Saffron Agronomy & Technology
Homepage: http://saffron.torbath.ac.ir
Vol. 13, No. 4, 2026, p. 403-430

Determining the Optimal Cropping Pattern with an Approach to Saffron Development and the Utilization of Modern Irrigation Methods under Water Scarcity

Vahid Kalantar[1], Seyed Habibollah Mousavi[2]* and Hamed Najafi Alamdarlo[2]

Article type:
Research Article
Article history:
Submitted: 5 September 2025
Revised: 5 November 2025
Accepted: 7 January 2026
Available Online: 2 February 2026

How to cite this article:
Vahid Kalantar, V., Mousavi, S. H. A., and Najafi Alamdarlo, H. (2026). Determining the Optimal Cropping Pattern with an Emphasis on Saffron Development and the Adoption of Modern Irrigation Methods under Water Scarcity Conditions. *Saffron Agronomy & Technology, 13*(4), 403-430. https://doi.org/10.22048/jsat.2025.545371.1571

Abstract

Water resources, as one of the most critical inputs in agricultural production, have faced increasing constraints in recent years due to climate change and unsustainable exploitation. This situation underscores the need to optimize cropping patterns and enhance water productivity. The objective of this study is to examine the effects of changes in irrigation methods and water-reduction scenarios on crop yield and net profit within the cropping pattern of the Hamadan–Bahar Plain, with particular emphasis on saffron, a strategic crop for strengthening agricultural resilience. During the 2023–2024 agricultural year, crop yield simulations were conducted under three irrigation methods (surface, sprinkler, and drip irrigation) combined with deficit irrigation scenarios of 5%, 8%, and 10%. The simulated yield results were subsequently incorporated as inputs into a Positive Mathematical Programming (PMP) model to assess the impacts of yield changes on total agricultural net profit. The findings indicate that crop yields varied significantly across the three irrigation methods, and under the 10% deficit irrigation scenario, most crops experienced noticeable yield reductions. Consequently, saffron was introduced into the cropping pattern due to its low water requirement and high economic potential. A comparative assessment of irrigation methods revealed that drip irrigation consistently outperformed surface and sprinkler systems across all scenarios, effectively compensating for yield losses and mitigating reductions in farm income. Economic results further demonstrated that expanding saffron cultivation, alongside the adoption of modern irrigation technologies, not only offset the profit losses associated with water scarcity but, in some scenarios, increased net agricultural income relative to the baseline condition. Therefore, integrating saffron cultivation development with drip irrigation systems can be recommended as a sustainable and economically viable strategy for water resource management and for enhancing the resilience of agriculture in the Hamadan–Bahar Plain.

Keywords: Adaptation strategies, Cropping pattern change, Economic resilience, Hamedan–Bahar plain,

1 - M.Sc. Student, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2 - Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Corresponding author email: hosseinzadehh@mums.ac.ir
https://doi.org/10.22048/jsat.2025.545371.1571
© 2026, University of Torbat Heydarieh. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY NC 4.0)
(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0).

نشریه زراعت و فناوری زعفران
جلد۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴ ص. ۴۳۰-۴۰۳
Homepage: http://saffron.torbath.ac.ir

مقاله پژوهشی

تعیین الگوی کشت بهینه با رویکرد توسعه زعفران و به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری در شرایط کم‌آبی

وحید کلانتر[۱] و سید حبیب الله موسوی[۲*] و حامد نجفی علمدار لو[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴ شهریور ۱۴۰۴
تاریخ بازنگری: ۱۴ آبان ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۷ دی ۱۴۰۴

کلانتر، و.، و موسوی، س. ح. ا.، نجفی، ح. (۱۴۰۴). تعیین الگوی کشت بهینه با رویکرد توسعه زعفران و به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری در شرایط کم‌آبی. *زراعت و فناوری زعفران*، ۱۳ (۴)، ۴۳۰-۴۰۳.

چکیده

منابع آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نهاده‌های تولید کشاورزی، در سال‌های اخیر به‌دلیل تغییر اقلیم و بهره‌برداری بی‌رویه با محدودیت‌هایی روبه‌رو شده‌اند. این مسئله ضرورت بهینه‌سازی الگوی کشت و ارتقای بهره‌وری آب را نشان می‌دهد. هدف این مطالعه، بررسی اثر تغییر روش‌های آبیاری و سناریوهای کاهش میزان آب آبیاری بر عملکرد و سود خالص محصولات الگوی کشت دشت همدان – بهار، با تأکید بر زعفران به‌عنوان محصولی راهبردی در افزایش تاب‌آوری کشاورزی است. داده‌های موردنیاز از طریق پرسشنامه و مصاحبه میدانی با کشاورزان منطقه در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ گردآوری شد. برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات، سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای تحت سناریوهای کاهش آبیاری (۵، ۸ و ۱۰ درصد) بررسی گردید. نتایج شبیه‌سازی عملکرد محصولات به‌عنوان ورودی مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی استفاده شد تا اثر تغییرات عملکرد بر سود خالص کل بخش کشاورزی ارزیابی شود. یافته‌ها نشان داد که عملکرد محصولات در سه روش آبیاری متفاوت بوده و در سناریوی ۱۰ درصد کاهش آبیاری، اغلب محصولات با افت عملکرد مواجه شدند. ازاین‌رو، زعفران به‌دلیل نیاز آبی پایین به الگوی کشت افزوده شد. مقایسه روش‌های آبیاری نشان داد که سامانه قطره‌ای در تمامی سناریوها نسبت به آبیاری سطحی و بارانی برتری داشته و توانست افت عملکرد و سود را به‌طور قابل‌توجهی جبران کند. نتایج اقتصادی نیز بیانگر آن بود که توسعه سطح زیرکشت زعفران در کنار استفاده از روش‌های نوین آبیاری، موجب جبران کاهش سود ناشی از کم‌آبی و حتی افزایش سود خالص کشاورزی در برخی سناریوها نسبت به وضعیت پایه شد. بنابراین، ترکیب توسعه کشت زعفران و به‌کارگیری آبیاری قطره‌ای می‌تواند به‌عنوان راهبردی پایدار و اقتصادی برای مدیریت منابع آب و ارتقای تاب‌آوری کشاورزی دشت همدان – بهار توصیه شود.

کلمات کلیدی: راهبردهای سازگاری، تغییر الگوی کشت، تاب‌آوری اقتصادی، دشت همدان – بهار، کم‌آبیاری.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
۲- دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
(*- نویسنده مسئول: shamosavi@modares.ac.ir)

https://doi.org/10.22048/jsat.2025.545371.1571

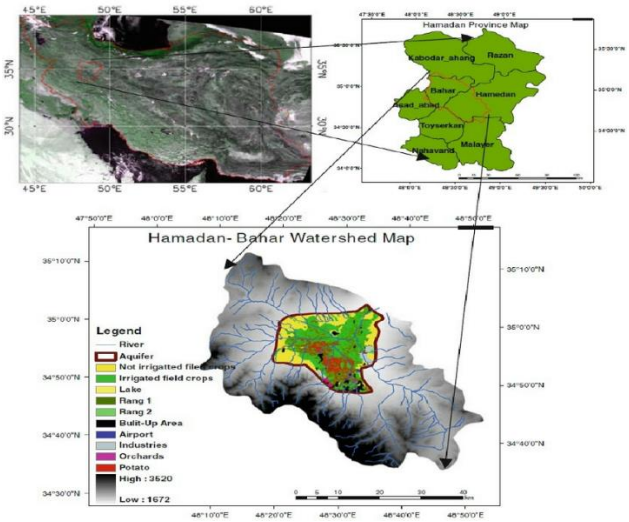
مقدمه

کمبود منابع آب یکی از چالش‌های اساسی بخش کشاورزی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری تولید و امنیت غذایی دارد. محدودیت دسترسی به آب نه‌تنها ظرفیت تولید محصولات زراعی را کاهش می‌دهد، بلکه با ایجاد فشار بر بخش‌های تولیدی، موجب کاهش بهره‌وری و افزایش هزینه‌های تولید می‌شود (Begna, 2020). در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در مقیاس جهانی به بررسی روش‌های نوین آبیاری از جمله آبیاری قطره‌ای، زیرسطحی، بارانی با راندمان بالا و سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری پرداخته‌اند که هدف اصلی آن‌ها کاهش تلفات آب، بهبود یکنواختی توزیع رطوبت و افزایش کارایی مصرف آب بوده است (Chauhdary et al., 2023). در بسیاری از کشورها، این راهبردها با سیاست‌های حمایتی نظیر یارانه برای سرمایه‌گذاری در تجهیزات (Birkenholtz, 2023)، آموزش بهره‌برداران (Xiuling et al., 2023) و تدوین استانداردهای بهره‌وری آب (Eshete et al., 2020) همراه بوده که موجب افزایش عملکرد و سودآوری محصولات شده است. بااین‌حال، میزان موفقیت این سیاست‌ها تحت‌تأثیر شرایط اقلیمی و تولید، نوع محصول و بازار محصولات مناطق موردمطالعه بوده و نتایج حاصل در مطالعات مختلف نشان می‌دهد که انتخاب روش آبیاری مناسب باید بر اساس ارزیابی هم‌زمان معیارهای فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی انجام گیرد (Zhang et al., 2021; Yang et al., 2023). در ادامه، این موضوع در بستر ایران و با تمرکز بر روش‌های آبیاری، اثرات اقتصادی و عملکردی آن‌ها و سیاست‌های اجرایی موردبررسی قرار می‌گیرد.

در ایران، محدودیت منابع آب کشاورزی به دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک و توزیع نامتوازن بارش، یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید به شمار می‌آید. کاهش منابع آب زیرزمینی (Sadeghi-Lari et al., 2024)، افت کیفیت آب (Bahrami & Zarei, 2023) و افزایش رقابت میان بخش‌های مختلف مصرف (Mohseni et al., 2022)، ضرورت استفاده از روش‌های کارآمد آبیاری را بیش‌از پیش آشکار ساخته است. در پاسخ به این چالش، مطالعات و برنامه‌های ملی متعددی باهدف ارتقای راندمان آبیاری (Seyedzadeh et al., 2022) و کاهش اتلاف آب اجرا شده که شامل توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار (Shaker, 2022)، بهینه‌سازی زمان‌بندی و میزان آبیاری (Kashkaki et al., 2025)، و استفاده از فناوری‌های مدیریت هوشمند (Mohiuddin et al., 2024) آبیاری بوده است. این اقدامات در کنار سیاست‌های حمایتی نظیر تخصیص یارانه برای تجهیزات، آموزش بهره‌برداران و ایجاد سیاست‌های مناسب، منجر به بهبود نسبی بهره‌وری و عملکرد برخی محصولات شده است. باوجود این، ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که میزان اثربخشی این روش‌ها در محصولات مختلف و مناطق گوناگون کشور یکسان نبوده و عواملی نظیر اکوفیزیولوژیک محصول، شرایط اقلیمی و تولید هر منطقه در نتایج این ارزیابی‌ها اثرگذاری مستقیم دارند. در ادامه، این موضوع در دشت همدان – بهار و با تمرکز بر روش‌های آبیاری، پیامدهای اقتصادی و عملکردی آن‌ها و سیاست‌های اجرایی مرتبط بررسی خواهد شد.

دشت همدان – بهار به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم تولید محصولات کشاورزی در غرب کشور، طی سال‌های اخیر با کاهش محسوس منابع آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی مواجه بوده است (Soltani et al., 2023). این منطقه با اقلیم نیمه‌خشک و الگوی بارش نامتوازن، وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی برای آبیاری دارد که فشار بهره‌برداری بیش از حد، پایداری تولید را با چالش جدی روبه‌رو کرده است (Sarami-Foroushani et al., 2024). بررسی‌های انجام‌شده در این دشت نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از مزارع از سامانه‌های آبیاری سطحی استفاده می‌کنند که با راندمان پایین، باعث تلفات

قابل‌توجه آب و کاهش کارایی مصرف آن می‌گردد (Seyedan & Ghadami Firouzabadi, 2019; Ghadami Firouzabadi & Akbari, 2024). در سال‌های اخیر، طرح‌هایی برای توسعه آبیاری‌های مختلف و بهبود مدیریت مزرعه اجرا شده، اما پذیرش و اثربخشی آن‌ها به دلیل هزینه‌های اولیه بالا، کمبود آموزش فنی و محدودیت‌های اقتصادی بهره‌برداران با چالش روبه‌رو بوده است (Afruzi et al., 2021). در چنین شرایطی، توجه به محصولاتی با توانایی سازگاری بیشتر نسبت به کم‌آبی می‌تولند راهبردی مؤثر در ارتقای بهره‌وری و کاهش ریسک تولید باشد که یکی از مهم‌ترین این محصولات، زعفران است. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه را نشان می‌دهد. این منطقه شامل دشت همدان–بهار در استان همدان، غرب ایران است. بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی و داده‌های بارش سال زراعی ۱۴۰۳–۱۴۰۲، میزان بارندگی در این دوره کمتر از میانگین بلندمدت بوده و این منطقه در شرایط کم‌آبی قرار داشته است. در نتیجه، جریان‌های سطحی و تراز آب زیرزمینی نسبت به سال‌های نرمال کاهش یافته‌اند. این وضعیت کم‌آبی در ارزیابی کارایی مصرف آب و عملکرد زعفران تأثیر قابل‌توجهی داشته و در تحلیل نتایج این پژوهش لحاظ شده است.



