Research Article

Agricultural Engineering. 49(1) (2026) 85-98

DOI: 10.22055/AGEN.2026.51712.1799

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Enhancing Grain Yield and Water Use Efficiency of Rainfed Wheat through Integrated Supplemental Irrigation and Optimized Nutrient Management (Case Study: Baghmalek County, Khuzestan Province)

F. Meskini-Vishkaee [1*], M. H. Sedri [2] and F. Loveimi[3]

1. Assistant professor, Soil and Water Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran
2. Associate professor, Soil and Water Research Department, Kordestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sanandaj, Iran
3. Agriculture Sector Expert, Jihad-e-Agriculture Organization of Khuzestan Province, Ahvaz, Iran

Receive: 02 February 2026 Accepted: 19 May 2026 *Corresponding Author: fatemeh.meskini@yahoo.com

Abstract

Introduction Wheat (Triticum aestivum L.) serves as Iran's most strategic crop for food security, yet its production in arid regions faces severe constraints from limited water resources and erratic rainfall patterns. Dryland farming systems in khuzestan province experience significant yield gaps due to moisture stress during critical growth stages. While supplemental irrigation offers potential relief, its effectiveness depends fundamentally on concurrent nutrient management. This study investigated the integrated effects of supplemental irrigation and soil test-based optimal nutrition on yield, water use efficiency, and economic viability of dryland wheat in Baghmalek County, Khuzestan province.

Materials and Methods A field experiment was conducted during the 2023-2024 growing season in Baghmalek County, Khuzestan (Coordinates: 32°49' N, 49°50' E, 827 m altitude). The soil at the experimental site had a pH of 7.79, EC of 1.57 dS m^{-1}, 0.84% organic carbon, 7.54 mg kg^{-1} available P, and 138 mg kg^{-1} available K. The experiment followed a randomized complete block design with three treatments and three replications, using plots of 50 m^2 (10m × 5m). The wheat cultivar 'Dehdasht' was sown at a rate of 200 kg ha^{-1} with 13 cm row spacing. Treatments included: 1) Farmer's conventional practice (rainfed, control); 2) Farmer's conventional practice + combined package of supplemental irrigation and improved nitrogen management; and 3) Soil test-based optimal nutrition + supplemental irrigation. In treatments with supplemental irrigation (T2 and T3), nitrogen fertilizer was split-applied to enhance use efficiency, as top-dressing without adequate moisture is ineffective under rainfed conditions. This approach aligns with the recommendations of the Dryland Agricultural Research Institute of Iran. The optimal nutrition treatment involved: basal application of 100 kg ha^{-1} ammonium phosphate and 100 kg ha^{-1} potassium sulfate based on soil

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

test, seed priming with humic acid and zinc (1.5 L per 100 kg seed), 120 kg ha^{-1} urea at first irrigation, foliar application of amino acids and seaweed extract at tillering, foliar application of potassium silicate at stem elongation, and 80 kg ha^{-1} urea at second irrigation. Supplemental irrigation consisted of two events: 50 mm (2,500 L per plot) at planting and 30 mm (1,500 L per plot) at the booting stage. All other agronomic practices were uniform. At maturity, yield components (spikes m^{-2}, grains per spike and thousand kernel weight), biological yield, and grain yield were measured. Water use efficiency (WUE) was calculated using both total seasonal rainfall and effective rainfall (estimated using a reliable rainfall method). Economic analysis was performed using partial budgeting with wheat priced at 20,500 Tomans kg^{-1}. Data were analyzed using SPSS software with Duncan's test at $p \leq 0.05$.

Results and Discussion The results revealed that the integrated treatment (optimal nutrition + supplemental irrigation) significantly outperformed the others. It achieved the highest grain yield at 4368 kg ha^{-1}, representing a 47% increase over the control (2962 kg ha^{-1}). This treatment also recorded the highest thousand kernel weight (44.65 g), a 21% increase over the control. Notably, while the combined package of supplemental irrigation and improved nitrogen management (T2) significantly increased the number of spikes per unit area (231 spikes m^{-2} compared to 165 in the control), it failed to significantly boost grain yield (3660 kg ha^{-1}) or thousand kernel weight. It should be noted that the observed yield increase in T2 is attributable not solely to supplemental irrigation, but also to the split application of nitrogen—a component inherently enabled by water availability in this treatment. This demonstrates that the conjunctive use of water and nitrogen, without balanced nutrition, cannot effectively translate vegetative growth into grain yield. The synergy between water and all essential nutrients was crucial. WUE calculations based on effective rainfall plus irrigation showed the integrated treatment reached 1.54 kg m^{-3}, the highest among all treatments. Economic analysis using the partial budgeting method demonstrated a superior benefit-to-cost ratio of 1.36 for the integrated management, confirming it as the most profitable option for farmers. The study confirms that while the combined use of water and nitrogen primarily influences yield component establishment (spike number) a soil test-based comprehensive optimal nutrition program is essential for grain filling and final yield realization.

Conclusion This study conclusively demonstrates that a targeted, integrated approach combining supplemental irrigation with a balanced, soil test-based nutrition program is essential for unlocking the yield potential of dryland wheat in arid regions. The synergy between water and nutrients not only achieves substantial yield gains (47% increase) but also enhances the efficiency of water use and provides strong economic justification (benefit-to-cost ratio of 1.36). This integrated crop management strategy offers a viable pathway toward sustainable intensification, ensuring greater productivity and resilience in rainfed farming systems of Khuzestan and similar agro-ecologies.

Keywords: Dryland Wheat, Supplemental Irrigation, Optimal Nutrition, Soil Testing, Water Use Efficiency, Economic Analysis.

مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد و کارایی مصرف آب در گندم دیم با تلفیق آبیاری تکمیلی و مدیریت تغذیه بهینه (مطالعه موردی: شهرستان باغملک استان خوزستان)

فاطمه مسکینی ویشکایی[1*]، محمد حسین سدری[2] و فاطمه لویمی[3]

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی(AREEO)، اهواز، ایران

۲- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی(AREEO)، سنندج، ایران

۳- کارشناس بخش زراعت، سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان، اهواز، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹

کلمات کلیدی:

