



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

Vahid Kalantar¹, Seyed Habibollah Mousavi^{2*} and Hamed Najafi Alamdarlo²

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: shamosavi@modares.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>).

مقاله پژوهشی

تعیین الگوی کشت بهینه با رویکرد توسعه زعفران و به کارگیری روش‌های نوین آبیاری در شرایط کم آبی

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 به کارگیری روش‌های نوین آبیاری در شرایط کم آبی. *زراعت و فناوری زعفران*، ۱۳ (۴)، ۴۳۰-۴۰۳.

چکیده

منابع آب به عنوان یکی از مهم‌ترین نهاده‌های تولید کشاورزی، در سال‌های اخیر به دلیل 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 به عنوان محصولی راهبردی در افزایش تاب‌آوری کشاورزی است. داده‌های مورد نیاز از طریق پرسشنامه و مصاحبه میدانی با کشاورزان منطقه در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ 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 به عنوان 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. از این رو، زعفران به دلیل 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 به طور قابل توجهی 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 کم آبی و حتی افزایش سود خالص کشاورزی در برخی سناریوها نسبت به وضعیت پایه شد. بنابراین، ترکیب توسعه کشت زعفران و به کارگیری آبیاری قطره‌ای می‌تواند به عنوان 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، کم آبیاری.

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

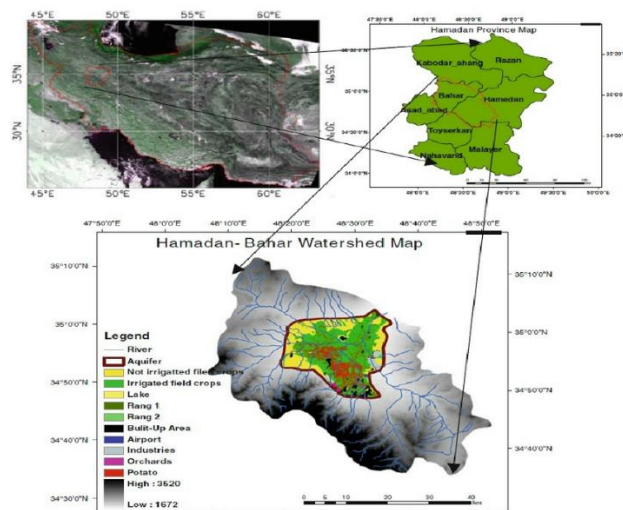
مقدمه

کمبود منابع آب یکی از چالش‌های اساسی بخش کشاورزی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری تولید و امنیت غذایی دارد. محدودیت دسترسی به آب نه تنها 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). 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. با این حال، میزان موفقیت این سیاست‌ها تحت‌تأثیر شرایط اقلیمی و تولید، نوع محصول و بازار محصولات مناطق مورد مطالعه 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 مورد بررسی 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 بیش از 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. با وجود 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

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.

قابل توجه 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 می‌تواند راهبردی مؤثر در ارتقای بهره‌وری و کاهش ریسک تولید باشد که یکی از مهم‌ترین این محصولات،



Source: Iran Meteorological Organization (IMO, 2024).

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

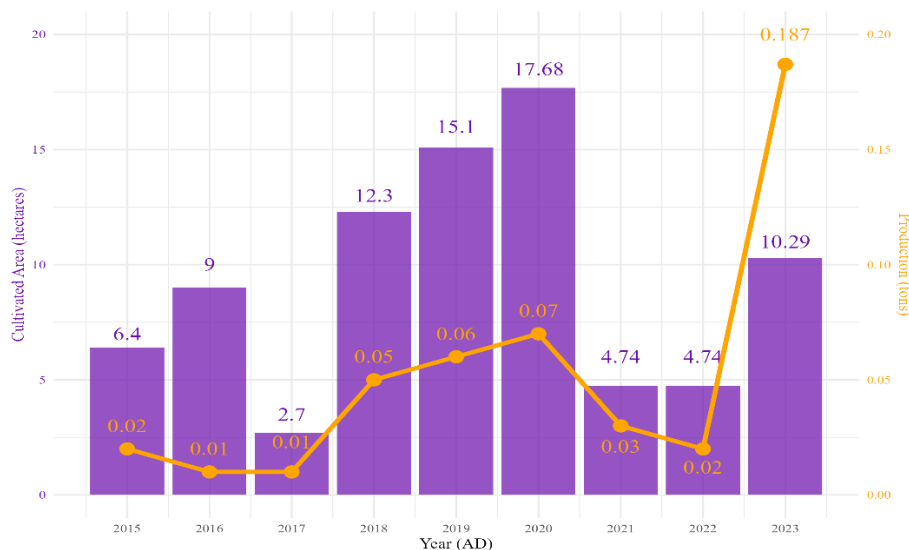
Figure 1- Spatial and climatic status of the Hamadan-Bahar Plain during the 2023-2024 agricultural year.

