

شبیه‌سازی رشد ذرت تحت مدیریت‌های مختلف آب و نیتروژن با مدل AquaCrop

میلاد ابراهیمی^۱، وحید رضاوردی‌نژاد^{۲*}، ابوالفضل مجنون‌ی‌هریس^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹)

چکیده

در این مطالعه کارایی مدل شبیه‌سازی رشد گیاه AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه، رشد ماده خشک، و پوشش گیاهی ذرت تحت مدیریت‌های مختلف عمق آبیاری و نیتروژن ارزیابی شد. آزمایش مزرعه‌ای با سه سطح نیتروژن شامل ۰ و ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار (به ترتیب N_1 و N_2 و N_3) و چهار عمق آبیاری شامل ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد تخلیه رطوبت خاک (به ترتیب I_1 ، I_2 ، I_3 و I_4) با سه تکرار طی دو سال و به صورت طرح بلوک کامل تصادفی اجرا شد. مدل AquaCrop بر اساس اطلاعات زراعی سال اول آزمایش واسنجی و سال دوم اعتبارسنجی شد. به طور کلی، مدل AquaCrop دقت بالایی در شبیه‌سازی رشد ذرت داشت. اما در سطح آبیاری I_1 در تخمین ماده خشک و سطح کودی N_1 در تخمین پوشش گیاه دقت کمتری نشان داد. متوسط ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE) تخمین عملکرد دانه در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۷/۸۹ و ۴/۸۶ درصد به دست آمد. در پیش‌بینی رشد ماده خشک، در سطح نیتروژن معین، افزایش تنش آبی باعث افزایش خطای پیش‌بینی ماده خشک توسط مدل شد. در همه تیمارها ماده خشک به صورت بیش‌برآورد پیش‌بینی شد و متوسط NRMSE پیش‌بینی رشد ماده خشک در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۱۸/۷ و ۲۰/۹ درصد محاسبه شد. همچنین، مدل AquaCrop رشد پوشش گیاهی در سطح نیتروژن N_2 را با دقت بالا پیش‌بینی کرد؛ اما در سطوح نیتروژن N_1 و N_3 به ترتیب خطای کم‌برآورد و بیش‌برآورد نشان داد. متوسط خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) تخمین پوشش گیاهی (کل تیمارها) در واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۱۱/۷ و ۷/۳ درصد محاسبه شد.

کلیدواژگان: رشد پوشش گیاهی، رشد ماده خشک، شیراز، عملکرد دانه، مدل رشد گیاه.

مقدمه

ذرت، به لحاظ چهارکربنه بودن و گرماپسندی، با مناطق خشک و نیمه‌خشک سازگاری خوبی دارد (De Juan Valero *et al.*, 2005). با توجه به اهمیت وجود آب در جذب عناصر غذایی و به‌ویژه نیتروژن، مطالعه برهم‌کنش تنش خشکی و میزان نیتروژن قابل دسترس گیاه اهمیتی بسزا دارد (Majidian *et al.*, 2008). آب و نیتروژن از عوامل اصلی محدودکننده دستیابی به حداکثر محصول است و مدیریت صحیح این دو، علاوه بر کاهش هزینه، افزایش کارایی مصرف آن‌ها را نیز به دنبال خواهد داشت (Kropff *et al.*, 1993). مدیریت نامناسب آبیاری و نیتروژن از عوامل بسیار مهم کاهش عملکرد ذرت است (Norwood, 2000). در شرایط کمبود آب، که بر جذب عناصر غذایی، به‌ویژه نیتروژن، تأثیر می‌گذارد، لزوم برقراری تناسب میان نیتروژن

مصرفی و تأمین رطوبت خاک ضروری است (Majdam *et al.*, 2008). Patel *et al.* (2006) استفاده از نیتروژن را زمانی در افزایش کارایی مصرف آب مؤثر دانستند که آب کافی برای رشد گیاه وجود داشته باشد. مقدار نیتروژن قابل دسترس بر توزیع مواد فتوسنتزی بین اندام‌های زایشی و رویشی مؤثر است و مراحل فنولوژیکی رشد و نمو گیاه در اثر کمبود نیتروژن به تأخیر می‌افتد (Girardin *et al.*, 1987). Gheysari *et al.* (2009a) در بررسی اندرکنش و اثر متقابل آب و نیتروژن بر عملکرد ذرت علوفه‌ای در منطقه ورامین، سطح بهینه آبیاری را تأمین ۸۵ درصد مقدار تخلیه آب (SWD)^۱ به دست آوردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد، در شرایط تنش خشکی، افزایش کاربرد نیتروژن به منظور افزایش ماده خشک ذرت استراتژی مناسبی نیست و موجب اتلاف نیتروژن می‌شود. همچنین آن‌ها

1. SWD: Soil Water Depletion

* نویسنده مسئول: Rezaverdinejad@gmail.com

بیلان نیتروژن را در نیمرخ خاک بررسی کردند و به منظور پیشگیری از آبشویی نترات مقادیر بهینه کاربرد نیتروژن را برای سطوح مختلف آب کاربردی به دست آوردند. مطابق یافته‌های آن‌ها با مدیریت صحیح عمق آبیاری و نیتروژن کاربردی امکان جلوگیری از آبشویی نیتروژن از ناحیه ریشه وجود دارد (Gheysari *et al.*, 2009b).

آزمایش‌های مزرعه‌ای برای بررسی آثار متقابل مقادیر کود و آب مفید، اما هزینه‌بر است. از سایر محدودیت‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای می‌توان به محدود شدن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی، کوتاه‌بودن مدت زمان آزمایش، و نیز محدودیت تعداد سناریوهای تحت آزمایش اشاره کرد (Heng *et al.*, 2009). مدل‌های رشد گیاهی ابزاری مفید برای بررسی بهتر نحوه تغییرات عملکرد محصول بر اساس تغییرات نهاده‌ها و عوامل محیطی است. این مدل‌ها برای مطالعه و بررسی اثر آب، کود، و مدیریت زراعی ابزاری مفیدند (Geerts and Raes, 2009). در این زمینه شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه و در نتیجه پیش‌بینی عملکرد محصول می‌تواند برنامه‌ریزی بهتر و مدیریت کاراتر را در روند تولید محصول به دنبال داشته باشد. برای این منظور مدل‌هایی که علاوه بر حفظ دقت مناسب به اطلاعات ورودی کمتری نیاز دارند در عمل موفق‌ترند (Gholami and Pirmoradian, 2011). مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی و مدیریت آب‌خاک، با در نظر گرفتن اثر آب و کود نیتروژن در رشد و نمو گیاه، ارائه شده است؛ از آن‌ها می‌توان به سری مدل‌های CERES (Jones and Kiniry, 1986)، CropSyst (Zand-Parsa *et al.*, 2006)، MSM (stockle and Nelson, 1994)، AquaCrop (Hsiao *et al.*, 2009)، DSSAT (Jones *et al.*, 2003)، و APSIM (McCown *et al.*, 1996) اشاره کرد. بیشتر این مدل‌ها به اطلاعات ورودی زیادی نیاز دارند که اغلب آن‌ها در دسترس نیست و استفاده از این مدل‌ها را به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، که باید قبل از فصل کشت صورت گیرد، دچار مشکل می‌کند (Gholami and Pirmoradian, 2011). آثار تنش خشکی و نیتروژن را بر عملکرد، کارایی مصرف آب، و نیتروژن ذرت در منطقه اهواز بررسی و مدل CERES-Maize را برای این منظور ارزیابی کردند. اثر سطوح مختلف آب و نیتروژن با استفاده از مدل CSM-CERES-MAIZE بر عملکرد ذرت علوفه‌ای در ورامین (Rabie *et al.*, 2012a) و بر آبشویی نترات از زیر عمق فعال ریشه ذرت (Rabie *et al.*, 2012b) بررسی شد. یکی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه

مدل AquaCrop است که فائو ارائه کرد و بر اساس نشریه بازرگاری شده فائو ۳۳ عمل می‌کند (Hsiao *et al.*, 2009). در این مدل تأثیر تنش آبی، شوری، و نیتروژن خاک بر رشد گیاه و عملکرد محصول لحاظ شده است. از ویژگی‌های مدل AquaCrop استفاده از پوشش گیاهی به جای شاخص سطح برگ و نیز شاخص کارایی مصرف آب به جای ضریب کاهش نسبی عملکرد محصول است (Steduto *et al.*, 2009). Heng *et al.* (2009) مدل AquaCrop را برای ذرت در سه منطقه با شرایط اقلیمی متفاوت - شامل نیمه‌خشک، باد شدید با تبخیرتقرق زیاد، اقلیم مرطوب - واسنجی و اعتبارسنجی کردند. نتایج نشان داد مدل قادر است آب مصرفی گیاه، ماده خشک، عملکرد دانه، و پوشش گیاهی را در شرایط بدون تنش آبی و تنش آبی متوسط با دقت زیاد شبیه‌سازی کند؛ اما تحت تنش آبی شدید، به‌ویژه در مراحل حساس رشد، عملکرد مناسب ندارد. مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای شش فصل زراعی ذرت، در منطقه کالیفرنیا، ارزیابی شد و نتایج نشان داد ماده خشک و عملکرد دانه در شرایط مختلف تراکم بوته، تاریخ کاشت، و آب مصرفی با دقت مناسب شبیه‌سازی می‌شود (Hsiao *et al.*, 2009). با در نظر گرفتن احتمال وقوع تنش خشکی و با توجه به مشکلات مدیریت مصرف نیتروژن مطالعه جهت دستیابی به حداکثر محصول و بهبود بازده استفاده از آب و کود ضروری است. مدل AquaCrop مدلی مناسب به منظور شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف آب و نیتروژن بر عملکرد محصول است (Khoshravesht *et al.*, 2013).

