

شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در کشت برنج تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت با مدل ^۱Aquacrop

پویا اعلائی بازکیایی^۱، بهنام کامکار^۲، ابراهیم امیری^{۳*}، حسین کاظمی^۴، مجتبی رضایی^۵ و سهیل اکبرزاده^۶

(۱) دانشجوی دکتری گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
(۲) استاد گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و گروه آگروتکنولوژی دانشگاه فردوسی مشهد.
(۳*) استاد گروه مهندسی آب، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات: eamiri57@yahoo.com

(۴) دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
(۵) استادیار پژوهشی موسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گیلان، ایران.
(۶) دانشجوی سابق کارشناسی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

چکیده

به‌منظور ارزیابی مدل Aquacrop و بررسی بهره‌وری تولید برنج تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار بر روی رقم محلی (هاشمی) در دو سال زراعی ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ در مؤسسه تحقیقات برنج ایران، رشت انجام گردید. دور آبیاری به‌عنوان عامل اصلی در چهار سطح غرقاب دائمی، دور آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روز و تاریخ کاشت به‌عنوان عامل فرعی در سه سطح (یک اردیبهشت، بیستم اردیبهشت و دهم خرداد) در نظر گرفته شدند. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی با استفاده از مؤلفه‌های ضریب تبیین، آزمون t و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل (EF) و میانگین انحراف خطا (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی به‌ترتیب ۹ و ۵ درصد می‌باشد. بر اساس بهره‌وری و میزان کاهش عملکرد شلتوک، آبیاری غرقاب در تاریخ یک اردیبهشت بیش‌ترین بهره‌وری را داشت. با توجه به ضریب تبیین بالای ۰/۷ و کارایی بالای ۰/۶ مدل Aquacrop در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی، مدل مذکور از دقت مناسبی برخوردار بود و می‌توان از مدل Aquacrop برای پشتیبانی نتایج آزمایش‌های تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت استفاده نمود.

کلید واژه‌ها: آبیاری؛ برنج؛ تاریخ کاشت؛ بهره‌وری آب؛ مدل Aquacrop

مقدمه

تقریباً آبیاری در کل مناطق کاشت برنج ایران با استفاده از رژیم آبیاری غرقابی و با ننگه‌داشتن ۳-۵ سانتی‌متر آب روی خاک برای فصل رشد انجام می‌شود. دو استان گیلان و مازندران ۷۰-۸۰ درصد از برنج کل ایران را تولید می‌کنند (Amiri et al., 2011)، این در حالی است که رشد بی‌سابقه تقاضا برای مصرف آب در بخش‌های صنعتی، شرب و کاهش میزان آب قابل‌استفاده در بخش کشاورزی تولید برنج را تهدید می‌کند (Amiri et al., 2011). Ran و همکاران (۲۰۱۸) در واسنجی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت تحت تیمار آبیاری کامل و کم‌آبیاری در چین مشاهده نمودند که در بیش‌تر تیمارهای آبیاری در پیش‌بینی پوشش تاج‌پوشش خوب عمل کرده و ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال برابر ۰/۸۱ و ۱۹/۳ درصد بود. از آنجایی که محصولات زراعی در پاسخ به عوامل اقلیمی و فیزیکی محدوده مشخصی دارند، با شناخت این عوامل می‌توان امکانات بالقوه اقلیمی را در مناطق مختلف شناسایی کرده و از آن حداکثر بهره‌برداری را انجام داد (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۵). تاریخ کاشت به دلیل تأثیر آن بر مراحل مختلف رشد و نمو و نهایتاً عملکرد، طبق نظر بسیاری از محققان حائز اهمیت است (بازوکی و همکاران، ۱۳۸۹). Nyakudya و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی عمق ریشه و تراکم و تاریخ کاشت ذرت در زیمباوه با مدل Aquacrop پرداختند. نتایج نشان داد که در این آزمایش به‌کارگیری مدل در انتخاب بهترین تاریخ کاشت سبب کاهش ۴۰ درصد زهکشی آب در سال مرطوب، افزایش آب در دسترس خاک، عمق ریشه و افزایش عملکرد دانه از ۶ به ۷۰۸ تن شد. بنابراین با توجه به‌ضرورت افزایش بهره‌وری مصرف آب در کنار حصول تولید اقتصادی مطلوب، این تحقیق با هدف شبیه‌سازی عملکرد دانه، عملکرد زیستی و بررسی بیلان و بهره‌وری برنج رقم هاشمی با استفاده از مدل Aquacrop و تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت در استان گیلان انجام شد.

بر اساس آمار سازمان خواربار جهانی (FAO)، ایران در سال ۲۰۱۶ دارای ۵۵۷ هزار هکتار سطح زیر کاشت و ۲/۳ میلیون تن تولید برنج بوده است. واردات برنج در ایران در سال ۲۰۱۶ حدود ۱/۱ میلیون تن بوده است (FAO, 2016). این آمار دلالت بر آن دارد که تولید داخلی کفایت تأمین نیاز کشور را نداشته و بخشی از نیاز برنج مصرفی از طریق واردات تأمین شده است. استان گیلان بعد از مازندران بیش‌ترین سطح زیر کاشت برنج (۱۹۷ هزار هکتار) را در بین استان‌های کشور دارد (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۳۹۶)؛ بنابراین توجه به تولید برنج در این استان از اهمیت زیادی برخوردار است. از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف مدیریت گیاه استفاده شده است (سلطانی و همکاران، ۱۳۷۸). AquaCrop مدلی بر مبنای مصرف آب است که شبیه‌سازی پوشش تاج‌پوشش و ماده خشک بالای سطح خاک گیاه را در پاسخ به تعرق انجام می‌دهد و در پایان کار عملکرد را بر اساس مقادیر تعرق روزانه گیاه شبیه‌سازی می‌کند (Tan (Jin et al., 2018) و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رشد پنبه تحت تیمارهای آبیاری در شرایط استفاده از مالچ، ضریب تبیین بالای ۰/۷۷ را در شبیه‌سازی پوشش تاج‌پوشش، ذخیره آب خاک و عملکرد زیستی پنبه گزارش نمودند. Sekyi-Annan و همکاران (۲۰۱۸) در بررسی برنامه ریزی آبیاری در ناحیه شرق غنا با مدل AquaCrop گزارش نمودند که استفاده از این مدل کارایی مصرف آب را بین ۵۸-۶۸ و کارایی بازیابی آب را ۳۶ درصد افزایش داد. Liu و همکاران (۲۰۱۸) در برآورد نیاز آبیاری ذرت تحت آبیاری قطره‌ای ابتدا مدل را واسنجی کرده، سپس آبیاری عمیق را در دوره ۳۰ ساله شبیه‌سازی نمودند که نتایج صرفه‌جویی ۱۴ درصد مصرف در آبیاری قطره‌ای نسبت به کشت دیم را نشان داد.

مواد و روش‌ها

تناسب کلی مدل مورد استفاده قرار گرفت. همچنین ضریب تبیین (R^2) رگرسیون خطی بین مقادیر شبیه‌سازی شده (P) و اندازه‌گیری شده (O) محاسبه گردید. جهت ارزیابی آماری نتایج شبیه‌سازی مدل از آزمون t و متغیرهای آماری زیر (معادلات ۱ تا ۵) استفاده شد (Bouman and Van Laar, 2006):

$$RMSE = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$NRMSE = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} / O_{mean}} \quad (2)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \quad (4)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_{mean} - O_i)^2} \quad (5)$$

که در این روابط: P_i = مقدار شبیه‌سازی شده اجزای گیاهی مدل، O_i = مقدار اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی؛ n = تعداد اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی، O_{mean} = میانگین مقادیر اندازه‌گیری اجزای گیاهی؛ $RMSE$ = ریشه میانگین مربعات خطا و $NRMSE$ = ریشه میانگین مربعات خطای نرمال است. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده در حالت مطلوب یا حالتی که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند، برابر با صفر هستند. آشکار است هرچه مقدار این دو مؤلفه به صفر نزدیک‌تر باشد مدل دقیق‌تر است. چنانچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده کم‌تر از ۱۰ باشد نشان‌دهنده حالت عالی شبیه‌سازی و بین ۲۰-۱۰ حالت خوب، بین ۳۰-۲۰ حالت متوسط و بالای ۳۰ حالت ضعیف شبیه‌سازی می‌باشد

به‌منظور ارزیابی مدل Aquacrop در استان گیلان، آزمایشی در قالب کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در طی دو سال زراعی (۱۳۹۵ و ۱۳۹۶) در موسسه تحقیقات برنج کشور بر روی رقم هاشمی انجام شد. طول و عرض هر کرت آزمایشی معادل ۳/۵ متر بود. آبیاری نوبتی به‌عنوان عامل اصلی در چهار سطح غرقاب دائمی با ارتفاع پنج سانتی‌متر (I1)، دور آبیاری پنج (I2)، ۱۰ (I3) و ۱۵ روز (I4) و تاریخ کاشت در سه سطح شامل یک اردیبهشت (D1)، ۲۰ اردیبهشت (D2) و ۱۰ خرداد (D3) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. فاصله کشت نشاها ۲۰×۲۰ سانتی‌متر (تراکم ۲۵۰ هزار بوته در هکتار) بود. کلیه عملیات زراعی و یادداشت‌های مورد نیاز نظیر تاریخ بذرپاشی در خزانه، نشاکاری، گل‌دهی و برداشت طبق استانداردهای زراعی مؤسسه بین‌المللی تحقیقات برنج (IRRI) انجام گرفت. در زمان رسیدگی، مقدار عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی با برداشت به ترتیب پنج و یک متر مربع از وسط هر کرت با حذف اثر حاشیه‌ای اندازه‌گیری شد. نقشه طرح اجرا شده در مزرعه در شکل (۱) ارائه گردید. فاصله بین کرت‌های آزمایشی یک متر در نظر گرفته شد.

