Research Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 13
No. 1 (49)

Received:
2022-12-07

Accepted:
2023-05-09

Pages: 1-11

Estimation of Wheat Irrigation Water by Inverse Solution Method of the Production Functions under Water Stress Conditions Using NIAZAB System

Niazali Ebrahimipak[1], Ali Abdzad Gohari[2*] and Arash Tafteh[3]

1) Associated professor of Department of Irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
2) Resercher of Department of Irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
3) Assistant professor of Department of Irrigation and soil physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
*Corresponding author email: abdzadgohari_a@yahoo.com

Abstract:

Background and Aim: Different factors are effective in increasing wheat production, one of the most important of which is water. Determining the actual consumed water of wheat in arid and semi-arid regions is of particular importance and the economic use of water is a serious and very important issue for farmers and researchers who cultivate and produce wheat under irrigation. The season of wheat cultivation has a direct effect on its water requirement due to the change in the energy pattern affecting evapotranspiration, and it will definitely have a lower water requirement in winter than in spring and summer. Therefore, the present study was conducted in order to investigate the water requirement system in determining the actual amount of irrigation water and wheat plant yield based on the inverse solution of the production function under water stress conditions for Alvand variety wheat in Qazvin province.

Method: The research was conducted in 2017-2019 crop years in Qazvin province on a land of 600 square meters in Esmailabad research station (49º 52' N, 36º 15' E, 1285 MSL). The experimental design was in the form of split plots and in the form of a randomized complete block design with three replications. So that the main factor of irrigation management includes providing water requirements of 20 (I_1), 40 (I_2), 60 (I_3), 80 (I_4) and 100 percent (I_5) and secondary treatment includes irrigation until the end of the flowering stage (S1) and The pulping of the seed was (S_2). The country's using NIAZAB system was provided by the Soil and Water Research Institute (SWRI). This system is designed to determine the water requirement of farmland and Orchard products, which has the ability to estimate and determine the water requirement, Consumed water and plants irrigation planning at the level of the region, city, catchment and plain. One of the prominent points of this system is its location-based nature, and the user can extract their regional needs by referring to the system and can allocate the water used for the cultivation pattern under different usage options to the beneficiaries of the agricultural water stakeholder with the ability to provide an update.

Results: The results showed that the root mean square error in Tafteh, Pasquale and Raes methods was 122, 83 and 126 mm per day, respectively, and Pasquale method had a better estimation than other methods. In Pasquale's method, the best normalized root mean square error was observed with 0.18%. The index of agreement or consistency in Tafteh, Pasquale and Raes methods was 0.95, 0.98 and 0.95%, respectively, and the Coefficient of Efficiency of the model was 0.77, 0.91 and 0.73, respectively. The results of the statistical analysis showed that the measured and simulated values are close to the 1:1 line and have a good relationship, and the coefficient of determination values in the studied years showed 0.98. The results of estimation the amount of wheat plant evapotranspiration in the using NIAZAB system in the Qazvin plain with the methods of Tafteh et al. (2013), Pasquale et al. (2017) and Raes et al. (R^2=0.98) were high and the root mean square error in Tafteh, Pasquale and Raes methods was 120, 83 and 126 mm per day, respectively, in which Pasquale's method had a better estimation than other methods.

Conclusion In general and according to the statistical results, a good approximation was observed between the real data and the using NIAZAB system in determining the amount of irrigation water under water stress conditions, which indicates the appropriate evaluation of the water requirement system and the ability to simulate the wheat yield function in relation to different treatments. It was irrigation and this system can be used as a suitable tool in estimating water needs to improve water management in wheat.

Keywords: Alvand cultivar, evapotranspiration, numerical inverse solution, water requirement

10.30495/WSRCJ.2023.70827.11337

مقاله پژوهشی

برآورد مقدار آب آبیاری گیاه گندم به روش حل معکوس توابع تولید تحت شرایط تنش آبی با استفاده از سامانه نیاز آب

نیازعلی ابراهیمی پاک[1]، علی عبدزادگوهری[2*] و آرش تافته[3]

۱) دانشیار، بخش تحقیقات مدیریت آب در مزرعه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۲) بخش تحقیقات مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۳) استادیار، بخش تحقیقات مدیریت آب در مزرعه، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: abdzadgohari_a@yahoo.com

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال سیزدهم
شماره ۱ (۴۹)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۲/۱۹

صفحات: ۱۱-۱

چکیده:

زمینه و هدف: عوامل مختلفی در افزایش تولید محصول گندم مؤثر می‌باشند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، آب است. تعیین آب مصرفی واقعی گندم در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیتی خاص برخوردار بوده و استفاده اقتصادی از آب یک مسئله جدی و بسیار مهم برای کشاورزان و محققانی است که گندم را به‌صورت آبی کشت و تولید می‌کنند. فصل کشت گندم به‌دلیل تغییر الگوی انرژی موثر بر تبخیر- تعرق، اثر مستقیمی بر نیاز آبی آن دارد و به‌طور قطع در فصل زمستان، نیاز آبی کمتری نسبت به‌بهار و تابستان خواهد داشت. این پژوهش به منظور بررسی سامانه نیاز آب در تعیین مقدار واقعی آب آبیاری و عملکرد گیاه گندم بر اساس حل معکوس تابع تولید در شرایط تنش آبی برای گندم رقم الوند در استان قزوین انجام شد.

روش پژوهش: این پژوهش در سال‌های زراعی ۱۳۹۶- ۱۳۹۸ در استان قزوین در زمینی به مساحت ۶۰۰ متر مربع در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل آباد (49º 52' N, 36º15' E, 1285 MSL) انجام شد. طرح آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بود. به طوری که عامل اصلی مدیریت آبیاری شامل تأمین نیاز آبی ۲۰ (I_1)، ۴۰ (I_2)، ۶۰ (I_3)، ۸۰ (I_4) و ۱۰۰ درصد (I_5) و تیمار فرعی شامل آبیاری تا پایان مرحله گلدهی (S_1) و مرحله خمیری شدن دانه (S_2) بود. سامانه نیاز آبی کشور که توسط موسسه تحقیقات خاک و آب کشور ارائه شده است، سامانه‌ای است برای تعیین نیاز آبی محصولات زراعی و باغی که توانایی برآورد و تعیین نیاز آبی، آب مصرفی و برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان را در سطح منطقه، شهرستان، حوضه آبریز، دشت دارد. یکی از نکات برجسته این سامانه، مکان محور بودن آن است و استفاده کننده در هر مکان با مراجعه به سامانه، نیازهای منطقه‌ای خود را استخراج می‌کند و می‌تواند آب مصرفی برای الگوی کشت را تحت گزینه‌های مختلف کاربری به‌ذی‌نفعان بخش آب کشاورزی با قابلیت به‌روزرسانی ارائه نماید.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطا در روش تافته، پاسکوئله و رئس به ترتیب با ۱۲۲، ۸۳ و ۱۲۶ میلی‌متر در روز بود که در این میان، روش پاسکوئله نسبت به‌سایر روش‌ها، دارای برآورد بهتری بود. در روش پاسکوئله بهترین ریشه میانگین مربعات خطای نرمال با ۰/۱۸ درصد مشاهده شد. شاخص توافق یا سازگاری در روش تافته، پاسکوئله و رئس به‌ترتیب با ۰/۹۵، ۰/۹۸ و ۰/۹۵ درصد و ضریب کارایی مدل به‌ترتیب با ۰/۷۷، ۰/۹۱ و ۰/۷۳ بود. همچین نتایج آنالیز آماری نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده به‌خط یک- به‌یک نزدیک و ارتباط مناسبی دارند و مقادیر ضریب تبیین در سال‌های مورد مطالعه را ۰/۹۸ نشان داد. نتایج برآورد میزان تبخیر- تعرق گیاه گندم با استفاده از سیستم نیاز آب در دشت قزوین با روش‌های تافته و همکاران. (۲۰۱۳)، پاسکوئله و همکاران. (۲۰۱۷) و رئس و همکاران، (R^2=۰/۹۸) بالا بوده و ریشه میانگین مربعات خطا در روش‌های تافته، پاسکوئله و رئس به ترتیب ۱۲۰، ۸۳ و ۱۲۶ میلی‌متر در روز بود که در این روش روش پاسکوئله برآورد بهتری نسبت به روش‌های دیگر داشت.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی و با توجه به نتایج آماری، تقریب خوبی بین داده های واقعی و استفاده از سیستم نیاز آب در تعیین میزان آب آبیاری در شرایط تنش آبی مشاهده شد که بیانگر ارزیابی مناسب سیستم نیاز آبی و توانایی شبیه سازی است. تابع عملکرد گندم در رابطه با تیمارهای مختلف آبیاری بود و این سیستم می تواند به‌عنوان ابزار مناسبی در برآورد نیاز آبی برای بهبود مدیریت آب در گندم استفاده شود.