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

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

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 افزایش یافته 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.

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



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.

پذیرش و اجرای الگوهای نوین آبیاری و تغییر ترکیب محصولات از سوی کشاورزان است که این امر به میزان کارایی نظام ترویج،

در این مطالعه، محدودیت‌ها عمدتاً به ابعاد نهادی و رفتاری بخش کشاورزی مربوط می‌شود. یکی از چالش‌های اصلی،

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 تحت فشار، 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. با این حال، تصمیم‌گیری‌های مدیریت آب نه تنها بر پایه جنبه‌های فنی، بلکه در چارچوب واقعیات اقتصادی و بستر اجتماعی - سیاسی هر منطقه اتخاذ می‌شود. از این رو، 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. بر این اساس، 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

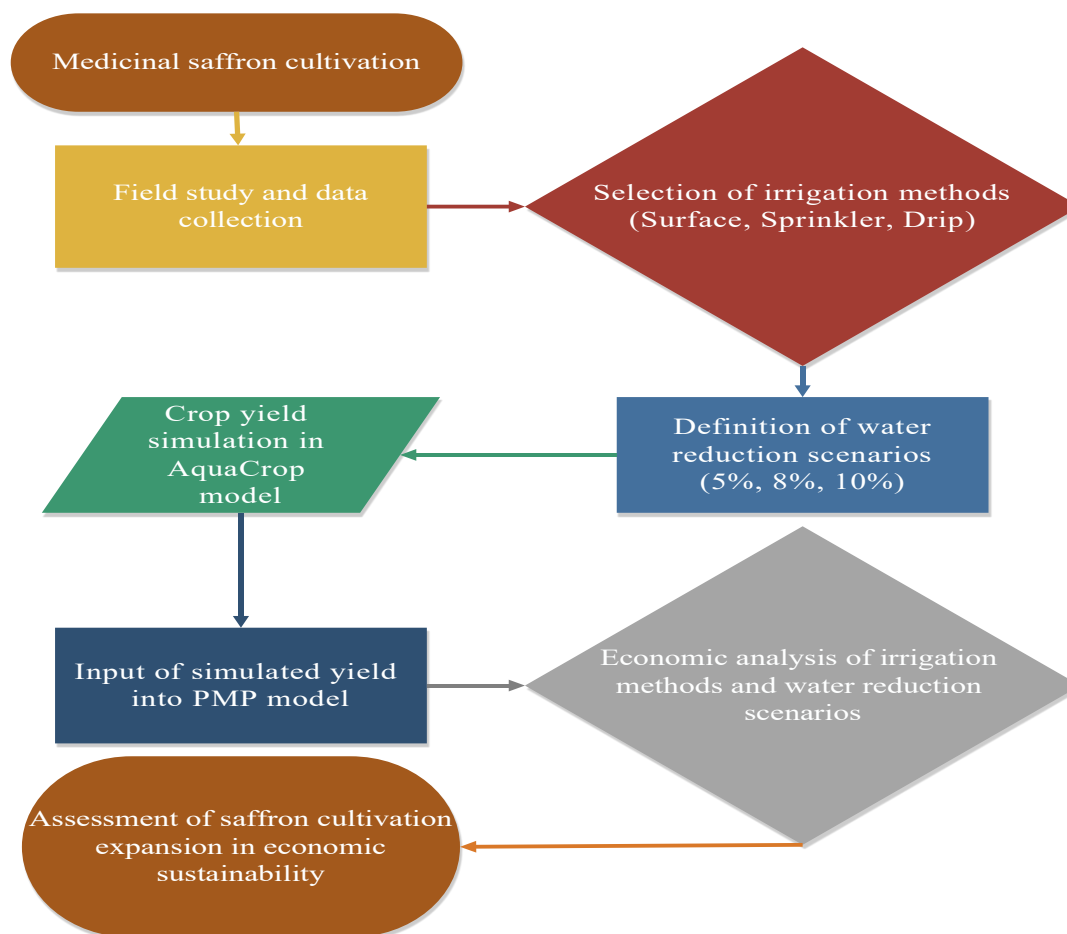
در این مطالعه، فرایند تحقیق مطابق با فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۳ طراحی و اجرا شد. در گام نخست، داده‌های پایه موردنیاز

