

Water Productivity of Commercial Bread Wheat Cultivars in Southern Warm and Dry Zone

M. Moayeri^{1*}, S.M. Tabib Ghafari², M. Esmailzadeh Moghadam³

1- Agricultural Engineering Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education And Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran

(*- Corresponding Author Email: Man_moayeri@yahoo.com)

2- Agricultural and Horticultural Sciences Research Department, Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education And Extension Organization (AREEO), Dezful, Iran

3- Seed and Plant Improvement Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Received: 04 November 2025
Revised: 23 December 2025
Accepted: 05 January 2026
Available Online: 05 January 2026

How to cite this article:

Moayeri, M., Tabib Ghafari, S.M., & Esmailzadeh Moghadam, M. (2026). Water productivity of commercial Bread wheat cultivars in southern warm and dry zone. *Journal of Water and Soil*, 39(5), 499-514. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.96227.1507>

Introduction

Wheat is the principal crop in Iran in terms of both production and cultivated area. Enhancing its production is critically important for the economy and national food security. Assessing the water productivity of commercial wheat varieties is key to achieving more efficient water use. Previous studies have demonstrated that wheat water productivity is influenced by cultivar type and irrigation amount, with different varieties exhibiting varying grain yields under both water deficit and surplus conditions. Increasing yield and water productivity depend on several factors, most notably the selection of high-yielding, improved cultivars with lower water requirements, coupled with irrigation management strategies tailored to the characteristics of these varieties, especially in hot and arid climates.

Materials and Methods

A two-year field experiment was conducted during the 2021-2022 and 2022-2023 growing seasons at the Safiabad Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, using a randomized complete block design with three replications. The experimental treatments consisted of five irrigation levels (25%, 50%, 75%, 100%, and 125% of crop evapotranspiration) as the horizontal factor and six bread wheat cultivars (Azadegan, Ouj, Barat, Jalal, Darion, and Mehregan) as the vertical factor.

Following land preparation, fertilization with macronutrients was applied before planting and during the vegetative growth stage, based on soil test recommendations. Sowing was performed using a Wintersteiger row planter, and irrigation was supplied via a T-tape drip irrigation system. Water was sourced from the Dez irrigation and drainage network. The designated irrigation treatments were implemented starting from the third irrigation event, with water volumes measured using volumetric water meters. Crop evapotranspiration was calculated using the evaporation pan method, and soil moisture balance was monitored by auger sampling and the gravimetric method. Weed control was achieved through appropriate herbicide applications.

Results and Discussion

In the first and second years, total evapotranspiration (ET) was 310 mm and 300 mm, while total rainfall was 145 mm and 289 mm, respectively. Accounting for effective rainfall, the irrigation treatments supplied 42, 62, 82, 102, and 122% of the crop ET in the first year, and 60, 76, 89, 103, and 117% in the second year. A combined



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.96227.1507>

analysis of variance revealed a significant year effect. The grain yield of the cultivars in response to ET showed maximum variations of 10% and 30% in the first and second years, respectively. Water productivity, measured as grain yield per millimeter of water consumed, ranged from 18.43 to 22.38 kg ha⁻¹ mm⁻¹. By selecting an appropriate cultivar and managing deficit irrigation, the applied water productivity and crop water productivity indices increased by 63% and 93%, respectively. The relationship between plant water supply and grain yield followed a quadratic function. Based on this model, the optimal deficit irrigation strategy was to supply 70% of wheat ET, which resulted in an acceptable grain yield reduction of approximately 15%. Across irrigation treatments in both years, the Darion, Mehregan, and Jalal cultivars exhibited higher average grain yield and crop water productivity than the mean of all cultivars. A cluster analysis was performed using R software, based on the regression coefficients of the grain yield, relative water supply, and evapotranspiration data. The cultivars were grouped into distinct clusters, and practical, cluster-specific management recommendations are provided.

Conclusion

Hot and dry climates are characterized by high variability in evaporation, precipitation patterns, and crop water requirements across different wheat growth stages. Consequently, to achieve sustainable production and enhance water productivity within the genetic potential of wheat varieties, breeding programs should target the development of cultivars capable of producing more than 24 kg of grain per hectare per millimeter of water consumed.

Keywords: Applied water, Productivity, Production function, Water consumption, Yield

بهره‌وری آب ارقام تجاری گندم نان در اقلیم گرم و خشک جنوب

منصور معیری^{۱*} - سید محمود طبیب غفاری^۲ - محسن اسماعیل زاده مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

چکیده

به منظور ارزیابی و مقایسه ارقام تجاری موجود گندم نان از نظر عملکرد و بهره‌وری آب، آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی به مدت دو سال زراعی از ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۲ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد اجرا شد. در این آزمایش تیمار افقی شامل پنج سطح مقادیر آب (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ نیاز آبیاری و تیمارهای عمودی شامل شش رقم گندم آزادگان، اوج، برات، جلال، داریون و مهرگان با سه تکرار بود. نیاز آبی بر اساس روش تشت تبخیر محاسبه و اعمال تیمارهای آبیاری با استفاده از روش آبیاری نواری - قطره‌ای (تیپ) انجام شد. در تجزیه واریانس مرکب اثر سال به دلیل شرایط اقلیمی هر سال به‌ویژه در مقدار و پراکنش بارش مؤثر، معنی‌دار شد. حداکثر تغییرات عملکرد دانه ارقام در تأمین نیاز آبی طی دو سال به ترتیب ۱۰ و ۳۰ درصد و مقدار تولید دانه به‌ازای هر میلی‌متر آب مصرفی ارقام در محدوده ۱۸/۴۳ تا ۲۲/۳۸ کیلوگرم در هر هکتار بود. در تیمارهای آبیاری مجزای هر دو سال، میانگین صفات عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی به ترتیب در ارقام داریون، مهرگان و جلال از متوسط کل ارقام بالاتر بود. میانگین دوساله بهره‌وری آب این ارقام در آبیاری کامل به ترتیب ۲/۵۷، ۲/۴۶ و ۲/۴۳ کیلوگرم در متر مکعب آب مصرفی اندازه‌گیری شد. با انتخاب رقم و مدیریت کم آبیاری متناسب آن، شاخص‌های بهره‌وری آب کاربردی و آب مصرفی به ترتیب تا ۶۳ و ۹۳ درصد افزایش داشت. در تجزیه کلاستر در محیط نرم‌افزار R بر اساس ضرایب مدل‌های رگرسیون عملکرد دانه - تأمین نسبی آب و نیاز آبی، ارقام خوشه‌بندی و توصیه‌های کاربردی برای هر خوشه ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: آب کاربردی، آب مصرفی، بهره‌وری، تابع تولید، عملکرد

مقدمه

سطح زیر کشت گندم در ایران ۷/۶ میلیون هکتار است که ۴/۸ میلیون هکتار آن کشت دیم و ۲/۸ میلیون هکتار آن کشت آبی است و متوسط عملکرد گندم دیم و آبی به ترتیب ۱۶۰۶ و ۳۸۹۲ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Anonymous, 2025). بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای (Baghani et al., 2018) این سطح زیر کشت آبی، ۱۵۲۷۴ میلیون متر مکعب آب قابل استحصال کشور را به خود اختصاص می‌دهد، اهمیت بهبود بهره‌وری گندم در جایگاه و ارزش اقتصادی، معیشتی، غذایی، سطح زیر کشت و همچنین مقدار آب مورد

نیاز مزارع آبی و دیم است. چالش تولید محصول بیشتر با محدودیت‌های فزاینده آب، افزایش تولید محصول به ازای واحد حجم آب مصرفی را می‌طلبد (Kijne et al., 2003). در سطح کشور و جهان تحقیقات زیادی در زمینه تعیین آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید گندم انجام شده‌است. ارزیابی‌های بهره‌وری آب (که عبارت است از نسبت عملکرد دانه به کل آب کاربردی) و سایر صفات وابسته، در ارقام تجاری دوروم و نان گندم ما را به استفاده بهینه‌تر از آب محدود قابل دسترس هدایت می‌کند (Kang et al., 2002; Sharma et al., 1986; Richards et al., 2002). مطالعه ۸۴ منبع تحقیقاتی در سال‌های

۱- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد دزفول، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران (*- نویسنده مسئول: Email: Man_moayeri@yahoo.com)

۲- بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی صفی آباد دزفول، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، دزفول، ایران

۳- مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

برآورد مقدار آب آبیاری و تعیین بهره‌وری آب آبیاری گندم توسط سامانه نیاز آب^۱ را با نتایج اندازه‌گیری این مزارع مقایسه و گزارش کردند که سامانه نیاز آب نتایج قابل قبولی در تعیین مقدار آب آبیاری و بهره‌وری آب گندم در سطح مزارع کشور برآورد می‌کند. استان خوزستان به همراه استان‌های هرمزگان، بوشهر، قسمت‌های جنوبی استان‌های فارس، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، کرمان و سیستان و بلوچستان، کرمانشاه و یزد، اقلیم گرم و خشک جنوب کشور را تشکیل داده که در محدوده جغرافیایی ۲۵ تا ۳۸ درجه عرض شمالی واقع شده‌اند و با وجود دشت‌های مستعد و منابع آب فراوان در بعضی از مناطق (خوزستان، فارس، کرمان و ...) انتظار می‌رود عملکرد و به تبع آن تولید گندم در این اقلیم بیش از مقدار فعلی (میانگین عملکرد ۳۰۴۰ کیلوگرم در هکتار) باشد. آب و هوای گرمسیری و خشک، زمستان‌های ملایم، بهار کوتاه و گرم، فصل گرم طولانی با حداکثر ۵۰ درجه سانتی‌گراد و حداقل ۵ - درجه سانتی‌گراد و حداکثر تعداد روزهای یخبندان کمتر از یک ماه از ویژگی‌های این اقلیم است (Esmailzadeh et al., 2020). بر اساس آمار نامه کشاورزی سال ۱۴۰۳-۱۴۰۲، سطح زیر کشت گندم آبی در استان خوزستان ۷۵۱ هزار هکتار و تولید گندم (تحویلی به سیلو) بیش از ۱۷۹۵ هزار تن است و از این جهت استان خوزستان بالاترین سطح زیر کشت و تولید گندم را در کشور به خود اختصاص داده است (Anonymous, 2025). متوسط بهره‌وری آب کاربردی در مزارع کشاورزان استان خوزستان حدود ۰/۸۴ (Moayeri, 2011b) و ۰/۹۲ (Baghani et al., 2018) گیلوگرم در متر مکعب آب (آبیاری و بارش مؤثر) گزارش شده‌است و طبق اندازه‌گیری‌های موردی در مزارع کشاورزان این متوسط می‌تواند به دو برابر ارتقا پیدا کند (Moayeri, 2011a). یکی از اهداف مهم کشاورزی پایدار بهینه‌سازی تولید براساس نهاده‌های محدود مانند آب است (Kang et al., 2002; Wojcik, 1990). این موضوع لزوم اجرای آزمایشاتی در زمینه بررسی روابط واقعی بین میزان آب مصرفی گیاه و عملکرد تولیدی (محصول استراتژیکی مثل گندم) را توجیه می‌کند. پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که عملکرد می‌تواند با آب مصرفی کمتر، ثابت باقی‌مانده حتی کیفیت محصول نیز تا حدی افزایش یابد (Fapohunda et al., 1984; Kang et al., 2002; Siddique et al., 1989; Wojcik, 1990; Sammis & Smeal, 1983). سیاهپوش و ابراهیمیان (Siahpoosh & Ebrahimian, 2005) در سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۸۲ هشت رقم مختلف گندم استان فارس را با استفاده از روش آبیاری تک شاخه‌ای ارزیابی و گزارش کردند که معادله بین عملکرد دانه و تبخیر تعرق تابع توزیع خطی است. باغانی و همکاران (Baghani et al. 2003) در استان خراسان رضوی و همچنین کیانی

