Lorestan University

Applied Researches in Water Engineering
Vol. 1, No. 2, Autumn & Winter 2023, p. 15-31

ARWE

Original Research

Determination of the Relationship between Physical and Economic Productivity of Water in the Cultivation of Bread Wheat Cultivars (Case Study: Qazvin Province)

Reza Saeidi[1*]
1- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Received: 27 August 2023/ **Revised:** 27 September 2023/ **Accepted:** 30 September 2023

https://doi.org/10.22034/arwe.2024.709855

Abstract

In this research, the physical and economic productivity of water was investigated in cultivation of bread wheat cultivars (in Qazvin, Iran in 2020). The main treatments were included rainfed and irrigated cultivation, and the sub-treatments were included cultivars of Sorkh-tokhm (E_1), Backcross Roshan (E_2), Bam (E_3), Azar2 (E_4) and Kavir (E_5). The experiment was performed in a randomized complete block design and with three replications. The amount of dry biomass, grain and straw was measured between 3495-4377 and 3501-4363 $kg.ha^{-1}$ (in rainfed cultivation) and between 5022-9027 and 4525-8440 $kg.ha^{-1}$ (in full irrigation), respectively. As a result, the Backcross Roshan cultivar (in full irrigation) was introduced as a suitable bread wheat cultivar. The amounts of physical water productivity in production of seeds, straw and biomass of Backcross Roshan cultivar were 1.67, 1.57 and 3.24 $kg.m^{-3}$, respectively. Also, the economic water productivity for above parameters was estimated as 68,791, 39,896 and 124,842 Iranian $rials.m^{-3}$, respectively. By changing the seed cultivar, the economic water productivity amount in full irrigation cultivation was increased to 20% (in compared to rainfed cultivation). By using the empirical models, economic water productivity amount was simulated based on the physical water productivity. The polynomial model with the R^2 coefficient = 0.996, was recognized as the optimal model. The results showed that the seed cultivars with high water consumption and low economic productivity, should be removed from the region crop cultivation pattern. By the optimal use of fresh water resources in the agricultural sector, are provided the more economic benefits for farmers.

Keywords: Experimental model, Virtual water, Water require, Yield.

***Corresponding Author Email: : saeidi@org.ikiu.ac.ir**

Lorestan University

دوفصلنامهٔ پژوهش‌های کاربردی مهندسی آب
دورهٔ اول، شمارهٔ ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۲ (صفحات ۳۱-۱۵)

ARWE

مقالهٔ پژوهشی

تعیین روابط بین بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در کشت ارقام گندم نان (مطالعه موردی: استان قزوین)

رضا سعیدی*[۱]

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

دریافت: ۰۵ شهریور ماه ۱۴۰۲/ اصلاحات: ۰۵ مهر ماه ۱۴۰۲/ پذیرش: ۰۸ مهر ماه ۱۴۰۲

https://doi.org/10.22034/arwe.2024.709855

چکیده

در این پژوهش، بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در کشت ارقام گندم نان (در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ و در استان قزوین) بررسی شد. تیمارهای اصلی شامل کشت بدون آبیاری و آبیاری کامل و تیمارهای فرعی شامل ارقام سرخ تخم (E_1)، بک‌کراس روشن (E_2)، بم (E_3)، آذر ۲ (E_4) و کویر (E_5) بود. آزمایش مزرعه‌ای در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار اجرا شد. در ارقام مختلف، مقدار زیست‌توده خشک دانه و کاه گندم به‌ترتیب بین ۳۴۹۵-۴۳۷۷ و ۳۵۰۱-۴۳۶۳ کیلوگرم بر هکتار (در کشت بدون آبیاری) و بین ۵۰۲۲-۹۰۲۷ و ۴۵۲۵-۸۴۴۰ کیلوگرم بر هکتار (در آبیاری کامل) اندازه‌گیری شد. در نتیجه رقم بک‌کراس روشن (کشت آبی) به‌عنوان رقم مناسب گندم نان معرفی شد. مقدار بهره‌وری فیزیکی آب در تولید دانه، کاه و زیست‌توده رقم بک‌کراس روشن، به‌ترتیب برابر با ۱/۶۷، ۱/۵۷ و ۳/۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب بود. هم‌چنین میزان بهره‌وری اقتصادی آب برای پارامترهای فوق به‌ترتیب ۶۸۷۹۱، ۳۹۸۹۶ و ۱۲۴۸۴۲ریال بر مترمکعب برآورد شد. با تغییر رقم بذر، مقدار بهره‌وری اقتصادی آب در کشت آبی ۲۰٪ (نسبت به کشت دیم) افزایش یافت. با استفاده از روابط تجربی، مقدار بهره‌وری اقتصادی آب بر اساس بهره‌وری فیزیکی آب شبیه‌سازی شد. رابطه درجه دوم با ضریب تبیین (R^2) ۰/۹۹۶ به‌عنوان مدل بهینه شناخته شد. نتایج نشان داد که ارقام بذر با مصرف آب زیاد و بازده اقتصادی کم، باید از الگوی کشت گیاهان زراعی حذف شوند. با این کار ضمن مصرف بهینه منابع آب باکیفیت در بخش کشاورزی، منافع اقتصادی بیشتر برای کشاورزان فراهم می‌گردد.

کلمات کلیدی: آب مجازی، عملکرد، مدل تجربی، نیاز آبی.

*Corresponding Author Email: saeidi@org.ikiu.ac.ir

مقدمه

بر اساس گزارش فائو (FAO., 2018)، گندم با تولید ۷۲۸/۱ میلیون تن در سال، مهم‌ترین گیاه برای تغذیه بشریت در جهان است. گندم نان از جمله محصولات زراعی راهبردی به‌شمار می‌رود که علاوه بر کشت آبی، می‌توان با کشت پاییزه آن، از نزولات جوّی در طول دوره رشد گیاه بهره‌مند شد و بهره‌وری مصرف آب آبیاری را افزایش داد (Saeidi et al., 2017). بر اساس آمارنامه جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ سطح زیر کشت محصولات زراعی در ایران حدود ۱۲/۱۹۲ میلیون هکتار بوده که ۵۱/۴ درصد آن به کشت آبی و ۴۸/۶ درصد اراضی به کشت دیم اختصاص یافته است. در این میان، کشت گندم دیم و آبی به‌ترتیب رتبه اول و دوم تولید را در بین کل محصولات زراعی ایران داشته است (Ahmadi et al., 2021). امروزه بخش کشاورزی با بحران کمبود منابع آب با کیفیت و نیاز روزافزون به آب برای تولید خوراک انسان و دام مواجه است. این مسئله باعث می‌شود که پژوهش‌های بیشتری درخصوص افزایش عملکرد محصولات زراعی در قبال هر واحد آب مصرفی صورت بگیرد. زیرا یکی از مؤثرترین و کاربردی‌ترین راه‌ها برای سازگاری با وضعیت اقلیمی هر منطقه، برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه و صرفه‌جویی در مصرف آب است (Abbasi et al., 2017). از سوی دیگر بررسی دقیق‌تر ارزش اقتصادی ماده گیاهی تولید شده به‌ازای هر واحد آب مصرف شده، می‌تواند در سامان‌دهی الگوی کشت اقتصادی یک منطقه (براساس درآمدزایی بیشتر)، به کار آید. به این ترتیب در کشت گیاه با ارزش گندم، اهداف افزایش بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب در بخش کشاورزی، مورد مناسبی برای پژوهش‌های کاربردی می‌باشد. در هر منطقه اقلیمی، انتخاب ارقام بهینه بذر و شیوه مناسب کشت (دیم یا آبی)، در میزان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب مؤثر است. حصول نتایج معتبر در زمینه پژوهش‌های مرتبط با موضوع مذکور، می‌تواند بخش کشاورزی را به‌سوی توسعه پایدار سوق دهد.

در این‌باره میزان بهره‌وری آب کشاورزی محصولات مهم زراعی در دشت مشهد بررسی شد و نتایج نشان داد که کشت‌های با مصرف آب زیاد و بازده اقتصادی کم مانند یونجه، باید از الگوی کشت منطقه حذف شوند. این کار باعث کاهش استحصال و مصرف آب شده و هم متضمن منافع اقتصادی بیشتر برای بهره‌برداران کشاورزی خواهد بود (Karimi, and Jolaini., 2017). در پژوهشی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در محصولات عمده زراعی حوضه تلوار استان کردستان بررسی شد. نتایج نشان داد که از لحاظ بهره‌وری اقتصادی، محصولات گندم، جو و سیب‌زمینی بیشترین سود خالص اقتصادی را دارند و میزان سطح اراضی تحت کشت تطابق مناسبی با بهره‌وری اقتصادی داشته است (Amini et al., 2020). در پژوهش دیگر وضعیت بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در کشت محصولات زراعی دشت مغان ارزیابی شد. در بین گیاهان زراعی شامل گندم، کلزا، سویا، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای و جو، بهره‌وری فیزیکی آب به‌ترتیب برابر با ۱/۲۷، ۰/۵، ۰/۶۷، ۰/۰۶۹، ۴/۵، ۰/۴۵ و ۱/۱۹ کیلوگرم بر متر مکعب و بهره‌وری اقتصادی آب به‌ترتیب برابر با ۱۰۹۸، ۵۷۲، ۷۰۲، ۳۱۳، ۵۴۲، ۲۲۸۶ و ۶۸۵ تومان بر متر مکعب محاسبه شد. نتایج نشان داد که از نظر شاخص‌های مذکور، محصول گندم بعد از ذرت علوفه‌ای دارای بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی مناسب در مصرف آب می‌باشد. از این‌رو کشت گیاهان بهینه از نظر مصارف اقتصادی و فیزیکی آب، باید در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری کشاورزی در دشت مغان مدنظر قرار گیرد (Farahza et al., 2021). در تحقیقی در شهرستان داراب استان فارس، بهره‌وری اقتصادی برای محصولات گندم، ذرت و پنبه به‌ترتیب ۵۴۸/۴، ۶۵۲/۲ و ۳۹۱/۸ ریال بر متر مکعب برآورد شد (Soleimani and Hasanli., 2009). در دشت بهار استان همدان، میزان بهره‌وری اقتصادی آب برای محصولات گندم، ذرت، جو و یونجه به‌ترتیب ۳۶۰۸، ۳۹۶۱، ۳۴۹۲ و ۲۸۷۵ ریال بر متر مکعب برآورد شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین بهره‌وری اقتصادی مربوط به گندم کشت پاییزه بود. در مقابل کم‌ترین میزان بهره‌وری اقتصادی مربوط به یونجه بود که به‌صورت بهاره تحت کشت بود (Zamani et al., 2014). در پژوهش دیگر دامنه تغییرات مقادیر بهره‌وری آب گندم در نقاط مختلف کشور بین ۰/۳ تا ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شد. همچنین بیشینه بهره‌وری آب گندم، در محدوده مصرف آب بین ۲۰۰ تا۴۰۰ میلی‌متر تعیین شد (Azizizehan et al., 2014). در دشت‌های شمالی چین یک نوبت آبیاری در مرحله شیری شدن دانه‌های گندم انجام شد. نتایج نشان داد که در اثر کاربرد ۷۵ میلی‌متر آب بر روی گندم دیم، بهره‌وری آب در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۳، ۲۰۱۵-۲۰۱۴ و ۲۰۱۶-۲۰۱۵ به ترتیب برابر با ۲/۱، ۱/۸۳ و ۱/۷۷ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شده است (Xu et al., 2018). مطالعات ۵ ساله پژوهش‌گران در مناطق خشک غرب آسیا و شمال آفریقا نشان داد که میزان بهره‌وری مصرف آب در کشت گندم از عدد ۰/۹۶ کیلوگرم بر مترمکعب در کشت دیم، به عدد ۱/۱۱ کیلوگرم بر مترمکعب در آبیاری تکمیلی و عدد ۱/۳۶ کیلوگرم بر متر مکعب در آبیاری مداوم افزایش یافته است (Oweis and

(Hachum., 2003). نتایج پژوهش مذکور نشان داد که اعمال آبیاری در مناطق خشک باعث شد که عملکرد محصول گندم نسبت به حجم آب مصرفی افزایش قابل توجهی داشته و در نتیجه بهره‌وری مصرف آب افزایش پیدا کرده است.