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، با توجه به 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^۱ 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

نوع روش آبیاری و درصد کاهش آب مصرفی تعریف گردید.



شکل ۳- فلوچارت روش شناسی تحقیق
Figure 3- Research methodology flowchart.

که در این روابط، IIRI نمایانگر مؤلفه های مرتبط با مدیریت آبیاری از جمله میزان و زمان بندی آب مصرفی، روش های اعمال آبیاری و راندمان آن است. همچنین، NIIRI معرف سایر عوامل غیرمستقیم در مدل AquaCrop بوده و شامل مجموعه ای از اطلاعات گیاه (ویژگی های فنولوژیک و نیازهای رشد)، داده های اقلیمی (دما، بارش، تبخیر - ترق مرجع و کربن دی اکسید) و مدیریت خاک (ویژگی های هیدرولیکی، ظرفیت نگهداشت رطوبت و عملیات زراعی) است. براین اساس، عملکرد شبیه سازی شده محصولات (Y_i) و زعفران (Y_s) حاصل برهم کنش مدیریت آبیاری و عوامل اقلیمی - اکولوژیک است

خروجی این سناریوها که شامل مقادیر شبیه سازی شده عملکرد برای هر محصول است، به عنوان داده های ورودی مدل برنامه ریزی ریاضی توسعه یافته منطقه به کار گرفته شد تا اثر این تغییرات بر سودآوری و الگوی بهینه کشت ارزیابی شود. در مدل AquaCrop، عملکرد محصولات به عنوان تابعی از مدیریت آبیاری و سایر عوامل مؤثر بر رشد گیاه در نظر گرفته می شود. چارچوب مفهومی مدل AquaCrop در روابط ۱ و ۲ نشان داده شده است.

$$Y_i = f(IIRI, NIIRI) \quad (1)$$

$$Y_s = f(IIRI, NIIRI) \quad (2)$$

که مدل AquaCrop با در نظر گرفتن 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.

به منظور اطمینان از دقت شبیه‌سازی‌ها، صحت‌سنجی مدل AquaCrop بر اساس داده‌های عملکرد واقعی محصولات و شاخص‌های آماری نظیر میانگین خطای مطلق^۱، میانگین خطای اریب^۲، ریشه میانگین مربعات خطا^۳ و ضریب تعیین^۴ انجام شد. در این فرایند، داده‌های مزرعه‌ای حاصل از اندازه‌گیری‌های محلی به عنوان مبنای مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی شده 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). این شاخص‌ها بر اساس روابط ۳ تا ۶ محاسبه گردیدند:

$$MAE = \frac{\sum_{c=1}^n S_t - A_t}{n} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{\sum_{c=1}^n (A_t - S_t)^2}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{c=1}^n (A_t - S_t)^2}{n}} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{c=1}^n (A_t - S_t)^2}{\sum_{c=1}^n (A_t - \bar{A})^2} \quad (6)$$

که در این روابط، A_c بیانگر عملکرد مشاهداتی، S_c عملکرد شبیه‌سازی شده 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. به طور مشخص، MAE میانگین قدرمطلق اختلافات بین

مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده 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 به عنوان شاخص مهمی برای ارزیابی کیفیت پیش‌بینی مدل در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، R^2 بیانگر میزان تغییرات توضیح داده شده توسط مدل بوده و نزدیک بودن آن به عدد یک، نشان‌دهنده همبستگی بالا بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است. به کارگیری این شاخص‌ها در این مطالعه موجب شد قابلیت اعتماد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت شرایط مختلف مدیریت آبیاری به صورت کمی سنجیده شود.

