

Original Article



Optimal Crop Pattern Base on Climate-Smart Agriculture and Sustainable Water Resources Management: Multiobjective programming and System Dynamics

Received: 2024.11.23

Accepted: 2025.04.23

Abdolmajid Ranjbar, Seyed Nematollah Mousavi,*  Bahaeddin Najafi

Department of Agricultural Economics, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Agriculture remains one of the most climate-vulnerable economic sectors globally, facing heightened risks from shifting precipitation patterns, rising temperatures, and increased frequency of extreme weather events. Adapting cultivation patterns through a climate-smart agriculture (CSA) framework—integrating productivity, adaptation, and mitigation—is critical to enhance systemic resilience and ensure food security. This study focuses on the Kosar Dam basin in western Iran, a region experiencing intensified water stress due to population growth, agricultural expansion, and recurrent droughts. Understanding the dynamic interactions between climate variability, water allocation, and farming practices in this context is essential for designing sustainable management strategies that balance ecological limits with socioeconomic needs.

Material and methods: This research employs a system dynamics (SD) modeling approach to simulate the complex water resources system of the Kosar Dam basin over the period 2021–2040. SD is particularly suited for capturing feedback loops, time delays, and nonlinear relationships inherent in socio-hydrological systems. A multi-objective optimization algorithm is embedded within the SD framework to evaluate trade-offs among objectives such as maximizing profit, minimizing water and fertilizer consumption, and reducing greenhouse gas emissions.

Results and discussion: The analysis revealed a consistent decline in the volume of surface water throughout the study period, with an average annual reduction of -0.94%. This trend coincides with an escalating demand for water across various sectors, resulting in a growing scarcity index for water resources in the region and a diminishing water balance index. By the end of the assessment, the predicted scarcity index was 0.51, and the water balance index stood at 413 million cubic meters. These indicators suggest that the water resource situation in the basin is likely to worsen, impairing the system's ability to meet increasing national water demands. The evaluation of cropping patterns indicated an 11.5% reduction in the total cultivated area, down to 28167 hectares. Most crops exhibited a decline in cultivation, with beans being deprioritized. However, adjustments in the cultivation strategy resulted in a lower scarcity index compared to baseline conditions. Notably, the implementation of the proposed cultivation scenario achieved a 14% reduction in the average annual scarcity index.

Conclusion: This study demonstrates that integrating climate-smart agriculture principles within a system dynamics framework provides a powerful tool for navigating water–food–climate nexus challenges in semi-arid regions. Proactive, adaptive management informed by scenario modeling can significantly enhance resilience in the Kosar Dam basin and similar contexts. Key recommendations include prioritizing investments in water-saving technologies, strengthening early-warning systems for drought, and fostering participatory governance to align farmer incentives with sustainability goals.

Keywords: System dynamics, Multi-objective, Climate-smart, Water management

How to cite this article:

Ranjbar, A. M., Mousavi, S. N., and Najafi, B. 2026. *Optimal Crop Pattern Base on Climate-Smart Agriculture and Sustainable Water Resources Management: Multiobjective programming and System Dynamics. Adv. Environ. Sci. 23(4): 1009-1032.*

* Corresponding Author Email Address: seyed_1976mo@yahoo.com

DOI: 10.48308/envs.2025.237671.1460



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

اصلاح الگوی کشت در چارچوب کشاورزی اقلیم- هوشمند و نقش آن در مدیریت پایدار منابع آب: کاربرد مدل برنامه‌ریزی چندهدفه و پویایی‌شناسی سیستم

عبدالمجید رنجبر، سید نعمت الله موسوی*، بهالالدین نجفی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه آزاد
واحد مرودشت، مرودشت، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: کشاورزی در سراسر جهان همچنان یکی از آسیب‌پذیرترین بخش‌های اقتصادی در برابر تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود و با خطرات روزافزون ناشی از تغییر الگوهای بارش، افزایش دما و تکرار پدیده‌های حدی آب‌وهوایی دست‌به‌گریبان است. سازگاری الگوهای کشت در چارچوب «کشاورزی هوشمند نسبت به اقلیم» که ابعاد بهره‌وری، سازگاری و کاهش اثرات زیست‌محیطی را تلفیق می‌کند، نقشی کلیدی در ارتقای تاب‌آوری نظام‌های تولید و تضمین امنیت غذایی ایفا می‌نماید. پژوهش حاضر بر حوضه آبریز سد کوثر در غرب ایران متمرکز است؛ منطقه‌ای که تحت تأثیر رشد جمعیت، توسعه اراضی کشاورزی و تکرار خشکسالی‌ها، با تشدید تنش آبی مواجه شده است. شناخت تعاملات پویا میان تغییرپذیری اقلیم، تخصیص منابع آب و الگوهای کشاورزی در این زمینه، برای طراحی راهبردهای مدیریتی پایدار هم‌سو با محدودیت‌های اکولوژیک و نیازهای اقتصادی-اجتماعی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش از رویکرد مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم (System Dynamics) برای شبیه‌سازی نظام پیچیده منابع آب حوضه سد کوثر در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ بهره می‌گیرد. این روش به دلیل توانایی در بازتاب حلقه‌های بازخورد، تأخیرهای زمانی و روابط غیرخطی حاکم بر نظام‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی، گزینه‌ای کارآمد محسوب می‌شود. سپس یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه نیز با مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها ادغام شده است تا مبادلات میان اهدافی نظیر بهینه‌سازی سود اقتصادی، کمینه‌سازی مصرف آب و نهاده‌های کودی، و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد.

نتایج و بحث: یافته‌ها حاکی از روند نزولی پیوسته در حجم آب‌های سطحی طی دوره مورد مطالعه با میانگین کاهش سالانه ۹۴/۰ درصد است. این روند هم‌زمان با افزایش تقاضای آب در بخش‌های گوناگون، به تشدید شاخص کم‌آبی منابع و کاهش شاخص بیلان آبی در منطقه منجر شده است. بر اساس پیش‌بینی‌ها، تا پایان دوره ارزیابی شاخص کم‌آبی به ۵۱/۰ و شاخص بیلان آب به ۴۱۳ میلیون مترمکعب خواهد رسید. این شاخص‌ها نشان می‌دهد که وضعیت منابع آب در حوضه در مسیر وخیم‌تر شدن قرار دارد و ظرفیت سامانه برای پاسخگویی به نیازهای فزاینده آب در سطح ملی کاهش می‌یابد. بررسی الگوهای کشت بهینه نیز کاهش ۵/۱۱ درصدی در سطح کل اراضی زیر کشت (معادل ۲۸۱۶۷ هکتار) را نشان می‌دهد. اگرچه سطح زیر کشت بیشتر محصولات کاهش یافته و کشت لوبیا در اولویت قرار نگرفت، اما بازنگری در الگوی کشت موجب کاهش شاخص کم‌آبی نسبت به سناریوی وضع موجود گردید. به‌طور مشخص، اجرای سناریوی پیشنهادی کشت منجر به کاهش ۱۴ درصدی در میانگین سالانه شاخص کم‌آبی شد.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق اصول کشاورزی هوشمند نسبت به اقلیم در چارچوب پویایی‌شناسی سیستم، ابزار کارآمدی برای مدیریت چالش‌های پیوندی آب، غذا و اقلیم در مناطق نیمه‌خشک به شمار می‌رود. مدیریت پیش‌دستانه و سازگارانه که بر پایه مدل‌سازی سناریوها استوار باشد، می‌تواند تاب‌آوری حوضه سد کوثر و مناطق مشابه را به‌طور چشمگیری ارتقا بخشد. بر این اساس، راهکارهای کلیدی شامل اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بهینه‌سازی مصرف آب، تقویت سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی، و توسعه حکمرانی مشارکتی جهت هم‌سوسازی انگیزه‌های کشاورزان با اهداف پایداری زیست‌محیطی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پویایی‌شناسی سیستم‌ها، بهینه‌سازی چندهدفه، کشاورزی هوشمند نسبت به اقلیم، مدیریت منابع آب

استناد به این مقاله: رنجبر، ع. م، موسوی، س. ن، و ب. نجفی. ۱۴۰۴. اصلاح الگوی کشت در چارچوب کشاورزی اقلیم- هوشمند و نقش آن در مدیریت پایدار منابع آب: کاربرد مدل برنامه‌ریزی چندهدفه و پویایی‌شناسی سیستم. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۳(۴): ۱۰۰۹-۱۰۳۲.

* Corresponding Author Email Address: seyed_1976mo@yahoo.com

DOI: 10.48308/envs.2025.237671.1460



مقدمه

ضمن کاهش مصرف منابع، سودآوری و رفاه کشاورزان افزایش یابد (Mardani et al., 2019).

روند افزایشی تولید گازهای گلخانه‌ای، در کنار خشکسالی‌های متوالی و شدید به دلیل اثرهایی که بر نیاز، افزایش تبخیر و تعرق، کمبود منابع آب و همچنین رشد علف‌های هرز در مزارع دارند بر راندمان تولید امنیت غذایی کشور اثر داشته و در نتیجه تأثیرهای منفی اقتصادی بر معیشت و ناپایداری منابع درآمدی فعالان بخش کشاورزی دارد (زارعی و همکاران، ۱۴۰۱). در این راستا راهبرد تخفیف و سازگاری با تغییرات اقلیمی از جمله راهبردهای کاهش اثرهای تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی هستند (Fankhauser, 2017) که لازم است مورد توجه کشاورزان و سیاستگذاران در این حوزه قرار گیرد. راهبرد سازگاری با تغییر اقلیم به عنوان فرایندی مناسب و اجرایی در اختیار بخش کشاورزی و فعالان آن است (Karimi et al., 2018). یکی از راهبردهای انطباق با تغییر اقلیم اصلاح الگوی کشت بر اساس چارچوب کشاورزی- اقلیم هوشمند است. کشاورزی اقلیم- هوشمند با تمرکز بر سه هدف از جمله افزایش بهره‌وری و درآمد کشاورزی، افزایش سازگاری و تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و کاهش یا حذف انتشار گازهای گلخانه‌ای، به امنیت غذایی ملی و اهداف توسعه کمک می‌کند (Okolie et al., 2022).

با توجه به این که بیش از ۹۰ درصد از منابع آب استحصالی به دلیل بهره‌وری پایین آب و مصرف بالای آن در واحد سطح، در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (Madani and Mariño, 2009)، اعمال سیاست‌های مؤثر بر بخش کشاورزی، تأثیر بیشتری بر بحران آب در کشور خواهد داشت. از دیدگاه شورای جهانی آب ایجاد تعادل بین منابع آب موجود و زمین‌های قابل کشت، استفاده مجدد از آب در تمامی بخش‌های اقتصادی و ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا از جمله مهمترین شاخص‌های کمی و کیفی مدیریت پایدار منابع آب است. بسیار مهم است که کشورها به‌صورت راهبردی، تخصیص منابع آب خود را برنامه‌ریزی کنند و ضمن بررسی

تاکید بر تولید بیشتر محصولات کشاورزی به منظور تامین تقاضای فزاینده غذا به دلیل رشد جمعیت و قطع وابستگی‌ها و تکیه بر خودکفایی در دهه‌های گذشته، افزایش سطح زیرکشت و در پی آن افزایش فشار بر منابع آب و خاک را به دنبال داشته است. بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی نیز این شرایط را تشدید کرده است. همه این مسائل باعث شد تا تولید در شرایطی افزایش یابد که توجه کمتری به محیط‌زیست اعمال شود. افزایش برداشت از آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین افزایش استفاده از مواد شیمیایی شامل کودها و سموم مثال‌هایی از نادیده گرفتن محیط‌زیست در سال‌های اخیر است (Halkidis and Papadimos, 2007). بخش کشاورزی نسبت به سایر بخش‌های اقتصادی همواره ارتباط بیشتر و نزدیکتری با محیط‌زیست داشته، به طوری که زیربنا و پایه اصلی فعالیت‌های تولیدی در بخش کشاورزی، محیط‌زیست می‌باشد (Olanipekun et al., 2019). تأثیرات نامطلوب مصرف نهاده‌ها از یک سو و لزوم تامین امنیت غذایی از سوی دیگر سبب توجه جدی به بحث پایداری شده است. تخصیص عوامل تولید بین فعالیت‌های مختلف زراعی به نحوی که همراه با در نظر گرفتن اهداف مناسب اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی واحد کشاورزی باشد، به واقعیت‌های کشاورزی پایدار نزدیک‌تر است. در طی سال‌های اخیر، استفاده بیش از حد و غیرمعتدل از مواد شیمیایی در کشاورزی و استفاده بی‌رویه از آب و به‌کارگیری روش‌های نامناسب آبیاری وضعیت نگران‌کننده و ناپایداری را در فعالیت‌های کشاورزی کشور به‌وجود آورده است (Dashti et al., 2022). از سوی دیگر کشاورزی یکی از حساس‌ترین بخش‌ها و سیستم‌ها در مقابل تغییرات اقلیمی است. با توجه به حساسیت بالای کشاورزی به عناصر و عوامل اقلیمی تاثیرهای تغییر اقلیم بر بخش‌های گوناگون آن مانند مراحل رشد و فنولوژیک گیاهان، نیاز آبی، راندمان تولید، آفات و بیماری‌های آن بسیار ملموس است (Jat et al., 2020). بنابراین جهت دستیابی به پایداری در بخش کشاورزی لازم است تا منابع تولید از جمله آب و زمین به بهترین وجه ممکن استفاده شوند تا