۲۰۰۴-۱۹۷۹ میلادی در سطح جهان نشان داد که متوسط شاخص بهره‌وری آب گندم، ۱/۰۹ و دامنه آن ۱/۷-۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب آب کاربردی بود (Zwart & Bastiaansen, 2004). فولی و همکاران (Foley et al., 2019) با استفاده از روش متاآنالیز، بهره‌وری آب مصرفی گندم (نسبت متوسط عملکرد به آب مصرفی گیاه یا نیاز آبی) ۶۸ سایت را در کشورهای مختلف تحلیل کردند در این بررسی گزارش شد که در نیمکره شمالی و در عرض‌های بالاتر، بهره‌وری آب مصرفی افزایش می‌یابد و در گروه‌بندی انجام شده سه طبقه بهره‌وری آب مصرفی کم (کوچک‌تر از ۰/۷۵ کیلوگرم در متر مکعب)، متوسط (از ۰/۷۵ تا ۱/۱۰ کیلوگرم در متر مکعب) و زیاد (بزرگ‌تر از ۱/۱۰ کیلوگرم در متر مکعب) معرفی کردند. در این مطالعه کشورهای آمریکا، چین، مصر، ترکیه، هلند، مکزیک و فلسطین را دارای بالاترین مقادیر بهره‌وری آب مصرفی گندم و کشور ایران را بر اساس مطالعه واقفی و همکاران با میانگین بهره‌وری آب مصرفی گندم ۰/۹۴ کیلوگرم در متر مکعب در طبقه متوسط گزارش کردند (Ashraf: Foley et al., 2019). مقادیر بهره‌وری آب ۱۰ محصول زراعی انتخابی با استفاده از نتایج ۶۷ طرح تحقیقاتی انجام‌شده طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۶ در ایستگاه‌های تحقیقاتی ۱۳ استان کشور بررسی شد و میانگین بهره‌وری آب گندم، ۱/۶۲ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شد (Montazar & Kosari, 2007). عزیزی‌زهان و همکاران (Azizizahan et al., 2014) با تعریف سه شاخص بهره‌وری کمی، اقتصادی و اشتغالی آب در تولید گندم، به بررسی شرایط مزارع گندم در سطح ایستگاه‌های تحقیقاتی ایران و جهان در یک دوره ۲۰ ساله از سال زراعی ۷۳-۱۳۷۲ تا ۹۳-۱۳۹۲ پرداختند. دامنه تغییرات نتایج آن‌ها در بهره‌وری آب کشاورزی برای محصول گندم بین ۰/۳ تا ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که غالب تکرارهای آن بین ۰/۶ تا ۱/۸ قرار داشته‌اند (Azizizahan et al., 2014). باغانی و همکاران (Baghani et al., 2018) با اندازه‌گیری مستقیم در ۲۴۱ مزرعه کشاورزان استان‌های خوزستان، فارس، خراسان رضوی، گلستان، اردبیل، کرمانشاه، قزوین، جنوب کرمان، سمنان، همدان، آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی، تفاوت عملکرد، حجم آب مصرفی و شاخص بهره‌وری مصرف آب در تولید گندم در استان‌های مختلف را معنی‌دار گزارش کردند. در این بررسی بیشترین و کمترین عملکرد به‌ترتیب ۶۱۳۸ و ۴۲۲۶ کیلوگرم در هکتار در اقلیم نیمه‌خشک معتدل و نیمه‌خشک گرم و میانگین عملکرد گندم، حجم آب مصرفی، بهره‌وری مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب به اضافه بارش مؤثر ده ساله در سطح کشور به‌ترتیب ۵۱۷۱ کیلوگرم در هکتار، ۵۴۵۵ متر مکعب در هکتار و ۱/۰۱ و ۰/۷۸ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کردند (Baghani et al., 2018). در ادامه این بررسی، ابراهیمی‌پاک و همکاران (Ebrahimipak et al., 2022)

مواد و روش‌ها

این آزمایش مزرعه‌ای باهدف مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب ارقام تجاری گندم با استفاده از نوارهای خردشده^۱ در متن اصلی طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار طی دو سال زراعی ۱۴۰۰ الی ۱۴۰۲ اجرا شد. پنج تیمار مقدار آب آبیاری (۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ نیاز آبیاری) با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای-نواری (تیپ) در کرت افقی و شش رقم تجاری گندم آزادگان، اوج، برات، جلال، داریون و مهرگان در کرت‌های عمودی بود. هر کرت خرد شده دارای طول ۶ متر با عرض ۴ پشته با فواصل ۶۱ سانتی‌متر بود. انتخاب روش آبیاری قطره‌ای نواری به‌عنوان ابزار یا روشی جهت اعمال یکنواخت با بازده آبیاری بالا و اطمینان از اعمال حجم یا عمق آبیاری تیمارها نسبت به سایر روش‌های آبیاری بود. نوارهای آبیاری (تیپ) با قطر ۱۶ میلی‌متر و فاصله قطره‌چکان ۱۰ سانتی‌متر با آبدهی ۱/۷ الی ۲/۱ لیتر در ساعت در فشار یک اتمسفر استفاده شد. بدین منظور در نیمه پاییز هر سال عملیات تهیه زمین مطابق عرف منطقه انجام گرفت سپس از خاک محل آزمایش تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری جهت تعیین برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌گیری به‌عمل آمده (جدول ۱) و بر اساس آزمون خاک کودهای شیمیایی تعیین، تقسیم و داده شد (به‌طور متوسط ۲۵۰ الی ۳۰۰ کیلوگرم اوره-۵۰ کیلو پایه مابقی در سه قسط تا قبل از گلدهی، ۱۵۰ الی ۲۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل-پایه و ۵۰ الی ۹۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم-پایه). آب موردنیاز از شبکه آبیاری دز تأمین شد. کشت با ردیف‌کار آزمایشی غلات (سه خط روی پشته‌های با فواصل ۶۰ سانتی‌متری) و برای هر تیمار بر اساس وزن هزار دانه (برحسب ۴۰۰ دانه در متر مربع) در تاریخ ۱۸ الی ۲۱ آذر انجام گرفت. پس از کشت آبیاری‌های اول و دوم به‌صورت یکنواخت و با استفاده از روش آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ- به‌ازای هر پشته یک نوار) انجام و پس از استقرار گیاهچه‌ها، از آبیاری سوم به بعد تیمارهای آبیاری (مقادیر آبیاری) اعمال شد. در اعمال آبیاری‌ها سعی شد تا هیچ‌گونه رواناب ناشی از بیشتر بودن ریزش آب در مقایسه با نفوذ آب به خاک اتفاق نیفتاد. جهت کنترل علف‌های هرز باریک‌برگ و پهن‌برگ از سموم علف‌کش پوماسوپر و گرانستار به مقادیر ۱/۲ و ۲۰ گرم در هکتار در اواسط بهمن یا اوایل اسفندماه (قبل از شروع طویل شدن ساقه) استفاده شد. در طول فصل رشد ضمن ثبت مراحل رشد ارقام گندم نیاز آبی روزانه (ET_{ci}) با استفاده از روش تشتک تبخیر- (حاصل‌ضرب تبخیر روزانه تشتک تبخیر (E_{pi}) در ضریب تشتک (K_{pi}) و ضرایب گیاهی (K_{ci}) مراحل رشد گندم در معادله ۱) محاسبه (Allen et al., 1998) شد و در فواصل بارش‌ها و قبل از آبیاری‌های موردنیاز، رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری و برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس

و کلاته عربی (Kiani & Kalateharabi, 2012) در استان گلستان، به بررسی واکنش ارقام مختلف گندم نسبت به آب، پرداختند و گزارش کردند که عملکرد گندم تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و ارقام است و تغییرات عملکرد در برابر آب مصرفی (تابع تولید) ارقام مختلف از نوع درجه دوم است.