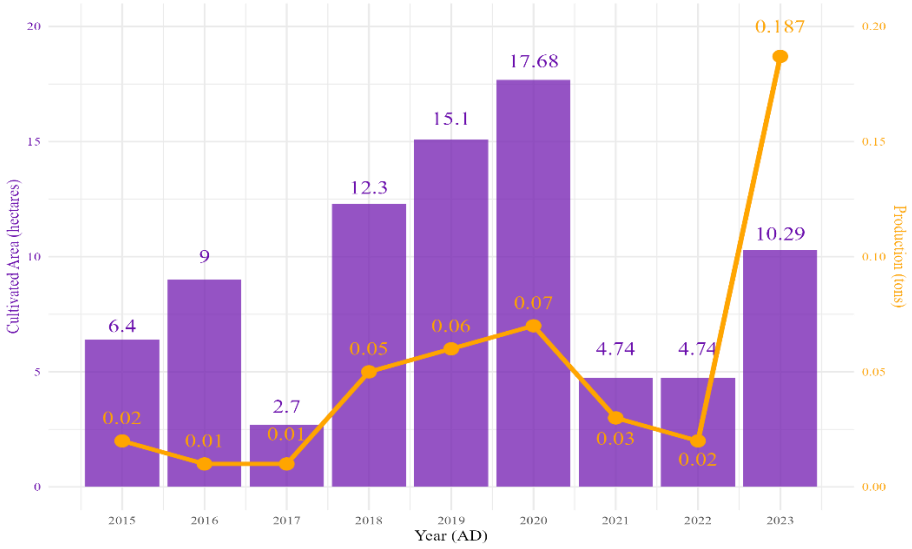
Source: Iran Meteorological Organization (IMO, 2024).

شکل ۱- وضعیت مکانی و شرایط اقلیمی دشت همدان–بهار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲

Figure 1- Spatial and climatic status of the Hamadan–Bahar Plain during the 2023–2024 agricultural year.

بررسی‌های متعدد در سال‌های اخیر نشان داده است که زعفران به‌عنوان یک گیاه چندساله با نیاز آبی کم و ارزش اقتصادی بالا، در سال‌های اخیر به‌عنوان گزینه‌ای راهبردی برای توسعه کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک مطرح شده است (Mehmeti et al., 2024). بخش قابل‌توجهی از مطالعات بر تحلیل اقتصادی کشت زعفران تمرکز داشته‌اند و نتایج نشان داده است که این محصول در مقایسه با محصولات زراعی، حاشیه سود بالاتری دارد و می‌تواند جایگزین اقتصادی مناسبی در شرایط کم‌آبی باشد (Yarami & Sepaskhah, 2018). گروه دیگری از تحقیقات به مدیریت آب و بهره‌وری آبی زعفران پرداخته‌اند که نشان می‌دهد این محصول با نیاز آبی پایین، امکان صرفه‌جویی چشمگیری در مصرف آب کشاورزی فراهم

می‌آورد (Razmavaran et al., 2024). همچنین برخی پژوهش‌ها بر ابعاد زیست‌محیطی و پایداری کشت زعفران تأکید داشته‌اند و نشان داده‌اند که توسعه سطح زیرکشت این گیاه، علاوه بر کاهش فشار بر منابع آبی، موجب ارتقای پایداری اکوسیستم‌های کشاورزی می‌شود (Rastegaripour et al., 2025). در مطالعات متعدد دیگر به بهبود عملکرد و فناوری‌های نوین در تولید زعفران شامل اصلاح بستر کشت (Maryam et al., 2025) و کاربرد نهاده‌های بهینه (Saeidi et al., 2022) پرداخته‌اند. همچنین، به بررسی نقش زعفران در توسعه روستایی و اشتغال‌زایی پرداخته و نشان داده‌اند که این محصول، به دلیل ارزش اقتصادی بالا و قابلیت صادراتی، می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای معیشت خانوارهای روستایی و توسعه اقتصادی داشته باشد (Golmohammadi, 2019). در دشت همدان – بهار، زعفران طی یک دهه گذشته باوجود سهم نسبتاً محدود از کل سطح زیرکشت، به علت سود بالا و مقاومت به تنش آبی، توانسته خود را در الگوی کشت منطقه جای دهد. شکل ۲ میزان سطح زیرکشت و تولید زعفران را نشان می‌دهد (MAJI, 2024). بررسی آمارهای موجود نشان می‌دهد که سطح زیرکشت زعفران در این منطقه طی سال‌های اخیر نوسانات قابل‌توجهی را تجربه کرده است؛ به‌طوری‌که از حدود ۶/۴ هکتار در سال ۱۳۹۴ به ۱۲/۳ هکتار در سال ۱۳۹۷ و سپس ۱۰/۲۹ هکتار در سال ۱۴۰۲ رسیده است. روند تولید نیز با الگوی مشابهی همراه بوده و از ۰/۰۲ تن در سال ۱۳۹۴ به ۰/۱۸۷ تن در سال ۱۴۰۲ افزایش‌یافته است که این رشد، باوجود نوسانات سطح زیرکشت، نشان‌دهنده بهبود نسبی عملکرد در واحد سطح یا به‌کارگیری مدیریت بهتر مزرعه در برخی سال‌ها است. این ویژگی‌ها در کنار سازگاری اکولوژیکی زعفران با شرایط کم‌آبی، ضرورت بررسی دقیق اثر تغییر روش‌های آبیاری بر عملکرد و سودآوری آن را در این دشت دوچندان می‌کند.



Source: Ministry of Agricultural Jihad (MAJI, 2024).

شکل ۲- سطح زیر کشت و میزان تولید زعفران در دشت همدان - بهار

Figure 2- Cultivated area and production amount of saffron in Hamadan-Bahar plain.

در این مطالعه، محدودیت‌ها عمدتاً به ابعاد نهادی و رفتاری بخش کشاورزی مربوط می‌شود. یکی از چالش‌های اصلی، پذیرش و اجرای الگوهای نوین آبیاری و تغییر ترکیب محصولات از سوی کشاورزان است که این امر به میزان کارایی نظام ترویج،

آموزش‌های فنی و انتقال دانش بومی وابستگی مستقیم دارد. افزون بر این، سیاست‌ها و زیرساخت‌های حمایتی دولت در زمینه‌هایی همچون تأمین و یارانه تجهیزات آبیاری تحت‌فشار، قیمت نهاده‌ها و نظام تخصیص و مدیریت منابع آب نیز از عوامل تعیین‌کننده و گاه محدودکننده به شمار می‌آیند که می‌توانند بر امکان‌پذیری و اثربخشی اجرای پیشنهادهای پژوهش تأثیرگذار باشند. در شرایط کم‌آبی، کشاورزان با این پرسش‌ها مواجه‌اند که چه محصولاتی کشت کنند و چگونه از حجم محدود آب آبیاری استفاده بهینه نمایند. انتخاب روش آبیاری مناسب، به‌ویژه زمانی که یک محصول شاخص مانند زعفران به‌عنوان محور تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد، می‌تواند نقشی تعیین‌کننده در افزایش کارایی مصرف آب و بهبود بازده اقتصادی کل الگوی کشت داشته باشد. بااین‌حال، تصمیم‌گیری‌های مدیریت آب نه‌تنها بر پایه جنبه‌های فنی، بلکه در چارچوب واقعیات اقتصادی و بستر اجتماعی – سیاسی هر منطقه اتخاذ می‌شود. ازاین‌رو، بررسی یکپارچه ابعاد فنی، اقتصادی و سیاستی تغییر روش‌های آبیاری با تمرکز بر زعفران، ضرورتی است که می‌تواند به شناسایی گزینه‌های بهینه برای استفاده از منابع آب محدود منجر شود. مدیریت این عوامل چندگانه در سازگاری با کاهش رو به افزایش منابع آبی، چالشی است که با چارچوب ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان به آن پاسخ داد. براین‌اساس، مطالعه حاضر باهدف ارزیابی اثر تغییر روش‌های آبیاری بر عملکرد و سودآوری زعفران و سایر محصولات در الگوی کشت منطقه طراحی شده است؛ در ادامه روش تحقیق و یافته‌ها ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

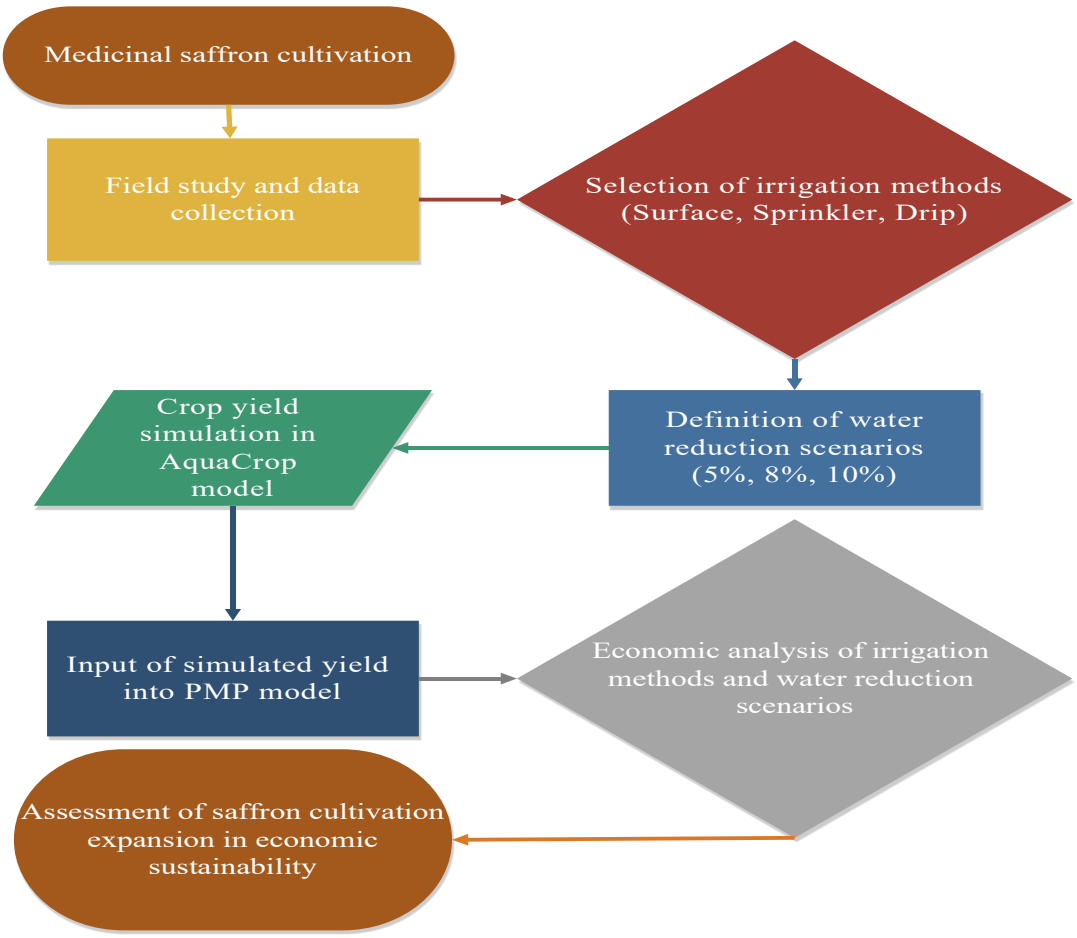
در این مطالعه، فرایند تحقیق مطابق با فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۳ طراحی و اجرا شد. در گام نخست، داده‌های پایه موردنیاز از طریق مطالعه میدانی و تکمیل پرسشنامه از کشاورزان منطقه دشت همدان – بهار در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ گردآوری شد. سپس نیاز آبی هر یک از محصولات موجود در الگوی کشت منطقه محاسبه و به‌عنوان داده‌های ورودی اولیه در تحقیق استفاده شد. در ادامه، باتوجه‌به شرایط منطقه و روش آبیاری پایه، سه روش آبیاری شامل سطحی، بارانی و قطره‌ای مقایسه شدند. به‌منظور بررسی آثار محدودیت منابع آبی، سه سناریوی کاهش آب آبیاری (۵، ۸ و ۱۰ درصد) تعریف و در مدل شبیه‌ساز عملکرد گیاه AquaCrop اعمال گردید. خروجی این مرحله شامل عملکرد شبیه‌سازی‌شده محصولات تحت شرایط مختلف آبیاری بود. در گام نهایی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌عنوان ورودی به مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی توسعه‌یافته استفاده شد تا پیامدهای اقتصادی ناشی از تغییر روش‌های آبیاری و کاهش میزان آب مصرفی در سطح منطقه ارزیابی گردد.