علاوه بر شیوه کشت گندم (به‌صورت دیم یا آبی)، نوع رقم بذر نیز می‌تواند بر میزان بهره‌وری آب اثرگذار باشد. در پژوهشی دامنه تغییرات بهره‌وری آب کاربردی گندم در استان‌های خراسان رضوی، فارس، البرز، آذربایجان غربی، اصفهان، خوزستان، کرمان و سیستان و بلوچستان بین ۰/۳ تا ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شد. دامنه وسیع بهره‌وری آب گندم، نشان‌دهنده پتانسیل زیاد برای افزایش تولید محصول گندم به ازای مصرف آب کمتر اعلام شد. همچنین دامنه متنوع بهره‌وری آب گندم در بین مناطق مختلف ایران ناشی از تفاوت اقلیم و تأثیر آن بر تغییرات تبخیر-تعرق، طول دوره فصل رشد گندم، نوع رقم بذر گندم و کیفیت منابع آب و خاک گزارش شد (Nakhjavani moghaddam et al., 2017). در این‌باره پژوهشی در مناطق خشک اُردن، به‌منظور بررسی بهره‌وری مصرف آب در کشت ارقام مختلف گندم انجام شد. تیمارهای اصلی شامل کشت دیم (T_0)، آبیاری تکمیلی در سطح (T_1) ۵۰، (T_2) ۷۵ و (T_3) ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه و تیمارهای فرعی شامل ارقام Cham1، Acsad65 و Ammon بود. نتایج نشان داد که به‌ترتیب ارقام مذکور، عملکرد دانه برابر با ۴/۲۴، ۳/۹۲ و ۳/۳۴ تن بر هکتار و بهره‌وری مصرف آب برابر با ۰/۹۵، ۰/۸۸ و ۰/۷۴کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد (Al-Ghzawi et al., 2018). در پژوهشی در منطقه گرگان، اثر مقادیر آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ارقام مختلف گندم بررسی شد. ارقام گندم شامل C_1 (TAJAN)، C_2 (N-80-6)، C_3 (N-80-7)، C_4 (N-80-19)، C_5 (N-81-18) و C_6 (Desconcido) بود. نتایج نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین بهره‌وری مصرف آب به‌ترتیب برای ارقام C_5 (۱/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب) و C_1 (۱/۳ کیلوگرم بر مترمکعب) به‌دست آمد. همچنین بهترین عملکرد دانه برای دستیابی به بیشینه بهره‌وری آب از مقدار ۴۹۰۰ کیلوگرم بر هکتار در رقم C_3 تا ۴۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار در رقم C_1 در نَوَسان بود (Kiani and Kalateharabi., 2009).

تاکنون روابط متنوعی در مناطق مختلف ایران بین بهره‌وری مصرف آب و عملکرد گندم، عمق آب کاربردی (آب باران و آبیاری) و سایر پارامترها برازش داده شده است. به‌طوری که در دشت مشهد، رابطه متقابل بین بهره‌وری آب (Y) و عمق آب آبیاری (I) به‌صورت $Y=-3\times10^{-5}I^2+0.0156I-0.7271$ با ضریب تعیین (R^2) ۰/۵۲۹ و رابطه بین بهره‌وری آب (Y) و عمق آب کاربردی (I+Re) به‌صورت $Y=-1\times10^{-5}I^2+0.0087I-0.6211$ با ضریب تعیین (R^2) ۰/۱۹۳۴گزارش شده است (Nakhjavani moghaddam et al., 2017). اما روابط چندانی بین میزان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب مصرفی (نزولات جوّی و آبیاری) در کشت دیم و آبی گندم، ارائه نشده است. زیرا به‌دلیل وجود تفاوت در واحدهای اندازه‌گیری بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب، تقابل و مقایسه دو شاخص مذکور به‌راحتی امکان‌پذیر نیست (Farahza et al., 2021). خلأ مذکور هم‌چنان وجود داشته و تاکنون از طریق پژوهش‌های گذشته برطرف نشده است. از این‌رو بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در کشت ارقام گندم موردنظر در پژوهش حاضر بررسی شد و روابط تجربی بین دو شاخص مذکور برقرار شد. به‌همین دلیل هدف از پژوهش حاضر، تعیین روابط بین بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در کشت ارقام گندم نان (در منطقه قزوین) در نظر گرفته شد. با این کار ضمن انتخاب ارقام گندم مناسب کشت برای دو حالت دیم و آبی، بهترین روابط تجربی برای تحلیل متقابل میزان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب معرفی شد. به‌طوری که با تغییر میزان بهره‌وری فیزیکی آب، رَوَند تغییر بهره‌وری اقتصادی آب قابل شناسایی بود.

مواد و روش‌ها

کلیات طرح

در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸، پژوهشی در خصوص بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب، بر روی ارقام مختلف گندم نان و در مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) (واقع در شهر قزوین) انجام شد (شکل ۱). محل پژوهش در موقعیت جغرافیایی با عرض شمالی "۱۹ '۱۸ °۳۶ و طول شرقی "۳۸ '۰۰ °۵۰ و ارتفاع ۱۳۴۶ متر (از سطح دریا) قرار داشت. تیمارهای اصلی شامل دو نوع کشت بدون آبیاری (D) و آبیاری کامل (I) گندم نان و تیمارهای فرعی (پنج رقم گندم نان) شامل ارقام سرخ تخم (E_1)، بک‌کراس روشن (E_2)، بم (E_3)، آذر ۲ (E_4) و کویر (E_5)، بر اساس سازگاری با اقلیم منطقه مورد مطالعه تعیین شد. تیپ رشد ارقام سرخ تخم، بک‌کراس روشن و آذر۲ به‌صورت نیمه‌زمستانه و زمستانه، کویر به‌صورت بهاره و بم، بینابین گزارش شد (Ministry of Agriculture., 2015). باتوجه به تنوع اقلیمی گسترده در منطقه قزوین، ارقام مذکور قابلیت کشت آبی و بدون آبیاری را داشته‌اند. ارقام عمده‌ای که

تاکنون در مزارع استان قزوین کشت شده شامل پیشگام، سیروان، سیوند، آذر۲، باران و هشترودی بوده است. به‌این ترتیب آزمایش با تعداد دو فاکتور اصلی، پنج فاکتور فرعی و سه تکرار، در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. قبل از اجرای پژوهش، از اعماق ۲۵-۰، ۵۰-۲۵، ۷۵-۵۰ و ۱۰۰-۷۵ سانتی‌متری خاک مزرعه، نمونه تهیه شد و به آزمایشگاه خاک‌شناسی (تحت نظارت جهاد کشاورزی استان قزوین) انتقال داده شد. تجزیه شیمیایی و فیزیکی نمونه‌های خاک، توسط آزمایشگاه انجام شد و نتایج آن در جدول (۱) ارائه شد. بر اساس نتایج آزمون شیمیایی خاک و نیاز گیاه به عناصر غذایی، مصرف کودهای اوره، دی‌فسفات آمونیوم و سولفات پتاسیم به‌ترتیب به‌مقدار ۱۵۰، ۱۱۰ و ۸۰ کیلوگرم بر هکتار اعمال شد. کودهای دی‌فسفات آمونیوم و سولفات پتاسیم قبل از کاشت بذور و کود اوره به‌صورت ثُلث مقدار در قبل از کاشت بذور، ثُلث مقدار در مرحله پنجه‌زنی گیاه و ثُلث مقدار در مرحله ساقه رفتن گیاه، به‌صورت سَرَک به خاک اضافه شد.

شکل ۱. محل اجرای پژوهش در منطقه مورد مطالعه

Fig. 1. The location of the research plan in the study area

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1. Physical and chemical characteristics of farm soil

پارامتر	واحد	عمق خاک (سانتی‌متر)			
		0-25	25-50	50-75	75-100
هدایت الکتریکی اولیه عصاره اشباع خاک	$dS.m^{-1}$	0.32	0.34	0.35	0.3
اسیدیته خاک (pH)	-	7.1	7.3	7.2	7.1
بافت خاک	-	Sandy Loam	Sandy Loam	Sandy Loam	Sandy Loam
رس	%	10	8	11	10
سیلت	%	31	28	27	29
شن	%	59	64	62	61
رطوبت وزنی حد ظرفیت مزرعه	%	24	23	24	24
رطوبت وزنی در نقطه پژمردگی دائم	%	11	10	10.5	11
چگالی ظاهری	$g.cm^{-3}$	1.33	1.4	1.37	1.39
نیتروژن کل	%	0.28	0.22	0.17	0.18
پتاسیم قابل جذب	p.p.m	391	284	273	258
فسفر قابل جذب	p.p.m	27	26	27	24

این پژوهش در محیط مزرعه انجام شد. به‌این صورت که کرت‌هایی مسطح، بدون شیب و با ابعاد ۳×۳ متر آماده شد و بذرها در داخل کرت‌ها کاشته شد. برای جلوگیری از اثر جانبی کرت‌ها بر یکدیگر، فاصله بین کرت‌ها دو متر از هم درنظر گرفته شد. عملیات کشت بذور برای هر دو تیمار بدون آبیاری و آبیاری کامل، در چهارم آذرماه انجام شد. براساس دستورالعمل فنی کشت گندم (Ministry of Agriculture., 2013)، تراکم مناسب کاشت بذر ارقام متنوع گندم نان برای اقالیم مختلف ایران از میزان ۳۵۰ الی ۵۰۰ بذر در متر مربع

و برای مناطق سردسیر (مانند قزوین) تعداد ۴۵۰ بذر در متر مربع می‌باشد. از این‌رو به جهت یکسان شدن شرایط کشت برای ارقام مورد پژوهش، تعداد ۴۵۰ بذر در متر مربع و به‌صورت دستی در کرت‌ها کشت شد. به‌دلیل زمستانه بودن کشت، هیچ یک از تیمارها پس از عملیات کاشت آبیاری نشدند و جوانه‌زنی بذور صرفاً از طریق جذب رطوبت اولیه خاک و نزولات جوی انجام شد. وضعیت آماری پارامترهای مهم هواشناسی به‌صورت میانگین ده ساله برای منطقه مورد مطالعه، به‌شرح جدول (۲) بود.