هدف این مطالعه شبیه‌سازی رشد ذرت تحت سطوح مختلف آبیاری و نیتروژن طی فصل رشد آن است. با توجه به اهمیت نیتروژن در رشد ذرت و همچنین اندرکنش آن با مقدار آب آبیاری، آزمایش مزرعه‌ای برای بررسی مدیریت‌های مختلف آبیاری و نیتروژن بر شاخص‌های عملکرد ذرت انجام شد. بر اساس اطلاعات مزرعه‌ای، از قبیل رشد ماده خشک و پوشش گیاهی و عملکرد دانه، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف آبیاری و نیتروژن ارزیابی و تحلیل شد.

مواد و روش‌ها

مطالعه مزرعه‌ای

آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور بررسی مدیریت‌های مختلف آبیاری و نیتروژن بر عملکرد ذرت (*Zea mays L.*) طی دو سال زراعی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ و ۱۳۸۲-۱۳۸۳ انجام گرفت. منطقه تحت کشت به ترتیب در طول و عرض و ارتفاع ۵۲°۰۲' شرقی و

و FC_i و θ_i به ترتیب رطوبت ظرفیت زراعی ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) و رطوبت خاک قبل از آبیاری ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)، Δz_i ضخامت لایه i ام اندازه‌گیری رطوبت خاک (cm)، d عمق آب آبیاری (cm)، n تعداد لایه‌ها تا عمق ریشه، و i شماره لایه خاک است. عمق d محاسبه شده برای سطح آبیاری I_3 اعمال و برای سایر سطوح آبیاری عمق آبیاری متناسب با درصد‌های مختلف سطوح آبیاری و ضرب آن‌ها در عمق d محاسبه شد.

در این مطالعه برنامه‌ریزی آبیاری با دور ثابت و عمق متغیر انجام شد. دور آبیاری برابر هفت روز در نظر گرفته شد. عمق آبیاری اول (خاک آب) طی هر دو سال زراعی ثابت و برابر ۱۵۰ میلی‌متر اعمال شد. این عمق با در نظر گرفتن شرایط کاملاً خشک خاک قبل از کشت و نیز با هدف اطمینان از آبیاری کامل نیم‌رخ خاک انتخاب شد. به منظور استقرار کامل گیاه، از آبیاری دوم تا چهارم، تنش آبی در نظر گرفته نشد و در همه تیمارها عمق آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک انجام گرفت. سطوح مختلف کم‌آبیاری بعد از استقرار کامل گیاه و از آبیاری پنجم اعمال شد. با در نظر گرفتن خاک آب، در مجموع پانزده رویداد آبیاری انجام شد. تنش آبی از آبیاری پنجم تا پانزدهم اعمال شد. با در نظر گرفتن مساحت کرت و عمق آبیاری در تیمارهای مختلف، آبیاری به صورت حجمی و به کمک کنتور انجام شد. با توجه به مسدود بودن انتهای جویچه‌ها، تلفات رواناب ۰ بود و به دلیل آبیاری به اندازه کمبود رطوبت خاک تلفات نفوذ عمقی نیز تقریباً ناچیز بود و راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. برای تعیین خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه، بافت خاک در دو عمق ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر با سه تکرار تعیین شد که نتایج آن در جدول ۱ می‌آید. بافت خاک به روش هیدرومتری، نقاط رطوبتی FC و PWP با دستگاه صفحات فشاری و هدایت آبی اشباع با روش بار افتان به دست آمد.

۲۹°۵۶' شمالی و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع است. رقم استفاده شده برای ذرت سینگل کراس ۷۰۴ (SC704) و از نوع هیبرید دیررس بود که در جویچه‌هایی به فواصل ۰/۷۵ متر و با تراکم ۶۶۰۰۰ بوته در هکتار و در زمینی به مساحت ۲۰۰۰ متر مربع کشت شد. روش آبیاری سیستم جویچه‌ای بود. به منظور اعمال دقیق حجم آبیاری، جویچه‌ها در کرت‌های انتهایی به طول ۱۰ متر در پنج ردیف قرار گرفتند. برای جلوگیری از آسیب احتمالی به تیمارهای آزمایشی و همچنین جهت از بین بردن اثر واحه‌ای، در اطراف تیمارهای آزمایشی، به عرض ۳ متر ذرت کاشته شد. آزمایش مزرعه‌ای با سه سطح نیتروژن شامل ۰ و ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار (به ترتیب N_1 و N_2 و N_3) و چهار عمق آبیاری شامل ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، و ۱۲۰ درصد تخلیه رطوبت خاک (به ترتیب I_1 ، I_2 ، I_3 و I_4) با سه تکرار طی دو سال به صورت طرح بلوک کامل تصادفی اجرا شد. عمق آبیاری در تیمارهای مختلف بر اساس رطوبت نیم‌رخ خاک (ناحیه ریشه) در نظر گرفته شد. رطوبت نیم‌رخ خاک با استفاده از یک دستگاه نوترون متر (نوع 503DRCPN COR) از عمق ۰/۱۵ تا ۱/۸ متری سطح خاک و برای حد فاصل‌های ۱۵ سانتی‌متری نیم‌رخ خاک تعیین شد. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک مزرعه در سال اول آزمایش شانزده لوله نوترون متر (از جنس آلومینیوم) و در سال دوم دوازده لوله نوترون متر وسط کرت‌های انتخابی نصب شد. ضرایب دستگاه نوترون متر قبل از فصل کشت، به روش نمونه‌برداری از نیم‌رخ خاک، واسنجی شد. بر اساس مقادیر رطوبت ناحیه ریشه و قبل از هر آبیاری عمق آبیاری مورد نیاز با رابطه ۱ محاسبه شد (Majnooni et al., 2011):

$$d = \sum_{i=1}^n (FC_i - \theta_i) \Delta z_i \quad (\text{رابطه ۱})$$

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

عمق (سانتی‌متر)	بافت خاک	ماده آلی (درصد)	FC ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	PWP ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	هدایت آبی اشباع (mm/day)
۰-۳۰	Si-C-L	۰/۹۵	۰/۳۳	۰/۱۶	۱۹۰
۳۰-۶۰	Si-C-L	۰/۵۷	۰/۳۳۵	۰/۱۶	۱۹۰

مزرعه داده شد. ۳۰ درصد کود نیز حدود هفتاد روز بعد از سبز شدن گیاه به صورت سرک بر سطح کرت پخش شد. جهت تعیین وزن ماده خشک گیاه، سه بوته از هر تیمار بریده و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد داخل آون

در هر دو سال زراعی، کود سوپرفسفات تریپل قبل از کاشت، به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، در زمین زراعی استفاده شد. ۷۰ درصد کود نیتروژن هنگام کاشت، با در نظر گرفتن سطوح کود تیمارهای مختلف، به صورت اوره به

$$CC = CC_0 e^{CGC.t} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$CC = CC_x - 0.125 \frac{CC_x^2}{CC_0} e^{-CGC.t} \quad (\text{رابطه ۵})$$

CC_0 ضریب پوشش گیاهی اولیه در زمان ظهور ۹۰ درصد بذر، CGC ضریب رشد پوشش گیاهی در هر روز، و CC_x ضریب پوشش گیاهی حداکثر تحت شرایط مطلوب است. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر شاخص سطح برگ (LAI) به مقادیر است، برای تبدیل مقادیر شاخص سطح برگ (LAI) به مقادیر پوشش گیاهی (CC) در طول فصل رشد از رابطه‌ی نمایی پیشنهادی *Nielsen et al.* (2012) استفاده شد که برای رقم ذرت SC704 هیبرید دیررس (مورد مطالعه تحقیق حاضر) با خطای نسبی کمتر از ۲ درصد پیشنهاد شده است:

$$CC = 76.178 \cdot 1 - \exp(-0.1105 LAI) \quad (\text{رابطه ۶})$$

رابطه ۶ نشان‌دهنده نحوه تبدیل شاخص LAI به CC است. شاخص LAI از تنش‌های محیطی تأثیر می‌پذیرد و هر گونه تنش محیطی، از قبیل تنش آب و تنش نیتروژن (کود)، بر LAI اثر می‌گذارد. طبق این رابطه، پوشش گیاهی معادل با شاخص سطح برگ محاسبه می‌شود. تنش‌ها در مدل AquaCrop شامل آبی، نیتروژن و کود، دمایی، و شوری است. اجزای مدیریت نیز عبارت از دو بخش مدیریت آبیاری، در زمینه کشاورزی دیم و آبی، و مدیریت زراعی، در زمینه سطوح مختلف نیتروژن خاک، است. مدیریت زراعی دربرگیرنده پوشش مالچ، شکل سطح خاک قبل از کشت، درجه غنی‌بودن خاک، و مقادیر کوددهی است. مدل نمی‌تواند بیان مواد مغذی خاک را شبیه‌سازی کند؛ فقط به صورت کلی شش سطح حاصل‌خیزی خاک در آن منظور شده است: ۱. شرایط بهینه یا خاک بدون محدودیت کود (بدون تنش)؛ ۲. نزدیک بهینه (حدود ۲۳ درصد تنش)؛ ۳. متوسط (حدود ۴۱ درصد تنش)؛ ۴. نزدیک نصف بهینه (حدود ۵۰ درصد تنش)؛ ۵. فقیر (حدود ۵۸ درصد تنش)؛ و ۶. خیلی فقیر (حدود ۷۲ درصد تنش). انتخاب هر یک از این گزینه‌ها بر پارامترهای WP ، پوشش گیاهی، سرعت پیری، عملکرد، و ماده خشک تأثیر می‌گذارد (*Raes et al.*, 2012).

