



## ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سه رقم ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی گرم و خشک

یاسر اسماعیلیان<sup>۱\*</sup> و محمود رمودی<sup>۲</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۴

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۲/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵

### چکیده

امروزه، مدل‌های رشد گیاهان نقش مهمی در تخمین رشد و عملکرد محصول، برنامه‌ریزی تولید محصولات کشاورزی، اقتصاد تولید و تعیین راهبردهای تأمین محصولات دارند. در این پژوهش، مدل AquaCrop برای سه رقم ذرت DC 370، ZP 677 و SC 704 تحت فراهمی سطوح متفاوت آب (عدم تنش، تنش ملایم و تنش شدید) و نیتروژن (صفر، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار) مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. برای اعتبارسنجی این مدل از ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شدند. نتایج نشان داد که مدل با دقت بالایی عملکرد دانه ارقام ذرت را شبیه‌سازی کرد. اما دقت شبیه‌سازی با افزایش تنش خشکی کاهش یافت. کمترین nRMSE (۷/۵٪) و بیشترین  $R^2$  (۰/۹۳) محاسبه شده از رقم ZP 677 به دست آمدند. مدل با خطای بیشتری عملکرد بیولوژیکی ذرت را نسبت به عملکرد دانه شبیه‌سازی نمود. هرچند روند تغییرات آن در نتیجه تغییر در سطح تنش خشکی و یا کود نیتروژن به خوبی و مطابق با آزمایش مزرعه‌ای پیش‌بینی شد. nRMSE بین ۶/۸ و ۱۰/۹ درصد بدست آمد، در حالی که  $R^2$  بین ۰/۸۲ تا ۰/۹۲ متغیر بود. مدل AquaCrop با دقت قابل قبولی تغییرات کارایی مصرف آب ارقام ذرت را شبیه‌سازی کرد، به طوری که با افزایش تنش خشکی و کاربرد کود نیتروژنی میزان آن افزایش یافت. البته، نتایج خروجی مدل در اغلب حالات کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بودند. بهترین نتیجه ارزیابی مدل (nRMSE=۶/۴٪ و  $R^2=0/93$ ) از رقم ZP 677 حاصل شد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان مدل AquaCrop را با درصد اطمینان بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت دانه‌ای در نواحی اقلیمی مشابه با این آزمایش را به کار برد.

**واژگان کلیدی:** تنش خشکی، شبیه‌سازی، عملکرد، کارایی مصرف آب، مدل AquaCrop.

۱- استادیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران. \* نگارنده‌ی مسئول [y.esmaeilian@gonabad.ac.ir](mailto:y.esmaeilian@gonabad.ac.ir)

۲- دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

## مقدمه

بخش کشاورزی حدود ۷۲ درصد از منابع آبی شیرین و با کیفیت را در جهان مورد استفاده قرار می‌دهد (Geerts and Raes, 2009) از طرف دیگر برای پایدار نگه‌داشتن جمعیت به سرعت در حال رشد جهان، نیاز به افزایش میزان تولیدات کشاورزی است (Howell, 2001). چالش جهانی در قرن حاضر افزایش تولید غذا به ازای مصرف آب کمتر می‌باشد. این موضوع اصولاً توسط بهبود کارایی مصرف آب (WUE) قابل دستیابی است که بخصوص برای کشورهایی که با مشکل کمبود آب و رقابت برای دستیابی به منابع آبی محدود جهت کشاورزی مواجه هستند، بسیار حایز اهمیت می‌باشد. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای دستیابی به این هدف برنامه‌ریزی آبیاری و اعمال روش‌های کم آبیاری است. آزمایش‌های مزرعه‌ای روش مرسوم برای ارزیابی استراتژی‌های مختلف مدیریت آبیاری می‌باشند. اما، این روش‌ها معمولاً پرهزینه، وقت‌گیر، و متأثر از شرایط غیرقابل کنترل محیطی بوده و آنالیز اثرات بلند مدت و سناریوهای گسترده توسط این روش‌ها دشوار است. در مقابل، مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی می‌توانند ابزاری مفید و کاربردی در این زمینه باشند (Pereira *et al.*, 2009). مدل‌های شبیه‌سازی مختلفی برای آنالیز واکنش گیاهان زراعی به تنش‌های محیطی و عملیات مدیریت محصولات زراعی استفاده شده‌اند (Boote *et al.*, 1996; Sinclair and Seligman, 1996). در همین راستا، سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO) مدل AquaCrop را معرفی کرده و توسعه داده است. اخیراً، مدل AquaCrop به‌طور گسترده‌ای برای اعمال برنامه‌ریزی‌های کم آبیاری، اصلاح مدیریت آبیاری، شبیه‌سازی واکنش

عملکردی و اصلاح استراتژی‌های تولید گیاهان زراعی استفاده شده است (García-Vila and Fereres, 2012; Abrha *et al.*, 2012; Geerts *et al.*, 2010; Mhizha, 2010). در طی پژوهشی عملکرد دانه و کارایی مصرف آب ذرت برای یک منطقه نیمه خشک با تبخیر و تعرق و سرعت باد زیاد و خاک رسی لومی عمیق شبیه‌سازی شده است. همچنین، این ارزیابی برای یک منطقه مرطوب و بارانی با خاک شنی و نیز یک منطقه نیمه خشک با خاک لومی انجام گرفته است. نگارندگان در نتیجه اعتبارسنجی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت تحت شرایط کم آبیاری و آبیاری کامل بیان کردند که مدل AquaCrop قادر است مصرف آب گیاه را در شرایط تبخیر و تعرق خیلی بالا و بادهای نسبتاً شدید به خوبی شبیه‌سازی کند. علاوه بر این، کارایی مدل برای شبیه‌سازی زیست توده اندام هوایی، عملکرد دانه و پوشش سایه‌انداز در تیمارهای عدم تنش (آبیاری مطلوب) و تنش‌های ملایم بسیار بهتر از تنش‌های شدید (به خصوص تنش‌هایی که در اواخر دوره رشد گیاه رخ می‌دهد) می‌باشد (Heng *et al.*, 2009). مدل AquaCrop به دلیل کارایی بالا، سهولت کاربرد، نیاز کمتر به پارامترها و اطلاعات ورودی نسبت به سایر مدل‌ها و دقت بالا در شبیه‌سازی گیاهان زراعی به عنوان ابزاری مطلوب جهت پیش‌بینی عملکرد و رشد گیاهان زراعی مورد توجه قرار گرفته است (Heng *et al.*, 2009). در طی پژوهشی، مدل AquaCrop با دو مدل CropSyst و WOFOST در شبیه‌سازی رشد، عملکرد و کارایی مصرف آب آفتابگردان مقایسه شد. نتایج مدل AquaCrop در مورد عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نسبت به دو مدل دیگر

ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی گرم و خشک، آزمایش مزرعه‌ای در سال ۱۳۹۰ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گناباد انجام گرفت. شهرستان گناباد با اقلیم گرم و خشک با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم و خشک در شرق کشور با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۶۰ متر از سطح دریا قرار دارد. میانگین سالانه درجه حرارت در این منطقه ۱۷/۲ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی سالانه ۱۴۲ میلی‌متر می‌باشد. جدول ۱ میانگین ماهیانه پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه را در طول دوره رشد ارقام ذرت نشان می‌دهد.

آزمایش مزرعه‌ای به صورت کرت‌های دو بار خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی شامل سه سطح: عدم تنش آبی ( $W_1$ ): آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A)، تنش ملایم ( $W_2$ ): آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) و تنش شدید ( $W_3$ ): آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) بود. فاکتور فرعی شامل چهار سطح کود نیتروژن ( $N_1$ : صفر،  $N_2$ : ۱۲۰،  $N_3$ : ۱۸۰ و  $N_4$ : ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار) و فاکتور فرعی متشکل از سه رقم ذرت ( $V_1$ : DC 370،  $V_2$ : ZP 677 و  $V_3$ : SC 704) بود. قبل از کاشت، یک نمونه مرکب خاک از هر تکرار جهت انجام آزمایش‌های خاک‌شناسی برداشت شد. نتایج تجزیه خاک محل آزمایش در جدول ۲ آمده است. کاشت بذور به صورت دستی و در اردیبهشت ۱۳۹۰ انجام گرفت. ۵۰ درصد نیتروژن مصرفی (از منبع کود اوره) قبل از کشت با خاک مخلوط گردید و ۵۰ درصد باقیمانده در مرحله

اختلاف کمی را نشان داد. مدل‌های AquaCrop و CropSyst مقادیر تبخیر و تعرق را به ترتیب ۸/۹ و ۵/۵ درصد بیشتر و برعکس مدل WOFOST آن را ۳ درصد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین زده بود. همچنین، مشخص شد که مدل CropSyst بهترین مدل برای تخمین کارایی مصرف آب آفتابگردان بود. مدل AquaCrop در تخمین این صفت وضعیت بهتری از WOFOST نشان داد، هرچند هر دو در اغلب موارد، خصوصاً در شرایط تنش آب کارایی مصرف آب را کمتر از مقدار واقعی تخمین زدند (Todorovic *et al.*, 2009). در نتیجه پژوهشی که در هندوستان انجام گرفت گزارش گردید مدل AquaCrop با دقت قابل قبولی عملکرد زیست توده، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب ذرت را در رژیم‌های مختلف آب آبیاری و کود نیتروژن شبیه‌سازی نمود. بهترین پیش‌بینی مدل در تیمار آبیاری کامل و مصرف ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص انجام گرفت (Abedinpuor *et al.*, 2012). همچنین در مطالعه دیگری که در مرکز کشور پرتغال صورت گرفت، این مدل تبخیر و تعرق ذرت، بیلان آب خاک، زیست توده و عملکرد دانه ذرت را در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری با دقت بالایی پیش‌بینی کرد (Paredes *et al.*, 2014).

