نشریه دانش آب و خاک / جلد ۳۳ شماره ۲ صفحه‌های ۲۳ تا ۳۴/ سال ۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی و ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم زمستانه در منطقه زنجان

زهرا آقاجانلو[1]*، جعفر نیکبخت[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۹

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: aghajanloo_z@yahoo.com

چکیده

آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین و تحلیل مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری، به دلیل محدود بودن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی محل آزمایش، تعداد محدود سناریوهای مورد آزمایش در مزرعه و نیز هزینه‌های بالای انجام آزمایش محدود می‌گردند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، می‌توان از مدل‌های گیاهی به عنوان ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی آزمایش‌های مزرعه‌ای استفاده کرد. در این پژوهش مدل *AquaCrop* در کم‌آبیاری گیاه گندم در منطقه زنجان ارزیابی شد. داده‌های مورد لزوم پژوهش، از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان در سال زراعی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ تهیه گردید. آزمایش مزرعه‌ای به منظور بررسی واکنش گیاه گندم به تیمارهای مختلف کم‌آبیاری به صورت طرح آماری کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام گرفته بود. تیمارهای آبیاری شامل تأمین ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بود. مدل با داده‌های تکرار اول مقادیر واقعی واسنجی گردید. سپس با وارد کردن شاخص برداشت تکرارهای دوم و سوم کلیه تیمارهای آبیاری، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گندم برای آن‌ها شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد. بر اساس نتایج، بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب به میزان ۶/۹ و ۷/۰ درصد (به ترتیب) در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و در تکرار سوم حاصل شد و کم‌ترین اختلاف به میزان ۱/۰ و ۰/۵ درصد (به ترتیب) در تیمار ۶۰ درصد و ۸۰ درصد تکرار دوم (به ترتیب) به دست آمد. مقدار R^2 مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب ۰/۹۶ و ۰/۹۹ (به ترتیب) حاصل شد که نشان از کارایی خوب مدل در شبیه‌سازی و پیش‌بینی مقادیر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گندم در شرایط کم‌آبیاری بود.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری مصرف آب، کم‌آبیاری، گندم زمستانه، عملکرد، مدل *AquaCrop*

Simulation and Assessment of AquaCrop Model in Deficit Irrigation Management of Winter Wheat in Zanjan Region

Zahra Aghajanloo[1*], Jaefar Nikbakht[2]

Received: May 7, 2021 Accepted: November 20, 2021

1-Graduate M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
2- Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
*Corresponding Author, E-Mail: aghajanloo_z@yahoo.com

Abstract

Background an Objectives

Iran is a country with a mostly hot and dry climate, and due to the high rate of evaporation, it loses a large amount of water annually in the form of evaporation. While only 12% of Iran's area is under cultivation, about 93% of Iran's water is consumed in the agricultural sector. One of the solutions available to improve and develop the agricultural sector is to increase the efficiency of water consumption for strategic plants such as wheat with proper management in the field, especially in low irrigation conditions. Wheat, in the composition of products, covers nearly 50% of the country's agricultural land. As a result, wheat has a major share in the country's per capita consumption and plays a prominent role in food security and social stability. One of the types of wheat, winter wheat, can tolerate -40 °C when the ground is covered by snow, and -32 °C when it is not covered by snow. In terms of wide range of tolerance, this wheat is compatible in different parts of the country such as Zanjan and is widely cultivated. Therefore, this study aimed to use the AquaCrop model to simulate and evaluate the performance of winter wheat in low irrigation in the Zanjan region.

Methodology

Field tests to determine and analyze different managements of low irrigation are limited due to the limited validity of the tests to the physical conditions of the test site, the limited number of scenarios tested in the field, and the high costs of conducting the test. To overcome these limitations, plant models can be used as a powerful tool to simulate field experiments. AquaCrop is a simple, strong, and multi-dimensional model to determine the optimal water consumption limit under different conditions. The model's ease of use, the need for relatively few input parameters, and sufficient accuracy in the simulation have made the AquaCrop model a reliable tool for estimating production under the rain, low irrigation, and supplemental irrigation conditions in agriculture. In order to evaluate the AquaCrop model for managing irrigation operations (deficit irrigation), the data of the field experiment conducted in the crop year 2019-2020 in the research farm of Zanjan University were used. The investigation was conducted to investigate the reaction of wheat plants to different levels of irrigation in the form of a statistical design of split plots in the form of random complete blocks and in three replications. The experimental irrigation treatments included supplying 60, 80, and 100 % of the water requirement of the plant. Also, the model was calibrated with the data of the first iteration of real values. Then, by entering the harvest index of the second and third repetitions of all irrigation treatments, the yield and water consumption efficiency of the wheat plant was simulated and predicted for them. The irrigation method of the plots is gravity, and to control the amount of water given to the plots, a volumetric meter installed on the tap was used.

Findings

Based on the results, the biggest difference between the simulated values and the actual values of yield and water consumption efficiency was 6.9 and 7.0%, respectively, in the 80% water requirement treatment and in the third iteration. The lowest difference was obtained by 0.1 and 0.5% in the treatment of 60 and 80% of the second repetition, respectively. The value of the

coefficient of determination of the simulated values and the actual values of yield and water consumption efficiency were 0.96 and 0.99, respectively, which indicated the good performance of the model in simulating and predicting the values of yield and water consumption efficiency of wheat plants under low irrigation conditions.