واسنجی و اعتبار سنجی مدل: معیارهای ارزیابی نتایج مدل

به‌منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل Aquacrop از ترکیب روش‌های گرافیکی و آماری، مقایسه مقدار شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد شلتوک و عملکرد زیستی در شرایط آبیاری نوبتی و تاریخ کاشت استفاده شد. داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ به ترتیب جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. نمودار پراکنش داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده و خطوط ۱:۱ نیز به‌منظور نشان دادن

² Root Mean Square Error

³ Root Mean Square Error Normalized

بیان و بهره‌وری آب: در این تحقیق معادله بیان آب در طول فصل زراعی به صورت معادله ۶ در نظر گرفته شد:

$$I + R = E + T + D + R + AW \quad (6)$$

که اجزای آن شامل I: آبیاری، R: بارندگی، E: تبخیر واقعی، R: رواناب، T: تعرق واقعی، D: نشت و نفوذ عمقی و AW تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه می‌باشند. مقدار آبیاری برای هر کرت با کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. مقدار بارندگی نیز از ایستگاه هواشناسی رشت که در مختصات جغرافیایی ۳۷/۲۰۳ درجه عرض شمالی و ۴۹/۶۴۵ درجه طول شرقی قرار دارد، دریافت شد. سایر اجزای معادله بیان آب با استفاده از مدل Aquacrop محاسبه گردید.

(Rinaldi et al., 2003). CRM = ضریب جرم باقی مانده یا خطای نسبی مدل است که مقدار خطای مدل در پیش-بینی را نشان می‌دهد. مقدار ضریب جرم باقی مانده منفی به این معنی است که مدل مقادیر شبیه‌سازی را بیش‌تر تخمین زده و مقدار مثبت بیانگر این است که مدل مقادیر شبیه‌سازی را کم‌تر از مقادیر شبیه‌سازی شده تخمین زده است. EF کارایی مدل نسبت به میانگین مقادیر اندازه-گیری شده است (امیری، ۱۳۹۰). معیار ارزیابی MBE بیانگر میانگین انحراف بوده که علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل)، مقدار انحراف از مقادیر مشاهده‌شده را نیز نشان می‌دهد. MBE برابر صفر نشان می‌دهد که برآورد مدل خوب بوده و در آن هیچ‌گونه انحرافی وجود ندارد (حسنی پاک، ۱۳۸۶).

تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم
I2D2	I3D3	I4D2
I2D1	I3D2	I4D3
I2D3	I3D1	I4D1
I3D1	I4D3	I1D3
I3D3	I4D2	I1D1
I3D2	I4D1	I1D2
I4D2	I2D2	I3D3
I4D3	I2D3	I3D1
I4D1	I2D1	I3D2
I1D1	I1D2	I2D2
I1D2	I1D1	I2D1
I1D3	I1D3	I2D3

* D3, D2, D1: به ترتیب تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد؛ I4, I3, I2, I1: به ترتیب آبیاری غرقاب، دوره آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه.

شکل ۱. نقشه طرح آزمایشی اجرا شده در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶

تبخیر واقعی (مترمکعب)، I: مقدار آبیاری (مترمکعب) و R: مقدار بارندگی مؤثر می‌باشند.

مؤلفه‌های فیزیکی و هیدرولیکی لایه‌های مختلف خاک در جدول ۱، اطلاعات هواشناسی سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ محل انجام طرح در جدول ۲ و نتایج ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مؤلفه‌های گیاهی مدل Aquacrop در جدول ۳ ارائه شده است. متوسط مقدار آب مصرفی در دو سال آزمایش در آبیاری غرقاب، دور ۵، ۱۰ و ۱۵ روز به ترتیب برابر ۵۸۰، ۵۰۵، ۳۹۹ و ۳۸۶ میلی‌متر و در تاریخ کاشت D1 تا D3 به ترتیب ۴۸۰، ۴۹۳ و ۴۲۸ میلی‌متر بود.

برای محاسبه اجزای بهره‌وری آب از روابط (۷ تا ۱۰) استفاده شد (Singh et al., 2006).

$$WP_T = \frac{Y_g}{T} \quad (7)$$

$$WP_{ET} = \frac{Y_g}{E+T} \quad (8)$$

$$WP_I = \frac{Y_g}{I} \quad (9)$$

$$WP_{I+R} = \frac{Y_g}{I+R} \quad (10)$$

در روابط فوق WP_T ، WP_{ET} ، WP_{I+R} ، WP_I اجزای بهره‌وری آب، Y_g : مقدار عملکرد شلتوک (کیلوگرم در هکتار)، T : مقدار تعرق واقعی (مترمکعب)، E : مقدار

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مؤلفه‌های ون‌گنوختن اندازه‌گیری شده در لایه‌های خاک مزرعه آزمایش

عمق (cm)	شن (%)	لوم (%)	رس (%)	θ_{SAT} (-)	K_{SAT} (cm/day)	θ_{FC}	θ_{PWP}	N	a (cm ⁻¹)
۰-۱۰	۱۴	۳۹	۴۷	۰/۶۵	۵۷/۵۴	۰/۴	۰/۲۷	۱/۲۳	۰/۰۳
۱۰-۲۰	۱۷	۳۹	۴۴	۰/۶۲	۳۰/۸	۰/۴	۰/۳	۱/۲	۰/۰۳
۲۰-۳۰	۹	۴۴	۴۷	۰/۶۲	۰/۴	۰/۴۱	۰/۳	۲/۹۹	۰/۰۶
۳۰-۴۰	۱۱	۴۲	۴۷	۰/۶	۱۲/۴	۰/۴۲	۰/۳	۱/۱۷	۰/۲۶

* θ_{SAT} : رطوبت در نقطه اشباع، θ_{FC} : ظرفیت مزرعه‌ای حجمی، θ_{PWP} : نقطه پژمردگی دائم حجمی، K_{SAT} : هدایت هیدرولیکی اشباع، α و n : شاخص‌های آب‌شناختی معادله ون‌گنوختن.

جدول ۲. اطلاعات هواشناسی سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ محل انجام طرح

سال	ماه	دمای حداقل (°C)	دمای حداکثر (°C)	سرعت باد (m s ⁻¹)	تشنه‌شع (KJ m ⁻² d ⁻¹)	فشار هوا (kPa)	بارش مؤثر (mm)
۱۳۹۵	فروردین	۹/۶۷	۱۸/۸	۱/۵۴	۳۴۳۷۷۸	۱/۲	۱۲۷/۴
	اردیبهشت	۱۴/۹۲	۲۴/۶۶	۱/۷۷	۴۲۸۲۱۸	۱/۸۴	۲۶/۵
	خرداد	۱۸/۴۴	۲۸/۷۵	۱/۵۹	۵۹۵۳۲۱	۲/۲۷	۴۸/۳
	تیر	۲۰/۹۸	۳۱/۲۸	۱/۴۷	۶۰۹۳۸۱	۲/۶۳	۱۴۴/۸
۱۳۹۶	مرداد	۲۱/۴۳	۳۳/۰۹	۱/۳۴	۵۹۲۱۶۹	۲/۷۳	۵۱/۲
	شهریور	۲۰/۱۲	۳۱/۴۲	۱/۲۹	۴۵۹۰۶۳	۲/۵۹	۱۶۴/۷
	فروردین	۸/۷۵	۱۷/۹۶	۲/۴۱	۳۸۳۱۳۹	۱/۲۵	۸۹/۴
	اردیبهشت	۱۴/۳۴	۲۳/۹۱	۲/۰	۴۸۱۲۲۰	۱/۸۱	۷۱/۱
۱۳۹۶	خرداد	۱۸/۸۸	۲۸/۲۷	۱/۸۲	۶۱۰۸۲۸	۲/۲۸	۹/۰
	تیر	۲۰/۶۸	۳۱/۰۸	۱/۵۹	۶۰۷۲۵۲	۲/۵۹	۱۴/۷
	مرداد	۲۲/۱۴	۳۲/۸۵	۱/۶۱	۶۷۲۲۹۳	۲/۷	۰
	شهریور	۲۱/۳۱	۳۲/۲	۱/۶۲	۵۲۷۶۳۳	۲/۷۶	۶۰/۵

*آمار دما، سرعت باد، تشنه‌شع و فشار هوا بر اساس میانگین ماهانه در شش ماه اول سال و بارش بر اساس مجموع بارش در هر ماه ذکر گردیده است.