این پژوهش به منظور ارزیابی دقت مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه، عملکرد زیست توده و کارایی مصرف آب ارقام مختلف ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی و آب و هوایی گناباد اجرا شد.

### مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سه رقم

دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ ثبت گردید. پس از برداشت نهایی گیاه، عملکرد بیولوژیکی و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد. عملکرد بیولوژیکی از طریق برداشت کل بوته‌های ۲ متر مربع از وسط هر کرت و خشک کردن اندام هوایی گیاه به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سلسیوس در آون به دست آمد. عملکرد دانه به وسیله جداکردن دانه‌ها از بوته و توزین آنها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم و نهایتاً تبدیل به واحد کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. کارایی مصرف آب نیز از تقسیم عملکرد دانه تولید شده (بر مبنای کیلوگرم) بر مقدار آب مصرف شده (بر مبنای متر مکعب) محاسبه شد.

جهت آنالیز آماری اثر تیمارهای آزمایش بر صفات مورد مطالعه ذرت، آزمون تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹ و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت.

### ورودی‌های مدل AquaCrop

داده‌های اقلیمی مورد نیاز (حداکثر و حداقل دمای روزانه، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و ساعات آفتابی روزانه) مربوط به دوره بلند مدت ۲۰ ساله (۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰) از ایستگاه هواشناسی گناباد جمع‌آوری شد. برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع از نرم‌افزار  $ET_0$  calculator فائو و با داشتن داده‌های هواشناسی روزانه استفاده شد (Abedinpour *et al.*, 2012). میانگین سالیانه غلظت دی اکسیدکربن برای سال‌های مختلف به‌صورت آماده در مدل AquaCrop (اندازه‌گیری شده در رصدخانه Mauna Loa) قرار داده شده است (Alizadeh *et al.*, 2010). داده‌های خاک از نتایج به‌دست آمده از آزمایش خاک وارد مدل شدند (جدول ۲).

طویل شدن ساقه (۸ برگ) اعمال گردید. ردیف‌های کاشت شامل ۶ خط کاشت به طول ۳ متر و با فاصله ۷۵ سانتی‌متر از یکدیگر در نظر گرفته شد. فاصله هر بوته روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود. به‌منظور دستیابی به تراکم مورد نظر، عملیات تنک در مرحله شش برگ صورت گرفت. آبیاری تمام کرت‌ها تا مرحله استقرار کامل گیاه (مرحله ۸-۶ برگ) به‌صورت یکسان و بر اساس ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A که در فاصله ۱۵۰ متری از مزرعه قرار داشت انجام پذیرفت. از این مرحله به بعد تیمارهای آبیاری اعمال شد. در طول دوره رشد گیاهان بارندگی رخ نداد. آبیاری به صورت سطحی (غرقابی) و با استفاده از لوله پلی‌اتیلنی با در اختیار داشتن دبی آب خروجی به نحوی انجام گرفت که حجم آب یکسانی وارد هر کرت گردید. تعداد دور آبیاری و میزان کل آب آبیاری در آزمایش مزرعه‌ای برای رقم میان‌رس DC 370 در تیمارهای  $W_1$ ،  $W_2$  و  $W_3$  به ترتیب ۱۷، ۱۱ و ۸ دور آبیاری و ۶۸۰، ۴۴۰ و ۳۲۰ میلی‌متر بود. این مقادیر برای دو رقم ZP 677 و SC 704 که ارقام دیررس هستند به ترتیب ۲۲، ۱۴ و ۹ دور و ۸۸۰، ۵۴۰ و ۳۶۰ میلی‌متر بود. در طول دوره رشد ارقام ذرت تمام عملیات داشت از قبیل کنترل آفات و علف‌های هرز برای تمام تیمارها به‌صورت یکسان انجام گرفت.

### داده‌های گیاه زراعی

در طول دوره رشد ارقام ذرت، تاریخ آغاز هر فاز نموی گیاه (سبز شدن، طویل شدن ساقه، ظهور تاسل، ظهور کاکل، شیری شدن، خمیری شدن و رسیدگی دانه) برای هر رقم ثبت شد (Abedinpour *et al.*, 2012). شاخص سطح برگ برای هر رقم و در مرحله ظهور تاسل با استفاده از

پارامترهای خاص رقم<sup>۲</sup>، مخصوص کاربر<sup>۳</sup> و کمتر محافظه کارانه<sup>۴</sup> نامیده شده و طول دوره‌های رشدی و فنولوژی را مشخص می‌کنند (Raes *et al.*, 2010; Shrestha *et al.*, 2013; Khalili *et al.*, 2014). این پارامترها برای هر ناحیه و محصول با توجه به شرایط خاص خود متغیر بوده و توسط کاربر تعیین می‌شوند، هرچند، اگر در دسترس نباشند مدل AquaCrop آنها را تخمین می‌زند. جدول ۵ پارامترهای متغیر ورودی مدل در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای سایر پارامترها از مقادیر پیش فرض مدل استفاده شد. این مقادیر بهینه بوده و اصولاً به اصلاح و واسنجی نیاز ندارند (Ebrahimi *et al.*, 2015).

#### واسنجی مدل AquaCrop

داده‌های مربوط به تیمارهای سطح آبیاری مطلوب برای واسنجی مدل و به‌دست آوردن پارامترهای گیاهی استفاده شد. در نهایت واسنجی مدل با وارد کردن پارامترهای گیاهی به گونه‌ای صورت گرفت که خطای نسبی بین عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و کارایی مصرف آب شبیه سازی شده با مقادیر به‌دست آمده از آزمایش مزرعه‌ای حداقل باشد (Mohammadi *et al.*, 2015).

#### اعتبارسنجی و ارزیابی مدل

دقت پیش‌بینی‌های مدل توسط ضریب تعیین ( $R^2$ ) و شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده<sup>۵</sup> (nRMSE) برآورد شد. برای محاسبه ضریب تعیین از رابطه زیر استفاده شد:

پارامترهای گیاهی (جدول ۵) با استفاده از داده‌های گیاهی به‌دست آمده در شرایط عدم محدودیت آب مورد واسنجی قرار گرفتند. بعضی پارامترها خاص گیاه زراعی بوده و تحت تأثیر زمان، عملیات مدیریتی، موقعیت جغرافیایی یا اقلیم و نیز نوع رقم قرار نمی‌گیرند. به همین دلیل به‌عنوان پارامترهای محافظه کارانه<sup>۱</sup> یا ثابت شناخته می‌شوند (Raes *et al.*, 2010). این پارامترها به‌عنوان پیش‌فرض در مدل قرار داده شده و با داده‌های گیاهی که تحت شرایط مطلوب و بدون محدودیت رشد داده شده است واسنجی شده و برای شرایط تنش آبی از طریق تأثیر ضرایب حساسیت گیاه به تنش ( $K_s$ ) تعدیل شده و قابل کاربرد می‌شوند (Raes *et al.*, 2010). در مدل مذکور فرض بر این است هنگامی که پتانسیل آب کاهش می‌یابد، آب در دسترس گیاه کاهش یافته و مقادیر  $K_{s_{sen}}$  (ضریب تنش آبی برای پیری زودرس)،  $K_{s_{exp,w}}$  (ضریب تنش آبی برای توسعه کانوبی) و  $K_{s_{sto}}$  (ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزه‌ها) را تغییر می‌دهد (Mohammadi *et al.*, 2015). حداکثر پوشش سایه‌انداز ( $CC_x$ ) با استفاده از داده‌های حداکثر شاخص سطح برگ بر اساس تراکم کشت و توسط معادله ذیل محاسبه می‌شود (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009):

$$cc_x = 1.005 [1 - \exp(-0.6 \times LAI_x)]^{1.2}$$

برخی دیگر از اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی در مدل (از قبیل تاریخ و تراکم کاشت، زمان مراحل فنولوژیکی گیاه، حداکثر عمق ریشه)، بستگی به گونه گیاهی دارند و یا بر اساس شرایط مدیریتی مختلف مقادیر متفاوتی داشته که