گندم دیم

آبیاری تکمیلی

تغذیه بهینه

کارایی مصرف آب

تحلیل اقتصادی

خوزستان

* عهده‌دار مکاتبات

Email: fatemeh.meskini@yahoo.com

چکیده

محصول گندم به‌عنوان محوری‌ترین محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی ایران، با چالش جدی افزایش تولید در شرایط محدودیت منابع آبی روبرو است. این پژوهش با هدف بررسی اثرات تلفیق آبیاری تکمیلی و تغذیه بهینه مبتنی بر آزمون خاک بر بهبود عملکرد و کارایی مصرف آب گندم دیم در شهرستان باغملک استان خوزستان انجام شد. آزمایش در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار شامل: ۱) مصرف کودهای شیمیایی بر اساس عرف زارع (شاهد)، ۲) مصرف کودهای شیمیایی بر اساس عرف زارع + بسته ترکیبی آبیاری تکمیلی و مدیریت کود نیتروژن و ۳) مصرف کودهای شیمیایی و آلی براساس آزمون خاک و تغذیه بهینه به‌همراه آبیاری تکمیلی در سه تکرار اجرا گردید. تیمار تغذیه بهینه شامل مصرف کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر اساس نتایج آزمون خاک، بذرمال با اسید هیومیک و روی، و محلول‌پاشی اسیدآمینه و سیلیکات پتاسیم در مراحل رشد بود. دو مرحله آبیاری تکمیلی ۵۰ میلی‌متر در زمان کاشت و ۳۰ میلی‌متر در مرحله چکمه‌ای شدن انجام شد. نتایج نشان داد که تلفیق آبیاری تکمیلی با تغذیه بهینه به‌طور معنی‌داری موجب افزایش ۴۷ درصدی عملکرد دانه (۴۳۶۸ کیلوگرم در هکتار) و ۲۱ درصدی وزن هزاردانه (۴۴/۶۵ گرم) در مقایسه با تیمار شاهد گردید. درحالی که آبیاری تکمیلی و تقسیط کود نیتروژن در شرایط عرف زارع، تنها منجر به افزایش تعداد سنبله در واحد سطح شد، ولی تأثیر معنی‌داری بر افزایش عملکرد دانه نداشت. محاسبه کارایی مصرف آب بر اساس بارش مؤثر نشان داد که تیمار

سوم با کسب ۱/۵٤ کیلوگرم بر مترمکعب، بالاترین کارایی مصرف آب را به خود اختصاص داد. تجزیه‌وتحلیل اقتصادی با روش بودجه‌بندی جزئی نیز نشان داد که تیمار سوم با نسبت سود به هزینه ۱/۳٦، اقتصادی‌ترین گزینه مدیریتی است. این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که تلفیق هدفمند آبیاری تکمیلی با برنامه تغذیه‌ای مبتنی بر آزمون خاک، نه‌تنها پتانسیل عملکرد گندم دیم را محقق می‌سازد، بلکه با بهبود کارایی مصرف آب و توجیه اقتصادی مطلوب، پایداری تولید در سامانه‌های کشت دیم مناطق خشک و نیمه‌خشک را تضمین می‌نماید.

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) به عنوان کلیدی‌ترین محصول استراتژیک در تأمین امنیت غذایی ایران، نقش بی‌بدیلی در سبد غذایی جامعه ایفا می‌کند. گندم بعد از برنج مهم‌ترین گیاه زراعی در جهان است که حدود ۱۸ درصد از کالری دریافتی و ۲۰ درصد از پروتئین روزانه را برای انسان فراهم می‌کند (Reynolds et al. 2012). بااین‌وجود، افزایش جمعیت ایران و محدودیت منابع آبی و خاکی، ضرورت افزایش تولید در واحد سطح را به یک چالش ملی تبدیل کرده است. بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱، از مجموع ۲۰ میلیون هکتار اراضی با قابلیت کشت دیم در کشور، تنها حدود ۶ میلیون هکتار سالانه زیر کشت محصولات دیم بوده و بخش عمده‌ای از آن به گندم (۴/۷۱۱ میلیون هکتار) اختصاص داشته است (Statistical Yearbook of the Ministry of Agriculture 2025). این در حالی است که متوسط عملکرد گندم دیم در کشور حدود ۱۳۴۰ کیلوگرم در هکتار است که در مقایسه با متوسط جهانی (۲/۵ تن در هکتار) و همچنین کشورهای همسایه مانند ترکیه (۲/۲ -۱/۸ تن در هکتار) و پاکستان (۱/۸ تن در هکتار) فاصله چشمگیری دارد (FAOSTAT 2026). این شکاف عملکردی، لزوم به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی نوین برای کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی و افزایش بهره‌وری آب را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد.

استان خوزستان به عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی ایران، دارای اراضی مستعد برای کشت گندم دیم است. اما ویژگی‌های اقلیمی خشک و نیمه‌خشک این منطقه، همراه با پراکنش نامناسب بارندگی، موجب ایجاد تنش رطوبتی به‌ویژه در مراحل بحرانی رشد زایشی گندم می‌شود. مطابق پژوهش‌ها، بین آمار سالانه تجمعی بارندگی و میزان محصول گندم، همبستگی منفی وجود دارد (Galant 1996). این امر باعث می‌گردد عملکرد واقعی محصول در دیم‌زارهای خوزستان، به مراتب کمتر از پتانسیل ژنتیکی ارقام کشت شده باشد. بر اساس مطالعات موسسه تحقیقات دیم کشور، بیش از ۹۶ درصد ایران جزو مناطق فراخشک، خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود و خوزستان نیز از این قاعده مستثنی نیست (Ghaffari 2000). در چنین شرایطی، تنش خشکی به عنوان یک عامل محدودکننده اصلی، تولید گندم دیم را با چالش جدی مواجه ساخته است (Yang et al. 2024).

در این زمینه، آبیاری تکمیلی به عنوان یک راهکار مدیریتی کارآمد شناخته شده است که می‌تواند با تأمین آب در مراحل حساس رشد، اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داده و پایداری تولید در سامانه‌های دیم را افزایش دهد (Sedri et al. 2016). پژوهش‌های متعددی در سطح جهان نشان داده‌اند که کاربرد آبیاری تکمیلی می‌تواند عملکرد گندم دیم را به میزان قابل‌توجهی افزایش دهد. اویس و هاچوم (Oweis and Hachum 2003) در سوریه با انجام آبیاری تکمیلی، میانگین

عملکرد گندم دیم را از ۱/۲۵ به ۳ تن در هکتار افزایش دادند. همچنین ایلبی و همکاران (Ilbeyi et al. 2006) در مناطق غرب آسیا و شمال آفریقا نشان دادند که آبیاری تکمیلی به میزان ۵۰ میلی‌متر در زمان کاشت، عملکرد گندم دیم را تا ۲ تن در هکتار نسبت به شاهد افزایش می‌دهد. همچنین، در یک آزمایش چهارساله در چین، انجام آبیاری تکمیلی در مرحله ساقه‌رفتن موجب افزایش ۷ تا ۱۲ درصدی عملکرد دانه نسبت به شرایط دیم و افزایش کارایی مصرف آب شد (Yang et al. 2024). مطالعات داخلی نیز مؤید این نتایج است؛ به‌طوری‌که توشیح (Tousiheh 1999) و حقیقتی ملکی (Haghighati Maleki 2002) افزایش معنی‌دار عملکرد گندم دیم را در شرایط آبیاری تکمیلی گزارش کرده‌اند. کریمی و جلینی (Karimi and Joleini 2019) براساس گزارشات و پژوهش‌های انجام شده در کشورمان، انجام دو مرحله آبیاری تکمیلی در گندم دیم را در اکثر مناطق دیم‌خیز کشور توصیه نمودند.