Conclusion

The AquaCrop plant model as a powerful tool for simulating field experiments was developed and presented by FAO. In this study, this software was used to simulate the performance and water consumption efficiency of wheat plants under the influence of different levels of irrigation. The results indicated the good performance and efficiency of this model in predicting the values of these two investigated parameters in the Zanjan region, so that the difference between the predicted and measured values of wheat plant yield and water consumption efficiency was less than 10%. Therefore, this software can be used to check different scenarios of water-soil-plant without cost, and based on the obtained results, the proper management decision-making can be done.

Keywords: AquaCrop model, Crop yield, Deficit irrigation, Water use efficiency, Winter wheat.

مقدمه

محدویت منابع آب، رشد روزافزون جمعیت، کاهش نزولات جوی و وجود خشکسالی‌های متناوب در کشور، صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش کشاورزی را امری ضروری و اجتناب ناپذیر کرده است. در این شرایط، اعمال کم‌آبیاری می‌تواند یکی از راهکارهای مدیریتی مؤثر و عملی در آب مصرفی با عملکرد قابل قبول و اقتصادی باشد (خنده‌رویان و همکاران ۲۰۱۱، احمدآلی و خلیلی ۲۰۰۷). آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین و تحلیل مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری، به دلیل محدود بودن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی محل آزمایش، تعداد محدود سناریوهای مورد آزمایش در مزرعه و نیز هزینه‌های بالای انجام آزمایش محدود می‌گردند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، می‌توان از مدل‌های گیاهی به عنوان ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی آزمایش‌های مزرعه‌ای استفاده کرد (مصطفی‌زاده‌فرد و همکاران ۲۰۰۹). با کمک مدل‌های گیاهی امکان پیش‌بینی عملکرد محصول و پتانسیل بهره‌وری مکان‌هایی که گیاه هنوز در آنجا رشد نکرده است وجود دارد بدون این که با صرف هزینه و زمان زیاد آزمایش‌های مزرعه‌ای خسته‌کننده‌ای در چند مکان با خصوصیات آب و هوایی و خاک متفاوت برای چندین سال انجام داد (کریمی ۲۰۰۹). اکثر مدل‌های گیاهی مانند *CERES*، *APSIM*، *CropSyst*، *ALMANAC* و ... نیاز به داده تعداد زیادی پارامتر گیاهی برای اجرا دارند که به راحتی در مزرعه قابل دسترس نبوده و باید به صورت آزمایشگاهی به دست آیند. برای فائق آمدن به این محدودیت‌ها، سازمان فائو در سال ۲۰۰۹ مدل گیاهی *AquaCrop* را بر پایه روش دورنبوس و کسام توسعه داد (ایقبال و همکاران ۲۰۱٤).

AquaCrop یک مدل ساده، قوی و چند بعدی برای تعیین حد بهینه مصرف آب تحت شرایط متفاوت می‌باشد. آسان بودن استفاده از مدل، نیاز به پارامترهای ورودی نسبتا اندک، دقت کافی در شبیه‌سازی، مدل *AquaCrop* را تبدیل به وسیله‌ای معتبر برای تخمین محصول تولیدی تحت شرایط دیم، کم‌آبیاری و آبیاری تکمیلی و راه‌کارهای مدیریت آب در مزرعه برای بهبود راندمان آب مصرفی در کشاورزی کرده است (علیزاده و همکاران ۲۰۱۰). پژوهش‌های زیادی برای ارزیابی این مدل گیاهی در شبیه‌سازی سناریوهای کم‌آبیاری و تنش آبی در سراسر جهان انجام شده است. فراهانی و همکاران (۲۰۰۸) با کمک مدل *AquaCrop* اثر آبیاری کامل و اعمال تنش آبی به میزان ٤۰، ٦۰ و ۸۰ درصد آبیاری کامل بر محصول پنبه را