جدول ۲. میانگین ۱۰ ساله آمار هواشناسی برای دوره رشد گندم (سال ۱۳۹۰-۱۴۰۰)

Table 2. 10-year average of meteorological statistics for the wheat growth period (2011-2021)

ماه	دما (°C)		رطوبت نسبی (٪)		بارندگی (mm)	ساعات آفتابی	بیشینه سرعت باد $m\ s^{-1}$
	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه			
آذر	-4.2	16.1	46	90	41.4	143.6	10
دی	-3.1	14.8	40	89	23	149	14
بهمن	-7.4	15.4	43	88	34.2	131.4	15
اسفند	-4.5	26	39	79	39.6	126.8	17
فروردین	-1.7	26.1	27	77	56.3	241.2	13
اردیبهشت	5.1	31.6	30	84	88.8	243.4	16
خرداد	10.2	37.5	21	76	7.5	348.8	22

زمان انجام آبیاری در تیمار کشت آبی

در طول دوره رشد گندم، مقدار رطوبت خاک از سطح تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری (چهار لایه ۲۵ سانتی‌متری) در مرکز هر کرت و به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد. برای این کار از دستگاه بازتاب‌سنج دامنه زمانی امواج (TDR[1]) مدل TRIME-FM استفاده شد. قبل از شروع پژوهش، آزمایشی در داخل کرت‌ها انجام شد و اعداد ثبت شده توسط دستگاه TDR نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک مزرعه واسنجی شد. در نشریه فائو-۵۶، متوسط حد آب سهل‌الوصول خاک (RAW[2]) در طول دوره رشد گندم، برای همه ارقام گندم به‌میزان ۵۵ درصد رطوبت موجود بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC[3]) و نقطه پژمردگی دائم (PWP[4]) گزارش شد (Allen et al., 1998). اما برای اطمینان از این‌که در مراحل مختلف رشد ارقام گندم (تحت کشت آبی) هیچ تنش آبی وارد نمی‌شود، حد آب سهل‌الوصول خاک به‌مقدار ۴۵ درصد درنظر گرفته شد. بنابراین هر زمان که مقدار ۴۵ درصد از رطوبت خاک بین دو حد FC و PWP به اتمام می‌رسید، آبیاری در تیمارهای کشت آبی انجام می‌شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (به‌ترتیب تحت فشارهای مکشی یک‌سوم و ۱۵ اتمسفر) و خشک کردن خاک در گرم‌خانه، محاسبه و در جدول (۱) ارائه شد. برای محاسبه و کنترل حد آب سهل‌الوصول خاک نیز از رابطه (۱) استفاده شد (Saeidi et al., 2021). به‌طور کلی با توجه به آمار بارندگی و دمای هوا در جدول (۲) و توقف رشد گیاه در ماه‌های سرد سال، کاهش رطوبت خاک و نیاز به آبیاری اصولاً پس از آغاز فصل بهار مشاهده شد. در جدول (۳) زمان انجام و عمق آب آبیاری (در کشت آبی) ارقام مختلف گندم، در طول دوره رشد آورده شده است. به دلیل اینکه میزان جذب روزانه رطوبت خاک توسط ارقام مختلف گندم یکسان نبود، از این‌رو همه ارقام در یک روز واحد آبیاری نشدند و زمان آبیاری آن‌ها اندکی با هم تفاوت داشت. باتوجه به متفاوت بودن زمان انجام آبیاری در طول دوره رشد گیاه، عمق آب آبیاری نیز برای ارقام مختلف یکسان نبود و مطابق جدول (۳) بود. در تحقیقات گذشته مقدار نیاز آبی گیاه گندم در محدوده دشت قزوین، با استفاده از داده‌های لایسیمتری ۳ ساله برآورد شد. نتایج نشان داد که متوسط نیاز آبی گندم (مجموع بارندگی و آبیاری) در منطقه قزوین، ۵۴۶ میلی‌متر بوده است

1- Time domain reflectometer, TDR
2 - Readily available water, RAW

3- Field capacity, FC
4- Permanent wilting point, PWP

(Khodarahmi and Ebrahimi-Pak, 2012). از این‌رو مقدار نیاز آبیاری ارقام گندم در پژوهش حاضر، به نتایج پژوهش‌های گذشته نزدیک بود.

$$RAW = \frac{\theta_{FC} - \theta_0}{\theta_{FC} - \theta_{PWP}} \quad (۱)$$

در رابطه ۱، RAW: حد آب سهل‌الوصول خاک، θ_{FC}: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_0: رطوبت وزنی خاک (درصد) در زمان انجام آبیاری و θ_{PWP}: رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (درصد) می‌باشد.

جدول ۳. زمان انجام و عمق آب آبیاری ارقام مختلف گندم

Table 3. Time and water depth of irrigation of different wheat cultivars

رقم	سرخ تخم	بک‌کراس روشن	بم	آذر 2	کویر
زمان انجام آبیاری	۲۵ فروردین	۲۶ فروردین	۲۶ فروردین	۲۴ فروردین	۲۴ فروردین
	۱۷ اردیبهشت	۱۹ اردیبهشت	۱۸ اردیبهشت	۱۷ اردیبهشت	۱۵ اردیبهشت
	۱ خرداد	۲ خرداد	۲ خرداد	۳۱ اردیبهشت	۳۱ اردیبهشت
	۹ خرداد	۱۰ خرداد	۹ خرداد	۸ خرداد	۷ خرداد
	۱۶ خرداد	۱۷ خرداد	۱۷ خرداد	۱۵ خرداد	۱۴ خرداد
	۲۲ خرداد	۲۴ خرداد	۲۳ خرداد	۲۱ خرداد	۲۰ خرداد
				۲۷ خرداد	۲۶ خرداد
عمق آب آبیاری (میلی‌متر)	200	192	196	220	223

حجم آب آبیاری در تیمار کشت آبی

در زمان انجام آبیاری، حجم آب آبیاری با هدف رساندن رطوبت خاک ناحیه ریشه گیاه به حد رطوبت FC تعیین شد. از این‌رو عمق توسعه ریشه گیاه در مراحل مختلف رشد، از طریق خارج کردن بوته از خاک در کرت‌های جداگانه (غیر از تیمارها) اندازه‌گیری شد. بر اساس مقدار اختلاف رطوبت خاک تا حد FC، چگالی خاک، عمق توسعه ریشه و مساحت کرت، حجم آب آبیاری از طریق رابطه (۲) محاسبه شد (Saeidi et al., 2022). لازم به‌ذکر است پایش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه، در لایه‌های ۲۵ سانتی‌متری عمق خاک (به‌صورت جداگانه) انجام شد و در زمان آبیاری، کمبود رطوبت لایه‌های خاک در عمق ریشه (تا حد FC) برطرف شد. از این‌رو رابطه (۲) نشان‌دهنده حجم تجمعی آب مورد نیاز برای آبیاری لایه‌های خاک منطقه ریشه (نهایتاً تا عمق یک متری) بود. در عملیات آبیاری، آب توسط شیلنگ به کرت‌ها انتقال داده شد و آبیاری در کرت‌ها به‌صورت غرقابی انجام شد. مقدار حجم آب ورودی به هر کرت توسط کنتور حجمی کنترل شد. آب به‌شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیع شد و با توجه به تراز بودن کف کرت‌ها، محصور بودن کرت‌ها توسط پشته‌ها و عدم خروج آب از آن‌ها، راندمان کاربرد آبیاری صد در صد در نظر گرفته شد.

$$V = \sum_{i=1}^{i=4} \left[\frac{(FC_i - \theta_i)}{100} \times \rho b_i \times D_i \right] \times A \quad (۲)$$

V: حجم آب آبیاری (مترمکعب)، FC: رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (٪)، θ: رطوبت وزنی خاک در زمان قبل از آبیاری (٪)، i: شمارنده لایه‌های عمق خاک (در این پژوهش نهایتاً چهار لایه ۰/۲۵ متری درنظر گرفته شده است)، ρb: چگالی ظاهری لایه خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D: عمق لایه خاک (متر) و A: مساحت کرت (متر مربع).

برداشت محصول و تحلیل آماری

از اواخر خردادماه تا اوایل تیرماه، زمان رسیدگی بوته‌های ارقام گندم و خشک شدن کامل برگ‌ها، ساقه و ریشک‌ها بود. در این هنگام که رطوبت دانه‌های گندم تقریباً به حدود ۱۴ درصد رسیده بود، اقدام به برداشت محصول شد. برای این منظور، یک قاب چوبی با ابعاد داخلی ۱×۱ متر (مساحت یک متر مربع) تهیه شد و به‌طور تصادفی به داخل کرت‌ها انداخته شد. سپس بوته‌های داخل قاب از کف زمین بریده شد و برای اندازه‌گیری اجزاءِ عملکرد محصول، به آزمایشگاه انتقال داده شد. در آزمایشگاه به‌طور مُجَزا وزن کاه و دانه در واحد سطح توسط ترازوی دقیق (با دقت صدم گرم) اندازه‌گیری شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفات توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون

چند دامنه‌ای دانکن انجام شد. برای برآورد بهره‌وری فیزیکی مصرف آب (WP[1])، بهره‌وری اقتصادی آب (WPe[2]) و مقدار آب مجازی (VWC[3]) در تولید محصول ارقام گندم، از روابط (۳) الی (۵) استفاده شد (Amini et al., 2020). بهره‌وری فیزیکی مصرف آب به‌معنی میزان ماده خشک گیاهی تولید شده به‌ازای هر واحد آب مصرفی (آب آبیاری + بارندگی) است و بهره‌وری اقتصادی آب به این مفهوم اشاره دارد که به‌ازای هر واحد آب مصرفی، ارزش اقتصادی ماده گیاهی تولید شده چقدر است. مقدار آب مجازی نیز رابطه معکوس با WP داشته و به‌معنی میزان حجم آب کاربردی برای تولید یک واحد ماده خشک گیاهی می‌باشد. در این پژوهش نرخ مربوط به هزینه‌های تولید (در مراحل کاشت، داشت، برداشت و آب آبیاری) و درآمد فروش محصول (دانه و کاه)، بر اساس آمار رسمی ارائه شده توسط مرکز آمار ایران در سال ۱۴۰۰ (جدول ۴) مورد استناد و استفاده قرار گرفت (Statistical center of Iran., 2021).