۲- Cultivar-specific

۳- User-specific

۴- Less conservative parameters

۵- Normalized root mean square error

۱- Conservative parameters

اصلی بر عملکرد دانه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود و از بین اثرات متقابل فقط اثر برهمکنش تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن معنی‌دار شده و سایر اثرات برهمکنشی بر این صفت معنی‌دار نبود. این صفت نیز در واکنش به اثر متقابل تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن روندی مشابه با عملکرد دانه را نشان داد (جدول ۴). کارایی مصرف آب ذرت در بین سطوح آبیاری، کود نیتروژن و ارقام ذرت اختلاف معنی‌داری نشان داد. اثر متقابل آبیاری و کود نیتروژن بر این صفت نیز معنی‌دار بود، درحالی که سایر اثرات متقابل اختلاف معنی‌داری از نظر آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند (جدول ۳). تغییرات این صفت در واکنش به اثرات متقابل تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن نسبت صفات قبلی کاملاً متفاوت بود، به‌گونه‌ای که کمترین مقادیر مربوط به تیمارهای متعلق به سطح عدم تنش خشکی بود و میانگین‌ها تحت تأثیر سطوح تنش خشکی افزایش یافت. بیشترین کارایی مصرف آب در ارقام DC 370 و ZP 677 در تیمارهای مصرف ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار در شرایط آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر کلاس A به‌دست آمد. در حالی که در مورد رقم SC 704 بیشترین اعداد در نتیجه اعمال همان تیمارهای کود نیتروژن و آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی حاصل شد (جدول ۴).

#### واسنجی مدل AquaCrop

نتایج واسنجی مدل در شکل‌های ۱ تا ۳ آمده است. همان‌طور که نتایج آنالیز آماری شکل‌ها نشان می‌دهند همبستگی و انطباق خوبی بین داده‌های عملکرد دانه اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایش مزرعه‌ای مربوط به تیمارهای کود

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

nRMSE از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$nRMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n\bar{O}} \right]^{0.5}$$

که در روابط فوق  $P_i$ : مقادیر پیش‌بینی شده،  $O_i$ : مقادیر اندازه‌گیری شده،  $\bar{O}$ : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد (Bannayan and Hoogenboom., 2009). درصد انحراف<sup>۱</sup> (D%) نیز برای مقایسه پارامترهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به کار رفت (Greaves and Wang, 2016). همچنین، از نمودار خطی یک به یک برای نمایش نتایج واسنجی مدل استفاده شد.

#### نتایج و بحث

##### تجزیه واریانس صفات ارقام ذرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌های عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و کارایی مصرف آب ارقام ذرت در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که از نتایج جدول مشخص است عملکرد دانه ذرت به‌طور بسیار معنی‌داری تحت تأثیر اثرات اصلی آبیاری، نیتروژن و نوع رقم قرار گرفت. همچنین، اثرات متقابل تیمارهای آزمایش بر عملکرد دانه ذرت در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۴) نشان دهنده بهبود عملکرد دانه ارقام ذرت در شرایط عدم تنش آبی و افزایش سطح مصرف کود نیتروژن است، در حالی که افزایش دور آبیاری و عدم مصرف کود نیتروژن موجب کاهش عملکرد دانه در آزمایش مزرعه‌ای گردید. در مورد عملکرد بیولوژیکی نیز کلیه اثرات

۱ - Deviation percentage

مزرعه‌ای گزارش کرده است. اما اعداد عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در اکثر تیمارهای مصرف نیتروژن مربوط به سطوح آبیاری بعدی نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده کمتر بود. جدول ۹ نتایج ارزیابی شبیه‌سازی مدل AquaCrop برای عملکرد دانه ارقام ذرت را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج ارزیابی مدل، سازگاری مناسبی بین داده‌های حاصل از خروجی مدل و داده‌های واقعی وجود داشت، به طوری که اعتبارسنجی مدل با  $nRMSE$  معادل  $11/3$  درصد محاسبه شد. همچنین، ضریب تعیین به دست آمده ( $0/87$ ) بیانگر همبستگی خوب بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده است. محققین دیگری نیز با ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در منطقه کرج نشان دادند که این مدل از دقت کافی در تخمین عملکرد محصول در شرایط آبیاری کامل، کم آبیاری و آبیاری تکمیلی برخوردار بود (Alizade *et al.*, 2010).

بر اساس نتایج جدول ۶ تطابق و همبستگی خوبی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در مورد رقم ZP 677 در پاسخ به روند تغییرات دسترسی به کود نیتروژن در شرایط عدم محدودیت آب به دست آمد و بین دو سری داده اختلاف کمی وجود داشت. این اختلاف با افزایش سطح تنش خشکی ناشی از افزایش دور آبیاری بیشتر شد و در سطح تنش خشکی شدید میزان مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل به خصوص در تیمار مصرف ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن به طور محسوسی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر بود. در نتیجه تحقیق دیگری نیز مشخص شده است که دقت پیش‌بینی مدل AquaCrop تحت شرایط آبیاری مطلوب نسبت به تیمارهای کم آبیاری بیشتر بود (Alizadeh *et al.*, 2010).

نیتروژن در سطح آبیاری مطلوب با داده‌های حاصل از خروجی شبیه‌سازی مدل وجود داشت. کمترین ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده از واسنجی رقم ZP 677 و بیشترین ضریب تعیین در واسنجی ارقام ZP 677 و DC 370 به دست آمد.

مقایسه داده‌های عملکرد بیولوژیکی خروجی مدل AquaCrop در مورد سه رقم ذرت نسبت به داده‌های به دست آمده از آزمایش مزرعه‌ای گویای واسنجی قابل قبول مدل در ارتباط با این صفت می‌باشد. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای ارقام DC 370، ZP 677 و SC 704 به ترتیب  $4/47$ ،  $2/75$  و  $3/39$  بود. در حالی که ضریب تعیین برای این ارقام به ترتیب ۹۹، ۹۰ و ۸۸ درصد محاسبه شد.

کارایی مصرف آب ارقام ذرت حاصل از داده‌های خروجی مدل نسبت به مقادیر واقعی حاصل از آزمایش مزرعه‌ای تطابق و همبستگی بالایی را نشان داد.  $nRMSE$  برای سه رقم مذکور به ترتیب  $6/77$ ،  $1/55$  و  $3/29$  به دست آمد. همچنین  $R^2$  برای این سه رقم به ترتیب ۹۴، ۱۰۰ و ۹۳ درصد محاسبه شد.

#### ارزیابی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop عملکرد دانه

جدول ۶ مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده مربوط به عملکرد دانه ارقام مختلف ذرت دانه‌ای در پاسخ به فراهمی آب و نیتروژن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مدل پاسخ رقم DC 370 به تنش خشکی ناشی از افزایش فواصل آبیاری را با دقت نسبتاً قابل قبولی پیش‌بینی کرده است. مدل میزان افزایش عملکرد در نتیجه افزایش کاربرد نیتروژن در سطح آبیاری مطلوب را بیشتر از مقادیر ثبت شده در آزمایش

در شرایط اقلیمی گناباد برخوردار است (جدول ۹).

### عملکرد بیولوژیکی

داده‌های جدول ۷ به خوبی نشان می‌دهند که مقادیر عملکرد بیولوژیکی پیش‌بینی شده توسط مدل AquaCrop برای هر سه رقم به‌طور کلی اختلاف بیشتری نسبت به مقادیر مشاهده شده در آزمایش در قیاس با عملکرد دانه ذرت نشان داد. این اختلاف با افزایش تنش خشکی (از سطح آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر تا آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) به تدریج بیشتر شد که مشخص کننده کاهش کارایی مدل در تخمین عملکرد بیولوژیکی ذرت در شرایط تنش خشکی است. محققین دیگری نیز دقیق‌تر بودن پیش‌بینی مدل AquaCrop در شرایط آبیاری کامل نسبت به تیمارهای تنش خشکی را گزارش کرده‌اند (Abedinpour et al., 2012).