Layani *et al.*, 2019) و مدیریت پایدار منابع آب (Bai *et al.*, 2019) و مدیریت پایدار منابع آب (Layani *et al.*, 2021; Gohari *et al.*, 2017; Kotir *et al.*, 2016) انجام شده است. اما تلفیق مفاهیم اصلاح الگوی کشت در چارچوب کشاورزی اقلیم- هوشمند و نقش آن در پایداری منابع آب با استفاده از مدل پویایی‌شناسی سیستم‌ها کمتر مورد توجه بوده است. به‌طور مثال، جهانگیرپور و زیبایی (Jahangirpour and Zibaei, 2022) در مطالعه‌ای به بهینه‌سازی الگوی کشت در چارچوب اهداف کشاورزی اقلیم- هوشمند در حوزه آبریز رودزن استان فارس پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که به بهینه‌سازی هم‌زمان اهداف متناقض حداکثرسازی سود اقتصادی و حداقل‌سازی ردپای آب، ردپای انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن، در مقایسه با مدل تک هدفه حداکثرسازی سود باعث کاهش ۲/۸ درصدی ردپای آب، کاهش ۲/۲۱ درصدی ردپای انرژی، کاهش ۹/۶ درصدی انتشار دی‌اکسیدکربن و کاهش ۴/۷ درصدی سود اقتصادی می‌شود. اعتمادی و همکاران (Etemadi *et al.*, 2022) در مطالعه خود به ارزیابی عوامل موثر بر پذیرش راهکارهای کشاورزی هوشمند به اقلیم پرداختند. نتایج نشان داد که ویژگی‌های روان‌شناختی مانند اعتقاد به وجود تغییرپذیری‌های اقلیمی و درک خطرات آن بر مشارکت کشاورزان در راهبردهای هوشمند به اقلیم تاثیر مثبت و معنی‌داری دارد. در زمینه اصلاح الگوی کشت همچنین مرزبان و همکاران (Marzban *et al.*, 2020) به‌منظور کاهش آثار زیست‌محیطی تولید کشاورزی به بازطراحی الگوی کشت با رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه در شرق استان لرستان پرداختند. در الگوی کشت بهینه سطح زیرکشت چغندر قند ۲۲ و لوبیا ۲ درصد نسبت به الگوی جاری افزایش و سطح زیرکشت کلزا ۵۰ درصد، سیب‌زمینی ۳۴ درصد، نخود ۲۱ درصد و عدس ۳ درصد نسبت به الگوی جاری کاهش یافت. در راستای مدیریت منابع آب، کوتیر و همکاران (Kotir *et al.*, 2024) در مطالعه‌ای با استفاده از روش پویایی‌شناسی سیستم، به مدیریت پایدار منابع آب و توسعه کشاورزی در کشور غنا پرداختند. هدف این مدل ارائه ابزار یادگیری برای سیاستگذاران برای بهبود

سیاست‌های بخش‌های آب و غذا از هماهنگی آنها با یکدیگر و شرایط متأثر از تغییر آب‌وهوا در جهت بهترین استفاده از هر قطره آب اطمینان حاصل کنند (Layani *et al.*, 2021). در این مطالعه تلاش شد تا در چارچوب مفهوم کشاورزی اقلیم- هوشمند، الگوی بهینه کشت به‌منظور انطباق با تغییر اقلیم در حوضه آبریز سد کوثر در استان کهگیلویه و بویراحمد، که مدیریت منابع آب در این منطقه به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی سیاستگذاران به‌شمار می‌رود، با رویکرد برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه دهد. تعیین الگوی بهینه کشت و به‌دست آوردن ترکیب مناسبی از محصولات که بتواند با صرف کمترین هزینه بالاترین میزان بازده و بیشترین درآمد را برای کشاورزان داشته باشد، از جمله مسئله‌های اساسی در زمینه برنامه‌ریزی تولید محصولات کشاورزی است (Mardani *et al.*, 2019). چنین الگویی می‌تواند تا بالاترین میزان بازده را با توجه به محدودیت‌ها و شرایط موجود هر منطقه، عاید کشاورز کند. در ادامه اثرات اصلاح الگوی کشت محصولات زراعی در منطقه مورد مطالعه بر مدیریت پایدار منابع آب با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مدیریت یکپارچه منابع آب به‌عنوان مؤثرترین راه برای بهینه‌سازی دسترسی به آب شناخته شده است. مدل‌های ساخته شده بر مبنای رویکرد پویایی‌شناسی سیستم، ابزارهای قدرتمندی برای درک اثرات متقابل بین زیرسیستم‌های متفاوت و در عین حال مرتبط به‌شمار می‌آیند که مجموع این اثرات متقابل، منشأ بروز رفتارهای پویا در یک سیستم بزرگتر می‌باشند (Serman, 2000; Layani *et al.*, 2021). مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم می‌توانند با شناخت و تعریف رفتارهای مسئله‌دار و محرک‌های اصلی آنها در یک الگوی جامع، مدیریت و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب را تسهیل نمایند (Madani, 2010).

تاکنون مطالعات مختلفی در ایران و جهان در زمینه برنامه‌ریزی الگوی کشت (Mirzaei *et al.*, 2019; Osama *et al.*, 2017; Marzban *et al.*, 2020; Norpour *et al.*, 2023) کشاورزی اقلیم- هوشمند (Patle *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2021)؛

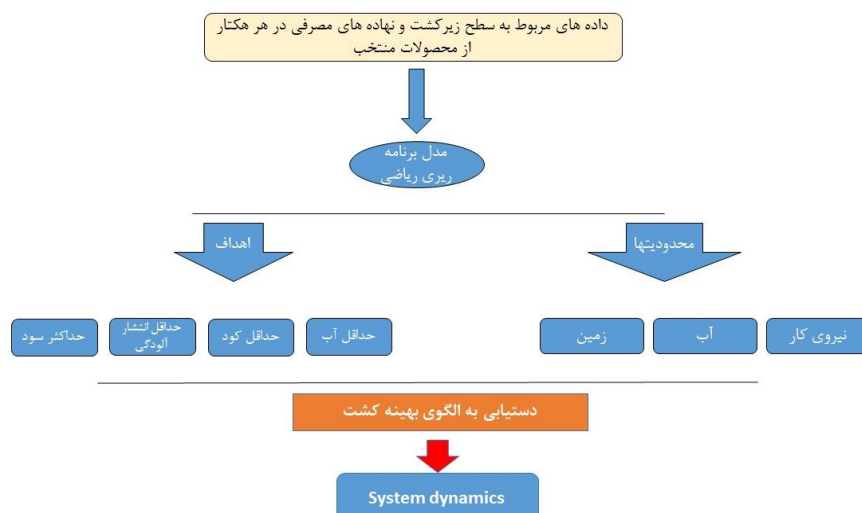
متغیرهای سیستم کشاورزی نیز در نظر گرفته نشده است. لذا ترکیب مدل برنامه‌ریزی چندهدفه با مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم می‌تواند ضمن دخالت ذی‌نفعان در تصمیم‌گیری، اثرات سیاست‌های مختلف همچون اصلاح الگوی کشت را در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در بلندمدت تعقیب نماید. بنابراین در این مطالعه تلاش شد تا در چارچوب کشاورزی اقلیم هوشمند و بهره‌مندی از مدل برنامه‌ریزی چندهدفه الگوی کشتی با لحاظ ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی برای منطقه پیشنهاد دهد. در ادامه ضمن طراحی یک مدل ذهنی برای سیستم منابع آب منطقه مورد مطالعه، تأثیر تغییر الگوی کشت بر شاخص‌های آبی در بلندمدت با استفاده از مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم دنبال شود.

روش تحقیق

در این مطالعه تلاش شد تا ابتدا با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، الگویی برای منطقه پیشنهاد شود تا ضمن به حداکثر رساندن سود کشاورزان، در مصرف آب، کود و انتشار آلودگی صرفه‌جویی شود. چارچوب اعمال سناریوی موردنظر در شکل (۱) ارائه شد. در واقع خروجی مدل برنامه‌ریزی چندهدفه به‌عنوان ورودی بخش کشاورزی وارد مدل پویایی‌شناسی سیستم شده و اثرات اصلاح الگوی کشت بر مدیریت پایدار منابع آب بررسی گردید.

درک آنها از رفتار پویای بلندمدت حوضه است. نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط ادامه وضعیت موجود کل جمعیت، تقاضای آب کشاورزی در بخش‌های مختلف روند صعودی خواهد داشت. گوموریا و همکاران (Guemouria *et al.*, 2023) با رویکرد پویایی‌شناسی سیستم به مدیریت منابع آب حوضه سوس-ماسا پرداختند. نتایج نشان داد ادامه وضع موجود منجر به ناپایداری در منابع آب خواهد شد و شاخص پایداری آب به ۲۰ درصد می‌رسد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که راندمان آبیاری یکی از سیاست‌های موثر در جهت بهبود وضعیت منابع آبی است.

بررسی مطالعات گذشته نشان داد اصلاح الگوی کشت منطبق با پتانسیل‌های هر منطقه یکی از گام‌های مهم در دستیابی به کشاورزی پایدار، انطباق با تغییر اقلیم و مدیریت پایدار منابع آب است. همچنین به‌منظور بررسی اثرات سیاست‌های مختلف عرضه محور یا تقاضا محور در بخش آب، مدلسازی پویایی‌شناسی سیستم به‌دلیل توانایی‌های آن (همچون سادگی، قابلیت بسط، ساخت مدلی نزدیک به دنیای واقعی و در نظر گرفتن تعاملات بین اجزای مختلف سیستم) مورد توجه بوده است. یکی از محدودیت‌های مطالعاتی که از مدل برنامه‌ریزی چندهدفه جهت انطباق با تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب استفاده نموده‌اند آن است که کمتر به تعاملات بخش کشاورزی با دیگر بخش‌ها توجه نمودند و پویایی در رفتار



شکل ۱- چارچوب مدلسازی پژوهش

Fig. 1- Research Modeling Framework

که حالت اول بدین مفهوم است که مجموع نسبی انحرافها حداقل شود و حالت دوم به مفهوم کمینه کردن مجموع توان دوم انحرافهای نسبی می باشد.

از روش Lp-metric مسئله توافقی زیر به دست می آید:

$$\text{Minimize} \left(\sum_{i=1}^p w_i \left| \frac{f_i^0 - f_i(x)}{f_i^0} \right|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

subject to $x \in X \sum w_i = 1$

که w_i وزن اهداف است که نماینده ترجیحات گروه تصمیم گیرنده می باشد. با توجه به وزنهای مختلف اهداف، می توان مجموعه ای از نقاط بهینه را برای متغیر تصمیم تعریف کرد. به طور کلی در این روش هدف تصمیم گیرندگان یافتن مجموعه ای از جوابهای بهینه است که فاصله آن از یک حالت ایده آل از پیش تعریف شده حداقل ممکن باشد. در این مطالعه بر اساس چارچوب کشاورزی اقلیم- هوشمند، چهار هدف به صورت حداکثرسازی بازده ناخالص (سود)، حداقل کردن مصرف آب آبیاری، حداقل کردن مصرف کودهای شیمیایی (شامل کود پتاسه، ازته، فسفات، ریزمغذی و سایر کودها)، حداقل کردن انتشار گازهای گلخانه ای^۱ (Jahangirpour and Zibaei, 2022; Darzi-) (Naftchali et al., 2024) به منظور بهینه سازی الگوی کشت در نظر گرفته شد. پس از تعیین اهداف مورد نظر و تهیه پرسشنامه و تکمیل آن توسط ۴ کارشناس و خبره، با استفاده از روش AHP^۲، به صورت جدول زیر تعیین شد.