مرحله اول: شبیه‌سازی عملکرد محصول با مدل AquaCrop

در گام نخست و باهدف شبیه‌سازی عملکرد محصولات در دشت همدان – بهار، تحت شرایط مدیریت آبیاری ارزیابی شد. مدل AquaCrop توسط سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد[1] توسعه‌یافته و یکی از مدل‌های پرکاربرد برای ارزیابی رابطه میان مصرف آب و عملکرد محصولات کشاورزی است. این مدل با تمرکز بر کارایی مصرف آب، رشد گیاه را بر اساس پارامترهایی همچون داده‌های هواشناسی، خصوصیات خاک، پارامترهای فیزیولوژیک گیاه و مدیریت آبیاری شبیه‌سازی می‌کند. یکی از مزیت‌های اصلی AquaCrop، امکان تعریف سناریوهای مختلف آبیاری و تغییر در میزان و روش توزیع آب است که آن را برای تحلیل اثرات کم‌آبی و انتخاب استراتژی‌های مدیریت آب بسیار مناسب می‌سازد. در این مطالعه، باهدف ارزیابی اثر تغییر روش‌های آبیاری بر عملکرد محصولات، سناریوهایی شامل تغییر

1- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

نوع روش آبیاری و درصد کاهش آب مصرفی تعریف گردید.



شکل ۳- فلوچارت روش‌شناسی تحقیق

Figure 3- Research methodology flowchart.

خروجی این سناریوها که شامل مقادیر شبیه‌سازی‌شده عملکرد برای هر محصول است، به‌عنوان داده‌های ورودی مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه‌یافته منطقه به کار گرفته شد تا اثر این تغییرات بر سودآوری و الگوی بهینه کشت ارزیابی شود. در مدل AquaCrop، عملکرد محصولات به‌عنوان تابعی از مدیریت آبیاری و سایر عوامل مؤثر بر رشد گیاه در نظر گرفته می‌شود. چارچوب مفهومی مدل AquaCrop در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است.

$$Y_i = f(IIRI, NIIRI) \quad (۱)$$

$$Y_s = f(IIRI, NIIRI) \quad (۲)$$

که در این روابط، IIRI نمایانگر مؤلفه‌های مرتبط با مدیریت آبیاری از جمله میزان و زمان‌بندی آب مصرفی، روش‌های اعمال آبیاری و راندمان آن است. همچنین، NIIRI معرف سایر عوامل غیرمستقیم در مدل AquaCrop بوده و شامل مجموعه‌ای از اطلاعات گیاه (ویژگی‌های فنولوژیک و نیازهای رشد)، داده‌های اقلیمی (دما، بارش، تبخیر – تعرق مرجع و کربن‌دی‌اکسید) و مدیریت خاک (ویژگی‌های هیدرولیکی، ظرفیت نگهداشت رطوبت و عملیات زراعی) است. براین‌اساس، عملکرد شبیه‌سازی‌شده محصولات (Y_i) و زعفران (Y_s) حاصل برهم‌کنش مدیریت آبیاری و عوامل اقلیمی – اکولوژیک است

که مدل AquaCrop با درنظرگرفتن این ورودی‌ها و شبیه‌سازی فرایندهای تبخیر – تعرق، توازن آب خاک و پاسخ گیاه به تنش‌های آبی، مقدار عملکرد نهایی را برآورد می‌کند. استفاده از این ساختار باعث می‌شود امکان بررسی تغییرات عملکرد تحت شرایط مختلف مدیریت آبیاری فراهم گردد.

به‌منظور اطمینان از دقت شبیه‌سازی‌ها، صحت‌سنجی مدل AquaCrop بر اساس داده‌های عملکرد واقعی محصولات و شاخص‌های آماری نظیر میانگین خطای مطلق[1]، میانگین خطای اریب[2]، ریشه میانگین مربعات خطا[3] و ضریب تعیین[4] انجام شد. در این فرایند، داده‌های مزرعه‌ای حاصل از اندازه‌گیری‌های محلی به‌عنوان مبنای مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی‌شده استفاده گردید. این شاخص‌ها به دلیل کارایی در ارزیابی دقت، تطابق و پراکندگی داده‌ها انتخاب شدند (Moghbel et al., 2022; Pereira, 2023; Reddy & Madapuri, 2024)[5]. این شاخص‌ها بر اساس روابط ۳ تا ۶ محاسبه گردیدند:

$$MAE = \frac{\sum_{c=1}^{n} S_t - A_t}{n} \quad (۳)$$

$$MSE = \frac{\sum_{c=1}^{n} (A_t - S_t)^2}{n} \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{c=1}^{n} (A_t - S_t)^2}{n}} \quad (۵)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{c=1}^{n} (A_t - S_t)^2}{\sum_{c=1}^{n} \left(A_t - \overline{A}\right)^2} \quad (۶)$$

که در این روابط، A_c بیانگر عملکرد مشاهداتی، S_c عملکرد شبیه‌سازی‌شده و c محصولات موجود در الگوی کشت است. شاخص‌های مذکور این امکان را فراهم می‌کنند که میزان انطباق خروجی‌های شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی ارزیابی شود. به‌طور مشخص، MAE میانگین قدرمطلق اختلافات بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده را نشان داده و بیانگر دقت کلی مدل است. MSE جهت و میزان اریبی مدل را مشخص کرده و مثبت یا منفی بودن آن نشان‌دهنده تمایل مدل به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد عملکرد است. RMSE حساسیت بیشتری به مقادیر خطای بزرگ دارد و به‌عنوان شاخص مهمی برای ارزیابی کیفیت پیش‌بینی مدل در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، R^2 بیانگر میزان تغییرات توضیح‌داده‌شده توسط مدل بوده و نزدیک بودن آن به عدد یک، نشان‌دهنده همبستگی بالا بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده است. به‌کارگیری این شاخص‌ها در این مطالعه موجب شد قابلیت اعتماد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت شرایط مختلف مدیریت آبیاری به‌صورت کمّی سنجیده شود.

در این مطالعه، طبق مطالعات گذشته، سناریوهای کاهش ۵، ۸ و ۱۰ درصدی آبیاری در مدل AquaCrop به‌عنوان معادل زراعی کم‌آبیاری کنترل‌شده[6] تعریف شدند (Mirzaei & Azizabadi, 2022; Mosavi et al., 2023; Raja et al., 2024). در این رویکرد، به‌جای تأمین کامل نیاز آبی گیاه در هر نوبت آبیاری، عمق آب کاربردی به میزان مشخصی کمتر از مقدار مرجع در نظر گرفته می‌شود. این روش یکی از راهکارهای پذیرفته‌شده در مدیریت آب کشاورزی است که در تحقیقات متعدد به‌منظور شبیه‌سازی شرایط کم‌آبی و بررسی پاسخ گیاهان به محدودیت‌های آبی به کار گرفته شده است (Yu et al., 2020; Zou et al., 2021; Wang et al., 2023; Toumi et al., 2024). کاهش عمق آبیاری به‌طور مستقیم در AquaCrop قابل‌اعمال بوده و مدل اثرات ناشی از آن را بر فرایندهای فیزیولوژیک و در نهایت عملکرد محصول شبیه‌سازی می‌کند. انتخاب مقادیر ۵، ۸ و ۱۰ درصد، بر مبنای واقعیت‌های مزرعه‌ای

1- Mean Absolute Error (MAE)
2- Mean Squared Error (MSE)
3- Root Mean Squared Error (RMSE)
4- Coefficient of Determination (R-squared)

۵- برای جزئیات کامل روش‌شناسی صحت‌سنجی و توصیف ریاضی شاخص‌های مذکور، می‌توان به مطالعات پیشین مرتبط مراجعه نمود.

6- Deficit Irrigation (DI)

و امکان‌پذیری آن برای کشـــاورزان منطقه صـــورت گرفت؛ به‌طوری که چنین میزان کاهش‌هایی با تنظیم دریچه‌های ورودی آب یا کاهش جزئی مدت‌زمان هر نوبت آبیاری قابل اجرا بوده و نیازمند تغییرات عمده در تقویم آبیاری یا دور آبیاری نیست. ازاین‌رو، این سناریوها علاوه بر سازگاری با منطق فنی و زراعی، از دیدگاه عملی نیز برای شـــرایط دشـــت همدان – بهار واقع‌بینانه و قابل‌پیاده‌سازی هستند.

مرحله دوم: بهینه‌ســـازی اقتصـــادی الگوی کشـــت با مدل برنامه‌ریزی ریاضی

برای تحلیل اثرات تغییر روش‌های آبیاری بر ســـودآوری و الگوی بهینه کشـــت منطقه، از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضـــی اثباتی[1] توسـعه‌یافته اسـتفاده شـد. این مدل بر اسـاس سـاختار سه‌مرحله‌ای طراحی شد که در گام نخست، الگوی کشت بهینه ســـال پایه با اســـتفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی و با درنظرگرفتن محدودیت‌های منابع موجود (زمین، آب، نیروی کار، ماشین‌آلات، کود و سرمایه) و قیود کالیبراسیون محاسبه شد. در مرحله دوم، مقادیر دوگان حاصـــل از حل مدل پایه برای برآورد پارامترهای تابع هدف غیرخطی به کار رفت. در نهایت، مرحله سوم شامل حل یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی کالیبره‌شده بود که در آن تابع تولید غیرخطی به‌عنوان جزء اصـــلی تابع هدف لحاظ شـــد. در این مطالعه، عملکردهای شـــبیه‌ســـازی‌شـــده محصـــولات تحـت ســـناریوهـای مختلف آبیـاری از مـدل AquaCrop به‌عنوان داده‌های ورودی به PMP وارد شـــد تا امکان شـبیه‌سـازی واکنش کشـاورزان به تغییرات عملکرد فراهم شود. این رویکرد ضمن بازتولید دقیق الگوی کشت و استفاده از منابع در سال پایه، قابلیت ارزیابی پیامدهای اقتصادی سیاست‌ها و فناوری‌های آبیاری مختلف را در ســـطح منطقه‌ای دارد (Yao et al., 2025; Mimoun et al., 2025; Bouzidi & Pérez-Blanco, 2025; Chang et al., 2025)[2].

$$\text{Max}\ \ \omega = \sum_{i=1}^{11} X_i(P_i Y_i - C_i) + X_s(P_s Y_s - C_s) \quad (۷)$$

st:

$$\sum_{i=1}^{11} X_i \le Tl, \qquad X_s \le Tl \quad (۸)$$
$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} X_i + X_s \le TI$$

$$\sum_{i=1}^{11} W_i X_i \le TWater, \qquad W_s X_s \le TWater \quad (۹)$$
$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} W_i X_i + W_s X_s \le TWater$$

$$\sum_{i=1}^{11} L_i X_i \le Tlabor, \qquad L_s X_s \le Tlabor \quad (۱۰)$$
$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} L_i X_i + L_s X_s \le Tlabor$$

$$\sum_{i=1}^{11} T_i X_i \le TMachin, \qquad T_s X_s \le TMachin \quad (۱۱)$$
$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} T_i X_i + T_s X_s \le TMachin$$

$$\sum_{i=1}^{11} F_i X_i \le TFeltilizer, \qquad F_s X_s \le TFeltilize \quad (۱۲)$$
$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} F_i X_i + F_s X_s \le TFeltilize$$

$$\sum_{i=1}^{11} K_i X_i \ge TInvest, \qquad K_s X_s \le TInvest \quad (۱۳)$$
$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} K_i X_i + K_s X_s \le TInvest$$

1- Positive Mathematical Programming (PMP)

۲- جزئیات کامل فرمول‌بندی، روش کالیبراسیون و مبانی نظری مدل در مطالعات پیشین ارائه شده است.

$$X_i, X_s \geq 0 \quad (۱۴)$$

در روابط ارائه‌شده، ω بیانگر بازده ناخالص سالانه حاصل از کل فعالیت‌های زراعی در منطقه است. متغیر X سطح زیرکشت محصولات کشاورزی (ha)، P قیمت محصولات، Y عملکرد محصولات کشاورزی ($kg.ha^{-1}$) و C هزینه‌های تولید در هر هکتار برای هر محصول را نشان می‌دهد. اندیس‌های i به محصولات موجود در الگوی کشت پایه و اندیس s به محصول زعفران در منطقه موردمطالعه اختصاص دارند. علاوه بر این، پارامترهای Tl، TWater، Tlabor، TMachin، Tfeltilizer و Tinvest به‌ترتیب نمایانگر کل منابع زمین، آب، نیروی کار، ماشین‌آلات، کود و سرمایه در دسترس برای فعالیت‌های زراعی منطقه هستند. روابط ۸ تا ۱۳ محدودیت‌های مربوط به نهاده‌های مصرفی را مشخص می‌کنند و نشان می‌دهند که میزان استفاده از هر یک از منابع مذکور برای تولید محصول i و همچنین محصول زعفران نباید از مقدار کل منابع در دسترس در منطقه فراتر رود. در نهایت، رابطه ۱۴ محدودیت غیرمنفی بودن سطح فعالیت را بیان می‌کند.

مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی یکی از رهیافت‌های پرکاربرد در تحلیل الگوهای کشت و مدیریت منابع است که بر مبنای داده‌های واقعی و رفتار مشاهده‌شده کشاورزان طراحی می‌شود. این مدل با درنظرگرفتن محدودیت‌های منابع و شرایط اقتصادی، قابلیت شبیه‌سازی واکنش کشاورزان به تغییرات سیاستی یا مدیریتی را دارد. در پژوهش حاضر، PMP برای بررسی اثر تغییر روش‌های آبیاری و کاهش مقادیر آب مصرفی بر سطح زیرکشت و بازده اقتصادی محصولات مورداستفاده قرار گرفت. تحلیل در دو حالت انجام شد: نخست الگوی کشت موجود بدون زعفران و سپس الگوی کشت اصلاح‌شده با افزودن زعفران به‌عنوان محصول کم‌آب و مقاوم به خشکی است. در هر دو حالت، داده‌های عملکرد محصولات، سطح زیرکشت و مصرف آب وارد مدل شدند تا تغییرات سود خالص در شرایط متفاوت آبیاری و ترکیب محصول به‌طور دقیق بررسی و مقایسه گردد. این بررسی امکان ارزیابی اثر ترکیب توسعه زعفران و روش‌های نوین آبیاری بر اقتصاد کشاورزی منطقه را فراهم می‌سازد. مطالعات متعددی در حوزه اقتصاد کشاورزی و مدیریت منابع آب، به‌ویژه در زمینه تحلیل تغییرات الگوی کشت، کارایی و سیاست‌های حمایتی، از روش PMP استفاده کرده‌اند که نشان‌دهنده کارآمدی و قابلیت تعمیم این مدل در شرایط مشابه است (Arribas et al., 2020; Bashiri et al., 2021; Soltani et al., 2023; Yao et al., 2025; Kalantar et al., 2025).

محدوده مکانی این پژوهش، اراضی کشاورزی دشت همدان – بهار را در بر می‌گیرد که بیش از ۴۶ هزار هکتار اراضی زراعی را در شامل می‌شود. این منطقه به دلیل سهم قابل‌توجه در تولید محصولات استراتژیک استان و کشور و نیز مواجهه با محدودیت‌های روزافزون منابع آب، به‌عنوان حوزه مطالعاتی انتخاب گردید. انسجام اقلیمی و الگوی کشت پایه، زمینه مناسبی برای تحلیل سناریوهای تغییر روش آبیاری و ارزیابی اثرات اقتصادی آن در این دشت فراهم ساخته است. اطلاعات موردنیاز این پژوهش از مرجع اصلی گردآوری شد: نخست، طراحی و تکمیل پرسشنامه‌های میدانی در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ با مشارکت کشاورزان منطقه، و دوم، بهره‌گیری از داده‌های تکمیلی سازمان‌ها و نهادهای مرتبط برای استخراج روابط فنی بین نهاده‌ها و محصولات، از روش نمونه‌گیری تصادفی دو مرحله‌ای استفاده گردید. در مرحله نخست، چهار بخش دشت همدان – بهار به‌عنوان خوشه‌های اصلی بر اساس همگنی اقلیم انتخاب شدند. در مرحله دوم، روستاهای هر بخش بر اساس شباهت ویژگی‌های خاک و توپوگرافی خوشه‌بندی و سپس نمونه‌ها به‌صورت تصادفی ساده انتخاب گردیدند. این فرایند زمینه جمع‌آوری داده‌های دقیق و قابل‌اعتماد از مزارع کشت زعفران و سایر محصولات در الگوی کشت منطقه را فراهم آورد.

نتایج و بحث

در این پژوهش، باهدف ارزیابی اثرات تغییر روش و میزان

آبیاری بر عملکرد محصولات و بهینه‌سازی الگوی کشت در شرایط کم‌آبی، اراضی کشاورزی دشت همدان – بهار به‌عنوان منطقه موردمطالعه انتخاب شد. این منطقه به‌دلیل اهمیت بالای آن در تولید محصولات کشاورزی استان همدان و نقش آن در امنیت غذایی منطقه، موردتوجه قرار گرفت. برای بررسی سناریوهای مختلف مدیریت آب، سه روش آبیاری شامل آبیاری سطحی، آبیاری بارانی و آبیاری قطره‌ای در چهار سطح کم آبیاری به ترتیب ۰ درصد (شرایط بدون تنش آبی)، ۵، ۸ و ۱۰ درصد تحلیل شدند. این رویکرد امکان ارزیابی تغییر روش آبیاری و مدیریت میزان آب مصرفی بر بهره‌وری آب، عملکرد محصولات و پیامدهای اقتصادی بخش کشاورزی را فراهم می‌سازد. جدول ۱ میزان آب کاربردی محصولات درون الگوی کشت دشت همدان – بهار را در سه روش آبیاری و سه سناریوی کاهش آب (۵، ۸ و ۱۰ ٪) نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که در تمام محصولات، با افزایش درصد کاهش آبیاری، مقدار آب مصرفی به‌صورت متناسب کاهش‌یافته است. شدت این روند بسته به نیاز آبی هر محصول و کارایی روش آبیاری متفاوت بوده است. برای مثال، محصولات با نیاز آبی بالا نظیر چغندرقند، یونجه و گوجه‌فرنگی در سناریوهای کاهش، بیشترین کاهش مطلق در مصرف آب را تجربه کرده‌اند، درحالی‌که محصولات کم‌نیاز مانند جو و نخود به دلیل ماهیت فیزیولوژیک و مقاومت بیشتر به کم‌آبی، کاهش مطلق کمتری را در میزان آب کاربردی نشان داده‌اند.

جدول ۱- آب کاربردی محصولات تحت سناریوهای مختلف کاهش آب در سه روش آبیاری دشت همدان - بهار

Table 1- Applied water of crops under different water reduction scenarios in three irrigation methods in Hamedan–Bahar plain (cubic meter)

محصول Crop	کاهش ۰٪ 0% Reduction	کاهش ۵٪ 5% Reduction	کاهش ۸٪ 8% Reduction	کاهش ۱۰٪ 10% Reduction
جو Barley	2450	2328	2254	2205
چغندرقند Sugar beet	9890	9396	9099	8901
خیار Cucumber	6230	5919	5732	5607
ذرت علوفه‌ای Forage maize	8350	7933	7682	7515
سیب‌زمینی Potato	8580	8151	7894	7722
گندم Wheat	4370	4151	4020	3933
گوجه‌فرنگی Tomato	8820	8379	8114	7938
لوبیا Bean	5140	4883	4729	4626
نخود Chickpea	4320	4104	3974	3888
هندوانه Watermelon	7256	6893	6676	6530
یونجه Alfalfa	9390	8921	8639	8451

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Refrences: Finding Research.

بررسی ارقام نشان می‌دهد که در سناریوی ۱۰ ٪ کاهش آبیاری، بیشترین کاهش مصرف آب مربوط به چغندرقند (۹۸۹

$m^3.ha^{-1}$ کمتر از حالت پایه) و کمترین کاهش مربوط به جو ($m^3.ha^{-1}$ ۲۴۵کمتر از حالت پایه) بوده است. این اختلاف بیانگر اهمیت انتخاب الگوی کشت متناسب با شرایط کم‌آبی و نیز ضرورت استفاده از روش‌های مناسب آبیاری است تا علاوه بر حفظ عملکرد، بهره‌وری آب افزایش یابد. این نتایج مبنایی برای تحلیل‌های بعدی عملکرد محصولات و پیامدهای اقتصادی هر سناریو در منطقه فراهم می‌کند. میانگین حجم آب مصرفی برای مزرعه زعفران در داده‌های میدانی این پژوهش ۲۰۴۵ $m^3.ha^{-1}$ ثبت و در تحلیل‌ها استفاده شد.[1]

جدول ۲ تغییرات عملکرد محصولات زراعی تحت آبیاری سطحی را در سه سناریوی کاهش آبیاری نشان می‌دهد. در این جدول، مقادیر منفی بیانگر کاهش عملکرد نسبت به حالت بدون تنش آبی (کاهش صفر ٪) هستند. سناریوی صفر ٪ به‌عنوان شرایط بهینه آبیاری در نظر گرفته شده و سه سناریوی بعدی، محدودیت آبیاری را با شدت‌های متفاوت شبیه‌سازی می‌کنند. بررسی این داده‌ها امکان مقایسه حساسیت محصولات مختلف به تنش کم‌آبی و شناسایی گزینه‌های مقاوم‌تر برای شرایط محدودیت منابع آب را فراهم می‌سازد.

جدول ۲- درصد تغییرات عملکرد محصولات تحت آبیاری سطحی در سناریوهای مختلف کاهش آبیاری

Table 2- Percentage of yield variations of crops under surface irrigation across different water reduction scenarios ($t.ha^{-1}$)

محصول Crop	پایه Base	کاهش ۰٪ 0% Reduction	کاهش ۵٪ 5% Reduction	کاهش ۸٪ 8% Reduction	کاهش ۱۰٪ 10% Reduction
جو Barley	3.8	-	-5.8	-12.2	-16.5
چغندرقند Sugar beet	48.15	-	-7.1	-11.7	-15.6
خیار Cucumber	21.06	-	-6.4	-11.9	-17.3
ذرت علوفه‌ای Forage maize	45.74	-	-5.6	-10.5	-14.1
سیب‌زمینی Potato	38.99	-	-9.0	-14.3	-18.2
گندم Wheat	2.63	-	-5.7	-10.3	-12.9
گوجه‌فرنگی Tomato	35.52	-	-6.3	-11.0	-14.2
لوبیا Bean	1.39	-	-7.2	-15.1	-20.9
نخود Chickpea	1.15	-	-6.1	-10.4	-13.0
هندوانه Watermelon	47.37	-	-5.3	-8.7	-11.4
یونجه Alfalfa	10.2	-	-4.9	-10.7	-15.7

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Refrences: Finding Research.

طبق نتایج جدول ۲ با کاهش ۵ درصد آبیاری، بیشترین افت عملکرد نسبی به‌ترتیب در سیب‌زمینی (۹ ٪)، لوبیا (۷/۲ ٪) و چغندرقند (۷/۱ ٪) مشاهده شد. کمترین افت به یونجه (۴/۹ ٪) و هندوانه (۵/۳ ٪) مربوط می‌شود. در سناریوی ۸ ٪ کاهش

آبیاری، بیشترین کاهش عملکرد در لوبیا (۱۵/۱ ٪)، سیب‌زمینی (۱۴/۳ ٪) و خیار (۱۱/۹ ٪) مشاهده می‌شود، در حالی که گندم (۱۰/۳ ٪) و هندوانه (۸/۷ ٪) کمترین افت را تجربه می‌کنند. در نهایت، در سناریوی ۱۰ ٪، لوبیا (۲۰/۹ ٪)، سیب‌زمینی (۱۸/۲ ٪) و خیار (۱۷/۳ ٪) بیشترین کاهش را دارند، و گندم (۱۲/۹ ٪) و هندوانه (۱۱/۴ ٪) کمترین افت عملکرد را ثبت می‌کنند. این روند نشان می‌دهد که محصولات حجیم و پرنیاز آبی مانند سیب‌زمینی و لوبیا به کم‌آبی بسیار حساس هستند، اما محصولات کم‌نیاز مانند برخی صیفی‌جات تاب‌آوری بیشتری دارند.

جدول ۳ تغییرات عملکرد محصولات زراعی در روش آبیاری بارانی تحت سه سناریوی کاهش آبیاری، با استفاده از عملکرد پایه، ارائه شده است. مقادیر کاهش به‌صورت درصد نسبت به عملکرد پایه بیان شده‌اند تا مقایسه حساسیت محصولات به کم‌آبی امکان‌پذیر شود. سناریوی بدون تنش آبی بیانگر شرایط بدون محدودیت آبیاری است که عملکرد محصولات صرفاً با تفاوت‌های ناشی از ویژگی‌های فنی و کارایی روش بارانی مشاهده می‌شود. در سناریوهای ۵، ۸ و ۱۰ ٪، اثرات تدریجی محدودیت آب بر کاهش عملکرد نشان داده‌شده که میزان تاب‌آوری هر محصول در شرایط تنش آبی است.

جدول ۳- درصد تغییرات عملکرد محصولات تحت آبیاری بارانی در سناریوهای مختلف کاهش آبیاری

Table 3 – Percentage of yield variations of crops under sprinkler irrigation across different water reduction scenarios (t.ha^{-1})

محصول Crop	پایه Base	کاهش ۰٪ 0% Reduction	کاهش ۵٪ 5% Reduction	کاهش ۸٪ 8% Reduction	کاهش ۱۰٪ 10% Reduction
جو Barley	3.8	6.1	-0.5	-6.3	-10.3
چغندرقند Sugar beet	48.15	5	-1.8	-6.2	-10.0
خیار Cucumber	21.06	4.5	-0.7	-6.0	-11.2
ذرت علوفه‌ای Forage maize	45.74	3.8	-1.2	-6.0	-9.5
سیب‌زمینی Potato	38.99	6	-1.5	-6.9	-10.3
گندم Wheat	2.63	4.9	-1.1	-5.7	-8.7
گوجه‌فرنگی Tomato	35.52	7.8	-0.1	-3.7	-7.8
لوبیا Bean	1.39	6.4	0	-8.6	-14.4
نخود Chickpea	1.15	3.5	-1.7	-6.1	-8.7
هندوانه Watermelon	47.37	2.9	-2.3	-5.9	-8.6
یونجه Alfalfa	10.2	5.9	0	-5.9	-9.8

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Refrences: Finding Research.

