Journal of
Hydraulics and Water Science

Online ISSN: 3092-6114
Journal homepage: https://hws.tabrizu.ac.ir/

Original Article

Analysis of Water Productivity in Potato Cultivation and Evaluation of Optimal Irrigation Management Scenarios in Zanjan Province

Hassan Ojaghlou[1], Mohammad Ghorbanian[2], Mohammad Babaakbari[3]

1-Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2-Ph.D. Candidate, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3-Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Received:2026-04-13 Accepted:2026-09-22
Revised:2026-06-08 Published online:2026-09-21
* Corresponding author: ojaghlou@znu.ac.ir

ARTICLE INFO

***Keywords*:**
Application efficiency,
Improvement,
Irrigation scheduling,
Potato,
Water productivity,
Zanjan.

ABSTRACT

Introduction

A considerable portion of Iran is situated within arid and semi-arid climatic zones, receiving an average annual precipitation of roughly 250 mm—approximately one-third of the global mean. Much of this rainfall occurs outside the primary agricultural growing periods, creating substantial challenges for the agricultural sector, which accounts for more than 90% of the nation's total water consumption. In recent years, limited water availability has intensified difficulties in meeting agricultural demands. Addressing this scarcity necessitates the optimal and efficient use of existing water resources, particularly in farming. Enhancing water use efficiency requires systematic monitoring of farm-level productivity and the implementation of practical, site-specific measures that can be readily adopted by farmers. Zanjan Province, similar to many regions across Iran, has recently experienced severe drought and declining water availability, with groundwater levels dropping sharply due to excessive withdrawal and insufficient recharge. Given that potatoes are both highly water-demanding and widely cultivated in the region, a detailed evaluation of water use efficiency is essential for introducing effective improvement strategies. Accordingly, this study assessed key indicators of water productivity on potato farms located in the plains of Zanjan, Soltanieh, and Khodabandeh. In the subsequent phase, simple and practicable solutions—such as irrigation management techniques were proposed and implemented to enhance water use efficiency on the studied farms.

Materials and Methods

Zanjan Province, located in northwestern Iran, covers approximately 22,164 km^2 and is classified as a semi-arid region according to the Demarton climate classification system. The province experiences an average annual temperature ranging between 9 °C and 17 °C and receives about 303 mm of precipitation per year. Among the main irrigated crops cultivated in Zanjan province, potatoes occupy a prominent

How to cite:
Ojaghlou, H., Ghorbanian, M., Babaakbar, M. (2026). *Analysis of Water Productivity in Potato Cultivation and Evaluation of Optimal Irrigation Management Scenarios in Zanjan Province*. Journal of Hydraulics and Water Science, 36 (2):45-62.
https://doi.org/10.22034/hws.2026.71640.1054

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

position, with an estimated cultivation area of 6,544 ha in terms of both farmed area and production. In the phase 1, 12 potato farms were randomly selected across the province to ensure adequate spatial distribution. The majority of potato farms in Zanjan employ sprinkler irrigation systems, while a smaller proportion utilize surface or drip methods. Accordingly, eleven of the selected experimental farms used sprinkler irrigation, and one applied a drip irrigation system. During the phase 2, improvement strategies were implemented on two of the selected farms. Each farm was divided into two units: one operated by the farmer practices (representing real farm conditions) and the other managed under improved conditions (representing controlled farm conditions). The principal improvement involved implementing an irrigation scheduling plan tailored to the actual water requirements of the crop. Key productivity indicators including seasonal water consumption, crop yield, and relevant economic parameters were collected. Subsequently, water productivity indices such as AE, CPD, BPD and NBPD were determined to evaluate the effectiveness of the applied agronomic practices.

Results and Discussion

The mean water consumption among the potato farms was calculated 10,392 $m^3\ ha^{-1}$. The net irrigation water requirements of potato are 7,120 $m^3.\ ha^{-1}$ in the Zanjan–Soltaniyeh plain and 6,530 $m^3.\ ha^{-1}$ in the Khodabandeh (Gheydar) plain; thus, all farms exceeded the prescribed water requirement. The average application efficiency across the farms was 67.2%. The farm using a drip irrigation system achieved an efficiency of 79%, approximately 13 percentage points higher than the mean efficiency of sprinkler systems (66%). Potato yields ranged from 29.1 to 60.6 t ha^{-1}, with an average yield of 40.95 t ha^{-1}. Evaluation of the yield–water use relationship indicated that the optimal water consumption range for attaining a desirable yield of about 40 t ha^{-1} lies between 9,000 and 10,500 $m^3\ ha^{-1}$. Net benefit varied widely among farms, from 175 to 664 million rials per hectare, with an average of 338 million rials per hectare. In the second phase, irrigation performance and both physical and economic productivity were examined under conventional farmer management and improved (controlled) treatments. A deficit-irrigation strategy was implemented by reducing seasonal irrigation water depths by 15–20%. Under controlled conditions, deficit irrigation resulted in water savings of 19% and 17% on farms 201 and 202, respectively, relative to their corresponding farmer-managed plots. The CPD index for the study farms ranged from 2.25 to 6.91 kg m^{-3}, with an average of 4.10 kg m^{-3}. Implementing the revised irrigation schedule increased CPD values by 17.1% and 22.5% for farms 201 and 202, respectively, compared with their existing conditions. Similarly, the BPD index increased by 16.9% and 22.6% in the controlled plots due to reduced water consumption. A statistically significant difference at the 1% level was detected between controlled plots and conventional farm practices, confirming the effectiveness of the improved irrigation program in reducing water losses.

Conclusions

Based on field experiments data, a consistent pattern of over-irrigation was observed, with water application exceeding crop requirements at various growth stages. This excessive irrigation negatively affected both the physical and economic dimensions of water productivity. Key contributing factors to this problem were identified as: a deficiency in farmers' knowledge of crop water demands and irrigation scheduling principles; the adherence to conventional, fixed irrigation schedules rooted in traditional practices; insufficient regulatory oversight concerning the optimal and legal extraction of groundwater resources; a strong inclination to fully utilize allocated water rights; and consequently, a diminished incentive for adopting water-efficient irrigation methodologies. The second phase of the study demonstrated that optimizing irrigation programming and employing controlled deficit irrigation strategies on experimental farms significantly reduces water consumption while simultaneously improving physical and economic productivity indices.

Keywords: Application efficiency, improvement, irrigation scheduling, monitoring, productivity

نشریه
دانش آب و هیدرولیک
شاپا الکترونیکی:3092-6114
درگاه نشریه: https://hws.tabrizu.ac.ir/

مقاله پژوهشی

تحلیل بهره‌وری آب در کشت سیب‌زمینی و ارزیابی سناریوهای بهینه مدیریت آبیاری در استان زنجان

حسن اوجاقلو[1]، محمد قربانیان[2]، محمد بابااکبری[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۸ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰

۱-دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.
۲-دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.
۳-دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

چکیده

در پژوهش حاضر، وضعیت موجود بهره‌وری مصرف آب در مزارع سیب‌زمینی پایش شد. در مرحله بعد، راهکارهای ساده و عملیاتی به‌منظور بهبود شاخص‌های بهره‌وری آب مصرفی مورد ارزیابی قرار گرفت. اندازه‌گیری‌های میدانی در دو فصل زراعی در ۱۲ مزرعه سیب‌زمینی واقع در شهرستان‌های زنجان، سلطانیه و خدابنده استان زنجان انجام گرفت. عوامل مرتبط با بهره‌وری نظیر حجم آب مصرفی، عملکرد محصول و پارامترهای اقتصادی تعیین شد. کمترین و بیشترین مقدار حجم آب مصرفی به‌ترتیب ۶۹۰۱ و ۱۵۴۸۰ و به‌طور میانگین ۱۰۳۹۲ مترمکعب بر هکتار اندازه‌گیری شد. راندمان کاربرد آب بین ۵۰ تا ۸۱ درصد متغیر بود. مدیریت آبیاری عامل مهم در بوجود آمدن اختلاف قابل توجه بین حجم آب مصرفی و راندمان کاربرد آب در مزراع شناخته شد. میانگین شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی مصرف آب (CPD)، بهره‌وری اقتصادی شامل سود ناخالص (BPD) و سود خالص (NBPD) به ازای هر مترمکعب به‌ترتیب ۴/۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۸۸/۲ و ۳۴/۳ هزار ریال بر مترمکعب به‌دست آمد. اصلاح برنامه آبیاری منجر به کاهش مصرف آب و بهبود شاخص CPD به میزان تا ۲۲/۵ و شاخص NBPD تا ۲۱ درصد شد. بر اساس نتایج بدست آمده از پایش وضع موجود بهره‌وری در سال اول تحقیق، عمق آب آبیاری در تمام مزارع بیشتر از نیاز آبی خالص در طول فصل رشد بود. بر این اساس، اصلاح مدیریت آبیاری به عنوان راهکار اصلی بهبود بهره‌وری مصرف آب شناخته شد به طوری که اجرای راهکار اصلاح برنامه آبیاری منجر به کاهش قابل ملاحظه حجم آب مصرفی و ارتقای شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب گردید.

کلمات کلیدی: بهبود، برنامه آبیاری، پایش، راندمان کاربرد آب، عملکرد

This is an open-access article under the CC BY NC license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