در این مطالعه، طبق مطالعات گذشته، سناریوهای کاهش ۵، ۸ و ۱۰ درصدی آبیاری در مدل AquaCrop به عنوان معادل زراعی کم‌آبیاری کنترل شده^۵ تعریف شدند (Mirzaei & Azizabadi, 2022; Mosavi et al., 2023; Raja et al., 2024). در این رویکرد، به جای 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 پذیرفته شده در مدیریت آب کشاورزی است که در تحقیقات متعدد به منظور 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 به طور مستقیم در AquaCrop قابل اعمال 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

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

6- Deficit Irrigation (DI)

1- Mean Absolute Error (MAE)

2- Mean Squared Error (MSE)

3- Root Mean Squared Error (RMSE)

4- Coefficient of Determination (R-squared)

۲. (Blanco, 2025; Chang et al., 2025

$$\text{Max } \omega = \sum_{i=1}^{11} X_i (P_i Y_i - C_i) + X_s (P_s Y_s - C_s) \quad (7)$$

st:

$$\sum_{i=1}^{11} X_i \leq Tl, \quad X_s \leq Tl \quad (8)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} X_i + X_s \leq Tl$$

$$\sum_{i=1}^{11} W_i X_i \leq T\text{Water}, \quad W_s X_s \leq T\text{Water} \quad (9)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} W_i X_i + W_s X_s \leq T\text{Water}$$

$$\sum_{i=1}^{11} L_i X_i \leq T\text{labor}, \quad L_s X_s \leq T\text{labor} \quad (10)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} L_i X_i + L_s X_s \leq T\text{labor}$$

$$\sum_{i=1}^{11} T_i X_i \leq T\text{Machin}, \quad T_s X_s \leq T\text{Machin} \quad (11)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} T_i X_i + T_s X_s \leq T\text{Machin}$$

$$\sum_{i=1}^{11} F_i X_i \leq T\text{Fertilizer}, \quad F_s X_s \leq T\text{Fertilizer} \quad (12)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} F_i X_i + F_s X_s \leq T\text{Fertilizer}$$

$$\sum_{i=1}^{11} K_i X_i \geq T\text{Invest}, \quad K_s X_s \leq T\text{Invest} \quad (13)$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^{12} K_i X_i + K_s X_s \leq T\text{Invest}$$

و امکان‌پذیری آن برای کشاورزان منطقه صورت گرفت؛ به‌طوری که چنین میزان کاهش‌هایی با تنظیم دریاچه‌های ورودی آب یا کاهش جزئی مدت‌زمان هر نوبت آبیاری قابل اجرا بوده و نیازمند تغییرات عمده در تقویم آبیاری یا دور آبیاری نیست. از این‌رو، این سناریوها علاوه بر سازگاری با منطق فنی و زراعی، از دیدگاه عملی نیز برای شرایط دشت همدان - بهار واقع‌بینانه و قابل‌پیاده‌سازی هستند.

مرحله دوم: بهینه‌سازی اقتصادی الگوی کشت با مدل برنامه‌ریزی ریاضی

برای تحلیل اثرات تغییر روش‌های آبیاری بر سودآوری و الگوی بهینه کشت منطقه، از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی^۱ توسعه‌یافته استفاده شد. این مدل بر اساس ساختار سه‌مرحله‌ای طراحی شد که در گام نخست، الگوی کشت بهینه سال پایه با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع موجود (زمین، آب، نیروی کار، ماشین‌آلات، کود و سرمایه) و قیود کالیبراسیون محاسبه شد. در مرحله دوم، مقادیر دوگان حاصل از حل مدل پایه برای برآورد پارامترهای تابع هدف غیرخطی به کار رفت. در نهایت، مرحله سوم شامل حل یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی کالبره‌شده بود که در آن تابع تولید غیرخطی به‌عنوان جزء اصلی تابع هدف لحاظ شد. در این مطالعه، عملکردهای شبیه‌سازی‌شده محصولات تحت سناریوهای مختلف آبیاری از مدل AquaCrop به‌عنوان داده‌های ورودی به PMP وارد شد تا امکان شبیه‌سازی واکنش کشاورزان 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 سطح منطقه‌ای دارد (Yao et al., 2025; Mimoun et al., 2025; Bouzidi & Pérez-

