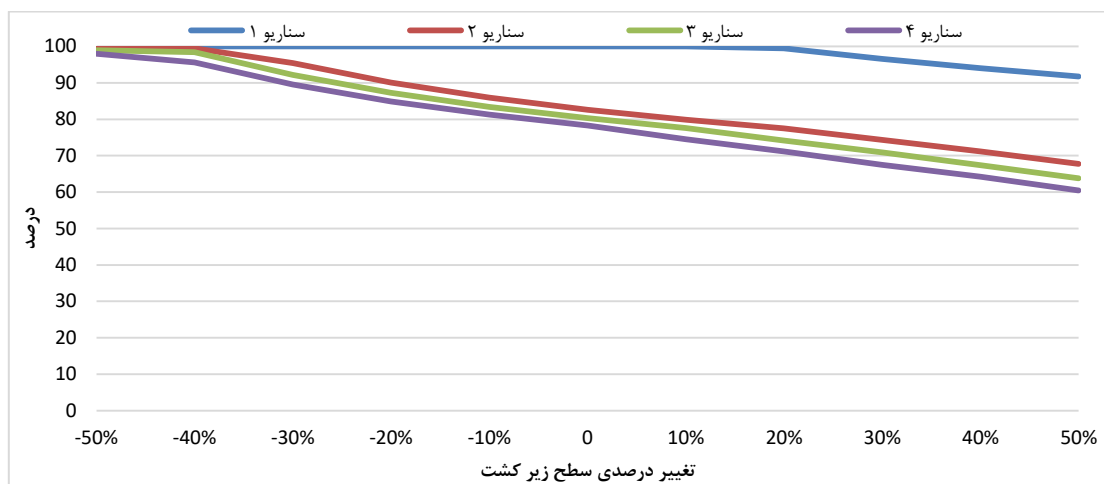
این سناریو حتی با افزایش سطح زیر کشت، شاخص‌های تأمین و اعتمادپذیری در سطح نسبتاً بالایی حفظ شده‌اند. همچنین مقایسه بین شاخص‌ها نشان می‌دهد که شاخص مجموع نسبی یک‌طرفه مربع انحرافات از نیاز و درصد کمبود، بیش‌ترین حساسیت را نسبت به تغییرات سطح زیر کشت داشته‌اند و به‌عنوان شاخص‌های هشدار اولیه برای مدیریت 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 این‌رو، یک سیاست‌گذاری منعطف و سناریومحور، با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی و سطح نیاز زیست‌محیطی، برای حفظ تعادل سامانه ضروری است.



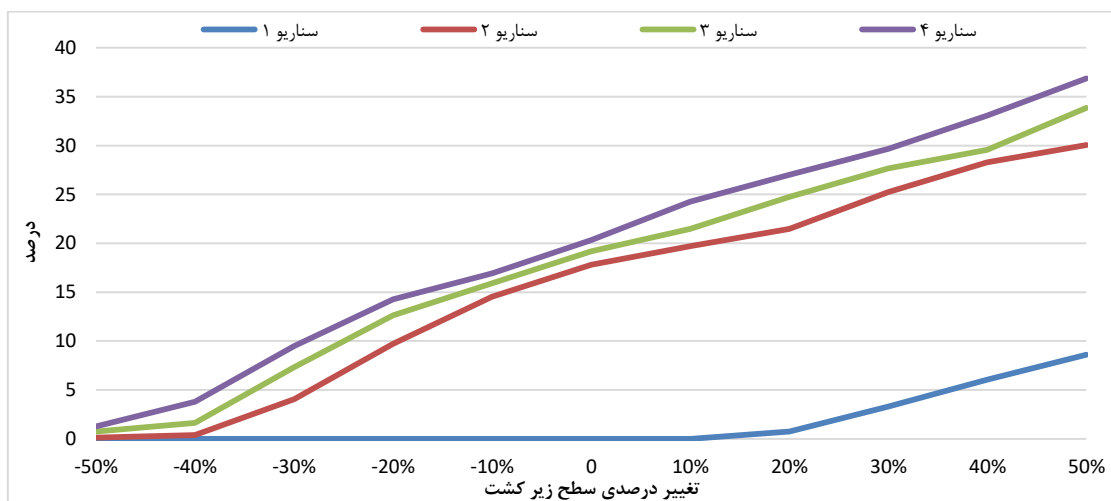
شکل ۱۰. تحلیل حساسیت شاخص مجموع نسبی یک‌طرفه مربع انحرافات از نیاز برای چهار سناریوی زیست‌محیطی



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت شاخص اعتمادپذیری برای چهار سناریوی زیست‌محیطی



شکل ۱۲. تحلیل حساسیت شاخص درصد تأمین برای چهار سناریو زیست‌محیطی



شکل ۱۳. تحلیل حساسیت شاخص کاهش کمبود برای چهار سناریوی زیست‌محیطی

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که الگوهای مختلف کشت تأثیر چشم‌گیری بر عملکرد سامانه مدیریت منابع آب پایین‌دست 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 قابل‌توجهی 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، درحالی‌که توسعه بدون ملاحظه 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.

## ۵. پی‌نوشت‌ها

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
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
16. FAO Penman-Monteith
17. Modified Montana (Tennant) Method

## ۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

## ۷. منابع

- اسلامی، امیر؛ شیروانیان، عبدالرسول و زارعیان، رضا (۱۴۰۳). تأثیر اصلاح الگوی کشت بر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب آبیاری محصولات زراعی در استان فارس (بررسی موردی: دشت قادآباد- مادرسلیمان). *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، ۲۵ (بهار)، ۱۷-۳۷.
- بشاورد، مهدی؛ ادیب، آرش و اشرفی، سیدمحمد (۱۴۰۱). تأثیر استراتژی‌های مدیریت سیستم‌های منابع آب بر شاخص‌های خشک‌سالی در سد جره. *نشریه زمین‌شناسی مهندسی*، ۱۶ (۳)، ۸۷-۱۰۷.
- جعفری، علی محمد؛ نیکوئی، علیرضا؛ قدمی فیروزآبادی، علی؛ شانازی، کاروان و بختیاری، محمدرضا (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 و عطاری، جلال (۱۳۹۶). برنامه‌ریزی الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی با استفاده از ترکیب مدل شبیه‌سازی SWAT و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۳ (۳)، ۷۲-۸۸.
- قمشی، مهدی و حمادی، کاظم (۱۴۰۳). تعیین نیاز زیست‌محیطی تالاب‌های استان خوزستان و پیشنهاد نحوه تأمین آن. اولین همایش ملی هیدرولوژی و منابع آب ایران. اهواز، ایران. ۲۴-۲۳ بهمن ۱۴۰۳. <https://civilica.com/doc/2256258>

گودرزی، مصطفی؛ قدبیک‌لو، جواد؛ غدیری، عادل و خودشناس، محمدعلی (۱۴۰۲). تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر همبست 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 اطلاع‌رسانی مؤسسه تحقیقات آب. بازیابی‌شده از <http://niwr.ir/Public/BookIR/Default.aspx> شیبانی، سحر (۱۳۹۶). بررسی پایداری الگوی کشت براساس عوامل عدم قطعیت بر فاکتورهای زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و منابع آب. پایان‌نامه دکتری، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، دانشگاه زابل، دانشکده کشاورزی.

## References

- 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., Cibin, 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. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 187-202. <http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79946.1233>
- 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