نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۵ شماره ۴/۲ صفحه‌های ۲۱۷ تا ۲۲۹ / سال ۱۳۹۴

ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس گندم، تحت تنش کم‌آبی

ابراهیم امیری[1*]، عبدالله بحرانی[2]، افشین خورسند[3]، مهتا حق‌جو[4]

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۴/۲۲

۱- دانشیار گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان
۲- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامهرمز، رامهرمز
۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه
۴- مربی گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامهرمز، رامهرمز
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: eamiri57@yahoo.com

چکیده

مطالعه حاضر برای ارزیابی توانایی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس کل گندم زمستانه تحت تنش آبی، در ایستگاه تحقیقات کشاورزی فارس (زرقان)، به‌مدت دو سال در سال‌های زراعی ۸۶-۱۳۸۵ و ۸۷-۱۳۸۶ اجرا گردید. طرح آزمایشی، بلوک‌های کامل تصادفی در قالب طرح کرت‌های خردشده با چهار تکرار بود. کرت‌های اصلی شامل تیمارهای آبیاری I_1 (آبیاری کامل و بدون تنش) و I_2 (تنش آخر فصل با رطوبت ۶۵ درصد ظرفیت زراعی) و کرت‌های فرعی شامل ارقام چمران، مرودشت و شیراز بودند. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد دانه و بیوماس کل با استفاده از ضریب تبیین، پارامترهای خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده انجام گرفت. بر اساس نتایج، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای مقادیر پیش‌بینی عملکرد دانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای ارقام چمران، مرودشت و شیراز به‌ترتیب در محدوده ۰/۵ تا ۲ و ۲ تا ۹ درصد و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده پیش‌بینی بیوماس در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای ارقام چمران، مرو-دشت و شیراز به‌ترتیب در محدوده ۲ تا ۵ و ۳ تا ۶ درصد محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در پیش-بینی عملکرد دانه و بیوماس محصول، دارای دقت قابل‌قبول هست.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، شبیه‌سازی، گندم زمستانه، مدل، واسنجی

Evaluating AquaCrop Model Performance to Predict Grain Yield and Wheat Biomass, Under Water Stress

E Amiri[1*], A Bahrani[2], A Khorsand[3], M Haghjoo[4]

Received: 7 August 2013 Accepted: 13 July 2015
1- Assoc. Prof., Department of Agriculture, Lahijan branch, Islamic Azad University, Iran
2- Assist. Prof., Department of Agriculture, Ramhormoz branch, Islamic Azad University, Iran
3- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran
4- Lecturer, Department of Agriculture, Ramhormoz branch, Islamic Azad University, Iran
* Corresponding Author, Email: eamiri57@yahoo.com

Abstract

This study was conducted for evaluating AquaCrop model performance in prediction of grain yield and biomass production of winter wheat, under water stress at Fars Agricultural Research Station (Zarghan), during two years (2006-2008). The experiment was a randomized block, based on a split plot design with four replications. Main plots consisted of two irrigation treatments, namely I_1 (nonstressed), and I_2 (Post anthesis water stressed plots with 65% FC). Each subplot consisted of three varieties; Shiraz, Marvdasht, and Chamran. Evaluation of the simulated yield and biomass production values were performed based on the measured data adjusted coefficient of correlation, relative error, and normalized root mean square error (NRMSE). Based on the results, the NRMSE values for the predicted grain yield of studied varieties in the calibration and validation stages were between of 0.5-2, and 2-9 percent, respectively. Also, the NRMSE values of calibration and validation in biomass production for the varieties, were between 2-5, and 3-6 percent, respectively. Results indicated that the AquaCrop model could predict the grain yield and biomass production with an acceptable accuracy.

Keywords: Calibration, Model, Simulation, Validation, Winter wheat

مقدمه

آب منبعی محدود و درعین‌حال ضروری برای جوامع بشری و سیستم‌های اکولوژیکی وابسته به آن بوده و با رشد جمعیت و توسعه اقتصادی در بسیاری از کشورها و مناطق جهان، این منبع با ارزش به شکلی فزاینده رو به کاهش است. بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب جهت تولید غذای بیشتر با آب کمتر با چالش مواجه شده، و در چنین شرایطی نیاز به افزایش بهره‌وری آب محصول است که به‌صورت کسر عملکرد بر آب مصرفی تعریف می‌شود. به‌عنوان یک قاعده، هر عامل مدیریتی که منجر به افزایش عملکرد گیاهی شود، بهره‌وری آب را نیز افزایش می‌دهد (کژینه و همکاران ۲۰۰۳). یکی از مشکلات پیش رو در بخش کشاورزی استفاده پایدار از منابع موجود مانند زمین، آب و نیروی کارگری برای افزایش تولید و توسعه کشاورزی هست که نیازمند برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری مناسب است. در طول دو دهه گذشته مدل‌های متعددی به‌منظور استفاده بهینه از منابع موجود در مقیاس‌های مختلف توسعه‌یافته که برخی از اطلاعات موردنیاز آن‌ها از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه استخراج گردیده است. مدل‌های گیاهی برای اهداف