امروزه افزایش شدید بحران آبی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان از جمله کشور ایران از یک سوء و رشد روزافزون جمعیت کشور و به‌تبع آن افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی از سوی دیگر، لزوم بهبود بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی را به‌منظور داشتن کشاورزی پایدار در کانون توجه‌ها قرار داده است (Haghjou, 2025). مساحت عمده‌ای از کشور ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارای میانگین بارش سالیانه ۲۵۰ میلی‌متر معادل یک‌سوم متوسط بارش سالیانه در جهان واقع می‌باشد؛ این در حالی است که بخش اصلی این بارش‌ها در فصول غیر زراعی رخ می‌دهد. این عوامل سبب شده‌است که بخش کشاورزی با چالش اساسی تأمین آب از منابع آبی محدود مواجه شود (Hassanli et al., 2009; Masomi et al., 2015; Afshar et al., 2020). مواجهه با بحران کم‌آبی نیازمند مدیریت بهینه منابع محدود آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی که به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب شیرین است. منظور از بهبود بهره‌وری مصرف آب، افزایش عملکرد محصول در ازای بهینه نمودن آب مصرفی برای تولید می‌باشد. به‌عبارت دیگر هدف از بهبود بهره‌وری مصرف آب، افزایش درآمد حاصل از تولید، از طریق بهبود عملکرد محصول و استفاده مؤثرتر از منابع آبی موجود است (Howell, 2001; Kjine et al., 2003; Bacon, 2004; Zwart and Bastiaanssen, 2004; Qureshi et al., 2011; Heydari, 2014; Scheierling et al., 2016; Koech & Langat, 2018; Ojaghlou et al., 2023b). ارتقای شاخص بهره‌وری مصرف آب نیازمند پایش دقیق وضع موجود بهره‌وری در سطح مزارع و سپس ارائه راهکارهای عملی مناسب، منطبق بر شرایط مزرعه و دارای قابلیت اجرایی برای کشاورزان می‌باشد (Ojaghlou et al., 2023a, Reyhani Jabozi et al., 2025). پایش وضعیت موجود بهره‌وری و ارئه راهکارهای عملی بهبود آن، هدف پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور بوده است (Fall Soleiman and Javan, 2008; Liu et al., 2008; Vazifedoust et al., 2008; Bossio et al, 2010; Karam et al., 2011; Kang et al, 2017; Nazari et al., 2018; Mohammadi et al., 2021; Ojaghlou et al., 2022; Bluemling et al, 2007; Drechsel et al, 2022). در سالیان اخیر، استان زنجان همانند بسیاری از استان‌های ایران با بحران خشک‌سالی و کاهش منابع آب قابل دسترس مواجه بوده است (Anonymous, 2017). منابع آب زیرزمینی استان زنجان در نتیجه برداشت بی‌رویه و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها با افت قابل‌توجه سطح آب زیرزمینی و تشدید بحران منابع آب مواجه شده‌اند؛ به طوری‌که طبق آمار شرکت مدیریت منابع آب ایران، با برداشت ۲/۲ برابر بیشتر از سقف حجم برداشت پیش‌بینی شده دارای بیلان آبی منفی می‌باشند (Anonymous, 2017). با توجه به نیاز آبی نسبتاً بالای محصول سیب‌زمینی و سطح زیرکشت قابل‌توجه آن در استان زنجان، پایش بهره‌وری مصرف آب در این محصول به‌منظور شناسایی راهکارهای مدیریتی برای بهبود مصرف آب ضروری است. استان زنجان با اختصاص ۱۰۶۴۳ هکتار از اراضی زراعی خود به کشت انواع سیب‌زمینی، حدود ۷/۲ درصد از کل اراضی تحت کشت این محصول در کشور را به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر با مجموع تولید سالیانه ۴۰۳ هزار تن انواع ارقام سیب‌زمینی، ۷/۶ درصد از مجموع تولید سیب‌زمینی کشور را در اختیار دارد و از این حیث در جایگاه هشتم قرار گرفته است (Anonymous, 2025). ارائه راهکار برای بهبود شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب و ارتقای کمی و کیفی شاخص‌های تولید محصول سیب‌زمینی تحت تیمارها و روش‌های متفاوت، موضوع بسیاری از پژوهش‌های انجام شده توسط محققان داخلی و خارجی بوده است (Kar & Kumar, 2007; Ebrahimipak & Pazira, 2009; Badr et al., 2012; Yactayo et al., 2013; Carli et al., 2014; El Mokh et al., 2014; Ahmadvand et al., 2016; Fandika et al., 2016; Haghighati et al., 2016; Zin El-Abedin et al., 2017; Li et al., 2018; Zhou et al., 2018; Chen et al., 2019; Elhani et al., 2019; Shafaroodi et al., 2019; Ansari et al., 2020; Ierna & Mauromicale, 2020; Mattar et al., 2021). مطالعه‌ای به‌منظور تعیین میزان اثر روش‌های آبیاری جویچه‌ای و قطره‌ای و همچنین سطوح مختلف کاربرد کودهای پتاسیم بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب محصول سیب‌زمینی در منطقه ابوغریب بغداد واقع در کشور عراق انجام دادند. شاخص بهره‌وری مصرف آب از ۷/۹ (کیلوگرم در مترمکعب) در روش جویچه‌ای به ۱۱/۵ (کیلوگرم در مترمکعب) برای روش قطره‌ای افزایش یافته‌است. استفاده از کم‌آبیاری یکنواخت به میزان ۲۵ درصد در طول دوره رشد، به‌عنوان یک تکنیک مدیریتی مناسب برای صرفه‌جویی در آب مصرفی بدون کاهش عملکرد محصول سیب‌زمینی در شمال شرق اتیوپی پیشنهاد شد (Kifle and Gebretsadikan, 2016). Gebremariam et al. (2018) مطالعه را با هدف بررسی نیاز آبی محصول، بهبود کارایی مصرف آب و عملکرد سیب‌زمینی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در مناطق شمالی اتیوپی انجام دادند. نتایج نشان داد، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب سیب‌زمینی به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر عمق آب کاربردی قرار دارد. تیمار دارای آبیاری معادل ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه (اعمال ۳۰ درصد کم‌آبیاری) بهینه‌ترین عملکرد را از لحاظ برآیند توأمان تولید و بهره‌وری مصرف آب ثبت نمود. در تحقیقی، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب محصول سیب‌زمینی در دو روش آبیاری بارانی و قطره‌ای نواری مورد مقایسه قرار گرفت. عملکرد محصول در روش آبیاری بارانی ۴۲ درصد کمتر از

عملکرد آبیاری قطره‌ای نواری گزارش شد (Molaei et al., 2015). Joleini et al. (2022) حجم آب مصرفی، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب محصول سیب‌زمینی را در استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار دادند. میانگین حجم آب مصرفی در مزارع استان برابر ۱۱۸۸۵ (مترمکعب در هکتار)، میانگین عملکرد ۴۰۳۹۹ (کیلوگرم در هکتار) و میانگین بهره‌وری مصرف آب برابر ۳/۴۲ (کیلوگرم در مترمکعب) گزارش شد. Baghbanyan et al. (2020) شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب محصول سیب‌زمینی (CPD، BPD و NBPD) را در شهرستان سقز استان کردستان به ترتیب ۵/۶۲ (کیلوگرم بر مترمکعب)، ۳۹۰۰۰ و ۱۴۲۰۰ (ریال بر مترمکعب) گزارش نمودند. Mastalizadeh et al. (2020) مطالعه‌ای را با هدف بررسی اثر روش‌های مختلف آبیاری و ارقام مختلف گیاهی بر بهره‌وری مصرف آب محصول سیب‌زمینی انجام دادند. تیمار با روش آبیاری بارانی و رقم سانته با بهره‌وری ۵/۹۳ (کیلوگرم بر مترمکعب) به‌عنوان بهترین تیمار از لحاظ شاخص بهره‌وری مصرف آب شناخته شد.

با توجه به وقوع بحران کمبود آب در اکثر حوضه‌های آبریز کشور از جمله حوضه آبریز سفیدرود، مدیریت بهتر منابع آبی و بهینه‌سازی مصارف به‌خصوص در بخش کشاورزی به یک ضرورت تبدیل شده‌است. لذا بررسی وضع موجود و ارائه راهکارها به منظور مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی و به خصوص محصولات آب‌بر نظیر سیب‌زمینی ضروری است. محققین پیشین عموماً مطالعاتی را به‌صورت متمرکز و نقطه‌ای، مبتنی بر تیمارهای مختلف نظیر روش آبیاری، مدیریت آبیاری، مدیریت تغذیه‌ای (به‌کارگیری سطوح مختلف سم و کود) و تنوع ارقام مختلف گیاهی با هدف تعیین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب محصول سیب‌زمینی انجام داده‌اند. با این حال مطالعه و پایش میدانی در مقیاس دشت‌های مختلف یک استان به‌منظور بررسی بهره‌وری مصرف آب محصول سیب‌زمینی، تغییرات مکانی بهره‌وری تعیین عوامل اثرگذار بر آن، ارائه و اجرای راهکارهای عملی و در نهایت جمع‌بندی نتایج با اطلاعات کافی میدانی ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، وضعیت شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب در مزارع سیب‌زمینی واقع در دشت‌های زنجان، سلطانیه و خدابنده واقع در استان زنجان پایش شد. سپس در مرحله دوم تحقیق، راهکارهای ساده و عملی نظیر اصلاح مدیریت آبیاری به منظور بهبود بهره‌وری مصرف آب در مزارع پایش شده ارائه واجرا شد. مطالعه و ارزیابی راهکارهای اجرایی ساده نظیر مدیریت آبیاری با هدف ارتقای بهره‌وری مصرف آب در مقیاس مزرعه‌ای و گسترده و با در نظر گرفتن تغییرات مکانی در سطح یک استان، زمینه‌ای پژوهشی می‌باشد که به‌صورت خیلی محدود مورد توجه محققان قرار گرفته است.

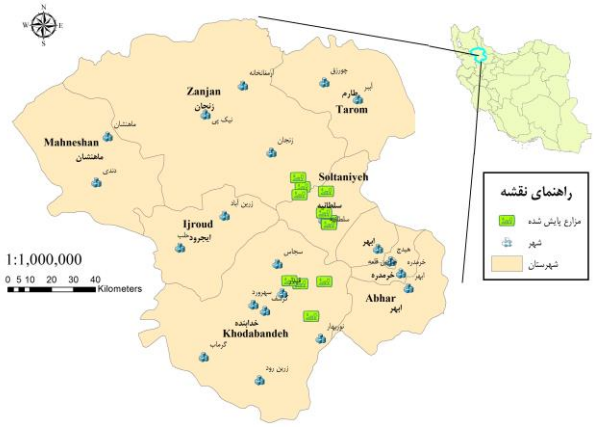
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان زنجان در شمال‌غرب ایران واقع در مختصات جغرافیایی بین ´ ۳۳ °۳۵ تا ´ ۱۵ °۳۷ عرض شمالی از خط استوا و ´ ۱۰ °۴۷ تا ´ ۲۶ °۴۹ طول‌شرقی از نصف‌النهار مبدأ می‌باشد. وسعت استان زنجان ۲۲۱۶۴ کیلومتر مربع بوده که پست‌ترین نقطه داخل استان با ارتفاع ۳۰۰ متر در منطقه طارم و بلندترین قله آن با ارتفاع ۲۹۰۰ متر در کوه‌های تخت‌سلیمان از ارتفاعات شهرستان ماهنشان قرار دارد (Anonymous, 2021). بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، استان زنجان دارای اقلیم نیمه خشک است. با استفاده از آمار و اطلاعات هواشناسی ۳۰ سال اخیر، میانگین سالیانه دمای هوا بین ۹ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد و میانگین سالیانه بارش برابر ۳۰۳ میلی‌متر برای استان زنجان برآورد شد. این استان در حوضه آبریز سفیدرود واقع شده و حوضه رودخانه قزل اوزن بزرگ‌ترین حوضه آبریز آن می‌باشد. شکل (۱) منطقه مورد بررسی مطالعه حاضر را نمایش می‌دهد.

۲-۲- مشخصات مزارع آزمایشی

بر اساس مقادیر سطح کشت و میزان تولید محصول سیب‌زمینی که در بخش قبل ارائه شد، این محصول یکی از تولیدات شاخص کشاورزی استان زنجان محسوب می‌شود. برای اجرای تحقیق در سال اول، تعداد ۱۲ مزرعه سیب‌زمینی دارای توزیع مکانی مناسب به‌صورت تصادفی در اراضی کشاورزی استان انتخاب گردید (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت مزارع آزمایشی واقع در استان زنجان (دشت‌های زنجان، سلطانیه و خدابنده)

Figure 1. Location of the experimental farms in Zanjan Province (Zanjan, Soltaniyeh and Khodabandeh plains)

چهار مزرعه در شهرستان زنجان با مجموع مساحت ۵/۲۹ هکتار، چهار مزرعه در شهرستان سلطانیه با مساحت ۳۶/۶ هکتار و چهار مزرعه در شهرستان خدابنده با مساحت ۲۵/۱۷ هکتار، واقع‌شده‌اند. مساحت مزارع با استفاده از دستگاه GPS اندازه‌گیری شد. مزارع سیب زمینی در استان زنجان عمدتا با روش بارانی کلاسیک و تعداد کمی نیز با سایر روش ها نظیر سطحی و یا قطره‌ای نواری آبیاری

می‌شوند. بنابراین روش آبیاری در ۱۱ مزرعه آزمایشی از نوع بارانی و تنها در یک مزرعه از نوع آبیاری قطره‌ای نواری بود. مزارع مورد مطالعه در ۱۲ روستای مختلف واقع شده و تحت کشت ارقام مختلف سیب‌زمینی می‌باشند که این موضوع نشانگر رعایت توزیع مکانی مناسب و تنوع ویژگی‌های فیزیکی و مدیریتی مزارع در تحقیق حاضر است. مرحله دوم مطالعه به منظور اجرای راهکارهای بهبود بهره‌وری مصرف آب انجام شد. در این مرحله، تمرکز اصلی بر ارزیابی نتایج حاصل از اجرای راهکارها بر عملکرد محصول و شاخص‌های بهره‌وری مصرف بود. راهکارهای اصلاحی برای دو مزرعه منتخب در سال دوم زراعی اعمال گردید. مساحت مشخصی از مزرعه انتخاب شده تحت مدیریت کشاورز (شرایط واقعی مزرعه) و سطح مشخصی نیز تحت اعمال راهکارهای بهبود (شرایط مزرعه‌ای کنترل‌شده) قرار داشت. مهمترین راهکار اصلاحی شامل برنامه آبیاری تدوین شده و متناسب با نیاز آبی واقعی محصول بود. با توجه به حقابه مشخص و ثابت مزارع و به منظور قابل فهم بودن مدیریت آب در مزرعه برای کشاورز، اصلاح تعداد ساعت آبیاری به‌عنوان پارامتر مطلوب جهت اعمال مدیریت آبیاری در قطعات کنترل‌شده برگزیده شد. از سوی دیگر با توجه به پایش خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع در مرحله اول پژوهش، برنامه تغذیه متناسب با خصوصیات شیمیایی خاک مزرعه، اعمال شد. در جداول (۱) و (۲) اطلاعات مربوط به مزارع مورد بررسی در فازهای اول و دوم مطالعه و در جداول (۳) و (۴) نیز پارامترهای کمی و کیفی منابع آب و خاک مزارع مورد مطالعه ارائه شده است. در جدول (۵) مشخصات برنامه آبیاری اعمال شده در فاز دوم تحقیق ارائه شده‌است.