تا کنون هدف‌گذاری برنامه به‌نژادی در اقلیم گرم و خشک، ارزیابی پایداری فتوتیپی و تحلیل اثر متقابل فنوتیپ و محیط برای گزینش ارقام با ظرفیت عملکرد بالا، تحمل نسبتاً خوب به گرمای آخر فصل، زودرسی نسبی، مقاومت قابل‌قبول به بیماری زنگ زرد و قهوه‌ای و ریزش دانه بوده است (Esmaeilzadeh et al., 2020). در فعالیتهای به‌نژادی گندم و معرفی ارقام جدید ضروری است تا به شاخص بهره‌وری آب توجه خاص نمود در این خصوص طی ۱۵۰ سال فعالیتهای به‌نژادی گندم دیم در استرالیا، بهره‌وری آب ارقام از ۲۰ کیلوگرم دانه در هکتار در ۱ میلی‌متر به مقدار ۲۴ کیلوگرم دانه در ۱ میلی‌متر رسیده است در این بررسی نیاز آبی یا آب مصرفی توسط گیاه، معادل مجموع کاهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه و در کل فصل رشد بود (Sadras & Lawson, 2013). عبدالرحمان (El-Rahman, 2009) در کشور مصر بهره‌وری آب کاربردی سه واریته گندم را در روش آبیاری قطره‌ای، متفاوت و برابر ۱/۲۰، ۱/۱۷ و ۱/۱۳ کیلوگرم دانه در متر مکعب آب گزارش کرد. معیری با هدف بررسی و کاهش تأثیر تنش‌های خشکی و گرمایی در پژوهشی سه ساله، شش رقم و لاین امیدبخش گندم دوروم و نان تحت آبیاری بارانی تک‌شاخه‌ای را بررسی کرد در این پژوهش سه ساله مشخص شد که بهره‌وری آب متأثر از رقم و مقدار آب بود و ارقام در بیش و کم آبیاری‌ها واکنش‌های متفاوتی داشتند (Moayeri, 2019). بالابردن عملکرد محصول و بهره‌وری آب تابع عوامل خاصی است که مهمتر از همه انتخاب و کشت ارقام اصلاح‌شده پر محصول با مقدار مصرف آب کمتر و همچنین مدیریت آبیاری منطبق با خصوصیات ارقام تجاری گندم بویژه در اقلیم گرم و خشک جنوب است. از این‌رو در این بررسی سطوح مختلف آب بر خصوصیات فیزیولوژیک منابع پَرظرفیت ژنتیکی گندم، ارزیابی و با تعیین تابع تولید هر رقم، معادله آب- عملکرد تعیین و توصیه‌های کاربردی در این خصوص ارائه می‌شوند. انتظار است نتایج این مطالعه بتواند از یک‌سو، راهگشای مطالعه بهره‌وری آب و اجزای متشکله آن در شرایط مزرعه برای محققین و به‌نژادگران و از سوی دیگر راهنمای مؤثری برای کشاورزان از نظر انتخاب ارقام مناسب برای مناطق مختلف با توجه به زمان بحران رطوبتی منطقه کشت آن‌ها باشد.

تحقیقات هواشناسی کشاورزی واقع در مزرعه محل اجرای آزمایش، به دست آمد. در برداشت نهایی بوته‌های ۴/۸ متر از هر کرت برداشت و وزن دانه و ماده خشک تولیدی تعیین شده با توجه به عملکرد، میزان آب آبیاری و بارش مؤثر در طول کل دوره رشد گندم، شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی آب تعیین شد.

در این بررسی بر اساس روش فائو حداکثر بارش مؤثر در عمق توسعه ریشه گیاه تعیین و در محاسبات استفاده شده است و بهره‌وری آب کاربردی (معادله ۴) که عبارت است از نسبت عملکرد دانه یا کل ماده خشک تولیدی (Y) بر مجموع بارش مؤثر (R_e) و آب آبیاری (I) و بهره‌وری آب مصرفی (معادله ۶) که عبارت است از نسبت عملکرد دانه یا کل ماده خشک تولیدی (Y) بر آب خالص مصرفی (ET_a) - معادله (۵) در هر تیمار/رقم محاسبه شدند. سپس مقایسه میانگین‌های عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری آب تیمارهای مختلف با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

$$Wp = \frac{Y}{(I+R_e)} \quad (۴)$$

$$ET_a = I_n + R_e \quad (۵)$$

$$CWP = 100 \times \frac{Y_a}{ET_a} \quad (۶)$$

تعیین ضرایب معادله رگرسیون خطی و غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار SPSS و تجزیه کلاستر این مدل‌ها در محیط نرم‌افزار R انجام شد.

نیاز آبیاری متناسب شرایط آب و هوایی

در شکل ۱، تبخیر، نیاز آبی محاسباتی، بارش کل و نیاز آبیاری تجمعی (شرایط رطوبتی خاک بدون آبیاری) به همراه تغییرات رطوبت خاک (بیان رطوبتی خاک در تیمار آبیاری کامل) در عمق توسعه ریشه گیاه در تیمار آبیاری برابر نیاز آبی از جوانه‌زنی تا رسیدگی فیزیولوژیکی گندم هر دو سال نمایش داده شده است.

نیاز آبی با بیان روزانه (روز i ام) رطوبت خاک (S) برآورد شده (تدقیق محاسبات تغییرات روزانه عمق آب خاک (S_{i+1}) با منظور کردن بارش مؤثر روزانه (R_{ei}) در عمق توسعه ریشه در محیط نرم‌افزار اکسل (نمودار قرمز رنگ شکل ۱) در تیمار آبیاری کامل مقایسه شد (معادله ۳). بارش مؤثر عبارت بود از ۸۰ درصد بارش با شرط اینکه در عمق توسعه ریشه گیاه ظرفیت ذخیره وجود داشته باشد. اندازه‌گیری رطوبت خاک (تا چهار نوبت و هر نوبت حداقل دو نقطه) با استفاده از روش وزنی و با نمونه‌گیری توسط آگر و در اعماق متناوب ۱۵ سانتی‌متری تا عمق ۱۰۵ سانتی‌متری در تیمار آبیاری کامل انجام شد. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه سینوپتیک/ تحقیقات هواشناسی کشاورزی صفی‌آباد واقع در مزرعه محل اجرای آزمایش، تهیه شد. بر اساس تفاضل آب در دسترس گیاه (ΔS) بین دو آبیاری، سطح سایه‌انداز بوته‌های گندم (P_s) و بازده کاربرد آب (E_a) حجم آب (نیاز آبیاری یا حجم ناخالص هر آبیاری - I_g) در معادله ۳ تیمارهای آبیاری (۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد از I_g × مساحت نوار آزمایشی) با دور آبیاری حدود ۵ ± ۳۵ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر اعمال شد.

$$ET_{ci} = E_{pi} \times K_{pi} \times K_{ci} \quad (۱)$$

$$S_{i+1} = S_i + I_{gi} + R_{ei} - ET_{ci} \quad (۲)$$

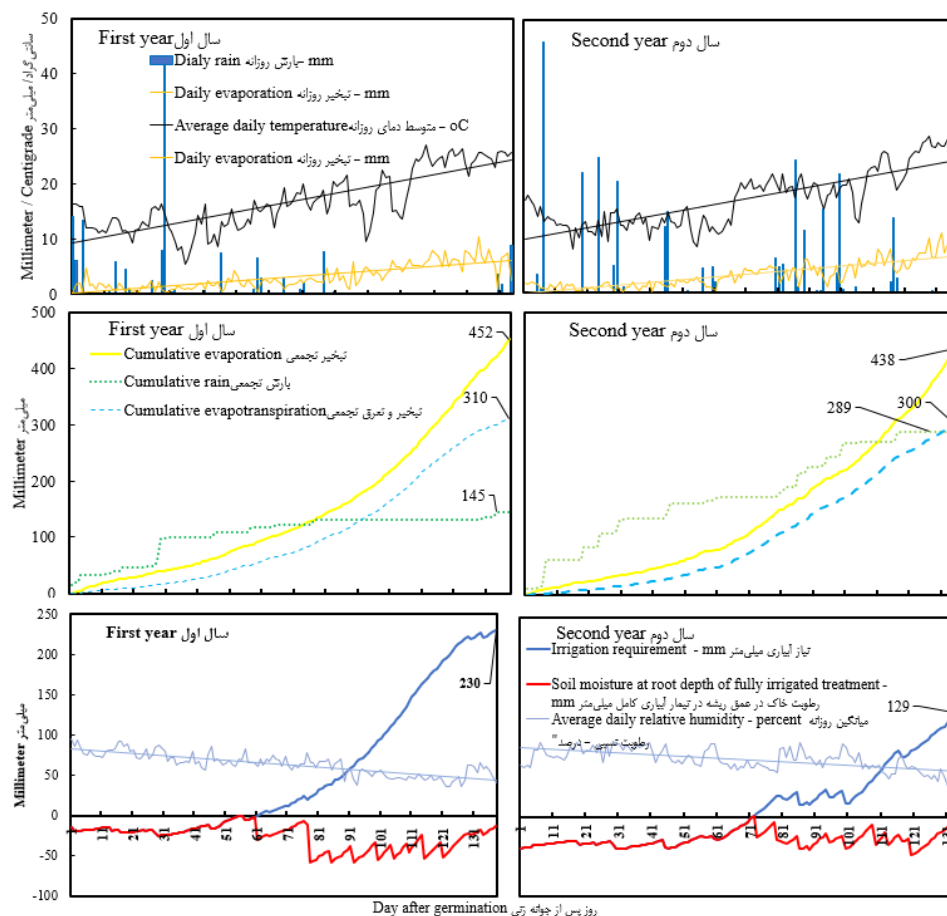
$$I_g = \frac{\Delta S}{E_a} \times [P_s + 0.15 \times (1 - P_s)] \quad (۳)$$

در فواصل بارش‌ها و قبل از آبیاری‌های مورد نیاز، رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری و برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس نیاز آبی با بیان رطوبت خاک برآورد شده (تدقیق محاسبات تغییرات روزانه عمق آب خاک در عمق توسعه ریشه در محیط نرم‌افزار اکسل - نمودار قرمز رنگ شکل ۱) در تیمار آبیاری کامل مقایسه شد. اندازه‌گیری رطوبت خاک (تا چهار نوبت و هر نوبت حداقل دو نقطه) با استفاده از روش وزنی و با نمونه‌گیری توسط آگر و در اعماق متناوب ۱۵ سانتی‌متری تا عمق ۱۰۵ سانتی‌متری در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی انجام شد. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه سینوپتیک/

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Some soil physical and chemical properties of the experiment field