بااین‌وجود، پاسخ گیاه به آبیاری تکمیلی، تنها هنگامی به حداکثر می‌رسد که سایر عوامل محدودکننده، به ویژه تغذیه بهینه، نیز مدیریت شوند. در شرایط دیم، کمبود رطوبت، اصلی‌ترین عامل محدودکننده جذب عناصر غذایی محسوب می‌گردد (Reynolds et al. 2012). بنبی و همکاران (Benbi et al. 1993) و سبحانی و همکاران (Subhani et al. 2012) تأکید کرده‌اند که جذب نیتروژن توسط گیاه به شدت به مکانیسم جریان توده‌ای وابسته است که در شرایط کمبود آب به طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، افزایش رطوبت خاک بدون تأمین متعادل و صحیح عناصر غذایی ضروری، ممکن است نتواند به افزایش معنی‌دار عملکرد بینجامد. به عبارت دیگر، بین آب و عناصر غذایی به ویژه نیتروژن، یک رابطه هم‌افزایی قوی وجود دارد. لوبل و همکاران (Lobell et al. 2005) در مکزیک نشان دادند که هر دو فاکتور آب و نیتروژن به عنوان عوامل محدودکننده رشد گندم دیم عمل می‌کنند. از سوی دیگر، پالا و همکاران (Pala et al. 2011) در مناطق غرب آسیا و شمال آفریقا اشاره کرده‌اند که با بهبود شرایط تغذیه‌ای، وابستگی عملکرد دانه به نیتروژن کاهش می‌یابد، اما وابستگی به آب همچنان به عنوان عامل اصلی باقی می‌ماند. این امر نشان‌دهنده اهمیت تلفیق این دو عامل در مدیریت مزرعه است. نتایج پژوهش دیگری در کشور مراکش نشان داد که انجام آبیاری تکمیلی و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن با ۳۲ درصد افزایش در عملکرد دانه گندم همراه بود (Khlila et al. 2025).

در حال حاضر، توصیه‌های کودی رایج برای گندم دیم، عمدتاً بر اساس شرایط "دیم مطلق" و بدون در نظر گرفتن امکان تأمین رطوبت تکمیلی ارائه شده‌اند. این در حالی است که با اعمال آبیاری تکمیلی، الگوی رشد گیاه، دوره رشد و درنتیجه، نیاز غذایی آن تغییر می‌کند (Sedri et al. 2016). بنابراین، یک شکاف دانشی مهم در زمینه نیاز غذایی گندم دیم در شرایط تلفیقی دیم و آبیاری تکمیلی، به ویژه در اقلیم خاص استان خوزستان وجود دارد. بر این اساس، هدف اصلی از اجرای این پژوهش، بررسی اثر متقابل آبیاری تکمیلی و مدیریت تغذیه بهینه بر عملکرد، اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و توجیه اقتصادی گندم دیم در شهرستان باغملک استان خوزستان بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت تحقیقی- توسعه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ در یک قطعه مزرعه در شهرستان باغملک، دهستان قلعه تل، روستای کمردراز با طول جغرافیایی ۴۹° ۵۴′ ۳۲/۸۶۷″ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱° ۳۸′ ۵۹/۵۲۶″ شمالی و ارتفاع از سطح دریای ۹۳۰ متر با رقم دهدشت و میزان بذر مصرفی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار با خطی‌کار (بذرکار- عمیق‌کار شرکت کشت‌گستر **مدل** DD225با عمر ۴ سال) و فاصله ردیف‌های کشت ۱۳ سانتی‌متر در استان خوزستان اجرا شد. مزرعه گندم دیم در باغملک در تاریخ ۱۴۰۳/۹/۲۲ کشت گردید. ابعاد کرت‌های آزمایشی با طول ۱۰ متر و عرض ۵ متر طراحی شد و فاصله بین بلوک‌ها از هم ۱/۵ متر در نظر

گرفته شد (مساحت کل آزمایش حدود ۵۰۰ متر مربع). به منظور ارزیابی حاصلخیزی عمومی خاک محل اجرای آزمایش، قبل از اعمال تیمارهای کودی، یک نمونه خاک مرکب از عمق ۲۵-۰ سانتی‌متری تهیه و تحویل آزمایشگاه خاک و آب مرکز شد.

تیمارهای آزمایشی شامل ۱) مصرف کودهای شیمیایی مطابق عرف زارع (بدون آبیاری تکمیلی)، ۲) مصرف کودهای شیمیایی مطابق عرف زارع به همراه آبیاری تکمیلی + مدیریت کود نیتروژن (در این تیمار، با توجه به فراهمی آب، امکان یک مرحله کوددهی سرک در زمان آبیاری اول فراهم شد که خود بخشی از بسته مدیریت ترکیبی است) و ۳) مصرف کودهای شیمیایی و آلی بر اساس تغذیه بهینه به همراه آبیاری تکمیلی بودند (جدول ۱). با توجه به اینکه در شرایط دیم، مصرف کود سرک بدون وجود رطوبت کافی بی‌اثر است، مدیریت کود اوره در تیمارهای دارای آبیاری تکمیلی (تیمار ۲ و ۳) به صورت تقسیطی و سرک انجام شد تا حداکثر کارایی مصرف نیتروژن حاصل گردد. این رویکرد منطبق بر اصول تغذیه گیاهی در شرایط دیم و توصیه‌های مؤسسه تحقیقات دیم کشور است.

در تیمار اول و دوم آزمایش، کودهای شیمیایی پایه مطابق عرف زارع منطقه (از نظر منبع کودی، میزان، زمان و روش مصرف) مصرف شد (جدول ۱).

در تیمار سوم، نحوه مصرف کود نیتروژنی براساس دستورالعمل ابلاغی از موسسه تحقیقات دیم کشور انجام شد. با درنظر گرفتن امکان دو مرحله آبیاری تکمیلی (۵۰ میلی‌متر در زمان کاشت + ۳۰ میلی‌متر در مرحله چکمه‌ای شدن)، ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار اوره در زمان کاشت در پائیز به‌صورت جایگذاری + ۸۰ کیلوگرم در هکتار اوره در زمان دومین آبیاری تکمیلی به‌صورت سرک در بهار استفاده شد. کودهای فسفر و پتاسیم بر اساس نتایج آزمون خاک و مطابق حد بحرانی این عناصر در خاک (حد بحرانی ۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم فسفر و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم پتاسیم) به‌ترتیب از منابع کودی فسفات آمونیوم و سولفات پتاسیم هم‌زمان با کاشت در سطح تمام کرت‌های مربوطه با بذرکار در عمق خاک به‌صورت نواری جایگذاری شد. در تیمار سوم، علاوه بر مصرف کودهای اوره، فسفات آمونیوم و سولفات پتاسیم بر مبنای آزمون خاک، بذر گندم دیم مصرفی با کود مایع اسید هیومیک و روی (۱/۵ لیتر به ازای ۱۰۰ کیلوگرم بذر) بذرمال شد. در بهار و در سطح تیمار سوم، در دو مرحله مرحله پنجه‌دهی با اسیدآمینه و جلبک دریایی و مرحله ساقه‌دهی با کود سیلیکات پتاسیم محلول‌پاشی با غلظت ۵ در هزار انجام شد (Jafarnejadi et al. 2024). لازم به ذکر است که تمام نهاده‌های مورد استفاده در این پژوهش از نوع تجاری، رایج و در دسترس در بازار نهاده‌های کشاورزی استان خوزستان بوده است.