جدول ۱- مشخصات مزارع سیب‌زمینی (فاز اول مطالعه)

Table 1. Characteristics of the Potato farms- phase 1

کد مزرعه	نام منطقه	موقعیت	مساحت (هکتار)	رقم	دبی ورودی (لیتر در ثانیه)	روش آبیاری
Farm Code	Name of location	Location	Area (ha)	Cultivar	Inflow rate (lit s^{-1})	Irrigation method
101	Nimavar	(292557, 4048760)	0.94	Bamba	10.1	Sprinkler
102	Kheirabad	(303203, 4046664)	1.21	Agria	36.0	Sprinkler
103	Dizajabad	(290402, 4052980)	0.86	Milva	15.8	Sprinkler
104	Nimavar	(291074, 4045190)	2.28	Jily-Boron	25.0	Sprinkler
105	Soltanieh	(304810, 4033350)	5.78	Agria	26.6	Sprinkler
106	Soltanieh	(304389, 4031920)	11.4	Agria (SE-E)	16.8	Sprinkler
107	Soltanieh	(304519, 4031530)	12.7	Agria (E)	8.4	Trickle-Tape
108	Soltanieh	(302301, 4036770)	6.72	Agria (SE-E)	13.4	Sprinkler
109	Nazargholi	(291449, 4004400)	3.52	Bamba-Jily	10.2	Sprinkler
110	Gavandareh	(286456, 4005750)	1.51	Bamba	14.4	Sprinkler
111	Topghareh	(302468, 4005416)	19.2	Jily	27.9	Sprinkler
112	Aliabad	(296408, 3989470)	0.94	Bamba	24.0	Sprinkler

جدول ۲- مشخصات مزارع سیب‌زمینی (فاز دوم مطالعه)

Table 2. Characteristics of the Potato farms- phase 2

کد مزرعه	نام روستا	موقعیت	مساحت (هکتار)	رقم	دبی ورودی (لیتر در ثانیه)	روش آبیاری	نوع آبپاش
Farm Code	Name of village	Location	Area (ha)	Cultivar	Inflow rate (lit s^{-1})	Irrigation method	Sprinkler Type
201	Soltanieh	(305387, 4033291)	4.20	Agria	26.0	Sprinkler	Komet
202	Soltanieh	(304728, 4033298)	3.02	Agria	26.0	Sprinkler	Ambo

جدول ۳- مشخصات کیفی منابع آب مزارع سیب‌زمینی پایش شده

Table 3. Qualitative characteristics of water resources in monitored potato farms

کد مزرعه	شوری	اسیدیته	سدیم	کلسیم	منیزیم	کلر	سولفات	بی‌کربنات	کربنات	نسبت جذب سدیم
Farm Code	E.C mics cm^{-1}	PH	Na^{+} meq l^{-1}	Ca^{++} meq l^{-1}	Mg^{++} meq l^{-1}	cl^{-} meq l^{-1}	so4- meq l^{-1}	Hco3-- meq l^{-1}	$CO3^{--}$ meq l^{-1}	S.A.R
101	526	7.46	1.55	2.60	0.95	0.58	1.20	3.40	0.00	1.16
102	423	1.55	1.22	1.19	1.44	0.22	1.30	2.5	0.00	1.06
103	447	7.75	2.60	0.40	0.59	2.40	0.80	0.50	0.00	3.70
104	486	4.52	1.71	2.55	0.95	0.60	1.27	3.45	0.00	1.29
105	487	7.76	1.04	1.35	2.40	0.45	0.38	3.70	0.00	0.76
106	638	7.82	3.70	0.64	0.69	3.10	1.35	0.50	0.00	4.53
107	490	7.76	1.05	1.40	2.40	0.50	0.41	3.90	0.00	0.76

108	811	7.74	4.50	0.45	1.28	4.11	1.60	0.80	0.00	4.84
109	498	7.31	1.21	1.94	2.50	0.70	1.55	2.95	0.00	0.81
110	405	7.55	0.50	2.15	1.60	0.24	0.23	3.85	0.00	0.37
111	386	7.71	0.35	2.60	1.30	0.24	0.10	3.60	0.00	0.25
112	880	7.24	2.45	3.00	2.25	0.85	2.65	5.55	0.00	1.51

جدول ۴- مشخصات کمی و کیفی منابع خاک مزارع سیب‌زمینی پایش شده

Table 4. Quantitative and qualitative characteristics of soil resources in monitored potato farms

کد مزرعه	بافت	رطوبت ظرفیت زراعی	اسیدیته	شوری	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	ماده آلی	آهک
Farm Code	Texture	Soil Moisture at FC Point (%)	PH	E.C ($ds\ m^{-1}$)	Available K ppm	Available P ppm	N (%)	O.M (%)	T.N.V (%)
101	sandy clay loam	19	7.71	1.88	196	7.6	0.160	1.81	20.50
102	sandy clay	26	6.72	2.41	242	15.8	0.210	2.95	9.90
103	silty clay	26	7.46	2.25	261	15.8	0.260	2.95	17.85
104	sandy clay loam	25	7.71	1.26	259	10.1	0.220	2.51	16.30
105	sandy clay	24	7.52	1.13	240	7.7	0.160	1.34	16.80
106	Silty Clay Loam	23	7.63	1.45	179	9.6	0.210	2.42	9.70
107	silty clay loam	22	7.80	1.23	172	10.2	0.110	2.61	18.00
108	silty loam	23	7.80	1.15	140	13.0	0.100	2.60	21.20
109	silty clay	0.26	7.71	1.99	236	9.1	0.180	2.11	10.10
110	silty clay loam	22	7.87	1.25	274	13.7	0.210	2.41	7.90
111	silty clay loam	23	7.74	1.32	176	10.7	0.210	2.33	18.90
112	silty clay	26	7.54	1.10	229	12.7	0.240	2.73	22.80

جدول ۵- مشخصات برنامه آبیاری اعمال‌شده در مزارع آزمایشی فاز دوم مطالعه

Table 5. Specifications of irrigation program implemented in the experimental farms- phase 2

کد مزرعه	شرایط مزرعه	بخش	زمان پس از کاشت (روز)	دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	فواصل آبیاری (روز)	تعداد نوبت آبیاری	زمان آبیاری (ساعت)	عمق آبیاری (میلی‌متر)
Farm Code	Farm type	Section	Time after planting (day)	Inflow discharge ($l\ s^{-1}$)	Irrigation intervals (day)	Irrigation events	Irrigation time (hr)	Irrigation depth (mm)
201	شرایط واقعی Actual conditions	1	0	26.0	-	1	35	78.00
		2	15	26.0	-	1	14	31.20
		3	30	26.0	-	1	21	46.80
		4	30-100	24.5	7	10	32	67.20
		5	105	24.5	-	1	18	37.80
	شرایط کنترل‌شده Control treatment	1	0	26.0	-	1	28	62.40
		2	15	26.0	-	1	14	31.20
		3	30	26.0	-	1	21	46.80
		4	30-70	24.5	7	6	28	58.80
		5	70-100	24.5	7	4	21	44.10
		6	105	24.5	-	1	14	29.40
202	شرایط واقعی Actual conditions	1	0	26.0	-	1	25	77.50
		2	15	26.0	-	1	20	62.00
		3	30	26.0	-	1	10	31.00
		4	30-100	24.5	7	10	22	64.30
		5	105	24.5	-	1	14	40.90
	شرایط کنترل‌شده Control treatment	1	0	26.0	-	1	20	60.60
		2	15	26.0	-	1	20	62.00
		3	30	26.0	-	1	10	31.00
		4	30-70	24.5	7	6	20	58.40
		5	70-100	24.5	7	4	15	43.80
		6	105	24.5	-	1	10	29.20

۳-۲- شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب

به‌منظور بررسی بهره‌وری مصرف آب در مزارع مورد مطالعه، شاخص‌های مرتبط نظیر حجم آب مصرفی، راندمان کاربرد آب، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب محاسبه گردید.

۱-۳-۲- شاخص حجم آب مصرفی

مقدار دبی ورودی به مزارع و پایش برنامه آبیاری حداقل سه مرتبه در طول دوره آبیاری به‌منظور محاسبه حجم آب مصرفی اندازه‌گیری شد. در هر نوبت آبیاری، مقدار دبی ورودی و دبی آبپاش‌ها بسته به شرایط منبع آب ورودی مزرعه از طریق روش‌های متنوع نظیر خط‌کش جت آب، دبی‌سنج اولتراسونیک، روش حجمی و دستگاه مولینه اندازه-گیری شد (شکل ۲). در روش خط‌کش جت، طول پرتاب آب خروجی از لوله با استفاده گونیای فلزی اندازه‌گیری و با توجه به قطر لوله مقدار مقدار دبی محاسبه شد. دبی‌سنج اولتراسونیک در شرایطی که سیستم آبیاری کاملا بسته بود استفاده شد. در این روش از طریق امواج صوتی، سرعت سیال داخل لوله تخمین زده شده و با در نظر گرفتن سطح مقطع لوله، مقدار دبی برآورد می‌گردد. در روش حجمی، مقدار دبی از طریق اندازه‌گیری حجم آب خروجی از آبپاش در واحد زمان تعیین شد و در نهایت دبی سیستم آبیاری از جمع دبی آبپاش‌ها بدست آمد. در مزارعی که آب از طریق کانال وارد مزرعه می‌شد، سرعت جریان با استفاده از مولینه اندازه‌گیری و سپس از حاصلضرب آن در سطح مقطع کانال، مقدار دبی محاسبه شد. دقت وسایل و دستگاه‌های اندازه‌گیری دبی قبل از شروع داده‌برداری‌های اصلی ارزیابی شد. در هر مزرعه سعی گردید حداقل با دو روش، دبی ورودی به مزرعه برآورد گردد. معمولا یکی از روش‌ها روش حجمی بود که بیشترین دقت را در بین روش‌های مستقیم دارد. شاخص حجم آب مصرفی کل در طول دوره آبیاری که از تجمیع حجم آب مصرفی در نوبت‌های مختلف آبیاری حاصل می‌شود، از طریق معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$V=3.6\sum_{i=1}^{n} Q_i \times t_i \qquad (۱)$$

در رابطه بالا، V حجم کل آب مصرفی در طول دوره آبیاری (مترمکعب)، Q_i دبی ورودی به مزرعه در آبیاری نوبت iام (لیتر بر ثانیه) و t_i مدت زمان آبیاری در نوبت iام (ساعت) است.



شکل ۲- اندازه‌گیری دبی آب در مزارع آزمایشی
الف) مولینه، ب) خط‌کش جت، ج) اولتراسونیک، د) حجمی

Figure 2. Measuring the flow discharge in the experimental farms
A) Current meter, B) Jet flow meter C) Ultrasonic Flow Meter D) Volumetric Method

۲-۳-۲- راندمان کاربرد آب

شاخص راندمان کاربرد آب (AE[1]) مبتنی بر اندازه‌گیری رطوبت خاک پیش‌از آبیاری حداقل سه مرتبه در طول دوره آبیاری از طریق رابطه (۲) برآورد شد. پارامترهای جرم مخصوص ظاهری و رطوبت حد ظرفیت زراعی پیش از آغاز عملیات مزرعه‌ای و پارامترهای رطوبت خاک قبل از آبیاری و عمق توسعه ریشه در هر نوبت به طور مستقیم مراجعه اندازه‌گیری و ثبت شد. عمق آب آبیاری نیز برای هر نوبت آبیاری به‌صورت نسبت حجم آب ورودی به مساحت مزرعه برآورد و در نهایت شاخص راندمان کاربرد آب از معادله (۲) محاسبه شد.

$$E_a=\frac{\rho_b(\theta_{(FC)}-\theta_{(i)})\times D_{rz}}{D_{app}} \qquad (۲)$$

در این رابطه، Ea راندمان کاربرد آب (درصد)، D_{app} عمق آب کاربردی (میلی‌متر)، ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، $\theta_{(FC)}$ رطوبت وزنی در حد ظرفیت زراعی (درصد)، $\theta_{(i)}$ رطوبت وزنی پیش از آبیاری نوبت iام (درصد)، و D_{rz} عمق توسعه ریشه (میلی‌متر) می‌باشد.