در مورد رقم DC 370 هرچند مدل روند کاهش و افزایش عملکرد بیولوژیکی در واکنش به کاهش فراهمی آب و افزایش دسترسی به نیتروژن را به خوبی شبیه‌سازی کرد، اما به‌جز تیمار عدم مصرف نیتروژن تحت شرایط آبیاری مطلوب ( $W_1N_1$ ) مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود. مقدار nRMSE به دست آمده (۰/۱۹/۲) نشان‌دهنده دقت و کارایی نسبتاً خوب مدل برای برآورد عملکرد بیولوژیکی این رقم است، هرچند مدل در برآورد عملکرد دانه این رقم کارایی بهتری نشان داد. نتایج در مورد  $R^2$  (۰/۷۱) نیز به همین صورت بوده و میزان همبستگی داده‌ها کمتر از نتایج مربوط به عملکرد دانه بود (جدول ۹).

مقدار  $nRMSE=۰/۶/۱۱$  نشان‌دهنده کارایی بسیار خوب مدل در تخمین عملکرد رقم ZP 677 می‌باشد. همچنین،  $R^2=۰/۸۹$  بیانگر همبستگی و نزدیکی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در این آزمایش می‌باشد (جدول ۹). کارایی بالای مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه جو در منطقه شرق آفریقا نیز گزارش شده است (Araya et al., 2010).

داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهند که کمترین اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده برای رقم SC 704 در تیمارهای مربوط به سطح اول آبیاری مشاهده شد. اما با افزایش تنش خشکی این اختلاف به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته و از میزان همبستگی داده‌ها کاسته شد. نشان داده شده است که مدل AquaCrop در شرایط آبیاری کامل و یا حتی تنش ملایم عملکرد دانه ذرت را خوب شبیه‌سازی می‌کند (Heng et al., 2009). اما پیش‌بینی مدل برای تیمارهای تنش خشکی شدید مطلوب نبود. در مورد این رقم نیز در اغلب حالات مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر ثبت شده و واقعی بود. مدل افزایش عملکرد دانه در نتیجه افزایش مصرف کود نیتروژن را در سطح آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر با اختلاف نسبتاً زیادی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش پیش‌بینی نمود که نشان‌دهنده پایین آمدن دقت مدل در تخمین عملکرد دانه در شرایط تنش خشکی است. مقدار nRMSE و  $R^2$  به دست آمده (۰/۱۸/۲ و ۰/۷۵) نشان داد که مدل AquaCrop عملکرد دانه رقم SC 704 را نسبت به دو رقم دیگر با دقت کمتری پیش‌بینی می‌کند. هرچند اعداد به‌دست آمده بیانگر آن است که مدل از توانایی خوبی در ارزیابی عملکرد این رقم



بیشترین مقادیر را دارا بود. علاوه بر این، مدل در اغلب حالات (خصوصاً در تیمارهای نیتروژن مربوط به سطح دوم آبیاری) عملکرد بیولوژیکی کمتری نسبت به مقادیر واقعی گزارش کرد. نتایج ارزیابی شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی مشخص کرد که پیش‌بینی توسط مدل AquaCrop برای اثرات سطوح مختلف آبیاری و کود نیتروژن با nRMSE معادل با ۱۶/۹٪ خوب بوده است. البته میزان  $R^2$  به دست آمده برای این رقم در شرایط مذکور (۰/۶۸) نسبت به سایر ارقام پایین بوده که گویای همبستگی و قرابت کمتر دو سری داده شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است (جدول ۹).

#### کارایی مصرف آب (WUE)

نتایج کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop و مقایسه آن با داده‌های به دست آمده از آزمایش مزرعه‌ای در جدول ۸ آمده است. همان‌طور که مشخص است مدل روند تغییرات این پارامتر را برای رقم DC 370 در نتیجه تغییر در میزان آب در دسترس و کود نیتروژن مطابق با شرایط مزرعه‌ای شبیه‌سازی کرد. اگرچه مقادیر خروجی مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در تیمارهای سطح اول آبیاری بیشتر و در مورد اغلب تیمارهای سطوح آبیاری دوم و سوم کمتر بود. بر اساس نتایج، کارایی مصرف آب با کاهش تعداد دور آبیاری افزایش و با افزایش نیتروژن مصرفی افزایش نشان داد. در همین ارتباط، نتایج پژوهش دیگری نشان داده است که کاهش دور آبیاری باعث افزایش کارایی مصرف آب می‌شود (Oktem et al., 2003). بیشترین کارایی مصرف آب هم در مورد خروجی‌های مدل و هم در مورد مقادیر اندازه‌گیری شده از تیمار  $W_3N_4$  و کمترین آن از تیمار  $W_1N_1$  به دست آمد. شاخص ضریب تعیین

داده‌های جدول ۷ بیانگر تطابق و نزدیکی مقادیر عملکرد بیولوژیکی مشاهده شده رقم ZP 677 با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است. این انطباق در سطح اول آبیاری نسبت به سایر سطوح بیشتر بود. همان‌طور که داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده نشان می‌دهند با افزایش میزان نیتروژن از سطح صفر تا سطح بعدی عملکرد بیولوژیکی به میزان قابل توجهی افزایش یافت. اما نرخ این افزایش در سطوح سوم و چهارم کاهش نشان داد که خود می‌تواند بیانگر قانون بازده نزولی میچرلیخ باشد. بر طبق این قانون واکنش گیاه به افزایش عنصر محدود کننده خطی نبوده و میزان افزایش رشد و عملکرد با افزایش میزان فراهمی عنصر محدود کننده سیر نزولی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارزیابی مدل (جدول ۹)، مقادیر شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده همبستگی خوبی با یکدیگر داشته به نحوی که میزان  $R^2$  برای این رقم ۰/۸۷ به دست آمد. علاوه بر این، میزان nRMSE برای این رقم پایین (۰/۱۰/۴) بود که نشان می‌دهد مدل کارایی خوبی برای پیش‌بینی عملکرد بیولوژیکی این رقم دارد. نتایج مطالعه دیگری نیز نشان داد که مدل AquaCrop به‌طور قابل قبولی زیست توده اندام هوایی را برای چهار رقم ذرت با تیمارهای مختلف آبیاری به کار رفته شبیه‌سازی کرده است (Hsiao et al., 2009).

داده‌های جدول ۷ نشان می‌دهند که مدل AquaCrop تغییرات عملکرد بیولوژیکی رقم SC 704 در نتیجه تغییر سطوح آبیاری و کود نیتروژن را مطابق با شرایط مزرعه‌ای پیش‌بینی کرد، هرچند اختلافاتی بین دو سری داده مشاهده شد که این اختلاف در سطح اول آبیاری (عدم تنش آبی) کمترین و در سطح دوم (تنش ملایم)

بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در مورد رقم ZP 677 بالا نبود ( $R^2=0/63$ )، اما nRMSE به دست آمده (۱۵/۳۸٪) گواه بر دقت و توانایی خوب مدل در پیش‌بینی شاخص مذکور در شرایط مشابه با محل آزمایش است (جدول ۹).

توانایی مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب رقم SC 704 تحت شرایط مختلف رطوبتی و نیتروژن خاک به غیر از سطح آبیاری مطلوب نسبتاً پایین بود. کمترین اختلاف در تیمار  $W_1N_1$  و بیشترین اختلاف در تیمارهای  $W_3N_3$  و  $W_3N_4$  مشاهده شد. در نتیجه آزمایشی که در نجف‌آباد اصفهان صورت گرفت نیز افزایش اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده کارایی مصرف آب ذرت با افزایش سطح تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل گزارش شد (Salemi *et al.*, 2011a). همانند رقم قبل، نتایج مدل و مشاهدات مزرعه‌ای در مورد بهترین تیمار برای دستیابی به بالاترین مقدار کارایی مصرف آب متفاوت بود (جدول ۸). با توجه به نتایج ارزیابی مدل ( $R^2=0/34$  و  $nRMSE=0/22/12$ )، دقت پیش‌بینی مدل در برآورد کارایی مصرف ذرت رقم SC 704 در منطقه مورد مطالعه (گناباد) متوسط ارزیابی شد (جدول ۹).