در سوریه ارزیابی کردند. نتایج، میزان خطای حداکثر ۱۰ درصد را بین مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی، در حالت‌های آبیاری کامل و ٤٠ درصد و حدود ۳۲ درصد خطا در تنش‌های ٦٠ و ۸۰ درصد را نشان داد. استدیوتو و همکاران (۲۰۰۹) از مدل *AquaCrop* به منظور بررسی اثر اعمال کم‌آبیاری قبل از دوران گلدهی و آبیاری کامل بعد از دوران گلدهی بر تولید محصول ذرت استفاده کرد. نتایج نشان داد حداکثر خطای عملکرد محصول بین مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی ٢٤ درصد بود. گارسیا-ویلا و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی مشابه نشان دادند که مدل *AquaCrop* قادر بود عملکرد، رشد پوشش تاجی، زیست توده و کارایی مصرف آب را برای محصول کتان به خوبی شبیه‌سازی کند. هنگ و هسیائو (۲۰۰۹) مدل گیاهی *AquaCrop* را برای عملکرد ذرت ارزیابی کرده و نشان دادند که کارایی مدل در شبیه‌سازی زیست توده (بیوماس)، محصول و سطح سایه‌انداز در تیمارهای بدون تنش آبی و تیمارهای با تنش آبی متوسط، رضایت‌بخش بود در حالی که مدل در شرایط تنش آبی شدید از دقت کمتری برخوردار بود. هسیائو و همکاران (۲۰۰۹) با مدل *AquaCrop* پوشش تاجی، رشد وزنی زیست توده بخش هوایی و عملکرد دانه ٤ رقم ذرت در شش فصل رشد مختلف با تراکم، تاریخ کاشت و نیاز تعرقی مختلف با تیمارهای مختلف آبیاری (اعمال تنش تا زمان سنبله‌دهی، از زمان سنبله‌دهی به بعد، آبیاری یک در میان و آبیاری کامل) را به صورت مناسبی شبیه‌سازی کردند. حیدری‌نیا و همکاران (۲۰۱۰-A) با شبیه‌سازی عملکرد گیاه پنبه با مدل *AquaCrop* در ایستگاه هاشم آباد گرگان، میزان ضریب R^2 برآورد شده بین مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده با مدل و اندازه‌گیری شده پنبه در سال‌های ۸۳ و ۸٤ را به ترتیب ۰/۷۳۸۱ و ۰/۷٦۳۸ به دست آوردند که با توجه به خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و خطاهای مدل، این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی بود. حیدری نیا و همکاران (۲۰۱۰- B) سناریوهای کم‌آبیاری را روی گیاه آفتابگردان با مدل *AquaCrop* در اراضی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز شبیه‌سازی کردند. میزان R^2 در شبیه‌سازی محصول، بیوماس و بهره‌وری مصرف آب در این پژوهش به ترتیب ۰/۷٤۱٤، ۰/۸۱۳۳ و ۰/۹۹۵۹ به دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل بود. علیزاده و همکاران (۲۰۱۰) مدل *AquaCrop* را برای گندم تحت شرایط آبیاری کامل و مقادیر تنش آبی ۲۰، ٤٠، ٦٠ و ۸۰ درصد نیاز آبی و تیمار تک آبیاری در کرج ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که برای دور آبیاری ۷ روزه، مدل در پیش‌بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر-تعرق گیاهی و بهره‌وری مصرف آب قابلیت خوبی داشت در حالی که کارآیی مدل در پیش‌بینی این عوامل در دور آبیاری ١٤ روزه کمتر بود. بابازاده و سرائی تبریزی (۲۰۱۲) از مدل *AquaCrop* برای شبیه‌سازی پارامترهای رشدی گیاه سویا تحت شرایط آبیاری کامل (در حد ۱۰۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک)، کم‌آبیاری سنتی در حد ۷۵ و ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک و آبیاری بخشی منطقه ریشه در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک در کرج استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل *AquaCrop* در شبیه‌سازی عملکرد محصول، تبخیر-تعرق گیاهی و بهره‌وری مصرف آب عملکرد قابل قبولی دارد. با توجه به محدودیت منابع آب و ضرورت کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، اعمال تنش کم‌آبیاری در تولید محصول لازم می‌باشد. ارزیابی نتایج اعمال این شرایط بر عملکرد گیاه بدون صرف هزینه‌های گزاف مزرعه‌ای، می‌تواند کمک شایانی در تصمیم‌سازی و مدیریت آب در مزرعه داشته باشد. هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی دوره رشد گندم پائیزه کشت شده در منطقه زنجان- مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان با کمک مدل *AquaCrop*

و ارزیابی مدل، در پیش‌بینی عملکرد گیاه تحت شرایط کم‌آبیاری بود.

مواد و روش‌ها

تئوری مدل

AquaCrop مدلی است که جهت بررسی بهره‌وری مصرف آب گیاه، توسط بخش آب و خاک سازمان خواروبار جهانی (FAO) با تجدید نظر در مقاله شماره ۳۳ سازمان فائو طراحی شده و در ژانویه‌ی ۲۰۰۹ معرفی شد (ژانگ و همکاران ۲۰۱۳، ایقبال و همکاران ۲۰۱٤). پارامترهای مورد نیاز این مدل به دو دسته پارامترهای ثابت (اطلاعات خاک و گیاه که در نرم‌افزار ذخیره شده) و متغیر (اطلاعات اقلیمی و مدیریتی توسط کاربر وارد نرم‌افزار می‌شود) تقسیم می‌شوند (علیزاده و همکاران ۲۰۱۰). پارامترهای گیاهی مهم مورد بررسی در این مدل عملکرد محصول (Y[1])، بهره‌وری مصرف آب (WP[2]) و شاخص برداشت (HI[3]) می‌باشد.

$$WP = Y / ET \qquad [۱]$$

$$HI = Y / BM \qquad [۲]$$

در روابط ۱ و ۲، Y (*Yield*): عملکرد گیاه (کیلوگرم در هکتار)، BM (*Biomass*): زیست توده (کیلوگرم در هکتار)، ET: تبخیر–تعرق یا میزان آب مصرفی (مترمکعب در هکتار)، WP: بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) و HI: شاخص برداشت محصول (بی‌بعد) می‌باشد (توکلی و همکاران ۲۰۱۳). مدل *AquaCrop* همانند مدل *CROPWAT* بر اساس معادله دورنبوس و کسام (۱۹۷۹) (رابطه ۳) توسعه و بسط داده شده است.

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \qquad [۳]$$

که در آن، Y_x: عملکرد حداکثر، Y_a: عملکرد واقعی، ET_x: تبخیر–تعرق حداکثر، ET_a: تبخیر–تعرق واقعی و K_y: ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر–تعرق می‌باشد (خرسند و همکاران ۲۰۱٤).