$$WP = \frac{Y}{\forall} \quad (۳)$$

WP: بهره‌وری فیزیکی مصرف آب ($Kg.\ m^{-3}$)، *Y*: عملکرد زیست‌توده خشک گندم ($Kg.\ ha^{-1}$) و ∀: حجم آب آبیاری به‌علاوه حجم آب حاصل از بارندگی در دوره رشد گیاه ($m^3.\ ha^{-1}$).

$$WP_e = \frac{I_N - C_n}{\forall} \quad (۴)$$

WP_e: بهره‌وری اقتصادی آب ($Rial.\ m^{-3}$)، I_N: درآمد حاصل از فروش محصول (دانه و کاه گندم) در دوره کشت (Rial)، C_n: هزینه تولید محصول در دوره کشت (Rial) و ∀: حجم آب آبیاری به‌علاوه حجم آب حاصل از بارندگی در دوره رشد گیاه ($m^3.\ ha^{-1}$).

$$VWC = \frac{\forall}{Y} \quad (۵)$$

VWC: مقدار آب مجازی ($m^3.\ Kg^{-1}$)، *Y*: عملکرد زیست‌توده خشک گندم ($Kg.\ ha^{-1}$) و ∀: حجم آب آبیاری به‌علاوه حجم آب حاصل از بارندگی در دوره رشد گیاه ($m^3.\ ha^{-1}$).

جدول ۴. نرخ هزینه تولید و درآمد فروش محصول گندم

Table 4. Production cost rate and sales revenue of wheat product

نوع کشت	هزینه تولید (۱۰ هزار ریال در هکتار)											درآمد فروش (ریال در کیلوگرم)	
	شخم	دیسک	بذر	بذرپاشی	کود اوره	کود فسفات	کود پتاس	کودپاشی	آب بها	هزینه کارگری	برداشت	دانه	کاه
بدون آبیاری	333	232	1124	267	188	193.7	245.46	380	0	0	560	51110	36242
آبیاری کامل	527	260	1124	227	188	193.7	245.46	380	533.6	4402.3836	1067	51110	36242

نرمال‌سازی و تعیین روابط بین داده‌ها

پس از آن‌که مقادیر پارامترهای بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب در دو حالت کشت آبی و بدون آبیاری برای ارقام گندم محاسبه شد، داده‌های مذکور نرمال‌سازی (استانداردسازی) شد. زیرا واحد پارامترهای بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب یکسان نبود و برای مقایسه بهتر دو پارامتر مذکور، نیاز به انتخاب مقادیر بی‌بُعد برای آن‌ها بود. برای این منظور از روش Z-Score که معادله آن در رابطه (۶) ارائه شده است، استفاده شد. روش Z-Score باعث شد که اختلاف مقیاس بین داده‌ها رفع شده و نتایج آن‌ها بهتر مقایسه شوند.

$$Z = \frac{X - \mu}{\frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}} \quad (۶)$$

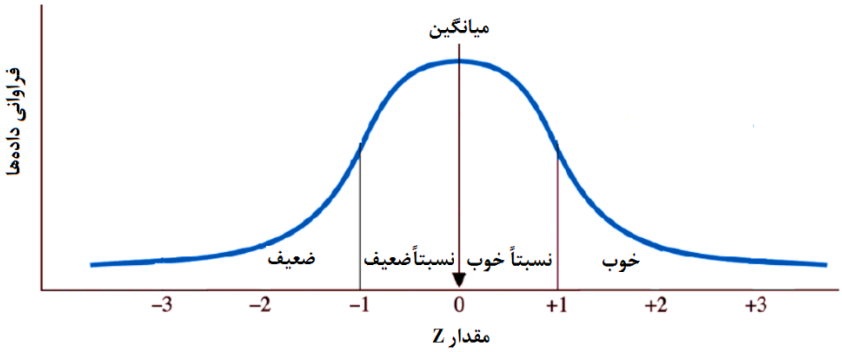
در رابطه (۶)، *Z*: مقدار نرمال‌شده (نمره استاندارد) برای یک داده از پارامتر مدنظر (بی‌بُعد)، *X*: مقدار پارامتر که در اینجا مقادیر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب می‌باشد، μ: میانگین مقادیر پارامترها و $\frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$: انحراف معیار جامعه است. مقدار Z نشان می‌دهد که هر داده‌ای، نسبت به میانگین داده‌ها چقدر فاصله دارد. پس از تبدیل مقادیر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب به اعداد نرمال شده Z، معمولاً

[1] - Water Productivity

[2] - Economic Water Productivity

[3] - Virtual Water Content

مقدار Z در بازه ۴+ الی ۴- قرار می‌گیرد (Agresti, 2002). از این‌رو مطابق شکل (۲)، می‌توان وضعیت بهره‌وری آب (فیزیکی و اقتصادی) را بر اساس اعداد روش Z-Score در چهار گروه ضعیف، نسبتاً ضعیف، نسبتاً خوب و خوب طبقه‌بندی کرد. در این پژوهش ارقامی از گندم که در حالت کشت آبی و بدون آبیاری دارای اعداد Z مثبت و بالاتری باشند، از نظر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب مناسب برای کشت به شمار می‌روند.



شکل ۲. منحنی طبقه‌بندی مقادیر نرمال شده داده‌ها (بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب)، بر اساس روش Z-Score

Fig. 2. Classification curve of normalized data values (physical and economic productivity of water), based on the Z-Score method

برای تعیین روابط بین داده‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب، از مدل‌های رگرسیونی استفاده شد. مدل‌ها شامل توابع خطی، معکوس، نمایی، لگاریتمی، درجه دوم، درجه سوم، توانی، گاوس، لجستیک، ریچاردز و ویبول بود. برای این منظور مقادیر بهره‌وری فیزیکی آب به‌عنوان متغیر مستقل *(X)* و مقادیر بهره‌وری اقتصادی آب به‌عنوان متغیر وابسته *(Y)* در نظر گرفته شد. ضرایب مربوط به انواع مدل‌های رگرسیونی توسط نرم‌افزار SPSS برآورد شد. برای انتخاب مدل بهینه، از آماره F و ضریب تعیین R^2 استفاده شد. به‌این صورت که معنی‌دار بودن آماره F و بالاتر بودن مقدار ضریب همبستگی R^2، نشان‌دهنده تبیین بهتر رابطه بین دو پارامتر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب توسط مدل مربوطه بوده است.

نتایج و بحث

عملکرد دانه و کاه

اثر شرایط کشت آبی و بدون آبیاری بر عملکرد دانه و کاه پنج رقم گندم نان شامل سرخ تخم (E_1)، بک‌کراس روشن (E_2)، بم (E_3)، آذر۲ (E_4) و کویر (E_5) بررسی شد. نتایج در جدول (۵) نشان داد که اثر نوع کشت و رقم بذر بر عملکرد دانه و کاه گندم، در سطح یک درصد معنی‌دار بود. باتوجه به مقادیر عملکرد گندم در جدول (۶)، بیش‌ترین تا کم‌ترین مقادیر عملکرد دانه و کاه به‌ترتیب مربوط به ارقام بک‌کراس روشن، بم، سرخ تخم، آذر ۲ و کویر بوده است. برای مقایسه مقادیر جدول (۶) با وضعیت منطقه، وزارت جهاد کشاورزی متوسط عملکرد دانه انواع ارقام گندم را در دو شیوه کشت آبی و دیم در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸، به‌ترتیب ۴۷۵۴ و ۱۰۶۷ کیلوگرم بر هکتار در سطح کل اراضی استان قزوین گزارش کرد (Ahmadi et al., 2021). از این‌رو در پژوهش حاضر میزان عملکرد ارقام گندم، از متوسط مقدار آن در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ بیشتر بوده است. به‌طور کلی اثر انتخاب رقم مناسب بذر در منطقه و تأمین آب مورد نیاز گیاه (درصورت وجود شرایط لازم)، بیشتر بر روی تعداد پنجه‌زنی گیاه و تولید خوشه در کرت و به‌دنبال آن تفاوت عملکرد محصول مشاهده می‌شود.

در پژوهش حاضر میزان افزایش عملکرد در کشت آبی نسبت به کشت بدون آبیاری، در ارقام بک‌کراس روشن، بم، سرخ تخم، آذر۲ و کویر به‌ترتیب برابر با ۱۰۶٪، ۱۰۵٪، ۷۵٪، ۵۳٪ و ۴۳٪ (عملکرد دانه) و ۹۳٪، ۶۱٪، ۴۰٪، ۳۰٪ و ۲۹٪ (عملکرد کاه) محاسبه شد. در این‌باره در پژوهشی بر روی گندم در منطقه اراک گزارش شد که در شرایط کم‌آبی، میزان رشد رویشی و مقدار مواد فتوسنتزی گیاه گندم کاهش می‌یابد. این شرایط باعث کاهش گرده‌افشانی گل‌ها شده و ممکن است گل‌ها به دانه تبدیل نشوند. یا به‌دلیل شرایط تنش

آبی، برخی از گل‌های تلقیح شده موفق به دریافت کربوهیدرات کافی برای پرشدن دانه نخواهند شد و درنتیجه تعداد دانه و وزن آن‌ها کم می‌شود (Farmahini et al., 2014). تحقیق مشابهی بر روی شش رقم گندم شامل چمران، پیشتاز، بهار، سیروان، سیوند و پارسی در منطقه نیشابور انجام شد. عملکرد دانه در ارقام مذکور به‌ترتیب برابر با ۵۷۱۵، ۵۲۸۵، ۵۶۹۸، ۵۳۰۹، ۵۸۸۹ و ۶۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار برآورد شد. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین رقم گندم برای کشت در منطقه نیشابور رقم پارسی بود که بیش‌ترین تولید خوشه در واحد سطح و بیش‌ترین شاخص سطح برگ در مرحله گرده‌افشانی را داشته است (Baygi et al., 2017). پژوهش دیگر در منطقه خشک و نیمه‌خشک منطقه کاشمر بر روی گندم پاییزه رقم پیشگام و تحت سطوح مختلف آبیاری انجام شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب به‌ترتیب با مقادیر ۷۲۲۷ کیلوگرم درهکتار و ۲/۵۱ کیلوگرم بر مترمکعب متعلق به تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی و کم‌ترین آن‌ها به‌ترتیب با مقادیر ۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و ۱/۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب مربوط به تیمار ۴۰٪ نیاز آبی بوده است (Mokari et al., 2020). نتیجه این بخش از پژوهش این بود که رقم بک‌کراس روشن به‌عنوان رقم مناسب گندم نان (در بین پنج رقم پژوهش حاضر)، برای کشت بدون آبیاری و آبی در منطقه قزوین توصیه شد. در تیمار کشت بدون آبیاری مقدار عملکرد دانه رقم بک‌کراس روشن، نزدیک به چهار برابر متوسط عملکرد گندم دیم در منطقه قزوین (۱۰۶۷ کیلوگرم بر هکتار) برآورد شد. این در حالی بود که درصورت تأمین آب برای آبیاری (آبیاری کامل)، این قابلیت وجود داشت که عملکرد دانه در رقم مذکور را به بیش از دو برابر و عملکرد کاه را نزدیک به دو برابر افزایش داد.