۳-۳-۲- شاخص بهره‌وری فیزیکی مصرف آب

شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (CPD[2]) با دخیل کردن میزان تولید به عنوان ستانده از یک سو و مقدار آب آبیاری و بارندگی در فرآیند تأمین آب موردنیاز گیاه به عنوان نهاده در سوی دیگر، از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$CPD_{(Ir+P)}=\frac{Tp}{Tw\ (Ir+P)} \qquad (۳)$$

[1] - Application Efficiency

[2] - Crop per drop

$CPD_{(Ir+P)}$ نمایانگر شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، T_p مقدار عملکرد تولیدی محصول (کیلوگرم در هکتار)، P حجم بارش مؤثر (مترمکعب) و $Tw_{(Ir+P)}$ حجم آب کاربردی (مترمکعب در هکتار) است. با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه، سهم بارش در تامین نیاز آبی محصول سیب‌زمینی ناچیز می‌باشد.

۴-۳-۲- شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی آب

در صورتی که در رابطه بهره‌وری، ستانده را درآمد تعریف نمائیم، بهره‌وری اقتصادی قابل حصول خواهد بود. مطابق رابطه (۴) از تقسیم سود ناخالص کل بر حجم آب مصرفی، شاخص (BPD[1]) بر حسب میلیون ریال بر مترمکعب به‌دست می‌آید.

$$BPD=\frac{TR}{Tw_c} \quad (۴)$$

در این رابطه، T_Rمجموع سود ناخالص به‌دست آمده از محصول (میلیون ریال) و Tw_C حجم آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) برای تولید می‌باشد. همچنین مطابق رابطه (۵)، از تقسیم سود خالص کل بر حجم آب مصرفی، شاخص (NBPD[2]) بر حسب میلیون ریال بر مترمکعب حاصل می‌شود.

$$NBPD=\frac{NB}{Tw_c} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، N_B سود خالص حاصل از فروش (میلیون ریال) و Tw_C حجم آب مصرفی (مترمکعب در هکتار) است. هزینه‌های تولید محصول به چهار دسته هزینه‌های کاشت، داشت، برداشت و هزینه‌های سایر تقسیم می‌شود. هزینه‌های کاشت از قبیل آماده‌سازی و شخم زمین، خرید اقلامی نظیر بذر، کود حیوانی و هزینه کشت بذر و... می‌باشد. هزینه‌های داشت شامل بهای حامل‌های انرژی، آب‌بها، تهیه کود و سموم موردنیاز، کارگری است. هزینه‌های برداشت نظیر اجاره ماشین‌آلات، کارگری، ملزومات بسته‌بندی و حمل و نقل به میادین فروش است. از طرفی هزینه‌های سایر مانند اجاره زمین، تعمیرات احتمالی و نگهداری سامانه آبیاری نیز به موارد فوق افزوده می‌شود. برای دستیابی به مقادیر دقیق هزینه‌کرد هر یک از مزارع مورد بررسی، اقدام به انجام مصاحبه با کشاورز و تکمیل پرسشنامه‌های طراحی شده گردید. سپس نتایج به‌دست آمده جهت صحت‌سنجی نهایی با مقادیر عرف منطقه و گزارش‌های اقتصادی سازمان جهاد کشاورزی استان مطابقت داده شد. در این پژوهش قیمت عرضه سیب‌زمینی برای سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ (به ترتیب ۸۰ و ۱۰۰ هزار ریال به ازای هر کیلو) به‌عنوان معیار محاسبه شاخص‌های اقتصادی مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب

براساس پایش‌های انجام شده برای ۱۲ مزرعه آزمایشی در مرحله اول مطالعه، پارامترهای راندمان کاربرد، حجم آب مصرف‌شده، عملکرد محصول، هزینه‌های تولید و سود خالص و ناخالص برآورد و در جدول (۴) ارائه شده‌است. میانگین حجم آب مصرف شده در مزارع مورد بررسی ۱۰۳۹۲ مترمکعب در هکتار بوده است. این در حالی است که بر اساس سند ملی نیاز آبی، مقدار نیاز آبی خالص محصول سیب زمینی در دشت زنجان – سلطانیه برابر ۷۱۲۰ مترمکعب بر هکتار و در دشت خدابنده (قیدار) معادل ۶۵۳۰ متر مکعب در هکتار گزارش شده‌است. بر این اساس در تمامی ۱۲ مزرعه مورد بررسی حجم آب ناخالص ورودی بیشتر از نیاز آبی خالص بود. با این وجود آب خالص مورد نیاز در برخی مزارع به دلیل راندمان کاربرد پایین تامین نشده بود. عواملی نظیر مساحت کشت شده بیش از مساحت استاندارد تحت پوشش منبع آب، حقابه نامتناسب و کمتر از آب مورد نیاز مزرعه و تلفات زیاد در بخش توزیع آب در مزرعه به دلایلی از جمله تبخیر و بادبردگی در سامانه‌های بارانی در کمبود تأمین نیاز آبی مؤثر بود. میانگین راندمان تأمین نیاز آبی در مزارع مورد بررسی حدود ۹۲ درصد می‌باشد. کمینه و بیشینه حجم آب مصرفی در بین مزارع به‌ترتیب ۶۹۰۱ و ۱۵۴۸۰ مترمکعب بر هکتار است که اختلاف ۲/۲ برابری بین این اعداد نمایانگر اختلاف اساسی بین روش‌های مدیریت آبیاری موجود در مزارع مورد مطالعه بود. در این خصوص عواملی نظیر عدم تناسب عرضه و تقاضای آب، ضعف حکمرانی و عدم مدیریت مناسب تقاضا و همچنین عدم مدیریت صحیح و بهینه آب در مزرعه توسط برخی از کشاورزان اثرگذار بود. مقایسه بین میانگین حجم آب مصرفی دو روش آبیاری بارانی (۱۰۵۱۵ مترمکعب بر هکتار) و قطره‌ای-نواری (۹۰۳۹ مترمکعب بر هکتار) در مزارع مورد مطالعه، اختلاف چشمگیری را نشان نمی‌دهد. راندمان کاربرد آب در مزارع مطالعه بین ۵۰ تا ۸۱ درصد متغیر بود. میانگین راندمان کاربرد آب در ۱۲ مزرعه برابر ۶۷/۲ درصد است. از میان مزارع مجهز به سامانه بارانی، راندمان کاربرد در شش مزرعه بالاتر و در پنج مزرعه پایین‌تر از مقدار میانگین بوده است. مقدار راندمان در مزرعه مجهز به سیستم آبیاری قطره‌ای نواری برابر با ۷۹ درصد برآورد شد که نسبت به میانگین راندمان کاربرد در سیستم‌های بارانی (۶۶ درصد) حدود ۱۳ درصد بیشتر می‌باشد. این نتایج تأثیر مستقیم استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری در افزایش راندمان کاربرد آب در مزرعه را مبرهن می‌نماید. با عنایت به اینکه راندمان کاربرد آب بخشی از راندمان کل مزرعه می‌باشد، نتایج به‌دست‌آمده وضعیت متوسط از لحاظ راندمان کاربرد آب آبیاری در مزارع مورد پایش را نمایان می‌سازد. کمینه، بیشینه و میانگین عملکرد محصول سیب زمینی به

[1] - Benefit per drop

[2] - Net benefit per drop

ترتیب برابر با ۲۹/۱، ۶۰/۶ و ۴۰/۹۵ تن در هکتار حاصل شد. با توجه به تجزیه و تحلیل انجام شده برای مزارع پایش شده در خصوص رابطه بین عملکرد محصول و حجم آب خالص مصرفی، محدوده بهینه از لحاظ دستیابی به مقدار محصول مناسب (حدود ۴۰ تن بر هکتار) برای حجم آب مصرفی برابر ۹۰۰۰ تا ۱۰۵۰۰ مترمکعب بر هکتار می‌باشد. حجم آب مصرفی بالاتر از ۱۰۵۰۰ متر مکعب بر هکتار در برخی مزارع نه‌تنها تضمین‌کننده افزایش ملموس عملکرد محصول نبوده بلکه کاهش تولید را به‌دلیل خفگی ریشه در پی داشته است.

مطابق نتایج جدول (۶) مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین سود خالص حاصل از فروش محصول برای مزارع مورد بررسی برابر ۱۷۵، ۶۶۴ و ۳۳۸ میلیون ریال در هکتار به‌دست آمد. سود خالص به‌دست‌آمده در مزارع دارای سامانه آبیاری بارانی به‌طور میانگین برابر ۳۴۰ میلیون ریال در هکتار و در مزرعه دارای سامانه قطره‌ای-نواری برابر ۳۱۲ میلیون ریال در هکتار می‌باشد.

جدول ۶- حجم آب مصرفی، راندمان کاربرد، عملکرد محصول، هزینه کل، سود ناخالص و سود خالص به‌دست‌آمده - فاز اول

Table 6. Water consumption, total product, costs, gross revenue and net income in experimental farms- phase 1

کد مزرعه	آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)	راندمان کاربرد (درصد)	عملکرد (تن در هکتار)	هزینه‌ها (میلیون ریال در هکتار)	سود ناخالص (میلیون ریال در هکتار)	سود خالص (میلیون ریال در هکتار)
Farm Code	Water consumption ($m3\ ha^{-1}$)	Application Efficiency (%)	Total product ($ton\ ha^{-1}$)	Costs ($Million\ Rials\ ha^{-1}$)	Gross revenue ($Million\ Rials\ ha^{-1}$)	Net income ($Million\ Rials\ ha^{-1}$)
101	9329	59	60.6	507.8	970	462
102	9854	71	37.7	451.1	1055	603
103	12824	75	29.1	511.6	523	220
104	12059	81	41.7	551.0	844	293
105	8711	62	37.0	483.7	925	441
106	9677	69	36.0	562.4	1008	446
107	9039	79	36.0	581.0	893	312
108	10656	60	55.0	779.4	1444	664
109	9696	69	39.0	475.2	661	186
110	6901	74	40.0	540.4	715	175
111	10483	56	44.5	544.6	810	265
112	15480	50	34.8	470.7	666	195