مختلفی استفاده می‌شوند و به‌طورکلی این مدل‌ها نتایج آزمایش‌ها و تحقیقات کشاورزی را مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌دهند (استدیوتو و همکاران ۲۰۰۹). مدل‌های گیاهی جهت بهینه‌سازی عملیات مدیریتی در محیط‌های متغیر استفاده می‌شود که کاربرد آن در برون‌یابی نتایج حاصل، مفید هست. مدل‌ها اجازه مرور دوباره اطلاعات گذشته، شبیه‌سازی حال و پیش‌بینی آینده را می‌دهند و قابلیت تغییر در تمام موقعیت‌ها را دارند و نیز با اعمال مدیریت مناسب می‌توانند احتمال خطر در آینده را به کمینه برسانند. هدف اصلی مدل‌های گیاهی، کاربرد آن به‌عنوان ابزاری تحلیلی برای مطالعه اثر مدیریت سیستم-های کشت روی عملکرد محصول است. برای این منظور، اغلب مدل‌های گیاهی به شبیه‌سازی بیلان آب خاک، بیلان نیتروژن گیاه – خاک، فنولوژی گیاه، رشد ریشه، تولید بیوماس، عملکرد محصول، تولید و تجزیه باقیمانده، فرسایش خاک و سرنوشت آفت‌کش‌ها می‌پردازند. استفاده از مدل‌های گیاهی به محققان اجازه می‌دهد تا بر پایه دانش موجود برای محدوده‌ای از سیستم‌های تولید و محیط‌های خاص، به ساخت و کاربرد ساختارهای طرحی جامع بپردازند. مدل‌های گیاهی امکان پیش‌بینی عملکرد محصول و پتانسیل کارآیی مکان‌هایی که گیاه هنوز در آنجا رشد نکرده است را می‌دهند. اگرچه مدل‌ها نمی‌توانند جایگزین آزمایش‌های مزرعه‌ای شوند ولی مزیت عمده‌ای که دارند صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان هست (مونتیث ۱۹۹۶).

مدل AquaCrop یک ابزار قدرتمند و با ارزش برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب هست. سادگی، نیاز به کمینه داده ورودی و دقت قابل‌قبول مدل از مزایای استفاده از آن هست. با توجه به کاهش منابع آب، تغییرات اقلیمی و کاهش سهم بخش کشاورزی از آب موجود به‌علت رشد صنعت و جمعیت شهری، بهبود راندمان مصرف آب (WUE) مبتنی بر تولید بیشتر به‌ازای هر واحد آب مصرفی بسیار با اهمیت است. برای نیل به این هدف، آگاهی دقیق از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول ضروری است (علیزاده و همکاران ۱۳۸۹). مدل AquaCrop به نسبت مدل‌های شبیه‌ساز دیگر، پارامترها و داده‌های ورودی کمتری برای شبیه‌سازی واکنش گیاه به آب احتیاج دارد و برای اغلب محصولات گیاهی و زراعی اصلی در سراسر جهان قابل‌استفاده است (استدیوتو و همکاران ۲۰۰۹). مدل AquaCrop بر پاسخ عملکرد گیاه نسبت به آب تمرکز می‌کند، این مدل به مدیران پروژه، مشاوران، مهندسان آبیاری و کشاورزان در افزایش بهره‌وری آب کمک می-کند (هسیائو و همکاران ۲۰۰۹).

تودورویس و همکاران (۲۰۰۹) دو مدل CropSyst و WOFOST را با مدل AquaCrop در جنوب ایتالیا در کشت آفتابگردان تحت سه رژیم مختلف آبیاری در دو سال زراعی ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷، مورد مقایسه قرار دادند. آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی بر روی هیبرید آفتابگردان با سه تکرار، شامل تیمارهای: آبیاری برای سال ۲۰۰۵؛ آبیاری کامل (FI[1])، تأمین آبیاری ۷۰٪ آبیاری کامل (DI[2]) و شرایط دیم (RF[3]) و برای سال ۲۰۰۷؛ آبیاری کامل، تأمین آبیاری ۷۰٪ آبیاری کامل در تمام طول فصل، آبیاری ۵۰٪ آبیاری کامل تا گلدهی (RDI[4]) و پس‌ازآن آبیاری ۷۰٪ آبیاری کامل و شرایط دیم انجام گرفت. واسنجی بر اساس داده‌های سال ۲۰۰۷ انجام گردید. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop بر مبنای مقادیر کمینه ریشه میانگین مربعات خطا (۱/۸۱ برای بیوماس و ۰/۷ برای عملکرد) و بیشینه مقدار شاخص تطابق (سازگاری) که یک پارامتر توصیفی است و مقدار آن از ∞- تا ۱ متغیر است که هر چقدر به ۱ نزدیک باشد مناسب بودن مدل در شبیه-سازی را نشان می‌دهد (۰/۹۴ برای بیوماس و ۰/۹۶ برای عملکرد دانه)، علاوه بر اینکه نسبت به دو مدل دیگر نیاز به داده‌های ورودی کمی دارد مقدار بیوماس و عملکرد را تقریباً با همان دقت شبیه‌سازی می‌کند. در تحقیقی دیگر به‌منظور بررسی عملکرد مدل AquaCrop بر روی محصول گندم زمستانه در شرایط دیم، مطالعه‌ای در فلات جنوبی چین انجام و داده‌های آزمایش مزرعه‌ای چندساله برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شبیه-

1- Full Irrigation (FI)
2- Deficit Irrigation (DI)
3- Rain-Fed conditions (RF)
4- Regulated Deficit Irrigation (RDI)

سازی بیوماس، رطوبت خاک و عملکرد دانه مورداستفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج، محدوده خطا (ریشه میانگین مربعات) از۰/۱۶ تا ۰/۳۸ تن در هکتار برای شبیه‌سازی بیوماس، ۰/۵ تا ۱/۴۴ تن در هکتار برای عملکرد دانه و ۵/۷-۲۲/۵۶ میلی‌متر برای رطوبت حجمی خاک به‌دست آمد. به‌طورکلی، کارکرد مدل برای شبیه‌سازی عملکرد از بیوماس و رطوبت حجمی خاک دقیق‌تر و مدل قادر به شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه در شرایط دیم بود (ژانگ و همکاران ۲۰۱۳). به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop برای گندم زمستانه، مطالعه‌ای در دشت شمالی چین انجام و آزمایش‌ها مزرعه‌ای در ایستگاه لانچنگ در سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۹۸ تحت کم‌آبیاری انجام شد و مدل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. در اعتبارسنجی مدل، ریشه میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه و بیوماس به‌ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۸۷ تن در هکتار بود. نتایج کلی بر اساس اعتبارسنجی نشان داد که مدل AquaCrop مدلی معتبر است و می‌تواند با درجه قابل‌اطمینان از دقت و صحت مدل برای بهینه‌سازی تولید عملکرد دانه گندم زمستانه در دشت شمالی چین استفاده گردد (ایک‌بال و همکاران ۲۰۱۴).