جدول ۵. تجزیه واریانس صفات مورد بررسی

Table 5. Variance analysis of investigated traits

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		عملکرد دانه	عملکرد کاه	بهره‌وری فیزیکی آب	بهره‌وری اقتصادی آب
تکرار	2	0.71^{ns}	0.02^{ns}	0.043^{ns}	7×10^{5ns}
نوع کشت	1	69.8^{**}	47.7^{**}	0.065^{*}	$139\times 10^{5**}$
رقم بذر	4	6.2^{**}	4.01^{**}	1.165^{**}	$88740\times 10^{5**}$
نوع کشت×رقم بذر	4	2.8^{**}	0.61^{**}	0.37^{**}	$27860\times 10^{5**}$
خطا	18	0.06	0.12	0.006	10.3×10^{5}

ns ، ** و *: به‌ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد

جدول ۶. مقایسه میانگین صفات مختلف، تحت اثر متقابل نوع کشت و رقم بذر گندم

Table 6. Average comparison of different traits, under the interaction effect of type of cultivation and wheat seed variety

تیمار	عملکرد دانه (تن در هکتار)	عملکرد کاه (تن در هکتار)	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	بهره‌وری اقتصادی آب (هزار ریال بر مترمکعب)
DE_1	38.6 ^{gh*}	3.99 ^{fg}	2.27 ^{de}	88.95 ^{e}
DE_2	4.37 ^{f}	4.36 ^{ef}	2.52 ^{c}	100.15 ^{c}
DE_3	4.01 ^{fg}	4.14 ^{ef}	2.36 ^{d}	92.89 ^{d}
DE_4	3.65 ^{gh}	3.73 ^{gh}	2.13 ^{ef}	82.99 ^{g}
DE_5	3.49 ^{gh}	3.5 ^{h}	2.02 ^{f}	78.14 ^{h}
IE_1	6.78 ^{c}	5.59 ^{c}	2.26 ^{de}	82.22 ^{f}
IE_2	9.02 ^{a}	8.44 ^{a}	3.24 ^{a}	124.84 ^{a}
IE_3	8.23 ^{b}	6.67 ^{b}	2.75 ^{b}	103.23 ^{b}
IE_4	5.59 ^{d}	4.86 ^{d}	1.75 ^{g}	59.85 ^{i}
IE_5	5.02 ^{e}	4.53 ^{de}	1.59 ^{h}	52.97 ^{j}

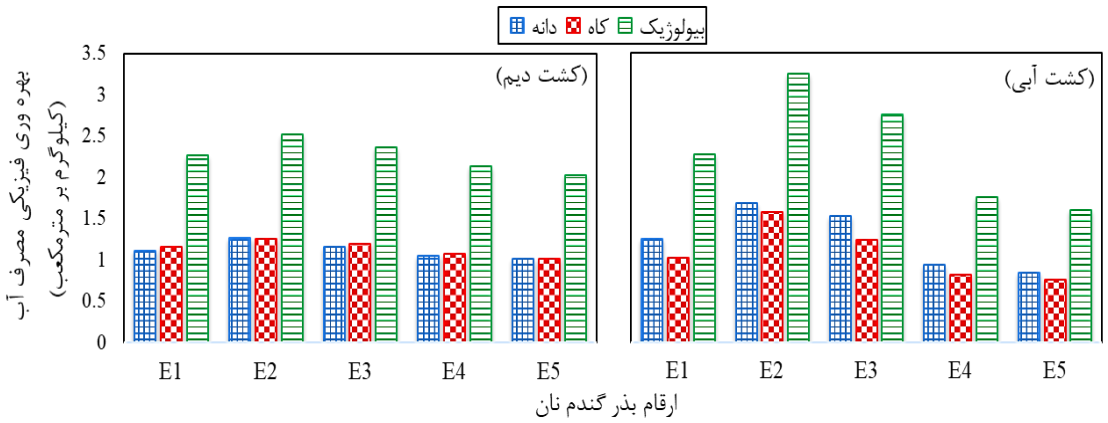
*: حروف مشترک نشان‌دهنده هم‌پوشانی مقادیر صفت در بین تیمارهاست.

بهره‌وری فیزیکی آب

باتوجه به تفاوت مقدار عملکرد و میزان آب جذب شده توسط ارقام مختلف گندم، مقدار بهره‌وری فیزیکی آب در کشت ارقام گندم متفاوت بود. به‌طوری که در جدول (۵) اثر نوع کشت و رقم بذر بر مقدار بهره‌وری فیزیکی آب، به‌ترتیب در سطح پنج و یک درصد معنی‌دار بود. بر اساس نتایج جدول (۶) و شکل (۳)، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار بهره‌وری فیزیکی آب به‌ترتیب مربوط به کشت آبی ارقام

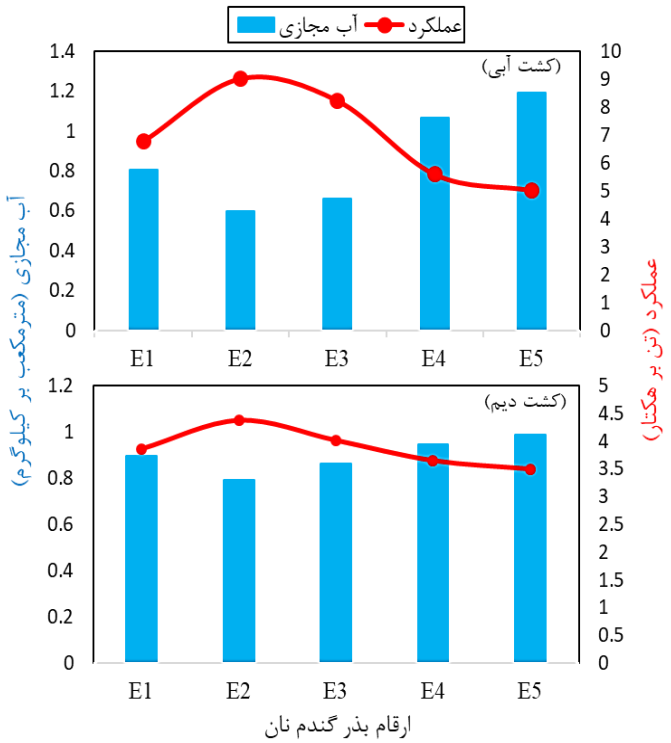
بک‌کراس روشن (E_2) و کویر (E_5) بود. برای ارقام مذکور، مقدار بهره‌وری فیزیکی آب در تولید دانه، کاه و کل زیست‌توده بیولوژیک به‌ترتیب برابر با ۱/۶۷، ۱/۵۷ و ۳/۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب (کشت آبی رقم E_2) و ۰/۸۴، ۰/۷۵ و ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب (کشت آبی رقم E_5) برآورد شد. در پژوهشی، میزان بهره‌وری فیزیکی آب برای گندم در دشت قزوین با استفاده از تصاویر مودیس (MODIS) به‌طور متوسط ۰/۷۶ کیلوگرم بر متر مکعب و از طریق داده‌های لایسیمتر ۰/۹ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شد (Kaviani et al., 2011). البته در پژوهش حاضر به‌دلیل پُر بارش بودن سال زراعی و صد در صد بودن راندمان آبیاری، مقادیر بهره‌وری فیزیکی آب بیشتر از پژوهش کاویانی و همکاران برآورد شد. در پژوهش دیگر آمار کشت گندم استان قزوین در تعداد ۲۳ مزرعه بررسی شد. به‌طوری که میزان بهره‌وری فیزیکی آب آبیاری در سیستم‌های آبیاری بارانی و سطحی به‌ترتیب بین ۰/۶۱ تا ۲/۲ و ۰/۴۳ تا ۱/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد (Gholami et al., 2015). نتایج پژوهش اخیر نشان داد که در سیستم‌های آبیاری بارانی که راندمان آبیاری بیشتر است، مقدار بهره‌وری فیزیکی آب به نتایج پژوهش حاضر نزدیک بوده است. در مناطق دیگری، گندم رقم پارسی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در تیمارهای ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی، مقدار بهره‌وری مصرف آب (عملکرد بیولوژیک) به‌ترتیب برابر با ۳/۳۳، ۳/۱۱ و ۳/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار بهره‌وری مصرف آب (عملکرد دانه) به‌ترتیب برابر با ۱/۲۹، ۱/۲۴ و ۱/۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد (Jafari et al., 2019). نتایج پژوهش اخیر نشان داد که باتوجه به میزان کم‌آبی، مقدار بهره‌وری مصرف آب در تولید کل محصول بیولوژیک گندم می‌تواند کاهش و یا افزایش یابد و در همین شرایط، مقدار بهره‌وری مصرف آب در تولید دانه گندم، در اثر کم آبی کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر نیز نشان داده شد که باتوجه به رقم محصول، آبیاری کامل و یا کم‌آبی گیاه گندم می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش مقدار بهره‌وری فیزیکی آب بشود.