جدول ۱- وزن اهداف مختلف در مدل سازی برنامه الگوی کشت (بر اساس روش AHP و مصاحبه با خبرگان)

Table 1- Weights of various objectives in cultivation pattern planning modeling (based on the AHP method and expert interviews)

اهداف	وزن
حداکثرسازی بازده ناخالص (سود)	۰/۳۱
حداقل کردن مصرف آب آبیاری	۰/۲۹
حداقل کردن مصرف کودهای شیمیایی	۰/۲۱
حداقل کردن انتشار گازهای گلخانه ای	۰/۱۹

در ادامه به تشریح مدل برنامه ریزی چند هدفه پرداخته شد.

برنامه ریزی چندهدفه الگوی کشت

روش معیارهای وزنی

دیدگاه اصلی این روش یافتن نزدیک ترین راه حل عملی برای یک نقطه مرجع است که به طور معمول نقطه مطلوب Duckstein نامیده می شود. برخی از محققان همچون Zeleny (1973) و (1984) این روش را برنامه نویسی توافقی می دانند. متداول ترین معیارها برای اندازه گیری فاصله بین نقطه مرجع و منطقه ممکن، معیارهای Lp-metric است.

$$L_p(f) = \left[\sum_{i=1}^k |f_i^0 - f_i(x)|^p \right]^{1/p}, 1 \leq p \leq \infty \quad (1)$$

که f_i^0 بردار پاسخهای مطلوب است. در حالت کلی انحراف نسبی را می توان به صورت $\frac{f_i^0 - f_i(x)}{f_i^0}$ در نظر گرفت. بنابراین می توان نوشت:

$$L_p(f) = \left[\sum_{i=1}^k \left| \frac{f_i^0 - f_i(x)}{f_i^0} \right|^p \right]^{1/p}, 1 \leq p \leq \infty \quad (2)$$

که $1 \leq p \leq \infty$ است. ارزش P مشخص کننده درجه تاکید به انحرافهای موجود است؛ به گونه ای که هر چه این ارزش بزرگتر باشد، تاکید بیشتری بر بزرگترین انحرافها خواهد بود و اگر $P = \infty$ شود، بدان مفهوم خواهد بود که بزرگترین انحراف از انحرافهای موجود برای بهینه سازی، مدنظر واقع می گردد. مقدارهای متفاوتی برای p ذکر شده است که برخی $p=1$ و برخی $p=2$ را مناسب دانسته اند، آشکار است

سطح زیرکشت در دسترس (هکتار) است. محدودیت دوم، محدودیت آب در دسترس و RHS_{water} مجموع آب‌های در دسترس بر حسب مترمکعب است. محدودیت‌های سوم تا پنجم نیز به ترتیب محدودیت مربوط به کود شیمیایی، سموم شیمیایی و نیروی کار در دسترس می‌باشد. محدودیت (۱۱) نشان می‌دهد سطح زیرکشت محصولات اصلی منطقه مورد مطالعه نباید از مقدار حداکثر و حداقل آن طی سال‌های گذشته انحراف پیدا کند.

در این روش در آغاز، هر هدف به صورت تکی بر مبنای محدودیت‌های موردنظر حل شده و مقدار بهینه آن محاسبه می‌شود. آن‌گاه مقدارهای بهینه هدف‌های حاصل از حل مسئله به صورت تکی، در تابع (۵) لحاظ و بر مبنای مقدارهای مختلف وزن هدف‌ها که بر مبنای ترجیح‌های تصمیم‌گیرندگان اتخاذ می‌شود، با لحاظ محدودیت‌های موردنظر، مقدارهای متغیر تصمیم که در این بررسی سطح زیرکشت محصول‌های زراعی است، تعیین می‌شود.

پویایی‌شناسی سیستم کشاورزی و منابع آب

سیستم طراحی شده شامل روابط بازخوردی بین متغیرهای اقلیمی و منابع آب، جمعیت و کشاورزی است. بخش آب این سیستم بر اساس معادله بیلان آب منابع سطحی و زیرزمینی یا به بیان دیگر، با در نظر گرفتن همه ورودی‌ها و خروجی‌ها در سطح منطقه مطالعاتی ساخته می‌شود. این بخش نمایانگر مقدار منابع آب در دسترس در محدوده مورد بررسی است. منابع آب مورد نیاز در حوضه می‌تواند از راه منابع آب سطحی (مانند بارش طبیعی، رودخانه‌ها، نهرها و یا دریاچه‌ها) و یا منابع آب زیرزمینی تأمین شود (Kotir *et al.*, 2016). منابع آب‌های سطحی در دسترس از راه عوامل گوناگونی همچون مقدار بارش، رواناب، جریان ورودی و خروجی آب سطحی، تبخیر و تعرق و شرایط زیرساختی کنترل می‌شود (Layani *et al.*, 2021). همان‌گونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، بخش آب در این مطالعه شامل منابع آب‌های سطحی و منابع آب زیرزمینی است. در نمودار ذخیره- جریان، پویایی بین اجزای گوناگون سیستم با

بر این مبنای تابع هدف در روش Lp-metric به صورت زیر خواهد بود (Darzi-Naftchali *et al.*, 2024):

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= w_1 \times \left(\frac{f_1^* - f_1}{f_1} \right) + w_2 \times \left(\frac{f_2^* - f_2}{f_2} \right) + \dots + w_4 \times \left(\frac{f_4^* - f_4}{f_4} \right) \\ w_1 + w_2 + w_3 + w_4 &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

که f_1^* الی f_4^* مقدارهای مطلوب هدف‌های موردنظر است. با توجه به این که برخی از هدف‌ها از نوع بیشینه‌سازی و برخی دیگر به صورت کمینه‌سازی است، بنابراین به منظور همسان کردن آنها، دو تابع هدف کمینه‌سازی در نشانه منفی ضرب شده است. محدودیت‌های این مدل شامل سطح زمین در دسترس، منابع آب در دسترس، محدودیت دسترسی به کودها و سم‌های شیمیایی و نیروی کار است که به صورت زیر تعریف شد. در این روابط RHS بیشینه منابع در دسترس است.

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq RHS_{land} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w r_i x_i \leq RHS_{water} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n f c_i x_i \leq RHS_{fertilizer} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n p c_i x_i \leq RHS_{pesticide} \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n l c_i x_i \leq RHS_{labour} \quad (10)$$

$$x_i \leq \text{Max}_{x_i} \quad (11)$$

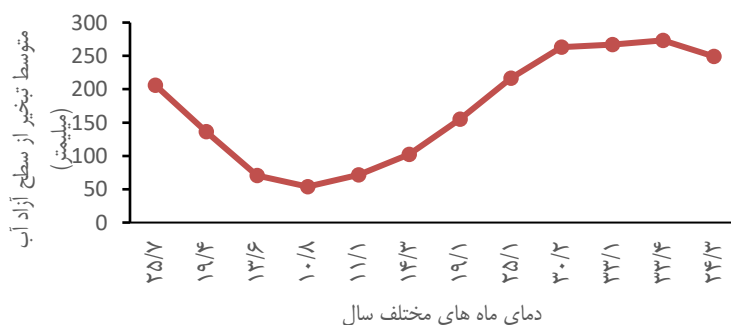
$$x_i \geq \text{Min}_{x_i}$$

که $w r_i$ نیاز ناخالص آبی محصول i در هر هکتار، $f c$ نیاز کودهای شیمیایی محصول‌ها در هر هکتار، $p c$ میزان مصرف سم در هر هکتار و در نهایت $l c$ نیروی کار مورد استفاده در هر هکتار از محصول در منطقه مورد بررسی می‌باشد. مسئله راندمان آبیاری (که برای استان کهگیلویه و بویراحمد به طور متوسط ۰/۴۳ عنوان شده است) با توجه به نیاز خالص آبی گیاهان مدنظر قرار گرفته است. به طوری که نیاز ناخالص آبی محصولات از تقسیم نیاز خالص آبی بر راندمان آبیاری به دست آمد. محدودیت اول، محدودیت سطح زیرکشت را نشان می‌دهد که مجموع کل سطح زیرکشت نباید از کل سطح زیرکشت در دسترس بیشتر باشد و RHS_{land} مجموع

می‌تواند بر حجم منابع آب ورودی به سیستم اثر گذاشته و آن را آسیب‌پذیر کند. پس از جمع‌آوری مقادیر میانگین بارندگی، رواناب و نفوذ برای زیرحوضه‌های گوناگون در منطقه مورد مطالعه (دشت لیستر، خیرآباد، چهاربیشه، شاه‌بهرام، دهدشت و سرپری)، میانگین وزنی ضریب رواناب و ضریب نفوذ به ترتیب معادل ۱۵/۸۸ درصد و ۱۲/۰۲ درصد به‌دست آمد که در مدل پویایی‌شناسی سیستم طراحی شده برای حوضه آبریز سد کوثر به‌کار گرفته شد. تبخیر و تعرق از جمله متغیرهایی هستند که می‌توانند بر مقدار دسترسی منابع آب اثری شایان توجه داشته باشند. در این مطالعه نرخ تبخیر تابعی از دما در نظر گرفته شد. لذا، افزایش دما در سال‌های آینده، می‌تواند بر تغییر رفتار متغیرهای بخش آب اثرگذار باشد. با در نظر گرفتن نرخ تبخیر و تعرق در منطقه مورد بررسی، حجم تبخیر در سال‌های گوناگون از رابطه (۱۴) قابل محاسبه است:

$$Evapotranspiration_t = Evapotranspiration\ rate \times Surface\ water_t \quad (14)$$

نرخ تبخیر خود تابعی از دماست که به‌صورت تابع لوک آپ^۳ در مطالعه حاضر در نظر گرفته شد. به‌عبارت دیگر به دلیل عدم اطمینان از رابطه خطی و یا غیرخطی بین این دو متغیر و عدم دسترسی به داده‌های سری زمانی برای برآورد رگرسیون بین این دو متغیر، تلاش شد تا ارتباط بین این دو متغیر به‌صورت تابع لوک آپ بر اساس داده‌های ماهانه سال پایه وارد مدل شود.



نمودار ۱- رابطه بین دما و تبخیر از سطح آزاد آب در حوضه مورد مطالعه

Fig. 1- Relationship between temperature and evaporation from water surface in the study basin

استفاده از پیکان‌های علامت‌دار نشان داده می‌شود که به‌صورت روابط علی- معلولی مثبت و یا منفی هستند. گونه جزئی‌تر متغیرهای موردنظر در این بخش شامل دما، بارش، تبخیر، رواناب، جریان‌های طبیعی و همچنین تغذیه آب‌های زیرزمینی از راه آب‌های برگشتی در منطقه هستند. عوامل ورودی شامل جریان‌های ورودی سطحی و زیرسطحی، آب برگشتی و ریزش‌های جوی و عوامل خروجی شامل جریان خروجی سطحی، جریان خروجی زیرسطحی، تبخیر و تعرق، بهره‌برداری و مصارف می‌باشد. دما و بارش به‌عنوان متغیرهای اقلیمی بر مقدار آب در دسترس اثر گذاشته به‌گونه‌ای که افزایش بارش می‌تواند مقدار منابع آب در دسترس را افزایش دهد. بخشی از حجم بارش مؤثر با در نظر گرفتن ضریب رواناب گزارش شده در مطالعات بیلان آب محدوده‌های مطالعاتی، به‌صورت رواناب به سیستم آب وارد می‌شود (Kotir et al., 2016). همان‌گونه که از رابطه (۱۲) پیداست حجم رواناب از حاصل ضرب ضریب رواناب در حجم بارش به‌دست می‌آید. براساس رابطه (۱۳) بخشی دیگر از بارش مؤثر نیز با در نظر گرفتن میانگین ضریب نفوذ، به منابع آب زیرزمینی می‌پیوندد:

$$Runoff_t = Runoff\ rate \times Actual\ rainfall_t \quad (12)$$

$$Percolation_t = Percolation\ rate \times Actual\ rainfall_t \quad (13)$$

بنابراین، کاهش حجم بارندگی ناشی از تغییرات اقلیم

متغیر جمعیت کل، جمعیت مطالعه موردی را در بر می‌گیرد و یکی از اجزای آن ذخیره «جمعیت» است که با نرخ رشد جمعیت در حال گسترش است. جمعیت در زمان t از نظر ریاضی با معادله (۱۹) به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$Population_t = Population_0 + \int_{t_0}^t (population\ change_t) dt \quad (19)$$

بر اساس آمارهای منتشر شده از مرکز آمار ایران (۱۴۰۳) متوسط نرخ رشد در منطقه مورد مطالعه ۱/۵۴ درصد گزارش شد. بر اساس مطالعه یانگ و همکاران (Yang et al., 2008) افزایش جمعیت با توجه به مصرف سرانه، باعث افزایش تقاضای آب می‌شود. به گونه مستقیم جمعیت تقاضای خانگی آب را تعیین و به گونه غیرمستقیم بر دیگر تقاضاها و استفاده از منابع آب اثرگذار است (Wu et al., 2013). جمعیت خود متأثر از نرخ رشد جمعیت است. به بیان دیگر، مقدار تولد و خالص مهاجران وارد شده بر کل جمعیت اثر مثبت و مقدار مرگومیر اثر منفی دارد (Sterman, 2001). جمعیت منطقه مورد بررسی بر اساس نرخ شهرنشینی به دو گروه جمعیت شهری و روستایی تقسیم شد. بر اساس سرانه آب مصرفی در هر بخش، مقدار تقاضای آب در بخش خانگی تعیین شد.