در مرحله دوم مطالعه، پارامترهای مرتبط با سنجش عملکرد آبیاری، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی محصول برای شرایط تحت مدیریت معمول کشاورز و تیمارهای کنترل‌شده برآورد شد (جدول ۷). به‌منظور ارتقای شاخص بهره‌وری مصرف آب، تکنیک کم‌آبیاری در مزارع انتخاب شده اجرا شد. بدین‌منظور در قطعات آزمایشی کنترل‌شده، مدیریت کم‌آبیاری از طریق کاهش حجم آب مصرفی در طول فصل کشت به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد اجرا گردید. با توجه به پیچیدگی و امکان‌پذیر نبودن ایجاد تغییر در عواملی همچون دور آبیاری و دبی ورودی مزرعه، اصلاح مدیریت آبیاری از طریق بهینه نمودن ساعات کارکرد آبیاری (اصلاح زمان شیفت‌های آبیاری) در قطعات کنترل شده انجام گرفت. براساس نتایج حاصل، کاهش ۲۰ و ۱۵ درصدی ساعات آبیاری در قطعات کنترل‌شده نسبت به شرایط واقعی مزرعه به‌ترتیب در مزارع با کدهای ۲۰۱ و ۲۰۲ منجر به کاهش حجم آب مصرفی به میزان ۱۹ و ۱۷ درصد شد. در شرایط واقعی مزرعه، تلفات نفوذ عمقی کمتر از ۱۰ درصد برآورد گردید و مهم‌ترین تلفات محتمل در این مزارع از نوع تلفات تبخیر و بادبردگی می‌باشد. با اعمال مدیریت کم‌آبیاری در قطعات آزمایشی، تلفات نفوذ عمقی کاهش یافت. بر اساس نتایج حاصل از بیلان رطوبتی خاک و همچنین عمق آب آبیاری اعمال شده، مقدار راندمان کاربرد آب در قطعات آزمایشی کنترل‌شده در مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ به‌ترتیب ۶ و ۷ درصد نسبت به شرایط واقعی مزرعه افزایش یافت. با توجه به اینکه مقدار راندمان پتانسیل سیستم آبیاری بارانی کلاسیک در شرایط آبیاری نرمال (بدون اعمال کم‌آبیاری) در حدود ۷۰ تا ۷۵ درصد می‌باشد، لذا انتظار حصول راندمان‌های حدود ۸۰ درصد در شرایط کم‌آبیاری منطقی به نظر می‌رسد. در صورتی که تلفات تبخیر و بادبردگی در منطقه کمتر می‌بود، انتظار می‌رفت دستیابی به مقادیر راندمان کاربرد آب بالاتر از ۸۰ درصد نیز در شرایط کم‌آبیاری ممکن شود. مقدار عملکرد محصول برای مزارع با کد ۲۰۱ و ۲۰۲ به‌ترتیب در قطعات آزمایشی کنترل‌شده برابر با ۴۰/۴ و ۳۵/۱ تن در هکتار و برای شرایط معمول مزرعه ۴۲/۸ و ۳۴/۵ تن در هکتار به‌دست آمد. با توجه به اعمال کم‌آبیاری در قطعات کنترل‌شده، کاهش عملکرد محصول در این تیمارها نسبت به شرایط واقعی مزرعه امری اجتناب‌ناپذیر است. بر همین اساس برای مزرعه ۲۰۱ مقدار عملکرد محصول در قطعه کنترل‌شده نسبت به شرایط واقعی حدود ۵/۶ درصد کاهش یافت. این در حالی است که در مزرعه ۲۰۲ مقدار عملکرد محصول در قطعه کنترل‌شده نسبت به شرایط واقعی ۱/۷ درصد افزایش داشته است (این افزایش از لحاظ آماری معنادار محسوب نمی‌شود). شایان‌ذکر است، عملکرد تولیدی محصول صرفاً وابسته به عامل حجم آب مصرفی نمی‌باشد و عوامل متعدد و متفاوتی از قبیل ویژگی‌های خاک و آب مزرعه، نوع و تراکم کشت، مدیریت تغذیه، مواجهه با آفات و بیماری‌ها و... نیز می‌تواند عملکرد تولیدی محصول را تحت الشعاع قرار دهد.

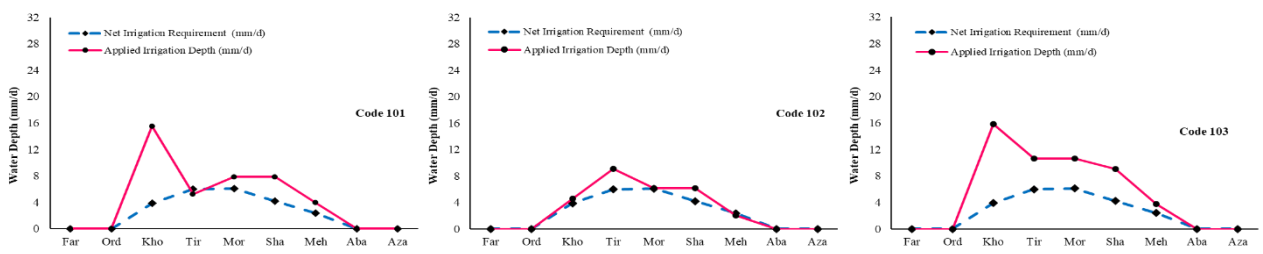
مقدار سود خالص حاصل برای شرایط قطعات آزمایشی کنترل‌شده و شرایط واقعی مزرعه در مزرعه با کد ۲۰۱، به‌ترتیب ۱۵۸۰ و ۱۷۵۰ میلیون ریال در هکتار و در مزرعه با کد ۲۰۲ به‌ترتیب ۱۴۰۲ و ۱۳۹۷ میلیون ریال در هکتار برآورد شده‌است. این نتایج نشانگر کاهش ۹/۷ و افزایش ۰/۳ درصدی سود خالص برای مزارع کد ۲۰۱ و ۲۰۲ در اثر اعمال کم‌آبیاری قطعات کنترل‌شده نسبت به شرایط واقعی مزرعه می‌باشد.

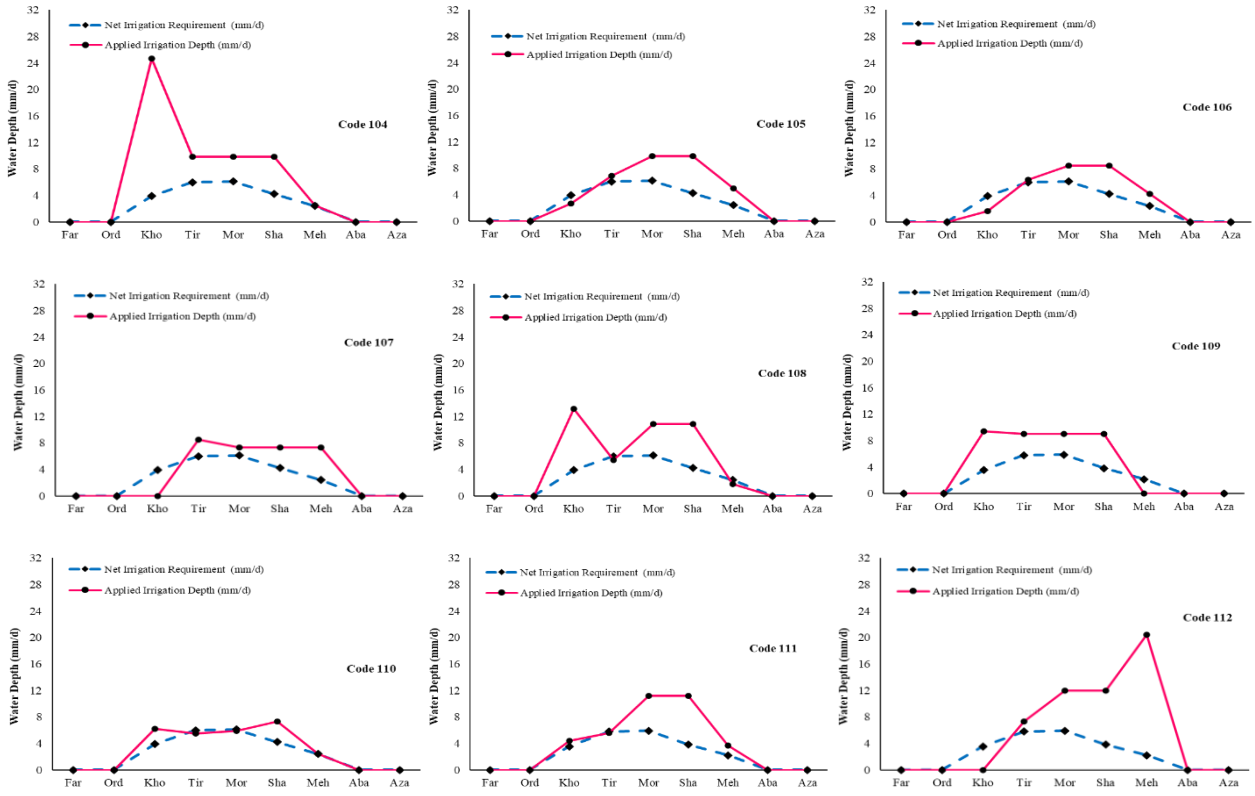
جدول ۷- حجم آب مصرفی، راندمان کاربرد، عملکرد محصول، هزینه کل، سود ناخالص و سود خالص حاصل‌شده- فاز دوم مطالعه

Table 7. Water consumption, total product, costs, gross revenue and net income in experimental farms- phase 2

کد مزرعه Farm Code	آب مصرفی (مترمکعب بر هکتار) Water consumption (m3/ha)	راندمان کاربرد (درصد) Application Efficiency (%)	عملکرد (تن در هکتار) Total product (ton/ha)	ها هزینه (میلیون ریال بر هکتار) Costs (million Rials/ha)	سود ناخالص (میلیون ریال در هکتار) Gross revenue (million Rials l/ha)	سود خالص (میلیون ریال در هکتار) Net income (million Rials /ha
201 شرایط واقعی Actual condition	8658	72.0	42.8	818.5	2568	1750
201 شرایط کنترل‌شده Control treatment	6990	78.0	40.4	843.6	2424	1580
202 شرایط واقعی Actual condition	8539	71.0	34.5	845.0	2243	1397
202 شرایط کنترل‌شده Control treatment	7084	78.0	35.1	878.0	2280	1402

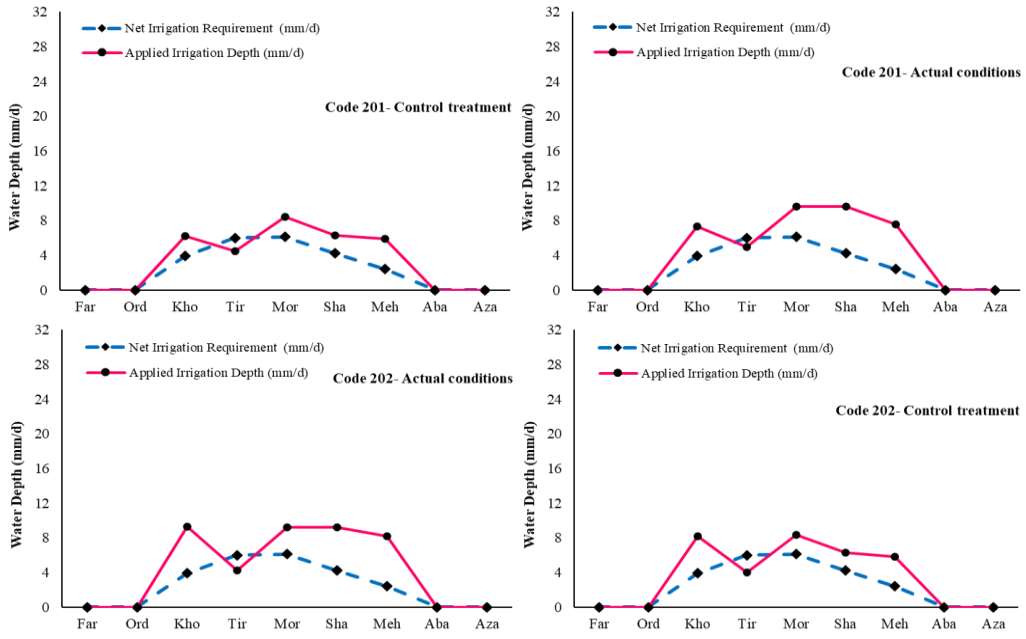
یکی از مهم‌ترین راهکارهای بهبود بهره‌وری مصرف آب و حفظ منابع آبی کاهش اختلاف و ایجاد بیشترین مطابقت بین حجم آب کاربردی و نیاز آبی خالص گیاه در سطح مزرعه است که لازمه این امر مدیریت صحیح و علمی آبیاری در سطح مزرعه می‌باشد. عدم تناسب آبیاری با نیاز واقعی مزرعه ناشی از اجرای برنامه آبیاری به‌روش سنتی است که در مطالعه حاضر نیز در بسیاری از مزارع پایش شده مشاهده می‌شود. از این رو برای درک بهتر و ارزیابی دقیق‌تر این مورد، فرآیند مقایسه نیاز آبی واقعی گیاه با عمق آب آبیاری کاربردی برای مزارع فاز اول و دوم مطالعه به‌طور جداگانه انجام شد. مقادیر عمق آب کاربردی براساس اطلاعات بدست آمده از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و محاسبات استلندارد تعیین شد و نیاز آبی واقعی گیاه با استفاده از نرم‌افزار Cropwat و به‌کارگیری داده‌هایی شامل مشخصات گیاهی، ویژگی‌های خاک و اطلاعات اقلیمی منطقه مورد مطالعه تعیین شد. نمودارهای مقایسه‌ای بین نیاز آبی خالص گیاه و عمق آب آبیاری برای تمامی مزارع آزمایشی ترسیم و در شکل‌های (۳) و (۴) نمایش داده‌شده‌است. براساس نمودارهای شکل (۳)، مقادیر عمق آب کاربردی در تمامی مزارع بیشتر از نیاز آبی خالص گیاه بوده است. به‌طور مثال، بیشترین آبیاری مازاد بر نیاز آبی انجام‌شده مربوط به مزارع با کد ۱۰۴ و ۱۱۲ بوده که به‌ترتیب در اوایل و اواخر فصل رشد به میزان ۲۰/۸ و ۱۸/۲ میلی‌متر بر روز عمق آب کاربردی بیشتری نسبت به نیاز آبی واقعی گیاه اعمال شده‌است.