### نتیجه‌گیری کلی

به‌منظور ارزیابی و اعتبارسنجی مدل AquaCrop در پیش‌بینی تغییرات صفات کمی هیبریدهای ذرت دانه‌ای، ابتدا مدل تحت شرایط آبیاری مطلوب مورد واسنجی قرار گرفت. داده‌های آماری سنجش دقت مدل نشان دهنده واسنجی مناسب مدل برای سه رقم DC 370، ZP677 و SC 704 بود. نتایج اعتبارسنجی مدل که با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده انجام گرفت گویای

محاسبه شده (۰/۸۳) نشان‌دهنده همبستگی خوب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است. همچنین nRMSE به دست آمده (۱۰/۲ درصد) نشان داد که مدل با دقت بسیار خوبی کارایی مصرف آب این رقم ذرت را در شرایط اقلیمی و خاکی مورد مطالعه پیش‌بینی می‌کند (جدول ۹). نتایج بررسی پژوهشگران دیگری نیز با این نتایج همخوانی دارد (Salemi *et al.*, 2011b).

جدول ۸ نشان می‌دهد مدل به خوبی واکنش رقم ZP 677 را به مدیریت آب و نیتروژن شبیه‌سازی کرده است. البته در بیشتر حالات مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده پایین‌تر بودند. این اختلاف در سطح آبیاری مطلوب کمتر و با افزایش تنش خشکی بیشتر شد، به گونه‌ای که بیشترین خطای نسبی در تیمار مصرف ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن تحت شرایط تنش خشکی شدید حاصل شد. همچنین، نتایج گویای این واقعیت است که هرچه مقدار آب در دسترس کاهش یافت بر میزان این شاخص افزوده شد. مشابه با این نتایج، به کارایی مصرف آب بیشتر گیاه جو تحت شرایط تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل اشاره شده است (Nagaz *et al.*, 2008). بر طبق نتایج خروجی مدل در مورد اثرات کود نیتروژن بر این صفت، کاهش دسترسی به نیتروژن اثر منفی بر این صفت گذاشته و آن را کاهش داد. نتایج مدل در مورد توصیه بهترین تیمار با نتایج مزرعه‌ای به دست آمده متفاوت بود، به‌صورتی که مدل بهترین تیمار را  $W_3N_4$  معرفی کرده، اما بر اساس نتایج مزرعه‌ای تیمار  $W_2N_4$  بهترین تیمار در جهت حصول بیشترین کارایی مصرف آب بود. ارزیابی مدل مشخص کرد که اگرچه همبستگی

سطوح فراهمی آب و نیتروژن داشت. هرچند، مدل نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده مقادیر را بیش برآورد محاسبه کرده و برعکس، در مورد اغلب تیمارهای تنش خشکی مقادیر کم برآورد بود.

### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری صمیمانه پرسنل محترم ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گناباد که با در اختیار گذاشتن امکانات مزرعه‌ای ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند تقدیر و تشکر می‌گردد.

شبیه‌سازی با دقت بالای مدل در تخمین عملکرد دانه و پیش‌بینی تغییرات آن منطبق با شرایط مزرعه‌ای در سطوح مختلف فراهمی آب و نیتروژن بود. مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل شبیه‌سازی برای عملکرد بیولوژیکی ذرت بیانگر انحراف و اختلاف بیشتر دو سری داده و در نتیجه دقت پایین‌تر مدل در پیش‌بینی عملکرد بیولوژیکی نسبت به عملکرد دانه بود. علاوه بر این، با افزایش سطح تنش خشکی میزان این اختلاف بیشتر شد. مدل AquaCrop پیش‌بینی قابل قبولی از تغییرات کارایی مصرف آب هیبریدهای ذرت دانه‌ای در نتیجه تغییر در

جدول ۱- میانگین پارامترهای هواشناسی ماهیانه محل آزمایش در طول دوره رشد ارقام ذرت

**Table 1-** Mean monthly meteorological parameters of experimental area during growing period of corn hybrids

ماه	Month	سرعت باد Wind velocity (m.s <sup>-1</sup> )	تشعشع Radiation (MJ.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> )	رطوبت نسبی حداقل Min relative humidity (%)	رطوبت نسبی حداکثر Max relative humidity (%)	درجه حرارت حداقل Min Temp. (°C)	درجه حرارت حداکثر Max Temp. (°C)	بارندگی Rainfall (mm)
اردیبهشت	May	8.4	11.1	45.2	24.5	19.1	32.5	16.0
خرداد	June	7.9	12.5	30.2	16.4	23.1	36.5	0.0
تیر	July	7.9	13.9	26.5	13.8	22.7	36.5	0.0
مرداد	August	7.4	13.6	26.1	13.3	22.6	37.0	0.0
شهریور	September	7.5	12.7	34.5	19.0	17.5	31.5	0.0

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

**Table 2-** Physical and chemical properties of experimental area soil

عمق Depth (cm)	بافت Texture	هدایت الکتریکی EC (ds.m <sup>-1</sup> )	اسیدیته pH	ماده آلی Organic matter (%)	نیترژن کل Total N (%)	فسفر قابل جذب Available P (ppm)	پتاسیم قابل جذب Available K (ppm)	رطوبت در ظرفیت زراعی Moisture in FC (%)	رطوبت در نقطه بزمردگی دائم Moisture in PWP (%)
0-30	Silt-sand	2.4	8.2	0.2	0.06	18	187	14.5	7.1

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات ارقام ذرت تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و کود نیترژن

**Table 3-** Analysis of variance of corn hybrids traits as affected by irrigation and N fertilizer treatments

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات MS		
		عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیکی Biological yield	کارایی مصرف آب Water use efficiency
تکرار Block	2	29565774**	1317496**	69**
آبیاری Irrigation (I)	2	90484709**	284350701**	130**
خطای Error a	4	5906297	911245	7.3
نیترژن Nitrogen (N)	3	12189532**	35455574**	23.5**
آبیاری×نیترژن I×N	6	3418720**	15805896**	3.5*
خطای Error b	18	1031216	3339937	2.9
رقم Hybrid (H)	2	34793830**	101557122**	80*
آبیاری×رقم I×H	4	3148881**	1159147 <sup>ns</sup>	3.9*
نیترژن×رقم N×H	6	1494179*	2918458 <sup>ns</sup>	2.2 <sup>ns</sup>
آبیاری×نیترژن×رقم I×N×H	12	946386*	1012614 <sup>ns</sup>	2.1 <sup>ns</sup>
خطای آزمایشی Error	48	517460	2376408	1.7
ضریب تغییرات CV (%)	-	12.9	11.2	14.2

ns, \*, و \*\* به ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

ns, \*, and \*\*= not significant, significant at P level of 0.05 and 0.01, respectively

**جدول ۴-** مقایسه میانگین صفات اندازه گیری شده ارقام ذرت تحت تأثیر اثر متقابل آبیاری و کود نیتروژن  
**Table 4-** Mean comparison of measured traits of corn hybrids as affected by irrigation and N fertilizer interaction effect

تیمار Treatment	SC 704 hybrid			ZP 677 hybrid			DC 370 hybrid		
	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	عملکرد بیولوژیکی Biological yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	کارایی مصرف آب WUE (kg.m <sup>-3</sup> )	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	عملکرد بیولوژیکی Biological yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	کارایی مصرف آب WUE (kg.m <sup>-3</sup> )	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	عملکرد بیولوژیکی Biological yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	کارایی مصرف آب WUE (kg.m <sup>-3</sup> )
I <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	6144abc	13265dc	6.68c	5734dc	12564bc	6.23d	3707c	9577c	5.45e
I <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	8600ab	17833abc	9.35b	8767a	17998a	9.53cd	5329abc	14305ab	7.84e
I <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	8994a	18433ab	9.78b	9293a	18942a	10.10bcd	6229ab	15230ab	9.16cde
I <sub>1</sub> N <sub>4</sub>	9707a	19120a	10.54ab	9333a	18180a	10.14bcd	6656a	16189a	9.79cde
I <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	5943abc	12253cd	11.00ab	4544cd	10160bcd	8.41cd	3153c	8760cd	7.17e
I <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	7445ab	14870cd	13.79a	6042bcd	13526bc	11.19bc	4600c	12296bc	10.45b
I <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	7696ab	16571bc	14.25a	7251abc	14882b	13.43a	5033bc	12636bc	11.44b
I <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	8573ab	16750bc	15.88a	7520ab	14722b	13.93a	5213bc	13830b	11.85b
I <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	2667c	9190d	7.41bc	2747d	9167d	7.63d	2233c	7670cde	6.98e
I <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	3941bc	11260cd	10.95ab	4215cd	10923bcd	11.71bc	3577c	10540bcd	11.18ab
I <sub>3</sub> N <sub>3</sub>	4053bc	12430cd	11.26ab	4631c	12696bc	12.86b	3962c	11490bcd	12.38a
I <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	4149bc	13200cd	11.53ab	4188cd	11900bc	11.63b	4167c	11513bcd	13.02a