Table 1. Detailed fertilization schedule applied across different experimental treatments.

Treatment	Pre-Planting	First Irrigation	Tillering Stage	Stem Elongation Stage	Second Irrigation
Farmer's Conventional Practice	Ammonium phosphate (100 kg ha^{-1}) + Urea (50 kg ha^{-1})	–	-	-	-
Farmer's Practice + Supplemental Irrigation & Improved N Management	Ammonium phosphate (100 kg ha^{-1})	Urea (100 kg ha^{-1})	-	-	-
Soil Test-Based Optimal Nutrition + Supplemental Irrigation	Ammonium phosphate (100 kg ha^{-1}) + Potassium sulfate (100 kg ha^{-1}) + Seed priming with humic acid & zinc	Urea (120 kg ha^{-1})	Amino acids + Seaweed extract (5 per 1000)	Potassium silicate (5 per 1000)	Urea (80 kg ha^{-1})

میزان آب مورد نیاز در آبیاری تکمیلی

آبیاری با استفاده از آب چاه عمیق و به روش آبیاری سطحی در سطح کرت‌ها انجام شد (جدول ۲). برای انجام آبیاری تکمیلی و با توجه به سطح کرت‌های آزمایشی (۵۰ مترمربع) و توصیه ۵۰ میلی‌متر آب برای مرحله اول آبیاری تکمیلی در زمان کاشت در پائیز و برای سهولت در انجام آبیاری، حجم ۲۵۰۰ لیتر و معادل ۲/۵ مترمکعب آب در پائیز و پس از انجام کاشت و ۳۰ میلی‌متر آب و تقریباً معادل ۱۵۰۰ لیتر و معادل ۱/۵ مترمکعب در مرحله چکمه‌ای شدن گندم و مصادف با بروز تنش خشکی، در بهار مصرف شد (Sedri et al. 2016) کنترل حجم آب ورودی به هر کرت با استفاده از کنتور انجام شد.

سایر مسائل به‌زراعی، مانند مبارزه با آفات و بیماری‌ها و کنترل علف‌های هرز، مطابق با توصیه‌های تحقیقاتی به طور یکنواخت در سطح هر سه تیمار انجام شد. در مرحله رسیدگی کامل گندم، تعداد سنبله در مترمربع در مزرعه اندازه‌گیری شد. برداشت محصول در تاریخ ۱۴۰۴/۰۲/۳۰ انجام شد. در هر کرت با استفاده از کادر ۱ مترمربعی، ۳ نمونه تصادفی از محصول، به صورت کف‌بر برداشت و عملکرد بیولوژیک تعیین شد. پس از انجام خرمن‌کوبی، عملکرد دانه در کرت‌ها تعیین و عملکرد کلش از تفاضل عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه در هر کرت، محاسبه شد. از نسبت عملکرد دانه بر عملکرد بیولوژیک در هر کرت، شاخص برداشت (HI) محاسبه شد. سپس وزن هزاردانه در هر تیمار تعیین شد. در نهایت، تجزیه‌وتحلیل آماری بر روی داده‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن انجام شد.

در صورت عدم اندازه‌گیری رطوبت خاک در مراحل مختلف فنولوژیکی گندم، با استفاده از میزان بارندگی در سال زراعی، کارآیی استفاده از آب باران (WUE) در گندم دیم برای کرت‌های آزمایش از رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Farooq et al. 2009).

$$WUE = \frac{GY}{RF} \quad (۱)$$

WUE، کارآیی استفاده از باران ($kg.mm^{-1}. ha^{-1}$)

G_Y، عملکرد دانه در کرت آزمایش ($kg. ha^{-1}$)

RF میزان باران در سال زراعی (mm)

از آنجایی‌که هر بارشی نمی‌تواند در تأمین نیاز آبی گیاه نقش داشته باشد بنابراین، استفاده از مقدار کل بارندگی در طول فصل رشد گیاه برای محاسبه کارایی مصرف آب چندان کاربردی نیست. از این رو در این پژوهش، مقدار کارایی مصرف آب در دو حالت محاسبه گردید: ۱) استفاده از مقدار کل بارش در طول فصل رشد گندم و ۲) استفاده از مقدار کل بارندگی مؤثر در طول فصل رشد گندم.

بارش مؤثر قسمت مفید کل باران دریافتی است که در طی دوره رشد گیاه رخ می‌دهد (Larijani 2017). در واقع بارش مؤثر، قسمتی از بارش است که در منطقه ریشه گیاه ذخیره‌شده و صرف تأمین بخشی از نیاز آبی گیاه می‌شود (Adnan and Hayat Khan 2008). در این پژوهش برای برآورد مقدار بارش مؤثر از روش بارش قابل‌اطمینان برای دوره‌های ده‌روزه استفاده شد (Tafteh et al. 2019):

$$If: RF \leq 23\ mm,\ RF_{eff} = 0.6*(RF-3.3) \quad (۱)$$

$$If: RF > 23mm,\ RF_{eff} = 0.8*(RF-8) \quad (۲)$$

در این مطالعه، برای تعیین مقدار بارندگی از اطلاعات هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به شهرستان باغملک، ایستگاه سینوپتیک ایذه با طول جغرافیایی ۴۹/۵۲ و عرض جغرافیایی ۳۱/۵۰ درجه و ارتفاع از سطح دریای ۸۲۷ متر استفاده شد. مقدار بارندگی از ۲۲ آذر ۱۴۰۳ تا ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۴ در نظر گرفته شد.

تجزیه‌وتحلیل اقتصادی

پس از جمع‌بندی داده‌های پژوهش، به‌منظور تجزیه‌وتحلیل اقتصادی نتایج در کرت‌های این پژوهش، از روش "بودجه-بندی جزئی" استفاده شد (Bigdeli and Neyvandi 2002) و با استفاده از این روش، اقتصادی‌ترین روش مشخص شد.

اطلاعات مورد نیاز برای به‌کارگیری روش " بودجه‌بندی جزئی " عبارت‌اند از:

درآمد ناخالص حاصل از اجرای هر کدام از تیمارها: از حاصل ضرب عملکرد محصول تولیدی در قیمت محصول (گندم) به دست می‌آید.