شکل ۳- نمودارهای مقایسه‌ای بین نیاز آبی خالص گیاه و عمق آب کاربردی برای مزارع آزمایشی (فاز اول)

Figure 3. Comparison of net irrigation requirement and applied water depth between actual and controlled treatment- phase 1



شکل ۴- نمودارهای مقایسه‌ای بین نیاز آبی خالص گیاه و عمق آب کاربردی برای شرایط واقعی و کنترل‌شده (فاز دوم)

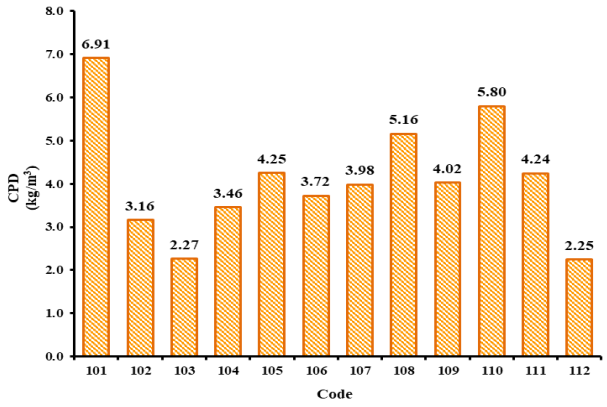
Figure 4. Comparison of net irrigation requirement and applied water depth between actual and controlled treatments-phase 2

این وضعیت در بیشتر مزارع ناشی از عدم شناخت کشاورز از نیاز آبی واقعی گیاه، اجرای برنامه آبیاری نامتوازن و ثابت در طول سال‌های متمادی، اصرار بر مصرف کامل حقابه تحت مالکیت و عدم انگیزه برای آبیاری بهینه و صرفه‌جویی در مصرف منابع آبی است. در برخی مزارع مورد بررسی، برنامه آبیاری و میزان عمق آب کاربردی در طول فصل رشد در وضعیت نسبتاً قابل قبولی قرار دارد. نمودارهای مقایسه‌ای برای بررسی تفاوت نیاز آبی خالص گیاه و عمق آب آبیاری کاربردی در شرایط واقعی و قطعات کنترل‌شده فاز دوم مطالعه در شکل (۴) ارائه

شده‌است. هدف اصلی در سناریو طراحی شده، اصلاح برنامه آبیاری و اجرای آن در قطعات کنترل‌شده به‌منظور دستیابی به یک حالت بهینه آبیاری است. با مقایسه نمودارهای مربوط به شرایط واقعی و قطعات کنترل‌شده در هر دو مزرعه مورد مطالعه، موفقیت‌آمیز بودن اعمال برنامه آبیاری اصلاح‌شده با کاهش ۱۹ و ۱۷ درصدی حجم آب مصرفی در مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ و همچنین نزدیک شدن عمق آب کاربردی به نیاز آبی واقعی گیاه تأیید می‌شود.

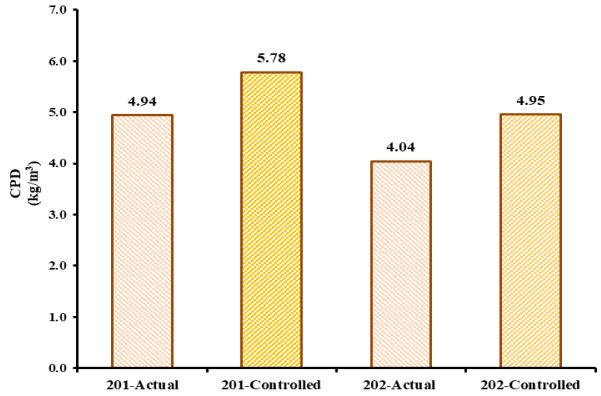
۲-۳- بهره‌وری فیزیکی مصرف آب

مقادیر محاسبه‌شده شاخص بهره‌وری فیزیکی مصرف آب (CPD) برای مزارع پایش‌شده در فاز اول تحقیق حاضر در شکل (۵) ارائه شده‌است. مقادیر این شاخص وابسته به تغییرات دو پارامتر عملکرد محصول و حجم آب مصرفی می‌باشد. به‌عبارت دیگر، حصول مقادیر بهینه شاخص مذکور مبتنی بر بهینه‌سازی مدیریت مصرف آب در مزرعه و ارتقای کمی محصول به‌دست‌آمده از طریق مدیریت تغذیه‌ای و اجرای راهکارهای به‌زراعی است. البته اثر عوامل کمی و کیفی منابع آب و خاک نیز قابل توجه بوده و لذا تحلیل همزمان تمامی پارامترهای مؤثر پیچیده‌است. مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین شاخص CPD برای مزارع مورد بررسی به‌ترتیب برابر ۲/۲۵، ۶/۹۱ و ۴/۱۰ کیلوگرم در مترمکعب به‌دست آمد. تجزیه و تحلیل همبستگی بین شاخص CPD و حجم آب مصرفی نشان از رابطه معکوس بین این پارامتر دارد. بدین صورت که در اثر افزایش حجم آب مصرفی به میزان ۱۰۰۰ مترمکعب، شاخص CPD به میزان ۰/۴ کیلوگرم در مترمکعب کاهش یافته است (شکل ۷). در نقطه مقابل افزایش عملکرد محصول به میزان یک تن بر هکتار، ارتقای شاخص بهره‌وری مصرف آب را به مقدار ۰/۱۲ کیلوگرم در متر مکعب در پی داشته است. نوع بذر مصرفی، عوامل کیفی آب و خاک، مدیریت کودی، آفت و حوادث پیش بینی نشده نظیر تغییرات اقلیمی به‌عنوان سایر عوامل مؤثر بر بهره‌وری مصرف آب مورد مطرح می‌باشند. با توجه به اینکه تفاوت عملکرد محصول در بین مزارع نسبتاً کم بود لذا میزان اثرگذاری تولید بر شاخص کارایی مصرف آب نسبت به اثرگذاری حجم آب مصرفی بر شاخص مذکور کمتر است. نتایج حاصل از مطالعه حاضر انطباق بالایی با نتایج مطالعات پیشین دارد. به‌عنوان نمونه، Joleini et al. (2022) مقادیر میانگین حجم آب مصرفی، عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب را به‌ترتیب برابر ۱۱۸۸۵ متر مکعب در هکتار، ۴۰/۴ تن در هکتار و ۳/۴۲ کیلوگرم در مترمکعب برای مزارع سیب زمینی واقع در استان خراسان رضوی که از لحاظ اقلیمی مشابه استان زنجان می‌باشد، گزارش نموده‌اند. در تحقیق Molaei et al. (2015) نیز شاخص بهره‌وری فیزیکی مصرف آب سیب زمینی را در استان اصفهان برابر با ۳/۸۳ کیلوگرم در مترمکعب گزارش شده‌است. شکل (۶) مقادیر شاخص بهره‌وری مصرف آب (CPD) برای مزارع پایش‌شده در فاز دوم تحقیق تحت شرایط واقعی مزرعه و اعمال مدیریت آبیاری اصلاح شده را نشان می‌دهد. اصلاح برنامه آبیاری منجر به افزایش ۱۷/۱ و ۲۲/۵ درصدی شاخص CPD نسبت به شرایط واقعی برای مزارع کد ۲۰۱ و ۲۰۲ گردید.



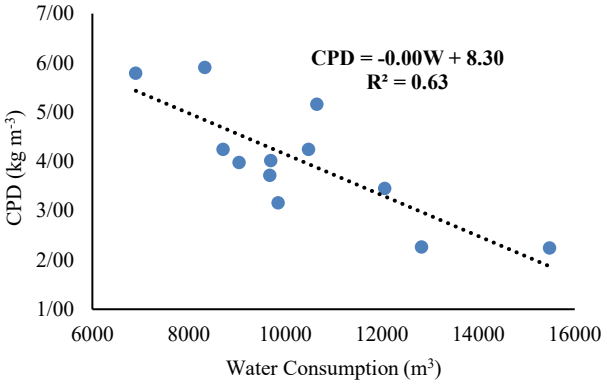
شکل ۵- مقادیر شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (CPD) برای مزارع آزمایشی (فاز اول)

Figure 5. The values of CPD indicator in experimental farms- phase 1



شکل ۶- مقادیر شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (CPD) در شرایط واقعی و کنترل‌شده (فاز دوم)

Figure 6. The values of CPD indicator in actual and controlled conditions- phase 2



شکل ۷- همبستگی بین شاخص CPD و حجم آب مصرفی

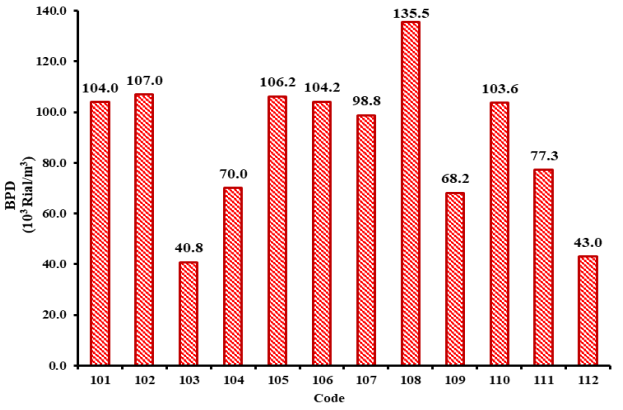
Figure 7. Correlation between the CPD index and the volume of water consumption