پارامترهای گیاهی مدل

برخی پارامترهای گیاهی، مانند حداکثر دمای رشد، برای ارقام مختلف گیاهان ثابت است و برای اکثر گیاهان به منزله پیش‌فرض در مدل وجود دارد که با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کند. بخشی دیگر از پارامترهای گیاهی مربوط به مکان و ویژه گیاه در طرح است، از جمله تاریخ جوانه‌زنی و تاریخ ظهور پوشش گیاهی (تاریخی که در آن ۹۰

خشک شد. سپس وزن ماده خشک در هکتار محاسبه شد. برای ارزیابی و بررسی رشد ماده خشک، طی روزهای مختلف پس از کاشت، ماده خشک تیمارهای مختلف مرتب اندازه‌گیری شد. پارامترهای هواشناسی طی دوره رشد- از قبیل حداکثر و حداقل دمای هوا، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، بارندگی در طول دوره رشد، دمای خاک- از ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز جمع‌آوری شد.

مدل AquaCrop

هسته اصلی تخمین عملکرد محصول در AquaCrop رابطه دورنیاس و کاسام (رابطه ۲) است که با اعمال اصلاحاتی از قبیل تفکیک تبخیر- تفرق واقعی (ET) به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تفرق (T_c) و نیز عملکرد (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت (HI) استنتاج شد (*Raes et al.*, 2012):

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

Y_x حداکثر عملکرد، Y عملکرد واقعی، ET_x حداکثر تبخیر- تفرق، ET تبخیر- تفرق واقعی، و K_y فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر- تفرق است. برای محاسبه عملکرد ماده خشک، مدل AquaCrop از رابطه ۳ استفاده می‌کند (*Raes et al.*, 2012):

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad (\text{رابطه ۳})$$

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، درجه حرارت هوا، زمان، و میزان تنش در طول چرخه رشد محصول بستگی دارد. ورودی‌های مدل شامل چهار بخش اقلیمی، گیاه، مدیریت، و خاک است. داده‌های اقلیمی شامل حداکثر و حداقل دما، بارش، و تبخیر- تفرق مرجع به صورت روزانه است. تبخیر- تفرق مرجع به روش فائو پنمن مانیتیت (*Allen et al.*, 1998) و به کمک برنامه ETCalculator محاسبه و به AquaCrop تعریف شد. سیستم گیاه از پنج بخش فنولوژی و پوشش گیاهی، تفرق گیاه، ماده خشک، و عملکرد و تنش‌ها تشکیل می‌شود. نمو پوشش گیاهی از طریق شاخص (CC) بیان می‌شود نه شاخص سطح برگ (LAI) و این یکی از ویژگی‌های مدل است که به سادگی شبیه‌سازی می‌انجامد و گسترش کامل پوشش گیاهی به یک تابع رشد منحصر می‌شود. پوشش گیاهی در نیمه اول رشد (مرحله جوانه‌زنی تا پوشش کامل) و طی دوره رسیدن به مقدار حداکثر به صورت تابع‌نمایی افزایش می‌یابد که با توجه به تحذب و تقعر روند رشد با دو رابطه‌ی نمایی ۴ و ۵ تشریح می‌شود (*Raes et al.*, 2012):

جدول ۲. پارامترهای گیاهی اندازه‌گیری‌شدهٔ مراحل فنولوژیکی ذرت (پارامترهای مخصوص)

پارامتر گیاهی	واحد	مقدار
تراکم کشت	بوته در هکتار	۶۶۰۰۰
زمان ظهور جوانه‌ها	روز بعد از کاشت	۵
زمان بلوغ کامل	روز بعد از کاشت	۱۴۵
زمان شروع گل‌دهی	روز بعد از کاشت	۶۵
مدت گل‌دهی	روز	۱۱
حداکثر عمق ریشه	سانتی‌متر	۱۲۰

پارامترهای ارزیابی مدل

برای بررسی کارایی AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه، رشد مادهٔ خشک، و پوشش گیاهی از معیارهای خطا و همبستگی-شامل معیارهای ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین نسبی خطا (MRE)، ضریب باقی‌مانده (CRM)، ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، و ضریب تبیین (R^2)- استفاده شد (Singh et al., 2008; Moriasi et al., 2007; Dai et al., 2009):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [(X_p)_i - (X_m)_i]^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$RE = \sum_{i=1}^n \frac{|(X_p)_i - (X_m)_i|}{(X_m)_i} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$MRE = \frac{RE}{N} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{X}_m} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n X_p}{\sum_{i=1}^n X_m} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

X_p مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ عملکرد دانه و مادهٔ خشک و پوشش گیاهی به کمک مدل، X_m مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ عملکرد دانه و مادهٔ خشک و پوشش گیاهی، \bar{X}_m میانگین پارامترها، و N تعداد اندازه‌گیری‌هاست. مقادیر NRMSE در بازه‌های ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، و ۲۰-۳۰ درصد به ترتیب نشان‌دهندهٔ وضعیت ایده‌آل، مناسب، و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهندهٔ عدم کارآبودن مدل است (Singh et al., 2008). آمارهٔ CRM نشان‌دهندهٔ تمایل مدل (در حالت کلی) برای بیش‌برآورد (مقادیر منفی) یا کم‌برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌هاست (Moriasi et al., 2007).

درصد بذرها سبز می‌شوند، که پارامترهای مخصوص کاربر نامیده می‌شوند. برخی از پارامترهای مخصوص کاربر، که مقادیرشان به گونهٔ گیاه بستگی دارد، برای منطقهٔ مورد مطالعه واسنجی می‌شوند (Raes et al., 2009). پارامترهای فنولوژیکی (پارامترهای مخصوص) اندازه‌گیری‌شدهٔ ذرت طی دورهٔ رشد، که در مدل AquaCrop به کار می‌روند، در جدول ۲ می‌آید.

مبنای و روش کار در واسنجی مدل، اطلاعات زراعی سال اول و تیمار شاهد قرار گرفت. تیمار I_3N_3 به مثابهٔ شاهد در نظر گرفته شد. این تیمار مربوط به سطح نیتروژن ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار و تأمین ۱۰۰ درصد تخلیهٔ آب خاک (SWD) است. با توجه به اینکه در سطح تأمین ۱۲۰ درصد تخلیهٔ آب خاک آب‌سویی نیز اتفاق می‌افتد، که ممکن است باعث تلفات نیتروژن خاک شود، سطح تأمین ۱۰۰ درصد تخلیهٔ آب خاک مبنای در نظر گرفته شد تا عملکرد مدل در حالت آبیاری بیش از نیاز نیز بررسی شود. در واسنجی مدل، بخش عمدهٔ اطلاعات ورودی مدل- از قبیل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک، شرایط اولیهٔ خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، پارامترهای هواشناسی، و بخشی از پارامترهای گیاهی (پارامترهای مخصوص)- اندازه‌گیری و به همان صورت وارد مدل شد. واسنجی مدل فقط بر قسمتی از پارامترهای گیاهی و بر مبنای تیمار شاهد (I_3N_3) انجام شد و مقادیر پارامترهای گیاهی حاصل‌شده از این تیمار در یازده تیمار دیگر در سال زراعی اول (سال واسنجی) اعمال شد. البته با فرض تأثیر تنش‌های محیطی بر برخی پارامترهای گیاهی، یک رویهٔ دیگر در واسنجی مدل‌ها واسنجی تیمار به تیمار این بخش از پارامترهای گیاهی است که با این رویه قابلیت تعمیم‌دهی مدل به سایر تنش‌ها و شرایط محیطی کاهش می‌یابد. پارامترهای گیاهی واسنجی‌شدهٔ سال اول (مستخرج بر اساس تیمار شاهد)، به همان صورت و بدون تغییر، برای سال زراعی دوم (اعتبارسنجی مدل) نیز در نظر گرفته شد. سایر ورودی‌های مدل در سال دوم زراعی- از قبیل پارامترهای هواشناسی، شرایط اولیهٔ نیمرخ خاک، ویژگی‌های خاک، و برنامه‌ریزی آبیاری- مطابق اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته در سال دوم وارد مدل شد. پارامترها در تیمار شاهد با سه هدف هم‌زمان کمینه‌کردن اختلاف بین مقادیر رشد پوشش گیاهی، عملکرد دانه، و رشد مادهٔ خشک اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده به کمک مدل واسنجی شد. پارامترهای رشد گیاه، شامل مادهٔ خشک (زیست‌توده) و پوشش گیاهی، در سال اول آزمایش هشت بار و در سال دوم هفت بار طی روزهای خاص دورهٔ رشد محصول اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها و بحث