از سوی دیگر در شکل (۴) میزان محتوای آب مجازی نسبت به عملکرد ارقام مختلف، در دو حالت کشت بدون آبیاری و آبی بررسی شد. به‌طور کلی هر مقدار که بهره‌وری فیزیکی آب بیشتر باشد، محتوای آب مجازی در تولید محصول کم‌تر خواهد بود. از این‌رو بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار محتوای آب مجازی مربوط به ارقام E_5 (۱/۱۹ لیتر در کشت آبی و ۰/۹۹ لیتر در کشت بدون آبیاری) و E_2 (۰/۶ لیتر در کشت آبی و ۰/۸ لیتر در کشت بدون آبیاری) بوده است. محتوای آب مجازی نشان داد که به‌ازای تولید هر یک کیلوگرم دانه گندم، چند لیتر آب باید مصرف شود. پژوهشی مشابه در شهرستان قلعه گنج استان کرمان که دارای آب و هوای خشک و فراخشک گرم بود، انجام شد. شاخص‌های بهره‌وری آب و آب مجازی در کشت محصولات مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۶ ساله ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۵، میزان شاخص‌های مذکور در کشت گندم به‌ترتیب برابر با ۰/۲۸ کیلوگرم بر متر مکعب و ۳/۵۷۱ متر مکعب بر کیلوگرم محاسبه شد (Rahimipour Anaraki et al., 2020). در پژوهشی دیگر در استان کردستان، تحقیقی بر روی محصولات گندم، جو، سیب زمینی، یونجه و شبدر انجام شد. به‌طوری که میزان بهره‌وری فیزیکی آب، آب مجازی و بهره‌وری اقتصادی آب در کشت گندم به‌ترتیب برابر با ۰/۴۵کیلوگرم بر متر مکعب، ۲/۲۲ متر مکعب بر کیلوگرم و ۱/۲۸۳ ریال بر متر مکعب محاسبه شد (Amini et al., 2020). در شکل (۴) پاسخ مقدار آب مجازی نسبت به تغییرات عملکرد محصول، در تیمارهای مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که در کشت آبی نسبت به کشت بدون آبیاری، منحنی عملکرد دانه فاصله بیشتری با نمودار ستونی آب مجازی داشت. این مسئله (به‌خصوص در ارقام E_2 و E_5) بیان می‌کند که آبیاری کامل گیاه بر روی همه ارقام گندم واکنش یکسانی نداشته و قدرت جذب آب و عملکرد ارقام مختلف، تأثیر به‌سزایی بر محتوای آب مجازی می‌گذارد. به این معنی که در شرایط آبیاری کامل گیاهان، ارقام مختلف گندم به یک میزان ثابت و برابر، آب خاک را جذب نکرده‌اند. به‌طوری که می‌توان گفت، برخی از ارقام پُر آب بَر و برخی دیگر کم آب بَر بوده‌اند. البته اگر رقمی پُر آب بَر بوده باشد، به این معنی نبوده است که عملکرد محصول آن هم بیشتر شده است. موارد مذکور مفاهیمی بود که از ارتباط بین پارامتر آب مجازی و عملکرد محصول نتیجه‌گیری شد. از سوی دیگر در نمودار مربوط به شرایط کشت بدون آبیاری (شکل ۴) فاصله بین منحنی عملکرد دانه و نمودار ستونی آب مجازی کاهش یافت. این نتایج نشان داد که در شرایط کمبود آب، دامنه نَوَسان کاهش یافته و نمودارهای عملکرد و آب مجازی در ارقام مختلف به یکدیگر نزدیک شده‌اند. به این مفهوم که در شرایط کشت بدون آبیاری، تغییر رقم بذر باعث ایجاد تفاوت‌های چشم‌گیر در میزان عملکرد محصول و محتوای آب مجازی نخواهد شد.



شکل ۳. بهره‌وری فیزیکی مصرف آب در کشت ارقام مختلف بذر گندم

Fig. 3. Physical efficiency of water consumption in the cultivation of different cultivars of wheat seeds



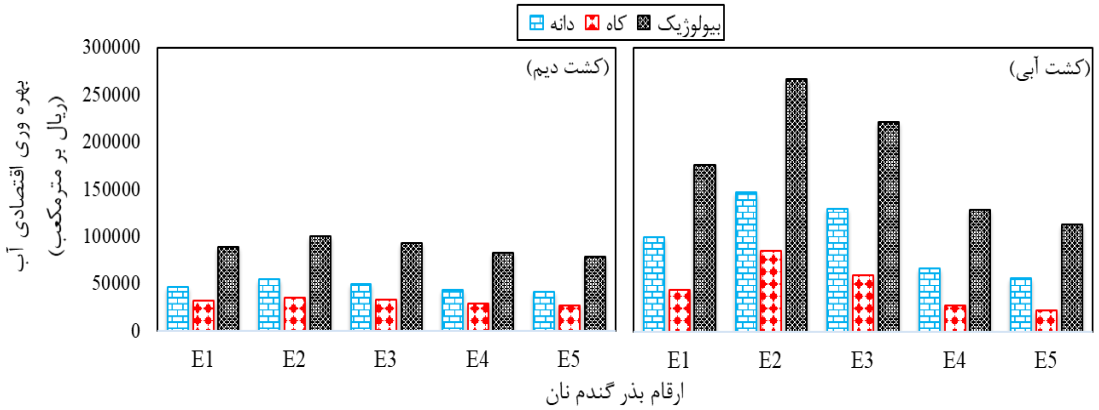
شکل ۴. مقایسه محتوای آب مجازی با عملکرد دانه، در کشت ارقام بذر گندم

Fig. 4. Comparison of virtual water content with grain yield, in the cultivation of wheat seed cultivars

بهره‌وری اقتصادی آب

مقدار بهره‌وری اقتصادی آب در کشت ارقام مختلف گندم برآورد شد و در شکل (۵) ارائه شد. بر اساس نتایج جدول (۵) نوع کشت، رقم بذر و اثر متقابل آن‌ها، بر مقدار بهره‌وری اقتصادی آب اثر معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. در بررسی کل زیست‌توده، دانه و کاه، رقم بک‌کراس روشن (E_2) با بهره‌وری اقتصادی به‌ترتیب ۱۲۴۸۴۲، ۶۸۷۹۱ و ۳۹۸۹۶ ریال بر مترمکعب دارای بیش‌ترین مقدار و رقم کویر (E_5) با بهره‌وری اقتصادی به‌ترتیب ۵۲۹۷۱، ۲۶۱۶۶ و ۱۰۶۶۵ریال بر مترمکعب دارای کم‌ترین مقدار بود. بر اساس نرخ دلار (در سال ۱۴۰۰) مقدار بهره‌وری اقتصادی آب برای کل زیست‌توده، دانه و کاه، در رقم بک‌کراس روشن (E_2) به‌ترتیب ۰/۵۲، ۰/۲۸۷ و ۰/۱۶۶ دلار بر مترمکعب و برای رقم کویر (E_5) به‌ترتیب ۰/۲۲، ۰/۱۱ و ۰/۰۴۵ دلار بر مترمکعب برآورد شد. نتایج پژوهش نشان داد که با تغییر رقم بذر، مقدار بهره‌وری اقتصادی آب در کشت آبی می‌تواند نسبت به کشت بدون آبیاری افزایش و یا کاهش داشته باشد. به این معنی که انتخاب رقم مناسب برای کشت باعث می‌شود که آبیاری کامل گیاه اثر تقویتی داشته و درغیر این‌صورت، اثر تخریبی داشته باشد. به‌منظور

مقایسه نتایج، پژوهشی در سال ۱۳۹۰ بر روی آمار کشت گندم در تعداد ۲۳ مزرعه از استان قزوین انجام شد. در این پژوهش حداقل و حداکثر بهره‌وری اقتصادی مصرف آب در آبیاری بارانی به‌ترتیب ۰/۱۶۳ و ۰/۵۹۳ دلار بر متر مکعب و در آبیاری سطحی به‌ترتیب ۰/۱۱۷ و ۰/۳۳۷ دلار بر متر مکعب گزارش شد (Gholami et al., 2015) . مقایسه نتایج نشان داد که مقدار بهره‌وری اقتصادی زیست‌توده در رقم E_2 به حداکثر بهره‌وری اقتصادی مصرف آب در آبیاری بارانی در پژوهش مذکور نزدیک بوده است.



شکل ۵. بهره‌وری اقتصادی آب در کشت ارقام مختلف بذر گندم

Fig. 5. Economic efficiency of water in the cultivation of different cultivars of wheat seeds

استانداردسازی بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب

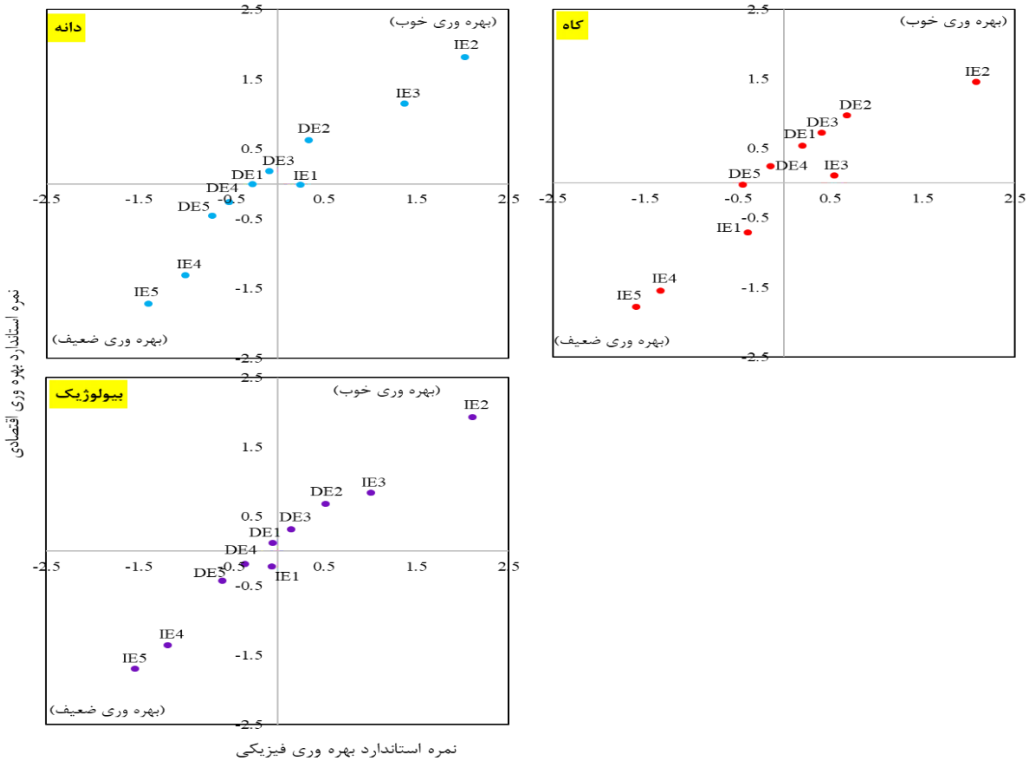
نمره استاندارد (Z) بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب در کشت ارقام بذر گندم، در جدول (۷) ارائه شده است. مقدار Z دارای رتبه‌بندی از ۱- تا ۱ است که به‌ترتیب نشان‌دهنده بهره‌وری ضعیف تا خوب می‌باشد. مقدار نمره استاندارد Z برای هر یک از مؤلفه‌های زیست‌توده بیولوژیک، دانه و کاه در کشت‌های بدون آبیاری و آبی بررسی شد. در نتیجه کم‌ترین مقدار نمره استاندارد بهره‌وری فیزیکی (۱/۶-) و اقتصادی آب (۱/۷۷-) مربوط به تولید کاه در رقم E_5 و بیش‌ترین مقدار نمره استاندارد بهره‌وری فیزیکی (۲/۱) و اقتصادی آب (۱/۹۳) مربوط به تولید بیولوژیک محصول گندم در رقم E_2 تعیین شد. جدول (۷) نشان داد که در یک شرایط مشخص رقم و نوع کشت، هر یک از اجزاءِ دانه و کاه گندم می‌تواند بهره‌وری خوب و دیگری بهره‌وری ضعیف داشته باشد. از این‌رو بر اساس اهداف کشت، باید شیوه کشت و رقم بذر انتخاب گردد. از سوی دیگر و در شکل (۶) مقادیر Z در یک شبکه دو بُعدی بررسی شد. شکل (۶) به‌خوبی نشان داد که جایگاه نمره ارقام مختلف در سه بخش بیولوژیک، دانه و کاه، به‌صورت ثابت نبوده است. ارقامی مثل E_1 در کشت آبی، در بخش‌های بیولوژیک و کاه دارای بهره‌وری فیزیکی نسبتاً ضعیف بوده و از لحاظ تولید دانه دارای بهره‌وری فیزیکی نسبتاً خوب است. حالت مذکور برای بهره‌وری اقتصادی تولید کاه در کشت بدون آبیاری رقم E_4، وجود داشت. در پژوهشی مشابه نمره استاندارد برای بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب در کشت محصولات کشاورزی دشت مغان بررسی شد. کم‌ترین نمره استاندارد بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی به‌ترتیب برای برنج (۰/۹۶۳-) و یونجه (۱/۰۷۲-) و بیش‌ترین آن‌ها برای چغندرقند (۲/۰۶۷) و ذرت دانه‌ای (۲/۹) گزارش شد (Farahza et al., 2021).