مدل *AquaCrop* در مقایسه با مدل *CROPWAT* با در نظر گرفتن موارد زیر توسعه یافته است:

الف) تفکیک تبخیر–تعرق (ET) به تعرق از سطح محصول (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E)؛

ب) توسعه یک مدل ساده رشد و پیری تاج پوشش گیاهی به عنوان پایه برآورد Tr و تفکیک آن از تبخیر؛

ج) شبیه‌سازی عملکرد نهایی (Y) به عنوان تابعی از زیست توده نهایی (B) و شاخص برداشت (HI)؛

د) تفکیک اثرات تنش آبی در چهار بخش رشد پوشش تاجی، پیری پوشش تاجی گیاه، Tr و HI (توکلی و همکاران ۲۰۱۳، بابازاده و سرائی تبریزی ۲۰۱۲، علیزاده و همکاران ۲۰۱۰).

منطقه مورد مطالعه

به منظور ارزیابی مدل *AquaCrop* برای مدیریت عملیات آبیاری (کم‌آبیاری) از داده‌های آزمایش مزرعه‌ای انجام گرفته در سال زراعی ۱۳۸۹–۱۳۹۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان با مختصات جغرافیایی ″۱۵ ′۲٤ °٤۸ طول شرقی و ″۳۷ ′٤۰ °۳٦ عرض شمالی و ارتفاع ۱۵۹٤ متر از سطح دریا استفاده شد. آزمایش به منظور بررسی واکنش گیاه گندم به سطوح متفاوت آبیاری به صورت طرح آماری کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار انجام گرفته بود. تیمارهای آبیاری آزمایش شامل تأمین ۱۰۰ (تیمار شاهد)، ۸۰ و ٦۰ درصد نیاز آبی گیاه تیمار شاهد بود. روش آبیاری کرت‌ها، ثقلی بود و برای کنترل میزان آب

1. Yield
2. Water productivity
3. Harvest index

داده شده به کرت‌ها از کنتور حجمی نصب شده بر روی شیر برداشت، استفاده شد. نیاز آبی گیاه برای تیماره شاهد در دوره رشد با استفاده از رابطه ٤ محاسبه گردید.

$$ET_C = K_C.ET_0 \qquad [٤]$$

ET_C: تبخیر–تعرق گیاه تیمار شاهد ($mm\ day^{-1}$)، ET_0: تبخیر–تعرق گیاه مرجع چمن ($mm\ day^{-1}$) و K_C: ضریب گیاه (گندم) (آلن و همکاران ۱۹۹۸). مقادیر ET_0 با استفاده از میانگین بلند مدت داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک زنجان از رابطه ٥ برآورد شد.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T+273)} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad [٥]$$

ET_0: تبخیر–تعرق گیاه مرجع چمن ($mm\ day^{-1}$)، R_n: تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، G: شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، T: میانگین روزانه دمای هوا (°C)، u_2: میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری ($m\ s^{-1}$)، e_a: فشار بخار اشباع (Kpa)، e_d: فشار بخار واقعی (Kpa)، $e_a–e_d$: کمبود فشار بخار اشباع (Kpa)، Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع ($Kpa/°C$)، γ: ضریب ثابت سایکرومتری ($Kpa/°C$)، ۹۰۰: ضریبی برای گیاه مرجع ($Kg^{\circ}K\ KJ^{-1}\ day^{-1}$) و ۰/۳٤: ضریب باد برای گیاه مرجع ($sec\ m^{-1}$) (آلن و همکاران ۱۹۹۸).

اطلاعات مربوط به تیمارهای آبیاری و گیاه در جدول ۱ نشان داده شده است. هم چنین جدول ۲ برخی از اطلاعات آب و خاک و اقلیم منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به گیاه گندم.

تاریخ کشت	تراکم کشت (بذر در هکتار)	تاریخ برداشت	حجم کل آب داده شده ($m^3\ ha^{-1}$)			متوسط عملکرد ($kg\ ha^{-1}$)		
			٪ ۱۰۰	٪ ۸۰	٪ ٦۰	٪ ۱۰۰	٪ ۸۰	٪ ٦۰
۱۹ آبان 10 November	٤,۰۰۰,۰۰۰	۷ تیر 28 June	۸۱۳٦	٦٥۱٦	٤۸۷۹	۷٥۰۰	٦۷۲۰	٦۲٥٤

جدول ۲- اطلاعات آب، خاک و اقلیم منطقه مورد مطالعه.