۳-۳- بهره‌وری اقتصادی مصرف آب

ارزیابی بهره‌وری اقتصادی مصرف آب در مطالعه حاضر از طریق محاسبه شاخص‌های (BPD) و (NBPD) صورت پذیرفت. در شکل (۸) شاخص سود ناخالص به‌ازای واحد حجم آب مصرفی (BPD) محاسبه‌شده برای مزارع مورد بررسی در فاز اول مطالعه ارائه شده‌است. حداقل و حداکثر شاخص BPD در بین مزارع به‌ترتیب برابر با ۴۰/۸ و ۱۳۵/۵ هزار ریال بر مترمکعب محاسبه شده‌است. این شاخص به‌طور میانگین در ۱۲ مزرعه مورد پایش برابر با ۸۸/۲ هزار ریال بر مترمکعب برآورد شد. مقادیر شاخص BPD به‌دست آمده برای دو مزرعه مربوط به فاز دوم تحقیق، تحت شرایط واقعی مزرعه و کنترل‌شده در شکل (۹) نشان داده‌شده‌است. ارتقای ۱۶/۹ و ۲۲/۶ درصدی شاخص BPD به‌ترتیب در قطعات کنترل‌شده مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ تحت‌تأثیر کاهش حجم آب مصرفی حاصل شد. شاخص سود خالص به‌ازای هر واحد حجم آب مصرفی (NBPD) برای ۱۲ مزرعه مورد بررسی در قالب شکل (۱۰) ارائه شده‌است. حداقل، حداکثر و میانگین شاخص NBPD برای مزارع مورد مطالعه به‌ترتیب ۱۲/۶، ۶۲/۳ و ۳۴/۳ هزار ریال بر مترمکعب برآورد گردید. تغییرات شاخص NBPD نسبت به حجم آب مصرفی، مؤید روند صعودی سود خالص با کاسته شدن حجم آب مصرفی است. بدین صورت که کاهش ۱۰۰۰ مترمکعب از حجم آب مصرفی، افزایش ۴۲۰۰ هزار ریالی شاخص NBPD را در پی داشته است. میانگین شاخص NBPD در مزارع با حجم آب مصرفی کمتر از ۱۰ هزارمترمکعب در هکتار حدود ۳۹ هزار ریال بر مترمکعب و در مزارع با حجم آب مصرفی بالاتر از ۱۰ هزارمترمکعب در هکتار، برابر با ۲۵ هزارریال بر مترمکعب محاسبه شد. این نتایج نشان‌می‌دهد دستیابی به سودآوری بهتر محصولات کشاورزی لزوماً با بالا بردن حجم آب مصرفی میسر نمی‌شود و در بیشتر موارد اثر معکوس داشته و منتج به کاهش سودآوری در عین تلفات منابع آبی محدود می‌شود. شکل (۱۱) شاخص (NBPD) محاسبه‌شده برای مزارع مورد بررسی در فاز دوم مطالعه تحت شرایط واقعی مزرعه و قطعات کنترل‌شده را نشان‌می‌دهد. افزایش ۱۲ و ۲۱ درصدی شاخص NBPD برای قطعات کنترل‌شده نسبت به شرایط واقعی در مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ حاصل‌شده است. این افزایش ناشی از کاهش حجم آب مصرفی در قطعات آزمایشی کنترل‌شده می‌باشد.

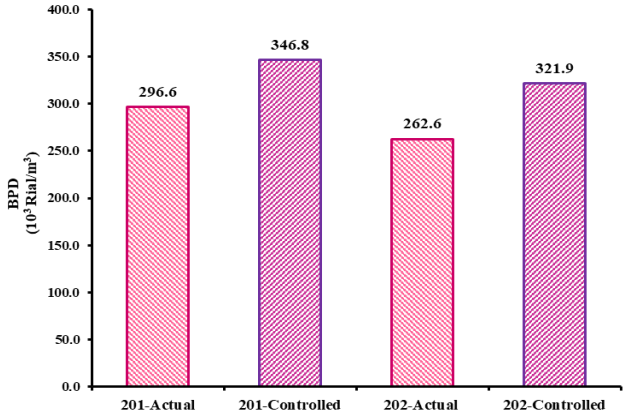
۴-۳- آزمون معنی‌داری

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری دقیق اثرات و نتایج اعمال برنامه آبیاری اصلاح‌شده بر حجم آب مصرفی و شاخص‌های CPD، BPD و NBPD در قطعات آزمایشی کنترل‌شده در قیاس با شرایط واقعی مزارع فاز دوم مطالعه، آزمون معنی‌داری با استفاده از روش آزمون T مستقل انجام شد. نتایج حاصل از آزمون معنی‌داری در جدول (۸) ارائه شده‌است. طبق این نتایج، اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بین حجم آب مصرفی قطعات آزمایشی کنترل‌شده با شرایط واقعی مزارع وجود دارد که نشان از اثر مثبت برنامه آبیاری اصلاحی در راستای جلوگیری از هدر رفت آب دارد. از سوی دیگر علی‌رغم ارتقای شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب شامل CPD، BPD و NBPD در قطعات کنترل‌شده، اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری در سطوح یک و پنج درصد با مقادیر متناظر به‌دست‌آمده در شرایط واقعی مزرعه نداشته‌اند. دلیل اصلی این موضوع عدم تغییر معنادار در عملکرد محصول بین قطعات آزمایشی و شرایط واقعی بود. کاهش حجم آب مصرفی به دلیل اصلاح برنامه آبیاری به‌عنوان گامی مؤثر و دستاوردی قابل‌اعتنا برای مطالعه حاضر در راستای بهبود وضعیت موجود مزارع و حفظ منابع آبی شناخته شد.



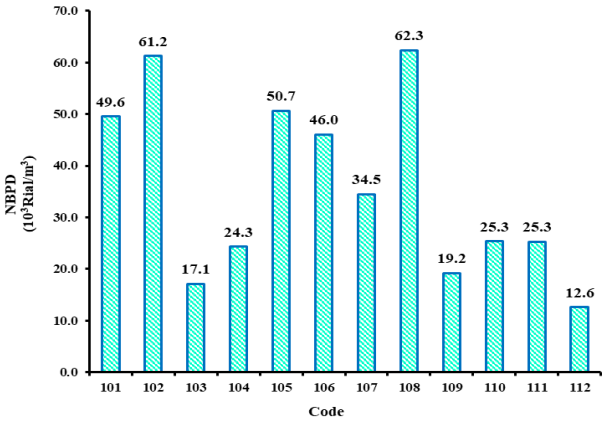
شکل ۸- مقادیر شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (BPD) برای مزارع آزمایشی (فاز اول)

Figure 8. The values of BPD indicator in experimental farms-phase 1



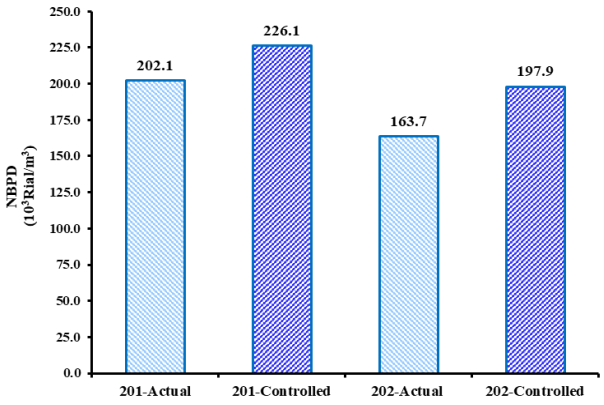
شکل ۹- مقادیر شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (BPD) در شرایط واقعی و کنترل‌شده (فاز دوم)

Figure 9. The values of BPD indicator in actual and controlled conditions- phase 2



شکل ۱۰- مقادیر شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (NBPD) به‌دست‌آمده برای مزارع آزمایشی (فاز اول مطالعه)

Figure 10. The values of NBPD indicator in experimental farms-phase 1



شکل ۱۱- مقادیر شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (NBPD) در شرایط واقعی و کنترل‌شده (فاز دوم)

Figure 11. The values of NBPD indicator in actual and controlled conditions- phase 2

جدول ۸- نتایج آزمون معنی‌داری بین شاخص‌های بهره‌وری در شرایط واقعی و کنترل‌شده

Table 8. Results of significance test between productivity indicators under actual and controlled conditions

شاخص Indicator	میانگین (Mean)		معیار انحراف(Standard deviation)		درجه آزادی Degrees of freedom	داری‌معنی Significance
	شرایط کنترل‌شده Controlled treatment	شرایط واقعی Actual Conditions	شرایط کنترل‌شده Controlled treatment	شرایط واقعی Actual Conditions		
حجم آب مصرفی Water consumption ($10^3 m^3 ha^{-1}$)	7.03	8.60	0.064	0.085	2	0.002**
CPD (kg m^{-3})	5.36	4.49	0.586	0.636	2	0.289 ns
BPD (10^3Rial m^{-3})	334.5	280.0	17.67	24.04	2	0.123 ns
NBPD (10^3Rial m^{-3})	212.0	183.0	19.79	26.87	2	0.344ns

*: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح 5% ، **: وجود اختلاف معنی‌دار در سطح 1%، ns: عدم وجود اختلاف معنی‌دار

ns No statistically significant difference, * Significance at 5% level, and ** Significance at the 1% level

۴- نتیجه‌گیری نهایی

پژوهش حاضر با هدف پایش وضعیت موجود بهره‌وری مصرف آب در مزارع سیب‌زمینی واقع در استان زنجان در قالب دو مرحله مجزا و به صورت میدانی اجرا شد. در مرحله اول وضعیت موجود شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی و در مرحله دوم ارزیابی راهکار اصلاح مدیریت آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. در بیشتر مزارع، آبیاری مازاد بر نیاز آبی واقعی گیاه در مراحل مختلف دوره رشد مشاهده شد. آبیاری مازاد علاوه بر اثر منفی بر شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی بهره‌وری مصرف آب، موجب کاهش راندمان کاربرد آب نیز شد. این وضعیت در بیشتر مزارع ناشی از عدم آگاهی کشاورز از نیاز آبی واقعی گیاه و اصول برنامه‌ریزی آبیاری، اجرای برنامه آبیاری نامتوازن و ثابت در طول سال‌های متمادی بر اساس تجارب سنتی، عدم نظارت مستمر مراجع ذی‌صلاح بر برداشت بهینه و صحیح از منابع آب زیرزمینی، اصرار بر مصرف کامل حقابه تحت مالکیت و به تبع آن عدم انگیزه برای آبیاری بهینه بود. براساس نتایج بدست آمده از مرحله دوم پژوهش، اصلاح برنامه آبیاری و به‌تبع آن اعمال کم‌آبیاری کنترل‌شده در مزارع آزمایشی می‌تواند دستاوردهای مثبتی از قبیل کاهش حجم آب مصرفی و بهبود نسبی شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی را در پی داشته‌باشد. نشر یافته‌های مطالعه حاضر در قالب دستورالعمل‌های ترویجی ساده و قابل درک برای کشاورزان مبتنی بر اصلاح روش‌های مدیریت آب در مزرعه و تطبیق مقدار آبیاری با نیاز واقعی گیاه، می‌تواند سبب برداشتن گامی مؤثر در راستای آبیاری بهینه، صرفه‌جویی در مصرف آب و تطبیق بهتر با بحران کمبود منابع آبی در راستای کشاورزی پایدار شود.

سپاس‌گزاری

مقاله ارائه شـــده برگرفته از طرح تحقیقاتی به کارفرمایی ســـازمان جهادکشـاورزی اسـتان زنجان می‌باشـد. از حمایت‌های مادی و معنوی صورت گرفته توسط آن سازمان قدردانی به عمل می‌آید.

منابع

Afshar A, Haghighatjuo P, Karandish F, Mohammadrezapour O, and Kouhestani SH, 2020. The effect of deficit irrigation on yield and water uses efficiency of several main crops in Jiroft. Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(8), 2137-2148, doi:10.22059/ijswr.2020.284116.668336. (In Persian).

Ahmadvand G, Mondani F, Dehghan Banadaki M, Hajinia S, and Eskandari B, 2016. The effect of different methods of tillage and cover crop on radiation interception and use by potato (solanum tuberosum) under Hamedan weather condition. Iranian Journal of Plant Production Technology, 16(2), 179-193, doi:10.22084/ppt.2016.1864. (In Persian)

Anonymous, Iran Water Resources Management Company, 2017. Monitoring the exploitation of water resources in Sefidroud. (In Persian).

Anonymous, Iran Ministry of Agriculture-Jahad, 2025. Agriculture statistical yearbook, Retrieved from https://zanjan.maj.ir/, (In Persian).

Anonymous, Iran Ministry of Agriculture-Jahad, 2021. Evaluation of solutions to improve agricultural water use efficiency (case study: Zanjan province). Technical report.

Harrington D, Abdo F, Adaska W, Hazaree CV, Ceylan H, and Bektas F, 2010. Guide for roller-compacted concrete pavements. National Concrete Pavement Technology Center

Ansari M.A, Egdernezhad A, and Ebrahimipak N.A, 2020. Evaluation of AquaCrop model for the simulation of potato yield and water use efficiency under different water stress values in different growth cycles. Iranian Journal of Water and Soil Science, 23, 383-394, doi:10.47176/jwss.23.4.1853. (In Persian).