میانگین‌های دارای حروف مشابه اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند (آزمون دانکن)

Means followed by the same letter have not significant difference at p 0.05 (Duncan test)

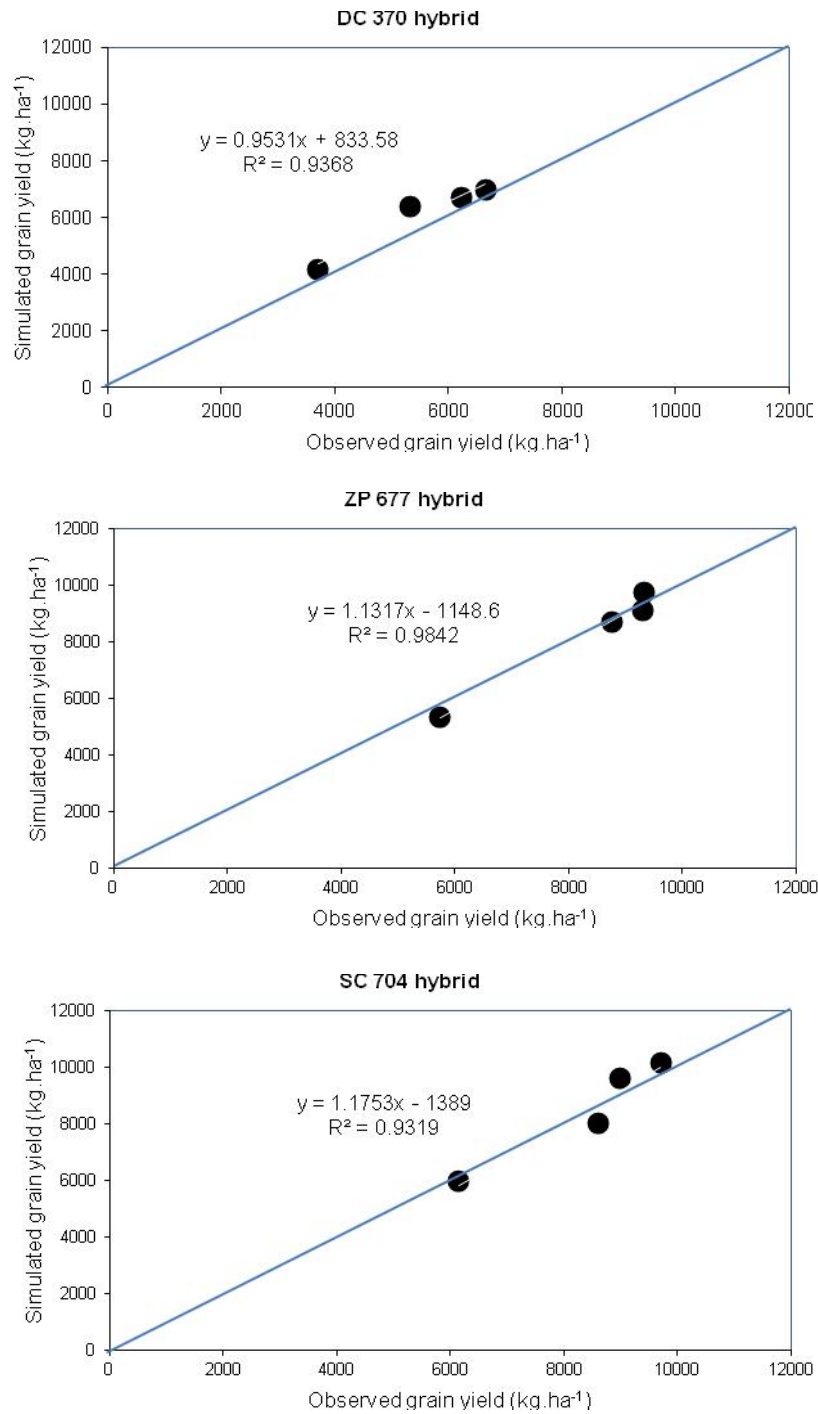
**جدول ۵-** برخی پارامترهای گیاهی مربوط به مراحل مختلف فنولوژیکی ارقام ذرت بکار رفته در مدل AquaCrop.  
**Table 5-** Some crop parameters related to different phenological stages of corn hybrids applied in AquaCrop model (Hsiao *et al.*, 2009; Heng *et al.*, 2009)

	SC 704 hybrid	ZP 677 hybrid	DC 370 hybrid
تراکم گیاهی Plant density (plant.m <sup>-2</sup> )	6.5	6.5	6.5
مراحل فنولوژیکی (تعداد روز از زمان کاشت) Phenological stages (days from planting)			
Emergence سبز شدن	6	6	6
Maximum canopy cover حداکثر پوشش سایه انداز	57	73	65
Flowering گلدهی	62	74	72
Maximum rooting depth حداکثر عمق ریشه دهی	76	86	90
Start canopy cover senescence شروع پیری پوشش سایه انداز	84	99	98
Physiological maturity رسیدگی فیزیولوژیکی	98	117	118
Maximum canopy cover (%) حداکثر پوشش سایه انداز	90	95	93
Maximum rooting depth (cm) حداکثر عمق ریشه دهی	150	175	180
Reference harvest index (%) شاخص برداشت مرجع	43	48	48

**جدول ۶-** عملکرد دانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام ذرت و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل  
**Table 6-** Simulated and observed grain yield of corn hybrids and deviation percentage for model simulation

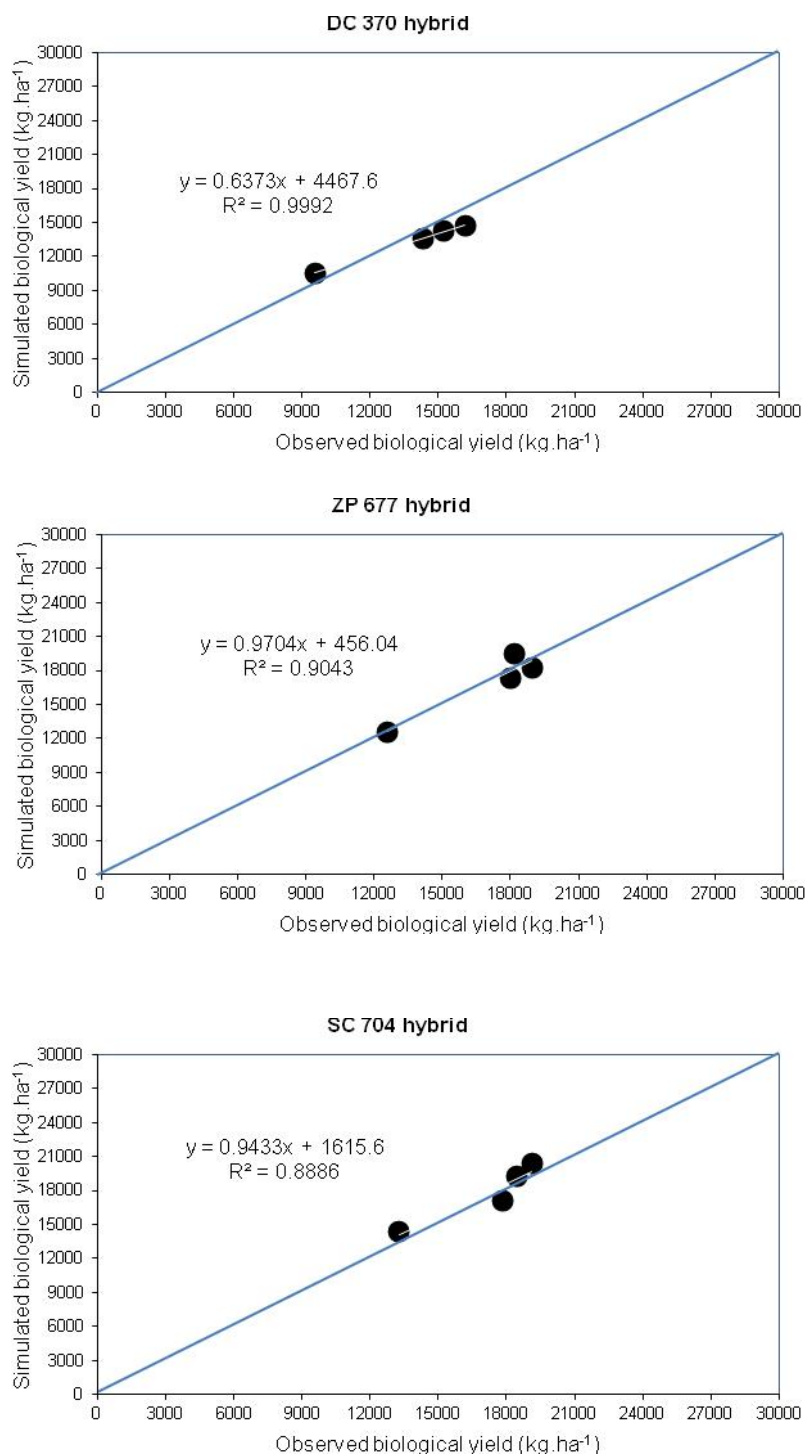
تیمار Treatment	SC 704 hybrid			ZP 677 hybrid			DC 370 hybrid		
	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.ha <sup>-1</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.ha <sup>-1</sup> )	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.ha <sup>-1</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.ha <sup>-1</sup> )	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.ha <sup>-1</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.ha <sup>-1</sup> )
I <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	3	5968	6144	7	5358	5734	-12	4162	3707
I <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	7	8009	8600	1	8678	8767	-16	6184	5329
I <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	-7	9603	8994	2	9115	9293	-8	6719	6229
I <sub>1</sub> N <sub>4</sub>	-5	10164	9707	-4	9743	9333	-5	6962	6656
I <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	23	4599	5943	2	4455	4544	-17	3678	3153
I <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	26	5502	7445	1	5960	6042	8	4211	4600
I <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	22	5999	7696	16	6063	7251	3	4900	5033
I <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	22	6707	8573	18	6191	7520	17	4311	5213
I <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	14	2306	2667	-9	3003	2747	3	2156	2233
I <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	-20	4715	3941	-21	5101	4215	-5	3743	3577
I <sub>3</sub> N <sub>3</sub>	-30	5286	4053	-14	5262	4631	4	3807	3962
I <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	-30	5403	4149	-28	5359	4188	8	3816	4167