هدایت الکتریکی ($ds\ m^{-1}$)			متوسط شرایط اقلیمی (سالانه)					
آب	خاک (عصاره اشباع)	بافت خاک	درجه حرارت (°C)	رطوبت نسبی (%)	ساعات آفتابی (hr)	بارندگی (mm)	سرعت باد ($m\ sec^{-1}$)	تبخیر–تعرق گیاه مرجع (mm)
۱/۱۰	۱/٤۹۲	رس سیلتی	۱۱/۱	٥۲	۱۷۹۷	۳۰٤	۱/٥۰	۱۰۸٦

واسنجی و ارزیابی نرم‌افزار

پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، کلیه داده‌های مربوط به تکرار اول، وارد نرم‌افزار شد و مقادیر عملکرد توسط آن شبیه‌سازی گردید. با انجام تغییرات لازم در پارامترهای از پیش تعریف شده در نرم‌افزار، سعی گردید شرایط منطقه آزمایشی به طور کامل توسط آن شبیه‌سازی گردد. ملاک واسنجی کامل نرم‌افزار اختلاف اندک (حدود ۱۰ درصد) بین مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده در مزرعه با مقادیر شبیه‌سازی شده قرار داده شد. پس از واسنجی، به منظور ارزیابی نرم‌افزار، داده‌های تکرار دوم و سوم کلیه تیمارها، وارد نرم‌افزار گردیده و مقادیر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب توسط آن شبیه‌سازی شد. با توجه به شرایط یکسان داده‌های هواشناسی و آبیاری

برای تکرارهای هر تیمار، تنها متغیر برای هر تکرار در مرحله ارزیابی شاخص برداشت (HI) بود.

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی عملکردهای شبیه‌سازی شده توسط مدل *AquaCrop* با مقادیر مشاهده‌ای از سه معیاره مجذور متوسط اختلاف مربعات (RMSE) (رابطه ٦)، ضریب تعیین (R^2) (رابطه ۷) و راندمان مدل (EF) (رابطه ۸) استفاده شد (توکلی و همکاران ۲۰۱۳، بابازاده و سرائی تبریزی ۲۰۱۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2} \quad [٦]$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i P_i - n\overline{O}\,\overline{P}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^{n} O_i^2 - n\overline{O}^2)(\sum_{i=1}^{n} P_i^2 - n\overline{P}^2)}} \quad [۷]$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad [۸]$$

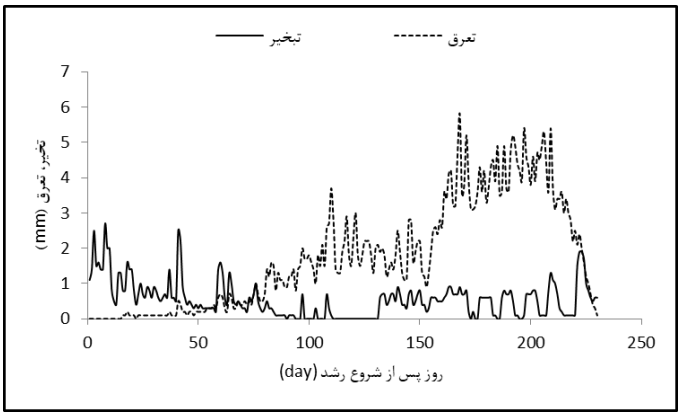
O_i: عملکرد مشاهده‌ای، P_i: عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل، $\overline{O}$: میانگین مقدار مشاهده‌ای، $\overline{P}$: میانگین مقدار شبیه‌سازی شده و n تعداد مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد.

لازم به توضیح است راندمان مدل (EF) میزان کارایی مدل را در شبیه‌سازی عملکرد نشان می‌دهد. مقدار EF بین منفی بینهایت و یک می‌باشد و هر چه مقدار راندمان مدل به یک نزدیک‌تر باشد بیان‌گر بهتر بودن مدل می‌باشد و اگر راندمان مدل منفی باشد پیش‌بینی مدل از مقادیر مشاهده‌ای ضعیف می‌باشد (بابازاده و سرایی تبریزی ۲۰۱۲).

نتایج و بحث

شکل ۱ نتایج حاصل از تفکیک مقادیر ETc به تعرق از سطح گیاه (Tr) و تبخیر از سطح خاک (E) توسط مدل *AquaCrop* برای تیمار آبیاری کامل (تیمار شاهد) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که در ۵۰ روز ابتدایی دوره رشد، به دلیل پایین بودن میزان پوشش سبز گیاهی بر روی سطح زمین، اکثر آب داده شده به زمین به صورت تبخیر از آن خارج شده است و میزان تعرق کم بوده است. به طوری که از مجموع ٥٥/٦ میلی‌متر تبخیر-تعرق صورت گرفته در این دوره از رشد، ٤/٩ میلی‌متر آن به صورت تعرق و ٥٠/٧ میلی‌متر به صورت تبخیر بود. با افزایش پوشش سبز گیاهی بر روی سطح زمین و افزایش میزان روزنه‌های گیاهی، مقدار تعرق به مرور افزایش یافت. بر اساس نتایج مدل *AquaCrop* حداکثر تعرق ثبت شده در طول دوره رشد گیاه گندم ٥/٨ میلی‌متر و در روز ١٦٨ بود. پس از آن با زرد و پیر شدن برگ‌های گیاه و کاهش مقدار روزنه‌ها، میزان تعرق نیز کاهش یافت به طوری که در ٥ روز انتهایی دوره رشد مقدار تعرق و تبخیر به یک میزان می‌باشد. این حالت به وضوح از انطباق دو خط نشان‌دهنده این دو پارامتر به یکدیگر در شکل ۱ دیده می‌شود. با توجه به شکل ۱ ملاحظه می‌شود که مقادیر تبخیر نسبت به تعرق نوسان کمتری دارد (بین صفر میلی‌متر در روز تا ۲/۷ میلی‌متر در روز). از مجموع ٥٣٦/٨ میلی‌متر آب خارج شده از زمین به صورت تبخیر-تعرق در کل دوره رشد، ١٢٦/٢ میلی‌متر به صورت تبخیر از سطح مرطوب خاک و ٤١٠/٦ میلی‌متر به صورت تعرق از سطح گیاه خارج شده است. به عبارت دیگر از کل آب خارج شده از

زمین، ۲٤ درصد به صورت تبخیر و ۷٦ درصد به صورت تعرق بود.