$$Urban\ population_t = Population_t \times Urbanization\ rate \quad (20)$$

$$Rural\ population_t = Population_t - Urban\ population_t \quad (21)$$

$$Urban\ water\ demand_t = Urban\ population_t \times per\ capita\ water\ consumption \quad (22)$$

$$Rural\ water\ demand_t = Rural\ population_t \times per\ capita\ water\ consumption \quad (23)$$

$$Residential\ water\ demand_t = Rural\ water\ demand_t + Urban\ water\ demand_t \quad (24)$$

افزایش عرضه آب خود می‌تواند به مصرف بخش‌ها گوناگون از جمله کشاورزی کمک کند و با افزایش مصرف آب در بخش کشاورزی، صنعت و شهری، جریان برگشتی آب افزایش می‌یابد که بخشی از آن به منابع زیرزمینی، بخشی دیگر به جریان آب‌های سطحی تبدیل می‌شود. جریان آب برگشتی از بخش‌های گوناگون بر اساس رابطه (۱۵) به مثابه درصدی از آب استفاده شده در هر یک از زیربخش‌ها است که به منبع آب سطحی و زیرزمینی افزوده می‌شود:

$$Total\ return\ flow_t = water\ demand_t \times rate\ of\ return\ flow \quad (15)$$

مصرف منابع آب در بخش کشاورزی، بخش خانگی و مصرف بخش صنعت بر اساس رابطه (۱۶) کل تقاضای آب را تشکیل می‌دهند:

$$Total\ water\ demand_t = Agricultural\ water\ demand_t + Residential\ water\ demand_t + Environmental\ need_t + Industry\ water\ demand_t + other\ water\ demand \quad (16)$$

این متغیرها (مصرف بخش‌های گوناگون) بر متغیر تقاضای کل آب اثر مثبت دارند، بدین معنی که افزایش (یا کاهش) آنها مقدار تقاضای کل آب را در محدوده مطالعاتی افزایش (یا کاهش) می‌دهد. ذخیره آب سطحی و زیرزمینی بر اساس رابطه‌های زیر قابل محاسبه هستند:

$$surface\ water_t = surface\ water_0 + \int_{t_0}^t (water\ inflow_t + return\ flow_t - evapotranspiration_t - water\ consumption_t - environmental\ need_t) dt \quad (17)$$

$$groundwater_t = groundwater_0 + \int_{t_0}^t (water\ inflow_t + return\ flow_t - evaporation_t - water\ consumption_t + percolation_t) dt \quad (18)$$

شاخص‌های منابع آب

ارتباط متقابل بین عرضه و تقاضای آب با استفاده از شاخص تعادل عرضه و تقاضا قابل ارائه است (Langedale *et al.*, 2007). در مطالعات گوناگون شاخص‌های گوناگونی برای لحاظ اثرات متقابل بین دو بخش در مدل‌سازی استفاده شده است. برای مثال، در مطالعه ژانگ (Zhuang, 2014) شاخص تعادل بین عرضه و تقاضای آب به صورت زیر معرفی شد:

$$BI = WS - WD \quad (26)$$

جایی که BI شاخص تعادل، WS منابع آب در دسترس و WD تقاضای قابل انتظار در محدوده مورد مطالعه است. با افزایش (کاهش) منابع آب در دسترس شاخص تعادل آب افزایش (کاهش) می‌یابد. زمانی که شاخص تعادل آب نزولی و یا حتی پایین‌تر از صفر است، نشان می‌دهد که نیازمند گزینه‌های مدیریت عرضه و یا تقاضاست. سیاست‌های مدیریت پایدار کشاورزی و انطباق با تغییر اقلیم می‌تواند منجر به افزایش شاخص تعادل آب شود (Zhuang, 2014). در این مطالعه از شاخص کمیابی منابع آب به منظور لحاظ کردن اثرات متقابل بین بخش تقاضا و عرضه آب و ارزیابی و مقایسه آثار سیاست‌های گوناگون از منظر پایداری استفاده شده است. پایداری در منابع آب به منظور بهره‌مندی از این منبع با ارزش برای نسل حاضر و آینده ضروری است. به منظور دستیابی به پایداری، نیاز به یک دانش جامع در مورد سیستم منابع آب است. شاخص کمیابی منابع آب به منظور تعیین وضعیت سیستم منابع آب در شرایط گوناگون مفید خواهد بود. از سوی دیگر، با تشخیص عناصر و عوامل تأثیرگذار بر رفتار سیستم طراحی شده، اثرات سیاست‌های مدیریت پایدار کشاورزی امکان‌پذیر خواهد بود. WSI شاخص کمیابی است.

$$WSI = \frac{WD}{WS} \quad (27)$$

جدول (۱) جزئیاتی از متغیرها و مقادیر اولیه آن‌ها ارائه شد.

بخش کشاورزی مصرف‌کننده عمده منابع آب است. تقاضای آب در بخش کشاورزی از حاصل ضرب سطح زیرکشت محصولات بر نیاز آبی گیاهان محاسبه می‌شود. البته راندمان آبیاری نیز در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. بخشی از مصرف آب در بخش کشاورزی به صورت برگشت آب به منابع آب سطحی و زیرزمینی باز می‌گردد. از سوی دیگر بخشی از تقاضای آب در سطح حوضه از طریق برداشت از منابع آب زیرزمینی پاسخ داده می‌شود.

$$Agricultural\ water\ demand_t = \sum_{i=1}^n (cropland\ area_i \times \frac{water\ requirement_i}{irrigation\ efficiency}) \quad (28)$$

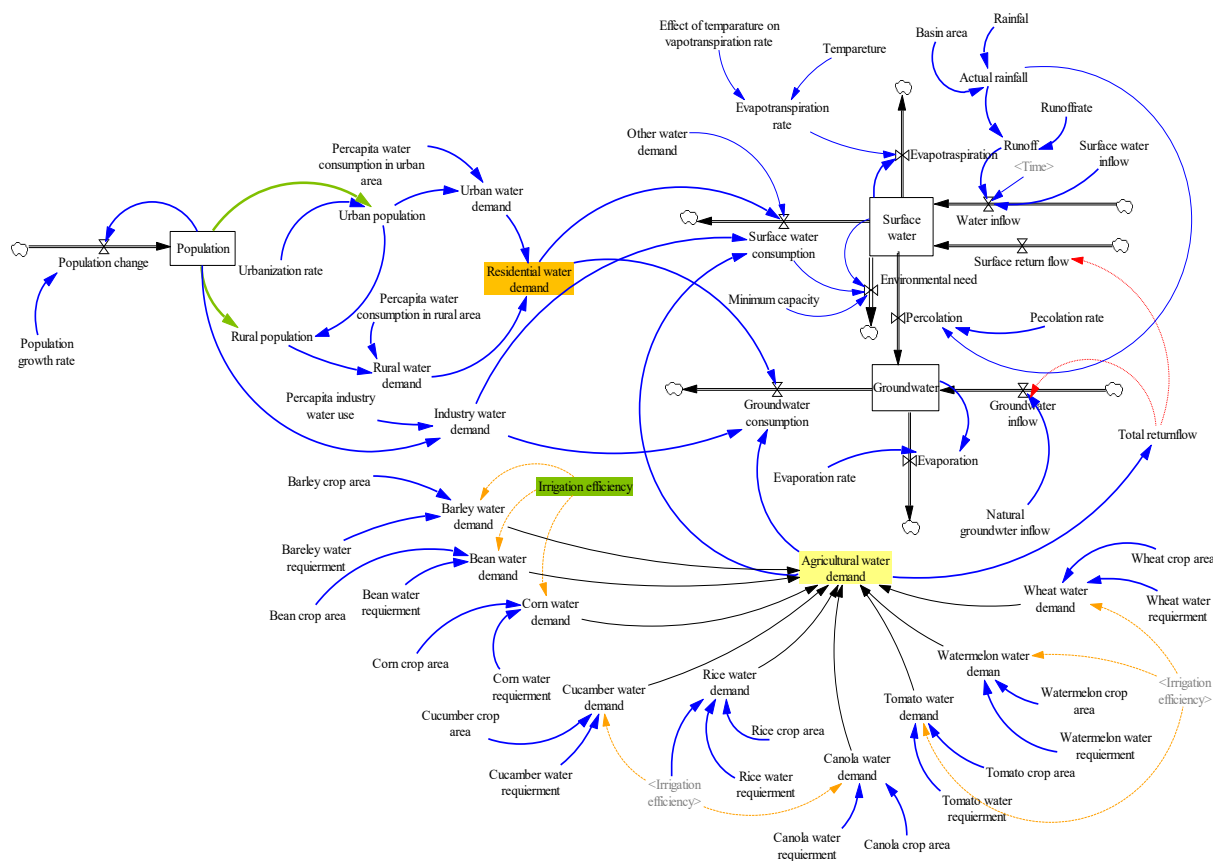
در مدل طراحی شده ابتدا الگوی کشت فعلی منطقه وارد مدل می‌شود. در ادامه نتایج الگوی برنامه‌ریزی چند هدفه و الگوی پیشنهادی در قالب سناریو مدیریت منابع آب وارد مدل شده و اثرات آن بر رفتار متغیرهای کلیدی سیستم شناسایی می‌شود.

به منظور آزمون مدل از دو آزمون ساختاری و رفتاری استفاده شد. آزمون ساختاری با مقایسه روابط علی و ریاضی بین متغیرها در سیستم طراحی شده با دانش موجود در مورد سیستم واقعی انجام می‌شود. در طراحی ساختار سیستم منابع آب در حوضه آبریز سد کوثر سعی بر این بوده تا به ادبیات موضوع توجه شود (Layani *et al.*, 2021). در آزمون رفتاری، پس از شبیه‌سازی متغیرهای کلیدی سیستم، رفتار آنها با داده‌های تاریخی مقایسه و ضریب تعیین (R^2) محاسبه شد. در صورتی که ضریب تعیین بالا باشد نشان‌دهنده همبستگی بالا میان روندهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده این متغیرها برای یک مدل یکپارچه پیچیده است و بیانگر آن است که مدل طراحی شده می‌تواند رفتار واقعی متغیرهای سیستم را به خوبی شبیه‌سازی کند.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2} \quad (29)$$

جدول ۱- جزئیات برخی از پارامترهای مهم به کار رفته در مدل
Table1- Details of selected key parameters used in the model

نام متغیر	مقدار کمی	واحد	مرجع
نرخ رشد جمعیت	۱/۵۴	درصد	مرکز آمار ایران
جمعیت اولیه	۲/۳۵	میلیون نفر	مرکز آمار ایران
نرخ شهرنشینی	۶۷	درصد	مرکز آمار ایران
سرانه آب مصرفی خانگی شهری	۶۴/۳	مترمکعب در سال	گزارش‌های آب منطقه‌ای
سرانه آب مصرفی خانگی روستایی	۳۶/۶	مترمکعب در سال	گزارش‌های آب منطقه‌ای
سرانه آب مصرفی صنعتی	۲/۳۱	مترمکعب در سال	گزارش‌های آب منطقه‌ای
مساحت حوضه	۴۲۳۲/۵	کیلومترمربع	گزارش‌های بیلان آب
نرخ نفوذ	۱۲	درصد	گزارش‌های بیلان آب
نرخ رواناب	۱۶	درصد	گزارش‌های بیلان آب
بارندگی	سری زمانی	میلیمتر	گزارش‌های بیلان آب
دما	سری زمانی	درجه سانتی گراد	گزارش‌های بیلان آب
تقاضای زیست‌محیطی	۷۹	میلیون مترمکعب	گزارش‌های آب منطقه‌ای
حجم آب سطحی اولیه	۶۸۰	میلیون مترمکعب	گزارش‌های آب منطقه‌ای
سطح زیرکشت گندم	۲۱۷۴۱	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
سطح زیرکشت جو	۱۲۰۱	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
سطح زیرکشت ذرت	۲۴۷۷	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
سطح زیرکشت برنج	۲۷۰۲	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
سطح زیرکشت لوبیا	۱۷۵	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
سطح زیرکشت کلزا	۳۹۹	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
سطح زیرکشت خیار	۱۳۶	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
سطح زیرکشت گوجه	۱۱۰	هکتار	سازمان جهاد کشاورزی
نیاز خالص آبی گندم	۴۱۲۳	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی جو	۳۵۱۶	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی ذرت	۶۶۶۴	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی برنج	۱۱۸۶۲	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی لوبیا	۷۱۹۳	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی کلزا	۴۶۰۲	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی هندوانه	۷۶۹۴	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی خیار	۸۹۸۹	مترمکعب در هکتار	NETWAT
نیاز خالص آبی گوجه	۹۷۰۸	مترمکعب در هکتار	NETWAT