مدل رشد گیاهی AquaCrop، در حال حاضر یکی از جدیدترین مدل‌های رشد گیاهی است و یک مدل شبیه‌سازی رشد بر اساس مقدار آب مصرفی در گیاه هست. قابل‌ذکر است که در این تحقیق از نسخه ۴ این مدل استفاده شد که در سال ۲۰۱۲ ارائه گردیده است (رائس و همکاران ۲۰۱۲). به‌طورکلی هدفی که در این تحقیق مورد نظر هست عبارت است از: ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی میزان عملکرد محصول و بیوماس گندم زمستانه در شرایط آب و هوایی شیراز.

مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش‌ها در ایستگاه تحقیقات کشاورزی فارس، زرقان، با عرض و طول جغرافیایی ۲۹/۳۳ درجه شمالی و ۵۲/۳۶ درجه شرقی، به‌مدت دو سال در سال‌های زراعی ۱۳۸۶-۱۳۸۵ و ۱۳۸۷-۱۳۸۶ اجرا گردید. طرح آزمایشی، بلوک‌های کامل تصادفی در قالب طرح کرت-های خردشده با چهار تکرار بود. کرت‌های اصلی شامل تیمارهای آبیاری که I_1 آبیاری کامل و بدون تنش و I_2 تنش آخر فصل با رطوبت ۶۵ درصد ظرفیت زراعی و کرت‌های فرعی، ارقام چمران، مرودشت و شیراز بودند.

برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، ۱۵ نمونه از عمق ۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری‌شده و در آزمایشگاه آب‌وخاک فارس، موردبررسی قرار گرفت. بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین گردید. برای اندازه‌گیری هدایت هیدورولیکی اشباع از روش بار افتان و رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی و حد پژمردگی از صفحات فشاری استفاده شد. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک با استفاده از عصاره اشباع خاک صورت گرفت. هدایت الکتریکی با استفاده از EC متر و اسیدیته با PH متر اندازه‌گیری شد (جدول ۱). کود فسفر و پتاسیم با توجه به توصیه‌های آزمایشگاه خاک ایستگاه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در فرم‌هایی از کود سوپر فسفات و سولفات پتاسیم به‌ترتیب ۱۵۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌کار گرفته شد. بذرها در کرت‌ها (۲۰ آبان سال ۱۳۸۶ و ۲۴ آبان ۱۳۸۷) با یک مخروط بذرپاش کاشته شدند. در این تحقیق از ۶ کرت با طول ۸، عرض ۱/۵ و فواصل ۰/۲ متر استفاده شد و کرت‌ها قبل از بذرپاشی مسطح شدند. آبیاری کرت‌های اصلی به‌صورت حجمی اندازه‌گیری شد. برای اعمال تنش آخر فصل و عدم تنش از بلوک گچی که واسنجی شده بود، استفاده شد که برای اعمال آبیاری‌ها مقدار عدد بلوک گچی برای شرایط بدون تنش و تنش به‌ترتیب ۰/۰۲۵ و ۰/۱ مگا پاسکال از زمان گلدهی تا رسیدگی در نظر گرفته شد.

چهار ردیف مرکزی از هر کرت، برای محاسبه عملکرد دانه و بیوماس کل در هکتار برداشت شدند که مطابق با روش پیشنهادی وان سانفورد و ماکاون، (۱۹۸۷) برای خشک‌کردن نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت قرار داده شد.

برای اطلاعات اقلیمی موردنیاز از داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک شیراز استفاده و تبخیر- تعرق مرجع نیز از روش فائو پنمن مانتیث و با استفاده از برنامه

ET_OCalculator محاسبه گردید (آلن و همکاران ۱۹۹۸). برنامه طرح برای تیمارهای آبیاری I_1 و I_2، مطابق جدول ۲ بوده و عوامل گیاهی ویژه طرح در جدول ۳ ارائه‌شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی.

پارامترها	واحد	سال ۱۳۸۵ -۱۳۸۶	سال ۱۳۸۶ -۱۳۸۷
عمق خاک	(cm)	۰-۳۰	۰-۳۰
بافت خاک	(-)	Si-C*	Si-C*
شوری عصاره اشباع اولیه خاک	($dS\ m^{-1}$)	۱/۸۸	۱/۲۵
رطوبت اشباع (SAT)	(cm^3cm^{-3})	۰/۴۵	۰/۴۵
رطوبت ظرفیت زراعی (FC)	(cm^3cm^{-3})	۰/۲۵	۰/۲۵
رطوبت در حد پژمردگی (PWP)	(cm^3cm^{-3})	۰/۱۴	۰/۱۴
هدایت هیدرولیکی (Ksat)	($mm\ day^{-1}$)	۱۰۰	۱۰۰
PH	(-)	۷/۹۶	۷/۸۵
مواد آلی (Organic matter)	(%)	۰/۲۵	۰/۳۹
N	(%)	۰/۰۲۳	۰/۰۳۶
P	($mg\ kg^{-1}$)	۵/۴	۱۶
K	($mg\ kg^{-1}$)	۳۴۰	۲۰۶
Fe	($mg\ kg^{-1}$)	۳/۷	۵/۴
Zn	($mg\ kg^{-1}$)	۰/۶۴	۰/۱
Mn	($mg\ kg^{-1}$)	۵/۸	۹/۹
Cu	($mg\ kg^{-1}$)	۰/۴۸	۰/۹۸

* Silty Clay

جدول ۲- تاریخ و حجم آب مصرفی در تیمارهای آبیاری بر حسب میلی‌متر برای ارقام گندم چمران، مرودشت و شیراز.

ارقام	تاریخ آبیاری	آبیاری کامل (I_1)	تنش آخر فصل (I_2)
چمران، مرودشت و شیراز	۱۳۸۵ -۱۳۸۶	۷۱۰	۶۱۲
	۱۳۸۶ -۱۳۸۷	۶۵۵	۵۱۸

جدول ۳- عوامل گیاهی مربوط به مراحل فنولوژیکی ارقام گندم.