شکل ۱- مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیر و تعرق روزانه گیاه گندم در طول فصل رشد توسط مدل *AquaCrop*.

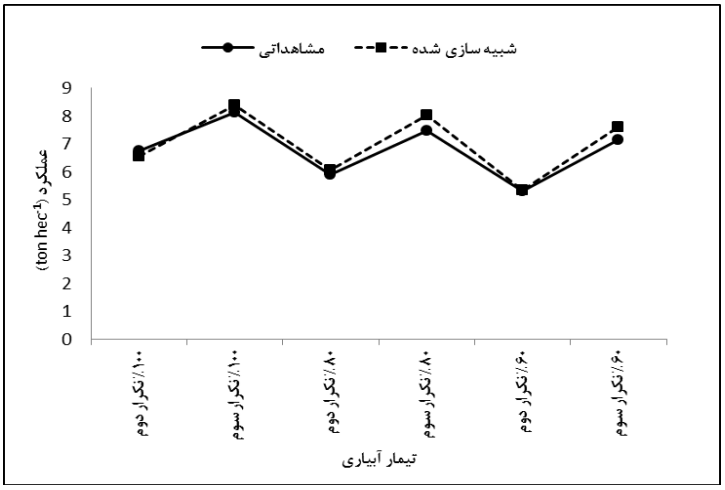
شکل ۲ و جدول ۳ مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار برای تکرارهای دوم و سوم هر تیمار آبیاری را نشان می‌دهد. هم چنین اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به واقعی در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به شکل ۲ و روند تغییرات عملکرد گیاه در آن، مشاهده می‌گردد که نرم‌افزار *AquaCrop* پس از واسنجی، توانایی پیش‌بینی تغییرات مقادیر عملکرد گیاه در کرت‌های متفاوت را با کمترین اختلاف را دارد به گونه‌ای که با توجه به جدول ۳، اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر واقعی در کلیه تیمارها کم‌تر از ۱۰ درصد شد. بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی (٦/۹ درصد) در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و در تکرار سوم حاصل شد و کم‌ترین اختلاف (۱/۰ درصد) در تیمار ٦۰ درصد تکرار دوم به دست آمد (جدول ۳ و شکل ۲). این اختلاف‌ها را می‌توان به خطای آزمایش مربوط دانست. با توجه به جدول ۳ و شکل ۲، به جز تیمار ۱۰۰ درصد تکرار دوم که در آن مقدار شبیه‌سازی شده ۰/۱۹ کیلوگرم در هکتار از مقدار واقعی کم‌تر بود، در بقیه موارد مقادیر شبیه‌سازی شده از طریق نرم‌افزار از مقادیر اندازه‌گیری شده بیش‌تر گردید. نتایج اخیر بیان‌گر قابلیت قابل قبول نرم‌افزار *AquaCrop* در مدیریت مزرعه از لحاظ سطوح متفاوت آبیاری می‌باشد. نتایج حاصل از این بخش پژوهش با نتایج علیزاده و همکاران (۲۰۱۰)، ایقبال و همکاران (۲۰۱٤)، خرسند و همکاران (۲۰۱٤)، توکلی و همکاران (۲۰۱۳) و ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) که در پژوهش خویش از مدل *AquaCrop* برای شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد گیاه گندم استفاده کرده بودند هم‌خوانی داشت.

جدول ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد گندم و اختلاف آن‌ها نسبت به یکدیگر برای تکرارهای دوم و سوم.

تیمار	مقدار عملکرد ($ton\ ha^{-1}$)		اختلاف (شبیه‌سازی شده-واقعی)	
	واقعی	شبیه‌سازی شده	$kg\ ha^{-1}$	(%)
	تکرار دوم			
۱۰۰	٦/۷۷	٦/۵۷	-۰/۱۹	-۲/۹
۸۰	۵/۹۰	٦/۰۸	۰/۱۸	۲/۹

۶۰	۵/۳۱	۵/۳۶	۰/۰۵	۱/۰
		تکرار سوم		
۱۰۰	۸/۱۳	۸/۳۹	۰/۲۷	۳/۲
۸۰	۷/۴۶	۸/۰۲	۰/۵۵	۶/۹
۶۰	۷/۱۶	۷/۶۰	۰/۴۴	۵/۸

جدول ٤ مقادیر آماره‌های ارزیابی کارایی مدل *AquaCrop* در شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم (RMSE، R^2 و EF) را نشان می‌دهد. همان طور که بیان شد نزدیکی مقدار راندمان مدل (EF) به مقدار یک بیان‌گر عملکرد خوب مدل در پیش‌بینی و شبیه‌سازی می‌باشد (بابازاده و سرایی تبریزی ۲۰۱۲). بر اساس مقادیر جدول ٤، اختلاف مقدار راندمان مدل *AquaCrop* به دست آمده در این پژوهش با عدد یک، ۰/۱۲ می‌باشد که اثبات کننده عملکرد خوب مدل در مرحله واسنجی و شبیه‌سازی مقادیر عملکرد می‌باشد. علاوه بر آماره EF، نزدیکی مقدار R^2 به عدد یک و RMSE به عدد صفر در جدول ٤ نیز تأیید کننده مسئله فوق می‌باشد.