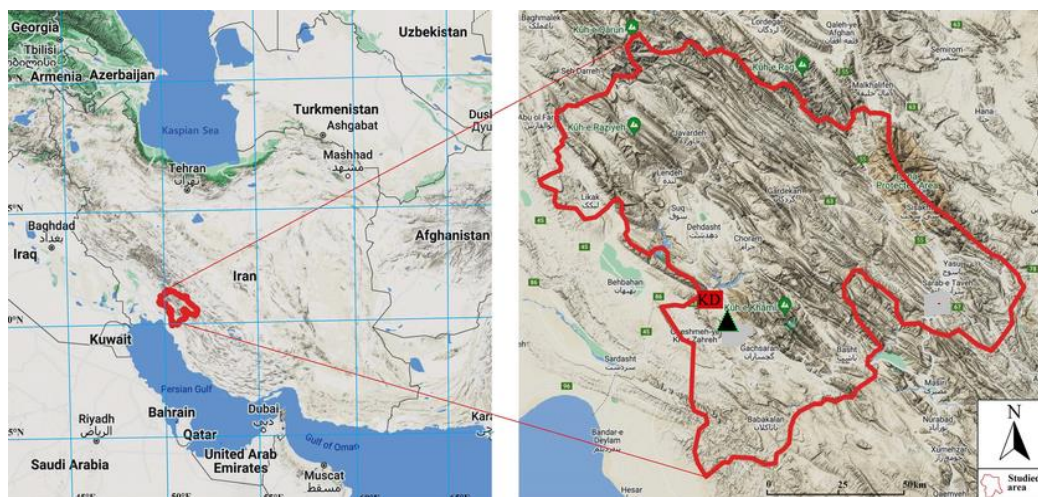
شکل ۲- نمودار ذخیره- جریان سیستم طراحی شده

Fig. 2- Stock-flow diagram of the designed system

کهگیلویه و بویراحمد در فاصله ۲۰ کیلومتری غرب شهرستان گچساران واقع است. به طور کلی در هر سال از مجموع منابع آب اختصاص یافته به مصارف به طور میانگین در حدود ۳۰ درصد به بخش کشاورزی، ۶۰ درصد به بخش شهری و ۱۰ درصد به بخش صنعتی اختصاص می‌یابد. روند کاهش ذخیره آب سد کوثر ناشی از کاهش جریان‌های ورودی و افزایش جریان‌های خروجی نگرانی‌هایی را در بین سیاستگذاران ایجاد کرده و این مسئله خود تأکیدی بر لزوم مدیریت پایدار این منبع حیاتی دارد. بسیار مهم است که بتوان به صورت راهبردی، تخصیص منابع آب خود را برنامه‌ریزی کرد و ضمن بررسی سیاست بخش‌های آب و غذا از هماهنگی آنها با یکدیگر و شرایط متأثر از تغییرپذیرهای آب و هوا در راستای استفاده بهینه از هر قطره آب اطمینان یافت.

منطقه مورد مطالعه

سد کوثر یکی از سدهای واقع شده در حوضه آبریز زهره است. این سد بر روی رودخانه خیرآباد و در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال غرب شهر گچساران واقع شده است. این سد به ارتفاع ۱۴۴ متر از نوع بتنی وزنی و حجم مخزن ۵۸۰ میلیون مترمکعب سالیانه ۴۲۶ میلیون مترمکعب آب را برای مصارف آب شهری، کشاورزی و زیست‌محیطی تنظیم می‌کند. یکی از اهداف مهم سد تأمین آب شهری و صنعتی به میزان ۱۸۲ میلیون مترمکعب در سال و تأمین آب طرح بزرگ آبرسانی به شهرهای حاشیه خلیج فارس است. هدف از اجرای طرح آبرسانی شهر گچساران تأمین آب این شهر و روستاهای بین راه در افق سال ۱۴۱۰ برای جمعیتی معادل ۱۵۵۰۰۰ نفر است. شبکه آبیاری زهکشی دشت لیستر نیز از اهداف سد مخزنی کوثر است که در استان



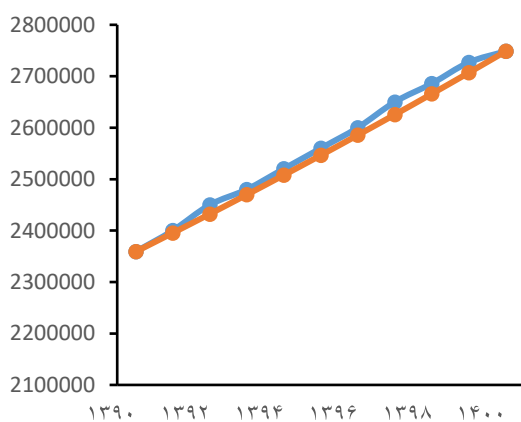
شکل ۳- موقعیت مکانی سد کوثر در استان کهگیلویه و بویراحمد

Fig. 3- Geographical location of Kosar Dam in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province

نتایج و بحث

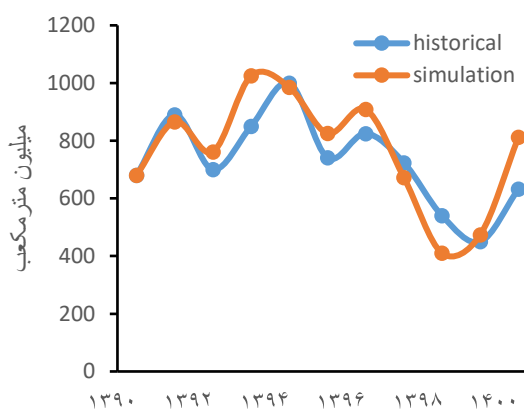
نتایج آزمون رفتاری نیز همبستگی معنی‌داری را بین روندهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده جمعیت، و منابع آب دسترس با رفتار واقعی این متغیرها نشان داد. بنابراین می‌توان گفت این مدل به خوبی کالیبره شده است تا رفتار پارامترهای مختلف را بازسازی کند. نمودارهای (۲ و ۳) مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده متغیرهای جمعیت و منابع آب سطحی را در آزمون رفتاری نشان می‌دهد. مقدار ضریب تعیین محاسبه شده برای متغیر جمعیت ۰/۸۸ و برای متغیر منابع آب سطحی در دسترسی ۰/۶۹ است. بنابراین از مدل طراحی شده می‌توان برای شبیه‌سازی رفتار سیستم در آینده بهره گرفت.

در این بخش، ابتدا نتایج آزمون مدل پویایی‌شناسی سیستم طراحی شده، بیان و سپس نتایج شبیه‌سازی رفتار متغیرهای کلیدی در شرایط موجود با فرض ثابت بودن شرایط اجتماعی و محیطی ارائه می‌شود. در نهایت، با تغییر پارامترهای ورودی مدل در سناریوهای تغییر الگوی کشت در چارچوب کشاورزی اقلیم- هوشمند، رفتار متغیرهای کلیدی سیستم در آینده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای اعتبارسنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ استفاده شد. آزمون رفتاری شامل تجزیه و تحلیل رفتار ایجاد شده توسط ساختار مدل برای ارزیابی کفایت ساختار مدل است.



شکل ۳- آزمون رفتاری متغیر جمعیت

Fig. 3- Behavior test of the population variable



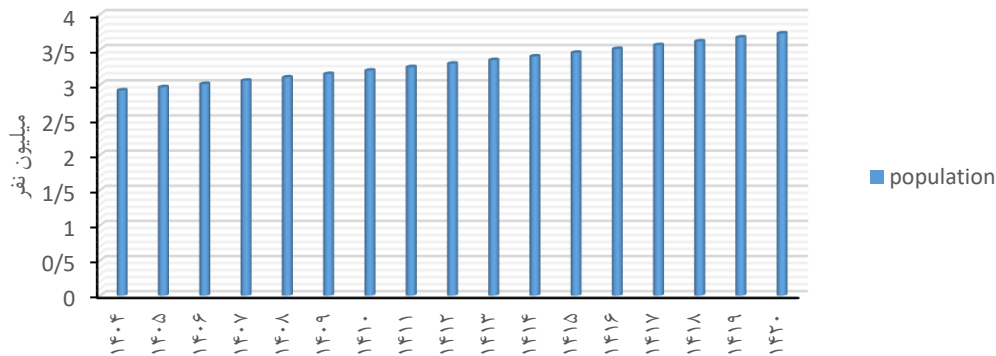
شکل ۲- منابع آب سطحی در دسترس

Fig. 2- Available surface water resources

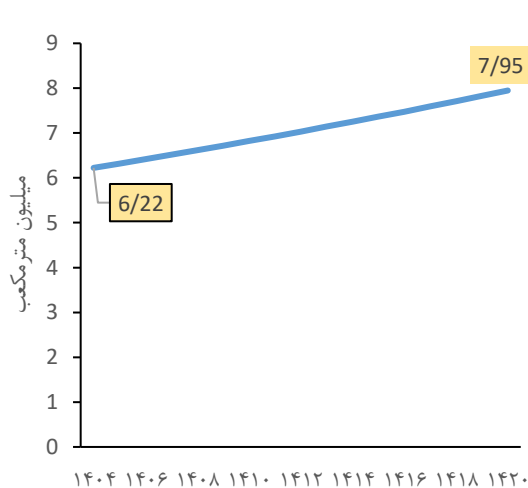
برآورد شده است که در ابتدای دوره معادل ۱/۹۵۷ میلیون نفر ساکن مناطق شهری و ۰/۹۶۴ میلیون نفر ساکن مناطق روستایی هستند. در سال ۱۴۰۴ نیز جمعیت ساکن مناطق شهری و روستایی به ترتیب معادل ۲/۴۹۹ میلیون نفر و ۱/۲۳۱ میلیون نفر پیش‌بینی شدند.

تقاضای آب خانگی تحت تأثیر مصرف سرانه آب در بخش شهری و روستایی و جمعیت است. با توجه به روند رو به رشد جمعیت در نمودار (۴) انتظار می‌رود تقاضای آب برای بخش شهری و روستایی افزایش یابد. همان‌گونه که در نمودار (۵) مشاهده می‌شود تقاضای آب خانگی مطابق با انتظار دارای روندی افزایشی است.

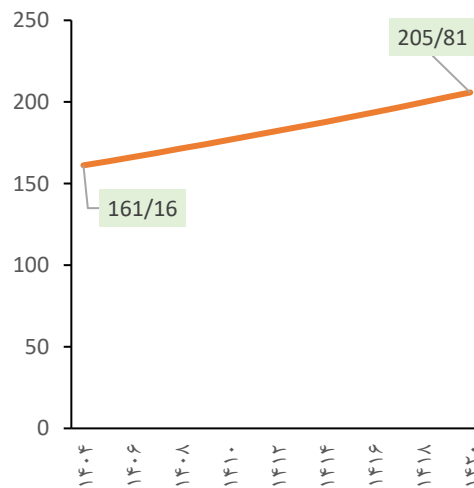
پس از اتمام تست قابلیت اطمینان، از مدل طراحی شده برای تجزیه و تحلیل رفتار متغیرهای کلیدی سیستم در منطقه مورد مطالعه طی دوره ۱۴۰۴ تا ۱۴۲۰ استفاده شد. جمعیت یکی از متغیرهای مهم در سیستم کشاورزی و منابع آب است. افزایش جمعیت با افزایش تقاضا برای آب و غذا بر رفتار سیستم اثرگذار است. نمودار (۴) بیانگر تغییرات جمعیت در منطقه مورد مطالعه است. در سناریو پایه نرخ رشد سالانه جمعیت معادل ۱/۵۴ درصد است که در طول دوره ۱۴۰۴ تا ۱۴۲۰ ثابت فرض شده است. با این نرخ رشد، مقدار جمعیت در سال ۱۴۰۴ معادل ۲/۹۲۱ میلیون نفر و در سال ۱۴۲۰ معادل ۳/۷۳۱ میلیون نفر



شکل ۴- شبیه‌سازی متغیر جمعیت در منطقه مورد مطالعه
Fig. 4- Simulation of the population variable in the study area



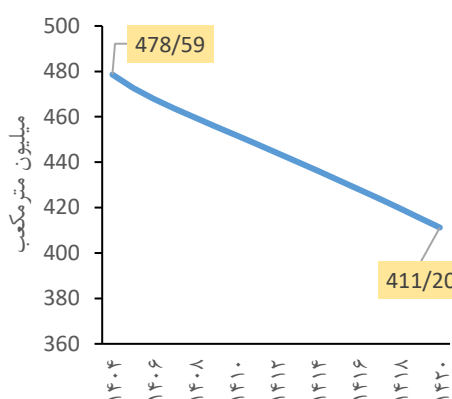
شکل ۶- نمودار شبیه‌سازی متغیر تقاضای آب بخش صنعت
Fig. 6- Simulation of water demand variable in the industrial sector



شکل ۵- شبیه‌سازی متغیر تقاضای آب در بخش مسکونی
Fig. 5- Simulation of the water demand variable in the residential sector

تقاضای آب برای بخش صنعت نیز به نوعی تابعی از جمعیت تعریف شده است. بنابراین، روند مشاهده شده برای این متغیر نیز همچون روند تغییرات تقاضای آب خانگی افزایشی است.