میزان تغییرات عملکرد در حالت بدون تنش‌آبی برای گوجه‌فرنگی (۷/۸ ٪) و لوبیا (۶/۴ ٪) بیشترین افزایش‌یافته است؛ در حالی که هندوانه (۲/۹ ٪) و نخود (۳/۵ ٪) کمترین افزایش را داشته‌اند. در سناریوی ۵ درصد، لوبیا و یونجه کاهش عملکردی نداشته‌اند. سایر محصولات کاهش بین ۰/۵ تا ۲/۳ ٪ داشته‌اند؛ بیشترین افت مربوط به هندوانه (۲/۳ ٪) و چغندرقند (۱/۸ ٪) است. در سناریوی ۸ ٪، بیشترین افت عملکرد به لوبیا (۸/۶ ٪)، سیب‌زمینی (۶/۹ ٪) و جو (۶/۳ ٪) اختصاص دارد، در حالی که کمترین افت را گوجه‌فرنگی (۳/۷ ٪) و گندم (۵/۷ ٪) نسبت به سایر محصولات دارند. در نهایت، در سناریوی ۱۰

درصد، بیشترین کاهش عملکرد به لوبیا (۱۴/۴ ٪) و خیار (۱۱/۲ ٪) مربوط است و کمترین کاهش گوجه‌فرنگی (۷/۸ ٪) اختصاص دارد. این الگو نشـــان می‌دهد که محصـــولات با نیاز آبی بالا و ســـطح برگ زیاد مانند لوبیا و خیار، در آبیاری بارانی نســـبت به محدودیت آب آسیب‌پذیرترند، در حالی که محصولات با نیاز آبی پایین‌تر یا چرخه رشـــد کوتاه‌تر، مانند گوجه‌فرنگی، ثبات عملکرد بیشتری دارند.

جدول ۴ تغییرات عملکرد محصـــولات تحت روش آبیاری قطره‌ای را در سه سناریوی کاهش آبیاری نسبت به عملکرد پایه نشـــان می‌دهد. روش آبیاری قطره‌ای به‌دلیل تمرکز بر رســـاندن مســـتقیم آب به ناحیه ریشـــه، به‌طور معمول بازدهی مصـــرف آب بالاتری دارد، اما حساسیت عملکرد به کم‌آبی می‌تواند تحت‌تأثیر ویژگی‌های فیزیولوژیک و نیاز آبی محصـــول قرار گیرد. داده‌ها به‌صـــورت درصـــد کاهش یا افزایش نســـبت به عملکرد پایه بیان شـــده‌اند که امکان ارزیابی دقیق‌تر میزان تاب‌آوری محصـــولات را در برابر سناریوهای محدودیت آب فراهم می‌کند.

جدول ٤- درصد تغییرات عملکرد محصولات تحت آبیاری قطره‌ای در سناریوهای مختلف کاهش آبیاری

Table 4- Percentage of yield variations of crops under drip irrigation across different water reduction scenarios (t.ha^{-1})

محصول Crop	پایه Base	کاهش ۰٪ 0% Reduction	کاهش ۵٪ 5% Reduction	کاهش ۸٪ 8% Reduction	کاهش ۱۰٪ 10% Reduction
جو Barley	3.8	12.8	7.4	0.6	-4.5
چغندرقند Sugar beet	48.15	7.9	2.3	-2.3	-6.1
خیار Cucumber	21.06	11.1	5.4	0	-5.5
ذرت علوفه‌ای Forage maize	45.74	6.7	1.2	-3.8	-7.9
سیب‌زمینی Potato	38.99	9	2.8	-2.8	-6.8
گندم Wheat	2.63	6.8	1.9	-3.0	-6.8
گوجه‌فرنگی Tomato	35.52	7.8	2.1	-3.7	-7.8
لوبیا Bean	1.39	14.8	6.5	-2.9	-10.8
نخود Chickpea	1.15	6.1	0.9	-3.5	-7.0
هندوانه Watermelon	47.37	5.1	1.1	-2.7	-5.8
یونجه Alfalfa	10.2	11.8	6.8	1.9	-3.9

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Refrences: Finding Research.

در سناریوی بدون تنش آبی، بیشترین افزایش عملکرد نسبت به پایه به لوبیا (۱۴/۳ ٪) و جو (۱۲/۸ ٪) اختصـــاص دارد که نشـــان‌دهنده کارایی بالای روش قطره‌ای در شـــرایط بدون محدودیت آبیاری برای این محصولات است. در مقابل، کمترین افزایش به هندوانه (۵/۱ ٪) و نخود (۶/۱ ٪) اختصـــاص دارد. در سناریوی ۵ درصد، محصولات مورد بررسی افزایش اندک نسبت به حالت پایه بین ۰/۹ تا ۵/۴ ٪دارند؛ کمترین افزایش به نخود (۰/۹ ٪) و هندوانه (۱/۱ ٪) مربوط است. در سناریوی ۸ درصد،

برخی محصولات مانند خیار (۰ ٪) و جو (۰/۶ ٪) عملکرد تقریباً پایدار دارند، اما کاهشی در ذرت‌علوفه‌ای (۳/۸ ٪) و گوجه‌فرنگی (۳/۷ ٪) خواهند داشت. نهایتاً در سناریوی ۱۰ درصد، بیشترین کاهش عملکرد در لوبیا (۱۰/۸ ٪)، ذرت علوفه‌ای (۷/۹ ٪) و گوجه‌فرنگی (۷/۸ ٪)، در حالی که یونجه (۳/۹ ٪) و جو (۴/۵ ٪) کمترین افت را داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که در روش قطره‌ای، عملکرد بسیاری از محصولات حتی تحت محدودیت‌های متوسط آبیاری نسبتاً پایدار باقی می‌ماند و افت شدید تنها در سطوح بالای تنش آبی رخ می‌دهد.

علاوه بر تغییرات عملکرد، بررسی شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب نیز اهمیت بالایی در ارزیابی کارایی سامانه‌های آبیاری دارد. همان‌گونه که در جدول ۵ این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد زعفران در روش آبیاری بارانی نسبت به حالت پایه (سطحی) حدود ۸/۹ ٪ افزایش داشته است، در حالی که در روش آبیاری قطره‌ای، این افزایش به حدود ۱۵/۵ ٪ رسیده است. با به‌کارگیری روش آبیاری بارانی، بهره‌وری فیزیکی آب زعفران نسبت به آبیاری سطحی به میزان ۲۸/۱ ٪ افزایش یافته است؛ در حالی‌که در روش آبیاری قطره‌ای، این افزایش به حدود ۷۷/۷ ٪ رسیده است. این روند نشان می‌دهد که کاهش تلفات آب در سامانه‌های نوین آبیاری، منجر به استفاده مؤثرتر از منابع آبی و در نتیجه افزایش تولید به ازای واحد حجم آب مصرفی شده است. همچنین بهره‌وری اقتصادی آب، که بیانگر بازده مالی ناشی از مصرف هر مترمکعب آب است، در هر دو روش آبیاری بارانی و قطره‌ای به ترتیب به میزان ۲۸/۱ و ۷۷/۸ ٪ نسبت به حالت پایه بهبود یافته است. به طور کلی، نتایج حاکی از آن است که استفاده از روش‌های نوین آبیاری، به ویژه آبیاری قطره‌ای، علاوه بر افزایش عملکرد، موجب ارتقای بهره‌وری آب در دو بعد فیزیکی و اقتصادی گردیده و از این رو می‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب و افزایش بازده تولید زعفران در دشت همدان–بهار مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۵- درصد تغییرات عملکرد، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب زعفران تحت آبیاری بارانی و قطره‌ای

Table 5 – Percentage changes in saffron yield, physical and economic water productivity under sprinkler and drip irrigation

نوع آبیاری Irrigation method	عملکرد Yield ($kg.ha^{-1}$)	بهره‌وری فیزیکی آب Physical water productivity ($g.m^{-3}$)	بهره‌وری اقتصادی آب Economic water productivity ($IRR.m^{-3}$)
آبیاری سطحی (پایه) Surface irrigation (Base)	7.0	2.19	240652
آبیاری بارانی Sprinkler Irrigation	8.9	28.1	28.1
آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation	15.5	77.7	77.8

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Refrences: Finding Research.

این اختلاف قابل‌توجه بیانگر آن است که آبیاری قطره‌ای می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای عملکرد زعفران و افزایش بهره‌وری آب ایفا کند. باتوجه‌به اینکه زعفران گیاهی مقاوم به خشکی است و به دلیل نیاز آبی پایین و ویژگی‌های فیزیولوژیک این گیاه، در این مطالعه سناریوهای کاهش آبیاری برای آن بررسی نشده است. ازآنجاکه هدف اصلی پژوهش، ارزیابی روش‌های آبیاری در شرایط تنش آبی و بررسی راهبردهای توسعه سطح زیرکشت محصولات مقاوم است، تمرکز بر توسعه سطح زیرکشت زعفران می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش تاب‌آوری اقتصادی کشاورزی در منطقه باشد.

جدول ٦- شاخص‌های صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای کل محصولات تحت روش‌های مختلف آبیاری و سطوح کاهش آب
Table 6- Validation statistics of AquaCrop for aggregated crops under different irrigation methods and deficit irrigation scenarios

روش آبیاری Irrigation methods	سناریو Scenario	MAE ($t.ha^{-1}$)	MSE ($t.ha^{-1}$)	RMSE ($t.ha^{-1}$)	R^2
سطحی Surface irrigation	بدون تنش آبی 0% Reduction	1.45	+0.20	2.05	0.92
	۵٪ کاهش 5% Reduction	1.70	−0.30	2.30	0.91
	۸٪ کاهش 8% Reduction	2.10	−0.60	2.70	0.90
	۱۰٪ کاهش 10% Reduction	2.55	−0.90	3.20	0.89
بارانی Sprinkler irrigation	بدون تنش آبی 0% Reduction	1.20	+0.10	1.75	0.93
	۵٪ کاهش 5% Reduction	1.50	−0.25	2.05	0.92
	۸٪ کاهش 8% Reduction	1.85	−0.45	2.40	0.91
	۱۰٪ کاهش 10% Reduction	2.25	−0.70	2.80	0.90
قطره‌ای Drip irrigation	بدون تنش آبی 0% Reduction	0.95	+0.05	1.50	0.95
	۵٪ کاهش 5% Reduction	1.25	−0.20	1.80	0.94
	۸٪ کاهش 8% Reduction	1.55	−0.35	2.10	0.93
	۱۰٪ کاهش 10% Reduction	1.90	−0.60	2.40	0.92

مأخذ: یافته‌های تحقیق.
Research: Finding Research.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در روش آبیاری قطره‌ای عملکرد به‌طور محسوسی بالاتر از آبیاری بارانی و سطحی است. علت این تفاوت به کارایی بالاتر سامانه قطره‌ای در انتقال و توزیع یکنواخت آب در ناحیه ریشه، کاهش تلفات تبخیر و رواناب سطحی، و حفظ رطوبت پایدار خاک در محدوده مطلوب رشد گیاه بازمی‌گردد. در مقابل، در سامانه سطحی بخشی از آب به‌صورت نفوذ عمقی و تبخیر سطحی از دست رفته و در آبیاری بارانی نیز بخشی از آب به دلیل تبخیر در حین پاشش یا رانش باد، به ریشه گیاه نمی‌رسد. بنابراین، حتی در شرایط تأمین کامل نیاز آبی، تفاوت در یکنواختی، راندمان توزیع و کارایی مصرف آب موجب شده است که عملکرد در سامانه قطره‌ای بیشتر از سایر روش‌ها باشد.

برای ارزیابی صحت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات دشت همدان – بهار، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سطح کل گیاهان (به‌صورت تجمیعی) با داده‌های واقعی مقایسه گردید. این مقایسه در سه روش آبیاری (غرقابی، بارانی و قطره‌ای) و تحت چهار سناریوی کاهش آب (۰، ۵، ۸ و ۱۰ ٪) انجام شد. شاخص‌های MAE، MSE، RMSE و R^2 محاسبه شدند تا میزان دقت، بی‌طرفی و همبستگی مدل مشخص گردد.