رشد ماده خشک و پوشش گیاهی

نتایج مقادیر واسنجی شده پارامترهای گیاهی مدل بر اساس

تیمار شاهد سال اول زراعی در جدول ۳ می‌آید. مطابق جدول ۳، برخی از این پارامترها واسنجی شده‌اند و برخی نیز به صورت پیش‌فرض مدل است. در واقع، مقادیر پیش‌فرض بهینه است و به اصلاح و واسنجی نیاز ندارد.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای گیاهی پیش‌فرض و واسنجی شده مدل AquaCrop برای ذرت

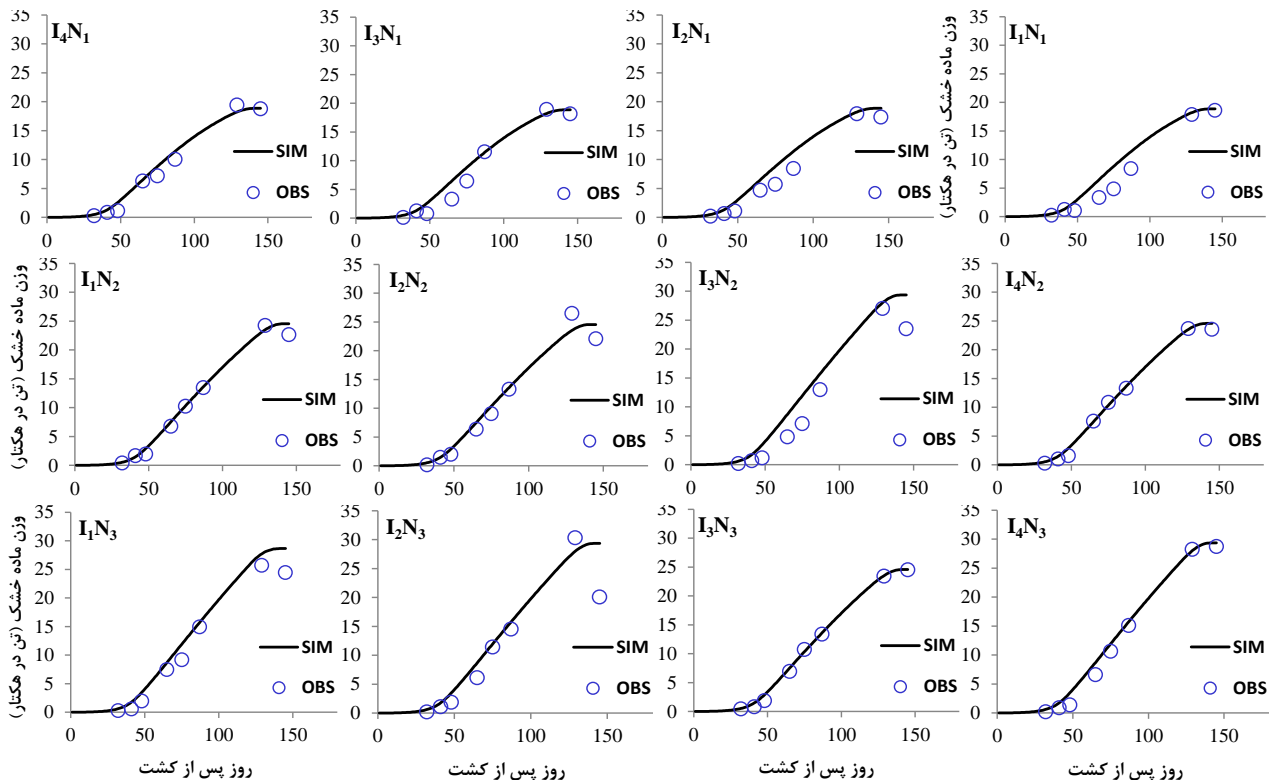
پارامتر گیاهی	واحد	پیش‌فرض	واسنجی شده
زمان ماکزیمم پوشش گیاهی	روز	۵۴	۶۸
زمان پیری	روز	۱۰۷	۱۲۱
ضریب کاهش پوشش گیاهی در پیری (CDC)	%/day	۱۱/۷	-
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)	%/day	۱۶/۳	۱۲/۴
حداکثر پوشش گیاهی	درصد	۹۶	۸۴
آستانه پایین رشد	-	۰/۱۴	-
آستانه بالای رشد	-	۰/۷۲	-
ضریب تنش پیری پوشش گیاهی	-	۰/۶۹	-
ضریب منحنی شکل تنش پیری	-	۲/۷	-
آستانه بالای بسته شدن روزنه	-	۰/۶۹	-
فاکتور شکل ضریب تنش برای کنترل روزنه	-	۶	-
بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	g/m ²	۳۳/۷	۲۹/۷
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل (K _{CTr,x})	-	۱/۰۵	۱/۲۱
دمای پایه	°C	۸	-
دمای بالا	°C	۳۰	-

I_3N_1 و I_4N_1 مقادیر NRMSE طی واسنجی به ترتیب ۳۱/۰۷، ۲۶/۳۲، ۲۱/۲۵، و ۱۲/۹۶ درصد به دست آمد. در این تیمارها و برای اعتبارسنجی مدل، این مقادیر به ترتیب ۵۳/۹۷، ۱۳/۵۱، ۱۸/۴۸ و ۱۴/۷۳ درصد محاسبه شد. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت در سطح نیتروژن N_1 ، با افزایش عمق آبیاری، خطای پیش‌بینی رشد ماده خشک کاهش می‌یابد و در سطوح تنش آبی شدید و متوسط (سطوح I_1 و I_2) خطای پیش‌بینی رشد ماده خشک افزایش پیدا می‌کند. در سطح نیتروژن N_2 شامل تیمارهای I_1N_2 ، I_2N_2 ، I_3N_2 و I_4N_2 مقادیر NRMSE در اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۴۹/۷۲، ۱۵/۱۲، ۳۴/۲۶، و ۱۰/۶۲ درصد محاسبه شد. مطابق نتایج، این سطح نیتروژن (N_2) نیز، با افزایش عمق آبیاری، مقادیر خطای مدل در تخمین رشد ماده خشک کاهش یافته است. تقریباً چنین شرایطی در سطح نیتروژن N_3 نیز حاکم بود. بیشترین خطای شبیه‌سازی رشد ماده خشک به کمک AquaCrop مربوط به دوره‌های رشد رویشی و گل‌دهی گیاه بود. مدل برای روز نهایی (روز برداشت) در همه تیمارها (واسنجی و اعتبارسنجی) مقدار NRMSE کمتر از ۱۰ درصد نشان داد که یکی از دلایل آن می‌تواند تأثیر متفاوت تنش نیتروژن و تنش آب بر مقدار ماده خشک در