تشریح مدل AquaCrop

برای محاسبه عملکرد از زیست‌توده، مدل AquaCrop از معادله ۱۱ استفاده می‌کند (Raes et al., 2012)

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad (11)$$

که در آن HI_0 : 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، دمای هوا، زمان و شدت تنش در طول چرخه رشد محصول بستگی دارد. در AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز مدنظر قرار نمی‌گیرند (Steduto et al., 2009). ورودی‌های مدل شامل چهار دسته اطلاعات: اقلیمی، گیاه، مدیریت و خاک است. داده‌های اقلیمی حداقل و حداکثر دما، بارش و تبخیر و تعرق مرجع به صورت روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد (GDD) به منظور تعدیل عملکرد زیست‌توده به دلیل تنش سرما استفاده می‌کند (Raes et al., 2009). سامانه اطلاعات گیاه از چهار بخش فنولوژی و تاج‌پوشش گیاه، تعرق گیاه، زیست‌توده و عملکرد قابل‌برداشت و تنش‌ها تشکیل شده است. تنش‌های مدل شامل تنش آبی، تنش حاصلخیزی، تنش دمای هوا و تنش شوری است. اجزای مدیریت شامل دو قسمت مدیریت آبیاری (در زمینه کشاورزی دیم و آبی) و مدیریت زراعی (در زمینه سطوح مختلف حاصلخیزی خاک) است. اطلاعات خاک خصوصیات هیدرولیکی خاک است که برای هر لایه از نیمرخ خاک وارد مدل می‌شوند. رابطه حاکم بر حرکت آب در خاک، معادله بیلان آب است که مدل آن را برای بخشی از نیمرخ خاک که

ساختار ریشه در آن واقع شده است، شبیه‌سازی می‌کند. در این فرایند، مدل با استفاده از مقدار آب وارد و خارج شده، بیلان آب خاک را محاسبه و اجزای بیلان را برای مدت‌زمان مشخص تعیین می‌کند. شرایط مرزی بالادست مدل در تخمین بیلان آب توسط آبیاری، بارندگی و تبخیر و تعرق واقعی مشخص می‌شود. برای شرط مرزی پایین نیز وجود سطح ایستابی و شرایط زهکشی آزاد در نظر گرفته شده است که در این مطالعه به علت عمق زیاد سطح ایستابی (عمق ۱۱۰ متری)، شرایط زهکشی آزاد حاکم است. مقدار رطوبت نیمرخ خاک قبل از کاشت با فواصل هر ۲۰ سانتی‌متر و تا عمق یک متری، به عنوان شرایط اولیه وارد مدل شد (Raes et al., 2012). مدل AquaCrop به منظور بررسی و شبیه‌سازی بیلان املاح، دو فرایند انتقال توده‌ای و پخشیدگی را در یک بعد به کار می‌گیرد که انتقال توده‌ای املاح توسط منافذ بزرگ و فرایند پخشیدگی املاح، توسط منافذ ریز انجام می‌گیرد. مدل برای بررسی بیلان املاح، نیمرخ خاک را به چند افق و چندین بخش (پیش‌فرض ۱۲ بخش) با ضخامت Δz برابر ۲۰ سانتی‌متر تقسیم می‌کند. به منظور شبیه‌سازی پخشیدگی و انتقال توده‌ای املاح در عمق ۳۰ سانتی‌متر (عمق ریشه برنج)، هر بخش (سطر) به چندین سلول یا المان تقسیم می‌شود. تعداد سلول‌های هر بخش (n) بین ۲ تا ۱۱ عدد است که تابعی از هدایت آبی اشباع می‌باشد (Raes et al., 2012). در تخمین بیلان املاح، شرایط مرزی بالای مدل، توسط شوری آب آبیاری تعیین می‌شود (شوری آب باران صفر لحاظ می‌شود). مرز پایین نیز در شرایط حضور سطح ایستابی با شوری آب زیرزمینی مشخص می‌شود. شوری عصاره اشباع خاک نیز قبل از کاشت پیش‌فرض اولیه مدل در پیش‌بینی شوری خاک است (Raes et al., 2012).

در تاریخ کاشت دهم خرداد مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج ارائه گردید.

پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل Aquacrop، مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴ بر اساس سناریوهای آبیاری مورد استفاده در واسنجی مدل،

جدول ۳. واسنجی مؤلفه‌های گیاهی مدل برای برنج رقم هاشمی.

مؤلفه‌ها	واحد	مقدار مؤلفه	روش واسنجی
دمای پایه رشد	$^{\circ}\text{C}$	۸	پیش فرض
دمای بالا	$^{\circ}\text{C}$	۳۰	پیش فرض
ضریب رشد پوشش تاجی (CGC)	روز/٪	۱۳/۱	تنظیم شد
ضریب کاهش پوشش تاجی (CDC)	روز/٪	۱۱/۸	تنظیم شد
بهره‌وری آب نرمال شده (WP)	g/m^2	۲۰	تنظیم شد
حداکثر پوشش تاجی	%	۹۵	تنظیم شد
کاهش پوشش تاجی	روز	۲۵	تنظیم شد
شاخص برداشت (HI)	%	۵۷	تنظیم شد
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل ($\text{Kc}_{\text{Tr,x}}$)	(-)	۱/۱۵	پیش فرض
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه	(-)	۰/۵	تنظیم شد
آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه	(-)	۰/۸	تنظیم شد
ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه	(-)	۰	تنظیم شد
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	(-)	۰/۷	پیش فرض
ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	(-)	۳	پیش فرض
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه	(-)	۰/۶	پیش فرض
ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه	(-)	۳	پیش فرض

نتایج و بحث

عملکرد شلتوک

متغیرهای آماری که برای ارزیابی (واسنجی و اعتبارسنجی) توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک برنج مدنظر بود، در جدول (۴) ارائه داده شده است. نتایج نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای عملکرد شلتوک در شرایط واسنجی، اعتبارسنجی و میانگین دو سال به ترتیب ۲۱۶، ۴۰۹ و ۳۲۷ کیلوگرم در هکتار است. همچنین کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک در سال اول ۶۷ و در سال دوم ۷۵ درصد میانگین بود (جدول ۴). بررسی مقادیر MBE نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک دارای بیش‌برآورد (۷۸ کیلوگرم در هکتار) و در سال دوم دارای کم‌برآورد (۲۱۶- کیلوگرم در هکتار) بوده است (جدول ۴). مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد شلتوک در

شرایط واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۶ و ۱۱ درصد به دست آمد (جدول ۴). Akumaga و همکاران (۲۰۱۷) در واسنجی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop در ذرت دیم در نیجریه، تفاوت بین مقادیر عملکرد مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را بین (۳۰- تا ۱۹+) درصد و NRMSE شبیه‌سازی عملکرد دانه را بین (۸ تا ۱۷-) درصد گزارش نمودند. علیزاده و همکاران (۱۳۹۶) در بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف آب و کود مصرفی با استفاده از مدل AquaCrop حداکثر خطای نرمال شده، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب تبیین در سال صحت سنجی مدل را به ترتیب معادل ۲۴/۷۷، ۹/۳۷ و ۰/۹۲ درصد گزارش کردند. ابراهیمی پاک (۱۳۹۷) در بررسی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا تحت سناریوهای کم آبیاری در دشت قزوین مقادیر جذر

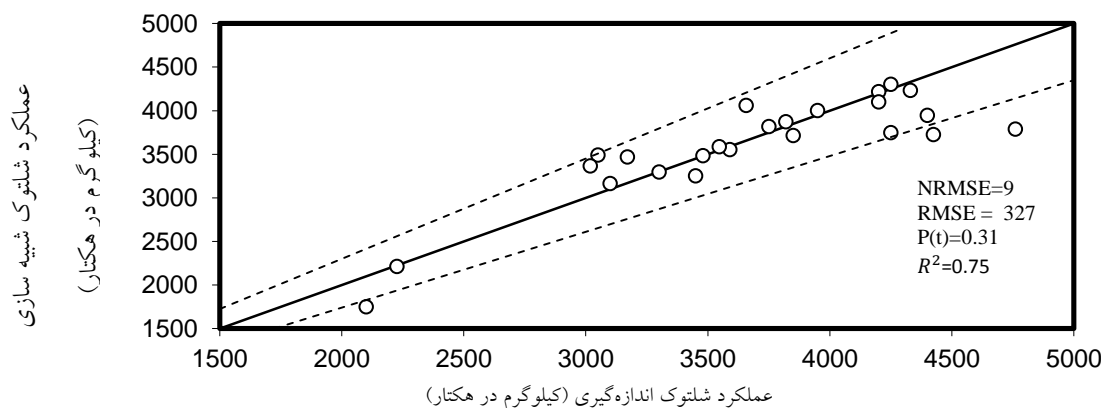
شلتوک را طی دو سال آزمایش داشته است که مدل نیز به خوبی تغییرات عملکرد شلتوک را طی شرایط واسنجی و اعتبارسنجی پیش‌بینی کرده است (جدول ۵). بیش‌ترین مقدار خطای مدل در تخمین عملکرد شلتوک در واسنجی تیمار I4D1 و در شرایط اعتبارسنجی در تیمار IID1 مشاهده شد (به ترتیب برابر ۱۵ و ۲۰ درصد). شرایط توأمان آب و تاریخ کاشت تأثیر پیچیده‌ای بر رشد و نمو گیاه برنج در شرایط واقعی ایجاد می‌کند؛ اما به طور متوسط طی دو سال آزمایش درصد خطای مدل جهت تخمین عملکرد شلتوک کم‌تر از ۱۰ درصد بود (جدول ۵). نتایج حاصل از تجزیه رگرسیون خطی (شکل ۲) بین مقادیر عملکرد شلتوک شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان داد که ضریب تبیین (R^2) برای کل داده‌های دو سال آماری مدل برابر ۰/۷۵ است (شکل ۲)؛ که نشان از مناسب بودن مدل در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک دارد. همچنین بالا بودن نسبی R^2 بیانگر پراکندگی پائین داده‌ها است.

میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) به دست آمده برای عملکرد، زیست‌توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت را به ترتیب برابر با ۰/۱۰، ۰/۰۴، ۰/۱۱ و ۰/۰۴ گزارش کرد. ضیایی و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت، شاخص RMSE در برآورد عملکرد محصول را برای مدل AquaCrop بین ۲۰ تا ۴۰ درصد و برای مدل CERES-Maize بین ۲۰ تا ۸۰ درصد گزارش نمودند. نتایج آزمون t نشان داد که مقادیر عملکرد شلتوک شبیه‌سازی شده مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در سطح احتمال ۹۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند (جدول ۴). در جدول (۵) مقدار عملکرد شلتوک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دور آبیاری، عملکرد شلتوک واقعی کم می‌شود. تاریخ کاشت یک و ۲۰ اردیبهشت (به ترتیب با میانگین ۳۷۹۵ و ۳۸۲۰ کیلوگرم در هکتار) بیش‌ترین عملکرد

جدول ۴. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مؤلفه‌های گیاهی مدل AquaCrop (دو سال ۱۳۹۵-۱۳۹۶) در گیاه برنج (رقم هاشمی)

	تعداد نمونه	O_{mean}	P_{mean}	R^2	$P(t)$	RMSE	MBE	EF	NRMSE (%)
واسنجی (۱۳۹۵)									
عملکرد شلتوک (kg/ha)	۱۲	۳۶۳۳	۳۷۱۱	۰/۷۱	۰/۲۲	۲۱۶	۷۸	۶۷	۶
عملکرد زیستی (kg/ha)	۱۲	۹۹۶۸	۱۰۲۰۴	۰/۷۳	۰/۰۹	۴۸۶	۲۳۶	۶۳	۵
اعتبارسنجی (۱۳۹۶)									
عملکرد شلتوک (kg/ha)	۱۲	۳۶۵۵	۳۴۳۸	۰/۸۲	۰/۰۶	۴۰۹	-۲۱۶	۷۵	۱۱
عملکرد زیستی (kg/ha)	۱۲	۹۹۹۹	۹۸۷۳	۰/۸۳	۰/۰۵	۶۱۰	-۱۲۶	۸۲	۶

*RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، NRMSE: ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده، $P(t)$: آزمون t، R^2 : ضریب تبیین، P_{mean} : مقادیر شبیه‌سازی شده، O_{mean} : مقادیر مشاهده شده.



شکل ۲. مقایسه عملکرد شلتوک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نسبت به خط ۱:۱. خطوط منقطع حدود اطمینان ۱۵٪ را نشان می‌دهند.

جدول ۵. مقادیر عملکرد شلتوک شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل در تیمارهای ترکیبی تاریخ کاشت و دور آبیاری در برنج (رقم هاشمی)

تیمار	۱۳۹۵		۱۳۹۶	
	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	خطای نسبی (%)
I1D1	۴۲۰۰	۴۲۱۸	-۰/۴۳	۲۰/۴۳
I1D2	۴۰۹۰	۴۱۰۰	-۰/۲۴	۱۰/۵۶
I1D3	۳۸۵۰	۳۷۱۴	۳/۵۳	۱۵/۸۱
I2D1	۳۴۸۰	۳۴۸۲	-۰/۰۶	-۰/۷۴
I2D2	۴۰۹۰	۴۰۹۹	-۰/۲۲	۱۰/۵۶
I2D3	۳۴۵۰	۳۴۵۲	-۰/۰۶	-۱/۱۱
I3D1	۳۰۱۹	۳۳۶۵	-۱۱/۴۵	-۱/۳۲
I3D2	۳۶۵۷	۴۰۵۹	-۱۰/۹۸	-۵/۴۳
I3D3	۳۴۵۰	۳۲۵۱	۵/۷۷	۱۶/۷۱
I4D1	۳۰۰۰	۳۴۶۷	-۱۵/۵۷	-۱/۷۳
I4D2	۳۸۲۰	۳۸۷۰	-۱/۳۱	۰/۰۹
I4D3	۳۴۹۰	۳۴۵۲	۱/۰۹	۰/۶۶
متوسط	۳۶۳۳	۳۷۱۱	-۲/۴۹	۵/۳۷
انحراف معیار (sd)	۳۹۴	۳۴۱	-	۷۴۴

* D3, D2, D1: به ترتیب تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد؛ I4, I3, I2, I1: به ترتیب آبیاری غرقاب، دوره آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه.

عملکرد زیستی

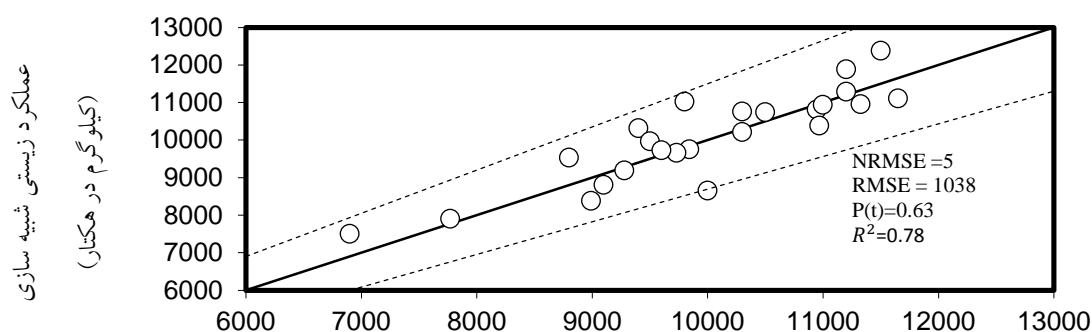
نتایج ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد زیستی برنج نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای عملکرد زیستی در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب معادل ۴۸۶ و ۶۱۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (جدول ۴). مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد زیستی در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۵ و ۶ درصد تعیین شد (جدول ۴). همچنین کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک در سال اول ۶۳ و در سال دوم ۸۲ درصد میانگین بود (جدول ۴). بررسی مقادیر MBE نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد شلتوک دارای بیش‌برآورد (۲۳۶ کیلوگرم در هکتار) و در سال دوم دارای کم‌برآورد (۱۲۶- کیلوگرم در هکتار) بوده است (جدول ۴).

Geerts و همکاران (۲۰۰۸) ضریب رگرسیونی داده‌های شبیه‌سازی شده در برابر مشاهده شده در شبیه‌سازی واکنش عملکرد کینوا به دسترسی آب با مدل AquaCrop را به ترتیب معادل ۰/۸۷ در شبیه‌سازی ماده خشک و ۰/۸۳ در شبیه‌سازی عملکرد دانه گزارش نمودند. نتایج

آزمون t نشان داد که مقادیر عملکرد زیستی شبیه‌سازی شده مدل در سطح احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری با مقدار اندازه‌گیری شده ندارد (جدول ۴). در جدول (۶) مقایسه مقدار عملکرد زیستی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده ارائه شده است. نتایج نشان داد که با تغییر در مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت عملکرد زیستی واقعی کم یا زیاد می‌شود که مدل نیز کاهش و افزایش مقدار عملکرد زیستی شبیه‌سازی شده را به خوبی نشان داد. بیش‌ترین مقدار خطای مدل در تخمین عملکرد زیستی در واسنجی در تیمار I4D3 و در اعتبارسنجی در تیمار I3D3 مشاهده شد (به ترتیب برابر ۹ و ۱۲ درصد) (جدول ۶). نتایج نشان داد که درصد خطای مدل متغیر بوده، به نحوی که در تاریخ کاشت D3 در بین مدیریت‌های تاریخ کاشت و در سال اول در شرایط مدیریت آبیاری با افزایش سطح خشکی قدر مطلق میزان خطا افزایش یافت؛ در حالی که در سال دوم در تیمار آبیاری ۵ روزه بیش‌ترین خطا مشاهده شد (جدول ۶). به‌طور متوسط در طی دو سال، مقدار خطای مدل برابر

خشک را بین ۴/۳- و ۱۴/۶ درصد گزارش کردند. Hsiao و همکاران (۲۰۰۹) در شبیه‌سازی عملکرد ذرت با مدل AquaCrop خطای شبیه‌سازی ماده خشک را حدود ۲۲ درصد و در مورد عملکرد دانه معادل ۲۴ درصد گزارش کردند. همچنین بین عملکرد زیستی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده بر اساس آزمون t در سطح احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴).