کلید واژه‌ها: تبخیر-تعرق، حل معکوس عددی، رقم الوند، نیاز آبی

10.30495/WSRCJ.2023.70827.11337

مقدمه

گیاه گندم[1] منبع بیش از ۲۰ درصد کالری در رژیم غذایی انسان بوده (Lobell and Gourdji, 2012; Shiferaw et al., 2013; Zulkiffal et al., 2021) و ۱۵ درصد از کل غلات کشت شده در سطح جهان را در بر می‌گیرد (Kiss, 2011). از آن‌جایی که انتظار می‌رود تقاضا برای غلات تا سال ۲۰۵۰ به ۳ میلیارد تن برسد، لذا کشت گندم در جهان افزایش یافته است (Alexandratos and Bruinsma, 2012). در بین محصولات زراعی، سطح زیر کشت گندم در رتبه اول جهانی قرار دارد (Rahimian et al., 2022). براساس گزارشات فائو، تولید کل غلات جهان نزدیک به ۵۸۷/۲ میلیارد تن می‌باشد که تقریباً ۷۲۲ میلیون تن آن به گندم اختصاص دارد (FAO, 2018). عوامل مختلفی در افزایش تولید محصول گندم مؤثر می‌باشند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، آب است. تعیین آب مصرفی واقعی گندم در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیتی خاص برخوردار بوده و استفاده اقتصادی از آب یک مسئله جدی و بسیار مهم برای کشاورزان و محققانی است که گندم را به صورت آبی کشت و تولید می‌کنند (Ebrahimipak et al., 2018). گندم پس از کاشت باید رطوبت کافی جهت جوانه‌زنی داشته باشد تا با جذب آب و اکسیژن کافی رشد نماید. تأمین رطوبت مناسب بلافاصله پس از کشت یا در زمان کشت گندم برای دستیابی به تعداد مناسب بوته در واحد سطح و در نتیجه دریافت عملکرد مطلوب لازم است. تنش‌آبی یکی از عوامل اصلی محدودکننده تولید محصولات زراعی از جمله گندم می‌باشد. در شرایط تنش آبی، به‌دلیل بسته شدن روزنه‌ها در طول دوره تنش و تغییر کارایی مصرف آب، ماده خشک تولیدی گیاه کاهش می‌یابد (Shamsi et al., 2011 ؛ Rahimi et al., 2019). در پژوهشی پنج سطح مدیریت آبی شامل آبیاری کامل، بدون آبیاری و تامین نیاز آبی ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد در گندم رقم گاسکوژن بررسی شد و گزارش گردید که کاهش میزان فراهمی آب در تیمارها با کاهش تدریجی عملکرد بیولوژیک و عملکرد اقتصادی همراه بود و بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری کامل به میزان ۸۲۴۵ کیلوگرم در هکتار بود (Rahimi et al., 2019).

یکی از شاخص‌های اساسی در تعیین کارایی استفاده از آب در تولید محصولات کشاورزی، شاخص کارایی و بهره‌وری مصرف آب می‌باشد. اصطلاح بهره‌وری مصرف آب بیانگر نسبت میزان محصول تولیدی بر حسب کیلوگرم به آب تعرق شده بر حسب متر مکعب می‌باشد (Egdernezhad et al.,2019). استفاده از مفهوم بهره‌وری آب، بستگی به‌مقیاس کار و نوع استفاده از آن دارد که از نسبت عملکرد اقتصادی (عملکرد ارائه شده به‌بازار) به‌تبخیر-تعرق واقعی گیاه تعریف می‌گردد. در پژوهشی اثر کم‌آبیاری بر خصوصیات کمی و کیفی گندم هامون با دو تیمار اصلی شامل آبیاری نواری با انتهای بسته و شیاری در کرت‌های اصلی و سه تیمار فرعی میزان آب شامل آبیاری کامل، ۷۵ درصد آبیاری کامل و ۵۵ درصد آبیاری کامل در کرت‌های فرعی انجام شد و گزارش گردید که میانگین آب مصرفی در تیمار آبیاری کامل، ۷۵ درصد آبیاری کامل و ۵۵ درصد آبیاری کامل به‌ترتیب برابر با ۳۵۰۵ ، ۴۴۷۳ و ۲۷۳۰ مترمکعب در هکتار و بهره‌وری مصرف آب در محدوده ۰/۹۴ و ۱/۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود (Kikhaei and Ganji Khorram, 2016).

تابع تولید یکی از شاخص‌های مورد استفاده در مباحث عملکرد گیاه-آب مصرفی است که در افزایش بهره‌وری مصرف آب که به‌صورت نسبت عملکرد محصول به‌مقدار آب مصرفی می‌باشد، موثر است (Greaves et al., 2017 ؛ Tafteh et al., 2020). مبنای حل معکوس تابع تولید، از روش (GRG)[2] پیروی می‌کند. این روش، توسعه‌ای از روش گرادیان کاهش یافته برای تطبیق با محدودیت‌های نابرابر غیرخطی است که در آن به‌گونه‌ای جواب یافت می‌شود که برای هر حرکت کوچک، محدودیت‌های فعال در نظر گرفته می‌شود و دقیقاً فعال باقی می‌مانند. اگر برخی از قیودهای فعال به‌دلیل غیرخطی بودن توابع محدودیت، دقیقا برآورده نشده باشند، از روش نیوتن-رافسون برای بازگشت به‌مرز محدودیت استفاده می‌شود. بنابراین، روش مذکور را می‌توان تا حدودی شبیه به‌روش طرح ریزی گرادیان پیشرفته در نظر گرفت.

سامانه نیاز آبی کشور که توسط موسسه تحقیقات خاک و آب کشور ارائه شده است، سامانه‌ای است برای تعیین نیاز آبی محصولات زراعی و باغی که توانایی برآورد و تعیین نیاز آبی، آب مصرفی و برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان را در سطح منطقه، شهرستان، حوضه آبریز، دشت دارد. این سامانه ساختار چند هسته‌ای دارد و با در اختیار گرفتن بانک‌های اطلاعات داده‌های هواشناسی، داده‌های گیاهی، مراحل فنولوژی گیاه و با ایجاد زیرسامانه محاسبات فنی که شامل فرمول‌ها و روابط علمی کالیبره شده است، مقدار نیاز آبی گیاهان را برآورد می‌کند و از طریق زیرسامانه‌های خروجی بسته به‌نوع بهره‌بردار، خروجی‌های متعدد در اختیار کاربر قرار می‌دهد. یکی از نکات برجسته این سامانه، مکان محور بودن آن است و استفاده‌کننده در هر مکان با مراجعه به سامانه، نیازهای منطقه‌ای خود را استخراج می‌کند و می‌تواند آب مصرفی برای الگوی کشت را تحت گزینه‌های مختلف کاربری به‌ذی‌نفعان بخش آب کشاورزی با قابلیت به‌روزرسانی ارائه نماید (Abdzad Gohari et al., 2022).