Ati A.S, Iyada A.D, and Najim S.M, 2012. Water use efficiency of potato (Solanum Tuberosum L.) under different irrigation methods and potassium fertilizer rates. Annals of Agricultural Science, 57(2), 99-103, doi:10.1016/j.aoas.2012.08.002.

Bacon M.A, 2004. Water use efficiency in plant biology. Blackwell Publishing, London. doi:10.2135/CROPSCI2005.0809A.

Badr M.A, El-Tohamy W.A, and Zaghloul A.M, 2012. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region. Agricultural Water Management, 110, 9-15, doi:10.1016/j.agwat.2012.03.008.

Baghbanyan M, Emamverdi GH, Ghaderzadeh H, Daman Keshideh M, and Amin Rashti N, 2020. A survey on virtual water and sustainable productivity indices of agricultural water in major agricultural crops (A case of Saqqez city, Kurdistan Province). Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 14(3), 1046-1054. (In Persian).

Bossio D, Geheb K, and Critchley W, 2010. Managing water by managing land: Addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. Agricultural Water Management, 97(4), 536-542, doi:10.1016/j.agwat.2008.12.001.

Carli C, Yuldashev F, Khalikov D, Condori B, Mares V, and Monneveux P, 2014. Effect of different irrigation regimes on yield, water use efficiency and quality of potato (Solanum tuberosum L.) in the lowlands of Tashkent, Uzbekistan: A field and modeling perspective. Field Crops Research, 163, 90-99, doi:10.1016/j.fcr.2014.03.021.

Chen Y, Chai S, Tian H, Chai Y, Li Y, Chang L, and Cheng H, 2019. Straw strips mulch on furrows improves water use efficiency and yield of potato in a rainfed semiarid area. Agricultural Water Management, 211, 142-151, doi:10.1016/j.agwat.2018.09.048.

Drechsel P, Qadir M, and Baumann J, 2022. Water reuse to free up fresh water for higher-value use and increase climate resilience and water productivity. Irrigation and Drainage, 1–10, doi:10.1002/ird.2694.

Ebrahimipak N.A, and Pazira E, 2009. The effect of deficit irrigation in growth stages on the quantity and quality of potatoes and water use efficiency. Iranian Journal of Agricultural Engineering Research, 9(4), 17-30, doi:20.1001.1.26454531.1387.9.4.2.3. (In Persian)

El Mokh F, Nagaz K, Moncef Masmoudi M, and Ben Mechlia N, 2014. Effects of surface and subsurface drip irrigation regimes with saline water on yield and water use efficiency of potato in arid conditions of Tunisia. Journal of Agriculture and Environment for International Development, 108(2), 227-246, doi: 10.12895/jaeid.20142.258.

Elhani S, Haddadi M, Csákvári E, Zantar S, Hamim A, Villányi V, Douaik A, and Bánfalvi Z, 2019. Effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield, irrigation water-use efficiency and some potato (Solanum tuberosum L.) quality traits under glasshouse conditions. Agricultural Water Management, 224, 105745, doi:10.1016/j.agwat.2019.105745.

Fandika I.R, Kemp P.D, Millner J.P, Horne D and Roskruge N, 2016. Irrigation and nitrogen effects on tuber yield and water use efficiency of heritage and modern potato cultivars. Agricultural Water Management, 170, 148-157, doi:10.1016/j.agwat.2015.10.027.

Gebremariam H.L, Welde K, and Kahsay K.D, 2018. Optimizing yield and water use efficiency of furrow-irrigated potato under different depth of irrigation water levels. Journal of Sustainable Water Resources Management, 4, 1043-1049, doi:10.1007/s40899-018-0238-4.

Haghighati B, Bromand Nasab S, and Naseri A, 2016. Effect of deficit irrigation and partial root – zone drying on yield and water use efficiency of two

agricultural water productivity exemplified at a wheat–maize cropping pattern in the North China plain. Agricultural Water Management, 91, 11–23, doi:10.1016/j.agwat.2007.03.001.

Koech R and Langat P, 2018. Improving irrigation water use efficiency: a review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. Water, 10, 1771, doi:10.3390/w10121771.

Li Q, Li H, Zhang L, Zhang S, and Chen Y, 2018. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis. Field Crops Research, 221, 50-60, doi:10.1016/j.fcr.2018.02.017

Liu J, Zehnder A.J.B, and Yang H, 2008. Drops for crops: modelling crop water productivity on a global scale. Global Nest Journal, 10(3), 295-300, doi:10.30955/gnj.000486.

Masomi T, Rahimikhoob A, Ghorbanijavid M, and Nazarifar M.H, 2015. The effect of intermittent deficit irrigation on yield, yield components and water productivity of maize Se-704. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 4(8), 810–816. (In Persian).

Mastalizadeh B, Khajoei-Nejad GH, and Moradi R, 2020. Effect of various irrigation methods on tuber yield and water productivity of potato varieties. Iranian Journal of Journal of Plant Productions, 43(3), 431-442, doi:10.22055/ppd.2019.28244.1706. (In Persian)

Mattar M.A, Zin El-Abedin T.K, Al-Ghobari H.M, Alazba A.A, and Elansary H.O, 2021. Effects of different surface and subsurface drip irrigation levels on growth traits, tuber yield, and irrigation water use efficiency of potato crop. Irrigation Science, 39, 517-533, doi:10.1007/s00271-020-00715-x

Mohammadi F, Ojaghlou H, and Ghorbanian M, 2021. Effect of water resources utilization methods on olive water use efficiency. Iranian Journal of Water and Irrigation Management, 11(3), 643-658, doi:10.22059/jwim.2021.330311.917. (In Persian)

Molaei B, Gheysari M, Mostafazadeh Fard B, Landi E and Majidi M.M, 2015. Evaluation of yield and its characteristics for two potato cultivars in sprinkler and drip-tape irrigation methods. Iranian Journal of Water and soil sciences, 19(71), 241-250, doi:10.18869/acadpub.jstnar.19.71.241. (In Persian)

Nazari B, Liaghat A, Akbari M.R, and Keshavarz M, 2018. Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. Agricultural Water Management, 208,7-18, doi:10.1016/j.agwat.2018.06.003.

Ojaghlou H, Ojaghlou F, Ghorbanian M, Misaghi F, Nazari B, and Karami Dehkordi E, 2022. Water use efficiency in Onion production and assessment of improvement strategies. Journal of Water and Irrigation Management, 12(4), 799-820, doi:10.22059/jwim.2022.344149.998. (In Persian)

Ojaghlou H, Ojaghlou F, Jafari M.M, Misaghi F, Nazari B, and Karami Dehkordi E, 2023a. Effect of irrigation management on water productivity indicators of potato cultivars. Iranian Journal of Water and Soil, 30(3), 717-729, doi:10.22067/jsw.v30i3.42913. (In Persian)

Haghjou, M., 2025. Application of the Treatment Effect Approach in Evaluation of Government Credits for Adoption of Modern Irrigation Methods in Tabriz County. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (1):71-83. https://doi.org/ 10.22034/hws.2025.65774.1010 (In Persian with English abstract).

Hassanli A.M, Ebrahimizadeh M.A, and Beecham S, 2009. The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region. Agricultural Water Management, 96, 93–99, doi:10.1016/j.agwat.2008.07.004.

Heydari N, 2014. Water productivity in agriculture: challenges in concepts, termsand values. Irrigation and Drainage, 63(1), 22–28, doi:10.1002/ird.1816.

Howell T.A, 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. Agronomy, 93, 281-289, doi:10.2134/agronj2001.932281x.

Ierna A, and Mauromicale G, 2020. How moderate water stress can affect water use efficiency indices in potato. Agronomy, 10, 1034, doi:10.3390/agronomy10071034

Javan J, and Fal Soleiman M, 2008. Water crisis and importance of water productivity in agriculture in dry area of Iran (Case study: Birjand plain). Iranian Journal of Geography and Development, 6(11), 115-138, doi:10.22111/gdij.2008.1619. (In Persian)

Joleini M, Karimi M, and Baghani J, 2022. Investigation of applied water, yield and water efficiency of potato fields in the conditions of farmers in Razavi Khorasan Province. Iranian Journal of Journal of Water and Sustainable Development, 8(4), 51-58, doi:10.22067/jwsd.v8i4.2108.1075. (In Persian).

Kang S.Z, Hao X.M, Du T.S, Tong L, Su X.L, Lu H.N, Li X.L, Huo Z.L, Li S.E, and Ding R.S, 2017. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. Agricultural Water Management, 179, 5-17, doi:10.1016/j.agwat.2016.05.007.

Kar G, and Kumar A, 2007. Effects of irrigation and straw mulch on water use and tuber yield of potato in eastern India. Agricultural Water Management, 94, 109-116, doi:10.1016/j.agwat.2007.08.004.

Karam F, Saliba R, Skaf S, Breidy J, Rouphael Y, and Balendonck J, 2011. Yield and water use of eggplants (Solanum melongena L.) under full and deficit irrigation regimes. Agricultural Water Management, 98, 1307–1316, doi:10.1016/j.agwat.2011.03.012.

Kifle M, and Gebretsadikan T.G, 2016. Yield and water use efficiency of furrow irrigated potato under regulated deficit irrigation, Atsibi-Wemberta, North Ethiopia. Agricultural Water Management, 170, 133-139, doi:10.1016/j.agwat.2016.01.003

Bluemling B, Yang H, and Phal-Wostl C, 2007. Making water productivity operational—A concept of

Vazifedoust M, Van Dam J.C, Feddes R.A, and Feizi M, 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agricultural Water Management, 95, 89-102, doi:10.1016/j.agwat.2007.09.007.

Yactayo W, Ramírez D.A, Gutiérrez R, Mares V, Posadas A, and Quiroz R, 2013. Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency. Agricultural Water Management, 123, 65-70, doi:10.1016/j.agwat.2013.03.009.

Zhou Z, Plauborg F, Parsons D, and Neumann Andersen M, 2018. Potato canopy growth, yield and soil water dynamics under different irrigation systems. Agricultural Water Management, 202, 9-18, doi:10.1016/j.agwat.2018.02.009.

Zin El-Abedin T.K, Mattar M.A, Alazba A.A, and Al-Ghobari H.M, 2017. Comparative effects of two water-saving irrigation techniques on soil water status, yield, and water use efficiency in potato. Scientia Horticulturae, 225, 525-532, doi:10.1016/j.scienta.2017.07.044.

Zwart S.J, and Bastiaanssen W.G. M, 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. Agricultural Water Management, 69(2), 115-133, doi:10.1016/j.agwat.2004.04.007.

alfalfa. Journal of Water and Soil, 37(2), 165-185, doi:10.22067/jsw.2023.79145.1211. (In Persian)

Ojaghlou H, Jafari M.M, Ojaghlou F, Misaghi F, Nazari B, and Karami Dehkordi E, 2023b. Effect of irrigation management on water use efficiency in Tomato farms. Water and Soil Science, 33(4), 217-236, doi:10.22034/ws.2023.53855.2499. (In Persian)

Qureshi M.E, Quentin Grafton R, Kirby M, and Hanjra M.A, 2011. Understanding irrigation water use efficiency at different scales for better policy reform: a case study of the Murray-Darling Basin, Australia. Water Policy, 13, 1-17. doi:10.2166/wp.2010.063.

Reyhani Jabozi, M. Yousefi Javan, I. Naseri, M., 2025. Investigating the Impact of Subsurface Irrigation on the Quantity and Quality of Four Grape Cultivars. Journal of Hydraulics and Water Science, 35 (1):39-52. https://doi.org/10.22034/hws.2025.65973.1011

Scheierling S.M, Tréguer D.O, and Booker J.F, 2016. Water productivity in agriculture: Looking for water in the agricultural productivity and efficiency literature. Water Economics and Policy, 2(3), 1650007. doi:10.1142/S2382624X16500077.

Shafaroodi A, Gholipouri A, Zavareh M, Hassanpanah D, and Salahi B, 2019. Effect of different irrigation regimes on physiological characteristics, yield and water productivity of potato genotypes in Ardabil. Iranian Journal of Crop Production and Processing, 9(3), 75-93, doi:10.47176/jcpp.9.3.34341. (In Persian)