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های مدل AquaCrop در سطح تجمیعی از دقت مطلوبی برخوردار بوده و

مقدار ضریب تعیین (R^2) در بازه ۰/۸۹ تا ۰/۹۵ قرار گرفته است که بیانگر همبستگی قوی بین عملکرد شبیه‌سازی‌شده و داده‌های واقعی می‌باشد؛ بااین‌حال، افزایش سطح کاهش آب سبب افزایش تدریجی خطاهای مدل (MAE و RMSE) و کاهش اندک دقت شده است. در این میان، روش آبیاری قطره‌ای در تمامی سناریوها بهترین کارایی مدل را نشان داد، به‌گونه‌ای که در شرایط بدون تنش آبی مقادیر $MAE=0.95\ t.ha^{-1}$ و $RMSE=1.50\ t.ha^{-1}$ همراه با $R^2=0.95$ ثبت شد و حتی در سناریوی ۱۰ درصد کاهش آب، مقدار RMSE نسبت به سایر روش‌ها کمتر (۲.۴ $t.ha^{-1}$) باقی ماند. روش بارانی از نظر دقت در رتبه دوم قرار گرفت، به‌طوری که در شرایط بدون تنش آبی با $R^2=0.93$ و $MAE=1.20\ t.ha^{-1}$ برآوردهای قابل قبولی ارائه داد و باوجود افزایش خطا در شرایط کاهش آب، همچنان R^2 بالاتر از ۰/۹۰ حفظ شد. در مقابل، روش آبیاری سطحی بیشترین خطا را نشان داد، به‌ویژه در سناریوی ۱۰ ٪ کاهش آب که $MAE=2.55\ t.ha^{-1}$ و $RMSE=3.20\ t.ha^{-1}$ همراه با $R^2=0.89$ مشاهده گردید که می‌تواند ناشی از حساسیت بالای این روش به مدیریت مزرعه و راندمان پایین مصرف آب باشد. در مجموع، مقایسه روش‌ها نشان می‌دهد که دقت شبیه‌سازی مدل به ترتیب در آبیاری قطره‌ای > بارانی > سطحی قرار دارد و این یافته‌ها بیانگر تولنایی بالای AquaCrop در بازتولید رفتار عملکرد محصولات تحت شرایط واقعی و سناریوهای مختلف کم‌آبی است؛ ازاین‌رو، نتایج مدل می‌تواند مبنایی قابل‌اعتماد برای ارزیابی اقتصادی و بهینه‌سازی الگوی کشت در چارچوب مدل برنامه‌ریزی ریاضی توسعه‌یافته دشت همدان – بهار فراهم سازد.

در این مطالعه، سناریوی بدون تنش آبی (۰ درصد کاهش) به‌عنوان سناریوی ۱ و سناریوهای کاهش ۵، ۸ و ۱۰ درصدی آب به‌ترتیب به‌عنوان سناریوهای ۲، ۳ و ۴ در نظر گرفته شدند. بااین‌حال، ازآنجاکه زعفران ذلتاً گیاهی کم‌نیاز به آب و مقاوم به خشکی است، کاهش آبیاری برای آن اعمال نشد و لذا این سناریوها برای زعفران موضوعیت ندارند.

نتایج جدول ۷ تغییرات سطح زیرکشت محصولات در روش آبیاری سطحی، را نشان می‌دهد. در سناریوی ۲، بیشترین افزایش سطح زیرکشت مربوط به خیار (۲۴۳ ha) و سیب‌زمینی (۲۹۲۴ ha) است که بیانگر کشت محصولات با ارزش اقتصادی بالاتر و عملکرد مطلوب‌تر در شرایط محدودیت آبی است، در حالی‌که کاهش در سطح زیرکشت گندم (۱۰۰۷- ha)، جو (۴۶۰- ha)، و یونجه (۵۸۵- ha) مشاهده می‌شود که عمدتاً به دلیل نیاز آبی بالاتر و سودآوری نسبی کمتر آنها در مقایسه با محصولات جایگزین است. در سناریوی ۳، افزایش سطح زیرکشت سیب‌زمینی به ۲۵۱۱ ha و زعفران به ۵ ha می‌رسد، اما سطح زیرکشت خیار به سطح پایه بازمی‌گردد و کاهش سطح زیرکشت گندم به ۳۵۰- ha محدود می‌شود. در سناریوی ۴، همچنان گرایش به توسعه سطح زیرکشت محصولات با مصرف آب کمتر و ارزش افزوده بالاتر نظیر سیب‌زمینی (۹۵۱ ha) و زعفران (۶ ha) ادامه دارد، در حالی‌که برخی محصولات نظیر گندم و نخود با کاهش قابل‌توجه سطح زیرکشت مواجه می‌شوند. روند کلی نشان می‌دهد که حتی در شرایط کاهش شدید آب آبیاری، زعفران نه‌تنها کاهش سطح زیرکشت نداشته بلکه با رشد تدریجی مواجه بوده است.

جدول ۷- تغییرات سطح زیرکشت محصولات تحت آبیاری سطحی

Table 7- Changes in crop cultivation area under surface irrigation (ha)

محصول Crop	پایه Base	سناریوی ۱ Scenario 1	سناریوی ۲ Scenario 2	سناریوی ۳ Scenario 3	سناریوی ٤ Scenario 4
جو Barley	7666	-	-460	-459	0
چغندرقند Sugar beet	48	-	-14	-14	0
خیار Cucumber	812	-	+243	0	+243
ذرت علوفه‌ای Forage maize	570	-	-171	-171	0
سیب‌زمینی Potato	13247	-	+2924	+2511	951+
گندم Wheat	16788	-	-1007	-350	-1007
گوجه‌فرنگی Tomato	66	-	-19	-20	0
لوبیا Bean	104	-	-31	-31	-31
نخود Chickpea	1550	-	-465	-465	-159
هندوانه Watermelon	482	-	-145	-144	0
یونجه Alfalfa	14302	-	-858	-858	0
زعفران Saffron	8	-	+2	+5	+6

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Research: Finding Research.

نتایج جدول ۸ تغییرات سطح زیرکشت محصولات در روش آبیاری بارانی، تحت سناریوهای کاهش آب آبیاری را نشان می‌دهد. در سناریوی ۱، بیشترین افزایش سطح زیرکشت به سیب‌زمینی (۱۹۵۳ ha)، خیار (۲۳۳ ha) و ذرت علوفه‌ای (۱۶۵ ha) اختصاص دارد، در حالی‌که محصولات یونجه (۵۰۲- ha) و جو (۳۱۶- ha) کاهش قابل‌توجهی را تجربه می‌کنند. با تشدید محدودیت آبی، روند کاهش سطح زیرکشت محصولات کم‌بازده و پرمصرف نظیر یونجه و جو ادامه یافته و در سناریوی ۴ به ترتیب به (۱۴۰۲-) و (۶۶۶-) ha می‌رسد. در مقابل، زعفران در تمام سناریوها افزایش تدریجی دارد و از ۷ ha در سناریوی ۱، به ۱۵ ha در سناریوی ۴ می‌رسد که نشان‌دهنده پایداری و مزیت اقتصادی این محصول در شرایط تنش آبی است. همچنین، گندم در تمامی سناریوها افزایش محدود اما ثابت سطح زیرکشت را حفظ کرده است که می‌تولند به دلیل نقش استراتژیک این محصول در امنیت غذایی باشد. به‌طور کلی، الگوی کشت تحت آبیاری بارانی حتی با کاهش شدید آب، انعطاف‌پذیری بالاتری در حفظ و توسعه محصولات با ارزش افزوده بالا، به‌ویژه زعفران و سیب‌زمینی، نسبت به روش آبیاری سطحی از خود نشان می‌دهد.

جدول ۸- تغییرات سطح زیرکشت محصولات تحت آبیاری بارانی

Table 8- Changes in crop cultivation area under sprinkler irrigation (ha)

محصول Crop	پایه Base	سناریوی ۱ Scenario 1	سناریوی ۲ Scenario 2	سناریوی ۳ Scenario 3	سناریوی ٤ Scenario 4
جو Barley	7666	-316	-366	-616	-666
چغندرقند Sugar beet	48	+14	+14	+14	+14
خیار Cucumber	812	+233	+208	+238	+208
ذرت علوفه‌ای Forage maize	570	+165	+150	+150	+130
سیب‌زمینی Potato	13247	+1953	+1603	+1253	+953
گندم Wheat	16788	+262	+262	+312	+262
گوجه‌فرنگی Tomato	66	+19	+19	+18	+17
لوبیا Bean	104	+31	+26	+31	+26
نخود Chickpea	1550	-400	-425	-430	-500
هندوانه Watermelon	482	+133	+133	+128	+118
یونجه Alfalfa	14302	-502	-752	-1102	-1402
زعفران Saffron	8	+7	+8	+12	+15

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Research: Finding Research.

نتایج جدول ۹ تغییرات سطح زیرکشت محصولات در روش آبیاری قطره‌ای، تحت سناریوهای کاهش آب آبیاری را نشان می‌دهد. در سناریوی ۱، بیشترین افزایش سطح زیرکشت به سیب‌زمینی (۲۵۰۱ ha)، گندم (۷۱۲ ha) و خیار (۲۴۳ ha) اختصاص دارد، در حالی‌که بیشترین کاهش مربوط به یونجه (۷۳۰- ha) و جو (۳۸۶- ha) است. در سناریوی ۴، گرچه بخشی از افزایش سطح زیرکشت سیب‌زمینی تعدیل شده و به ۲۱۰۳ ha می‌رسد، اما این محصول همچنان در صدر محصولات توسعه‌یافته باقی می‌ماند. خیار و ذرت علوفه‌ای نیز در تمامی سناریوها افزایش پایدار سطح زیرکشت را حفظ کرده‌اند. در مقابل، محصولات کم‌بازده و پرمصرفی چون یونجه و جو در تمام سناریوها کاهش قابل ملاحظه‌ای را تجربه کرده‌اند و نخود در سناریوهای ۲، ۳ و ۴ با افت چشمگیری مواجه شده است. زعفران در تمام شرایط افزایش تدریجی قابل‌توجهی داشته و از ۸ ha در سناریوی ۱، به ۱۵ ha در سناروی ۴ رسیده که این امر پایداری و مزیت اقتصادی آن را در تنش آبی تأیید می‌کند. به طور کلی، آبیاری قطره‌ای با حفظ یا حتی ارتقای سطح زیرکشت محصولات استراتژیک و با ارزش افزوده بالا، نشان‌دهنده کارآمدترین روش در سازگاری با محدودیت‌های آبی است.

جدول ۹- تغییرات سطح زیرکشت محصولات تحت آبیاری قطره‌ای

Table 9- Changes in crop cultivation area under drip irrigation (ha)

محصول Crop	پایه Base	سناریوی ۱ Scenario 1	سناریوی ۲ Scenario 2	سناریوی ۳ Scenario 3	سناریوی ٤ Scenario 4
جو Barley	7666	-386	-387	-386	-396
چغندرقند Sugar beet	48	+14	+14	+14	+14
خیار Cucumber	812	+243	+243	+238	+238
ذرت علوفه‌ای Forage maize	570	+171	+171	+170	+170
سیب‌زمینی Potato	13247	+2501	+2113	+2053	+2103
گندم Wheat	16788	+712	+312	+312	+312
گوجه‌فرنگی Tomato	66	+19	+19	+19	+19
لوبیا Bean	104	+31	+31	+31	+31
نخود Chickpea	1550	0	-465	-460	-465
هندوانه Watermelon	482	+144	+144	+143	+29
یونجه Alfalfa	14302	-730	-714	-687	-762
زعفران Saffron	8	+8	+10	+12	+15

مأخذ: یافته‌های تحقیق.

Research: Finding Research.

بررسی تغییرات سود خالص الگوی کشت در حالت حذف زعفران در جدول ۱۰ نشان می‌دهد که در مقایسه با شرایط پایه (آبیاری سطحی بدون کاهش آبیاری با سود خالص ۵۶۶/۹۷ میلیارد تومان)، روش‌های نوین آبیاری به‌ویژه در سناریوی ۱، عملکرد اقتصادی بهتری داشته‌اند. در همین سناریو، آبیاری بارانی با سود خالص ۵۶۸/۲۴ میلیارد تومان (افزایش ۱/۲۷ میلیارد تومان نسبت به پایه) و آبیاری قطره‌ای با سود ۵۶۸/۶۰ میلیارد تومان (افزایش۱/۶۳ میلیارد تومان) منجر به ارتقای بازده اقتصادی شده‌اند. این روند نشان می‌دهد که در شرایط بدون محدودیت آبی، روش‌های کارآمدتر آبیاری، با بهبود بهره‌وری آب و کاهش هزینه‌های تولید، منجر به افزایش سود می‌شوند.

با اعمال محدودیت آبی، واکنش سیستم کشاورزی در سه روش متفاوت است. در سناریوی کاهش ۲، هر سه روش افزایش جزئی سود نسبت به پایه را تجربه می‌کنند، اما آبیاری قطره‌ای همچنان در صدر با افزایش ۰/۷۱ میلیارد تومان قرار دارد. با افزایش شدت محدودیت به ۳، آبیاری سطحی کاهش سود ۰/۱۲ میلیارد تومان و آبیاری بارانی کاهش جزئی ۰/۰۱ میلیارد تومان را ثبت می‌کنند، در حالی که آبیاری قطره‌ای هنوز با افزایش ۰/۵۷ میلیارد تومان نسبت به پایه، بیشترین پایداری اقتصادی را نشان می‌دهد. در سناریوی ۴، افت سود در هر سه روش مشهود است، اما میزان این افت در آبیاری قطره‌ای (۰/۰۹ میلیارد تومان) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از آبیاری سطحی (۰/۴۱ میلیارد تومان) و بارانی (۰/۲۴ میلیارد تومان) است. این نتایج بیانگر آن است که آبیاری قطره‌ای، حتی در شرایط تنش آبی شدید، کمترین آسیب اقتصادی را متحمل شده و از نظر پایداری سود خالص، برتری محسوسی نسبت به روش‌های دیگر دارد.