عمق	بافت	کربن آلی	اسیدیته	شوری	جرم مخصوص ظاهری
Depth (cm)	Texture	Organic carbon (%)	PH	Electrical conductivity (dS/m)	Apparent specific gravity (cm ³ /gr)
0-20	Loam	0.73	7.59	3.0	1.59
20-40	Loam Silt & Loam	0.55	7.63	1.7	1.69
40-60	Loam Clay	0.28	7.58	1.8	1.69
60-80	Loam Clay Silt	0.23	7.66	1.8	1.60
80-100	Loam Clay Silt & Loam Clay	0.19	7.69	1.4	1.59



شکل ۱- تبخیر، بارش، نیازآبی و نیازآبیاری تجمعی به همراه تغییرات رطوبت خاک تیمار شاهد

Figure 1- Evaporation, precipitation, evapotranspiration and cumulative irrigation requirement along with soil moisture changes in the control treatment

و در مجموع کل ۱۱ آبیاری انجام شد. بر اساس نیازآبی محاسبه شده به روش تشتک تبخیر نیازآبی گندم در این سال ۳۱۰ میلی‌متر بدست آمد که با توجه به بارش کل ۱۲۵ میلی‌متری نیازآبیاری حدود ۲۴۸ میلی‌متر، در ۱۱ نوبت آبیاری برای مزرعه (۴۱۵ میلی‌متر آب کاربردی در تیمار برابر نیاز آبی) تأمین شد. در سال دوم نیز دو آبیاری برای جوانه زنی (۱۴۰/۹/۲۷) و استقرار بوته گندم انجام شد از خاکآب تا قبل از خوشه‌دهی حدود ۱۷۴ میلی‌متر بارش طی بیست روز متناوب بارانی ثبت شد و در وقفه بارش‌ها در ابتدای سنبله‌دهی دو آبیاری (روز ۷۲ ام پس از جوانه‌زنی به بعد) و از مرحله شیری شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی سه آبیاری و در مجموع هفت آبیاری (دو آبیاری جوانه‌زنی و استقرار بعلاوه پنج آبیاری از سنبله‌دهی تا رسیدگی) انجام شد. بر اساس نیازآبی محاسبه شده به روش تشتک تبخیر نیازآبی گندم در این سال ۳۰۰ میلی‌متر بدست آمد که با توجه به بارش کل ۲۸۹ میلی‌متری در دوره رشد گندم، نیازآبیاری حدود ۱۲۹ میلی‌متر در ۷ نوبت آبیاری برای مزرعه (۳۷۳ میلی‌متر آب کاربردی در تیمار برابر نیاز آبی) تأمین شد. در سال‌های اول و دوم میزان تبخیر تجمعی در دوره رشد گندم

در هر دو سال آزمایش از ۶۰ الی ۷۰ روز پس از جوانه‌زنی که مصادف با انتهای دوره رشد رویشی و آغاز رشد زایشی گندم است شرایط آب‌وهوایی (افزایش دما و تبخیر روزانه و کاهش رطوبت نسبی) برای تنش رطوبتی مهیا شده است. آمار هواشناسی و ترسیم روند میانگین دما و تبخیر روزانه در طول دوره رشد گندم نشان از همسان بودن این دو پارامتر در هر دو سال داشت؛ اما میانگین رطوبت نسبی سال دوم در ابتدای فصل از جوانه‌زنی گندم به‌طور متوسط ۵ درصد بیشتر و در مراحل انتهایی تا رسیدگی دانه به حدود ۱۰ درصد رسید به‌عبارت‌دیگر سال دوم رطوبت نسبی ۵ الی ۱۰ درصد بیشتر از سال اول بود همچنین بارش مرحله انتهای از ساقه‌دهی تا رسیدگی گندم طی سال دوم بیشتر از سال اول بود.

طی سال اول برای جوانه‌زنی (۱۴۰۰/۹/۲۷) و سبز شدن مزرعه دو آبیاری با فواصل چهار روزه انجام شد و از مراحل رویشی جوانه‌زنی و استقرار بوته‌ها تا ساقه‌دهی، حدود ۱۱۲ میلی‌متر بارش فصلی اتفاق افتاد اما پس از آن و تا رسیدگی فیزیولوژیکی فقط ۱۳ میلی‌متر بارش ثبت شد با این توصیف (از روز ۶۶ ام پس از جوانه‌زنی به بعد) ۹ آبیاری

به ترتیب ۴۵۲ و ۴۳۷ میلی متر بود.

در شرایط اقلیمی دو سال اجرای آزمایش و بر اساس تجزیه واریانس انجام شده:

تجزیه واریانس مرکب دو سال آزمایش

نتایج تجزیه واریانس در صفات ماده خشک تولیدی، عملکرد دانه، شاخص های بهره‌وری آب کاربردی و آب مصرفی بر اساس ماده خشک تولیدی و عملکرد دانه در جدول ۲ ارائه شده است در تجزیه مرکب انجام شده اثرات سال، اثرات ساده آبیاری، رقم، اثرات مرکب سال در مقادیر آبیاری، اثرات سال در ارقام گندم (به جز در صفات ماده خشک تولیدی و بهره‌وری آب مصرفی - ماده خشک تولیدی)، اثرات آبیاری در رقم و همچنین اثرات سال در آبیاری در رقم در سطح یک یا پنج درصد دارای اختلاف معنی دار شدند. تیمارهای آبیاری تابع مقدار بارش ها و پراکنش مختلف (با نسبت آب مصرفی به نیاز آبی) اثرات متفاوتی داشتند به گونه ای که در سال اول تیمارهای آبیاری اعمال شده ۴۲، ۶۲، ۸۲، ۱۰۲ و ۱۲۲ درصد نیاز آبی و در سال دوم ۶۰، ۷۶، ۸۹، ۱۰۳ و ۱۱۷ درصد نیاز آبی بود.

صفات ماده خشک تولیدی، بهره‌وری آب کاربردی - ماده خشک تولیدی به ترتیب تحت تأثیر شرایط اقلیمی سالانه، مقادیر آبیاری متفاوت و سپس ویژگی های رقم، نتایج متفاوت با اختلاف معنی دار آماری داشتند.

در شاخص های بهره‌وری آب کاربردی و مصرفی بر اساس عملکرد دانه، ابتدا تحت تأثیر مقادیر آبیاری سپس ویژگی های ارقام و نهایتاً شرایط اقلیمی سالیانه اختلاف معنی دار آماری داشت.

با توجه نتایج تجزیه واریانس مرکب، تفاوت مقادیر آب تیمارهای آبیاری و عملکرد دانه آنها، اثر سال در میانگین صفت بهره‌وری آب کاربردی و آب مصرفی عملکرد دانه (به عنوان مهم ترین پارامتر انتخاب و توسعه) ارقام گندم در سطح یک در صد معنی دار شد. برای بررسی تغییرات عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی ارقام در تیمارهای آبیاری هر سال در شکل ۲ ارائه شده است.

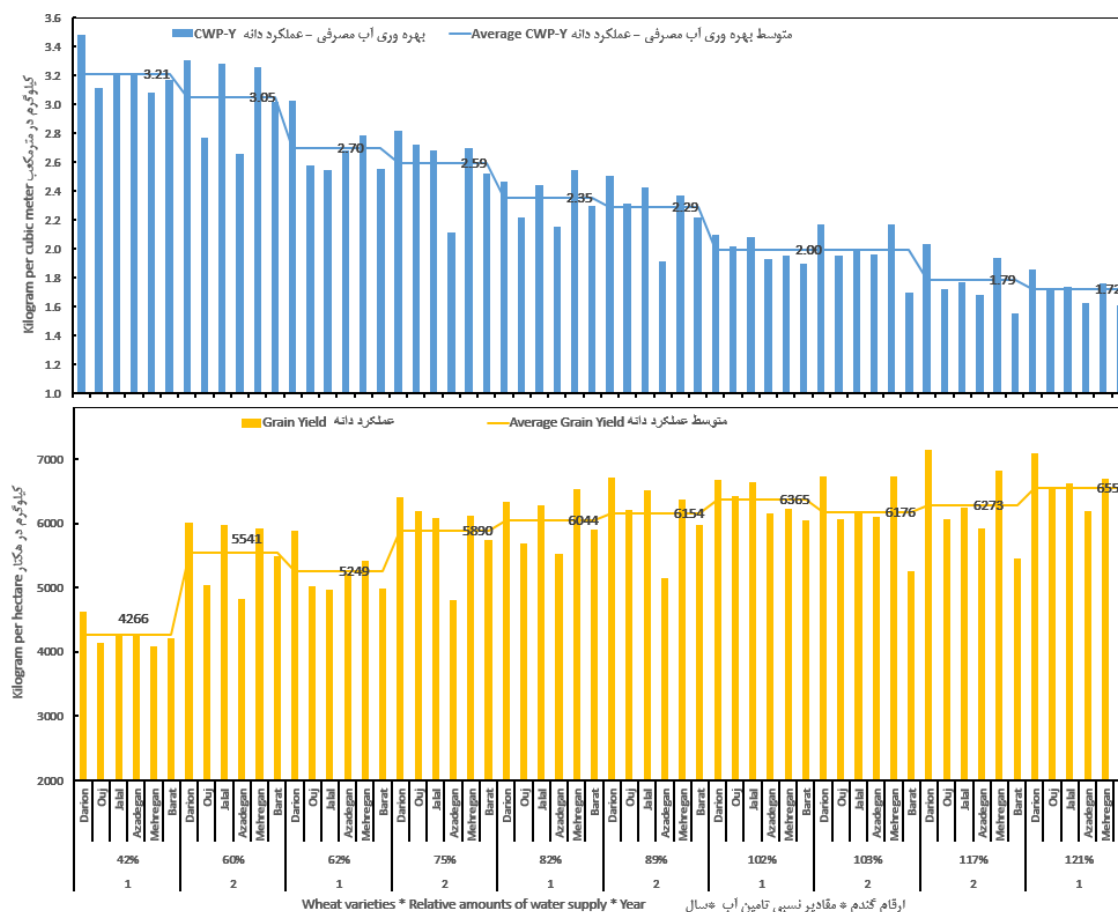
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) مرکب دو سال