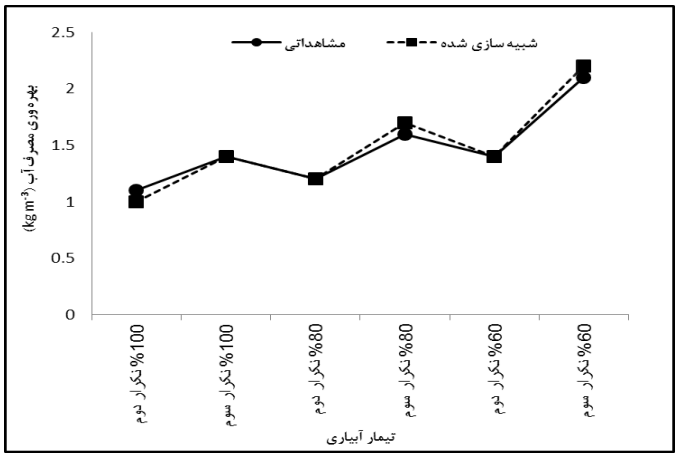
شکل ۲- مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده گیاه گندم برای تکرارهای دوم و سوم.

جدول ۴- مقدار معیاره‌های ارزیابی کارایی مدل *AquaCrop* در شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم.

معیاره	R^2	RMSE ($kg\ ha^{-1}$)	EF
مقدار	۰/۹۶	۰/۳۳	۰/۸۸

شکل ۳ و جدول ۵ مقادیر بهره‌وری مصرف آب محاسبه شده برای گیاه گندم از طریق مقادیر مزرعه‌ای و هم چنین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار *AquaCrop* برای تکرارهای دوم و سوم را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر جدول ۵، ملاحظه می‌گردد که همانند مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد گندم (جدول ۳) برای مقادیر بهره‌وری مصرف آب نیز در تمام تیمارها اختلاف مقدار شبیه‌سازی شده نسبت به مقدار واقعی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. همانند مقادیر عملکرد، در مقادیر بهره‌وری مصرف آب نیز بیش‌ترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر

واقعی (۷/۰ درصد) در تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و در تکرار سوم حاصل شد. کم‌ترین اختلاف برای این مقادیر (۰/۵ درصد) در تیمار ۸۰ درصد تکرار دوم به دست آمد در حالی که این مقدار در جدول ۳ (مقادیر عملکرد) در تیمار ٦۰ درصد تکرار دوم بود. با توجه به جدول ۵، برای بهره‌وری مصرف آب نیز مقادیر شبیه‌سازی شده در تیمار ۱۰۰ درصد تکرار دوم به میزان ۰/۰۵ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب مصرف آب، از مقدار واقعی کم‌تر شد (همانند مقادیر عملکرد این تیمار)، اما برای بقیه موارد، مقادیر شبیه‌سازی شده از طریق نرم‌افزار از مقادیر واقعی بیش‌تر بود. هم چنین بر اساس شکل ۳، مقادیر پیش‌بینی شده بهره‌وری مصرف آب توسط مدل *AquaCrop* دارای روندی مشابه با مقادیر واقعی داشت.



شکل ۳- مقادیر بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده.

جدول ۵- مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده بهره‌وری مصرف آب گندم برای تکرارهای دوم و سوم.

تیمار	مقدار بهره‌وری مصرف آب ($kg\ m^{-3}$)		اختلاف (شبیه‌سازی شده-واقعی)	
	واقعی	شبیه‌سازی شده	$kg\ ha^{-1}$	(%)
		تکرار دوم		
۱۰۰	۱/۱	۱/۰	-۰/۰۵	-۵/۲
۸۰	۱/۲	۱/۲	۰/۰۱	۰/۵
٦۰	۱/٤	۱/٤	۰/۰۲	۱/٦
		تکرار سوم		
۱۰۰	۱/٤	۱/٤	۰/۰٤	۲/۹
۸۰	۱/٦	۱/۷	۰/۱۲	۷/۰
٦۰	۲/۱	۲/۲	۰/۰۸	۳/٦

مقادیر معیاره‌های ارزیابی کارایی مدل *AquaCrop* در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب گندم (RMSE، R^2 و EF) در جدول ٦ آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول ٦ مشاهده می‌شود که ریشه میانگین خطا بین مقادیر بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ۰/۰۸ کیلوگرم در هر هکتار حاصل شد. هم چنین نزدیکی مقادیر R^2 و EF به عدد یک بیان‌گر کارایی بسیار خوب مدل در شبیه‌سازی مقادیر بهره‌وری مصرف آب گیاه گندم بود.

جدول ۶- مقدار معیاره‌های ارزیابی مدل *AquaCrop* در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب.