پارامترها	واحد	مقدار پارامترهای ارقام چمران	مرودشت	شیراز
تراکم کشت	بوته در مترمربع	۲۸۸/۷۵	۲۸۰	۲۸۰
زمان ظهور جوانه‌ها	روز بعد از کاشت	۹	۹	۱۳
زمان شروع گلدهی	روز بعد از کاشت	۱۷۰	۱۶۷	۱۷۰
زمان پیری	روز بعد از کاشت	۱۸۰	۱۸۰	۱۷۲
زمان بلوغ کامل	روز بعد از کاشت	۲۱۴	۲۱۷	۲۱۲

تشریح مدل AquaCrop

هسته اصلی تخمین عملکرد محصول در AquaCrop، رابطه دورنباس و کاسام (رابطه ۱) بوده که با اعمال اصلاحاتی در آن از جمله تفکیک تبخیر و تعرق واقعی به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_r) و نیز

عملکرد (Y) به بیوماس (B) و شاخص برداشت (HI) استنتاج شده است (بی‌نام ۲۰۱۲):

$$\left(1-\frac{Y_a}{Y_{max}}\right)=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_{max}}\right) \quad [۱]$$

که در آن: Y_{max} بیشینه عملکرد، Y_a عملکرد واقعی، ET_{max} بیشینه تبخیر- تعرق، ET_a تبخیر- تعرق واقعی و K_y فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر- تعرق است. بهره‌وری آب محصول (WP) بیان‌گر مقدار تولید ماده خشک بالای سطح زمین (گرم) در هر واحد سطح زمین (مترمربع) به‌ازای هر واحد آب تعرق یافته (میلی‌متر) است. آزمایش‌های بسیاری نشان داده‌اند که رابطه بین بیوماس و آب مصرف‌شده، خطی است که به‌صورت رابطه زیر هست (رائس و همکاران ۲۰۱۲):

$$B=WP\sum_{i=1}^{n}Tr \quad [۲]$$

برای اصلاح اثر شرایط آب و هوایی، مدل برای شبیه‌سازی از بهره‌وری آب نرمال‌شده (WP*) استفاده می‌کند. هدف از نرمال‌سازی این است که بتوان WPرا برای موقعیت‌ها و فصل‌های مختلف، هم‌چنین برای سناریوهای اقلیمی در آینده به‌کار برد. بیوماس برای هر روز از چرخه محصول با ضرب WP* به نسبت تعرق محصول بر تبخیر - تعرق مرجع در آن روز ($\frac{ET_o}{Tr}$) محاسبه می‌شود. تولید بیوماس ممکن است به‌دلیل سرد شدن بیش‌ازحد دمای هوا صرف‌نظر از میزان تعرق و ET_O در آن روز مختل شود. به‌همین منظور شبیه‌سازی در مدل، با در نظر گرفتن ضریب تنش دمایی (Ks_b) و به‌صورت معادله زیر انجام می‌گیرد (رائس و همکاران ۲۰۱۲):

$$B=Ks_b WP^*\sum_{i=1}^{n}\frac{Tr_i}{ETo_i} \quad [۳]$$

برای محاسبه عملکرد از بیوماس، مدل از رابطه زیر استفاده می‌کند (رائس و همکاران ۲۰۱۲):

$$Y=f_{HI}\times HI_O\times B \quad [۴]$$

که در آن: HI_o شاخص برداشت مرجع (طی مرحله بلوغ فیزیولوژیک)، Y عملکرد دانه و f_{HI} ضریبی است که شاخص برداشت مرجع را تنظیم می‌کند و به کمبود آب، درجه حرارت هوا، زمان و میزان تنش در طول چرخه رشد محصول بستگی دارد.

سیستم اطلاعات گیاه از چهار بخش فنولوژی گیاه، تعرق گیاه، بیوماس و عملکرد قابل‌برداشت و تنش-ها تشکیل‌شده است. تنش‌های مدل شامل تنش آبی، تنش حاصل‌خیزی، تنش دمایی و تنش شوری می‌باشند. قسمت مدیریت مدل از دو بخش مدیریت آبیاری و مدیریت زراعی تشکیل‌شده است. اطلاعات خاک، خصوصیات هیدرولیکی خاک بوده که برای هر لایه از نیم‌رخ خاک وارد مدل می‌شود (رائس و همکاران ۲۰۱۲).

هدف از واسنجی، تنظیم ورودی‌های گیاهی مدل است که باید مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل با مقادیر مشاهده‌ای، در دو تیمار I_1 و I_2 کمترین اختلاف را با هم داشته باشند که با اجرای مدل و مقایسه مقادیر حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای میسر می‌گردد. جهت واسنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۸۶-۱۳۸۵ و جهت اعتبارسنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۸۷-۱۳۸۶ استفاده گردید. سپس مدل اجرا و مقادیر عملکرد و بیوماس حاصل از شبیه‌سازی، با مقادیر اندازه‌گیری شده بر اساس شاخص‌های آماری موردبررسی قرار گرفت.

ارزیابی مدل AquaCrop

برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در تخمین عملکرد دانه و بیوماس محصول از شاخص‌های متوسط خطای نسبی (MRE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، معیار کارایی نش - ساتکلیف (NSE)، ضریب باقیمانده (CRM)، خطای نسبی (RE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید (سینگ و همکاران ۲۰۰۸):

$$MRE=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{|S_i-O_i|}{O_i}\right)\times 100}{n} \quad [۵]$$

$$NRMSE = \frac{1}{\overline{O}} \times \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2} \times 100 \qquad [۶]$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \qquad [۷]$$

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \qquad [۸]$$

$$RE = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{O_i - S_i}{O_i}\right) \times 100 \qquad [۹]$$

که در آن: S_i مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده هست. مقدار NRMSE ایده‌آل برای مدل‌سازی کمتر از ۱۰٪ هست. NRMSE در بازه ۱۰ تا ۲۰٪ و ۲۰ تا ۳۰٪ به‌ترتیب نشان‌گر وضعیت مناسب و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰٪ نشان‌دهنده عدم اطمینان از مدل هست. مقدار NSE بین $-\infty$ تا ۱ متغیر است که هر چه مقدار آن به یک نزدیک باشد، مدل کارآتر است. آماره CRM نشانگر تمایل مدل برای بیش برآورد (مقادیر منفی) و یا کم‌برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها هست. ضریب تبیین (R^2) معیار پراکنش بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده است (سینگ و همکاران ۲۰۰۸).