جدول ۱۰- تغییرات سود خالص الگوی کشت در حالت حذف زعفران تحت روش‌های آبیاری
Table 10- Net profit changes of the cropping pattern without Saffron under irrigation methods (billion tomans)

سناریو Scenario	آبیاری سطحی Surface Irrigation	تفاوت Difference	آبیاری بارانی Sprinkler Irrigation	تفاوت Difference	آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation	تفاوت Difference
سناریوی ۱ Scenario 1	–	–	568.24	1.27	568.60	1.63
سناریوی ۲ Scenario 2	567.06	0.09	567.34	0.37	567.68	0.71
سناریوی ۳ Scenario 3	566.85	-0.12	566.98	0.01	567.54	0.57
سناریوی ۴ Scenario 4	566.56	-0.41	566.73	-0.24	566.88	-0.09

مأخذ: یافته‌های تحقیق.
Research: Finding Research.

طبق نتایج جدول ۱۱، افزودن زعفران به الگوی کشت، در همه روش‌های آبیاری و تحت سناریوهای اعمال شده، سود خالص منطقه را نسبت به مبنای مطالعه (آبیاری سطحیِ بدون تنش‌آبی با سود ۵۶۶/۹۷ میلیارد تومان) به‌طور معناداری افزایش داده است. در سناریوی ۱، سود خالص به ۵۷۳/۶۴ ، ۵۷۵/۳۲ و ۵۷۵/۴۹ میلیارد تومان به‌ترتیب برای سطحی (۶/۶۷)، بارانی (۸/۳۵) و قطره‌ای (۸/۵۲) می‌رسد؛ حداکثر سود خالص در این حالت با آبیاری قطره‌ای حاصل شده است. با اعمال سناریوی ۲، مزیت اقتصادی همچنان پایدار می‌ماند: ۵۷۴/۷۳، ۵۷۴/۸۳ و ۵۷۵/۰۹ میلیارد تومان برای سطحی (۷/۷۶)، بارانی (۷/۸۶) و قطره‌ای (۸/۱۲). در سناریوهای ۳ و ۴ نیز افزودن زعفران به الگوی کشت همچنان سود افزوده‌ای در بازه‌ای نسبتاً محدود ایجاد می‌کند: در سناریوی ۳، سود به ۵۷۴/۲۷، ۵۷۴/۳۴ و ۵۷۴/۴۴؛ و در سناریوی ۴، به ۵۷۳/۸۵ ، ۵۷۴/۱۰ و ۵۷۴/۲۰ میلیارد تومان برای آبیاری سطحی (۷/۳۰) و (۶/۸۸)، آبیاری بارانی (۷/۳۷) و (۷/۱۳) و آبیاری قطره‌ای (۷/۴۷) و (۷/۲۳) می‌رسد. بنابراین، دامنه بهبود سود خالص نسبت به مبنا در همه سناریوها بین حدود ۶/۶۷ تا ۸/۵۲ میلیارد تومان قرار دارد و نشان می‌دهد اثر اقتصادی افزودن زعفران به الگوی کشت و نسبتاً کم‌حساس به تنش آبی است.

جدول ۱۱- تغییرات سود خالص الگوی کشت در حالت افزودن زعفران تحت روش‌های آبیاری و سناریوهای کاهش آب
Table 11- Net profit changes of the cropping pattern with Saffron under irrigation methods (billion tomans)

سناریو Scenario	آبیاری سطحی Surface Irrigation	تفاوت Difference	آبیاری بارانی Sprinkler Irrigation	تفاوت Difference	آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation	تفاوت Difference
سناریوی ۱ Scenario 1	573.64	6.67	575.32	8.35	575.49	8.52
سناریوی ۲ Scenario 2	574.73	7.76	574.83	7.86	575.09	8.12
سناریوی ۳ Scenario 3	574.24	7.30	574.34	7.37	574.44	7.47
سناریوی ۴ Scenario 4	573.85	6.88	574.10	7.13	574.20	7.23

مأخذ: یافته‌های تحقیق.
Research: Finding Research.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، باهدف ارزیابی اثر تغییر روش‌های آبیاری و مدیریت الگوی کشت بر سودآوری بخش کشاورزی، در شرایط محدودیت منابع آب، دشت همدان - بهار به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم تولید محصولات زراعی کشور انتخاب شد. این منطقه به‌دلیل تنوع محصولات، وابستگی شدید اقتصادی به کشاورزی و مواجهه با تنش‌های آبی، نمونه‌ای مناسب برای تحلیل راهبردهای ارتقای تاب‌آوری اقتصادی در برابر کم‌آبی محسوب می‌شود. در این مطالعه، سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای تحت شرایط بدون تنش آبی و سه سناریوی کاهش آب آبیاری (۵، ۸ و ۱۰ درصد) برای محصولات درون الگوی کشت منطقه بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط بدون تنش آبی، روش آبیاری قطره‌ای بالاترین افزایش عملکرد را نسبت به عملکرد پایه در اغلب محصولات، به‌ویژه لوبیا، زعفران، جو، یونجه و خیار، نشان داد. روش آبیاری بارانی نیز در برخی محصولات مانند گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی عملکرد مناسبی داشت، اما به‌طورکلی کمتر از قطره‌ای بود، درحالی‌که روش سطحی به دلیل توزیع غیریکسان آب و اتلاف بیشتر، کمترین بهبود عملکرد را نشان داد. با اعمال کاهش متوسط آب (سناریوهای ۵ و ۸ درصد)، تفاوت‌ها میان روش‌ها نشان داده شد. در این شرایط، روش آبیاری قطره‌ای بیشترین تاب‌آوری عملکرد را نشان داد؛ بسیاری از محصولات یا همچنان افزایش عملکرد داشتند یا افت کمی را داشته‌اند. در مقابل، روش آبیاری بارانی کاهش کمتر و روش سطحی کاهش قابل‌توجه عملکرد را به‌ویژه در محصولات حساس به کم‌آبی مانند گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای نشان داد. روش قطره‌ای حتی در سناریوی کاهش ۱۰ درصد نیز تا حدودی نسبت به دو روش آبیاری دیگر کارایی مناسب خود را حفظ کرد و افت عملکرد در محصولات کم‌حساس مانند یونجه، هندوانه و نخود به کمتر از ۶ درصد داشته‌اند، درحالی‌که روش آبیاری بارانی کاهش بیشتری نشان داد و روش سطحی بیشترین افت را تجربه کرد. این نتایج نشان می‌دهد که روش قطره‌ای نه‌تنها در شرایط بدون تنش آبی، بلکه در محدودیت‌های شدید آبی نیز می‌تواند بهترین گزینه برای حفظ و حتی بهبود عملکرد، به‌ویژه در محصولات مقاوم به کم‌آبی مانند یونجه و نخود باشد. در مجموع، یافته‌ها بر ضرورت تغییر الگوی آبیاری به سمت روش‌های کارآمدتر مانند آبیاری قطره‌ای برای افزایش تاب‌آوری تولیدات کشاورزی در شرایط کم‌آبی تأکید دارند. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین نیز هم‌خوانی دارد. به‌عنوان‌مثال، پژوهش‌های Maleki et al. (2020)، Habibi et al. (2021)، Choopan et al. (2021) و Sharifi et al. (2024) نشان داده‌اند که استفاده از روش آبیاری قطره‌ای، همراه با تغییر الگوی کشت به سمت محصولات کم‌آب‌بر و با ارزش اقتصادی بالا، می‌تواند بخشی از کاهش درآمد ناشی از محدودیت‌های آبی را جبران کند. همچنین یافته‌های Moazzezi et al. (2021)، Soltani et al. (2023) و Kalantar et al. (2025) بر اهمیت جایگزینی محصولات پرمصرف آب با گونه‌های مقاوم و اقتصادی در دشت همدان - بهار تأکید دارند. نتایج مقایسه روش‌های آبیاری نشان داد که رتبه‌بندی اقتصادی در تمامی سناریوها ثابت مانده و به ترتیب آبیاری قطره‌ای > آبیاری بارانی > آبیاری سطحی قرار دارد. با افزودن زعفران به الگوی کشت منطقه تحت شرایط مختلف مدیریت آبیاری منطقه، توانسته نسبت به حالت الگوی کشت پایه (بدون زعفران) تا حدودی کاهش سود را جبران کند. این الگو با تغییرات عملکرد و سطح زیرکشت نیز سازگار است؛ به‌طوری که زعفران به دلیل نیاز آبی پایین و حاشیه سود بالا، امکان تخصیص بهینه منابع و جایگزینی محصولات کم‌بازده و آب‌بر را فراهم کرده و در کنار راندمان بالاتر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، موجب می‌شود حتی در سناریوهای ۳ و ۴، سود خالص منطقه

همچنان نسبت به روش آبیاری سطحی و بارانی، افزایش پیدا کند. در مجموع، ترکیب افزودن زعفران به الگوی کشت، همراه با به‌کارگیری سامانه آبیاری قطره‌ای، پایدارترین و سودآورترین گزینه اقتصادی در شرایط محدودیت منابع آب به شمار می‌آید. در این الگو، از مجموع ۵۵،۶۴۳ هکتار اراضی زراعی منطقه، به‌طور میانگین حدود ۱۷ هکتار (معادل حدود ۰/۰۳ درصد از کل اراضی زیرکشت) به کشت زعفران اختصاص یافته است که این سطح، با توجه به محدودیت منابع آب و مزیت اقتصادی محصول، ترکیب بهینه‌ای را در چارچوب الگوی کشت منطقه ایجاد کرده است. به‌طورکلی، نتایج این مطالعه نشان داد که اتخاذ رویکرد هم‌زمان بهینه‌سازی الگوی کشت و ارتقای فناوری آبیاری، می‌تولند به‌عنوان یک راهبرد کارآمد برای حفظ پایداری اقتصادی بخش کشاورزی در شرایط تنش آبی عمل نماید. ارزیابی سناریوهای مختلف حاکی از آن است که انعطاف‌پذیری بالاتر در انتخاب محصولات، به‌ویژه کشت گونه‌های با نیاز آبی کمتر و حاشیه سود بالاتر، همراه با بهره‌گیری از سامانه‌های آبیاری کارآمد، توانایی جبران بخش قابل‌توجهی از خسارات ناشی از محدودیت منابع آب را دارد. این امر بیانگر آن است که برنامه‌ریزی هوشمندانه و سیاست‌گذاری مبتنی بر داده، توانایی حفظ مسیر توسعه پایدار کشاورزی را دارد. بر اساس نتایج این پژوهش، استفاده از روش آبیاری قطره‌ای، به‌عنوان گزینه‌ای برتر توصیه می‌شود، زیرا در شرایط بدون تنش آبی موجب افزایش عملکرد محصولات شده و در شرایط تنش آبی نیز تا حدی توانسته است کاهش عملکرد و خسارات اقتصادی را جبران کند. بااین‌حال، یافته‌ها نشان می‌دهد که برای ارتقای پایدار سود خالص بخش کشاورزی، به‌ویژه در سناریوهای مختلف محدودیت آبی، توسعه سطح زیرکشت زعفران در الگوی کشت از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌کارگیری این راهبرد علاوه بر بهبود سودآوری در مقایسه با الگوی پایه، سبب می‌شود که در تمامی روش‌های آبیاری نیز سود خالص بخش کشاورزی افزایش یابد و تا حد زیادی اثرات منفی کاهش منابع آبی جبران گردد.

Reference

Afruzi, A., Zare Abyaneh, H., & Abdolabadi, H. (2021). Local strategies to manage groundwater depletion under climate change scenarios—a case study: Hamedan-Bahar Plain (Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, *14* (15), 1548. https://doi.org/10.1007/s12517-021-07773-1

Arribas, I., Louhichi, K., Perni, A., Vila, J., & Gomez-y-Paloma, S. (2020). Modelling agricultural risk in a large scale positive mathematical programming model. *International Journal of Computational Economics & Econometrics*, *10* (1), 2-32.

Bahrami, M., & Zarei, M. R. (2022). Long-term temporal trend analysis of climatic parameters using polynomial regression analysis over the Fasa Plain, southern Iran. *Meteorology & Atmospheric Physics*, *134* (2), 42. https://doi.org/10.1007/s00703-022-00875-9

Bashiri, H. R., Mousavi, S. N., & Najafi, B. (2021). An analysis of the effects of the policies of water demand management in Marvdasht: an application of the positive mathematical programming (PMP). *Iranian Journal of Agricultural Economics & Development Research*, *52* (3), 441-455. (In Persian with English abstract)

Begna, T. (2020). Major challenging constraints to crop production farming system and possible breeding to overcome the constraints. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences (IJRSAS)*, *6* (7), 27-46.

Birkenholtz, T. (2023). Infrastructuring drip irrigation: The gendered assembly of farmers, laborers and state subsidy programs. *Environment & Planning E: Nature & Space*, *6*

(1), 132-152. https://doi.org/10.1177/25148486221100

Bouzidi, N., & Pérez-Blanco, C. D. (2025). A dynamic hydro-economic model to assess the effectiveness and economic benefits and costs of wetland restoration and creation. *Ecosystem Services*, *73*, 101737.