Table 2- Results of the two-year compound analysis of variance (mean square)

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد	وزن خشک زیست توده	بهره‌وری آب کاربردی - عملکرد	بهره‌وری آب کاربردی - ماده خشک	بهره‌وری آب مصرفی - عملکرد	بهره‌وری آب مصرفی - ماده خشک
S.O.V.	df	Yield	Biomass dry weight	Water productivity - Yield	Water productivity - Biomass	Crop water productivity - Yield	Crop water productivity - Biomass
سال Year	1	4366762**	316646167**	0.157**	21.156**	0.130**	13.795**
سال × تکرار Y*R	4	46574	967309	0.003	0.082*	0.005	0.149*
آبیاری Irrigation	4	13756765**	72746367**	2.078**	17.795**	10.587**	86.073**
سال × آبیاری Y*I	4	3765519**	18872569**	0.068**	0.935**	0.068**	0.893**
اشتباه Error	16	65992	269761	0.005	0.023	0.009	0.042
رقم Variety	5	3894307**	14005024**	0.341**	1.266**	0.598**	2.301**
سال × رقم Y*V	5	517455**	1079373	0.055**	0.131	0.095**	0.247
اشتباه Error	20	83599	708265	0.006	0.062	0.010	0.111
آبیاری × رقم I*V	20	228239**	1252455**	0.020**	0.136**	0.037**	0.274**
سال × آبیاری Y*I*V	20	237723**	1199224**	0.024**	0.114**	0.046**	0.214**
اشتباه Error	80	93541	448297	0.007	0.039	0.013	0.072
ضریب تغییرات CV (%)	-	5.23	4.28	4.84	4.19	4.81	4.23

ns, ** و * به ترتیب عدم معنی داری، معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.



شکل ۲- عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی - عملکرد دانه در تیمارهای مرکب دو سال
Figure 2- Grain yield and crop water productivity – yield in composite treatments of two year

از متوسط کل ارقام هر دو سال بالاتر بود.

آب مصرفی - عملکرد دانه ارقام

ضرایب تعیین منحنی‌های درجه دوی نسبت تأمین آب به عملکرد دانه ارقام به‌ترتیب در سال اول ۰/۹۱ الی ۰/۹۷، سال دوم ۰/۶۰ الی ۰/۸۱ و متوسط دو ساله ۰/۶۵ الی ۰/۹۰ بود (جدول ۳). نتایج تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تأمین آب ارقام گندم در مدل رگرسیون ۳ و ضرائب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیر وابسته عملکرد دانه نشان داد که میزان نوسانات متغیر وابسته نسبت تأمین آب، ۶۵ الی ۹۰ درصد ($0.65 \leq R \leq 0.9$) نوسانات متغیر وابسته عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار را تبیین کردند. همچنین در تمامی ارقام، مدل رگرسیون انتخابی و ضرائب معادلات (A و B) در تبیین عملکرد دانه بر اساس نسبت تأمین آب، سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). از منحنی‌های متوسط دو ساله برای شناخت و بررسی

متوسط کل عملکرد ارقام در سال اول ۵۶۹۵ کیلوگرم در هکتار با بهره‌وری آب مصرفی ۲/۳۴ کیلوگرم دانه در متر مکعب و در سال دوم عملکرد با افزایش ۵ درصدی به ۶۰۰۷ کیلوگرم در هکتار و بهره‌وری با افزایش ۲ درصدی به ۲/۴۰ کیلوگرم دانه در متر مکعب رسید. در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در ترتیب تیمارهای آبیاری و به‌ازای افزایش تأمین نسبی آب مصرفی گیاه از ۴۲ الی ۱۲۱ درصد، شاخص بهره‌وری آب مصرفی از ۳/۲۱ به ۱/۷۲ کیلوگرم در متر مکعب رسید اما میانگین عملکرد دانه کل ارقام در تیمار ۶۲ درصد تأمین نسبی آب در سال اول در مقایسه با تیمار ۶۰ درصد تأمین نسبی آب سال دوم کاهش حدود ۵ درصد داشت به نظر می‌رسد این افت عملکرد در دو تیمار آبیاری تقریباً مشابه به علت افزایش ۵ الی ۱۰ درصدی رطوبت نسبی هوا و بارش‌های در مرحله زایشی سال دوم نسبت به سال اول در این تیمارهای کم آبیاری باشد.

در نمودارهای ترسیم شده مشهود است که میانگین صفات عملکرد دانه و بهره‌وری آب مصرفی به‌ترتیب در ارقام داریون، مهرگان و جلال

مقایسه‌ای ظرفیت تولید دانه، پایداری تولید در کم تا بیش آبیاری‌ها، تعیین نیاز آبی و خوشه‌بندی ارقام با استفاده از تجزیه کلاستر در محیط نرم‌افزار R بر اساس سه پارامتر نیاز آبی و ضرائب رگرسیون A و B انجام شد (شکل ۳). بر اساس تجزیه کلاستر انجام شده، در فاصله اقلیدسی (جذر مجموع مجذور تفاوت مقادیر ضرائب مدل رگرسیونی و درصد نیاز آبی) صفر به شش خوشه، صفر تا نیم به پنج خوشه، در فاصله نیم تا یک به چهار خوشه، در فاصله یک الی یک و نیم به دو خوشه و در فاصله ۴ به یک خوشه تقسیم‌بندی می‌شوند. تغییرات عملکرد دانه در تیمارهای برابر و بیشتر از نیاز آبی که به نظر می‌رسد ناشی از تفاوت بارش دو سال اجرای پروژه در مراحل رشد زایشی گندم بویژه در دو رقم برات و جلال بود ضرورت اصلاح این خوشه‌بندی براساس تأثیرپذیری عملکرد ارقام از شرایط متغیر آب هوایی سالانه در مشخص می‌کند.

متوسط عملکرد دانه در ارقام اوج و آزادگان به ترتیب حدود ± 200 و 6300 ± 100 کیلوگرم در هکتار با تأمین آب مورد نیاز ۴، درصد بیشتر نسبت به رقم مهرگان و داریون و از ۱۴ درصد بیشتر نسبت به رقم برات بود که در خوشه‌بندی کلاستر انجام شده در فاصله اقلیدسی یک الی یک و نیم به ترتیب با ظرفیت ۱۹/۹۰ و ۱۸/۴۳

کیلوگرم دانه در هکتار به ازای هر میلی‌متر آب مصرفی در یک خوشه آماری و در فواصل اقلیدسی کمتر از یک در دو خوشه متفاوت از هم قرار گرفتند. از کم آبیاری تا تأمین نیاز آبی کامل، رقم اوج عملکرد بالاتر و شیب منحنی عملکرد دانه- آب مصرفی تندتری نسبت به رقم آزادگان داشت (شکل ۴- A) از طرفی در سال دوم و مصادف با بارش‌های بویژه پایان فصل رشد، هر دو رقم کاهش عملکرد را داشتند و از این جهت رقم آزادگان، جزو ارقام حساس یا کاملاً حساس و رقم اوج، بین دو رقم جلال و مهرگان قرار گرفت.

در ارقام مهرگان و داریون با تأمین نیاز آبی به‌طور متوسط حدود ۱۰ درصد بیشتر از رقم برات و ۴ درصد کمتر از ارقام اوج و آزادگان به ترتیب متوسط عملکرد حدود 100 ± 6700 و 150 ± 7000 کیلوگرم بود. این دو رقم در خوشه‌بندی کلاستر انجام شده در فاصله اقلیدسی نیم الی یک (همراه رقم جلال) در یک خوشه آماری و در فواصل اقلیدسی کمتر از نیم در دو خوشه متفاوت از هم قرار گرفتند. با در نظر گرفتن کم‌بارشی سال اول آزمایش و بارش‌های پایان فصل رشد در سال دوم، رفتار عملکرد- آب مصرفی هر دو سال بسیار مشابه بود و از این جهت این ارقام محدودیت‌های بیش آبیاری را مثل ارقام اوج و آزادگان را ندارند.

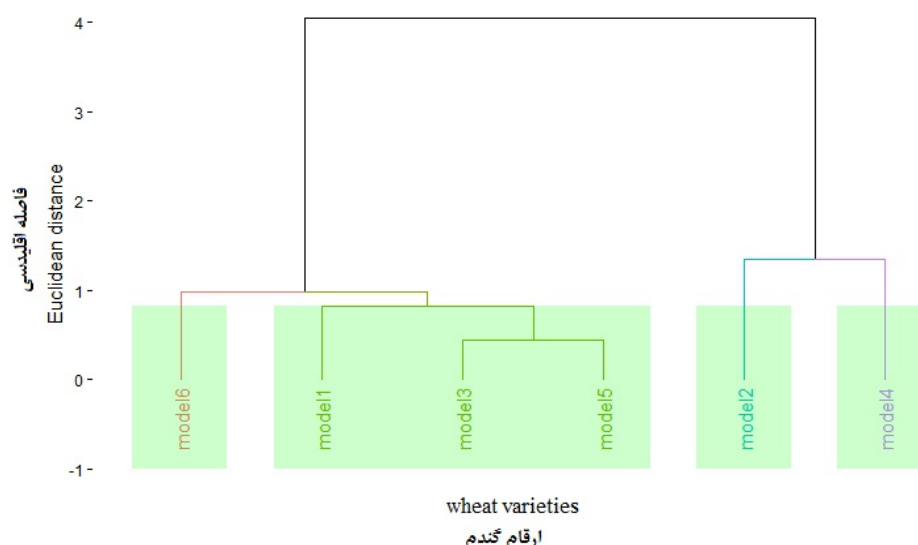
جدول ۳- تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تأمین نیاز آبی در مدل رگرسیون دو ساله برای متغیر وابسته درصد تولید دانه ارقام گندم
Table 3- Analysis of variance of the independent variable, percentage of wheat water requirement, in a two-year regression model for the dependent variable, percentage of grain yield of wheat varieties