این پژوهش با هدف بررسی سامانه نیاز آب در تعیین مقدار آب آبیاری گیاه گندم رقم الوند بر اساس حل معکوس تابع تولید عملکرد در شرایط تنش آبی در منطقه مورد مطالعه انجام شد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی سامانه نیاز آب در تعیین مقدار واقعی آب آبیاری و عملکرد گیاه گندم بر اساس حل معکوس تابع تولید در شرایط تنش آبی در سال‌های زراعی ۱۳۹۶- ۱۳۹۸ در استان قزوین در زمینی به مساحت ۶۰۰ مترمربع در ایستگاه تحقیقاتی اسماعیل آباد (49º 52' N, 36º15' E, 1285 MSL) انجام شد. طرح آزمایشی به‌صورت کرت‌های خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجراء گردید. عامل اصلی مدیریت آبیاری شامل تأمین ۲۰ (I_1)، ۴۰ (I_2)، ۶۰ (I_3)، ۸۰ (I_4) و ۱۰۰ (I_5) درصد نیاز آبی و تیمار فرعی شامل آبیاری تا پایان مرحله گلدهی (S_1) و مرحله خمیری شدن دانه (S_2) بود. اطلاعات مربوط به‌هواشناسی منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۹۶-۹۸ در جدول ۱ ارائه شده است. قبل از آماده‌سازی زمین، جهت تعیین خصوصیات فیزیکی‌و شیمیایی خاک، از اعماق ۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متری به‌طور تصادفی نمونه‌برداری انجام شد و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به‌ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. بذر مورد استفاده از رقم الوند بود. زمان کاشت در طی سه سال، ۱۱ آبان و زمان برداشت بین ۱۰ تا ۱۲ تیرماه متغیر بود. هر واحد آزمایشی ۱۰ مترمربع بود. در این آزمایش ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و ۴۵ کیلوگرم در هکتار کود فسفات با تراکم ۵ میلیون بوته در هکتار استفاده شد. برای به‌دست آوردن تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_o) از نرم‌افزار کراپ‌وات ۸[۳] استفاده شد. این نرم افزار از روش پنمن- مونتیث برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع استفاده می‌کند. تعیین تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه (ET_c) از ضرب تبخیر-تعرق گیاه مرجع در ضریب گیاهی (K_c) گندم در مراحل مختلف رشد که بین ۰/۲۹ تا ۱/۰۹ متغیر بود، به‌دست آمد. ضرایب گیاهی از پژوهش ابراهیمی پاک و همکاران (۲۰۱۸) استخراج شد (Tafteh et al.,2014). مقدار آب آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک محاسبه شد و درصد حجمی رطوبت خاک قبل از آبیاری با نمونه‌گیری از اعماق خاک اندازه‌گیری و عمق خالص آبیاری (d_n) بر حسب سانتی‌متر، پس از تخلیه رطوبتی مجاز[۴] (MAD) و با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید. تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی‌گیاه به‌عنوان تیمار آبیاری کامل و سایر تیمارهای آبیاری (تیمارهای تنش) به عنوان درصدی از این مقدار در نظر گرفته شدند.

$$d_n = \frac{(\theta_{FC} - \theta_{PWP})}{100} \times MAD \times D_r \qquad (1)$$

که در آن، Θ_{Fc}: درصد حجمی رطوبت خاک در ظرفیت زراعی، Θ_{pwp}: درصد حجمی رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم و D_r: عمق توسعه ریشه گیاه (سانتی‌متر) می‌باشد. اندازه‌گیری بیشترین عمق توسعه ریشه با روش پروفیل مستقیم و به‌میزان ۶۰ سانتی‌متر بود. مقدار آب تحویلی به‌هر واحد آزمایشی توسط کنتور انجام شد و مقدار آب مصرف شده در طول دوره رشد گیاه شامل مجموع آب آبیاری و میزان بارندگی بود (جدول ۴).

جدول ۱. اطلاعات مربوط به هواشناسی منطقه در سال‌های مورد مطالعه

ماه	سال	حداقل‌دما (سانتی‌گراد)	حداکثردما (سانتی‌گراد)	حداقل رطوبت نسبی (درصد)	حداکثر رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد در ارتفاع دو متری (متربرثانیه)	ساعات‌آفتابی (ساعت در روز)	بارندگی (میلی‌متر)	تبخیر از تشتک (میلی‌متر)
آبان	۱۳۹۶	۷/۴	۲۱/۲	۲۸/۹	۶۷/۶	۱/۲	۵/۹	۸/۹	۲/۲
	۱۳۹۷	۷/۴	۲۰/۰	۴۴/۳	۸۶/۲	۱/۲	۶/۱	۲۲/۸	۲/۰
	۱۳۹۸	۴	۱۵/۴	۵۱/۴	۹۱/۵	۱/۰	۶/۴	۵۶/۶	۱/۵
آذر	۱۳۹۶	-۱/۳	۱۱/۴	۳۷/۰	۷۷/۷	۱/۱	۶/۸	۹/۸	۱/۲
	۱۳۹۷	۲/۹	۱۲/۳	۵۷/۴	۹۰/۷	۱/۲	۴/۵	۷۹/۴	۱/۰
	۱۳۹۸	۱/۷	۱۱/۷	۶۰/۰	۹۳/۲	۱/۱	۵/۰	۳۷/۷	۱/۰
دی	۱۳۹۶	۰/۴	۱۱/۷	۳۷/۴	۷۹/۲	۱/۳	۵/۸	۱۶/۳	۱/۳
	۱۳۹۷	-۱/۴	۸/۶	۵۲/۷	۸۶/۶	۱/۲	۵/۵	۵۵/۸	۱/۰
	۱۳۹۸	-۰/۲	۱۰/۷	۵۱/۲	۸۹/۹	۱/۲	۶/۲	۳۱/۳	۱/۰
بهمن	۱۳۹۶	-۱/۵	۸/۹	۵۴/۴	۹۱/۸	۱/۲	۵/۱	۷۵/۳	۱/۲
	۱۳۹۷	-۰/۴	۱۰/۵	۴۴/۴	۸۵/۲	۱/۴	۵/۴	۲۷/۹	۱/۴
	۱۳۹۸	-۱/۷	۱۰/۰	۴۲/۸	۸۳/۶	۱/۳	۶/۳	۱۲/۵	۱/۴
اسفند	۱۳۹۶	۳/۶	۱۵/۸	۴۲/۶	۸۵/۰	۱/۳	۵/۴	۵۲/۵	۲/۲
	۱۳۹۷	۰/۷	۱۲/۷	۴۰/۷	۸۲/۴	۱/۳	۶/۶	۱۸/۹	۲/۱
	۱۳۹۸	۲/۴	۱۴/۸	۴۳/۵	۸۵/۲	۱/۴	۶/۰	۶۸/۹	۲/۲
فروردین	۱۳۹۶	۶/۲	۲۱/۴	۲۹/۵	۷۱/۸	۱/۳	۷/۵	۹/۸	۳/۵
	۱۳۹۷	۵/۸	۱۶/۹	۵۰/۱	۸۸/۹	۱/۴	۵/۸	۱۰۹/۸	۲/۷
	۱۳۹۸	۳/۷	۱۵/۴	۵۳/۲	۹۳/۴	۱/۶	۵/۹	۱۲۷/۵	۲/۶

ماه	سال	حداقل‌دما (سانتی‌گراد)	حداکثردما (سانتی‌گراد)	حداقل رطوبت نسبی (درصد)	حداکثر رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد در ارتفاع دو متری (متربرثانیه)	ساعات‌آفتابی (ساعت در روز)	بارندگی (میلی‌متر)	تبخیر از تشتک (میلی‌متر)
اردیبهشت	۱۳۹۶	۹/۲	۲۲/۴	۴۲/۰	۸۵/۸	۱/۵	۶/۹	۵۸/۷	۳/۸
	۱۳۹۷	۷/۱	۲۳/۸	۳۳/۹	۷۹/۲	۱/۳	۹/۱	۱۵/۱	۴/۳
	۱۳۹۸	۸/۴	۲۳/۳	۴۲/۷	۸۷/۸	۱/۴	۸/۵	۴۹/۵	۴/۱
خرداد	۱۳۹۶	۱۳/۸	۳۱/۵	۲۸/۱	۸۰/۳	۱/۴	۹/۹	۱۹/۸	۵/۶
	۱۳۹۷	۱۲/۴	۳۰/۳	۲۴/۲	۶۸/۸	۱/۵	۱۰/۴	۲/۱	۵/۸
	۱۳۹۸	۱۴/۹	۳۴/۴	۱۶/۷	۶۱/۰	۱/۵	۱۱/۵	۰/۳	۶/۶
تیر	۱۳۹۶	۲۰/۲	۳۸/۷	۱۳/۳	۵۱/۹	۱/۶	۱۱/۸	۰/۰	۷/۳
	۱۳۹۷	۱۸/۷	۳۷/۹	۱۸/۷	۵۸/۴	۱/۴	۱۱/۴	۰/۰	۶/۸
	۱۳۹۸	۱۷/۲	۳۴/۵	۲۳/۵	۶۳/۹	۱/۵	۱۰/۶	۷/۷	۶/۳