نتایج و بحث

نتایج مقادیر واسنجی پارامترهای گیاهی گندم زمستانه برای ارقام چمران، مرودشت و شیراز در جدول ۴ ارائه‌شده است.

عملکرد دانه

مقایسه مقادیر عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده توسط مدل AquaCrop در شکل ۱، برای ارقام گندم طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده است. هم‌چنین مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول، در جدول ۵ آورده شده است. مدل AquaCrop در مرحله واسنجی، عملکرد محصول را برای هر سه رقم چمران، مرودشت و شیراز با دقت مناسب، شبیه‌سازی کرده است.

مقدار NRMSE در هر سه رقم کمتر از ۵ درصد (در محدوده ۰/۵ تا ۲/۰ درصد) به‌دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی عملکرد محصول، ایده‌آل هست. شاخص نش – ساتکلیف برای ارقام چمران، مرودشت و شیراز نزدیک به یک بوده و نشان‌دهنده دقت مناسب مدل، در پیش‌بینی عملکرد محصول هست. مقدار آماره CRM در هر سه رقم چمران، مرودشت و شیراز منفی به‌دست آمد که نشان داد در دو تیمار آزمایش، مدل AquaCrop کمی تمایل به بیش‌برآورد دارد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که این مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی می‌کند. به‌طورکلی و برای دو تیمار آزمایش، متوسط خطای نسبی مدل در پیش‌بینی عملکرد، برای ارقام گندم در محدوده ۰/۵ تا ۲/۰ درصد محاسبه گردید (جدول ۵). مقدار NRMSE در مرحله اعتبارسنجی، برای عملکرد دانه در هر سه رقم گندم زمستانه کمتر از ۱۰ درصد (در محدوده ۲ تا ۹ درصد) به‌دست آمد که نشان‌دهنده قابلیت مناسب مدل بوده و دقت مدل‌سازی در شرایط عالی هست. هم‌چنین برای دو تیمار آزمایش، متوسط خطای نسبی تخمین عملکرد دانه، برای هر سه رقم کمتر از ۱۰ درصد (در محدوده ۲ تا ۱۰ درصد) محاسبه گردید که بیشترین خطا در بین سه رقم مربوط به رقم چمران هست (جدول ۶).

جدول ۴- واسنجی پارامترهای گیاهی مدل برای ارقام چمران، مرودشت و شیراز محصول گندم.

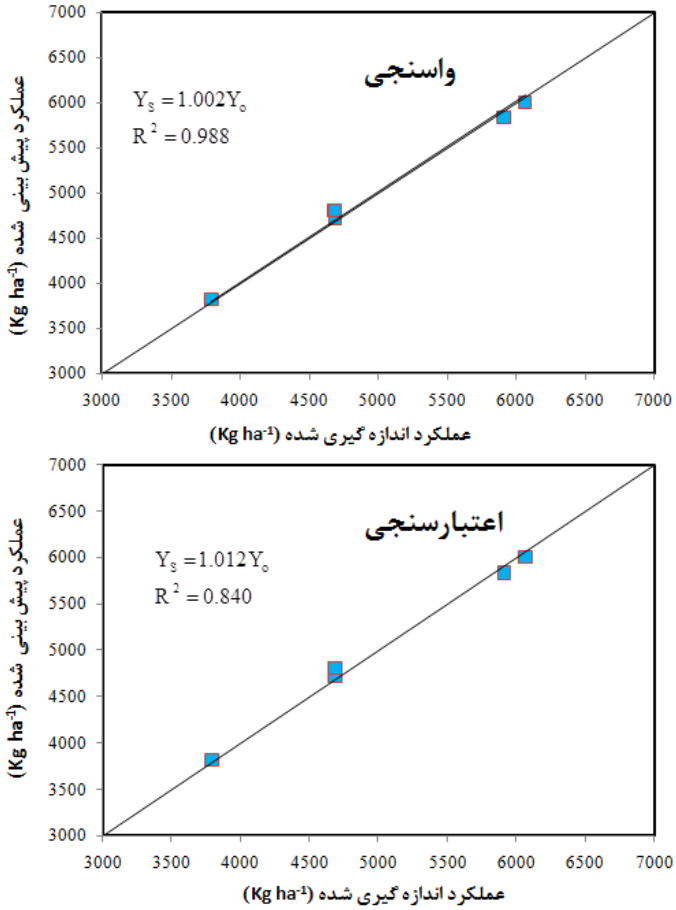
پارامترها	واحد	ارقام			روش واسنجی
		چمران	مرودشت	شیراز	
دمای پایه رشد	(°C)	۰	۰	۰	پیش‌فرض
دمای بالا	(°C)	۲۶	۲۶	۲۶	پیش‌فرض
ضریب رشد پوشش تاجی (CGC)	(% day^{-1})	۴/۷۵	۴/۶۲	۵/۲۴	تنظیم شد
ضریب کاهش پوشش تاجی (CDC)	(% day^{-1})	۸/۰۰	۶/۷۷	۷/۱۸	تنظیم شد
بیشینه پوشش گیاهی (CCx)	(%)	۹۲/۰۰	۸۰/۰۰	۹۶/۰۰	تنظیم شد
بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)	(gm^{-2})	۱۵	۱۵	۱۵	پیش‌فرض
شروع تشکیل شاخص برداشت (HI) تا گلدهی	(days)	۴۲	۴۸	۴۷	تنظیم شد
شاخص برداشت مرجع (HIo)	(%)	۳۱	۲۸	۴۸	تنظیم شد
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل ($Kc_{Tr,x}$)	(–)	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۱۰	تنظیم شد
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی	(–)	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۰	تنظیم شد
آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی	(–)	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۶۵	تنظیم شد
ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه	(–)	۵/۰	۵/۰	۵/۰	پیش‌فرض
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	(–)	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۶۵	تنظیم شد
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	(–)	۲/۵	۲/۵	۲/۵	پیش‌فرض
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی	(–)	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۷۰	تنظیم شد
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه	(–)	۲/۵	۲/۵	۲/۵	پیش‌فرض
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گرده‌افشانی	(–)	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	پیش‌فرض

جدول ۵- پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد دانه گندم در مرحله واسنجی.