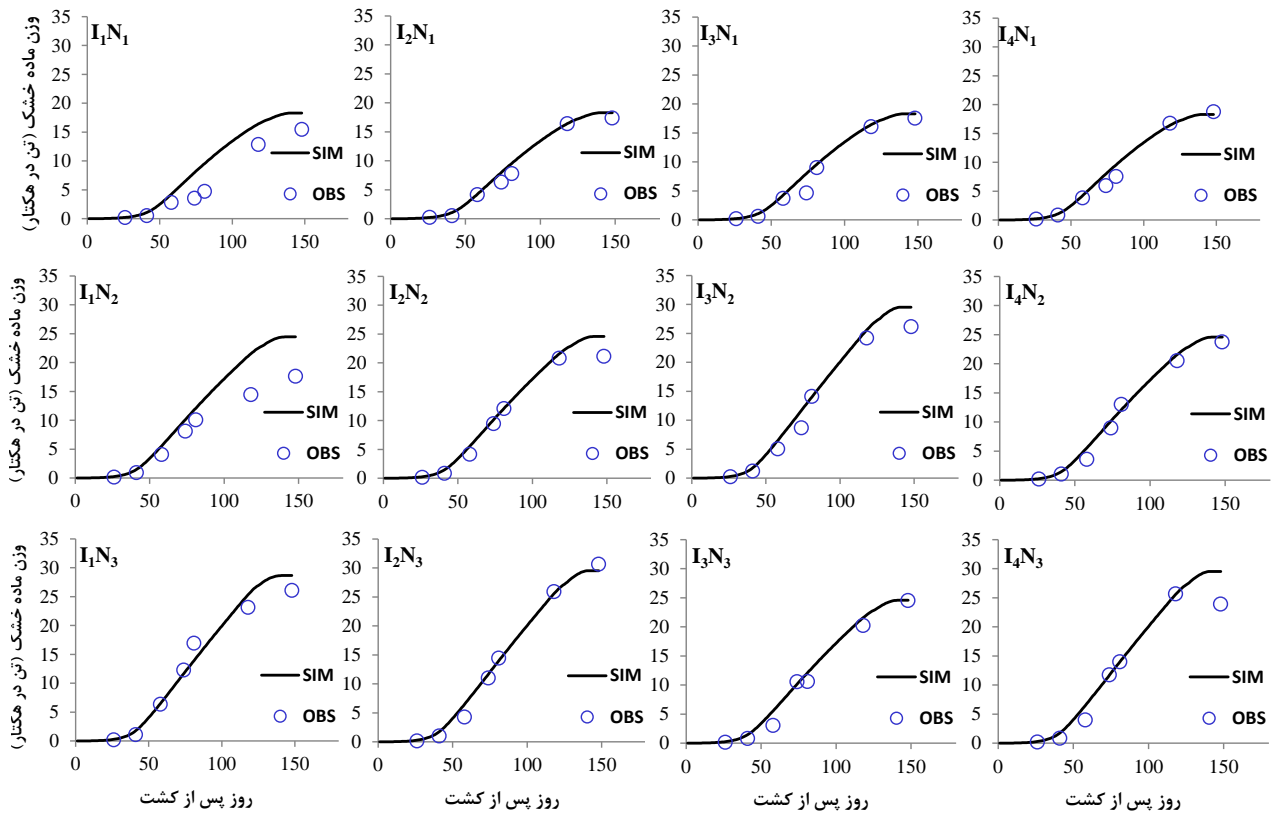
پارامترهای گیاهی مدل با هدف حداقل کردن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مدل در تیمارهای مختلف واسنجی شد. نتایج واسنجی ماده خشک و پوشش گیاهی نشان داد به طور کلی مدل AquaCrop روند رشد ماده خشک و پوشش گیاهی را در بیشتر تیمارها نسبتاً دقیق و با NRMSE کمتر از ۱۰ درصد پیش‌بینی می‌کند. مقایسه گرافیکی رشد ماده خشک شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ذرت برای تیمارهای مختلف، طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ می‌آید. به منظور بررسی کمی و دقیق نتایج مدل در پیش‌بینی رشد ماده خشک، برخی پارامترهای ارزیابی، شامل NRMSE و RMSE و CRM، برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی محاسبه شد که مقادیر آن‌ها در جدول ۴ می‌آید. متوسط NRMSE پیش‌بینی رشد ماده خشک به کمک مدل (متوسط کل تیمارها) در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۱۸/۷ و ۲۰/۹ درصد محاسبه شد. متوسط RMSE برای واسنجی و اعتبارسنجی نیز به ترتیب ۱/۳۸ و ۱/۳۵ تن بر هکتار به دست آمد. با این حال، این خطا در برخی تیمارها کم و در برخی نیز نسبتاً زیاد به دست آمد. مطابق جدول ۴ در سطح نیتروژن N_1 شامل تیمارهای I_1N_1 ، I_2N_1 ،

مدل در این شرایط در شبیه‌سازی ماده خشک بیش‌برآورد نشان داد. مقدار عددی آماره CRM ماده خشک در شرایط تنش‌های شدید نیتروژن و آب (سطح I_1N_1) طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب -0.22 و -0.44 محاسبه شد که بیش‌برآورد قابل ملاحظه مدل را نشان می‌دهد. تحت تنش آبی شدید (سطح I_1) و در سطوح نیتروژن N_2 و N_3 نیز چنین وضعیتی حاکم است. مقادیر آماره CRM نیز در این تیمارها منفی است و مدل در شبیه‌سازی ماده خشک بیش‌برآورد دارد. به این ترتیب، می‌توان نتیجه گرفت مدل AquaCrop اثر تنش آبی بر سطوح مختلف نیتروژن را دقیق شبیه‌سازی نمی‌کند. مطابق نتایج تحقیقات Patel et al. (2006) و Gheysari et al. (2009) تأثیر نیتروژن بر مقدار ماده خشک ذرت به مقدار آب در خاک وابسته است و در شرایط تنش خشکی باید کاربرد نیتروژن به علت جذب کمتر کاهش یابد. به این ترتیب، تحت شرایط تنش خشکی کاربرد نیتروژن بیش از یک مقدار معین سبب افزایش ماده خشک نخواهد شد. نتایج AquaCrop تحت تنش خشکی نشان می‌دهد AquaCrop این اندرکنش را به‌خوبی شبیه‌سازی نمی‌کند. به عبارت دیگر، AquaCrop تحت تنش خشکی کاربرد نیتروژن را در افزایش عملکرد ماده خشک تأثیر می‌دهد؛ در حالی که نتایج تحقیقات نشان داد اعمال نیتروژن تحت تنش خشکی تأثیر چندانی در افزایش ماده خشک ندارد.

دوره‌های مختلف رشد ذرت باشد؛ به این صورت که حساسیت ماده خشک ذرت به تنش‌های آب و کود در مراحل رشد رویشی و گل‌دهی نسبت دوره انتهایی رشد متفاوت است. بر اساس مطالعات انجام‌شده، تأثیر تنش نیتروژن و تنش آب در مراحل مختلف رشد ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) بر عملکرد ذرت نشان می‌دهد تنش نیتروژن و آب در مراحل دهبرگی و گل‌تاجی و بعد از گرده‌افشانی به ترتیب باعث کاهش ۲۷ و ۲۱ و ۱۱ درصدی عملکرد ذرت می‌شود (Majidian and Ghadiri, 2002). مطابق شکل‌های ۱ و ۲، در سطوح مختلف تنش نیتروژن و آب بیشترین خطا مربوط به دوره‌های رشد رویشی و گل‌دهی است که مقادیر اندازه‌گیری‌شده ماده خشک در این دوره‌ها کمتر از مقادیر شبیه‌سازی مدل است. این وضعیت حاکی از آن است که تأثیر تنش کود بر عملکرد ماده خشک ذرت طی مراحل مختلف رشد متفاوت است؛ اما مدل AquaCrop تأثیر تنش کود را در مراحل مختلف رشد گیاه یکسان فرض کرد. این در حالی است که در مرحله انتهایی رشد، که حساسیت گیاه به تنش نیتروژن کمتر است (Majidian and Ghadiri, 2002)، خطای شبیه‌سازی ماده خشک به کمک مدل کمتر است. مطابق جدول ۴، در شرایط تنش آبی شدید (سطح آبیاری I_1) کاهش قابل ملاحظه در مقدار ماده خشک وجود دارد. اما



شکل ۱. مقایسه رشد ماده خشک مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده به کمک AquaCrop به منظور واسنجی مدل (سال اول)



شکل ۲. مقایسه رشد ماده خشک مشاهده شده و شبیه سازی شده به کمک AquaCrop در مرحله اعتبارسنجی مدل (سال دوم)

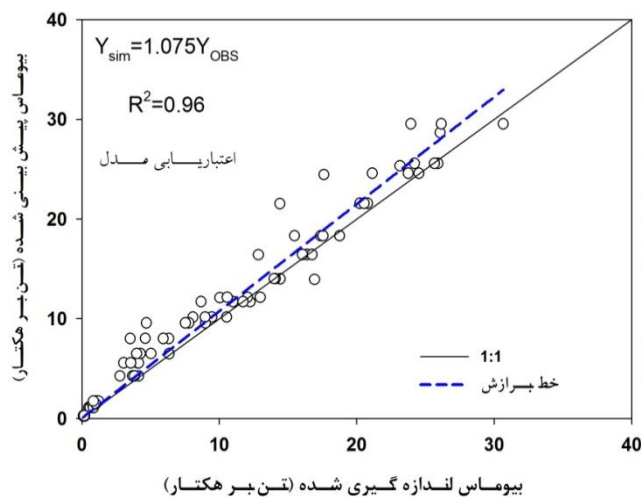
جدول ۴. پارامترهای ارزیابی عملکرد مدل در پیش بینی رشد ماده خشک طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

اعتبارسنجی			واسنجی			تیمار	
CRM (-)	RMSE (t/ha)	NRMSE (%)	CRM (-)	RMSE (t/ha)	NRMSE (%)	سطح نیترژن	سطح آبیاری
-۰/۴۴	۲/۳۵	۵۳/۹۷	-۰/۲۲	۱/۷۶	۳۱/۰۷	N ₁	I ₁
-۰/۳۶	۳	۴۹/۷۲	-۰/۰۴	۰/۶۶	۷/۹۸	N ₂	
-۰/۰۲	۱/۳۳	۱۷/۱۴	-۰/۱۶	۱/۷۰	۱۹/۷۹	N ₃	
-۰/۰۹	۰/۷۷	۱۳/۵۱	-۰/۲۱	۱/۵۰	۲۶/۳۳	N ₁	I ₂
-۰/۱	۱/۱۳	۱۵/۱۲	-۰/۰۴	۱/۲۵	۱۵/۲	N ₂	
-۰/۰۲	۱/۳۶	۱۸/۳۴	-۰/۱۶	۲/۹۳	۳۳/۵۷	N ₃	
-۰/۱۱	۱/۰۴	۱۸/۴۸	-۰/۱۲	۱/۳۱	۲۱/۲۵	N ₁	I ₃
-۰/۱۲	۱/۴۳	۱۶/۵۷	-۰/۲۸	۲/۷	۳۴/۲۶	N ₂	
-۰/۰۸	۰/۹۶	۱۲/۶۷	-۰/۰۲	۰/۴۲	۵/۰۲	N ₃	
-۰/۰۷	۰/۸۶	۱۴/۷۳	-۰/۰۶	۰/۸۴	۱۲/۹۶	N ₁	I ₄
-۰/۰۶	۰/۸۲	۱۰/۶۲	-۰/۰۳	۰/۵۳	۶/۴۳	N ₂	
-۰/۱۱	۱/۷۹	۲۰/۴۴	-۰/۰۸	۱	۱۰/۷۶	N ₃	
-۰/۱۳	۱/۳۵	۲۰/۹۴	-۰/۱۱	۱/۳۸	۱۸/۷۱	میانگین	