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

1- Positive Mathematical Programming (PMP)

(۱۴)

$$X_i, X_s \geq 0$$

در روابط ارائه شده، w 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 ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) و C هزینه‌های تولید در هر هکتار برای هر محصول را نشان می‌دهد. لندیس‌های i به محصولات موجود در الگوی کشت پایه و اندیس s به محصول زعفران در منطقه مورد مطالعه اختصاص دارند. علاوه بر این، پارامترهای $Tfertilizer$ ، $TMachin$ ، $Tlabor$ ، $TWater$ ، Tl و $Tinvest$ به ترتیب 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 مشاهده شده کشاورزان طراحی می‌شود. این مدل با در نظر گرفتن 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 مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل در دو حالت انجام شد: نخست الگوی کشت موجود بدون زعفران و سپس الگوی کشت اصلاح شده با افزودن زعفران به عنوان 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 به طور 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، به ویژه 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 قابل توجه در تولید محصولات استراتژیک استان و کشور و نیز مواجهه با محدودیت‌های روزافزون منابع آب، به عنوان 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 مورد نیاز 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 به عنوان 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 به صورت تصادفی ساده انتخاب گردیدند. این فرایند زمینه جمع‌آوری داده‌های دقیق و قابل اعتماد 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

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 به صورت متناسب کاهش یافته 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 چغندرقد، 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.

آبیاری بر عملکرد محصولات و بهینه‌سازی الگوی کشت در شرایط کم‌آبی، اراضی کشاورزی دشت همدان - بهار به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این منطقه به دلیل اهمیت بالای آن در تولید محصولات کشاورزی استان همدان و نقش آن در امنیت غذایی منطقه، مورد توجه 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

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
چغندرقد 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.

References: Finding Research.

آبیاری، بیشترین کاهش مصرف آب مربوط به چغندرقد (۹۸۹)

بررسی ارقام نشان می‌دهد که در سناریوی ۱۰٪ کاهش

$m^3.ha^{-1}$ کمتر از حالت پایه) و کمترین کاهش مربوط به جو ($245 m^3.ha^{-1}$ کمتر 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 $2045 m^3.ha^{-1}$ ثبت و در تحلیل‌ها استفاده شد.

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
چغندر قند 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.

References: Finding Research.

طبق نتایج جدول ۲ با کاهش ۵ درصد آبیاری، بیشترین افت عملکرد نسبی به‌ترتیب در سیب‌زمینی (۹٪)، لوبیا (۷/۲٪) و

چغندر قند (۷/۱٪) مشاهده شد. کمترین افت به یونجه (۴/۹٪) و هندوانه (۵/۳٪) مربوط می‌شود. در سناریوی ۸٪ کاهش

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.

آبیاری، بیشترین کاهش عملکرد در لوبیا (۱۵/۱٪)، سیب‌زمینی (۱۴/۳٪) و خیار (۱۱/۹٪) مشاهده می‌شود، در حالی که گندم (۱۰/۳٪) و هندولنه (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

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
چغندر 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.

References: Finding Research.

داشته‌اند؛ بیشترین افت مربوط به هندوانه (۲/۳٪) و چغندر (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٪

میزان تغییرات عملکرد در حالت بدون تنش آبی برای گوجه‌فرنگی (۷/۸٪) و لوبیا (۶/۴٪) بیشترین افزایش یافته است؛ در حالی که هندولنه (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٪

نشان می‌دهد. روش آبیاری قطره‌ای به دلیل تمرکز بر رساندن مستقیم آب به ناحیه ریشه، به طور معمول بازدهی مصرف آب بالاتری دارد، اما حساسیت عملکرد به کم‌آبی می‌تواند تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیولوژیک و نیاز آبی محصول قرار گیرد. داده‌ها به صورت درصد کاهش یا افزایش نسبت به عملکرد پایه بیان شده‌اند که امکان ارزیابی دقیق‌تر میزان تاب‌آوری محصولات را در برابر سناریوهای محدودیت آب فراهم می‌کند.