۲/۵۱- و ۱/۱ درصد میانگین بود (جدول ۶). نتایج حاصل از رگرسیون خطی (شکل ۳) بین مقادیر عملکرد زیستی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان داد که ضریب تبیین (R^2) برای داده‌های مجموع دو سال آماری مدل برابر ۰/۷۸ بود (شکل ۲) که نشان از مناسب بودن مدل در شبیه‌سازی عملکرد زیستی دارد. Araya و همکاران (۲۰۱۰) با کاربرد مدل AquaCrop برای گیاه جو تحت تیمارهای آبیاری، مقدار خطای مدل در شبیه‌سازی ماده



عملکرد زیستی اندازه‌گیری (کیلوگرم در هکتار) در (سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۵)

شکل ۳. مقایسه عملکرد زیستی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نسبت به خط ۱:۱. خطوط متقطع حدود اطمینان ۱۵٪ را نشان می‌دهند.

جدول ۶. مقادیر عملکرد زیست توده شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل

تیمار	۱۳۹۵		۱۳۹۶	
	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/ha)
I1D1	۱۰۹۴۵	۱۱۳۹۱	-۴/۰۷	۱۰۵۸۳
I1D2	۱۱۳۲۵	۱۱۱۵۷	۱/۴۹	۱۰۷۱۲
I1D3	۹۸۴۱	۱۰۳۴۲	-۵/۰۹	۱۰۴۶۲
I2D1	۱۰۳۰۰	۹۵۳۹	۷/۳۹	۱۱۴۳۷
I2D2	۱۱۰۰۰	۱۱۱۵۷	-۱/۴۳	۱۰۷۱۲
I2D3	۹۷۳۰	۹۷۹۷	-۰/۶۹	۱۰۱۸۵
I3D1	۸۹۹۰	۹۲۴۶	-۲/۸۵	۱۰۹۸۰
I3D2	۱۰۰۰۰	۱۰۸۹۹	-۸/۹۹	۹۳۸۲
I3D3	۹۲۸۰	۹۳۱۲	-۰/۳۴	۶۸۵۹
I1D1	۹۱۰۰	۹۴۸۶	-۴/۳۴	۱۰۴۱۲
I1D2	۱۰۳۰۰	۱۰۴۹۱	-۱/۸۵	۹۶۴۷
I1D3	۸۸۰۰	۹۶۳۳	-۹/۴۷	۷۱۰۴
متوسط	۹۹۶۸	۱۰۲۰۴	-۲/۵۱	۹۸۳۳
انحراف معیار (sd)	۸۰۱	۷۶۲	-	۱۳۹۵

* D3, D2, D1: به ترتیب تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد؛ I4, I3, I2, I1: به ترتیب آبیاری غرقاب، دوره آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه.

بیان آب

خرداد در سال اول (به ترتیب ۲۷۵ و ۲۷۶ میلی‌متر تعرق) و تاریخ کاشت یک اردیبهشت در سال دوم (۲۹۴ میلی‌متر تعرق) با بیش‌ترین میانگین عملکرد شلتوک، بیش‌ترین تعرق را به همراه داشتند (جدول ۷). مقدار تبخیر و تعرق در طول دوره رویش در سال‌های مورد بررسی در محدوده ۳۸۱-۵۶۸ میلی‌متر متغیر بود (جدول ۷). بررسی مقادیر تبخیر و تعرق نشان داد که با تغییر روش آبیاری غرقاب به غیر غرقاب از مقدار تبخیر و تعرق (از ۴۹۵ تا ۴۱۴ میلی‌متر) کاسته می‌شود (جدول ۷). Wang و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی اثر برنامه‌ریزی در مصرف آب برنج مشاهده نمودند که در مقایسه با کاشت برنج در غرقاب دائم، کاشت در آب کم‌عمق و آبیاری تحت کنترل، به ترتیب سبب هفت و ۳۶ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش تبخیر-تعرق می‌شود. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان داد که تغییر در مدیریت آبیاری غرقاب، میزان تلفات عمقی را کم می‌کند؛ به طوری که بررسی نتایج مقدار نفوذ عمقی در دوره مورد مطالعه نشان داد که حداکثر مقدار تلفات آب از طریق نفوذ عمقی در مدیریت غرقاب (میانگین ۴۰۳ میلی‌متر) مشاهده شد (جدول ۷). همچنین بیش‌ترین میزان ذخیره آب طی دو سال آزمایش در دور آبیاری ۱۵ روزه (۳۵۰ میلی‌متر) و کم‌ترین ذخیره در تیمار غرقاب (۲۷۸ میلی‌متر) مشاهده شد (جدول ۷). کمالی و همکاران (۱۳۹۵) به منظور بررسی تأثیر دو عامل تاریخ کاشت و آبیاری تکمیلی بر میزان عملکرد عدس بهاره دیم در شرایط آب و هوایی دشت قزوین، از مدل Aquacrop استفاده نمودند. نتایج این بررسی نشان داد که با یک مرحله آبیاری تکمیلی در زمان مناسب و در تاریخ کاشت یکسان، میزان عملکرد محصول عدس نسبت به شرایط دیم به میزان ۹۰ درصد افزایش یافت. در بین تاریخ‌های کاشت بیش‌ترین نفوذ عمقی در تاریخ کاشت ۲۰ اردیبهشت (۳۷۱ میلی‌متر) و کم‌ترین مقدار نفوذ عمقی در تاریخ کاشت یک اردیبهشت و ۱۰ خرداد (به ترتیب ۳۳۰ و ۳۲۷ میلی‌متر) مشاهده شد (جدول ۷). Singh و

در جدول (۷)، مقادیر متغیرهای بیان آب در منطقه توسعه ریشه برای مدیریت‌های آبیاری و تاریخ کاشت در طول دو سال آزمایش نشان داده شده است. شاخص‌های تبخیر واقعی، تعرق واقعی، نشت و نفوذ عمقی و تغییرات آب ذخیره‌شده در منطقه توسعه ریشه بر اساس نتایج مدل AquaCrop به دست آمده است. نگاهی به مقادیر اجزای بیان آب در مدیریت‌های آبیاری و تاریخ کاشت نشان می‌دهد که در مدیریت‌های غرقاب (با میانگین تبخیر ۲۰۲ میلی‌متر)، میزان تبخیر بیش‌تر از مدیریت‌های غیر غرقاب است که به علت وجود آب در سطح زمین در طول دوره رویش و اشباع بودن سطح خاک از آب می‌باشد. در مدیریت آبیاری غیر غرقاب شامل دور آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه با میانگین تبخیر به ترتیب ۱۹۷، ۱۶۵ و ۲۰۳ میلی‌متر، به علت عدم وجود آب در سطح زمین در دوره بیش‌تری از رشد نسبت به آبیاری غرقاب، میزان تبخیر کم‌تر می‌باشد (جدول ۷). مقایسه سه تاریخ کاشت نشان داد که در دو سال آزمایش، در تاریخ کاشت ۱۰ خرداد با عملکرد بیش‌تر، میزان تبخیر بیش‌تر بوده است (جدول ۷). در سال اول، تاریخ کاشت ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد (به ترتیب ۱۷۶ و ۱۷۴ میلی‌متر) و در سال دوم تاریخ کاشت ۱۰ خرداد (۲۰۴ میلی‌متر) بیش‌ترین میانگین تبخیر را داشتند (جدول ۷). مقدار تعرق در دوره رشد، تحت تأثیر شرایط و وضعیت رطوبتی خاک، کم‌آبی و میزان پوشش گیاهی قرار گرفت (جدول ۷). بررسی مقدار تعرق در مدیریت‌های آبیاری و تاریخ کاشت نشان داد که مقدار تعرق در محدوده ۳۳۵-۲۱۹ میلی‌متر متغیر بود (جدول ۷). همچنین نتایج تحقیق نشان داد که تغییر روش آبیاری از غرقاب و آبیاری پنج روزه (به ترتیب ۲۹۴ و ۲۹۸ میلی‌متر تعرق) به غیر غرقاب (۲۶۵ میلی‌متر تعرق در دور آبیاری ۱۵ روزه) و شرایط مطلوب تاریخ کاشت مطلوب جهت افزایش عملکرد شلتوک، به افزایش مقدار تعرق منجر گردید، به طوری که تاریخ کاشت ۲۰ اردیبهشت و ۱۰

آب را داشتند (جدول ۷). نتایج این تحقیق نشان داد که با تغییر روش آبیاری از غرقاب به غیر غرقاب، از مقدار آبیاری کاسته می‌شود (جدول ۷). به‌طور متوسط در دوره-های آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه نسبت به تیمار غرقاب دائم به میزان ۱۲، ۲۹ و ۳۳ درصد از میزان آبیاری کاسته شد.