معیاره	R^2	RMSE ($kg\ ha^{-1}$)	EF
مقدار	۰/۹۹	۰/۰۸	۰/۹٤

نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های صورت گرفته توسط علیزاده و همکاران (۲۰۱۰)، بابازاده و سرایی تبریزی (۲۰۱۲)، حیدری‌نیا و همکاران (۲۰۱۲- A و B)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۳)، توکلی و همکاران (۲۰۱۳)، خرسند و همکاران (۲۰۱٤)، ایقبال و همکاران (۲۰۱٤) و ... هم‌خوانی داشت. کلیه پژوهش‌گران فوق بر اساس نتایج حاصل از پژوهش انجام گرفته بیان داشته‌اند که، مدل *AquaCrop* در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه مورد بررسی از کارایی بالایی برخوردار می‌باشد و از آن می‌توان در مدیریت آب، گیاه کشت شده در مزرعه و سایر عوامل و پارامترهای مرتبط با آن‌ها استفاده به عمل آورد.

نتیجه‌گیری کلی

مدل گیاهی *AquaCrop* به عنوان ابزاری توانمند برای شبیه‌سازی آزمایش‌های مزرعه‌ای، توسط سازمان فائو در سال ۲۰۰۹ بر پایه روش دورنبوس و کسام (۱۹۷۹) جهت ممانعت از انجام آزمایش‌های وقت‌گیر، سخت و پرهزینه مزرعه‌ای توسعه و ارائه شد. در این پژوهش از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گندم تحت تأثیر سطوح متفاوت آبیاری (کم‌آبیاری) استفاده شد. نتایج دلالت بر عملکرد و کارایی خوب این مدل در پیش‌بینی مقادیر این دو پارامتر مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه (زنجان) داشت به طوری که اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاه گندم کم‌تر از ۱۰ درصد به دست آمد. بنابراین این نرم‌افزار به خوبی می‌تواند جهت بررسی سناریوهای متفاوت آب-خاک-گیاه بدون هزینه‌کرد مورد استفاده قرار گیرد و بر اساس نتایج حاصل، تصمیم‌سازی مناسب مدیریتی انجام گیرد.

منابع مورد استفاده

Ahmadali J and Khalili M, 2007. Assessment of deficit irrigation on maize yield in Miandoab. Iranian Water Researches Journal 1(1): 17-23. (In Persian with English abstract)

Alizadeh H, Nazari B, Parsinezhad M, Ramezanietedali H and Janbaz H, 2010. Assessment of AquaCrop model in management of deficit irrigation of wheat in Karaj, Tehran. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 2(4): 273-283. (In Persian with English abstract)

Allen RG, Periera LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper. No. 56. Rome, Italy.

Babazadeh H and Saraee Tabrizi M, 2012. Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management condition. Journal of Water and Soil 2(26): 329-339. (In Persian with English abstract)

Farahani HJ, Izzi G and Oweis TY, 2008. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigation cotton. Agronomy Journal 101: 469-476.

García-Vila M, Fereres E, Mateos L, Orgaz F and Steduto P, 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agronomy Journal 101: 477-487.

Heidarinia M, Naseri A, Borumandnasab S and Nasrollahi AH, 2010(A). Calibration of AquaCrop model in planning of cotton irrigation in Gorgan. Ahvaz. 3rd National Conference of Irrigation and Drainage Network Management, 2010. Shahid Chamran Ahvaz University. (In Persian with English abstract)

Heidarinia M, Naseri A, Borumandnasab S and Nasrollahi AH, 2010(B). Studying AquaCrop model usage in sunflower irrigation planning in Ahvaz. 3rd National Conference of Irrigation and Drainage Network Management, Shahid Chamran Ahvaz University. (In Persian with English abstract)

Heng LKH, Hsiao T, Evett S, Howell T and Steduto P, 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal 101: 488-498.

Hsiao TC, Heng LK, Steduto P, Raes D and Fereres E, 2009. AquaCrop Model parameterization and testing for maize. Agronomy Journal 101: 448–459.

Iqbal MA, Shen Y, Stricevic R, Pei H, Sun H, Amiri E, Penas A and Del Rio S, 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from filed experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management 135: 61-72.

Karimi M, 2009. Studying the management of water and fertilizer usage with CropSyst model and AquaCrop model in Varamin. Master thesis of Irrigation and Drainage, Tarbiat Modarres University. (In Persian with English abstract)

Khandehrouyan M, Nikbakht J and Taheri M, 2011.The effect of continuous deficit irrigation with magnetic water on water use efficiency and maize yield. Master thesis of Irrigation and Drainage, Zanjan University. (In Persian with English abstract)

Khorsand A, Rezaverdinezhad V and Shahidi A, 2014. Assessment of AquaCrop model in forecasting wheat yield, humidity and salinity of soil profil under salinity and dehydration condition. Journal of Water and Irrigation Management 4(1): 89-104. (In Persian with English abstract)

Mostafazadeh-fard B, Mansouri H, Mousavi S.F and Feyzi M, 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 135(1): 32-38. (In Persian with English abstract)

Steduto P, Hsiao TC, Raes D and Fereres E, 2009. AquaCrop-The FAO Crop Model to simulate yield response to water. Agronomy Journal 101: 426-437.

Tavakkoli AR, Liaghat A and Alizadeh A, 2013. Studying the balance of water soil, planting date and wheat yield with AquaCrop model under rainfed and deficit irrigation condition. Journal of Agricultural Engineering Research 14(4): 41-56. (In Persian with English abstract)

Zhang W, Liu W, Xue Q, Chen J and Han X, 2013. Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. Water Science and Technology 68(4): 821-828.