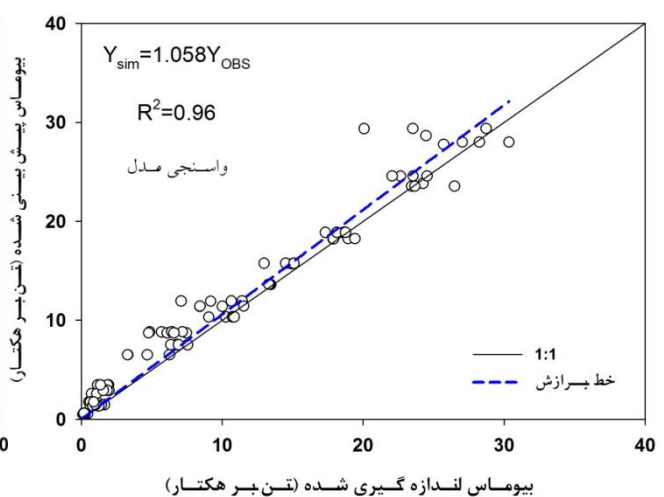
مقایسه مقادیر ماده خشک اندازه گیری شده و پیش بینی شده به کمک مدل AquaCrop بر اساس اطلاعات کل تیمارها، طی دوره رشد، در شکل ۳ می آید. بزرگتر از ۱ بودن ضریب خط برازش برای هر دو وضعیت واسنجی و اعتبارسنجی نشان دهنده بیش برآورد ماده خشک به کمک مدل در حالت کلی است. نقاط با خطای زیاد، عمدتاً مربوط به تنش شدید یا متوسط است. با توجه به رویکرد واسنجی، که فقط برای تیمار

به این ترتیب، یکی از ضعف های AquaCrop شبیه سازی بیش برآورد ماده خشک در شرایط تنش خشکی با کاربرد نیترژن است؛ یعنی مدل کاربرد نیترژن را در شرایط تنش خشکی در افزایش ماده خشک مؤثر فرض می کند. در حالی که نتایج تحقیقات دیگر پژوهشگران، از جمله *Gheysari et al.* (2012)، نشان دهنده تأثیر کم کاربرد نیترژن در افزایش بیوماس تحت تنش خشکی است.

مطالعه Heng *et al.* (2009) بر ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) نشان داد خطای RMSE مدل AquaCrop در پیش‌بینی رشد پوشش گیاهی در سه منطقه مطالعه موردی (بوشلند، تکراس؛ گاینسویل، فلوریدا؛ زاراگوزا، اسپانیا) در دامنه ۷۰۱ تا ۱۱۶۳ درصد قرار دارد. نتایج شبیه‌سازی آثار تنش خشکی و نیتروژن بر رشد ذرت علوفه‌ای با مدل CSM-CERES-MAIZE نیز توانایی این مدل را در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ و وزن ماده خشک تأیید کرد (Rabie *et al.*, 2012a). حداکثر و حداقل ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی این مدل (RMSE) بین دوازده تیمار بررسی‌شده، شامل چهار سطح آبیاری و سه سطح نیتروژن، به ترتیب ۱۴۸۳ و ۹ کیلوگرم بر هکتار به دست آمد.



I₃N₃ (شاهد) انجام شد، مدل AquaCrop برای تیمارها با حداکثر تنش‌های نیتروژن و آب عملکرد مناسب ندارد و دارای بیشترین خطاست. البته با این رویکرد واسنجی خطای تخمین ماده خشک ذرت در سایر تیمارها در حدود خطاهای گزارش‌شده در سایر تحقیقات بر ذرت است. در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی مدل AquaCrop در منطقه قزوین برای ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ (رقم مطالعه‌شده در این تحقیق) متوسط جذر میانگین مربع خطای (RMSE) اعتبارسنجی مدل در پیش‌بینی ماده خشک ذرت ۱/۵ تن بر هکتار به دست آمد (Rahimi-khoob *et al.*, 2014). این مقادیر با مقادیر متوسط جذر میانگین مربع خطای حاصل از این مطالعه (۱/۳۸ و ۱/۳۵ تن بر هکتار، به ترتیب برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل) تطابق دارد. نتایج



شکل ۳. مقایسه ماده خشک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به کمک AquaCrop طی سال زراعی اول و دوم (واسنجی و اعتبارسنجی)

۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، در یک سطح آبیاری معین، مثلاً I₁، نیز تغییرات پوشش گیاهی نسبت به افزایش نیتروژن چشمگیر نبود. حداکثر پوشش از ۷۲ درصد در تیمار I₁N₁ به ۷۵/۷ درصد در تیمار I₁N₃ افزایش یافت که در حدود ۳/۷ درصد افزایش داشت. به این ترتیب، طبق نتایج مزرعه‌ای، تغییرات پوشش گیاهی نسبت به سطوح مختلف آب و نیتروژن تقریباً کم است.

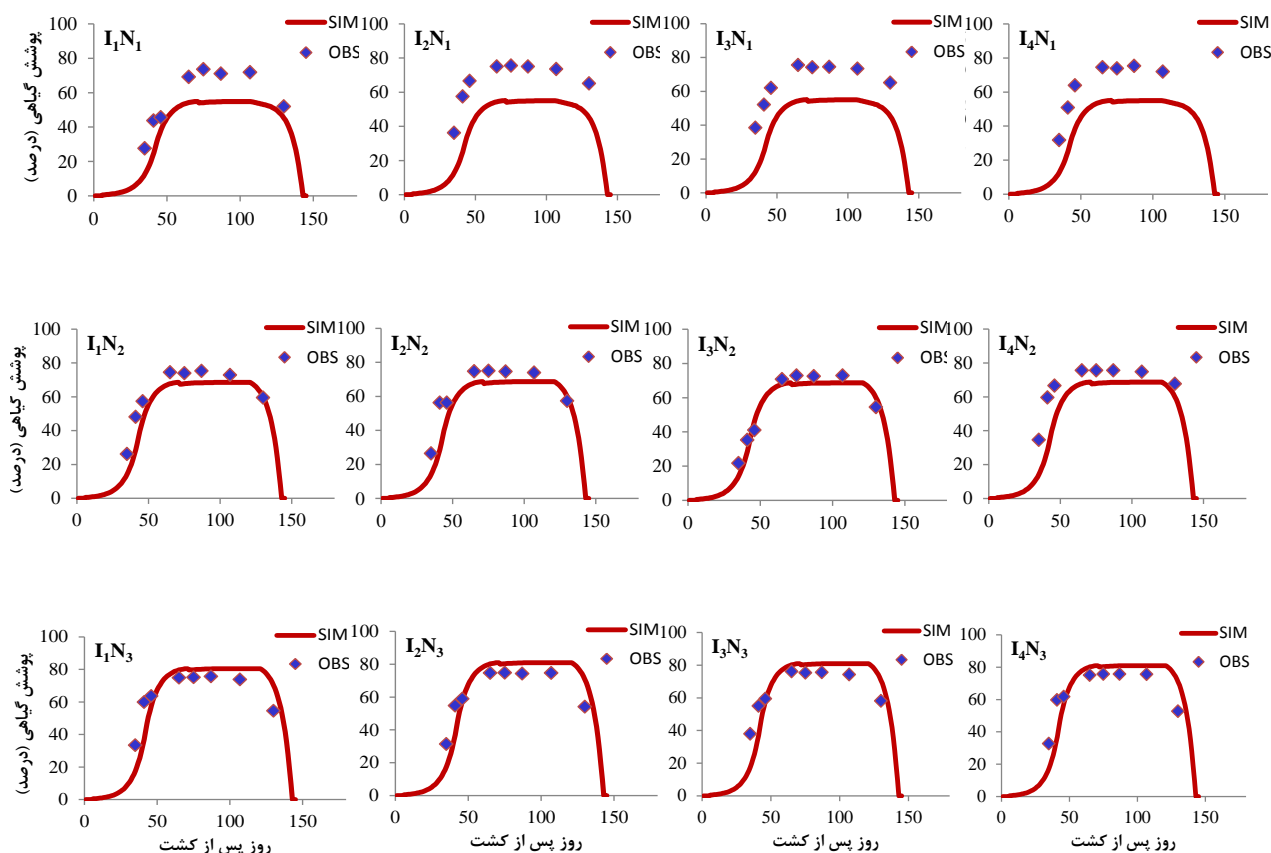
نتایج تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی پوشش گیاهی نشان داد حساسیت پوشش گیاهی به نیتروژن در مقایسه با آب بیشتر است. مطابق نتایج، حساسیت پوشش گیاهی به تنش‌های نیتروژن و آب به ترتیب زیاد و کم است. بر این اساس، در سطح نیتروژن معین، تغییرات مقدار آب کاربردی باعث تغییرات زیاد در شاخص پوشش گیاهی نمی‌شود؛ اما در سطح آبیاری معین، تغییر سطوح کاربرد نیتروژن باعث تغییرات