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

جدول ۴ تغییرات عملکرد محصولات تحت روش آبیاری قطره‌ای را در سه سناریوی کاهش آبیاری نسبت به عملکرد پایه

جدول ۴- 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
چغندر قند 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.

References: Finding Research.

افزایش به هندوانه (۵/۱٪) و نخود (۶/۱٪) اختصاص 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،

در سناریوی بدون تنش آبی، بیشترین افزایش عملکرد نسبت به پایه به لوبیا (۱۴/۳٪) و جو (۱۲/۸٪) اختصاص دارد که نشان‌دهنده کارایی بالای روش قطره‌ای در شرایط بدون محدودیت آبیاری برای این محصولات است. در مقابل، کمترین

برخی محصولات مانند خیار (۰٪) و جو (۰/۶٪) عملکرد تقریباً پایدار دارند، اما کاهشی در ذرت علوفه‌ای (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 حالی که 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.

References: Finding Research.

این اختلاف قابل توجه 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. از آنجاکه 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 ۶- 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.

روش‌ها باشد.

برای ارزیابی صحت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد محصولات دشت همدان - بهار، نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سطح کل گیاهان (به صورت تجمعی) 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 R² محاسبه شدند تا میزان دقت، بی‌طرفی و همبستگی مدل مشخص گردد.

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

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در روش آبیاری قطره‌ای عملکرد به طور 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 به صورت 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

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؛ با این حال، 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 $MAE=0.95 \text{ t.ha}^{-1}$ و $RMSE=1.50 \text{ t.ha}^{-1}$ همراه با $R^2=0.95$ ثبت شد و حتی در سناریوی ۱۰ درصد کاهش آب، مقدار RMSE نسبت به سایر روش‌ها کمتر (2.4 t.ha^{-1}) باقی ماند. روش بارانی از نظر دقت در رتبه دوم قرار گرفت، به‌طوری که در شرایط بدون تنش آبی با $MAE=1.20 \text{ t.ha}^{-1}$ و $R^2=0.93$ برآوردهای قابل قبولی ارائه داد و با وجود 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 $MAE=2.55 \text{ t.ha}^{-1}$ و $RMSE=3.20 \text{ t.ha}^{-1}$ 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؛ از این رو، نتایج مدل می‌تواند مبنایی قابل اعتماد 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. با این حال، از آنجاکه 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 حالی که کاهش در سطح زیرکشت گندم (1007 ha)، جو (460 ha)، و یونجه (585 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 2511 ha و زعفران به 5 ha می‌رسد، اما سطح زیرکشت خیار به سطح پایه بازمی‌گردد و کاهش سطح زیرکشت گندم به 350 ha محدود می‌شود. در سناریوی ۴، همچنان گرایش به توسعه سطح زیرکشت محصولات با مصرف آب کمتر و ارزش افزوده بالاتر نظیر سیب‌زمینی (951 ha) و زعفران (6 ha) ادامه دارد، در حالی که برخی محصولات نظیر گندم و نخود با کاهش قابل توجه سطح زیرکشت مواجه می‌شوند. روند کلی نشان می‌دهد که حتی در شرایط کاهش شدید آب آبیاری، زعفران نه تنها 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 ۴ Scenario 4
جو Barley	7666	-	-460	-459	0
چغندر قند 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.

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 می‌تواند 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.

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 حالی که 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

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 ۴ Scenario 4
جو Barley	7666	-316	-366	-616	-666
چغندر قند 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.

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 قابل توجهی داشته و از ۸ ha در سناریوی ۱، به ۱۵ ha در سناریوی 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.

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 حالی که 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

جدول ۹- تغییرات سطح زیر کشت 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 ۴ Scenario 4
جو Barley	7666	-386	-387	-386	-396
چغندر قند 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.

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 محسوس نسبت به روش‌های دیگر دارد.

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 (افزایش ۱/۶۳ 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

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.

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 مبنای 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.

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 سطحی بدون تنش آبی 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

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.