جدول ۷. نمره استاندارد (Z) بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب، در شرایط کشت بدون آبیاری و آبیاری کامل ارقام بذر گندم

Table 7. The standard score (Z) of the physical and economic efficiency of water consumption, in the conditions of cultivation without irrigation and full irrigation of wheat seed varieties

نوع کشت	رقم بذر	بهره‌وری فیزیکی آب			بهره‌وری اقتصادی آب		
		بیولوژیک	کاه	دانه	بیولوژیک	کاه	دانه
بدون آبیاری	E_1	-0.05 *	0.198	-0.272	0.117	0.543	-0.006
	E_2	0.515	0.683	0.338	0.683	0.972	0.627
	E_3	0.148	0.404	-0.089	0.316	0.725	0.183
	E_4	-0.351	-0.142	-0.523	-0.183	0.241	-0.266
	E_5	-0.597	-0.444	-0.704	-0.428	-0.026	-0.454
آبیاری کامل	E_1	-0.058	-0.392	0.246	-0.222	-0.707	-0.014
	E_2	2.1	2.078	2.03	1.93	1.457	1.815
	E_3	1.01	0.548	1.375	0.839	0.114	1.147
	E_4	-1.18	-1.33	-0.998	-1.352	-1.542	-1.308
	E_5	-1.537	-1.602	-1.402	-1.7	-1.777	-1.723

*: تحلیل مقادیر Z به‌صورت؛ Z<-۱: بهره‌وری ضعیف، -۱< Z <۰: بهره‌وری تقریباً ضعیف، ۰< Z <۱: بهره‌وری تقریباً خوب، Z >۱: بهره‌وری خوب می‌باشد.



شکل ۶. دسته‌بندی عملکردهای کاه، دانه و بیولوژیک ارقام مختلف، بر اساس نمره استاندارد بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب

Fig. 6. Classification of straw, grain and biological functions of different cultivars, based on the standard score of physical and economic water productivity

روابط بین بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب

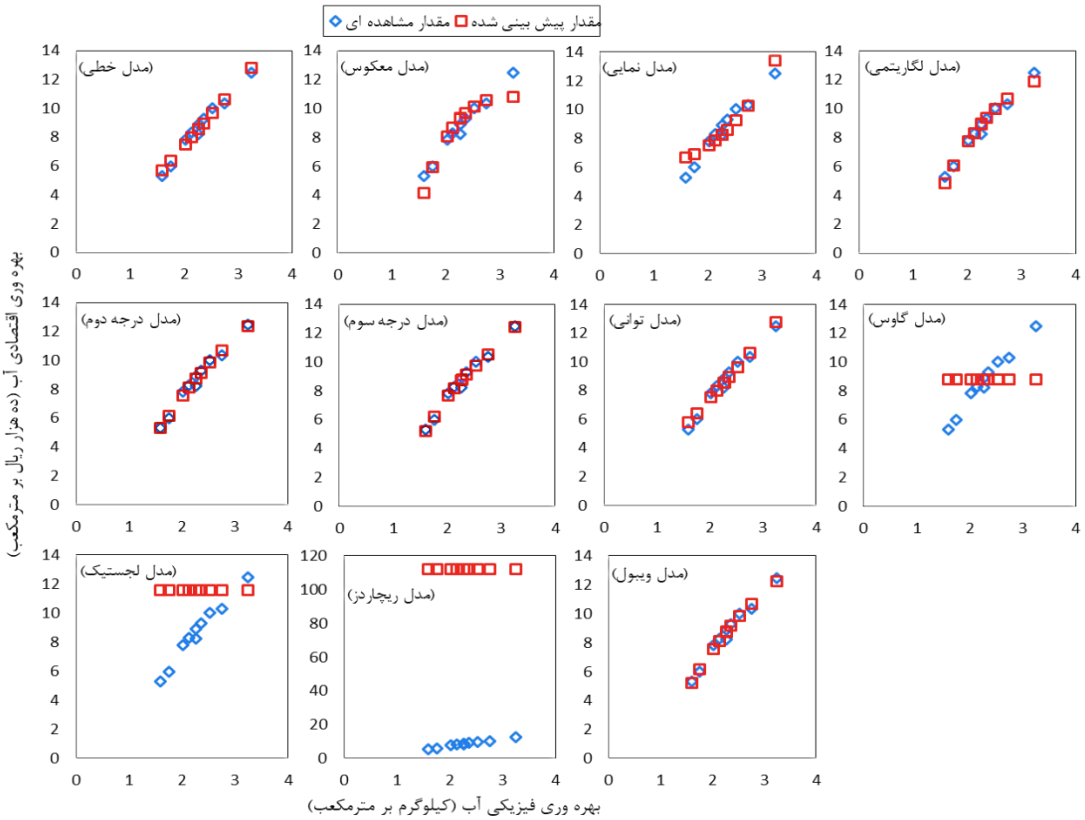
در این پژوهش برای تحلیل رابطه بین دو پارامتر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب و تخمین مقدار بهره‌وری اقتصادی بر اساس بهره‌وری فیزیکی آب، از انواع مدل‌های تجربی استفاده شد. به‌این صورت که بهره‌وری اقتصادی آب به‌عنوان متغیر وابسته (Y) و بهره‌وری فیزیکی آب به‌عنوان متغیر مستقل (X) درنظر گرفته شد. محدودیت این قبیل مدل‌ها، شامل وابستگی آن‌ها به شرایط خاص مکانی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه می‌باشد اما نسبت به سایر روش‌های تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی هستند، ترجیح داده می‌شوند (Saeidi et al., 2018). در این پژوهش روابط مربوط به مدل‌ها در نرم‌افزار SPSS معرفی شد و ضرایب آن‌ها برآورد شد. در جدول (۴) معادلات برآورد شده مدل‌ها ارائه شد و براساس مقادیر ضریب تعیین (R^2) و آماره F، مدل‌های بهینه اولویت‌بندی شدند. درنتیجه اولویت انتخاب مدل بهینه به‌ترتیب مربوط به مدل‌های درجه دوم، ویبول، درجه سوم، خطی، توانی، لگاریتمی، نمایی، معکوس، لجستیک، گاوس و ریچادرز بوده است. در شکل (۷) نیز نحوه برازش مدل‌های تجربی به مقادیر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب نشان داده شد. به‌طوری که وضعیت قرارگیری مقادیر واقعی داده‌ها نسبت به مقادیر تخمینی توسط مدل‌ها، به‌خوبی نشان داده شد. اغلب مدل‌ها به‌غیر از مدل‌های لجستیک، گاوس و ریچادرز، تقریباً دارای انطباق خوبی بین داده‌های واقعی و تخمینی بود. در تحقیق مشابه و با استفاده از روابط تجربی، بهره‌وری اقتصادی آب در کشت انواع محصولات کشاورزی دشت مغان بر اساس بهره‌وری فیزیکی آب مدل‌سازی شد. به‌طوری که مدل درجه سوم دارای بیش‌ترین قابلیت تبیین رابطه بین بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب بود (Farahza et al., 2021). با توجه به این که بر اساس جدول (۴)، مدل درجه سوم دارای اولویت سوم (در بین ۱۱ مدل) بود، از این‌رو نتایج پژوهش حاضر به پژوهش فرحزا و همکاران (Farahza et al., 2021) نزدیک بود. به‌این ترتیب برای تخمین مقدار بهره‌وری اقتصادی آب از روی بهره‌وری فیزیکی آب مدل درجه دوم پیشنهاد شد. اما برای راحتی کار و انتخاب مدل‌های ساده‌تر، مدل خطی نیز مدل مناسبی بود. درنتیجه باوجود این‌که بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب دارای واحدهای یکسانی نبودند، اما در پژوهش حاضر قابلیت تخمین یکی از آن‌ها بر اساس دیگری بررسی شد و نتایج کاربردی قابل قبولی به‌دست آمد.

جدول۴. معادلات مربوط به مدل‌های استفاده شده در این پژوهش

Table 4. Equations related to the models used in this research

نام مدل	معادله مدل	ضریب تعیین (R^2)	آماره F
خطی (۴)*	Y=8.676X-1.215	0.993	1126
معکوس (۸)	Y=38.398+(-43.514/X)	0.963	2508
نمایی (۷)	$Y=6.909e^{0.426X}$	0.965	2702
لگاریتمی (۶)	Y=20.038ln(X)+2.435	0.992	11452
درجه دوم (۱)	$Y= -0.827X^2+12.652X-5.816$	0.996	13343
درجه سوم (۳)	$Y= -18.065+(28.911X)+(-7.792X^2)+(0.963X^3)$	0.996	10007
توانی (۵)	$Y=7.776X^{1.055}$	0.992	11824
گاوس (۱۰)	$Y=18.676*(1-8.16*e^{(-19.804*X^2)})$	0.013	52
لجستیک (۹)	$Y=23.492-ln[1+(2*10^{-7})*e^{(-5.41*X)}]$	0.81	285
ریچاردز (۱۱)	$Y=18.676/[(1+8.044*e^{(-25.192*X)})^{(1/7.053)}]$	0.001	33
ویبول (۲)	$Y=55.231-63.464*e^{(-0.243*X)}$	0.996	12917

*: اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده اولویت انتخاب مدل بر اساس مقادیر ضریب R^2 و آماره F است.