هزینه اجرای هر کدام از تیمارها: معمولاً کل هزینه‌های مربوط به تولید محصول در نظر گرفته می‌شود. اما می‌توان هزینه‌های تولید مشترک در اجرای تیمارها را حذف و فقط هزینه‌های غیرمشترک را در محاسبات لحاظ کرد. بنابراین می‌توان فقط کلیه هزینه‌های مربوط به فرآیند کوددهی و آبیاری تکمیلی (هزینه خرید کود، هزینه لوله‌های انتقال آب و ادوات آبیاری و نیروی کار برای توزیع کود و یا آبیاری، هزینه تجهیزات مربوط به کوددهی و ...) را محاسبه و لحاظ کرد.

در روش بودجه‌بندی جزئی، منافع و هزینه‌های هر کدام از تیمارها به صورت زیر محاسبه شد:

منافع حاصل از اجرای تیمارها: درآمد حاصل از اجرای تیمار جدید (Rn)، هزینه مربوط به تیمار شاهد که با اجرای تیمار جدید (کود دهی یا آبیاری)، آن هزینه ذخیره‌شده و در واقع به عنوان هزینه انجام نشده محسوب می‌شود که بر این اساس نوعی درآمد به حساب می‌آید (C0).

هزینه اجرای تیمارها: هزینه‌های ناشی از اجرای تیمارهای جدید (Cn)، درآمد ازدست‌رفته مربوط به تیمار شاهد که درنتیجه اجرای تیمارهای جدید، ازدست‌می‌رود (R0). در روش بودجه‌بندی جزئی انتخاب اقتصادی‌ترین تیمار بر این اساس انجام می‌شود که، در صورتی که منافع حاصل از اجرای تیمار (Rn+ C0) بیشتر از هزینه‌های آن (Cn+ R0) باشد، تیمار مورد نظر از نظر اقتصادی سودآورتر از تیمار شاهد خواهد بود. در این روش مقدار منفعت خالص (سود خالص) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Bigdeli and Neyvandi 2002):

$$\text{منفعت خالص} = (R0+Cn) - (Rn+C0) \quad (۳)$$

نتایج

جدول ۲ و ۳ مقادیر برخی ویژگی‌های شیمیایی آب و خاک محل اجرای پروژه آبیاری تکمیلی در گندم دیم (شهرستان باغملک) در سال زراعی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ را نشان می‌دهد.

Table 2. Some chemical properties of water used for supplemental irrigation

SAR	Na^{+} (mel^{-1})	Mg^{+2} (mel^{-1})	Ca^{+2} (mel^{-1})	Cl^{-} (mel^{-1})	HCO_3^{-} (mel^{-1})	pH	EC (dSm^{-1})
0.95	2.49	2.9	4.24	2.7	2.32	7.6	0.8

Table 3. Some physicochemical properties of the soil at the experimental site (Baghmalek County)

Soil Depth (cm)	EC ($dS\ m^{-1}$)	pH (-)	Organic Carbon (%)	Available P ($mg\ kg^{-1}$)	Available K ($mg\ kg^{-1}$)	Clay (%)	Sand (%)
0-30	1.57	7.79	0.84	7.54	138	22	28

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین عملکرد دانه گندم، وزن هزار دانه و تعداد سنبله در مترمربع در تیمارهای مختلف اختلاف معنی-داری وجود داشت. در حالی که در پارامترهای شاخص برداشت و عملکرد بیولوژیک، هیچ اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای مختلف مشاهده نشد.

نتایج جدول ۴ نشان داد که بیشترین تعداد سنبله در مترمربع در تیمار دوم مشاهده شد (۲۳۱) و به طور معنی‌داری از تعداد سنبله در متر مربع در دو تیمار تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی (۲۱۲) و عرف زارع (۱۶۵) بیشتر بود. اما بیشترین وزن هزاردانه در تیمار تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی مشاهده شد که به‌ترتیب به میزان ۲۱ و ۱۶/۵ درصد بیشتر از تیمارهای اول و دوم به دست آمد. بیشترین عملکرد دانه گندم نیز در تیمار تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی و به مقدار ۴۳۶۸ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد (جدول ۴) که به‌طور معنی‌داری بیشتر از عملکرد دانه گندم در تیمار عرف زارع (۲۹۶۲ کیلوگرم در هکتار) بود. نتایج مقایسه میانگین تیمارهای مختلف کودی نشان داد که کوددهی بر اساس تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی موجب افزایش ۴۷ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت شرایط عرف زارع شد. افزایش عملکرد دانه گندم در اثر آبیاری تکمیلی + مدیریت کود نیتروژن به میزان ۶۹۸ کیلوگرم در هکتار در شرایط عرف زارع، تنها ناشی از آبیاری تکمیلی نیست، بلکه بخشی از این بهبود می‌تواند به مدیریت تقسیط‌شده نیتروژن (که خود تابعی از وجود آب است) نیز نسبت داده شود. هرچند نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین عملکرد دانه گندم بین دو تیمار اول و دوم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. نتایج این پژوهش نشان داد که انجام آبیاری تکمیلی توأم با مدیریت کود نیتروژن، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد گیاه، موجب افزایش تعداد پنجه و در نهایت تعداد سنبله در واحد سطح شده است. با این حال، در صورت عدم تأمین متعادل سایر عناصر غذایی، دانه‌ها به خوبی پر نمی‌شوند. درنتیجه، افزایش عملکرد حاصل از این بسته مدیریتی (آبیاری + نیتروژن) در چارچوب عرف زارع، به افزایش معنی‌دار عملکرد دانه گندم منجر نگردید. درحالی‌که در تیمار تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی، انجام آبیاری در مرحله اول موجب افزایش تعداد پنجه و تعداد سنبله در واحد سطح گردید و تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گندم در طول مراحل رشد و انجام آبیاری در مرحله زایشی موجب افزایش وزن هزاردانه و عملکرد نهایی محصول گردید.

بازبینی نظام‌مند مطالعات میدانی از سوریه و اتیوپی نشان می‌دهد که تلفیق آبیاری تکمیلی و کوددهی نیتروژن، عملکرد گندم را در محیط‌های با محدودیت آبی به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. مطالعه اتیوپی گزارش کرد که تیمار بهینه (آبیاری تکمیلی ۱۰۰٪ همراه با ۹۲ کیلوگرم در هکتار نیتروژن) عملکرد دانه را از ۸۸۵ کیلوگرم در هکتار در شرایط دیم به ۴۵۰۴ کیلوگرم در هکتار افزایش داد و هم‌زمان بهره‌وری آب را از ۱۵/۲ به ۷/۹۹ کیلوگرم بر میلی‌متر در هکتار بهبود بخشید (Zemichael and Dechassa 2017). پژوهشی در سوریه نشان داد که حتی آبیاری محدود (معادل یک‌سوم آبیاری کامل) نیز به‌طور قابل‌توجهی باعث افزایش عملکرد شد، به‌طوری‌که نزدیک به حداکثر عملکرد در شرایط دو سوم آبیاری کامل به دست آمد (Oweis et al. 1998).