خطای استاندارد	ضریب تعیین	خطای استاندارد ضرایب رگرسیون	رگرسیون ضرایب	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر	رقم گندم	مدل
Std. Error of the Estimate	R Square	Std. Error of Reg. Coe.	Regression Coefficients	Mean Square	d.f.	Sources of change	Wheat variety	Model
233.203	0.899	3.986	A 130.860**	2.046E8**	2	مدل Model	داریون	
		0.040	B -0.612**	54383	9	خطا Error	Darion	1
					11	کل Total		
247.306	0.898	4.227	A 116.436**	1.672E8**	2	مدل Model	اوج	
		0.042	B -0.534**	61160	9	خطا Error	Ouj	2
					11	کل Total		
312.496	0.834	5.341	A 125.979**	1.807E8**	2	مدل Model	جلال	
		0.053	B -0.607**	97653	9	خطا Error	Jalal	3
					11	کل Total		
383.123	0.672	6.548	A 107.959**	1.479E8**	2	مدل Model	آزادگان	
		0.065	B -0.486**	146783	9	خطا Error	Azadegan	4
					11	کل Total		
255.592	0.903	4.368	A 125.163**	1.884E8**	2	مدل Model	مهرگان	
		0.043	B -0.583**	65327	9	خطا Error	Mehregan	5
					11	کل Total		
344.148	0.658	5.882	A 123.315**	1.533E8**	2	مدل Model	برات	
		0.058	B -0.636**	118437	9	خطا Error	Barat	6
					11	کل Total		

ns, ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

$$Y = A \left(\frac{ET_a}{ET_c} \times 100 \right)^2 + B \left(\frac{ET_a}{ET_c} \right)$$



شکل ۳- دندروگرام خوشه‌بندی ارقام گندم بر اساس ضرایب مدل رگرسیونی و نیاز آبی

Figure 3- Clustering dendrogram of wheat cultivars based on regression model coefficients and Evapotranspiration

این آزمایش متوسط عملکرد حدود 200 ± 6100 کیلوگرم در تأمین آب مورد نیاز این رقم دست‌یافتنی است. این رقم تجاری کاهش عملکرد در کم‌آبیاری‌ها و بیش‌آبیاری‌های همسانی دارد. نکته حائز اهمیت در این رقم، نوسان عملکرد دو سال این آزمایش و کاهش نسبتاً شدید عملکرد در سال دوم که مصادف با بارش‌های بویژه پایان فصل رشد بود به نظر می‌رسد که این رقم در بیش‌آبیاری‌ها بویژه در مراحل زایشی حساس باشد. شیب منحنی متوسط دو ساله این رقم در کم‌آبیاری‌ها از میانگین ارقام این بررسی کمتر است و نشان از این دارد که برات پایداری عملکرد خوبی در کم‌آبیاری‌ها داراست و از این جهت در گروه ارقام متحمل به تنش کم‌آبی قرار می‌گیرد. رقم برات ظرفیت $21/19$ کیلوگرم دانه در هکتار به‌ازای هر میلی‌متر آب مصرفی را داشت و از این جهت نسبت به میانگین کل ارقام این بررسی بالاتر بود.

برای اجتناب از کاهش عملکرد، ارقام اوج، آزادگان، برات و جلال ناشی از بارش‌های پایان فصل رشد، به نظر می‌رسد که کشت خطی روی پشته و برنامه‌ریزی آبیاری با عمق خالص کم تا متوسط در مراحل رشد زایشی گندم مؤثر است.

مصرف بهینه آب در ارقام

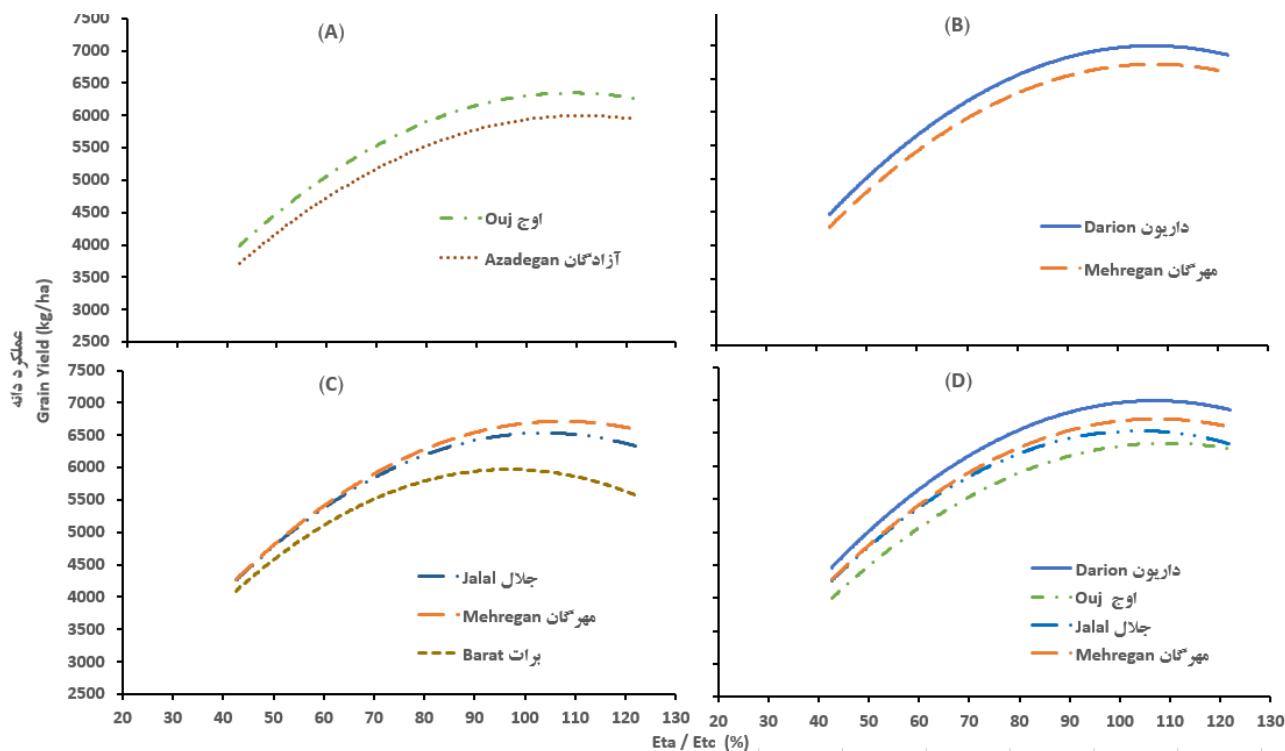
در شکل ۵ منحنی بدون بعد متوسط دو ساله تغییرات نسبت آب تأمین شده ارقام گندم به درصد تحقق عملکرد هر تیمار به مقادیر بیشینه بدست آمده در همان سال ترسیم شده‌است. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تأمین آب ارقام گندم و ضرایب متغیر وابسته عملکرد دانه در مدل رگرسیون (جدول ۴) نشان داد که میزان نوسانات متغیر وابسته نسبت تأمین آب، ۷۸ درصد ($R^2 \leq 0.78$)

نیاز آبی، رفتار عملکرد- آب مصرفی از کم تا بیش‌آبیاری موجب شد تا این دو در یک گروه قرار گیرند (شکل ۴- B) که البته عملکرد داریون همواره بیشتر از رقم مهرگان بود. شیب منحنی در کم‌آبیاری‌ها در این دو رقم نسبت به میانگین ارقام این بررسی بیشتر بود از این‌رو به نظر می‌رسد که ویژگی خاص این ارقام کاهش عملکرد شدیدتر در کم‌آبیاری‌ها نسبت به بیش‌آبیاری‌ها بود. ارقام مهرگان و داریون به‌ازای هر میلی‌متر آب خالص مصرفی به‌ترتیب با ظرفیت تولید $21/40$ و $22/38$ کیلوگرم دانه در هکتار از این حیث جزء ارقام برتر بودند ضمن اینکه در متوسط عملکرد دو ساله، از کم تا بیش‌آبیاری بین ارقام این بررسی داریون و مهرگان عملکرد بالاتری را نسبت به سایر ارقام داشتند (شکل ۴- D). رقم جلال در تأمین نیاز آبی به‌طور متوسط در حدود ۷ درصد بیشتر از رقم برات، متوسط عملکرد حدود 200 ± 6400 کیلوگرم تولید می‌کند. دو منحنی سالانه در کم‌آبیاری‌ها کمتر متأثر از بارش‌های فصلی اما در بیش‌آبیاری‌ها تحت تأثیر شرایط خشک و ترسالی قرار می‌گیرد (شکل ۴- D). شیب منحنی این رقم در کم‌آبیاری‌ها در حد رقم مهرگان و به لحاظ پایداری عملکرد در کم‌آبیاری تا تأمین نیاز آبی مشابه رقم مهرگان بود (شکل ۴- C) اما با کاهش نسبی عملکرد در سال دوم که مصادف با بارش‌های بویژه پایان فصل، به‌نظر می‌رسد که این رقم در بیش‌آبیاری‌ها بویژه در مراحل زایشی بین دو رقم حساس برات و متحمل مهرگان قرار گیرد (شکل ۴- C). رقم جلال ظرفیت $21/58$ کیلوگرم دانه در هکتار به‌ازای هر میلی‌متر آب مصرفی را داشت. و از این جهت جزء سه رقم برتر این بررسی شد.