همکاران (۲۰۱۷) در بررسی تأثیر تاریخ کاشت بر بهره‌وری و حرکت آب در برنج مشاهده نمودند که تغییر تاریخ کاشت سبب کاهش مصرف آب (تبخیر-تعرق به میزان ۷۵ میلی‌متر و زهکشی به میزان ۴۸ میلی‌متر) و ذخیره ۱۶۴ میلی‌متر از آب آبیاری شد. تحت این شرایط، تاریخ کاشت ۲۰ اردیبهشت و یک اردیبهشت به ترتیب با میانگین ۲۹۵ و ۳۱۱ میلی‌متر کم‌ترین و بیش‌ترین ذخیره

جدول ۷. مقادیر متغیرهای بیلان آب در منطقه توسعه ریشه در تیمارهای ترکیبی تاریخ کاشت و دور آبیاری در برنج (رقم هاشمی)

سال	تیمار	تعرق (میلی‌متر)	تبخیر (میلی‌متر)	تبخیر و تعرق (میلی‌متر)	آبیاری (میلی‌متر)	نفوذ عمقی (میلی‌متر)	رواناب (میلی‌متر)	بارش (میلی‌متر)	ذخیره ΔW (میلی‌متر)
۱۳۹۵	I1D1	۳۱۴	۱۸۳	۴۹۷	۴۹۰	۳۴۲	۴۸	۲۶۶	۲۷۸
	I2D1	۲۶۱	۱۷۱	۴۳۲	۳۷۰	۳۰۷	۲۸	۲۶۶	۱۸۱
	I3D1	۲۵۳	۱۶۹	۴۲۲	۲۵۵	۲۰۶	۲۵	۲۶۶	۲۰۶
	I4D1	۲۶۰	۱۵۵	۴۱۵	۲۷۰	۲۳۰	۲۴	۲۶۶	۳۴۸
	I1D2	۲۱۹	۱۶۲	۳۸۱	۵۰۰	۴۹۹	۵۸	۲۹۱	۱۴۷
	I2D2	۳۰۲	۲۰۱	۵۰۳	۵۰۵	۴۴۵	۳۰	۲۹۱	۲۶۶
	I3D2	۲۹۷	۱۷۸	۴۷۵	۴۰۲	۳۱۶	۵۰	۲۹۱	۳۸۱
	I4D2	۲۸۰	۱۶۱	۴۴۱	۴۱۰	۴۱۱	۳۰	۲۹۱	۳۵۹
	I1D3	۲۹۶	۱۹۷	۴۹۳	۵۳۰	۴۵۲	۹۳	۴۰۷	۲۸۸
	I2D3	۲۷۶	۱۹۷	۴۷۳	۴۳۰	۳۷۸	۹۰	۴۰۷	۲۹۹
	I3D3	۲۶۱	۱۵۹	۴۲۰	۳۱۵	۳۵۳	۵۴	۴۰۷	۳۲۰
	I4D3	۲۷۰	۱۴۴	۴۱۴	۳۴۰	۳۷۷	۵۷	۴۰۷	۴۵۰
	۱۳۹۶	I1D1	۲۸۶	۱۷۷	۴۶۳	۶۳۰	۴۵۲	۱/۶	۵۱
I2D1		۳۱۳	۱۸۲	۴۹۵	۵۹۵	۳۵۷	۱/۱	۵۱	۴۱۲
I3D1		۲۹۷	۱۴۶	۴۴۳	۵۷۵	۴۱۳	۱/۱	۵۱	۳۳۰
I4D1		۲۸۱	۱۲۸	۴۰۹	۴۶۰	۳۳۱	۱/۱	۵۱	۳۷۷
I1D2		۳۱۲	۲۰۵	۵۱۷	۶۳۰	۳۷۸	۱/۱	۳۰	۳۳۰
I2D2		۳۱۲	۱۹۸	۵۱۰	۵۷۵	۳۳۰	۰/۲	۳۰	۳۱۲
I3D2		۲۶۵	۱۵۶	۴۲۱	۴۶۰	۳۱۲	۰/۲	۳۰	۲۷۵
I4D2		۲۷۴	۱۳۸	۴۱۲	۴۱۵	۲۷۵	۰/۲	۳۰	۲۹۰
I1D3		۳۳۵	۲۳۳	۵۶۸	۶۰۱	۲۹۳	۳/۴	۸۳	۲۶۹
I2D3		۳۲۶	۲۳۳	۵۵۹	۵۶۷	۲۷۲	۳/۴	۸۳	۲۵۷
I3D3		۲۱۹	۱۸۵	۴۰۴	۳۹۵	۲۵۹	۳/۴	۸۳	۲۲۹
I4D3		۲۲۷	۱۶۵	۳۹۲	۳۵۵	۲۳۲	۳/۴	۸۳	۲۷۹

*D3,D2,D1: به ترتیب تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد؛ I4,I3,I2,I1: به ترتیب آبیاری غرقاب، دوره آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه.

اندازه‌گیری شده واقعی، استفاده گردید. بیش‌ترین مقدار بهره‌وری بر اساس آبیاری و مجموع آبیاری و بارش بین تیمارهای آبیاری، در آبیاری ۱۵ روزه مشاهده شد (جدول ۸). نتایج نشان داد که WP_I بین ۰/۵۳ تا ۱/۱۸ و WP_{I+R} بین ۰/۵ تا ۰/۷۴ کیلوگرم شلتوک به ازای هر متر مکعب

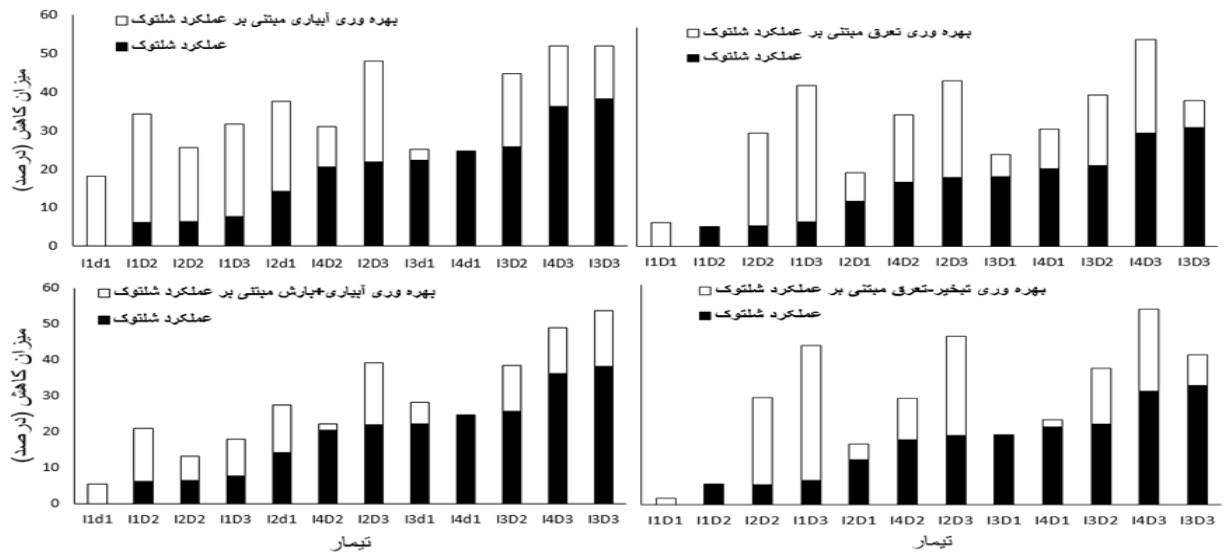
بهره‌وری

به‌منظور تخمین اجزای بهره‌وری آب (WP_I, WP_{I+R}) ، برای مدیریت‌های آبیاری و تاریخ کاشت از اجزای بیلان آب (جدول ۸) و مقدار عملکرد شلتوک

آب تغییرات است (جدول ۸). همچنین WP_I بر اساس عملکرد شلتوک شبیه‌سازی شده بین ۰/۴۴ تا ۱/۳۲ و WP_{I+R} بر اساس عملکرد شلتوک شبیه‌سازی شده بین ۰/۳۷ تا ۰/۷۵ متغیر بوده است (جدول ۸). بهره‌وری تولید WP_{ET} و WP_T طی دو سال آزمایش در تیمار غرقاب، بیش‌ترین مقدار را در بین تیمارهای آبیاری داشت. مقادیر بهره‌وری WP_T بین ۰/۹۹ تا ۱/۶۶ و WP_{ET} بین ۰/۵۲ تا ۱/۱۸ کیلوگرم شلتوک به ازای میزان متر مکعب تبخیر و تعرق متغیر بوده است (جدول ۸). در بین تاریخ‌های کاشت، اجزای بهره‌وری تولید بر اساس آبیاری، مجموع آبیاری و بارش، تعرق و تبخیر-تعرق در تاریخ کاشت یک اردیبهشت بیش‌ترین مقدار را داشته است (جدول ۸). مصرف آب نشان‌دهنده استفاده مفید از آن برای تولید شلتوک می‌باشد؛ یعنی می‌توان با میزان ورودی آب کمتر، مقدار عملکرد شلتوک بیش‌تری را از مقدار مشخصی آب به دست آورد. Belder و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که با تغییر روش آبیاری غرقاب به غیر غرقاب در گیاه برنج مقدار بهره‌وری آب افزایش می‌یابد. در این آزمایش WP_{I+R} بین ۰/۷۳-۰/۵۰ کیلوگرم شلتوک به ازای هر مترمکعب آب ورودی (مجموع آبیاری و بارندگی) متغیر بود (جدول ۸). Jabran و همکاران (۲۰۱۵) در مقایسه آبیاری تناوبی و غرقاب نشایی و کاشت مستقیم، مشاهده نمودند که بهره‌وری آب در کاشت مستقیم و آبیاری تناوبی بیش از آبیاری غرقاب بوده است. Chahal و همکاران (۲۰۰۷) گزارش نمودند که بهره‌وری مصرف آب برنج در تاریخ کاشتی که نیاز تبخیر کم‌تر است، افزایش یافته است؛ درحالی‌که Mahajan و همکاران (۲۰۰۹) دلایل افزایش WP_{I+R} را نوع رقم و افزایش

عملکرد تحت تأثیر تاریخ کاشت عنوان کردند. Brar و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی تأثیر تاریخ کاشت بر بهره‌وری آب برنج مشاهده نمودند که تغییر ۱۰ روزه تاریخ کاشت سبب تغییر بهره‌وری واقعی آب تا ۱۳ درصد می‌شود. کمبود اجتناب‌ناپذیر تلفات آب به علت تبخیر خاک، منجر به کاهش بهره‌وری آب از بهره‌وری آب مبتنی بر تعرق به بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر و تعرق می‌شود. نتایج تحقیق نشان داد که بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر-تعرق در محدوده ۰/۷-۰/۵۲ کیلوگرم شلتوک به ازای هر مترمکعب تبخیر و تعرق متغیر می‌باشد، به‌طور متوسط مقدار بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر-تعرق ۰/۷۸ کیلوگرم شلتوک به ازای هر مترمکعب تبخیر و تعرق محاسبه گردید (جدول ۸).