شکل ۷. عملکرد مدل‌های مختلف در تخمین مقدار بهره‌وری اقتصادی آب، بر اساس بهره‌وری فیزیکی آب

Fig. 7. The performance of different models in estimating the amount of economic productivity of water, based on the physical productivity of water

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر انتخاب رقم مناسب بذر در منطقه و تأمین آب مورد نیاز گیاه (درصورت وجود شرایط لازم)، بر روی تعداد پنجه‌زنی گیاه و تولید خوشه در کرت و به‌دنبال آن تفاوت عملکرد محصول مشاهده شد. بیشترین تا کم‌ترین مقادیر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب به‌ترتیب مربوط به ارقام E_2، E_3، E_1، E_4 و E_5 بوده است. نتایج نشان داد که در شرایط یکسان کشت، تغییر ارقام بذر گندم می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش مقدار بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب بشود. از سوی دیگر به‌ازای تولید هر یک کیلوگرم دانه گندم، بیش‌ترین و کم‌ترین محتوای آب مجازی مربوط به‌ترتیب به ارقام E_5 و E_2 اختصاص یافت. نتایج نشان داد که آبیاری کامل گیاه بر روی همه ارقام گندم واکنش یکسانی نداشته و قدرت جذب آب و عملکرد ارقام مختلف، تأثیر به‌سزایی بر محتوای آب مجازی می‌گذارد. به‌طوری که انتخاب رقم مناسب برای کشت باعث می‌شود که آبیاری کامل گیاه اثر تقویتی داشته و درغیر این‌صورت، اثر چندانی ندارد. علت آن می‌تواند به خصوصیات ژنتیکی ارقام و میزان مقاومت آن‌ها به تنش خشکی مربوط باشد. استانداردسازی مقادیر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب نیز نشان داد که هر یک از اجزاءِ دانه و کاه گندم می‌تواند (با توجه به نوع کشت) بهره‌وری خوب و دیگری بهره‌وری ضعیف داشته باشد. از این‌رو بر اساس اهداف کشت، باید شیوه کشت و رقم بذر انتخاب گردد. با تعیین روابط بین بهره‌وری اقتصادی و فیزیکی آب، بهترین مدل‌های تجربی برای این کار به‌ترتیب شامل مدل‌های درجه دوم، ویبول، درجه سوم، خطی، توانی، لگاریتمی، نمایی و معکوس بوده است. از این‌رو اگرچه واحدهای اندازه‌گیری بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب یکسان نبوده و تقابل و مقایسه دو شاخص مذکور به‌سادگی امکان‌پذیر نبود، اما در پژوهش حاضر قابلیت تخمین یکی از آن‌ها بر اساس دیگری نشان داده شد. در مجموع ضمن انتخاب ارقام گندم مناسب کشت برای دو حالت کشت بدون آبیاری و آبیاری کامل، مدل تجربی درجه دوم برای تحلیل متقابل میزان بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب معرفی شد.

منابع

Abbasi, F., & abbasi, N. (2017). Water productivity in agriculture; Challenges and prospects. *Journal of Water and Sustainable Development*, *4*(1), 141-144. (In Persian)

Agresti, A. (2012). Categorical data analysis (Vol. 792). John Wiley & Sons.

Ahmadi, K., Ebadzadeh, H.R., Hatami, F., Mohammadnia, Sh., Esfandiyaripoor, E., & Abbas Taleghani, R. (2021). Agriculture information in 2020. *Ministry of Agriculture, Iran*. Pp. 1-97. (In Persian)

Al-Ghzawi, A. L., Bani Khalaf, Y., Al-Ajlouni, Z., Al-Quraan, N., Musallam, I., & Bani Hani, N. (2018). The effect of supplemental irrigation on canopy temperature depression, chlorophyll content, and water use efficiency in three wheats (Triticum aestivum L. and T. durum desf.) varieties grown in dry regions of Jordan. *Journal of Agriculture*, 8(5), 1-23.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation Drainage Paper No.56*, Pp. 1-326.

Amini, A., Porhemmat, J., & Sedri, M.H. (2020). Investigating the physical and economic efficiency of water in major crops in the Talvar Watershed, Kurdistan, Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 12(2), 481-491. (In Persian)

Azizizehan, A. A., Shahabifar, M., Ebrahimipak, N., Razavi, R., Ghalebi, S., Saraei-Tabrizi, M., Tolooei, R., & Piri, R. (2014). Evaluation the efficiency of wheat water consumption in Iran and the world. In: Proceedings of 1th National *Congress* on Soil and Water Management in Wheat Production. 9-10 Dec, *Soil and water research institute*, Karaj, Iran.

Baygi, Z., Saifzadeh, S., Shirani Rad, A. H., Valadabadi, S. L., & Jafarinejad, A. (2017). Seed yield and yield component of some spring wheat varieties as affected by different sowing dates in Neishabour. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(4), 905- 920. (In Persian)

FAO. (2018). GIEWS-Crop prospects and food situation. Quarterly global report, 3 ,September, Rome, Italy.

Farahza, M. N., Nazari, B., Akbari, M. R., Naeini. M., & Liaghat, A. (2021). Assessing the physical and economic water productivity of annual crops in Moghan plain and analyzing the relationship between physical and economic water productivity. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(42), 166-179. (In Persian)

Farmahini, M., Mirzakhani, M., & Sajedi, N. (2014). Effect of water stress and absorbent materials application on yield and components yield of fall wheat. *Journal of New Finding in Agriculture*, 7(3), 263- 274. (In Persian)

Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Noory, H. (2015). Investigation of irrigation water productivity in sprinkler and surface irrigation systems (Case study: Qazvin plain). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), 135- 146. (In Persian)

Jafari, N., Aghayari, F., & Paknejad, F. (2019). Effect of different deficit-irrigation methods on yield and water use efficiency of wheat (Parsi cultivar). *Journal of Crop Ecophysiology*, 4(48), 581- 598. (In Persian)

Karimi, M., & Jolaini, M. (2017). Evaluation of agricultural water productivity indices in major field crops in Mashhad Plain (technical note). *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 133-138. (In Persian)

Kaviani, A., Sohrabi, T., & Arasteh, P. (2011). Evapotranspiration and water productivity estimation using SEBAL algorithm and comparison with lysimeter data. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(2), 165-175. (In Persian)

Khodarahmi, Z., & Ebrahimi-Pak, N. (2012). Determining the water requirement of wheat in the Qazvin plain by using the plant coefficient in real conditions and comparing the results with lysimeter data and the national water document. *Paper presented at the 11th national seminar on irrigation and evaporation reduction.* Shahid Bahonar University, Kerman, Iran. (In Persian)

Kiani, A.R., & Kalateharabi, M. (2009). Effect of different amount of irrigation water on yield and water use efficiency of various wheat cultivars in Gorgan. *Journal of Plant Production*, 16(3), 85- 102. (In Persian)

Ministry of Agricultural. (2013). Technical instructions for irrigated and rainfed wheat cultivation. Affairs of plant production, 1-212. (In Persian)

Ministry of Agriculture. (2015). Introduction of agricultural varieties (safety and health of food). *Research institute for improvement and seed preparation*, 1-235. (In Persian)

Mokari, M., Abedinpour, M., & Dehghan, H. (2020). Effect of drought stress and planting date on grain yield and water use efficiency of autumn wheat in Kashmar region. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(2), 167- 186. (In Persian)

Nakhjavanimoghaddam, M. M., Ghahraman, B., & Zareei, Gh. (2017). Wheat Water Productivity Analysis under Different Irrigation Management Practices in Some Regions of Iran. *Journal of Water Research in Agriculture*, 31(1), 43-57. (In Persian)

Oweis, T. Y., & Hachum, A.Y. (2003). Improving water productivity in the dry areas of west Asia and North Africa. CAB International, water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement. 179-198.

Rahimipour Anaraki, M. R., Mohammadi, A., Rafieian, M., Arjmandi, R., & Karimi, S. (2020). Evaluation of virtual water and water footprint of crop production (case study: Qaleganj county)**.** *Journal of Arid Regions Geographic's Studies*, 11(41), 77-92. (In Persian)

Saeidi, R., Ramezani-Etedali, H., Samadi, A., & Tavakoli, A. R. (2017). Optimum water allocation for supplementary irrigation in wheat and barley farms in the sub-basins of Kamyaran region. *Journal of Water and Soil*, 30(3), 701-714. (In Persian)

Saeidi, R., Sotoodehnia, A., Ramezani Etedali, H., Nazari, B., & Kaviani, A. (2018). Effect of water salinity and soil nitrogen deficiency on Ks-coefficient and readily available water of maize. *Journal of Water and Soil*, 32(5), 865-878. (In Persian)

Saeidi, R., Ramezani-Etedali, H., Sotoodenia, A., Kaviani, A., & Nazari, B. (2021). Salinity and fertility stresses modifies K_s and readily available water coefficients in maize (Case study: Qazvin region). *Journal of Irrigation Science*, 39, 299- 313.

Saeidi, R., Sotoodenia, A., & Babaei, G. (2022). Effect of supplementary irrigation with different salinity levels on yield of rainfed wheat in Qazvin. *Journal of Water Management in Agriculture*, 8(2), 89-100. (In Persian)

Soleimani, H., & Hasanli, A. (2009). Estimation of water unit cost, water (WUE) efficiency and water added value for major crops in Darab as an arid area. *Journal of Agricultural Knowledge of Iran*, 5(1), 45- 60. (In Persian)

Statistical center of Iran. (2021). Selling price of products and cost of agricultural services in rural areas of the country. Organization of the program and budget. 1-61 (In Persian).

Xu, X., Zhang, Y., Li, J., Zhang, M., Zhou, X., Zhou, S., & Wang, Z. (2018). Optimizing single irrigation scheme to improve water use efficiency by manipulating winter wheat sink-source relationships in Northern China Plain. *Journal of PLoS ONE*, 13(3), 1-19.

Zamani, A., Mortazavi, A., & Balali, H. (2014). Economical water productivity of agricultural products in Bahar plain, Hamadan. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(1), 51-61(In Persian).