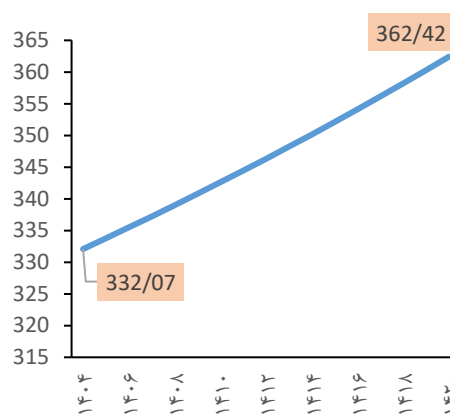
روند تغییر در برداشت از منابع آب سطحی در نمودار (۷) نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است برداشت از منابع آب سطحی در طول دوره مورد مطالعه دارای روند افزایشی است و بیشترین مقدار خود را در سال ۱۴۲۰ (۳۶۲/۴۱ میلیون مترمکعب) تجربه می کند.



شکل ۸- حجم آب سطحی در دسترس در دوره شبیه سازی
Fig. 8- Simulation of available surface water

آب سطحی معادل ۴۱۱/۲۰ میلیون مترمکعب پیش بینی شده است. انتظار می رود سیستم منابع آب منطقه مورد مطالعه کمترین مقدار حجم آب سطحی در دسترس را در انتهای دوره شبیه سازی تجربه کند. میانگین تغییرات سالانه این متغیر در طول دوره ۱۴۰۴ تا ۱۴۲۰ معادل ۰/۹۴- درصد برآورد شده است. با ادامه شرایط کنونی حاکم بر سیستم منابع آب حوضه سد کوثر، با افزایش تقاضای آب در بخش خانگی در نتیجه رشد جمعیت و تقاضا در بخش کشاورزی و صنعت، حجم آب سطحی در دسترس دارای روند نزولی است. رویهم رفته، با توجه به مقادیر پیش بینی شده حجم آب سطحی در دسترس می توان بیان کرد که سیستم منابع آب در آینده ای نزدیک با کمبود فیزیکی آب روبرو خواهد شد. این بدان معناست که حتی با بالاترین

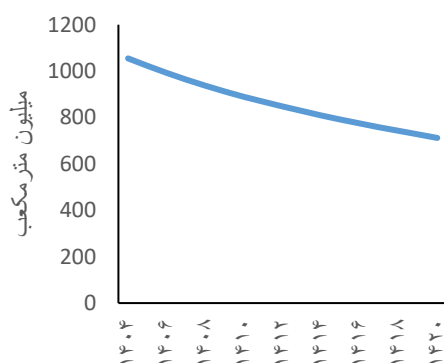
به گونه ای که مقدار این متغیر در ابتدای دوره شبیه سازی شده معادل ۱۶۱/۱۶ میلیون مترمکعب و در انتهای دوره با رشدی معادل ۲۷/۷۰ درصد به ۲۰۵/۸۰ میلیون مترمکعب می رسد. بر اساس نتایج به دست آمده میانگین سالانه حجم آب تقاضا شده در بخش خانگی معادل ۱۸۲/۶۳ میلیون مترمکعب است که از این بین ۲۱ درصد آن (معادل ۳۹/۹۹ میلیون مترمکعب) مربوط به بخش روستایی و ۷۹ درصد آن (معادل ۱۴۲/۶۴ میلیون مترمکعب) مربوط به خانوارهای شهری است. تغییرات



شکل ۷- شبیه سازی متغیر برداشت از منابع آب سطحی
Fig. 7- Simulation of surface water withdrawal variable

بر اساس نتایج به دست آمده میانگین درصد تغییر سالانه حجم برداشت از منابع آب سطحی معادل ۰/۵۴ درصد است. بنابراین، می توان بیان کرد که فرضیه نخست پژوهش مبنی بر افزایش برداشت از منابع آب در ادامه وضع موجود مورد پذیرش قرار می گیرد. به گونه جزئی تر بر اساس نمودار (۷) در ابتدای دوره مورد بررسی حجم آب برداشت شده از منابع آب سطحی معادل ۳۳۲/۰۷ میلیون مترمکعب به دست آمده است. این متغیر در انتهای دوره شبیه سازی با ۹/۱۴ درصد رشد نسبت به ابتدای دوره به ۳۶۲/۴۱ میلیون مترمکعب می رسد. بر اساس نمودار (۸) حجم آب سطحی در دسترس در طول دوره دارای روند کاهشی است و بیشترین مقدار خود را در ابتدای دوره شبیه سازی یعنی ۴۷۸/۵۸ میلیون مترمکعب تجربه می کند. در انتهای دوره مورد مطالعه حجم

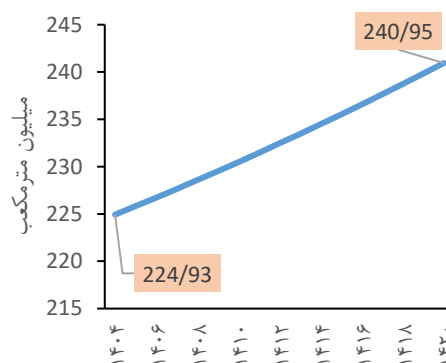
کشاورزی از راه افزایش راندمان آبیاری و یا تغییر الگوی کشت به سمت محصولات با نیاز آبی کمتر را می‌توان سیاستی مناسب برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی دانست. نمودار (۱۰) روند منابع آب زیرزمینی در دسترس در طول دوره شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حجم ذخیره آب زیرزمینی در طول دوره روند نزولی را تجربه نموده است. در نهایت شاخص کمیابی و شاخص تعادل در طول دوره شبیه‌سازی شده در شرایط ادامه وضع موجود محاسبه و در نمودار (۱۱) نشان داده شد. نتایج حاکی از آن است که شاخص کمیابی منابع آب در منطقه مورد بررسی در حال رشد و شاخص تعادل در حال نزول است. به بیان دیگر وضعیت منابع آب حوضه مورد مطالعه در آینده وضعیت نامطلوبی را تجربه خواهد کرد و توان سیستم در پاسخگویی به تقاضای فزاینده آب در کشور کاهش خواهد یافت.



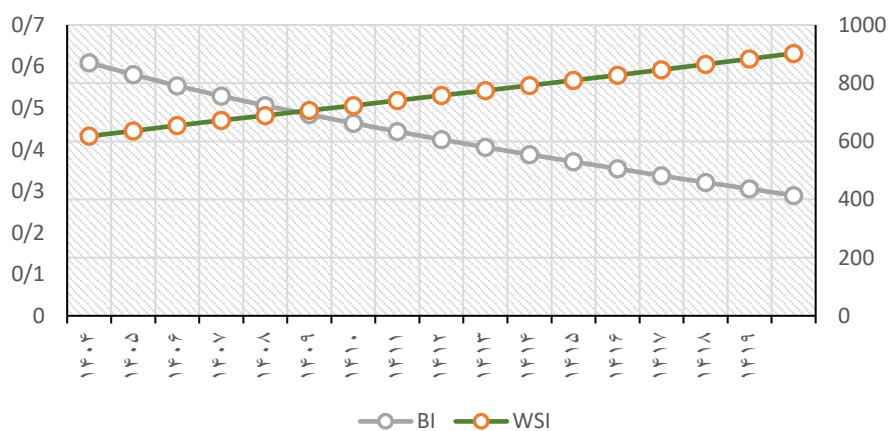
شکل ۱۰- روند حجم آب زیرزمینی در دسترس
Fig. 10- Trend of available groundwater volume

راندمان و بهره‌وری در مصرف آب ممکن است کافی برای تأمین نیازها در اختیار نباشد. این نکته ضرورت اتخاذ استراتژی‌های مدیریت تقاضا و یا عرضه آب را گوشزد می‌کند. در ادامه شرایط موجود، برداشت از منابع آب زیرزمینی دارای روندی افزایشی است. در ابتدای دوره شبیه‌سازی حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی معادل ۲۲۵/۸۱ میلیون مترمکعب است و با رشدی ۷/۱۲ درصدی در سال ۱۴۲۰ به بیشترین مقدار خود یعنی ۲۴۰/۹۵ میلیون مترمکعب می‌رسد. رویهم‌رفته، میانگین درصد تغییر سالانه متغیر حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی معادل ۰/۴۳ درصد محاسبه شده است.

نسبت به تقاضای آب خانگی و صنعتی، مساعدت منابع آب زیرزمینی بیشتر در تأمین تقاضای آب کشاورزی است. بنابراین، سیاست‌های مدیریت تقاضای آب در بخش



شکل ۹- شبیه‌سازی متغیر حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی
Fig. 9- Simulation of groundwater extraction volume variable



شکل ۱۱. روند شاخص کمیابی و شاخص تعادل آب در طول دوره شبیه‌سازی
Fig. 11- Trend of water scarcity index and water balance index during the simulation period

بهینه‌سازی الگوی کشت و اثرات آب بر شاخص‌های آبی

در جدول (۲) سطح زیرکشت فعلی (در سال زراعی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰) و میزان نهاده مصرفی در هر هکتار از محصول گزارش شد. نیاز آبی، میزان مصرف کود در هر هکتار از محصول و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای برای هر محصول در کنار بازده برنامه‌ای به‌عنوان ضرایب تابع هدف در مدل برنامه‌ریزی چندهدفه وارد مدل می‌شود. در بین محصولات منتخب سطح زیرکشت گندم، برنج، ذرت بیش از سایر محصولات است. کمترین سطح زیرکشت نیز به گوجه فرنگی اختصاص دارد.

نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با تلفیق اهداف اقتصادی-زیست‌محیطی مجموع سطح زیرکشت منطقه ۱۱/۵ درصد نسبت به شرایط پایه با کاهش همراه است. در بین محصولات زراعی منتخب، لوبیا از الگوی کشت

خارج و سطح زیرکشت اکثر محصولات با کاهش همراه است. به طور جزئی‌تر، تغییرات سطح زیرکشت گندم نسبت به شرایط پایه ۶/۴- درصد است. برای جو نیز سطح زیرکشت بهینه معادل ۱۰۵۱ هکتار پیش‌بینی شد. سطح زیرکشت برنج نیز با کاهش ۱۸/۵ درصدی همراه است. در بین محصولات مورد بررسی سطح زیرکشت کلزا در الگوی بهینه معادل ۱۵۰/۱ هکتار به‌دست آمده است که نسبت به شرایط پایه با کاهش ۶۱ درصدی همراه است. تغییرات سطح زیرکشت گوجه نیز ۲/۴- درصد به‌دست آمده است. به بیان دیگر سطح زیرکشت این محصول در شرایط پایه ۱۱۲ هکتار بود که در الگوی بهینه به ۱۰۹/۵ هکتار کاهش یافت. سطح زیرکشت خیار نیز با افزایش ۸۰ درصدی همراه بوده و به ۲۷۱ هکتار می‌رسد. سطح زیرکشت گندم و هندوانه نیز در الگوی بهینه به ترتیب معادل ۲۱۸۴۱ هکتار و ۵۸۹ هکتار به‌دست آمده است.