ارقام	NSE (-)	CRM (-)	MRE (%)	NRMSE (%)	R^2 (-)
چمران	۰/۹۷	-۰/۰۰۳	۱/۹۵	۱/۹۱	
مرودشت	۰/۹۹	-۰/۰۱	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۹۹
شیراز	۰/۹۸	-۰/۰۰۴	۱/۷۴	۱/۷۱	

جدول ۶- پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد دانه گندم در مرحله اعتبارسنجی.

ارقام	NSE (-)	CRM (-)	MRE (%)	NRMSE (%)	R^2 (-)
چمران	۰/۶۸	-۰/۰۱۵	۹/۲۷	۸/۹۳	
مرودشت	۰/۶۲	-۰/۰۳۵	۴/۷۳	۵/۵۹	۰/۸۴
شیراز	۰/۹۷	-۰/۰۱۵	۲/۴۰	۲/۶۰	



شکل۱- مقایسه عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای ارقام گندم در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی.

مقدار خطای نسبی تخمین مدل در پیش‌بینی عملکرد ارقام در جدول ۷ ارائه شده است. تحت شرایط تنش آبی (تنش آخر فصل با رطوبت ۶۵ درصد ظرفیت زراعی)، مقادیر پیش‌بینی عملکرد از مقادیر واقعی بزرگ-تر بوده و مدل AquaCrop در این بازه و تحت کم‌آبی، کم‌برآورد نشان داد. در تیمار I_1 (آبیاری کامل و بدون تنش)، تقریباً مقادیر مدل و واقعی بر هم تطابق نشان داد. بر اساس نتایج این جدول، بیشترین خطای نسبی بیش-برآورد در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، مربوط به تیمار I_1 (رقم چمران) بوده که مقدار این خطا به‌ترتیب برابر ۱/۴ و ۶/۳ درصد هست. هم‌چنین بیشترین خطای نسبی کم‌برآورد در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، مربوط به تیمار I_2 (رقم چمران) هست که مقدار آن به-ترتیب ۲/۵ و ۱۲/۲ درصد محاسبه گردید. وردی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴)، در مدل AquaCrop محدوده خطای نسبی (از نظر قدر مطلق) را برای ارقام گندم زمستانه روشن و قدس در ۳ سطح شوری مختلف به‌ترتیب ۰/۴ تا ۱۲/۰ و ۰/۱ تا ۴۰/۰ درصد اعلام نمودند که با نتایج تحقیق حاضر تطابق دارد.

مقایسه مقادیر بیوماس کل اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده توسط مدل AquaCrop در شکل ۲، برای ارقام گندم طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل ارائه‌شده است. مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در پیش‌بینی بیوماس محصول، در جدول ۸ آورده شده است. مدل در مرحله واسنجی، بیوماس محصول را برای هر سه رقم گندم زمستانه با دقت مناسب، شبیه‌سازی نمود. مقدار NRMSE در هر سه رقم کمتر از ۵ درصد (در محدوده ۲ تا ۵ درصد) به‌دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی بیوماس محصول، عالی هست. شاخص نش-ساتکلیف برای ارقام

چمران، مرودشت و شیراز در محدوده ۰/۶ تا ۱ محاسبه گردید. مقدار آماره CRM در هر سه رقم چمران، مرو-دشت و شیراز منفی حاصل شد که نشان داد در دو تیمار آزمایش، مدل کمی تمایل به بیش‌برآورد دارد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که مدل در پیش‌بینی بیوماس محصول گندم (همانند پیش‌بینی عملکرد محصول) بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده شبیه‌سازی می‌کند.

جدول ۷- مقادیر عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده و خطای نسبی مدل در پیش‌بینی عملکرد ارقام گندم برای دو تیمار I_1 و I_2 در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی.

ارقام	تیمار	واسنجی			اعتبارسنجی		
		عملکرد اندازه‌گیری شده**	عملکرد پیش‌بینی‌شده**	خطای نسبی (%)	عملکرد اندازه‌گیری شده**	عملکرد پیش‌بینی‌شده**	خطای نسبی (%)
چمران	I_1	۵۹۱۳	۵۸۳۰	-۱/۴*	۵۸۲۵	۵۴۵۷	-۶/۳
	I_2	۴۶۸۷	۴۸۰۴	۲/۵*	۴۲۴۷	۴۷۶۶	۱۲/۲
مرودشت	I_1	۴۶۸۸	۴۷۲۲	۰/۷	۴۳۲۴	۴۲۸۸	-۰/۸
	I_2	۳۷۹۶	۳۸۱۸	۰/۶	۳۶۱۱	۳۹۲۲	۸/۶
شیراز	I_1	۶۰۶۹	۶۰۰۳	-۱/۱	۶۲۰۰	۶۱۶۶	-۰/۵
	I_2	۴۶۸۸	۴۸۰۰	۲/۴	۴۶۰۶	۴۸۰۲	۴/۳

- * مقادیر مثبت، بیش‌برآورد و مقادیر منفی کم‌برآورد می‌باشند. - ** بر حسب کیلوگرم بر هکتار