\* Deviation (%) = (Simulated – observed) × 100/observed.



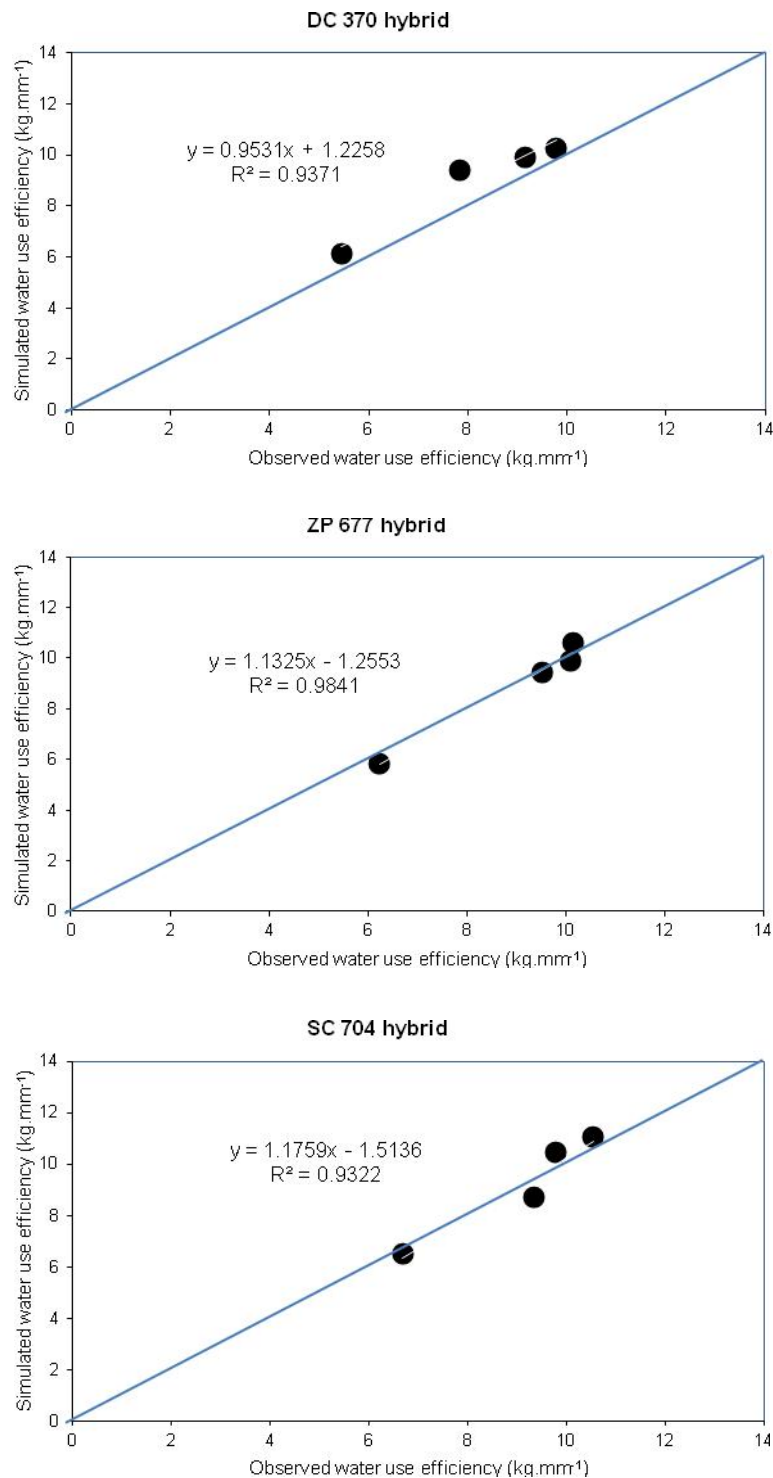
شکل ۱- عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ارقام ذرت در مرحله واسنجی مدل

**Figure 1-** Simulated and observed grain yield of corn hybrids during model calibration



شکل ۲- عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ارقام ذرت در مرحله واسنجی مدل  
**Figure 2-** Simulated and observed biological yield of corn hybrids during model calibration





شکل ۳- کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ارقام ذرت در مرحله واسنجی مدل

**Figure 3-** Simulated and observed water use efficiency of corn hybrids during model calibration

**جدول ۷-** عملکرد بیولوژیکی شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام ذرت و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل  
**Table 7-** Simulated and observed biological yield of corn hybrids and deviation percentage for model simulation

Treatment	SC 704 hybrid			ZP 677 hybrid			DC 370 hybrid		
	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.ha <sup>-1</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.ha <sup>-1</sup> )	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.ha <sup>-1</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.ha <sup>-1</sup> )	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.ha <sup>-1</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.ha <sup>-1</sup> )
I <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	-8	14377	13265	0	12578	12564	-10	10575	9577
I <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	4	17155	17833	4	17323	17998	5	13535	14305
I <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	-5	19281	18433	4	18176	18942	6	14247	15230
I <sub>1</sub> N <sub>4</sub>	-7	20405	19120	-7	19429	18180	9	14753	16189
I <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	17	10221	12253	-2	10406	10160	6	8199	8760
I <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	25	11116	14870	12	11915	13526	27	8959	12296
I <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	27	12115	16571	19	12127	14882	21	9955	12636
I <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	27	12216	16750	16	12358	14722	28	9986	13830
I <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	-6	9746	9190	-2	9350	9167	9	7006	7670
I <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	10	10129	11260	5	10409	10923	25	7953	10540
I <sub>3</sub> N <sub>3</sub>	14	10663	12430	17	10514	12696	30	8095	11490
I <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	17	10907	13200	10	10708	11900	23	8915	11513

**جدول ۸-** کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام ذرت و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل  
**Table 8-** Simulated and observed WUE of corn hybrids and deviation percentage for model simulation

Treatment	SC 704 hybrid			ZP 677 hybrid			DC 370 hybrid		
	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.m <sup>-3</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.m <sup>-3</sup> )	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.m <sup>-3</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.m <sup>-3</sup> )	انحراف Deviation (%)*	شبیه‌سازی شده Simulated (kg.m <sup>-3</sup> )	مشاهده شده Observed (kg.m <sup>-3</sup> )
I <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	3	6.49	6.68	7	5.82	6.23	-12	6.12	5.45
I <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	7	8.71	9.35	1	9.43	9.53	-20	9.39	7.84
I <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	-7	10.44	9.78	2	9.91	10.10	-8	9.88	9.16
I <sub>1</sub> N <sub>4</sub>	-5	11.05	10.54	-4	10.59	10.14	-5	10.24	9.79
I <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	23	8.52	11.00	2	8.25	8.41	-17	8.36	7.17
I <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	26	10.19	13.79	1	11.04	11.19	8	9.57	10.45
I <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	22	11.11	14.25	16	11.23	13.43	3	11.14	11.44
I <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	22	12.42	15.88	18	11.46	13.93	17	9.80	11.85
I <sub>3</sub> N <sub>1</sub>	13	6.41	7.41	-9	8.34	7.63	3	6.74	6.98
I <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	-20	13.10	10.95	-21	14.17	11.71	-5	11.70	11.18
I <sub>3</sub> N <sub>3</sub>	-30	14.68	11.26	-14	14.62	12.86	4	11.90	12.38
I <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	-30	15.01	11.53	-28	14.89	11.63	8	11.93	13.02