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی خاک محل آزمایش

عمق خاک (cm)	بافت خاک	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	وزن مخصوص ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	ظرفیت زراعی ($cm^3\ cm^{-3}$)	نقطهٔ پژمردگی ($cm^3\ cm^{-3}$)
۲۵-۰	رسی	۵۱	۳۴	۱۵	۱/۴۴	۰/۲۱	۰/۱۱
۵۰-۲۵	لوم رسی سیلت	۳۵	۵۰	۱۵	۱/۴۲	۰/۲۰	۰/۱۰
۷۵-۵۰	رسی	۴۷	۳۸	۱۵	۱/۴۷	۰/۲۳	۰/۱۲
۱۰۰-۷۵	لوم رسی سیلت	۳۹	۵۴	۷	۱/۵۳	۰/۲۳	۰/۱۲
۱۲۵-۱۰۰	لوم رسی سیلت	۳۷	۵۴	۹	۱/۵۵	۰/۲۳	۰/۱۳
۱۵۰-۱۲۵	لوم رسی سیلت	۳۹	۴۲	۱۹	۱/۶۰	۰/۲۴	۰/۱۳

جدول ۳. خصوصیات شیمیایی خاک محل آزمایش

عمق خاک (cm)	اسیدیته (-)	هدایت الکتریکی (dS/m)	نیترات (meq/l)	پتاسیم (meq/l)	فسفر (meq/l)	کلسیم (meq/l)	سدیم (meq/l)	منیزیم (meq/l)
۵۰ -۰	۷/۳	۰/۸۶	۰/۷	۵/۷	۰/۲۵	۱/۸	۰/۲۷	۰/۴۸
۱۰۰ -۵۰	۷/۵	۱/۱	۱/۲	۶/۱	۰/۳۲	۱/۲	۰/۳۱	۰/۵۲

جدول ۴. مقدار آب مصرفی (میلی‌متر) در سال‌های مورد مطالعه

تیمارهای آبیاری	مراحل رشد	سال۹۶	سال۹۷	سال۹۸
۲۰ درصد نیاز آبی	گلدهی	۷۴/۱	۷۶/۰	۷۷/۵
	خمیری شدن دانه	۷۸/۰	۸۰/۰	۸۱/۶
۴۰ درصد نیاز آبی	گلدهی	۱۴۶/۶	۱۵۰/۴	۱۵۳/۴
	خمیری شدن دانه	۱۵۶/۰	۱۶۰/۰	۱۶۳/۲
۶۰ درصد نیاز آبی	گلدهی	۲۱۵/۳	۲۲۰/۸	۲۲۵/۲
	خمیری شدن دانه	۲۳۴/۰	۲۴۰/۰	۲۴۴/۸
۸۰ درصد نیاز آبی	گلدهی	۲۹۰/۲	۲۹۷/۶	۳۰۳/۶
	خمیری شدن دانه	۳۱۲/۰	۳۲۰/۰	۳۲۶/۴
۱۰۰ درصد نیاز آبی	گلدهی	۳۶۶/۶	۳۷۶/۰	۳۸۳/۵
	خمیری شدن دانه	۳۹۰/۰	۴۰۰/۰	۴۰۸/۰

در سامانه نیاز آب، میزان تبخیر-تعرق بر اساس عملکرد پتانسیل و واقعی از روش‌های Raes (2004)، Tafteh et al., (2014) و روش پاسکوئله بر مبنای فائو۶۶ (۲۰۱۷) استفاده می‌شود. هر سه‌روش، ارزیابی حساسیت محصول را بر روی بازه‌ها و توان‌های مختلف بررسی می‌کنند و توان نسبی را بر اساس نسبت ضریب واکنش عملکرد به‌کل ضرایب واکنش (به‌عنوان توان معادله حاصل ضربی) ارائه می‌دهد. بهره‌وری فیزیکی آب گندم (کیلوگرم بر مترمکعب) بر اساس تبخیر-تعرق، از تقسیم عملکرد (کیلوگرم بر هکتار) بر میزان تبخیر-تعرق (میلی‌متر) محاسبه گردید (Abdzad Gohari et al., 2022). تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزارهای SPSS، رسم شکل‌ها با Excel و برای مقایسه آماری بین نتایج، از شاخص‌های آماری موجود در روابط ۶ تا ۱۱ استفاده شد.

$$MRE = \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \times 100 \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2\right)} \quad (۷)$$

$$RMSE_n=[(\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2/n)^{0.5}/\overline{O}]\times 100 \quad (۸)$$

$$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2} \quad (۹)$$

$$R^2=\frac{\left(\sum_{i=1}^{n}(P_i-\overline{P})(O_i-\overline{O})\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(P-\overline{P})^2\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$d=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i-\overline{O}|+|O-\overline{O})^2} \quad (۱۱)$$

که در آن: MRE میانگین خطای نسبی[۵]، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا[۶]، $RMSE_n$ ریشه میانگین مربعات خطای نرمال[۷]، EF ضریب کارایی مدل[۸]، d شاخص توافق یا سازگاری[۹] و R^2 ضریب تبیین[۱۰] است. پارامترهای O، P، $\overline{O}$ و n به ترتیب داده مشاهده‌شده، برآورد شده و میانگین داده‌های مشاهده‌ای و تعداد مشاهدات می‌باشد. در ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده اگر مقادیر MRE و RMSE به صفر و مقادیر d، EF و R^2 به ۱ نزدیک‌تر باشند، نشان دهنده این مطلب است که مدل شبیه‌سازی را بهتر انجام داده است. اگر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال، کمتر از ۱۰ درصد باشد، شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد متوسط و بالاتر از ۳۰ درصد، ضعیف بر آورد شده است (Jamieson et al., 1991). میزان ضریب کارایی و میزان شاخص توافق یا سازگاری بین منفی بی‌نهایت تا مثبت یک متغیر است و هرچه میزان آن به‌یک نزدیکتر باشد، مدل دارای کارایی بهتر و مقادیر شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌تر می‌باشد (Willmott et al., 1982).