Table (4) Comparison of the mean values of wheat yield indices among experimental treatments using Duncan's multiple range test

Treatment	Grain Yield (kg ha^{-1})	Biological Yield (ton ha^{-1})	Harvest Index (%)	Thousand Kernel Weight (g)	Spikes per m^2
Farmer's Conventional Practice	2962 b	8.92 a	0.323 a	36.83 b	165.3 c
Farmer's Practice + Supplemental Irrigation & Improved N Management	3660 ab	11.39 a	0.326 a	38.33 b	231 a
Soil Test-Based Optimal Nutrition + Supplemental Irrigation	4368 a	11.46 a	0.383 a	44.65 a	212 b
Coefficient of Variation (%)	3.77	11.52	12.11	1.84	3.36

Within each column, means followed by different letters are significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

کارایی مصرف آب

مقدار بارندگی در دهه‌های مختلف در طول فصل رشد گندم در شهرستان باغملک بر اساس اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک ایذه در جدول ۵ ارائه شده است. مقادیر کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف با استفاده از مقدار کل بارندگی و بارش مؤثر در طول فصل رشد گندم در پروژه آبیاری تکمیلی گندم دیم در جدول ۶ ارائه شده است.

مقدار کل بارش در طول فصل رشد گندم در منطقه باغملک، ۳۵۷/۸ میلی‌متر بود. اما مقدار بارش مؤثر بر اساس روش بارش قابل‌اطمینان به میزان ۲۰۴/۱ میلی‌متر برآورد شد. نتایج نشان داد زمانی‌که تنها بر اساس مقدار بارندگی کل، شاخص کارایی مصرف آب محاسبه می‌گردد، تیمارهایی که آبیاری تکمیلی داشته‌اند، کارایی مصرف آب بالاتری نسبت به عرف زارع دارند که قابل‌انتظار است. زمانی‌که مقادیر آبیاری تکمیلی نیز در محاسبات کارایی مصرف آب در نظر گرفته می‌شود، باز هم بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی مشاهده شد (۹/۹۸ کیلوگرم بر میلی‌متر یا ۰/۹۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب آب). نتایج نشان داد که در صورت استفاده از بارش مؤثر، کاربرد آبیاری تکمیلی در تیمار دوم (۱۲/۹ کیلوگرم بر میلی‌متر یا ۱/۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب آب) موجب کاهش کارایی مصرف آب نسبت به تیمار عرف زارع (۱۴/۵ کیلوگرم بر میلی‌متر) شده است (جدول ۶). زیرا افزایش عملکرد ناشی از آبیاری تکمیلی و مدیریت کود نیتروژن در تیمار دوم در حدی نبوده است که افزایش مصرف آب را جبران نماید (جدول ۴). در حالی‌که در صورت محاسبه کارایی مصرف آب براساس بارش مؤثر +آبیاری تکمیلی، استفاده از تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی، علاوه بر افزایش معنی‌دار عملکرد گندم موجب افزایش کارایی مصرف آب نیز شده است (جدول ۶). معشوقی و همکاران (Mashouqi et al. 2025) با تحلیل داده‌های بلندمدت جنوب غربی ایران، اعمال ۵۰ میلی‌متر آبیاری تکمیلی قبل از گلدهی را عامل افزایش کارایی مصرف آب به ۰/۶ تا ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نمودند. هرچند این پژوهشگران، بر اهمیت الگوی توزیع بارندگی و نه‌تنها مقدار کل آن در موفقیت آبیاری تکمیلی تأکید داشتند.

Table 5. Decadal distribution of rainfall (mm) during the 2024–2025 wheat growing season based on data from Izeh Synoptic Station

Month	December	January			February			March			April		
Decade	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Rainfall (mm)	30.2	25.5	21.8	22.1	25.9	26.4	29	29	17	24.8	42.8	27.9	35.4
Effective Rainfall (mm)	14	10.2	7.3	7.5	10.6	11	13	13	3.4	9.7	24	12.2	18.2

Decade: 10-day period.

Table 6. Comparison of water use efficiency (WUE) among experimental treatments based on total rainfall, total rainfall + supplemental irrigation, and effective rainfall + supplemental irrigation during the 2024–2025 growing season (Baghmalek County).

	WUE based on total rainfall (kg mm⁻¹ ha⁻¹)	WUE based on total rainfall + irrigation (kg mm⁻¹ ha⁻¹)	WUE based on effective rainfall + irrigation (kg mm⁻¹ ha⁻¹)
Farmer's Conventional Practice	8.28 c	8.28 c	14.5 b
Farmer's Practice + Supplemental Irrigation & Improved N Management	10.2 b	8.4 b	12.9 b
Soil Test-Based Optimal Nutrition + Supplemental Irrigation	12.2 a	9.98 a	15.4 a

Within each column, means followed by different letters are significantly different according to Duncan's multiple range test at the 5% probability level.
The coefficient of variation (CV) for water use efficiency based on total rainfall, total rainfall + supplemental irrigation, and effective rainfall + supplemental irrigation were 3.76%, 3.60%, and 3.83%, respectively.

افزایش ۴۷ درصدی عملکرد دانه در تیمار سوم این پژوهش، هم‌سو با یافته‌های تحقیقات در سایر اکوسیستم‌های مدیترانه‌ای است. در یک فراتحلیل گسترده بر روی سامانه‌های گندم دیم در غرب آسیا و شمال آفریقا (Pala et al. 2011) نشان دادند که مدیریت توام آب و نیتروژن می‌تواند شکاف عملکرد را تا ۷۰٪ کاهش دهد. به‌طور مشخص‌تر، مطالعه‌ای در شمال اتیوپی (Zemichael and Dechassa 2017) افزایش عملکردی در حدود ۴۰۰٪ را با تلفیق آبیاری تکمیلی و نیتروژن بهینه گزارش کرد که اگرچه از نظر عددی بیشتر از میزان مشاهده‌شده در خوزستان است، اما دلیل اصلی آن پایین بودن شدید عملکرد در تیمار شاهد (کمتر از ۱ تن در هکتار) در آن منطقه بود. هم‌خوانی کلیدی یافته حاضر با پژوهش‌های جهانی در تأکید بر اثر هم‌افزایی آب و تغذیه است. تحقیق‌های فیزیولوژیک (Palta et al. 1994; Farooq et al. 2009) به وضوح نشان داده‌اند که تنش خشکی متابولیسم نیتروژن در گیاه را مختل می‌کند و در مقابل، کمبود نیتروژن نیز کارایی مصرف آب را کاهش می‌دهد. بنابراین، مداخله تک‌عاملی (فقط آب یا فقط مدیریت کود نیتروژن) نمی‌تواند محدودیت اصلی را برطرف کند، چنان‌که در این آزمایش نیز آبیاری تکمیلی و مدیریت کود نیتروژن به تنهایی نتوانست منجر به افزایش معنادار وزن هزاردانه و عملکرد دانه شود بلکه برای دستیابی به عملکرد اقتصادی دانه گندم و بهبود کارایی مصرف آب، علاوه بر انجام آبیاری تکمیلی، تأمین تمام نیازهای تغذیه‌ای گیاه (تغذیه متعادل و بهینه عناصر غذایی براساس آزمون خاک) ضروری است.