جدول ۲- سطح زیر کشت و میزان مصرف نهاده در هر هکتار
Table 2- Cultivated area and input consumption per hectare

انتشار گاز گلخانه‌ای معادل کیلوگرم CO_2 (Kg CO_2 eq)	بازده برنامه‌ای (هزارریال/هکتار)	سم مصرفی ^۵ (کیلوگرم/هکتار)	کود مصرفی ^۴ (کیلوگرم/هکتار)	نیاز آبی (مترمکعب/هکتار)	سطح زیرکشت (هکتار)	محصول
۵۴۳/۶	۱۵۶۲۵	۳/۰۸	۳۳۰	۴۱۲۳/۵	۲۳۳۴۱	گندم
۴۷۹/۱	۱۱۲۵۲	۱	۱۵۳	۳۵۱۶/۴	۱۲۱۳	جو
۶۸۷/۱	۱۳۱۲۴۷	۱۲/۲۵	۳۲۷	۱۱۸۶۲/۶	۲۷۰۱	برنج
۱۶۲۳/۸	۱۰۸۶۲	۴/۵۰	۵۰۰	۶۶۶۴/۸	۲۸۱۹	ذرت
۱۱۵۴/۷	۳۶۱۳۸	۰/۵۰	۳۰۵	۴۶۰۲/۴	۳۹۳	کلزا
۸۰۰/۶	۳۵۴۰۶	۲/۹۰	۱۰	۷۱۹۳/۱	۱۸۰	لوبیا
۱۳۳/۸	۵۴۸۴۴	۵/۶۰	۴۲۷	۹۷۰۸/۲	۱۱۲	گوجه
۸۵/۷	۱۶۴۷۱۵	۱۵/۴۵	۷۵۳	۸۹۸۹/۶	۱۵۱	خیار
۹۹/۴	۳۴۱۹۷	۵	۵۷۰	۷۶۹۴/۶	۹۴۸	هندوانه

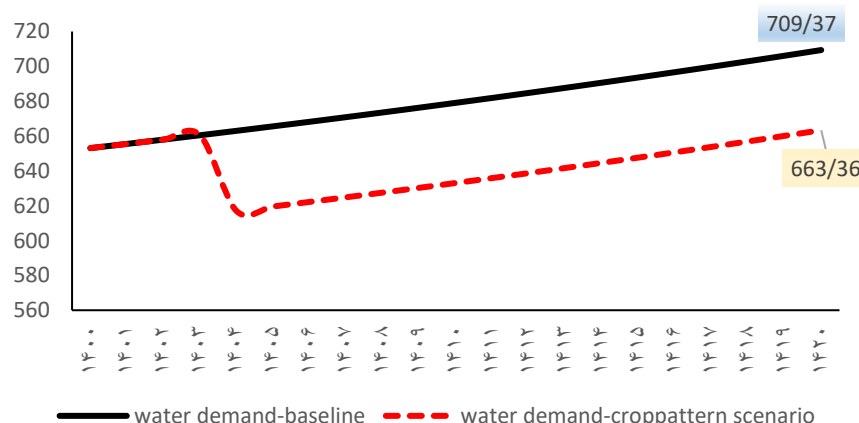
ماخذ: یافته‌های پژوهش

جدول ۳- سطح زیر کشت در الگوی بهینه چند هدفه
Table 3- Cultivated area under the multi-objective optimal cultivation pattern

محصول	سطح زیر کشت الگوی فعلی	سطح زیر کشت الگوی بهینه	درصد تغییرات
گندم	۲۳۳۴۱	۲۱۸۴۱/۲	-۶/۴
جو	۱۲۱۳	۱۰۵۱/۸	-۱۳/۲
برنج	۲۷۰۱	۲۲۰۱/۵	-۱۸/۵
ذرت	۲۸۱۹	۱۹۵۱/۹	-۳۰/۷
کلزا	۳۹۳	۱۵۰/۱	-۶۱/۸
لوبیا	۱۸۰	۰	-۱۰۰
گوچه	۱۱۲	۱۰۹/۵	-۲/۴
خیار	۱۵۱	۲۷۱/۴	+۸۰/۱
هندوانه	۹۴۸	۵۸۹/۳	-۳۷/۸
جمع	۳۱۸۵۷	۲۸۱۶۷	-۱۱/۵

دوره مورد مطالعه به ۶۶۳ میلیون مترمکعب کاهش دهد. همان طور که پیداست طی دوره ۱۴۰۴ تا ۱۴۲۰ حجم آب تقاضا شده در حوضه نسبت به شرایط پایه در سطح پایین تری قرار می گیرد. تحت این شرایط انتظار می رود برداشت از منابع آب زیرزمینی و سطحی کاهش و در نتیجه وضعیت آب منطقه در شرایط مطلوب تری قرار گیرد.

نتایج شبیه سازی تقاضای آب در حوضه مورد مطالعه در نمودار (۱۲) ارائه شد. همان طور که ملاحظه می شود در صورتی که شرایط موجود ادامه پیدا کند تقاضای آب در منطقه در انتهای دوره شبیه سازی به ۷۰۹ میلیون مترمکعب در سال افزایش می یابد. این در حالی است که اصلاح الگوی کشت بر اساس الگوی پیشنهادی می تواند تقاضای آب در حوضه را در انتهای

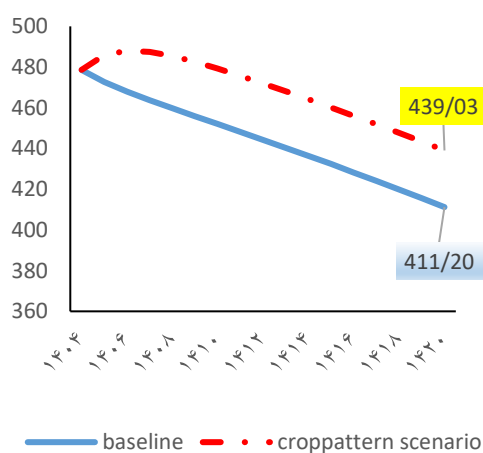


شکل ۱۲- تقاضای آب تحت شرایط پایه و الگوی کشت بهینه
Fig. 12- Water demand under baseline conditions and optimal cultivation pattern

مطالعه در سطح بالاتری نسبت به شرایط پایه قرار می گیرد. متوسط تغییرات سالانه این متغیر طی دوره ۱۴۰۴ تا ۱۴۲۰ معادل ۱۰/۲۵+ درصد ارزیابی شد. اگر چه حجم آب زیرزمینی در طول دوره مورد بررسی روند نزولی

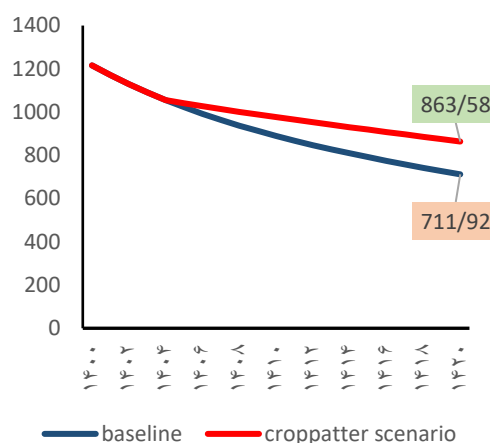
اثر اصلاح الگوی کشت بر حجم آب سطحی و زیرزمینی در دسترس در منطقه مورد مطالعه در نمودارهای زیر نشان داده شد. نتایج نشان داد که پس از اصلاح الگوی کشت، حجم آب زیرزمینی در دسترس در طول دوره مورد

معادل ۵/۲۲ درصد به دست آمده است. اصلاح الگوی کشت منجر شد تا شاخص کمیابی نسبت به شرایط پایه در سطح پایین تری قرار گیرد. به طوری که اعمال سناریو مورد نظر منجر شد تا به طور میانگین این شاخص سالانه ۱۴ درصد در سطح پایین تری نسبت به شرایط قرار گیرد. همچنین شاخص تعادل در طول دوره روند نزولی را طی خواهد کرد اما اصلاح الگوی کشت منجر شد تا شاخص تعادل آب در وضعیت بالاتری نسبت به شرایط پایه قرار گیرد.

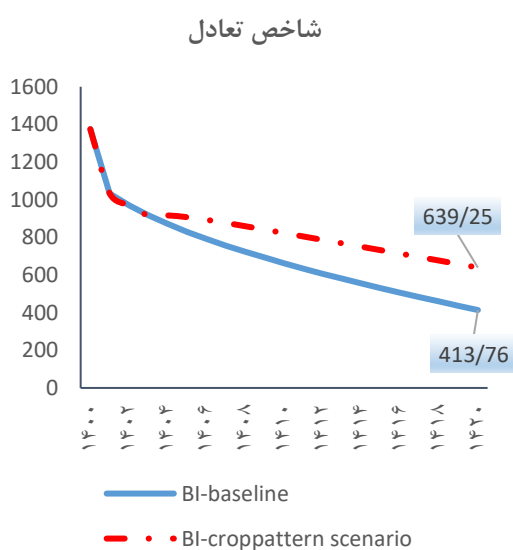


شکل ۱۴- اثر سیاست بر منابع سطحی
Fig. 14- Impact of policy on surface resources

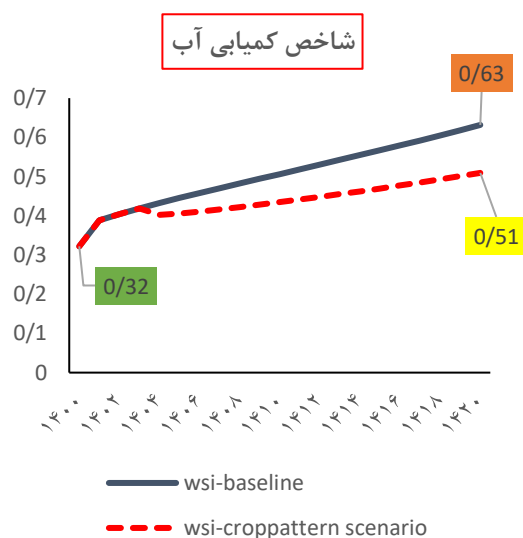
را طی می کند اما نسبت به شرایط پایه در سطح بالاتری قرار می گیرد به طوری که در انتهای دوره حجم آب در دسترس به ۸۶۳ میلیون مترمکعب می رسد. حجم آب سطحی در دسترس نیز در طول دوره مورد مطالعه روند نزولی را طی می کند این در حالی است که اعمال سناریو تغییر الگوی کشت منجر می شود تا ذخیره آب سطحی نسبت به شرایط پایه در طول دوره مورد بررسی در سطح بالاتری نسبت به شرایط پایه قرار گیرد. بر اساس نتایج میانگین تغییرات سالانه حجم آب سطحی در دسترس



شکل ۱۳- اثر سیاست بر منابع زیرزمینی
Fig. 13- Impact of policy on groundwater resources



شکل ۱۵- اثر سیاست بر شاخص های آبی
Fig. 15- Impact of policy on water index



نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در چند سال اخیر منابع آب در ایران به دلیل خشکسالی و اثرات تغییر اقلیم با کمبود روبه‌رو شده است. بر اساس داده‌ها و آمار مرکز ملی خشکسالی و مدیریت بحران کشور، استان کهگیلویه و بویراحمد، در هفت سال گذشته وضعیت بحرانی را از نظر بارندگی تجربه کرده است. در نتیجه تغییر شرایط آب‌وهوایی مقدار جریان‌های ورودی به حوضه و حجم آب ذخیره شده در سد کوثر در طول زمان روند نزولی داشته است. با توجه به این‌که از جمله اهداف اصلی احداث سد کوثر تأمین آب شرب استان‌های جنوبی کشور است، کاهش حجم ذخیره منابع آب در نتیجه برداشت‌های فزاینده به دلیل پاسخگویی به تقاضای پیش‌رو و همچنین، کاهش بارش و افزایش تبخیر، نگرانی‌هایی را در راستای تنش آبی در این منطقه ایجاد کرده است. بنابراین، کاهش منابع آب در دسترس، چالشی بسیار جدی پیش روی سیاستگذاران و برنامه‌ریزان منابع آب در این منطقه می‌باشد. این مسئله خود تأکیدی بر لزوم مدیریت پایدار این منبع حیاتی دارد. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه توسعه یک مدل یکپارچه بر اساس برهم‌کنش عناصر گوناگون در حوضه آبریز سد کوثر در استان کهگیلویه و بویراحمد و مطالعه رفتار سیستم کشاورزی در آینده و در نهایت، ارزیابی راهبردهای مدیریتی کشاورزی (اصلاح الگوی کشت) در حوضه به دلیل انطباق با این تغییرات است. نتایج نشان دادند که حجم تقاضای آب در بخش خانگی و صنعتی که تحت تأثیر رشد جمعیت می‌باشند، در حال افزایش است. نتایج این مطالعه همسو با نتایج (Layani et al., 2021) برای حوضه آبریز رودخانه خیرآباد و (Gohari et al., 2017) برای حوضه زاینده‌رود است. تقاضای آب در بخش کشاورزی نیز در طول دوره مورد بررسی اگرچه با نوساناتی همراه است، اما در طول دوره دارای روندی افزایشی می‌باشد. به دلیل رشد تقاضای آب در بخش‌های خانگی و صنعتی و همچنین، بخش کشاورزی، حجم برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی افزایش یافته و حجم آب در دسترس روند نزولی