نیاز آبی رقم برات به‌طور متوسط حدود ۱۰ درصد کمتر از میانگین ارقام نان مثل مهرگان و داریون است. بر اساس نتایج دو سال آزمایش

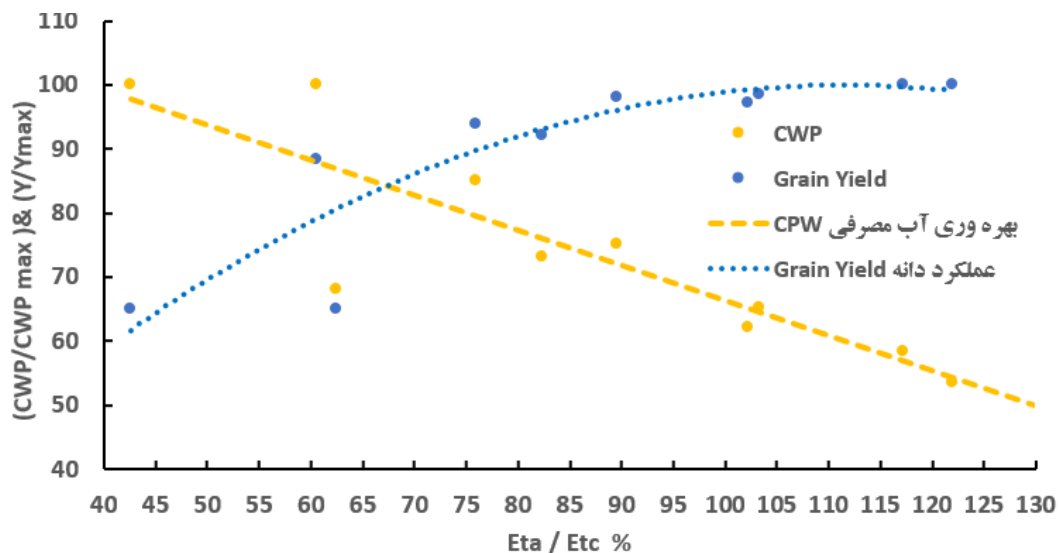
طبق این مدل، حداکثر تولید دانه در تیمار چهارم یا برابر نیاز آبی و به‌ازای کم یا بیش‌آبیاری، عملکرد کاهش می‌یافت.

نوسانات متغیر وابسته نسبت عملکرد دانه را تبیین کرد و نتایج مدل رگرسیون انتخابی و ضرایب معادله (A و B) در تبیین درصد تولید دانه بر اساس درصد تأمین آب، در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).



شکل ۴- مقایسه روند تغییرات نسبت تأمین آب به عملکرد دانه ارقام گندم

Figure 4- Comparison of trend Changes in the ratio of water supply to grain yield of wheat cultivars



شکل ۵- متوسط تغییرات نسبی عملکرد دانه و بهره‌وری آب به ازای درصد تأمین نیازآبی گندم

Figure 5- Average relative changes of grain yield and water productivity per percentage of supply wheat water requirement

جدول ۴- تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تامین نیاز آبی گندم در مدل رگرسیون برای متغیرهای وابسته

Table 4- Analysis of variance of the independent variable, percentage of wheat water requirement, in the regression model for dependent variables

خطای استاندارد	ضریب تعیین	خطای استاندارد ضرایب رگرسیون	ضرایب رگرسیون	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییر	مدل	متغیر وابسته
Std. Error of the Estimate	R Square	Std. Error of Reg. Coe.	Regression Coefficients	Mean Square	d.f.	Sources of change	Model	Dependent Variables
6.347	0.781	0.108	1.793**	41006.9**	2	Model	$y = Ax^2 + Bx$	$Y_a \times 100 / Y_{max}$
		0.001	-0.008**	40.3	9	Error		
					11	Total		
8.3669	0.765	9.608	121.217**	1818.6**	1	Model	$y = ax + b$	$CWP \times 100 / CWP_{max}$
		0.108	-0.549**	70.0	8	Error		
					9	Total		

ns, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

نیاز آبیاری ۱۲۹ میلی‌متر و تیمارهای آبیاری عملاً ۶۰، ۷۶، ۸۹ و ۱۰۳ درصد آب خالص را در اختیار گیاه قرار دادند. بروز شرایط محیطی متفاوت (در مراحل رشدی مؤثر شامل پنجه دهی، ساقه‌دهی، گل‌دهی و پرشدن دانه) دو سال، به‌ویژه رطوبت نسبی هوا، بارش‌های فصلی یا دمای روزانه هوا موجب تیمارهای متفاوت مقدار تامین آب شده، اثرات سال، سال در آبیاری، سال در ارقام و سال در آبیاری در رقم را معنی‌دار کرده است.

براساس تجزیه واریانس انجام شده عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری با اولویت‌های و ترتیب‌های مختلفی تحت‌تأثیر شرایط اقلیمی سالانه، مقادیر آبیاری و ویژگی‌های رقم، اختلاف معنی‌دار آماری در سطح یک و پنج درصد داشتند.

متوسط شاخص‌های بهره‌وری آب کاربردی بر اساس عملکرد دانه در تامین نیاز آبی ارقام در سال اول و دوم به‌ترتیب ۱/۵۳ و ۱/۶۶ کیلوگرم در متر مکعب بود که با انتخاب رقم و مدیریت کم‌آبیاری متناسب آن تا ۶۳ درصد قابل افزایش بود.

متوسط شاخص‌های بهره‌وری آب مصرفی بر اساس عملکرد دانه در تامین نیاز آبی ارقام در سال اول و دوم به‌ترتیب ۲/۰۰ و ۱/۹۹ کیلوگرم در متر مکعب بود که با اعمال کم‌آبیاری‌های متناسب هر رقم گندم نان از ۸۷ الی ۹۳ درصد قابل افزایش بود.

معادله تامین آب موردنیاز گیاه و عملکرد دانه از منحنی درجه‌دو تبعیت می‌کند و در کم و بیش آبیاری مزرعه نسبت به نیاز گیاه موجب خسارت در عملکرد می‌شود.

باهدف دستیابی به عملکرد دانه و بهره‌وری آب بهینه، بهترین توصیه کم‌آزاری در شرایط کمبود منابع آب در مناطق گرم جنوب کشور کاهش ۳۰ درصدی یا تامین ۷۰ درصد نیاز آبی گندم با قبول حدود ۱۵ درصد کاهش عملکرد دانه گندم است.

متوسط تغییرات نسبت بهره‌وری آب مصرفی به مقدار بیشینه در مقابل درصد تامین نیاز آبی متوسط دو سال که به‌صورت خطی رسم شده است (شکل ۵). نتایج تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل درصد تامین آب ارقام گندم در مدل رگرسیون و ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیر وابسته عملکرد دانه (جدول ۴) نشان داد که میزان نوسانات متغیر وابسته، ۷۶ درصد ($r \leq 0.76$) نوسانات متغیر وابسته را تبیین کرد. همچنین مدل رگرسیون انتخابی و ضرایب معادله (a و b) در تبیین درصد بهره‌وری آب مصرفی بصورت تابعی خطی از درصد تامین آب، در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). شیب خط متوسط دو سال منفی و معادل ۰/۵۵ (کاهش بهره‌وری به ازای افزایش آب مصرفی)، وابسته به شرایط اقلیمی بویژه بارش مؤثر در فصل رشد گندم و نیاز آبیاری هر سال زراعی است.

تقاطع منحنی تولید نسبی دانه گندم با خط بهره‌وری نسبی مصرف آب نشان‌دهنده مختصاتی است که به‌ازای آن می‌توان عملکرد دانه و بهره‌وری آب بهینه‌ای را از مزرعه گندم انتظار داشت. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در این دو سال اجرای آزمایش تامین نسبی آب خالص مصرفی به نیاز آبی در حد ۶۷ درصد با کاهش حدود ۱۶ درصدی در عملکرد دانه و بهره‌وری آب خالص مصرفی - عملکرد دانه محل تقاطع منحنی تولید دانه و بهره‌وری آب گندم نان است که برای کم‌آبیاری ملایم مزارع گندم قابل توصیه است.

نتیجه‌گیری

- در سال اول، نیاز آبی ۳۱۰ میلی‌متر، بارش کل ۱۴۵ میلی‌متر و نیاز آبیاری ۲۳۰ میلی‌متر و تیمارهای آبیاری عملاً ۴۲، ۶۲، ۸۲ و ۱۰۲ درصد آب خالص را در اختیار گیاه قرار دادند.
- در سال دوم، نیاز آبی ۳۰۰ میلی‌متر، بارش کل ۲۸۹ میلی‌متر و

به ازای هر میلی متر آب مصرفی در گزینش و معرفی ارقام جدید هدف گذاری (رسیدن به ارقام با ظرفیت تولید بالاتر از ۲۴ کیلوگرم تولید دانه در هکتار ما به ازای هر میلی متر آب خالص) و برنامه ریزی شود.

- هر ساله با توصیه های به روز شده، نیاز آبیاری مزارع اعلام شود
- لازمه این چنین توصیه ای کشت ارقام مختلف در مراکز تحقیقاتی در مناطق و قطب های تولید با نظارت محققین و متخصصین کشت و آشنا به مراحل رشد ارقام تجاری گندم است.

دستورالعمل فنی و توصیه ترویجی

- توسعه کشت رقم تجاری برات (که نیاز آبی کمتر و خسارت کمتر در تنش های خشکی دارد) در سال های با پیش بینی خشکسالی یا در مناطقی با احتمال بروز تنش آبی و همچنین مزارعی با عمق خاک زراعی کم یا دارای بافت سبک خاک می تواند خسارات ناشی از خشکسالی یا تنش های خشکی را به حداقل رسانده پایداری در تولید را تضمین کند.
- در سال های با احتمال وقوع بارش های بهاره بیشتر (بارش در فصل زایشی مزارع گندم) و همچنین دشت های کشاورزی با احتمال سطح ایستابی بالاتر (اما بدون محدودیت شوری)، کشت ارقام برات و آزادگان توصیه نمی شود.
- در سال های با احتمال وقوع بارش های بهاره بیشتر (بارش در فصل زایشی مزارع گندم) و همچنین دشت های کشاورزی با احتمال سطح ایستابی بالاتر (اما بدون محدودیت شوری)، کشت ارقام مهرگان و داریون و سپس جلال و اوج توصیه می شود.
- تأمین صد درصد نیاز آبی مزارع مهرگان و داریون توصیه می شود و بهتر است تا این ارقام در مزارعی کشت شود که در معرض تنش های آبی نباشند از این رو می بایست در مزارع با بافت خاک سبک یا مزارعی که عمق خاک زراعی کمی دارند از کشت آنها صرف نظر شود.
- باتوجه به تقارن فصل کشت گندم با بارش های فصلی و احتمال بیشتر نیاز به انجام آبیاری از اواخر رشد رویشی (انتهای راه رفتن) تا رسیدگی کامل، پیشنهاد می شود تا توصیه های مدیریت آبیاری (روش کاشت، روش و عمق آبیاری) متناسب بافت، تسطیح، شیب و طول زمین، عمق سطح ایستابی در مزرعه اعمال شوند (Moayeri, 2018).