## جدول ۹- ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop برای پارامترهای ارقام ذرت

Table 9- Evaluation of AquaCrop model simulation for corn hybrids parameters

	میانگین داده‌های مشاهده شده $O_{mean}$	میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده $P_{mean}$	ضریب تعیین $R^2$	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده nRMSE (%)
DC 370 hybrid					
عملکرد دانه Grain yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	4471	4210	0.88	514	11.76
عملکرد بیولوژیکی Biological yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	12002	9774	0.82	1096	10.94
کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg.m <sup>-3</sup> )	11.62	11.05	0.79	1.45	12.45
ZP 677 hybrid					
عملکرد دانه Grain yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	6189	5811	0.93	434	7.47
عملکرد بیولوژیکی Biological yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	13805	12636	0.92	850	6.81
کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg.m <sup>-3</sup> )	14.33	14.43	0.92	0.92	6.44
SC 704 hybrid					
عملکرد دانه Grain yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	6110	5865	0.80	701	12.01
عملکرد بیولوژیکی Biological yield (kg.ha <sup>-1</sup> )	14583	12447	0.86	1273	9.66
کارایی مصرف آب Water use efficiency (kg.m <sup>-3</sup> )	14.52	14.45	0.65	1.93	13.27

## References

## منابع مورد استفاده

- Abedinpour, M., A. Sarangi, T.B.S. Rajput, M. Singh, H. Pathak, and T. Ahmad. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110: 55-66.
- Abrha, B., N. Delbecque, D. Raes, A. Tsegay, M. Todorovic, L. Heng, E. Vanuytrecht, S. Geerts, M. Garcia-Vila, and S. Deckers. 2012. Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with AquaCrop. *Experimental Agriculture*. 48(2): 252-271.
- Alizadeh, H.M., B. Nazari, M. Parsinezhad, H. Ramezani etedali, and R. Janbaz. 2010. Evaluation of AquaCrop model under water deficit management in Karaj region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2(4): 273-283. (In Persian).
- Araya, A., S. Habtub, K.M. Hadguc, A. Kebedea, and T. Dejene. 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*. 97: 1838-1846.
- Bannayan, M, and G. Hoogenboom. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*. 111: 290-302.
- Boote, K.J., J.W. Jones, and N.B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*. 88: 704-716.
- Ebrahimi, M., V.R. Verdinejad, and A. Mjnooni Heris. 2015. Dynamic simulation through AquaCrop of maize growth under different management decisions of water application and nitrogen fertilizer use. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 46(2): 207-220. (In Persian).
- García-Vila, M, and E. Fereres. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*. 36: 21-31.
- Geerts, S, and D. Raes. 2009. Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*. 96: 1275-1284.
- Geerts, S., D. Raes, and M. Garcia. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management*. 98(1): 213-216.
- Greaves, G.E, and Y.M. Wang. 2016. Assessment of FAO AquaCrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water*. 8(12): 1-18.
- Heng, L.K., S.R. Evett, T.A. Howell, and T.C. Hsiao. 2009. Calibration and testing of FAO AquaCrop model for rainfed and irrigated maize. *Agronomy Journal*. 101: 488-498.
- Howell, T. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*. 93: 281-189.
- Hsiao, T.C., L.K. Heng, P. Steduto, B. Rojas-Lara, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101: 448-459.
- Khalili, N., K. Davary, A. Alizadeh, M. Kafi, and H. Ansari. 2014. Simulation of rainfed wheat yield using AquaCrop model, case study: Sisab. Rainfed Researches Station, Northern Khorasan. *Journal of Water and Soil*. 28(5): 930-939.

- Mhizha, T. 2010. Increase of yield stability by staggering the sowing dates of different varieties of rainfed maize in Zimbabwe. Ph.D. thesis. KU Leuven. Belgium. 166p.
- Mohammadi, M., K. Davari, B. Ghahraman, H. Ansari, and A. Haghverdi. 2015. Calibration and validation of AquaCrop model for simulation of spring wheat yield under simultaneous salinity and water stress. *Journal of Water Research in Agriculture*. 29(3): 277-295. (In Persian).
- Nagaz, K., I. Toumi, M.M. Masmoudi, and N.B. Mechilia. 2008. Soil salinity and barley production under full and deficit irrigation with saline water in arid conditions of Southern Tunisia. *Research Journal of Agronomy*. 2: 90-95.
- Oktem, A., M. Simsek, and A.G. Oktem. 2003. Deficit irrigation effects on sweet maize (*Zea mays saccharata Sturt*) with drip irrigation system in a semi-arid region I. Water-yield relationship. *Agricultural Water Management*. 61: 63-74.
- Paredes, P., J.P. de Melo-Abreu, I. Alves, and L.S. Pereira. 2014. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management*. 144: 81-97.
- Pereira, L.S., P. Paredes, E.D. Sholpankulov, O.P. Inchenkova, P.R. Teodoro, and M.G. Horst. 2009. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management*. 96: 723-735.
- Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres. 2010. Reference manual AquaCrop (Version 3.1). Rome, Italy: Land and Water Development Division. FAO, 89p.
- Salemi, H.R., M.A.M. Soom, S.F. Mousavi, A. Ganji, T.S. Lee, M.K. Yusof, and V.R. Verdinejad. 2011a. Irrigated silage maize yield and water productivity response to deficit irrigation in an arid region. *Polish Journal of Environmental Studies*. 20(5):1295-1303.
- Salemi, H.R., M.A.M. Soom, T.S. Lee, S.F. Mousavi, A. Ganji, and M.K. Yusoff. 2011b. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal Agricultural Research*. 6: 2204-2215.
- Shrestha, N., D. Raes, E. Vanuytrecht, and S.K. Sah. 2013. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. *Agricultural Water Management*. 122: 53-62.
- Sinclair, T.R, and N.G. Seligman. 1996. Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal*. 88: 698-704.
- Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres. 2009. AquaCrop. The FAO crop model to predict yield response to water. *Agronomy Journal*. 101: 426-437.
- Todorovic, M., R. Albrizio, L. Zivotic, M.T. Abi Saab, C. Stöckle, and P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*. 101: 509-521.

## Evaluation of AquaCrop Model in Simulating Yield and Water Use Efficiency of Three Corn Hybrids under Hot-Dry Climatic Conditions

Yaser Esmaeilian<sup>1\*</sup> and Mahmoud Ramroudi<sup>2</sup>

Received: March 2017, Revised: 4 May 2018, Accepted: 26 September 2018

### Abstract

Nowadays, crop simulation models have a key role in crop growth and yield estimation, production planning, production economy and identifying strategies for crops supply. In this research, AquaCrop model was calibrated and evaluated for three corn hybrids; (DC 370, ZP 677, and SC 704) under different levels of water supply (non stress, mid stress, and severe stress) and nitrogen rates (0, 120, 180, and 240 kg N/ha). For model validation, normalized root mean square error (nRMSE) and determination of coefficient ( $R^2$ ) were used. Result showed that the model simulated grain yield of corn hybrids with high precision. Simulation precision decreased with increasing drought stress. The lowest nRMSE (7.5%) and highest  $R^2$  (0.93) were obtained from ZP 677 hybrid. The model simulated corn biological yield with more deviation percentage than grain yield. However, its variation trend due to variation in drought stress level or nitrogen fertilizer predicted well according to field experiment. nRMSE ranged from 6.8 and 10.9, while  $R^2$  varied from 0.82 to 0.92. AquaCrop model simulated the variation of water use efficiency of corn hybrids with reasonable accuracy, so that its value increased with increasing drought stress and nitrogen fertilizer application, while, model outputs in most situations were lower than measured values. The best model validation result (nRMSE=6.4% and  $R^2= 0.93$ ) obtained from ZP 677 hybrid. According to the results were obtained, AquaCrop model can be applied with high reliability for simulating corn yield under similar climatic regions of this experiment.

**Key words:** AquaCrop model, Drought stress, Simulation, Water use efficiency, Yield.

1- Assistant professor, Department of Agriculture and Natural Resources, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

2- Associate professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.

\* Corresponding Author: [y.esmaeilian@Gonabad.ac.ir](mailto:y.esmaeilian@Gonabad.ac.ir)