را خواهد پیمود. لذا، سیستم منابع آب در پاسخگویی به تقاضای فزاینده در آینده‌ای نزدیک آسیب‌پذیر است. این نکته در روند شاخص کمیابی و تعادل محاسبه شده برای سیستم منابع آب نیز قابل پیگیری است. به‌گونه‌ای که شاخص کمیابی در شرایط پایه، دارای روندی صعودی و شاخص تعادل دارای روند کاهشی است. نتایج این مطالعه همسو با نتایج مطالعه (Ravar et al., 2020) و (Naeem et al., 2024) است. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که سیستم منابع آب با ادامه شرایط موجود، در آینده در وضعیت نامطلوبی از نظر دسترسی به منابع آب قرار گیرد. از سوی دیگر، تغییرات حجم ذخایر زیرزمینی دارای روندی کاهشی است. نتایج نشان داد اصلاح الگو کشت و کاهش سطح زیرکشت محصولات تأثیر معناداری بر شاخص کمیابی و پایداری آب در حوضه دارد. با توجه به نقش حیاتی بخش کشاورزی در اقتصاد ملی و اشتغال‌زایی و تأمین غذای جامعه، لازم است که از منابع و ابزارهای تولید در این بخش به بهترین شیوه ممکن استفاده شود تا ضمن کاهش در مصرف این منابع، سودآوری و رفاه کشاورزان نیز افزایش یابد. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور، آب به عنوان یکی از عوامل محدودکننده تولید، نقشی مهم را در تعیین نوع فعالیت‌های زراعی ایفا می‌کند. آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه از منابع آبی، تمام پتانسیل قابل توسعه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و پایین بودن راندمان آبیاری لزوم اصلاح الگوی مصرف آب را ضروری می‌سازد. تغییر الگوی کشت راهکار اساسی برای اصلاح الگوی مصرف آب در بخش کشاورزی است. با تغییر الگوی کشت در مناطق با پتانسیل آبی کمتر از محصولاتی که به آب زیاد در طول دوره رشد خود نیازمند هستند مانند برنج، به سمت محصولات با مقاومت بالاتر نسبت به کم آبی و محصولاتی که سازگاری بیشتری با شرایط اقلیمی و منطقه‌ای دارند می‌توان در راستای مدیریت صحیح مصرف آب و افزایش بهره‌وری گام برداشت. نتایج این مطالعه نشان داد که اصلاح الگوی کشت

تسهیلات مالی به کشاورزان برای خرید تجهیزات مدرن آبیاری و همچنین ایجاد شبکه‌های حمایتی برای تبادل تجربیات و اطلاعات باشد. در نهایت با توجه به این که در این مطالعه الگوی کشت پایه مربوط به آخرین داده‌های در دسترس (سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰) در مدلسازی در نظر گرفته شد پیشنهاد می‌شود به منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر و لحاظ تغییرات در سال‌های مختلف، میانگین الگوی کشت طی سه سال اخیر به عنوان الگوی پایه مدنظر قرار گیرد تا بهینه‌سازی الگوی کشت بر اساس اهداف موردنظر بر اساس داده‌های محاسبه شده برای سه سال اخیر به دست آید.

پی‌نوشت‌ها

^۱ در این مطالعه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای (و یا پتانسیل گرمایش جهانی بر حسب کیلوگرم معادل CO₂) در هر هکتار از محصول از مطالعه درزی نفت چالی و همکاران (Darzi-Naftchali et al., 2024) که بر اساس ارزیابی چرخه حیات (Life Cycle Assessment) برای محصولات مختلف محاسبه شد، در نظر گرفته شد. این مقادیر به عنوان ضرایب تابع هدف در تابع حداقل کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای در مدلسازی برنامه‌ریزی چندهدفه لحاظ شد.

^۲ فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) یک روش تصمیم‌گیری چندشاخصه برای وزن‌دهی به معیارها و انتخاب گزینه بهینه براساس مقایسه‌های زوجی می‌باشد. در این روش از دیدگاه خبرگان به تعیین وزن معیارها و اولویت‌بندی گزینه‌ها پرداخته می‌شود (Saaty, 2008).

^۳ LOOKUP Function

^۴ شامل کود پتاسه، ازته، فسفات، ریزمغذی و سایر کودهای شیمیایی

^۵ شامل قارچ‌کش، حشره‌کش، علف‌کش و سایر سموم

با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی شاخص امنیت آبی را در بلندمدت تقویت کند. به‌عبارت دیگر، با اتخاذ شیوه‌های بهینه و پایدار در کشاورزی، نه تنها می‌توان به حفظ منابع آبی موجود کمک کرد، بلکه می‌توان به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها نیز دست یافت. در این راستا، پیشنهاد می‌شود که سیاستگذاران و برنامه‌ریزان کشاورزی به توسعه و ترویج الگوهای کشت پایدار و متناسب با شرایط محلی توجه بیشتری داشته باشند. این الگوها باید بر اساس ویژگی‌های خاص هر منطقه، از جمله نوع خاک، شرایط آب و هوایی و نیازهای بازار طراحی شوند. به‌عنوان مثال، استفاده از کشت دیم در مناطق خشک و نیمه‌خشک یا انتخاب گیاهان مقاوم به خشکی می‌تواند به حفظ منابع آبی کمک کند. علاوه بر این، ایجاد برنامه‌های آموزشی برای کشاورزان به منظور افزایش آگاهی از مزایای این اصلاحات و تشویق به استفاده از تکنیک‌های نوین آبیاری و کشت می‌تواند مؤثر باشد. این آموزش‌ها می‌توانند شامل کارگاه‌های عملی، دوره‌های آنلاین و مشاوره‌های تخصصی باشند که به کشاورزان کمک می‌کند تا بهترین شیوه‌ها را در عمل پیاده‌سازی کنند. همچنین، همکاری بین بخش‌های دولتی و خصوصی در جهت تأمین منابع مالی و فنی برای اجرای این تغییرات ضروری است. این همکاری می‌تواند شامل تأمین اعتبار برای پروژه‌های تحقیقاتی، ارائه

References

Bai, X., Huang, Y., Ren, W., Coyne, M., Jacinthe, P. A., Tao, B., ... & Matocha, C. (2019). Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A meta-analysis. *Global change biology*, 25(8), 2591-2606. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.14658>

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. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-023-04074-3>

Duckstein, L. (1984). Multiobjective optimization in structural design: The model choice problem. *New directions in optimum structural design*, 459-481.

Etemadi, M., Mousavi, S. N., & Aminifard, A. (2022). Evaluating factors affecting adoption of climate-smart agricultural strategies with emphasis on the characteristics of social and capital psychological. Etemadi, Mehdi, MOUSAVI, Seyed Nematollah, & Aminifard, A. (2022). Evaluating factors affect on adoption of climate-smart agricultural strategies with emphasis on the characteristics of social and capital psychological. *Agricultural Economics: Iranian Journal of Agricultural Economics (Economics And Agriculture Journal)*, 16(1), 1-33.

<https://sid.ir/paper/1053861/en>
<https://www.sid.ir/paper/1053861/en>

#page=57

Gohari, A., Mirchi, A., & Madani, K. (2017). System Dynamics Evaluation of Climate Change Adaptation Strategies for Water Resources Management in Central Iran. *Water Resources Management*, 31, 1413-1434.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-017-1575-z>

Guemouria, A., Chehbouni, A., Belaqziz, S., Epule Epule, T., Ait Brahim, Y., El Khalki, E. M., ... & Bouchaou, L. (2023). System dynamics approach for water resources management: A case study from the Souss-Massa Basin. *Water*, 15(8), 1506. <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/8/1506>

Halkidis, I. & Papadimos, D. (2007). Technical report of life environment project: Ecosystem based water resources management to minimize environmental impacts from agriculture using state of the art modeling tools in Strymonas basin. Greek Biotope/Wetland Center (EKBY).

Jahangirpour, D., & Zibaei, M. (2022). Cropping Pattern Optimization in the Context of Climate-Smart Agriculture: A Case Study for Doroodzan Irrigation Network-Iran. *Journal of Economics and Agricultural Development*, 35(4), 407-422. <https://www.sid.ir/paper/1053935/en>

Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311917617945>

Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., & Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment*, 573, 444-457. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716317740

Langsdale, S., Beall, A., Carmichael, J., Cohen, S., & Forster, C. (2007). An exploration of water resources futures under climate change using system dynamics modeling. *Integrated Assessment*, 7, 1-17. <https://journals.lib.sfu.ca/index.php/iaj/article/view/2728>

Layani, G., Bakhshoodeh, M., & Zibaei, M. (2021). Water resources sustainability under climate variability and population growth in Iran: A system dynamics approach. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(3), 441-455. https://cjes.guilan.ac.ir/article_4931.html

Layani, G., Bakhshoodeh, M., Zibaei, M., & Viaggi, D. (2021). Sustainable water resources management under population growth and agricultural development in the Kheirabad river basin, Iran. *Bio-based and Applied Economics*, 10(4), 305-323. <https://www.torrossa.com/en/resources/an/5234206>

Madani, K. (2010). *Towards sustainable watershed management: Using system dynamics for integrated water resources planning*. VDM Publishing.

Mardani Najafabadi, M. M., Ziaee, S., Nikouei, A., & Borazjani, M. A. (2019). Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems*, 173, 218-232. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X18306644

Marzban, Z., Asgharipour, M., Ganbari, A., Nikouei, A., Ramroudi, M., Seyedabadi, E. (2020). Reducing Environmental Impacts through Redesigning Cropping Pattern Using LCA and MOP (Case study: East Lorestan Province). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 30(3), 311-330. <https://www.sid.ir/paper/403129/en>

Mirzaei, A., Layani, G., Azarm, H., Jamshidi, S. (2019). Determination Optimal Crop Pattern of Sirjan County Central Part Based on Stability of Water Resources and Environmental. *Agricultural Economics Research*, 9(36), 283-304. <https://www.cabdigitalibrary.org/doi/full/10.5555/20183102413>

Naeem, K., Aloui, S., Zghibi, A., Mazzoni, A., Triki, C., & Elomri, A. (2024). A system dynamics approach to management of water resources in Qatar. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 733-753. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550924000861>

Okolie, C. C., Danso- Abbeam, G., Groupson-Paul, O., & Ogundeji, A. A. (2022). Climate-Smart Agriculture Amidst Climate Change to Enhance Agricultural Production: A Bibliometric Analysis. *Land*, 12, 50. doi.org/10.3390/land12010050. <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/1/50>

Olanipekun, I. O., Olasehinde-Williams, G. O., & Alao, R. O. (2019). Agriculture and environmental degradation in Africa: The role of income. *Science of the Total Environment*, 692, 60-67. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719332425

Osama, S., Elkholy, M., & Kansoh, R. M. (2017). Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 557-566. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S111001681730159X>

Patle, G. T., Kumar, M., & Khanna, M. (2020). Climate-smart water technologies for sustainable agriculture: A review. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1455-1466. <https://iwaponline.com/jwcc/article-abstract/11/4/1455/69011>

Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Gozini, H., & Jafari, S. (2020). System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security

and nexus in Gavkhuni basin in Iran. *Ecological Indicators*, 108, 105682. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X19306752

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98. <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Sharma, J., Tyagi, M., & Bhardwaj, A. (2020). Parametric assessment of temperature monitoring trends in food supply chain. *Optim Methods Eng: Select Proceed CPIE*, 2019, 169. <https://books.google.com/books>

Sterman, J. D. (2001). System dynamics modeling: tools for learning in a complex world. *California Management Review*, 43, 8-25. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.2307/41166098>

Sterman, J.D. (2000). *Business dynamics, systems thinking and modeling for a complex world* (No. HD30. 2 S7835 2000). Boston.

Wu, G., Li, L., Ahmad, S., Chen, X., & Pan, X. (2013). A dynamic model for vulnerability assessment of regional water resources in arid areas: a case study of Bayingolin, China. *Water Resources Management*, 27, 3085-3101. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-013-0334-z>

Yang, C. C., Chang, L. C., & Ho, C. C. (2008). Application of system dynamics with impact analysis to solve the problem of water shortages in Taiwan. *Water Resources Management*, 22, 1561-1577. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-008-9243-y>

Zeleny, M. (1973). Compromise programming. In Cochrane, J.; Zeleny, M., eds., *Multiple Criteria Decision Making*, 262-301. University of South Carolina Press, Columbia, 1973. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573387450346632704>

Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., & Fu, G. (2018). Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production*, 195, 625-639. www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618315403

Zhuang, Y. (2014). *A system dynamics approach to integrated water and energy resources management* (Graduate Theses and Dissertations). <https://digitalcommons.usf.edu/etd/5164/>



*This page is intentionally
left blank.*