نتایج و بحث

برآورد مقادیر تبخیر-تعرق برای محاسبه نیاز آبی در راستای برنامه‌ریزی آبیاری برای گندم از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو تبخیر-تعرق در تیمارهای مختلف آبیاری در سال‌های مورد مطالعه با استفاده از روش‌های تافته، پاسکوئله و رئس موجود در سامانه نیاز آب و تکنیک حل معکوس تابع تولید برآورد گردید. نتایج نشان داد که میزان تبخیر-تعرق در طول دوره رشد گیاه مقدار ثابتی نیست و شرایط دمایی بر میزان تبخیر-تعرق تأثیرگذار است. کمترین و بیشترین تبخیر-تعرق به ترتیب در ماه‌های بهمن و تیر رخ داد (جدول ۵). شدت تبخیر-تعرق از سطح خاک به‌علت سطح کم پوشش گیاهی در مراحل ابتدایی بالا بوده و پس از آن به‌مرور زمان میزان تبخیر از سطح خاک به‌علت توسعه پوشش گیاهی کاهش می‌یابد (Abdzad Gohari et al, 2022 ؛ Ehsani et al., 2012). مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در گندم نشان داد که در تیمارهای مختلف، اختلاف اندکی وجود دارد. به‌طوری که میانگین خطای نسبی در طی دوره سه ساله در روش تافته، روش پاسکوئله و روش رئس به‌ترتیب ۲۰/۵، ۱۱/۷ و ۲۱/۵ درصد بود که حاکی از برتری روش پاسکوئله دارد. بیشترین عملکرد در طی سه‌سال در شرایط آبیاری کامل مشاهده شد که متناسب با آن، میزان بهره‌وری آب نیز دارای حداکثر مقدار گردید. در پژوهشی نشان داده شد که بین مقدار مصرف آب آبیاری و عملکرد محصول گندم یک رابطه غیرخطی وجود دارد، به‌طوری که در ابتدا رابطه بین عملکرد و آب آبیاری مستقیم می‌باشد. مصرف آب تا حد ۲۰۰۰ مترمکعب نسبت مستقیم داشت و عملکرد به‌تدریج افزایش می‌یابد. اما هنگامی که حجم آب آبیاری از حدود ۶۰۰۰ مترمکعب بیشتر شود، عملکرد کاهش پیدا می‌کند. رابطه غیرخطی، نشان‌دهنده این است که هرچه آب بیشتری به‌زمین داده شود، لزوماً عملکرد گندم افزایش پیدا نمی‌کند. به‌نظر می‌رسد تا زمانی که نیاز آبی گیاه تامین گردد، عملکرد نیز افزایش پیدا می‌کند و زمانی که از حد نیازگیاه فراتر رفت، کم‌کم مشکلات ناشی از تجمع آب اضافی در منطقه توسعه ریشه، خود را نشان می‌دهد و عملکرد، رو به‌کم شدن می‌رود (Mohtadi et al., 2016). در پژوهشی مدیریت آبیاری شامل دیم و تأمین ۴۰، ۶۰ ، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در دو رقم بادام‌زمینی با استفاده از سامانه نیاز آب کشور بررسی شد، نتایج نشان داد که بیشترین تبخیر-تعرق در ارقام مورد بررسی با تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در سال‌های ۹۶ و ۹۷ بین ۴۳۹ و ۵۲۴ میلی‌متر متغیر بود و مقادیر خطای نسبی در شرایط اندازه‌گیری و تخمین زده شده بین ۱/۷۶- و ۴۶/۷۰- درصد قرار داشت (Abdzad Gohari et al, 2022). در این پژوهش، میانگین سه‌ساله تبخیر-تعرق در شرایط اندازه‌گیری شده، روش تافته، روش پاسکوئله و روش رئس به ترتیب ۵۲۵/۴۷، ۴۱۵، ۶۴۰/۴ و ۴۱۰ میلی‌متر بود که با نتایج سایر پژوهشگران مانند ابراهیمی پاک[۱۱] و همکاران (۲۰۲۲) و میشرا[۱۲] و همکاران (۱۹۹۵) با ۶۴۰ میلی‌متر، یاسین[۱۳] و همکاران (۱۹۹۰) با ۵۴۱ میلی‌متر و روس[۱۴] و همکاران (۱۹۸۹) با ۴۸۸ میلی‌متر مطابقت داشت. میزان بهره‌وری فیزیکی آب در روش‌های تافته، پاسکوئله و رئس به ترتیب ۱/۰۰، ۱/۲۶، ۱/۱۳ و ۱/۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود (جدول ۶). در پژوهشی، بهره‌وری مصرف آب گندم در استان اصفهان بررسی گردید و گزارش شد که میزان بهره‌وری مصرف آب در محدوده ۰/۵۶ تا ۱/۳۷ کیلوگرم برمترمکعب متغیر بود (Rezaei rad et al., 2012). در تحقیقی نشان داده شد که میزان بهره‌وری مصرف آب در گندم ۱/۰۹ کیلوگرم برمترمکعب بود (Zwart and Bastiaanssen, 2004). نتایج پژوهش‌ها در کشور هند نشان داد که بهره‌وری فیزیکی‌آب برای گیاه گندم برابر با ۱/۰۴ کیلوگرم بر متر مکعب بود (Singh et al., 2006 و Liu et al., 2008). در پژوهشی بهره‌وری آب گندم تحت مدیریت‌های متفاوت آبیاری در طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰

بررسی شد و گزارش گردید که دامنهٔ تغییرات بهره‌وری آب کاربردی گندم از ۱/۵-۰/۳ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود که بالاتر از دامنهٔ گزارش شده توسط سازمان خواربار جهانی با ۰/۸ تا ۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود که تقریباً در محدودهٔ دامنهٔ گزارش شده توسط زوارت و بستیانسن با ۰/۶ تا ۱/۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود (Nakhjavani Moghadam et al., 2017).

دامنهٔ وسیع بهره‌وری آب گندم، نشان‌دهندهٔ پتانسیل بالا برای افزایش تولید این گیاه به‌ازای مصرف آب کمتر است و حداکثر مقادیر بهره‌وری آب آبیاری و آب مصرفی (آبیاری+بارندگی‌مؤثر) قابل حصول گندم برای آبیاری قطره‌ای و اعمال کم‌آبیاری به‌ترتیب ۲/۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب است (Nakhjavani Moghadam et al., 2017).

جدول ۵. مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شدهٔ تیمارهای مختلف در سال‌های مورد مطالعه

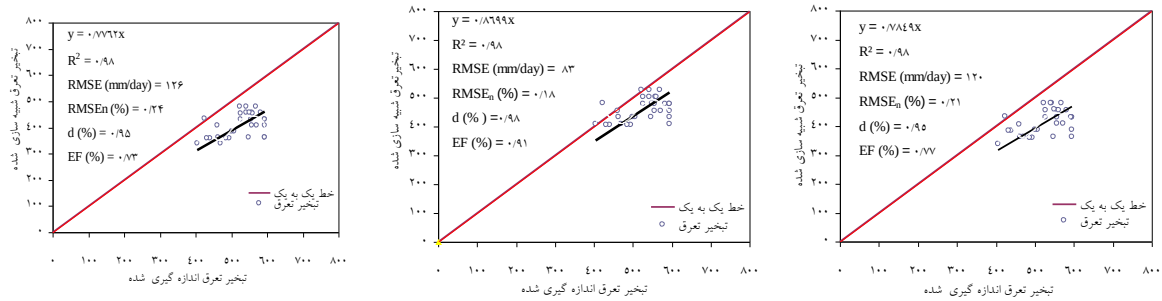
سال‌ها	تیمارها	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر
		مقادیر تبخیر-تعرق (میلی‌متر در روز)								
۱۳۹۶	I_1S_1	۳۹/۸	۱۳/۳	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۷/۱	۱۵۱/۵	۱۷۶/۴
	I_1S_2	۲۳/۹	۱۰/۱	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۴
	I_2S_1	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۵	۱۷۶/۴
	I_2S_2	۲۰/۲	۰/۰	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۷۵/۲	۱۵۱/۵	۱۷۶/۴
	I_3S_1	۳۸/۹	۲۰/۳	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۴
	I_3S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۴
	I_4S_1	۳۲/۴	۹/۹	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۳/۴	۱۵۱/۵	۱۷۶/۴
	I_4S_2	۲۶/۲	۴/۷	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۷۹/۷	۱۵۱/۵	۱۷۶/۴
	I_5S_1	۱۸/۸	۰/۰	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۴
	I_5S_2	۳۰/۱	۱۵/۷	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۴
۱۳۹۷	I_1S_1	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۵	۷۶/۴
	I_1S_2	۴۳/۲	۲۲/۵	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۱۷/۴	۱۳۰/۳	۱۶۹/۳
	I_2S_1	۳۹/۴	۲۰/۹	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۶۶/۰	۳۴/۰	۱۷۶/۴
	I_2S_2	۳۹/۴	۲۰/۸	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۰/۰	۱۰۶/۱	۱۶۲/۳
	I_3S_1	۴۵/۰	۲۳/۴	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۷۶/۰	۳۶/۰	۱۷۶/۴
	I_3S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۴
	I_4S_1	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۷/۰	۱۱۸/۰	۱۷۶/۴
	I_4S_2	۴۶/۹	۲۳/۷	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۶۶/۰	۱۴۵/۴	۱۷۴/۶
	I_5S_1	۴۵/۰	۲۳/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۴۱/۳	۱۴۰/۹	۱۶۹/۳
	I_5S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۱/۰	۹۱/۰	۱۷۶/۴
۱۳۹۸	I_1S_1	۳۹/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۷۴/۲	۷۲/۰
	I_1S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۸/۹	۱۵۰/۰	۵۶/۴
	I_2S_1	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۰
	I_2S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۹۸/۵	۹۸/۰
	I_3S_1	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۸/۹	۱۵۰/۰	۱۳۴/۰
	I_3S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۵۱/۱	۱۷۶/۰
	I_4S_1	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۸/۹	۱۵۰/۰	۹۳/۵
	I_4S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۱۵/۰	۱۱۹/۰
	I_5S_1	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۸۸/۹	۱۳۰/۰	۳۰/۰
	I_5S_2	۴۶/۹	۲۴/۲	۱۴/۷	۱۱/۳	۱۰/۴	۶۷/۲	۹۱/۷	۱۳۴/۱	۱۴۹/۰