بیوماس کل محصول

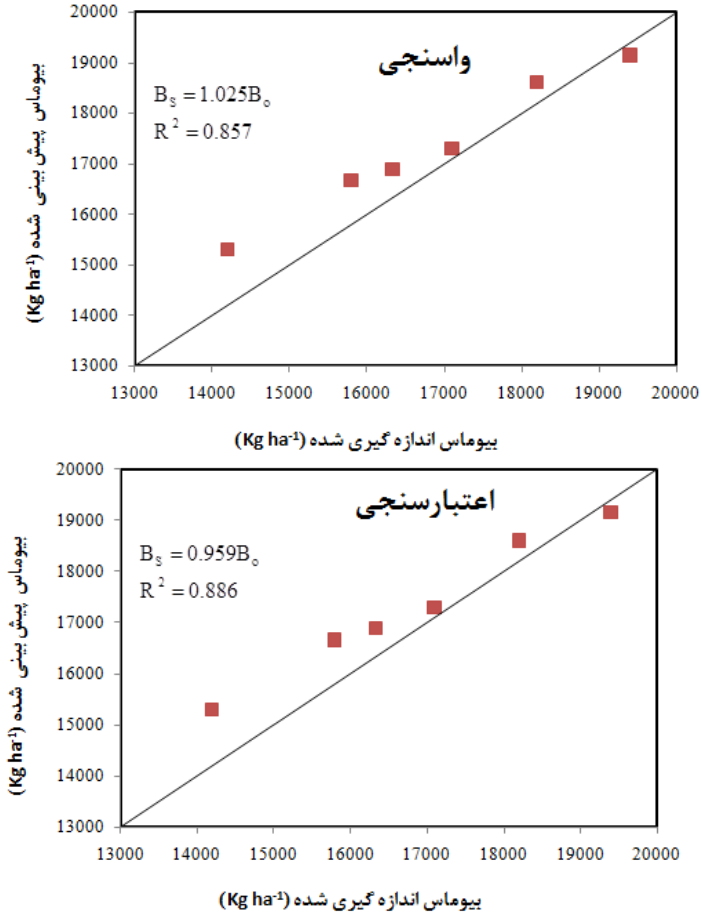
به‌طورکلی و برای دو تیمار آزمایش، متوسط خطای نسبی مدل در پیش‌بینی بیوماس، برای ارقام چمران، مرودشت و شیراز در محدوده ۲/۰ تا ۵/۰ در NRMSEدرصد محاسبه گردید (جدول ۸). مقدار مرحله اعتبارسنجی، برای بیوماس در هر سه رقم چمران، مرودشت و شیراز کمتر از ۱۰ درصد و در محدوده ۳/۰ تا ۶/۰ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت مدل‌سازی در شرایط عالی هست. برای دو تیمار آزمایش، متوسط خطای نسبی تخمین بیوماس، برای ارقام گندم زمستانه کمتر از ۵ درصد و در محدوده ۳/۰ تا ۵/۰ درصد محاسبه گردید (جدول ۹).

جدول ۸- پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای بیوماس گندم در مرحله واسنجی.

ارقام	NSE (-)	CRM (-)	MRE (%)	NRMSE (%)	R^2 (-)
چمران	۰/۶۹	-۰/۰۳۷	۳/۸۰	۳/۹۲	۰/۸۶
مرودشت	۰/۷۱	-۰/۰۴۱	۴/۳۹	۴/۹۹	
شیراز	۰/۹۲	-۰/۰۰۸	۲/۳۴	۲/۴۰	

جدول ۹- پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای بیوماس گندم در مرحله اعتبارسنجی.

ارقام	NSE (-)	CRM (-)	MRE (%)	NRMSE (%)	R^2 (-)
چمران	-۰/۰۳	۰/۰۴۶	۴/۴۴	۵/۸۴	۰/۸۹
مرودشت	۰/۱۹	۰/۰۳۷	۳/۵۷	۴/۶۳	
شیراز	۰/۸۲	۰/۰۳۵	۳/۴۲	۳/۶۵	



شکل۲- مقایسه بیوماس اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای ارقام گندم در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی.

مقدار خطای نسبی تخمین مدل در پیش‌بینی بیوماس ارقام در جدول ۱۰ ارائه‌شده است. تحت شرایط تنش آبی (I_2) و بدون تنش (I_1) در مرحله واسنجی، مقادیر پیش‌بینی بیوماس از مقادیر واقعی بزرگ‌تر بوده و مدل در این بازه، بیش‌برآورد نشان داد (به‌جز تیمار I_1 در رقم شیراز)، و در مرحله اعتبارسنجی، مقادیر پیش-بینی بیوماس از مقادیر واقعی کوچک‌تر بوده و مدل در این بازه، کم‌برآورد نشان داد. بر اساس نتایج جدول ۱۰، بیشترین خطای نسبی بیش‌برآورد در مرحله اعتبار-سنجی، مربوط به تیمار I_1 (رقم چمران) بوده که مقدار این خطا برابر ۷/۷ درصد هست. همچنین بیشترین خطای نسبی کم‌برآورد در مرحله واسنجی، مربوط به تیمار I_2 (رقم مرودشت) هست که مقدار آن ۷/۷ درصد محاسبه گردید.

در مدل مقدار خطای نرمال‌شده پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس محصول، کمتر از ۵ درصد به‌دست آمد، که نشان می‌دهد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس محصول (سال ۸۶-۱۳۸۵)، دقیق هست. وردی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۴)، مدل AquaCrop را واسنجی و ارزیابی نمودند و نشان دادند که مدل، مقادیر مشاهده‌ای را با دقت نسبتاً مناسبی برای گندم زمستانه (ارقام روشن و قدس) شبیه‌سازی می‌کند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی گندم زمستانه در بیرجند، مقدار خطای نرمال‌شده پیش‌بینی شاخص عملکرد محصول برای ارقام روشن و قدس در مدل AquaCrop به‌ترتیب برابر ۳/۴۴ و ۶/۰۲ درصد به‌دست آمدند. بابازاده و تبریزی (۱۳۹۱) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد دانه محصول سویا در منطقه کرج ارزیابی نمودند که بر

اساس نتایج این تحقیق، مقدار خطای نرمال‌شده پیش‌بینی عملکرد محصول سویا در مدل AquaCrop برابر ۴/۴۲ درصد محاسبه شد، که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد.