تحلیل اقتصادی اجرای پروژه

بررسی اقتصادی کاربرد تیمار عرف زارع + بسته ترکیبی آبیاری تکمیلی و مدیریت کود نیتروژن و تیمار تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی در مقایسه با عرف زارع در شهرستان باغملک در جدول‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارزیابی اقتصادی می‌توان بیان نمود که استفاده از آبیاری تکمیلی در هردو شرایط تغذیه گیاه (تیمار دوم و سوم) از نظر اقتصادی برای کشاورز سودآور است. تیمار تغذیه بهینه + آبیاری تکمیلی بالاترین نسبت منفعت به هزینه را داشت (۱/۳۶) و سودآورترین تیمار در این پژوهش به دست آمد (جدول ۸). باید به این نکته توجه نماییم که علی‌رغم این‌که افزایش عملکرد ناشی از آبیاری تکمیلی در تیمار عرف زارع + آبیاری تکمیلی نسبت به شرایط عرف زارع از نظر آماری معنی‌دار نبوده است، اما با این حال از نظر اقتصادی برای کشاورز سودآور بوده است. تحلیل اقتصادی کاربرد هم‌زمان آبیاری تکمیلی و مصرف کودهای شیمیایی در کشور اتیوپی نیز نشان داد که ترکیب آبیاری و نهاده‌های کودی در تولید گندم دیم مقرون‌به‌صرفه بوده و نرخ نهایی بازده ۲۵۵٪ را گزارش نمودند (Zemichael and Dechassa 2017). شواهد پژوهشی به‌طور پیوسته از این موضوع حمایت می‌کنند که یکپارچه‌سازی راهبردی آبیاری تکمیلی با مدیریت نهاده‌های کودی می‌تواند تولید گندم را در اقلیم نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد، اگرچه سطوح بهینه نهاده‌ها بسته به شرایط محیطی متفاوت خواهد بود.

یافته‌های این پژوهش از قابلیت اجرایی بالایی در سطح مزارع کشاورزان پیشرو شهرستان باغملک و مناطق مشابه در شرق خوزستان برخوردار است. روش تغذیه بهینه (کودهای پایه بر اساس آزمون خاک + بذرمال + محلول‌پاشی کودهای تکمیلی) با استفاده از نهاده‌های در دسترس و نیروی کار موجود در منطقه قابل پیاده‌سازی است. مهم‌ترین عامل محدودکننده اجرای این راهکار، فراهمی به‌موقع آب برای انجام دو مرحله آبیاری تکمیلی است. خوشبختانه، عمده اراضی دیم منطقه در مجاورت چاه‌های نیمه‌عمیق کشاورزی با متوسط دبی ۵ تا ۱۰ لیتر در ثانیه قرار دارند که مالکیت آن‌ها عمدتاً در اختیار خود کشاورزان است. بر اساس محاسبات پژوهش حاضر، حجم آب مورد نیاز برای دو نوبت آبیاری تکمیلی در هر هکتار حدود ۸۰۰ مترمکعب (۵۰ میلی‌متر در پاییز و ۳۰ میلی‌متر در بهار) است که با توجه به دبی چاه‌های منطقه، زمان لازم برای آبیاری یک هکتار بین ۲۲ تا ۴۴ ساعت خواهد بود که از نظر عملیاتی کاملاً شدنی است. هزینه تأمین این مقدار آب با احتساب هزینه انرژی

Table 7. Benefits and costs associated with each treatment (dryland wheat, Baghmalek County).

Treatment	Grain Yield (kg ha^{-1})	Fertilization + Supplemental Irrigation Cost (1000 IRR ha^{-1})	Gross Revenue (1000 IRR ha^{-1})
Farmer's Conventional Practice	2962	14200	607210
Farmer's Practice + Supplemental Irrigation & Improved N Management	3660	26900	750300
Soil Test-Based Optimal Nutrition + Supplemental Irrigation	4368	61950	895440

Gross revenue was calculated as grain yield (kg ha^{-1}) multiplied by the wheat price (20500 IRR kg^{-1}).

Table 8. Selecting the most profitable treatment based on the partial budgeting method.

Treatment	Benefits / Costs	Calculation	Value (1000 IRR ha^{-1})	Net Benefit (1000 IRR ha^{-1})	Benefit to Cost Ratio
Farmer's Practice + Supplemental Irrigation & Improved N Management	Benefits	$R_n + C_0$	764500	130390	1.21
	Costs	$C_n + R_0$	634110		
Soil Test-Based Optimal Nutrition + Supplemental Irrigation	Benefits	$R_n + C_0$	909640	240480	1.36
	Costs	$C_n + R_0$	669160		

(سوخت یا برق) و استهلاک پمپ، تقریباً بین ۵ تا ۸ درصد کل هزینه‌های متغیر تیمار را تشکیل می‌دهد که با توجه به نسبت سود به هزینه ۱/۳۶ کاملاً توجیه‌پذیر است. حیاتی‌ترین نکته، قطعیت دسترسی به آب در بازه‌های زمانی حساس یعنی دهه اول آذرماه (هم‌زمان با کشت) و نیمه دوم فروردین‌ماه (مرحله چکمه‌ای شدن) است. از آنجایی که اوج مصرف آب چاه‌های منطقه برای کشت‌های بهاره در اوایل اردیبهشت‌ماه آغاز می‌شود، انجام آبیاری تکمیلی دوم در فروردین‌ماه، از نظر تقویم زراعی با سایر مصارف در تضاد نبوده و آب مورد نیاز کاملاً قابل تخصیص است. بنابراین، با مدیریت صحیح تقویم آبیاری و وجود زیرساخت‌های نسبی انتقال آب (لوله و پمپ) و نیروی کار آشنا با آبیاری سطحی، این الگوی تلفیقی بدون نیاز به سرمایه‌گذاری کلان، قابلیت پذیرش سریع توسط کشاورزان منطقه را دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان داد که در سامانه‌های دیم خشک و نیمه‌خشک مانند شهرستان باغملک خوزستان، تلفیق هدفمند آبیاری تکمیلی با مدیریت تغذیه بهینه مبتنی بر آزمون خاک، راهکاری برتر برای تحقق پتانسیل عملکرد گندم و افزایش پایداری تولید است. این رویکرد تلفیقی نه‌تنها موجب افزایش ۴۷ درصدی عملکرد دانه و ۲۱ درصدی وزن هزاردانه نسبت به شرایط متعارف گردید، بلکه با بهبود کارایی مصرف آب (۱/۵۴ کیلوگرم بر مترمکعب) و دستیابی به نسبت سود به هزینه ۱/۳۶، از توجیه فنی و اقتصادی مطلوبی برخوردار بود. در مقابل، کاربرد آبیاری تکمیلی و مدیریت کود نیتروژن (بدون توجه به سایر عناصر غذایی و نیاز گیاه)، صرفاً باعث افزایش تعداد سنبله شد و نتوانست به افزایش معنی‌دار عملکرد دانه بیانجامد که این امر اهمیت وجود اثر هم‌افزایی بین آب و عناصر غذایی و لزوم رفع هم‌زمان هر دو محدودیت را تأیید می‌کند. بنابراین، به‌کارگیری برنامه غذایی دقیق و مبتنی بر آزمون خاک در کنار آبیاری تکمیلی، به عنوان یک الگوی مدیریتی یکپارچه، می‌تواند ضمن افزایش تولید و درآمد کشاورزان، پایداری منابع آب و خاک در دیم‌زارهای مناطق شرقی استان خوزستان را نیز تضمین نماید.