جدول ۶. مقادیر خطای نسبی (درصد) و تبخیر-تعرق شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده

سال‌ها	تیمارها	تبخیر-تعرق (میلی‌متر در روز)						خطای نسبی (درصد)			عملکرد (کیلوگرم برهکتار)	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)			
		اندازه‌گیری شده	روش تافته	روش پاسکوئله	روش رئس	روش تافته	روش پاسکوئله	روش رئس			اندازه‌گیری شده	روش تافته	روش پاسکوئله	روش رئس
۱۳۹۶	I_1S_1	۵۷۱/۷	۴۰۷/۸	۴۵۵/۸	۴۰۷/۸	۲۸/۷	۲۰/۳	۲۸/۷			۰/۸۷	۱/۲۳	۱/۱۰	۱/۲۳
	I_1S_2	۵۵۶/۸	۴۰۷/۸	۴۵۵/۸	۴۰۷/۸	۲۶/۸	۱۸/۱	۲۶/۸			۰/۹۲	۱/۲۵	۱/۱۲	۱/۲۵
	I_2S_1	۵۹۴/۳	۴۳۱/۸	۴۵۵/۸	۴۰۷/۸	۲۷/۳	۲۳/۳	۳۱/۴			۵۱۷۰ef	۱/۲۰	۱/۱۳	۱/۲۷
	I_2S_2	۵۲۶/۹	۴۳۱/۸	۴۷۹/۸	۴۳۱/۸	۱۸/۰	۸/۹	۱۸/۰			۵۲۵۰e	۱/۰۰	۱/۰۹	۱/۲۲
	I_3S_1	۵۸۲/۰	۴۵۵/۸	۴۷۹/۸	۴۵۵/۸	۲۱/۷	۱۷/۶	۲۱/۷			۵۴۵۰d	۱/۲۰	۱/۱۴	۱/۲۰
	I_3S_2	۵۹۳/۹	۴۳۱/۸	۴۷۹/۸	۴۳۱/۸	۲۷/۳	۱۹/۲	۲۷/۳			۵۴۰۰d	۱/۲۵	۱/۱۳	۱/۲۵
	I_4S_1	۵۵۷/۲	۴۵۵/۸	۵۰۳/۸	۴۵۵/۸	۱۸/۲	۹/۶	۱۸/۲			۵۵۰۰c	۱/۲۱	۱/۰۹	۱/۲۱
	I_4S_2	۵۴۲/۱	۴۵۵/۸	۵۰۳/۸	۴۷۹/۸	۱۱/۵	۷/۱	۱۵/۹			۵۷۰۰b	۱/۱۹	۱/۱۳	۱/۲۵
	I_5S_1	۵۴۱/۶	۴۷۹/۸	۵۲۷/۸	۴۷۹/۸	۱۱/۴	۲/۵	۱۱/۴			۵۸۰۰a	۱/۲۱	۱/۱۰	۱/۲۱
	I_5S_2	۵۶۸/۶	۴۷۹/۸	۵۲۷/۸	۴۷۹/۸	۱۵/۶	۷/۲	۱۵/۶			۵۸۵۰a	۱/۲۲	۱/۱۱	۱/۲۲
۱۳۹۷	I_1S_1	۴۹۴/۳	۳۵۹/۷	۴۰۷/۱	۳۵۹/۷	۲۷/۲	۱۷/۶	۲۷/۲			۰/۹۱	۱/۲۵	۱/۱۱	۱/۲۵
	I_1S_2	۴۸۶/۳	۳۵۹/۷	۴۰۷/۱	۳۵۹/۷	۲۶/۰	۱۶/۳	۲۶/۰			۰/۹۳	۱/۲۵	۱/۱۱	۱/۲۵
	I_2S_1	۴۴۰/۳	۳۸۳/۴	۴۰۷/۱	۳۵۹/۷	۱۲/۹	۷/۵	۱۸/۳			۱/۰۴	۱/۲۰	۱/۱۳	۱/۲۸
	I_2S_2	۴۳۲/۲	۳۸۳/۴	۴۰۷/۱	۳۵۹/۷	۱۱/۳	۵/۸	۱۶/۸			۰/۰۶	۱/۲۰	۱/۱۳	۱/۲۸
	I_3S_1	۴۶۰/۴	۴۰۷/۱	۴۵۴/۹	۴۰۷/۱	۱۱/۶	۱/۲	۱۱/۶			۱/۱۰	۱/۲۴	۱/۱۱	۱/۲۴
	I_3S_2	۵۹۳/۸	۴۳۰/۹	۴۷۸/۹	۴۳۰/۹	۲۷/۴	۱۹/۳	۲۷/۴			۰/۸۸	۱/۲۲	۱/۱۰	۱/۲۲
	I_4S_1	۵۵۶/۱	۴۳۰/۹	۴۷۸/۹	۴۳۰/۹	۲۲/۵	۱۳/۹	۲۲/۵			۰/۹۴	۱/۲۲	۱/۱۰	۱/۲۲
	I_4S_2	۵۶۰/۲	۴۵۴/۹	۵۰۳/۰	۴۵۴/۹	۱۸/۸	۱۰/۲	۱۸/۸			۰/۹۸	۱/۲۱	۱/۰۹	۱/۲۱
	I_5S_1	۵۲۶/۹	۴۵۴/۹	۵۰۳/۰	۴۵۴/۹	۱۳/۷	۴/۵	۱۳/۷			۵۶۳۰b	۱/۲۴	۱/۱۲	۱/۲۴
	I_5S_2	۵۲۳/۱	۴۷۸/۹	۵۲۶/۹	۴۷۸/۹	۸/۴	-۰/۷	۸/۴			۵۹۰۰a	۱/۱۳	۱/۱۲	۱/۲۳
۱۳۹۸	I_1S_1	۴۰۵/۶	۳۳۹/۳	۴۱۰/۵	۳۳۹/۳	۱۶/۳	-۱/۲	۱۶/۳			۱/۱۶	۱/۳۹	۱/۱۴	۱/۳۹
	I_1S_2	۴۷۰/۱	۳۶۳/۰	۴۱۰/۵	۳۳۹/۳	۲۲/۸	۱۲/۷	۲۷/۸			۴۷۵۰ef	۱/۰۱	۱/۱۶	۱/۴۰
	I_2S_1	۵۹۴/۳	۳۶۳/۰	۴۱۰/۵	۳۶۳/۰	۳۸/۹	۳۰/۹	۳۸/۹			۴۸۰۰e	۰/۸۱	۱/۱۷	۱/۳۲
	I_2S_2	۴۶۲/۹	۳۶۳/۰	۴۳۴/۲	۳۶۳/۰	۲۱/۶	۶/۲	۲۱/۶			۴۹۵۰d	۱/۰۷	۱/۱۴	۱/۳۶
	I_3S_1	۵۴۷/۶	۳۶۳/۰	۴۳۴/۲	۳۶۳/۰	۳۳/۷	۲۰/۷	۳۳/۷			۵۰۰۰d	۰/۹۱	۱/۱۵	۱/۳۸
	I_3S_2	۵۹۴/۳	۳۸۶/۸	۴۳۴/۲	۳۶۳/۰	۳۴/۹	۲۶/۹	۳۸/۹			۵۱۰۰c	۰/۸۶	۱/۱۷	۱/۴۰
	I_4S_1	۵۰۷/۱	۳۸۶/۸	۴۳۴/۲	۳۸۶/۸	۲۳/۷	۱۴/۴	۲۳/۷			۵۱۵۰c	۱/۰۲	۱/۱۹	۱/۳۳
	I_4S_2	۵۰۰/۴	۳۸۶/۸	۴۳۴/۲	۳۸۶/۸	۲۲/۷	۱۳/۲	۲۲/۷			۵۱۵۰c	۱/۰۳	۱/۱۹	۱/۳۳
	I_5S_1	۴۲۳/۶	۴۳۴/۲	۴۸۲/۱	۴۳۴/۲	-۲/۵	-۱۳/۸	-۲/۵			۵۷۰۰b	۱/۳۵	۱/۱۸	۱/۳۱
	I_5S_2	۵۴۹/۵	۴۵۸/۱	۴۸۲/۱	۴۵۸/۱	۱۶/۶	۱۲/۳	۱۶/۶			۶۰۰۰a	۱/۰۹	۱/۲۴	۱/۳۱
میانگین سه سال		۵۲۵/۴۷	۴۱۵	۶۴۰/۴	۴۱۰	۲۰/۵	۱۱/۷	۲۱/۵			۵۲۱۰	۱/۲۶	۱/۱۳	۱/۲۷