نتیجه گیری

در این مطالعه، باهدف ارزیابی اثر تغییر روش های آبیاری و مدیریت الگوی کشت بر سودآوری بخش کشاورزی، در شرایط محدودیت منابع آب، دشت همدان - بهار به عنوان یکی از قطب های مهم تولید محصولات زراعی کشور انتخاب شد. این منطقه به دلیل تنوع محصولات، وابستگی شدید اقتصادی به کشاورزی و مواجهه با تنش های آبی، نمونه ای مناسب برای تحلیل راهبردهای ارتقای تاب آوری اقتصادی در برابر کم آبی محسوب می شود. در این مطالعه، سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره ای 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 قطره ای بالاترین افزایش عملکرد را نسبت به عملکرد پایه در اغلب محصولات، به ویژه لوبیا، زعفران، جو، یونجه و خیار، نشان داد. روش آبیاری بارانی نیز در برخی محصولات مانند گوجه فرنگی و سیب زمینی عملکرد مناسبی داشت، اما به طور کلی کمتر از قطره ای بود، در حالی که روش سطحی به دلیل توزیع غیر یکسان آب و اتلاف بیشتر، کمترین بهبود عملکرد را نشان داد. با اعمال کاهش متوسط آب (سناریوهای ۵ و ۸ درصد)، تفاوت ها میان روش ها نشان داده شد. در این شرایط، روش آبیاری قطره ای بیشترین تاب آوری عملکرد را نشان داد؛ بسیاری از محصولات یا همچنان افزایش عملکرد داشتند یا افت کمی را داشته اند. در مقابل، روش آبیاری بارانی کاهش کمتر و روش سطحی کاهش قابل توجه عملکرد را به ویژه در محصولات حساس به کم آبی مانند گوجه فرنگی و ذرت علوفه ای نشان داد. روش قطره ای 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 کم حساس مانند یونجه، هندولنه و نخود به کمتر از ۶ درصد داشته اند،

در حالی که روش آبیاری بارانی کاهش بیشتری نشان داد و روش سطحی بیشترین افت را تجربه کرد. این نتایج نشان می دهد که روش قطره ای نه تنها در شرایط بدون تنش آبی، بلکه در محدودیت های شدید آبی نیز می تواند بهترین گزینه برای حفظ و حتی بهبود عملکرد، به ویژه در محصولات مقاوم به کم آبی مانند یونجه و نخود باشد. در مجموع، یافته ها بر ضرورت تغییر الگوی آبیاری به سمت روش های کارآمدتر مانند آبیاری قطره ای برای افزایش تاب آوری تولیدات کشاورزی در شرایط کم آبی تأکید دارند. این یافته ها با نتایج مطالعات پیشین نیز هم خوانی دارد. به عنوان مثال، پژوهش های (Habibi, Maleki et al. (2020)، (Sharifi et al. و Chooapan et al. (2021)، (et al. (2021) نشان داده اند که استفاده از روش آبیاری قطره ای، همراه با تغییر الگوی کشت به سمت محصولات کم آب بر و با ارزش اقتصادی بالا، می تواند بخشی از کاهش درآمد ناشی از محدودیت های آبی را جبران کند. همچنین یافته های (Moazzezi et al. (2021)، (Soltani et al. (2023) و (Kalantar et al. (2025) بر اهمیت جایگزینی محصولات پرمصرف آب با گونه های مقاوم و اقتصادی در دشت همدان - بهار تأکید دارند. نتایج مقایسه روش های آبیاری نشان داد که رتبه بندی اقتصادی در تمامی سناریوها ثابت مانده و به ترتیب آبیاری قطره ای < 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 زیر کشت نیز سازگار است؛ به طوری که زعفران به دلیل نیاز آبی پایین و حاشیه سود بالا، امکان تخصیص بهینه منابع و جایگزینی محصولات کم بازده و آب بر را فراهم کرده و در کنار راندمان بالاتر سامانه های آبیاری قطره ای، موجب می شود حتی در سناریوهای ۳ و ۴، سود خالص منطقه

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. با این حال، 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.

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. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که اتخاذ رویکرد هم‌زمان بهینه‌سازی الگوی کشت و ارتقای فناوری آبیاری، می‌تواند 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

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., & Khashae 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)

- abstract)
<https://doi.org/10.1061/JIEDH.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/GardenBIRReport?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 Boshrahadi, 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., Khazaei, 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.