Chang, K. B., Kang, S. W., Kwon, O. S., Lee, S., Lee, J., & Koo, Y. (2025). The economic impacts of implementing net zero policies in Korea: A combined top-down and bottom-up approach. *Climate Change Economics*, *16* (01), 2440011.

Chauhdary, J. N., Li, H., Jiang, Y., Pan, X., Hussain, Z., Javaid, M., & Rizwan, M. (2023). Advances in sprinkler irrigation: a review in the context of precision irrigation for crop production. *Agronomy*, *14* (1), 47. https://doi.org/10.3390/agronomy14010047

Choopan, H., Hezarjaribi, E., Abutalebi, Gh., Ghorbani, H., & Khashaee Siouki, O. (2021). Investigation of subsurface drip irrigation and time of first irrigation on quantity and quality of saffron. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *15* (1), 98–108. (In Persian with English abstract)

Eshete, D. G., Sinshaw, B. G., & Legese, K. G. (2020). Critical review on improvig irrigation water use efficiency: Advances, challenges, and opportunities in the Ethiopia context. *Water-Energy Nexus*, *3*, 143-154. https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.09.001

Ghadami Firouzabadi, A., & Akbari, M. (2024). Effect of irrigation system type on irrigation water use, wheat yield, and water productivity under farmers' conditions: A case study of Hamadan province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *17* (5), 831–842. (In Persian with English abstract)

Golmohammadi, F. (2019). Saffron as a main cash, medical and resistive plant for sustainable economy and livelihood of rural people in dried regions of Iran. *Black Sea Journal of Agriculture*, *2* (3), 156-163.

Habibi, G., Zafarian, H., Rajali, F., Bagheri, A., & Nadali, F. (2021). Evaluation of the effect of irrigation regime and arbuscular mycorrhizal fungus on some agronomic traits of saffron (*Crocus sativus* L.) in organic culture beds. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *52* (4), 115–126. (In Persian with English abstract)

Kalantar, V., Mousavi, S. H., & Najafi Alamdarlo, H. (2025). Wild pistachio cultivation and increasing strategic water-resource productivity for agricultural sustainability in arid regions. *Agricultural Economics*, *33* (2), e132224. (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.22034/iaes.2025.2058542.2122

Kalantar, V., Mousavi, S. H., & Najafi Alamdarloo, H. (2025). Russian olive and improving water resource productivity: A strategic approach for agricultural sustainability in arid regions. *Agricultural Economics & Development*, *13* (2), 130. (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.30490/aead.2025.367411.1667

Kalantar, V., Mousavi, S. H., Ebadi, A., Soltani, Sh., & Nemati Shishegaran, S. (2025). Economic assessment of saffron cultivation within the adaptation strategies to climate change. *Saffron Agronomy & Technology*, 13 (2), 125-139. (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.22067/jead.2020.17793.0

Kalantar, V., Mousavi, S. H., Najafi Alamdarlo, H., & Saberali, S. F. (2025). Economic analysis of changing planting date strategy to adapt to climate-change challenges in agriculture. *Iranian Journal of Agricultural Economics & Development Research*, *57-2*(1), 167-192 (In Persian with English abstract)
https://doi.org/10.22059/ijaedr.2025.392275.669367

Kashkaki, Z., Monem, M. J., & Nikbakhsh, E. (2025). Multiobjective optimization framework for irrigation scheduling under uncertainty. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 151 (5), 04025029. (In Persian with English

abstract) https://doi.org/10.1061/JIDEDH.IRENG-10451

Ling, X., & Ma, J. (2024). Future research trends and directions in breeding drought-resistant agricultural varieties. *Geographical Research Bulletin*, *3*, 179-182. https://doi.org/10.50908/grb.3.0_179

MAHI. (2023). Ministry of Agriculture of Hamadan Province Iran. *Agricultural Statistics Yearbook* (2022–2023). https://hm.agri-jahad.ir/cultivation-pattern

MAJI. (2023). Ministry of Agriculture Jihad Iran. *Agricultural Statistics Yearbook* (2022–2023). https://pbiamar.maj.ir/managementreport/powerbi/DataBank/GardenBIReport?rs:embed=true

Majidian, P., Ghorbani, H. R., & Farajpour, M. (2024). Achieving agricultural sustainability through soybean production in Iran: Potential and challenges. *Heliyon*, *10* (4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26389

Maleki, M., Saghatoleslami, A., Mousavi, S. G. R., & Feizi, H. (2020). Study the effect of irrigation management and growth stimulators foliar application on quantitative yield and some qualitative characteristics of saffron. *Saffron Agronomy & Technology*, *8* (4), 511–525. (In Persian with English abstract)

Maryam, M., Kumar, R., Hagare, D., Ghannoum, O., Moradi, S., Ellahi, B., Safeena, P., & Mir, S. A. (2025). Advancements in saffron cultivation: soilless farming techniques and IoT integration. *Next Research*, 100303.

Mehmeti, A., Candido, V., Canaj, K., Castronuovo, D., Perniola, M., D'Antonio, P., & Cardone, L. (2024). Energy, environmental, and economic sustainability of saffron cultivation: insights from the first European (Italian) case study. *Sustainability*, *16* (3), 1179.

Mimoun, A. B., Mazhoud, H., & Chemak, F. (2025). A mathematical programming approach for assessing the impact of climate change on Mediterranean farming systems: A Tunisian case study. *Scientific African*, *27*, e02528.

Mirzaei, F., & Azizabady, M. (2022). Determining the best irrigation scheduling to maximise productivity in irrigation and drainage networks (Case study: Qazvin irrigation network*). Journal of Rainwater Catchment Systems*, *10* (2), 61–76. (In Persian)

Moazzezi, F., Mosavi, S. H., Yavari, G., & Bagheri, M. (2021). Assessing the impact of climate change on food security and economic welfare: case study Hamedan-Bahar plain. *Agricultural Economics & Development, 29*, (2), 249-292. https://doi.org/10.30490/aead.2021.352780.1288

Moazzezi, F., Yavari, G. R., Mosavi, S. H., & Bagheri, M. (2020). Assessing the impact of climate change on agriculture in Hamedan-Bahar plain with emphasis on water productivity and food security. *Agricultural Economics & Development, 34* (3), 305-323. https://doi.org/10.22067/jead.2020.17793.0

Moghbel, F., Fazel, F., Aguilar, J., & Ansari, H. (2022). Performance analysis of AquaCrop model for simulating forage sorghum yield in western Kansas under different irrigation conditions. In 2022 ASABE Annual International Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Mohiuddin, M., Hosseini, E., Tajpour, M., & Bahman-Zangi, B. (2024). Internet of Things (IOT) Based Sensor Technologies and Smart Irrigation System: An Analysis of Critical Success Factors in Emerging Markets. *The Journal of Developing Areas*, *58* (4), 167-188. https://doi.org/10.1353/jda.2024.a931321

Mohseni, S., Zare Mehrjerdi, M. R., Abdolahi Ezzatabadi, M., & Mehrabi Boshrabadi, H. (2022). Irrigation water demand management with emphasis on pricing policy. *Water Policy, 24* (7), 1095-1108.

Mosavi, S. M., Aghdarnajad, A., Aslan, H., Sepahri, S., & Salomeh, S. (2023). Determining the optimal irrigation water quantity for wheat, barley, potato and sugar beet in Chaharmahal-

and-Bakhhtiari Province using the AquaCrop model and the concept of virtual water. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *17* (1), 25–41. (In Persian with English abstract)

Pereira, G. S. (2023). Management zones and space-time prediction of soybean yield variability: machine learning techniques applied to soil physical quality parameters. PhD dissertation, Universidade de São Paulo.

Raja, O., Veysi, M., & Barzegar, M. (2024). Assessing the effectiveness of management strategies to reduce agricultural water consumption using the AquaCrop model (Case study: Hashtgerd Plain). *Research on Irrigation & Drainage Engineering*, 25 (Fall), 1–26. (In Persian with English abstract)

Rastegaripour, F., Najafabadi, M. M., Ohadi, N., Tavassoli, A., & Caballero-Calvo, A. (2025). Enhancing agricultural eco-efficiency amid data uncertainty: Saffron farming insights from a semi-arid region. *Environmental Modeling & Assessment*, 1-15.

Razmavaran, M. H., Sepaskhah, A. R., & Ahmadi, S. H. (2024). Water footprint and production of rain-fed saffron under different planting methods with ridge plastic mulch and pre-flowering irrigation in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, *291*, 108632.

Reddy, D. J., & Madapuri, R. K. (2024). Agriculture crop yield prediction using inertia based cat swarm optimization. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (IJECE), *14* (2), 1700-1710.

Sadeghi-Lari, A., Bahrami, M., & Dastandaz, T. (2024). Temporal and spatial variations of groundwater quantity and quality for drinking and irrigation purposes in the arid and hot weather of Southern Iran. *Physics & Chemistry of the Earth*, Parts a/b/c, *134*, 103582. https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103582

Saeidi, E., Dehkordi, A. L., & Nabavi-Pelesaraei, A. (2022). Potential for optimization of energy consumption and costs in saffron production in central Iran through data envelopment analysis and multi-objective genetic algorithm. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *41* (5), e13857.

Sarami-Foroushani, T., Balali, H., Movahedi, R., & Partelow, S. (2024). Indicator assessment of groundwater resource sustainability: Using the framework of socio-ecological systems in Hamedan-Bahar Plain, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *54*, 101889. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101889

Seyedan, M., & Ghadami Firouzabadi, A. (2019). Productivity of production factors of garlic under sprinkler and surface irrigation systems in Hamadan province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *13* (3), 845–854. (In Persian with English abstract)

Seyedzadeh, A., Khazaee, P., Siosemardeh, A., & Maroufpoor, E. (2022). Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, *28* (3), 303-312. https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1891470

Shaker, M. (2022). Evaluating the effectiveness of pressurized irrigation systems in Iran. *Water Management in Agriculture*, *8* (2), 167-182.

Sharifi, N., Nabipour, Z., & Jalini, M. (2024). Investigation of the effect of different irrigation methods and levels on some vegetative characteristics and yield of saffron (*Crocus sativus L.*). *Saffron Agronomy & Technology*, 12 (1). (In Persian with English abstract)

Soltani, S., Mosavi, S. H., Khalilian, S., & Najafi Alamdarlo, H. (2023). The effects of climate change and climate variability on economic surplus of producers and consumers in the agricultural sector of Hamadan–Bahar plain. *Iranian Journal of Agricultural Economics & Development Research*, *54* (1), 53-72. https://doi.org/10.22059/ijaedr.2022.341524.669140

Soltani, S., Mosavi, S. H., Saghaian, S. H., Azhdari,

S., Alamdarlo, H. N., & Khalilian, S. (2023). Climate change and energy use efficiency in arid and semiarid agricultural areas: A case study of Hamadan-Bahar plain in Iran. *Energy*, 268, 126553. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126553

Toumi, I., Ghrab, M., Zarrouk, O., & Nagaz, K. (2024). Impact of deficit irrigation strategies using saline water on soil and peach tree yield in an arid region of Tunisia. *Agriculture*, *14* (3), 377.

Wang, F., Meng, H., Xie, R., Wang, K., Ming, B., Hou, P., & Li, S. (2023). Optimizing deficit irrigation and regulated deficit irrigation methods increases water productivity in maize. *Agricultural Water Management*, *280*, 108205.

Xiuling, D., Qian, L., Lipeng, L., & Sarkar, A. (2023). The impact of technical training on farmers adopting water-saving irrigation technology: an empirical evidence from China. *Agriculture*, *13* (5), 956. https://doi.org/10.3390/agriculture13050956

Yang, G., Xia, S., Huo, L., Li, M., Zhang, C., Su, Y., & Guo, D. (2023). Two-stage multiobjective decision-making method based on agricultural water-energy-food nexus: Case study in Hetao irrigation district, China. *Journal of Water Resources Planning & Management*, *149* (8), 05023006. https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5856

Yao, J., Berbel, J., Wang, H., & Martínez Dalmau, J. (2025). Application of positive mathematical programming (PMP) in sustainable water resource management: A case study of Hetao Irrigation District, China [Datasets].

Yao, J., Berbel, J., Yang, Z., Wang, H., & Martínez-Dalmau, J. (2025). Application of Positive Mathematical Programming (PMP) in sustainable water resource management: A case study of Hetao irrigation district, China. *Water*, *17* (17), 2598.

Yarami, N., & Sepaskhah, A. R. (2018). Water productivity and economic analysis of saffron under different irrigation water salinity, manure application rates and planting methods. *International Journal of Plant Production*, *12* (2), 139-147.

Yu, L., Zhao, X., Gao, X., & Siddique, K. H. (2020). Improving/maintaining water-use efficiency and yield of wheat by deficit irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, *228*, 105906.

Zhang, C., Li, X., Guo, P., & Huo, Z. (2021). Balancing irrigation planning and risk preference for sustainable irrigated agriculture: A fuzzy credibility-based optimization model with the Hurwicz criterion under uncertainty. *Agricultural Water Management*, *254*, 106949. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106949

Zou, Y., Saddique, Q., Ali, A., Xu, J., Khan, M. I., Qing, M., & Siddique, K. H. (2021). Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, *243*, 106483.