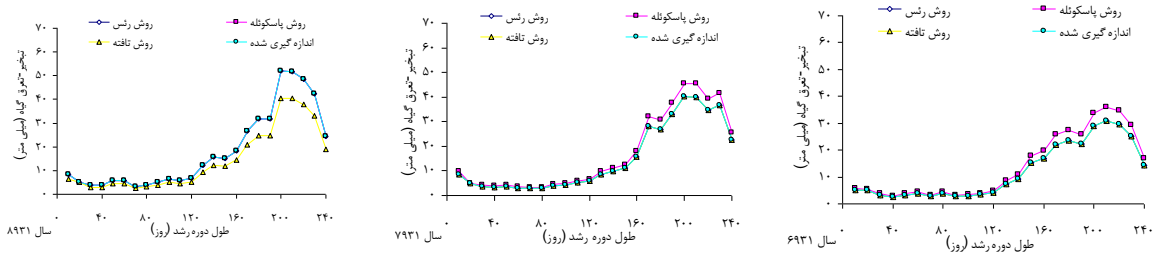
ریشه میانگین مربعات خطا در روش تافته، پاسکوئله و رئس به ترتیب با ۱۲۲، ۸۳ و ۱۲۶ میلی‌متر در روز بود که در این میان، روش پاسکوئله نسبت به سایر روش‌ها، دارای برآورد بهتری بود. در روش پاسکوئله بهترین ریشه میانگین مربعات خطای نرمال با ۰/۱۸ درصد مشاهده شد. شاخص توافق یا سازگاری در روش تافته، پاسکوئله و رئس به ترتیب با ۰/۹۵، ۰/۹۸ و ۰/۹۵ درصد و ضریب کارایی مدل به‌ترتیب با ۰/۷۷، ۰/۹۱ و ۰/۷۳ بود. همچین نتایج آنالیز آماری نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده به‌خط یک‌به‌یک نزدیک و ارتباط مناسبی دارند و مقادیر ضریب تبیین در سال‌های مورد مطالعه را ۰/۹۸ نشان داد (شکل ۱). در تحقیقی بر روی ارقام بادام‌زمینی مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده نیاز آبیاری توسط سامانه نیاز آب، بررسی گردید و گزارش شد که مقدار ضریب تبیین در ارقام مختلف بین ۰/۶۵ و ۰/۶۴، ریشه میانگین مربعات خطا بین ۵۲/۶۰ و ۵۲/۲۴ و میانگین انحراف خطا بین ۱۵/۵۳ و ۱۵/۰۳ متغیر بود. شاخص توافق و ضریب کارایی مدل به‌ترتیب بین ۰/۹۵ و ۰/۹۸ و همچنین بین ۰/۹۵ و ۰/۹۸ قرار داشت. لذا نتایج نهایی آن‌ها با توجه به شاخص‌های آماری موجود و سامانه نیاز آب نشان دهنده برآوردی منطقی از مقدار واقعی آب آبیاری ارائه نمود (Abdzad Gohari et al, 2022). در پژوهشی بر روی گیاه کینوا، تیمارهای تخلیه رطوبتی بر اساس ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد در مراحل مختلف رشد با مدل‌های آکواکراپ و سامانه نیازآب بررسی شد و گزارش گردید که در شاخص‌های آماری مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای مدل آکواکراپ و سامانه نیازآب به‌ترتیب ۹ و ۶ درصد

و همچنین ضریب کارایی برای مدل و سامانه حدود ۰/۹۸ بود که بیانگر دقت و همخوانی نتایج مدل در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق گیاه می‌باشد (Emdad et al., 2022). در تحقیقی تعیین نیاز آبی و آب کاربردی فلفل‌دلمه‌ای در گلخانه با تیمارهای آبیاری ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بررسی و با سامانه نیاز آب مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان‌دهنده شاخص‌های آماری RMSE، $RMSE_n$، d و EF به‌ترتیب با ۳۸/۵۵، ۰/۲۱، ۰/۹۹ و ۰/۹۵ بود (Jafari najafabadi et al., 2022). در پژوهشی نتایج اندازه‌گیری میدانی و مزرعه‌ای مقدار آب آبیاری و عملکرد گندم تحت مدیریت کشاورزان و مقایسه آن با برآورد سامانه نیاز آب در ۳۷ شهرستان در طول فصول زراعی ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ برای تعیین بهره‌وری آب آبیاری گندم و راندمان کاربرد آب آبیاری مورد مطالعه قرار گرفت و گزارش شد که میانگین مقدار آب آبیاری گندم در روش اندازه‌گیری شده در مزارع و سامانه به ترتیب برابر با ۵۷۱۰ و ۵۸۹۴ مترمکعب در هکتار بود و میانگین عملکرد گندم در روش اندازه‌گیری شده در مزارع و سامانه به ترتیب برابر با ۵۲۱۵ و ۴۹۴۹ کیلوگرم در هکتار بود و بهره‌وری آب گندم در روش اندازه‌گیری مزرعه‌ای و سامانه نیاز آب برابر ۱ و ۰/۹ کیلوگرم بر مترمکعب شد. همچنین گزارش شد که سامانه نیاز آب با ریشه میانگین خطای نرمال ۰/۱۹ درصد و ضریب توافق ۰/۹۳ مقدار آب آبیاری گندم را در مقیاس شهرستان برآورد می‌نماید و عملکرد دانه گندم با ریشه میانگین خطای نرمال ۰/۱۷ درصد و ضریب توافق ۰/۹۵ و بهره‌وری آب گندم را با ریشه میانگین خطای نرمال ۰/۲۴ درصد و راندمان کاربرد آب آبیاری را با ریشه میانگین خطای نرمال ۰/۱۹ درصد و ضریب توافق را با ۰/۹۳ برآورد می‌نماید و ضریب کارایی نشان‌دهنده نتایج قابل قبولی در تعیین مقدار آب آبیاری و بهره‌وری آب گندم در سطح مزارع کشور است (Ebrahimipak et al., 2022). از آن‌جایی که شرایط ایده‌آل برای رشد گندم، آب و هوای خنک در دوره رشد رویشی، آب و هوای معتدل در دوران تشکیل دانه و آب و هوای گرم و خشک در زمان برداشت محصول می‌باشد، اما اعمال تنش آبی به‌این گیاه سبب کاهش عملکرد آن به‌خصوص در شرایط دیم خواهد شد، لذا می‌توان کم‌آبی را دلیلی بر پایین بودن عملکرد گندم در منطقه مورد مطالعه نسبت به متوسط عملکرد آن در کشور در نظر گرفت. نتایج تبخیر-تعرق به‌دست آمده از مزرعه و روش‌های سامانه نیاز آب بسیار به‌یکدیگر نزدیک بود و در هر سه فصل زراعی، این نتایج از روند خوبی پیروی نمودند و در ابتدای دوره میزان تبخیر-تعرق کمتر بود و با افزایش سطح پوشش گیاهی این مقدار افزایش یافت و در نهایت در مرحله پلاسیدگی و زوال گیاه، این مقدار مجددا کاهش و در تمامی روش‌ها این روند مشخص و ادامه دار بود (شکل ۲).