امیری و همکاران (۱۳۹۰) متوسط مقدار بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر و تعرق را معادل ۰/۶۳ کیلوگرم شلتوک به ازای هر مترمکعب تبخیر و تعرق محاسبه نمودند. بررسی اجزای بهره‌وری آب، بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر و تعرق و بهره‌وری آب مبتنی بر تعرق در طول دو سال آزمایش، نشان‌دهنده تأثیر مدیریت‌های آبیاری و تاریخ کاشت بر مقادیر آن‌ها بود. همچنین مقدار بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر و تعرق، به‌طور متوسط ۳۷ درصد کمتر از مقدار بهره‌وری آب مبتنی بر تعرق محاسبه شد (شکل ۴). مقایسه کاهش اجزای بهره‌وری و عملکرد شلتوک نسبت به بالاترین میانگین اندازه‌گیری شده (شکل ۴) نشان داد که بر اساس آبیاری و بارش، تیمار IID1 و بر اساس تبخیر-تعرق و تیمار IID1 و IID2 بیش‌ترین بهره‌وری تولید شلتوک را داشته است.



* D3, D2, D1: به ترتیب تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد؛ I4, I3, I2, I1: به ترتیب آبیاری غرقاب، دوره آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه.

شکل ۴- متوسط مقدار کاهش اجزای بهره‌وری آب و عملکرد شلتوک نسبت به بیشینه مقادیر در تیمارهای ترکیبی تاریخ کاشت و دور آبیاری در برنج (رقم هاشمی).

جدول ۸. نتایج عملکرد شلتوک و بهره‌وری آب تیمارهای در تیمارهای ترکیبی تاریخ کاشت و دور آبیاری در برنج (رقم هاشمی).

مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت	تیمار/سال	عملکرد شلتوک	WP _{I+R} بر اساس عملکرد واقعی	WP _I بر اساس عملکرد واقعی	WP _{ET} بر اساس عملکرد واقعی	WP _T بر اساس عملکرد واقعی	WP _{I+R} بر اساس عملکرد مدل	WP _I بر اساس عملکرد مدل
I1D1	۱۳۹۵	۴۲۰۰	۰/۵۷	۰/۷	۰/۸۲	۰/۷۶	۱۳۹۶	۱۳۹۶
I2D1	۱۳۹۵	۴۱۰۰	۰/۵	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۶۸	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I3D1	۱۳۹۵	۳۸۵۰	۰/۵	۰/۵	۰/۷۳	۰/۷۴	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I4D1	۱۳۹۵	۳۴۸۰	۰/۵۲	۰/۶۵	۰/۷۷	۰/۷۱	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I1D2	۱۳۹۵	۴۰۹۰	۰/۵۴	۰/۷۱	۰/۸۱	۰/۷۵	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I2D2	۱۳۹۵	۳۴۵۰	۰/۵۱	۰/۶	۰/۸	۰/۶۲	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I3D2	۱۳۹۵	۳۰۱۹	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۷۳	۰/۶۹	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I4D2	۱۳۹۵	۳۶۵۷	۰/۵۶	۰/۶۱	۰/۹۱	۰/۶۵	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I1D3	۱۳۹۵	۳۵۴۸	۰/۶۴	۰/۵	۰/۱۳	۰/۵۳	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I2D3	۱۳۹۵	۳۰۰۰	۰/۶۱	۰/۷۳	۰/۱۱	۰/۸۲	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I3D3	۱۳۹۵	۳۸۲۰	۰/۵۸	۰/۷۴	۰/۹۳	۰/۸	۱۳۹۶	۱۳۹۵
I4D3	۱۳۹۵	۳۴۹۰	۰/۵۹	۰/۵۹	۱	۰/۶۳	۱۳۹۶	۱۳۹۵

* D3, D2, D1: به ترتیب تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد؛ I4, I3, I2, I1: به ترتیب آبیاری غرقاب، دوره آبیاری ۵، ۱۰ و ۱۵ روزه.

بدست آمد (جدول ۸). Li و همکاران (۲۰۱۸) به بهینه-سازی برنامه آبیاری گندم پاییزه با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند. در این آزمایش پس از واسنجی و اعتبارسنجی، از مدل جهت تعیین میزان آبیاری بهینه استفاده شد. نتایج نشان داد چهار مرتبه آبیاری با ذخیره آب اولیه بیش تر خاک مطلوب‌ترین شکل آبیاری بود.

بررسی مدل بر اساس داده‌های بلند مدت هواشناسی طی سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴ نشان داد که میانگین عملکرد شلتوک تیمار دور آبیاری پنج روزه (۳۹۲۳ کیلوگرم در هکتار) تفاوت چندانی با تیمار غرقاب (۳۹۷۳ کیلوگرم در هکتار) نداشته است (جدول ۹). نتایج نشان داد که کم-ترین میزان تبخیر-تعرق (۳۵۰ میلی‌متر) و بالاترین بهره‌وری تولید WP_{ET} (۱/۰۳) در دور آبیاری ۱۵ روزه

جدول ۹. میانگین مقادیر بدست آمده بهره‌وری و عملکرد شلتوک توسط مدل AquaCrop بر اساس آمار بلندمدت هواشناسی.

تیمار	عملکرد شلتوک (کیلوگرم بر هکتار)	تبخیر-تعرق (میلی‌متر)	WP _{ET}	WP _T
آبیاری غرقاب	۳۹۷۳	۴۱۵	۰/۹۵	۱/۶۶
دور آبیاری پنج روزه	۳۹۲۳	۴۰۸	۰/۹۶	۱/۶۶
دور آبیاری ۱۰ روزه	۳۵۹۰	۳۶۶	۰/۹۸	۱/۶۳
دور آبیاری ۱۵ روزه	۳۶۱۹	۳۵۰	۱/۰۳	۱/۶۶

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که مدل AquaCrop از توانایی و دقت قابل قبولی (کم‌تر از ۶ درصد خطا) برای شبیه‌سازی عملکرد شلتوک و زیست‌توده گیاه برنج (رقم هاشمی) در شرایط مدیریت‌های آبیاری و تاریخ کاشت برنج در شرایط آب و هوایی رشت برخوردار می‌باشد. از این مدل می‌توان به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در زمینه انتخاب مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت مناسب استفاده نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که جهت بهبود بهره‌وری تولید برنج، کاهش میزان آب مصرفی می‌تواند موثر باشد، در حالی که در تیمارهای کم‌آبیاری کاهش عملکرد، به ازای کاهش تبخیر-تعرق، در کاهش میزان بهره‌وری تولید موثر بوده و تیمار آبیاری غرقاب بیش‌ترین بهره‌وری را از نظر تعرق و تبخیر-تعرق داشته است. با اعمال مدیریت‌های آبیاری غیر غرقاب و مقدار تاریخ کاشت مناسب می‌توان بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر و تعرق (WP_{ET}) را با کاهش تلفات آب از طریق تبخیر، افزایش داد. نتایج این پژوهش نشان داد که در بین مدیریت‌های اعمال شده، با توجه به اجزای بهره‌وری آب؛

دوره آبیاری غرقاب از نظر تعرق و مجموع تبخیر و تعرق و دور آبیاری ۱۵ روزه از نظر میزان آب ورودی به مزرعه و میزان آبیاری، بیش‌ترین بهره‌وری را داشتند. در بین تاریخ‌های کاشت، تاریخ کاشت ۲۰ اردیبهشت بر اساس بهره‌وری آب مبتنی بر تعرق، تبخیر و تعرق و تاریخ کاشت یک اردیبهشت بر اساس بهره‌وری آب مبتنی بر آبیاری و مجموع آبیاری و بارندگی، بیش‌ترین مقادیر اجزای بهره‌وری را دارا بودند. بر اساس نتایج تاریخ کاشت، در تاریخ یک اردیبهشت تحت آبیاری غرقاب بیش‌ترین تولید با کم‌ترین کاهش بهره‌وری بر مبنای تبخیر-تعرق، تعرق و آبیاری و مجموع آبیاری و بارش بدست آمد. به‌طور کلی در این آزمایش مدل AquaCrop عملکرد شلتوک و زیست‌توده برنج رقم هاشمی را به‌خوبی پیش‌بینی نمود، اما برای رسیدن به نتایج کامل‌تر و توسعه کاربردی مدل برای ارقام برنج در شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت، آزمایش‌های طولانی‌مدتی در زمینه دور آبیاری و تاریخ کاشت در خاک‌های شالیزارهای گیلان لازم است.