علاوه بر پیش‌بینی رشد ماده خشک، رشد پوشش گیاهی نیز به کمک AquaCrop پیش‌بینی شد. مقایسه روند رشد پوشش گیاهی فصلی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ می‌آید. مطابق شکل‌های ۴ و ۵، در همه تیمارها حدود شصت و پنج روز پس کاشت مقدار پوشش گیاهی اندازه‌گیری شده به بیشترین مقدار می‌رسد و پس از آن و تا ۱۰۰ روز پس از کاشت تقریباً ثابت می‌ماند و بعد از آن روندی کاهشی می‌یابد. در سطح معین نیتروژن، مثلاً N₁، تغییرات پوشش گیاهی تحت سطوح مختلف آبیاری قابل ملاحظه نیست؛ مثلاً، در سال اول آزمایش در تیمار I₁N₁ حداکثر مقدار پوشش گیاهی حدود ۷۲ درصد بود و در تیمارهای I₃N₁ و I₄N₁ این مقدار به ترتیب به ۷۶ و ۷۵/۸ افزایش یافت. به این ترتیب، ماکزیمم پوشش گیاهی تیمار آبیاری کامل نسبت به I₁N₁ حدود

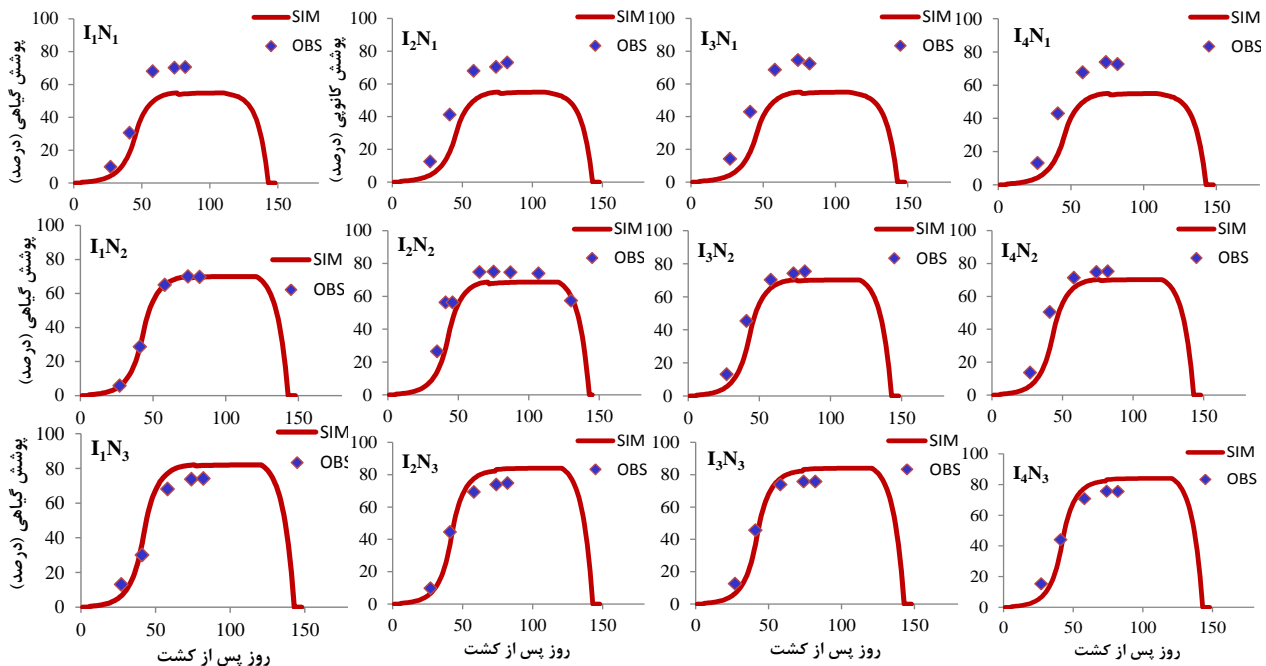
پیش‌بینی پوشش گیاهی طی واسنجی و اعتبارسنجی مدل در تیمارهای I_1N_1 ، I_2N_1 ، I_3N_1 و I_4N_1 (تیمارهای سطح N_1) بیشتر از ۲۰ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف مدل در تیمارهای یادشده است. در این تیمارها حداکثر مقدار پوشش گیاهی شبیه‌سازی‌شده به کمک AquaCrop بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده پوشش گیاهی است. مطابق نتایج Heng *et al.* (2009) بر ذرت مدل AquaCrop تحت تنش آبی در پیش‌بینی پوشش گیاهی بیش‌برآورد نشان داد. مطابق جدول ۵، در همه سطوح N_2 و N_3 ، مربوط به واسنجی و اعتبارسنجی، آماره NRMSE کمتر از ۲۰ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده دامنه مناسب مدل در تخمین پوشش گیاهی در سطوح نیتروژن متوسط و بالاست. در اکثر تیمارهای تحت مطالعه، بیشترین اختلاف مقادیر پوشش گیاهی مربوط به میانه فصل (حداکثر رشد پوشش گیاهی) بود و در دوره رشد رویشی تطابق مناسب بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری وجود داشت.

قابل توجه پوشش گیاهی می‌شود. البته این تغییرات از سطح N_1 به N_2 بسیار چشمگیرتر از سطح N_2 به N_3 است. دلیل آن می‌تواند این باشد که افزایش نیتروژن بیشتر از مقداری مشخص تأثیری بر افزایش پوشش گیاهی و سایر مؤلفه‌های عملکرد محصول ندارد. در سطوح نیتروژن کم (سطح نیتروژن N_1 و برای همه سطوح آبیاری) اختلاف مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده پوشش گیاهی به کمک مدل، به‌ویژه در میانه فصل، نسبتاً زیاد بود. مقایسه گرافیکی رشد پوشش گیاهی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده به کمک AquaCrop در مرحله اعتبارسنجی تطابق نتایج مدل را با مقادیر مشاهده‌ای در بیشتر تیمارها نشان داد.

شاخص‌ها و پارامترهای آماری ارزیابی مدل در پیش‌بینی رشد پوشش گیاهی برای هر یک از تیمارهای طی دو سال زراعی در جدول ۵ می‌آید. به طور کلی، متوسط RMSE خطای تخمین درصد پوشش گیاهی (CC) در سال اول و دوم آزمایش به ترتیب ۱۱/۷ و ۷/۳۳ درصد محاسبه شد. آماره NRMSE



شکل ۴. مقایسه رشد پوشش گیاهی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده به کمک AquaCrop در مرحله واسنجی مدل (سال اول)



شکل ۵. مقایسه رشد پوشش گیاهی مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به کمک AquaCrop در مرحله اعتبارسنجی مدل (سال دوم)

جدول ۵. پارامترهای ارزیابی مدل AquaCrop در پیش‌بینی درصد پوشش گیاهی ذرت (واسنجی و اعتبارسنجی)

اعتبارسنجی			واسنجی			تیمار	
CRM (-)	RMSE (%)	NRMSE (%)	CRM (-)	RMSE (%)	NRMSE (%)	سطح نیترژن	سطح آبیاری
۰/۲۷	۹/۱۵	۲۸/۵۳	۰/۲۵	۱۲/۳۰	۲۶/۵۲	N ₁	I ₁
۰/۱۱	۵/۳۵	۱۵/۴۳	۰/۱۳	۸/۰۸	۱۶/۲۸	N ₂	
-۰/۰۹	۴/۹۷	۱۴/۸۸	۰/۰۱	۹/۸۹	۱۸/۹۸	N ₃	
۰/۳۱	۱۱/۱۷	۳۲/۶۶	۰/۳۵	۱۹/۱۸	۳۵/۸۳	N ₁	I ₂
۰/۱۳	۵/۵۳	۱۵/۵۷	۰/۱۴	۹/۹۲	۱۹/۶۵	N ₂	
-۰/۰۵	۵/۰۲	۱۴/۲۹	-۰/۰۱	۸/۸۲	۱۷/۴۲	N ₃	
-۰/۳۳	۱۲/۱	۳۴/۳۹	۰/۳۴	۱۸/۰۶	۳۴/۳۳	N ₁	I ₃
-۰/۰۱	۴/۴۹	۱۲/۲۹	۰/۰۰۹	۹/۲	۱۷/۶۴	N ₂	
۰/۱۳	۵/۸	۱۶/۷۷	۰/۰۴	۴/۳۲	۹/۶۱	N ₃	
۰/۳۲	۱۱/۸۵	۳۳/۹۸	۰/۳۳	۱۷/۷	۳۴/۰۱	N ₁	I ₄
۰/۱۶	۷/۲۴	۱۹/۶۵	۰/۲	۱۲/۹۸	۲۴/۰۵	N ₂	
-۰/۰۲	۴/۹۵	۱۳/۶۵	۰/۰۰۳	۱۰	۱۹/۲۹	N ₃	
۰/۱۰	۷/۳۳	۲۱	۰/۱۴	۱۱/۷	۲۲/۷۹	میانگین	