روش تافته و همکاران (۲۰۱۳) روش پاسکوئله و همکاران (۲۰۱۷) روش رئس و همکاران (۲۰۰۳)

شکل ۱. مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با استفاده از روش‌های ارائه شده در سامانه نیاز آب



شکل ۲. مقادیر تبخیر-تعرق گندم در طول دوره رشد با استفاده از روش‌های ارائه شده در سامانه نیاز آب و اندازه‌گیری شده در مزرعه

نتیجه‌گیری

برآورد نیاز آبی و تعیین مقدار آب واقعی گیاه، از عوامل مهم در مدیریت آب در کشاورزی می‌باشد. در این تحقیق، تبخیر-تعرق و عملکرد گندم رقم الوند بر اساس حل معکوس تابع تولید ارزیابی و با داده‌های سامانه نیاز آب مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج تخمین میزان تبخیر-تعرق گیاه گندم در سامانه نیاز آب در دشت قزوین با روش‌های تافته و همکاران (۲۰۱۳)، پاسکوئله و همکاران (۲۰۱۷) و روش رئس و همکاران (۲۰۰۳) نشان داد که هر سه روش مذکور دارای ضریب تبیین (R^2=۰/۹۸) بالایی بودند و ریشه میانگین مربعات خطا در روش تافته، پاسکوئله و رئس به‌ترتیب با ۱۲۰، ۸۳ و ۱۲۶ میلی‌متر در روز بود که در این میان، روش پاسکوئله نسبت به‌سایر روش‌ها دارای برآورد بهتری بود. به‌طور کلی و با توجه به‌نتایج آماری، تقریب خوبی بین داده‌های واقعی و سامانه نیاز آب در تعیین مقدار آب آبیاری در شرایط تنش‌آبی مشاهده گردید که حاکی از ارزیابی مناسب سامانه نیاز آب و توانایی شبیه‌سازی تابع عملکرد گندم نسبت به‌تیمارهای مختلف آبیاری بود و این سامانه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب در تخمین نیاز آبی برای بهبود مدیریت آب در گندم مورد استفاده قرار گیرد.

Reference:

Abdzad Gohari, A., Tafteh, A., & Ebrahimipak, N. (2022). Investigation of Water Requirement System in Determining the Actual Amount of Irrigation Water of Peanut Plant Based on Inverse Solution of Yield Function under Water Stress Conditions. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 3(16), 460-471. [in Persian]

Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the (2012) revision.

Ebrahimipak, N., Tafteh, A., Egdarnejad, A., & Kapourchal, S. (2018). Determination of monthly evapotranspiration coefficients of winter wheat by different methods of estimating evapotranspiration and evaporation pan in Qazvin plain. Iranian Journal of Soil and Water Research, 8(4), 107-121. [in Persian]

Ebrahimipak, N.A., Tafteh, A., Abbasi, F., & Baghani, G. (2022). Estimation the actual amount of wheat irrigation water using the NIAZAB system and compare with the farm measurement. Iranian Journal of Soil and Water Research, Articles in Press. [in Persian]

Egdernezhad, A., EbrahimiPak, N. A., Tafteh, A., & Ahmadee, M. (2019). Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain. Water Management in Agriculture, 5(2), 53-64. [in Persian]

Ehsani, A., Arzani, H., Farahpur, M., & Jafari, M. (2012). Evapotranspiration Estimation Using Climatic Data, Plant Characteristics and Cropwat 8.0 Software (Case Study: Steppic Region of Markazi Province, Roodshore Station). Iranian journal of Range and Desert Research, 19(1), 1-16.

Emdad, M., Tafteh, A., & Ebrahimipak, N. (2022). Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements. Journal of Water and Soil, 36(3), 319-331. [in Persian]

FAO, 2018. FAOSTAT. Available online: http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx# ancor.

Jafari najafabadi, M., Tafteh, A., & Ebrahimipak, N. (2022). Determining the water requirement and Applied water of bell pepper in the greenhouse and comparing it with the results of the water requirement system. Iranian Journal of Soil and Water Research, Articles in Press. [in Persian]

Jamieson, P.D., Porter, J.R., & Wilson, D.R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT on wheat crops grown in New Zealand. Field Crops Research, 27: 337-350.

Kikhaei, F., & Ganji Khorram Del, N. (2016). Effect of Deficit Irrigation in Corrugation and Border Methods on Yield and Water Use Efficiency of Wheat. Hamoon. Water Research in Agriculture, 30(1), 1-11. [in Persian]

Liu, J., Zehnder, A.J. B., & Yang. H. (2008). Drops for crops: Modelling crop water productivity on a global scale. Global NEST Journal, 10(3): 295-300.

Lobell, D.B., Gourdji, S.M., (2012). The influence of climate change on global crop productivity. Plant Physiology, 160 (4), 1686-1697.

Mehtadi, M., Al-Baji, M., & Borumand Nesab, S. (2015). Investigating the irrigation water use efficiency of wheat crop in some irrigation and drainage networks of Khuzestan province. Irrigation science and engineering. 12(1), 239-248. [in Persian]

Nakhjavani Moghadam, M.M., Hero, B., & Zarei, Q. (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]

Raes, D. (2004). Budjet: A soil water and salt balance model. Reference Manual. Version 6.0 (http://www.iupware.be and select downloads and next software. last updated June 2004).

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., & Fereres, E. (2017). Reference manual AquaCrop. FAO. Land and Water Division, Rome, Italy. 25p.

Rahimi, Z., Hosseinpanahi, F., & Siosemardeh, A. (2019). Evaluation of yield, radiation and water use efficiency of drought resistant and susceptible wheat cultivars under different irrigation levels. Journal of Wheat Research, 2(1), 19-34. [in Persian]

Rahimian, M., Gholami, H., Ranjbar, GH., Beyrami, H., Moravvej-ol-Ahkami, B., Karimi, M., & Cheraghi, S.A. (2022). Interaction of Applied Water Volume and Irrigation Water Salinity on Wheat Yield in Arid Regions (Case study: Yazd). Journal of Water and Sustainable Development, 8(4), 43-50. [in Persian]

Rezaei rad, H., Hoshmand, A., & Dost Mohammadi, M. (2012). Investigating the water productivity of three crops: barley, wheat and alfalfa in Isfahan province (by city). Islamic Azad University, Khorasgan Branch, Faculty of Agriculture. 20 p. [in Persian]

Shamsi, K., petrosyan, M., Noor-mohammadi, G. Haghparast, A., Kobraee, S., & Rasekhi, B. (2011). Differential agronomic responses of bread wheat cultivars to drought stress in the west of Iran. African Journal of Biotechnology, 10 (14), 2708-2715. [in Persian]

Shiferaw, B., Smale, M., Braun, H.-J., Duveiller, E., Reynolds, M., & Muricho, G. (2013). Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security, Food Security, 5 (3), 291-317.

Singh, R., Van Dam., J.C. & Feddes., R.A. (2006). Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa District. Indian Agricutural Water Management, 82: 253-278.

Tafteh, A., Ebrahimipak. N. A., Babazadeh, H. and Kaveh, F. 2014.Determine yield response factors of important crops by different production functions in qazvin plain. Ecology, Environment and Conservation 20(2), 415-422.

Tafteh, A., Nakhjavani Moghadam, T., Egdernezhad, A., & Saloome Sepehri, S. (2020). Evaluation Of Production Functions In Estimating Two Varieties of Corn Yield with Native Yield Response Factor In The Iran. Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(10), 2519-2529. [in Persian]

Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of American Meteorology Society, 63: 1309-1313.

Zulkiffal, M., Ahsan, A., Ahmed, J., Musa, M., Kanwal, A., Saleem, M., Gulnaz, S. (2021). Heat and Drought Stresses in Wheat (*Triticum aestivum* L.): Substantial Yield Losses, Practical Achievements, Improvement Approaches and Adaptive, Plant Stress Physiology. 25p.

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

یادداشت‌ها

[1] Tritcum Aestivum *L*
[2] *GRG Nonlinear (Generalized Reduced Gradient)*
[3] *Cropwat 8.0*
[4] *Maximum Allowable Depletion, MAD*
[5] *Mean Relative Error*
[6] *Root Mean Square Error*
[7] *Normalized Root Mean Square Error*
[8] *Coefficient of Efficiency*
[9] *Index of Agreement*
[10] *Coefficient Of Determination*
[11] *Ebrahimipak*
[12] *Mishra*
[13] *Yasin*
[14] *Roth*