منابع مورد استفاده

- ابراهیمی پاک، ن.ع، ا.گدرنژاد، ا.، تافته، ا.، خدادادی دهکردی، د. ۱۳۹۷. بررسی کارایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کلزا تحت سناریوهای کم آبیاری در دشت قزوین. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۹(۵): ۱۰۰۳-۱۰۱۵.
- آمارنامه کشاورزی. ۱۳۹۶. جلد اول: محصولات زراعی. ۹۵-۱۳۹۴. دفتر آمار و فناوری اطلاعات، معاونت امور برنامه‌ریزی و اقتصادی. وزارت جهاد کشاورزی. ۹۰ صفحه.
- امیری، ا. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی رشد و نمو برنج تحت شرایط محدودیت آبیاری. علوم زیستی واحد لاهیجان، ۵(۴): ۱-۱۳.

- امیری، ا.، رضوی پور، ت. و بنایان، م. ۱۳۹۰. ارزیابی عملکرد و بهره‌وری آب در برنج تحت شرایط مختلف آبیاری و فاصله کاشت با استفاده از مدل ORYZA2000، ۴(۳): ۱-۱۹.
- پازوکی، ع.، کریمی، م. و فولادی، ع. ۱۳۸۹. بررسی اثر تاریخ‌های کاشت بر عملکرد اکوتیپ‌های گیاه زعفران (*Crocus sativus* L.) در منطقه نطنز. فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۲(۸): ۳-۱۲.
- حسنی پاک، ع. ا. ۱۳۸۶. زمین‌آمار (ژئواستاتیک). انتشارات دانشگاه تهران. ۳۱۴ ص.
- ذوالفقاری، ح.، فرهادی، ب. و رحیمی، ح. ۱۳۹۵. توان‌های اقلیمی ایران برای کاشت سویا. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۰(۵۶): ۸۹-۱۰۵.
- سلطانی، ا.، رحیم زاده خوبی، ف.، قاسمی گلعدانی، ک. و مقدم، م. ۱۳۷۸. CICER: یک مدل رایانه‌ای برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد نخود. دانش کشاورزی، ۹(۳): ۸۹-۱۰۶.
- ضیایی، غ.، بابازاده، ح.، عباسی، ف.، کاوه، ف. ۱۳۹۳. بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۴۵(۴): ۴۳۵-۴۴۵.
- علیزاده، ح. ع.، عباسی، ف. ۱۳۹۶. بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف آب و کود مصرفی با استفاده از مدل AquaCrop. علوم مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۴۰(۲): ۱۱۹-۱۳۴.
- کمالی، ب.، رمضان‌ی اعتدالی، ه.، ستوده نیا، ع. ۱۳۹۵. تعیین زمان مناسب کاشت و آبیاری تکمیلی عدس دیم در دشت قزوین با استفاده از مدل AquaCrop. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۰(۵): ۶۱۳-۶۲۱.
- Akumaga, U., Tarhule, A., and Yusuf, A. A. 2017. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and forest meteorology*, 232: 225-234.
- Amiri, E., Razavipour, T., Farid, A., and Bannayan, M. 2011. Effects of crop density and irrigation management on water productivity of rice production in Northern Iran: Field and Modeling Approach. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42 (17): 2085-2099.
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., and Dejene, T. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11): 1838-1846.
- Belder, P., Bouman, B.A.M. and Spiertz, J.H.J. 2007. Exploring option for water savings in lowland rice using a modeling approach. *Agricultural Systems*, 92: 91-114.
- Bouman, B.A.M. and H.H. Van Laar. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems*, (87): 249-273.
- Brar, S. K., Mahal, S. S., Brar, A. S., Vashist, K. K., Sharma, N., and Buttar, G. S. 2012. Transplanting time and seedling age affect water productivity, rice yield and quality in north-west India. *Agricultural water management*, 115: 217-222.
- Chahal, G.B.S., Sood, A., Jalota, S.K., Choudhury, B.U., Sharma, P.K. 2007. Yield, evapotranspiration and water productivity of rice-wheat system in Punjab (India) as influenced by transplanting date of rice and weather parameters. *Agricultural Water Management*, 88: 14-22.
- FAO. 2016. Food and Agricultural Organization of the United Nations (sited in: http://www.fao.org/index_en.htm/, 11/4/2018).
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Taboada, C., Miranda, R., Cusicanqui, J., Mhizha, T., and Vacher, J. 2008. Modeling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano, *Agricultural Water Management*, 96: 1652-1658.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy*, 101(3): 448-459.
- Jabran, K., Ullah, E., Hussain, M., Farooq, M., Haider, N., and Chauhan, B. S. 2015. Water saving, water productivity and yield outputs of fine-grain rice cultivars under conventional and water-saving rice production systems. *Experimental agriculture*, 51(4): 567-581.
- Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W., and Wang, J. 2018. Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. *Field Crops Research*, 226: 1-15.

- Li, J., Song, J., Li, M., Shang, S., Mao, X., Yang, J., & Adelaye, A. J. (2018). Optimization of irrigation scheduling for spring wheat based on simulation-optimization model under uncertainty. *Agricultural water management*, 208: 245-260.
- Liu, Y., Yang, H. S., Li, J. S., Li, Y. F. and Yan, H. J. 2018. Estimation of irrigation requirements for drip-irrigated maize in a subhumid climate. *Journal of integrative agriculture*, 17(3), 60345-7.
- Mahajan, G., Bharaj, T. S., and Timsina, J. 2009. Yield and water productivity of rice as affected by time of transplanting in Punjab, India. *agricultural water management*, 96(3): 525-532.
- Nyakudya, I. W., and Stroosnijder, L. 2014. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 146: 280-296.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy*: 101:438-447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Ran, H., Kang, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Li, S., Li, S., Ding, R. and Zhang, X. 2018. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203: 438-450.
- Rinaldi, M., N.Losavio and Z .Flagella. 2003. Evaluation of OIL CROP-SUN model for sun flower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 78:17-30.
- Sekyi-Annan, E., Tischbein, B., Diekkrüger, B. and Khamzina, A. 2018. Performance evaluation of reservoir-based irrigation schemes in the Upper East region of Ghana. *Agricultural Water Management*, 202, 134-145.
- Singh, M. C., Jain, A. K., and Jalota, S. K. 2017. Impact of Transplanting Date and Irrigation Scheduling on Water Balance, Water Productivity and Soil Moisture Movement. *Journal of Agricultural Engineering*, 54(1): 28-32.
- Singh, R., Van Dam, J.C. and Feddes, R.A. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agricultural Water Management*, 82: 253-278.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy*, 101:426-437.
- Tan, S., Wang, Q., Zhang, J., Chen, Y., Shan, Y., and Xu, D. 2018. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*, 196: 99-113.
- Wang, X., Lu, W., Jun Xu, Y., Zhang, G., Qu, W., and Cheng, W. 2016. The positive impacts of irrigation schedules on rice yield and water consumption: synergies in Jilin Province, Northeast China. *International journal of agricultural sustainability*, 14(1): 1-12.



ISSN 2251-7480

Simulation of growth and yield and evaluation of rice production productivity under irrigation management and planting date using AquaCrop model

Pooya Aalae Bazkiaei¹, Behnam Kamkar², Ebrahim Amiri^{3*}, Mojtaba Rezaei⁴, Hossein Kazemi⁵, and Soheil Akbarzadeh⁶

1) PhD student, Department of Agriculture, Plant production College, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Iran.

2) Prof., Agronomy Dept., Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources & Agrotechnology Dept. Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

3*) Professor, Department of Water Engineering, Islamic Azad University, Lahijan branch, Lahijan, Iran.

*Corresponding author email: eamiri57@yahoo.com

4) Associate. Prof., Department of Agriculture, Plant production College, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

5) Assistant Professor of Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Guilan, Iran.

6) Former undergraduate student, Department of Agriculture, Plant production College, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

Received: 13-03-2019

Accepted: 10-12-2019

Abstract

In order to evaluate the AquaCrop model and investigate the productivity of rice production under irrigation management and planting date, a split plot experiment based on a randomized complete blocks design with three replications was carried out on a local cultivar (Hashemi) in Rice Research Institute of Iran, in Rasht during 2016-2017. Irrigation interval was considered as the main factor in four levels including full flooding, 5, 10 and 15 days irrigation intervals, and transplanting date was assigned to subplots at three levels (April, 21st, May, 11th and May, 31st). Simulated and observed values of grain yield and biological yield were evaluated based on coefficient of determination, T-test, root mean square error (RMSE), Model efficiency (EF), mean bias error (MBE) and normalized root mean square error (NRMSE). The results showed that normalized root mean square error of the grain yield and biological yield were 9% and 5%, respectively. Based on the productivity and reduction in the yield of rice, flooding irrigation was the most efficient in April, 21th planting date. According to the correlation coefficient upper than 0.7 and Model efficiency upper than 0.6, the AquaCrop model had a good accuracy in simulating grain yield and biological yield, therefore AquaCrop model can be used to support the results of experiments under irrigation management conditions and different planting dates.

Keywords: AquaCrop model; Irrigation; Planting date; Rice; Water productivity