علیشیری و همکاران (۲۰۱۴)، محدوده خطای نرمال‌شده پیش‌بینی بیوماس چغندرقند تحت رژیم‌های مختلف آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن (۵ سطح) را در مدل AquaCrop، ۵ تا ۱۵ درصد اعلام نمودند. حیدری‌نیا و همکاران مدل (۱۳۹۱)، درصد خطای نرمال‌شده شاخص‌های عملکرد محصول و بیوماس را برای آفتابگردان در مدل AquaCrop، کمتر از ۵ درصد گزارش نمودند.

جدول ۱۰- مقادیر بیوماس اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده، خطای نسبی مدل در پیش‌بینی بیوماس ارقام گندم برای دو تیمار I_1 و I_2 در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی.

ارقام	تیمار	واسنجی			اعتبارسنجی		
		بیوماس اندازه‌گیری شده**	بیوماس پیش‌بینی‌شده**	خطای نسبی (%)	بیوماس اندازه‌گیری شده**	بیوماس پیش‌بینی‌شده**	خطای نسبی (%)
چمران	I_1	۱۸۲۰۰	۱۸۵۹۷	۲/۲*	۱۷۴۰۰	۱۶۰۵۳	-۷/۷*
	I_2	۱۵۸۰۰	۱۶۶۵۶	۵/۴	۱۵۵۰۷	۱۵۳۲۹	-۱/۱
مرودشت	I_1	۱۷۱۰۰	۱۷۲۲۸	۱/۱	۱۶۰۶۷	۱۵۰۷۶	-۶/۲
	I_2	۱۴۲۰۰	۱۵۲۹۱	۷/۷	۱۴۵۰۰	۱۴۳۵۸	-۱/۰
شیراز	I_1	۱۹۴۰۰	۱۹۱۴۲	-۱/۳	۱۹۰۰۰	۱۸۲۰۰	-۴/۲
	I_2	۱۶۳۳۳	۱۶۸۸۲	۳/۴	۱۶۰۲۷	۱۵۶۰۶	-۲/۶

- * مقادیر مثبت، بیش‌برآورد و مقادیر منفی کم‌برآورد می‌باشند. - ** بر حسب کیلوگرم بر هکتار

نتیجه‌گیری کلی

نتایج تحقیق حاضر نشان داد مدل AquaCrop مقدار خطای نرمال شده پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس محصول ۳ رقم گندم را در شرایط مدیریت آبیاری بدون تنش و تنش آخر فصل در شرایط شیراز، کمتر از ۵ درصد تخمین می‌کند، که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و بیوماس محصول هست. مدل AquaCrop به نسبت مدل‌های شبیه‌ساز دیگر، پارامترها و داده‌های ورودی کمتری برای شبیه‌سازی واکنش گیاه به آب احتیاج دارد و برای اغلب محصولات گیاهی و زراعی اصلی در سراسر جهان قابل‌استفاده است همچنین مدل AquaCrop بر پاسخ عملکرد گیاه نسبت به آب تمرکز دارد. این مدل به مدیران پروژه، مشاوران، مهندسان آبیاری و کشاورزان در افزایش بهره‌وری آب کمک می‌کند. بنابر نتایج این تحقیق می‌توان این مدل را برای برنامه‌ریزی آبیاری سه رقم چمران، مرودشت و شیراز در منطقه موردمطالعه توصیه نمود.

منابع مورداستفاده

بابازاده ح و تبریزی م، ۱۳۹۱. ارزیابی مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت کم آبیاری سویا. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع غذایی). جلد ۲۶، شماره ۲. صفحه‌های ۳۲۹ تا ۳۳۹.

حیدری‌نیا م، ناصری ع و برومندنسب س، ۱۳۹۱. بررسی امکان کاربرد شبیه‌سازی AquaCrop در برنامه‌ریزی آبیاری آفتابگردان در اهواز. مجله مهندسی منابع آب. سال پنجم، بهار ۱۳۹۱. صفحه‌های ۳۷ تا ۵۰.

علیزاده ح، نظری ب، پارسی‌نژاد م، رمضانی اعتدالی ه و جانباز ح ر، ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم-آبیاری گندم در منطقه کرج. آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۴، شماره ۲. صفحه‌های ۲۷۳ تا ۲۸۳.

Alishiri R, Paknejad F and Aghayari F, 2014. Simulation of sugarbeet growth under different water regimes and nitrogen levels by aqua crop. International Journal of Biosciences 4(4): 1-9.

Allen RG, Preira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper NO.56, Rome, Italy.

Anonymous, 2012. AquaCrop, Reference Manual. Annexes. Available at: http://www.fao.org/

Hsiao TC, Heng LK, steduto P, Rojas-Lara B, Raes D and E Fereres, 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: Parameterization and testing for maize. Agronomy Journal 101: 448-459.

Iqbal M, 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 field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management 135: 61-72.

Kijne J, barker R and molden D, 2003. Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. Comprehensive of Assessment of Water Management in Agriculture, series no 1, CABIpress, Wallingford, UK, 352 p.

Monteith JL, 1996. The guest for balance in crop modelling. Agronomy Journal 88: 695-697.

Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E, 2012. Reference Manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.

Singh AK, Tripathy R and Chopra UK, 2008. Evaluation of ceres-wheat and crop syst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. Agricultural Water Management 95: 776–786.

Steduto P, Hsiao TC, Raes D and Fereres E, 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy Journal 101: 426–437.

Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L, Abi Saab M, Stockle C and Steduto P, 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. Agronomy Journal 101: 509–521.

Van Sanford DA and Mackown CT, 1987. Cultivar differences in nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat. Crop Science 27: 295-300.

Verdinejad VR, Khorsand A and Shahidi A, 2014. Evaluation and comparison of AquaCrop and FAO models for yield prediction of winter wheat under environmental stresses. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences 4: 438-449.

Zhang W, Liu W, Xue Q, Pei H, 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.