References

Adnan, Sh., & Hayat Khan, A. (2008). Effective rainfall for irrigated agriculture plains of Pakistan. *Pakistan Journal of Meteorology*, 6, 61–72.

Benbi, D. K., Singh, R., Singh, G., Sandhu, K. S., & Saggar, S. (1993). Response of dryland wheat to fertilizer nitrogen in relation to stored water, rainfall and residual farm yard manure. *Fertilizer Research*, 36, 63–70. https://doi.org/10.1007/BF00749949

Bigdeli, M. T., & Neyvandi, F. (2002). *Guide to economic indicators*. Publisher Institute of Economic Affairs. [In Persian].

FAOSTAT. (2026). https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management (Review article). *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 185–212. https://doi.org/10.1051/agro:2008021

Galant, H. (1996). Yield of some crop plants versus meteorological conditions in Czeslawice in the year's 1986-1990. *Third symposium on climate of the cultivated field*, 405, 77–80.

Ghaffari, A. (2000). Application of GIS and crop simulation modeling to assess crop suitability and production potential. *Water and Soil Journal*, 24(5), 894–905. [In Persian].

Haghighati Maleki, A. (2002). Investigation of wheat yield under supplemental irrigation conditions in rainfed areas (Final Report No. 240/28). Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Iran. [In Persian].

Ilbeyi, A., Ustun, H., Oweis, T., Pala, M., & Benli, B. (2006). Wheat water productivity and yield in a cool highland environment: Effect of early sowing with supplemental irrigation. *Agricultural Water Management*, 82, 399–410. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.08.005

Jafarnejadi, A. R., Meskini-Vishkaee, F., & Azadi, A. (2024). *Practical principles of crops balanced nutrition in Khuzestan province*. Andisheh Goya Publications. [In Persian].

Karimi, M., & Joleini, M. (2019). Supplemental irrigation in cultivation of rainfed wheat. *Journal of Water and Sustainable Development*, 6(1), 29–34. https://doi.org/10.22067/jwsd.v6i1.77251

Khlila, I., Baidani, A., Hnizil, Q., & Amamou, A. (2025). Integrated management of water, nitrogen, and genotype selection for enhanced wheat productivity in Moroccan arid and semi-arid regions. *Agronomy*, 15(3), 612–621. https://doi.org/10.3390/agronomy15030612

Larijani, Sh. (2017). Validation of effective precipitation determination relationships in high-rainfall and low-rainfall regions of Iran. *Ecohydrology Journal*, 2(3), 825–836. [In Persian].

Lobell, D. B., Ortiz-Monasterio, J. I., Asner, G. P., Naylor, R. L., & Falcon, W. P. (2005). Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape. *Agronomy Journal*, 97, 241–249. https://doi.org/10.2134/agronj2005.0241a

Mashouqi, S., Ahmadi, S. H., & Kamali, B. (2025). Spatiotemporal modeling for enhancing winter wheat yield and water productivity in dryland farming with supplemental irrigation under variable rainfall conditions. *Agricultural Water Management*, 320, 109825. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109825

Oweis, T., & Hachum, A. (2003). Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa. In W. J. Kijne, R. Barker, & D. Molden (Eds.), *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement* (pp. 179–197). CAB International.

Oweis, T., Pala, M., & Ryan, J. (1998). Stabilizing rainfed wheat yields with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. *Agronomy Journal*, 90(5), 672–681. https://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000050017x

Pala, M., Oweis, T., Benli, B., De Pauw, E., El Mourid, M., Karrou, M., Jamal, M., & Zencirci, N. (2011). *Assessment of wheat yield gap in the Mediterranean: Case studies from Morocco, Syria and Turkey*. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA).

Palta, J. A., Kobata, T., Turner, N. C., & Fillery, I. R. (1994). Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. *Crop Science*, 34, 118–124. https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400010021x

Reynolds, M., Foulkes, J., Furbank, R., Griffiths, S., King, J., Murchie, E., Parry, M., & Slafer, G. (2012). Achieving yield gains in wheat. *Plant, Cell & Environment*, 35(10), 1799–1823. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02588.x

Sedri, M. H., Golchin, A., Fayazi Asl, V., & Si-o-se-marde, A. (2016). Effects of optimal nitrogen consumption on rainwater use efficiency and wheat yield under different moisture regimes. *Iranian Journal of Dryland Agriculture*, 5(1), 63–85. [In Persian with English abstract].

Statistical Yearbook of the Ministry of Agriculture. (2024–2025). Agricultural Year 1402–1401 (2023–2024). [In Persian].

Subhani, A., Tariq, M., Jafar, M. S., Latif, R., Khan, M., Iqbal, M. S., & Iqbal, M. S. (2012). Role of soil moisture in fertilizer use efficiency for rainfed areas: A review. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 2(11), 1–10.

Tafteh, A., Davatgar, N., & Azizizahan, A. A. (2019). A review of methods for determining and estimating effective precipitation in irrigation water requirement (Technical Journal). Soil and Water Research Institute. [In Persian with English abstract].

Tousiheh, V. (1999). Investigation of the yield of dryland wheat cv. Sabalan under supplemental irrigation (Final Report No. 143/H). Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research Center, Iran. [In Persian].

Yang, W., Zhou, J., Wang, S., & Yin, L. (2024). Different supplemental irrigation methods result in discrepant water use efficiency and yield by changing steps of water use process in dryland wheat. *European Journal of Agronomy*, 160, 127318. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127318

Zemichael, B., & Dechassa, N. (2017). Performance of bread wheat (Triticum aestivum L.) in response to supplemental irrigation and rate of nitrogen application in Enderta, Tigray, Northern Ethiopia. *International Journal of Life Sciences*, 5(3), 345–361.