- در بررسی رفتار ارقام گندم در تأمین آب مصرفی نسبت به نیاز آبی سالانه و تولید دانه در تأمین نیاز آبی و کم آبیاری های تا ۴۲ درصد نیاز آبی گروه های زیر مشخص شد:
- رقم برات، متحمل به خشکی و کم آبیاری با حساسیت بالا نسبت به سال های پر بارش، به ویژه در مراحل زایشی رشد.
- ارقام مهرگان و داریون با نیاز آبی حدود ۱۰ درصد بیشتر از برات، متحمل به بیش آبیاری در مراحل رشد زایشی.
- رقم جلال با نیاز آبی حدود ۷ درصد بیشتر از رقم برات، در کم آبیاری کمتر اما در بیش آبیاری ها تحت تأثیر بارش های سالیانه قرار می گیرد.
- ارقام آزادگان و اوج با نیاز آبی حدود ۱۴ درصد بیشتر از رقم برات، حساس یا کاملاً حساس به بیش آبیاری در تر سالی ها،
- بر اساس نتایج دو سال اجرای این آزمایش، ارقام به بارش های از مرحله زایشی تا رسیدگی فیزیولوژیکی پاسخ های (عملکرد دانه) متفاوتی نشان دادند به نظر می رسد که در بیش آبیاری ها دوره زایشی، رقم آزادگان کاملاً حساس، رقم برات حساس، ارقام اوج و جلال نسبتاً حساس و ارقام مهرگان، داریون متحمل باشند.
- ارقام داریون و مهرگان از کم آبیاری تا بیش آبیاری برتر از ارقام این آزمایش بودند و در شرایط ترسالی ها به ویژه سال های با بارش پایان فصل رشد مناسب و قابل توصیه هستند.
- حداکثر تغییرات عملکرد دانه ارقام در تیمار برابر نیاز آبی در سال اول و دوم به ترتیب ۱۰ و ۳۰ درصد بود که نشان دهنده تفاوت معنی دار در ظرفیت تولید ارقام گندم تجاری موجود داشت، که با توجه به تفاوت های در نیاز آبی این ارقام، به طور متوسط، به ازای هر میلی متر آب مصرفی تولید ۱۸/۴۳ الی ۲۲/۳۸ (نوسان ۲۱ درصدی) کیلوگرم دانه در هر هکتار از داشتند.
- بررسی وضعیت آب و هوایی متغیر اراضی شمال استان خوزستان (محل برخورد دو توده هوای گرم و مرطوب جنوبی و کوهستانی شمالی) گویای این نکته اساسی است که ویژگی اقلیم گرم و خشک در تغییرات غیریپوسته در مراحل رشد گندم است این تغییرات در تبخیر، مقدار و پراکنش بارش، نیاز آبی و ... مراحل رشد این واقعیت را بیان می کند که برای دستیابی به تولید پایدار گندم و حصول بهره وری آب کاربردی در حد ظرفیت ارقام در اقلیم گرم جنوب می بایست:
- در فرآیند به نژادی گندم صفت کیلوگرم تولید دانه در هکتار

References

1. Anonymous. (2015). The program of the resistance economy for the production of basic products (the self-reliance plan for the production of wheat in the country) in the years 1404- 1394. Deputy of Agricultural Affairs of the Ministry of Jihad and Agriculture. Publications of the Ministry of Jihad and Agriculture. 28 pages. (In Persian)
2. Anonymous. (2025). Agricultural Statistics of 2023-2024. Ministry of Jihad for Agriculture, Deputy for Planning

- and Economy, Information and Communication Technology Office. Volume 1, Crops. 120 pp. (In Persian)
3. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome, 300*(9), D05109. <https://doi.org/10.32614/cran.package.meto>
4. Ashraf Vaghefi, S., Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Srinivasan, R., & Arnold, J.G. (2017). Modeling crop water productivity using a coupled SWAT–MODSIM model. *Water*, 9(3), 157. <https://doi.org/10.3390/w9030157>
5. Azizizahan, A., Shahabifar, M., Ebrahimi Pak, N.A., Razavi, R., Ghalibi, S., Saraie Tabrizi, M., Toloui, R. & Piri, R. (2014). Evaluation of water use efficiency of wheat in Iran and the world. First National Conference on Soil and Water Management in Wheat Production, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute. (In Persian). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.78.183>
6. Baghani, J., Hashemi, H., & Ghodsi, M. (2003). Investigation of the effects of irrigation deficiency on the quantitative and qualitative characteristics of wheat and determination of the production function in the sprinkler irrigation method. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 290. (In Persian with English abstract)
7. Baghani, J., Moayeri, M., Varjavand, P., Salamati, N., Eslami, A., Shahrokhnia, M.A., Kiani, A.R., Ghadami-Firoozabadi, A., Haqej-Moghaddam, A., Khosravi, H., Akhavan, K., Bahramlou, R., Naseri, A., Abbasi, F., Akbari, M., Abbasi, N., Mousavi-Fadl, S.H., Taifeh-Rezaei, H., Hosseinzadeh-Ajirlou, S., Ghafari, Z., Aghaei, M.J., Dehghanian, S.A., Yousef-Gomrakchi, A., Moghbali-Damane, A., Eslami, A.R., Nakhjavani-Moghaddam, M.M., & Nemati, Sh. (2018). Determining the water consumption of wheat in the country. Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 53636. (In Persian with English abstract)
8. Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Abbasi, F., & Baghani, J. (2022). Estimation of the actual amount of wheat irrigation water using the NIAZAB system and comparing with the farm measurement. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2075-2092. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.346273.669328>
9. El-Rahman, A. (2009). Water use efficiency of wheat under drip irrigation systems at Al–Maghara area, North Sinai, EGYPT. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 34(3), 2537-2546. <https://doi.org/10.21608/jssae.2009.90464>
10. Esmaeilzadeh Moghaddam, M., Najafian, G., Mahmoudi, K., Akbari Moghaddam, H., Sayahfar, M., Tahmasebi, S., Aeineh, G.L., Amir Bakhtiar, N., Farhadi Sadr, M., Abedini Esfahlani, M., Afshari, F., Dalvand, M., Zakeri, A.K., Tabatabaei, N.A., Yasaei, M., Roohparvar, R., & Kia, S. (2020). Khalil, a new bread wheat cultivar, for cultivation in southern warm and dry zone of Iran. *Research Achievements for Field and Horticulture Crops*, 9(1), 79-88. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/rafhc.2021.125762.1189>
11. Fapohunda, H.O., Aina, P.O., & Hossain, M.M. (1984). Water use—Yield relations for cowpea and maize. *Agricultural Water Management*, 9(3), 219-224. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(84\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0378-3774(84)90004-0)
12. Foley, D.J., Thenkabail, P.S., Aneece, I.P., Teluguntla, P.G., & Oliphant, A.J. (2020). A meta-analysis of global crop water productivity of three leading world crops (wheat, corn, and rice) in the irrigated areas over three decades. *International Journal of Digital Earth*, 13(8), 939-975. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1651912>
13. Kang, S., Zhang, L., Liang, Y., Hu, X., Cai, H., & Gu, B. (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 55(3), 203-216. [https://doi.org/10.1016/s0378-3774\(01\)00180-9](https://doi.org/10.1016/s0378-3774(01)00180-9)
14. Kiani, A.R., & Kalateharabi, M. (2012). Effect of different amount of irrigation water on yield and water use efficiency of various wheat cultivars in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, 16(3), 85-102. (In Persian with English abstract)
15. Kijne, J.W., Tuong, T.P., Bennett, J., Bouman, B.A.M. & Oweis, T. (2003). Ensuring food security via crop water productivity improvement. In: Background Papers-Challenge Program for Food and Water. CGIAR-IWMI, Colombo, Sri Lanka, pp. 1–42.
16. Moayeri, M. (2011a). Improving the efficiency of water use for wheat irrigation in a selected site in the south of Karkheh basin, final report of the research project. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 594. (In Persian with English abstract)
17. Moayeri, M. (2011b). Determining water use efficiency and evaluating effective factors in water use efficiency of wheat and corn irrigation in a selected site in the south of Karkheh basin. final report of the research project. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 39151. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1177/11786221241274019>
18. Moayeri, M. (2018). Water management and irrigation of wheat fields in Khuzestan Province. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Education and Extension Institute. Extension publication. No. 54101. (In Persian). <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.1.10>

19. Moayeri, M. (2019). Determining the application model of irrigation water - wheat yield in the north of Khuzestan Province. final report of the research project. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 55785. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.1.10>
20. Montazar, A., & Kosari, H. (2007). Water productivity analysis of some irrigated crops in Iran. In *Proceedings of the international conference Water Saving in Mediterranean Agriculture & Future Research Needs. Italy*.
21. Richards, R.A., Rebetzke, G.J., Condon, A.G., & Van Herwaarden, A. (2002). Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals. *Crop Science*, 42(1), 111-121. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1110>
22. Sadras, V.O., & Lawson, C. (2013). Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *European Journal of Agronomy*, 46, 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.11.008>
23. Sammis, T.W., & Smeal, D. (1983). WRRI Report. No.179 January 1983.72 p.
24. Siahpoosh, M.R., & Ebrahimian, S.A. (2005). Evaluation of water use efficiency and its components as selection criteria in the production of drought-tolerant varieties in wheat breeding programs. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 455. (In Persian with English abstract)
25. Sharma, P.N., & Neto, F.B.A. (1986). Water production function of sorghum for northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, 11(2), 169-180. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(86\)90029-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(86)90029-6)
26. Siddique, K.H.M., Belford, R.K., Perry, M.W., & Tennant, D. (1989). Growth, development and light interception of old and modern wheat cultivars in a Mediterranean-type environment. *Australian Journal of Agricultural Research*, 40(3), 473-487. <https://doi.org/10.1071/ar9890473>
27. Wójcik, S. (1990). Variability of biometric traits, yield and technological quality of sugarbeet under conditions of different nitrogen fertilization.
28. Zwart, S.J., & Bastiaanssen, W.G. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115-133. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>