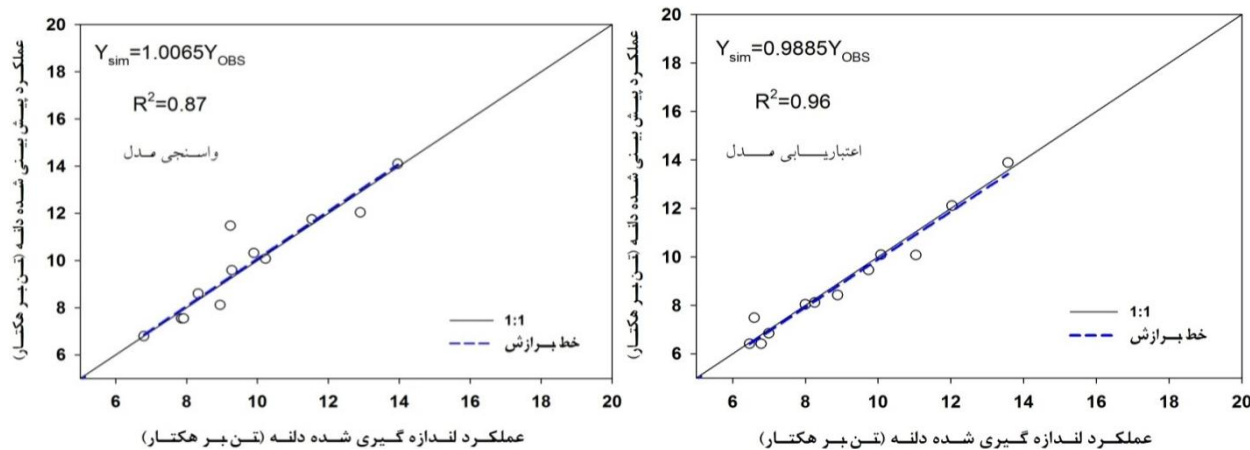
ترتیب ۷/۸۹ و ۴/۸۶ درصد محاسبه شد. مقدار جذر میانگین مربعات خطای پیش‌بینی دانه (RMSE) نیز برای واسنجی و اعتبارسنجی ۰/۷۶ و ۰/۴۳ تن بر هکتار محاسبه شد. همچنین مقادیر CRM در هر دو سال نزدیک به صفر بود که دقت زیاد مدل را نشان می‌دهد. در اعتبارسنجی مدل، بیشترین خطای شبیه‌سازی دانه مربوط به تیمار I₁N₁ بود که در آن خطای نسبی شبیه‌سازی حدود ۱۳ درصد به دست آمد. برای یازده تیمار دیگر مرحله اعتبارسنجی، مقادیر خطای نسبی مدل کمتر از ۸/۲ درصد محاسبه شد. به طور کلی و برای همه تیمارهای آزمایش متوسط خطای نسبی مدل در پیش‌بینی دانه برای

پیش‌بینی عملکرد دانه

مقایسه مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به کمک مدل AquaCrop برای سال‌های اول (واسنجی) و دوم آزمایش (اعتبارسنجی) در شکل ۵ می‌آید که نشان‌دهنده عملکرد دقیق مدل در پیش‌بینی دانه است. پارامترهای آماری ارزیابی مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه، طی واسنجی و اعتبارسنجی مدل، در جدول ۶ می‌آید. مقدار NRMSE در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد که بر اساس دسته‌بندی این آماره مدل‌سازی عملکرد دانه ایده‌آل است. مقادیر NRMSE برای واسنجی و اعتبارسنجی به

صورت گرفته، از جمله Heng et al. (2009) و Hsiao et al. (2009)، مدل AquaCrop عملکرد دانه ذرت را با خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد پیش‌بینی کرد.

واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۵/۳۳ و ۳/۶۸ درصد محاسبه شد. این خطا در تخمین دانه ذرت در دامنه خطاهای گزارش شده در سایر تحقیقات قرار دارد. در بیشتر مطالعات



شکل ۶. مقایسه عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده به کمک AquaCrop در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

جدول ۶. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد دانه (واسنجی و اعتبارسنجی)

پارامتر ارزیابی					مرحله
NRMSE (%)	RMSE (t/ha)	R ² (-)	CRM (-)	MRE (%)	ارزیابی
۷/۸۹	۰/۷۶	۰/۸۷	-۰/۰۰۸	۵/۳۳	واسنجی
۴/۸۶	۰/۴۳	۰/۹۶	۰/۰۱	۳/۶۸	اعتبارسنجی

کاربرد نیتروژن در افزایش ماده خشک مؤثر است. به این ترتیب یکی از ضعف‌های AquaCrop شبیه‌سازی بیش‌برآورد ماده خشک ذرت با کاربرد نیتروژن در شرایط تنش خشکی است. علاوه بر پیش‌بینی رشد ماده خشک و دانه، عملکرد مدل در شبیه‌سازی رشد پوشش گیاهی ارزیابی شد. متوسط جذر میانگین مربع خطای (RMSE) مدل در تخمین رشد پوشش گیاهی طی واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۱۱/۷ و ۷/۳ درصد به دست آمد که حاکی از عملکرد مناسب مدل است. با این حال، تحت تنش نیتروژن (سطح N₁) نتایج پیش‌بینی رشد پوشش گیاهی به کمک مدل از دقت کافی برخوردار نبود. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد مقادیر خطای RMSE در سطوح N₂ و N₃ همواره کمتر از ۱۰ درصد و در سطح نیتروژن N₁ کمتر از ۱۲ درصد است؛ نیز حساسیت مدل در شبیه‌سازی پوشش گیاهی در برابر تنش نیتروژن در مقایسه با تنش آب بیشتر است.

نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت تحت مدیریت‌های مختلف نیتروژن و عمق آبیاری از اعتبار کافی برخوردار است. متوسط خطای نسبی پیش‌بینی دانه به کمک مدل، طی مرحله اعتبارسنجی (سال دوم آزمایش)، ۳/۶۸ درصد به دست آمد. توانایی مدل در شبیه‌سازی روند فصلی رشد ماده خشک تحت مدیریت‌های مختلف نیتروژن و عمق آبیاری نسبتاً مناسب است. بیشترین خطای شبیه‌سازی رشد ماده خشک به کمک AquaCrop تحت تنش آبی شدید و متوسط و به‌ویژه طی دوره‌های رشد رویشی و گل‌دهی گیاه حاصل شد. متوسط RMSE پیش‌بینی ماده خشک به کمک مدل برای واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۱/۳۸ و ۱/۳۵ تن بر هکتار به دست آمد. نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای حاکی از آن است که تحت تنش خشکی اعمال نیتروژن تأثیر قابل توجهی در افزایش ماده خشک ذرت ندارد. اما در مدل AquaCrop تحت شرایط تنش خشکی

REFERENCES

Allen, R. G., Preira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirement. *FAO*

Irrigation and Drainage Paper, No. (56), Rome, Italy.

Dai, X., Shi, H., Li, Y., Ouyang, Z., and Huo, Z.

- (2009). Artificial neural network models for estimating regional reference evapotranspiration based on climate factors. *Hydrological Processes*, 23: 442-450.
- De Juan Valero, J. A. M., Maturano, A., Artigao, J. M., Ramirez, T. M. B., and Ortega, A. J. F. (2005). Growth and nitrogen use efficiency of irrigated maize in a semiarid region as affected by nitrogen fertilization. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3(1), 134-144.
- Geerts, S. and Raes, D. (2009). Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, 1275-1284.
- Ghamari, M., Andarziyan, B., Bakhshandeh, A., Gharineh, M. H., and Fathi, Gh. (2011). Simulate the effects of drought and nitrogen on yield, water and nitrogen use efficiency in maize using CERES-Maize. *Journal of Crop Physiology*, 3(11), 21-31. (In Farsi)
- Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Bannayan, M., Homae, M., and Hoogenboom, G. (2009a). Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. *Agricultural Water Management*, 96(5), 809-821.
- Gheysari, M., Mirlatifi, S. M., Bannayan, M., Homae, M., Asadi, M. S., and Hoogenboom, G. (2009b). Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agricultural Water Management*, 96(6), 946-954.
- Gholami, A. R. and Pirmoradian, N. (2011). Calibration of a simple model (VSM) for yield prediction of corn under different water and nitrogen managements. *Journal of Water and Soil*, 25(2), 258-265. (In Farsi)
- Girardin, P., Tollenaar, M., Deltour, A., and Muldoon, J. (1987). Temporary N starvation in maize (*Zea mays* L.): effects on development, dry matter accumulation and grain yield. *American Society of Agronomy*, 7, 289-296.
- Heng, L. K., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T., and Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *American Society of Agronomy*, 101, 488-498.
- Hsiao, T. C., Heng, L. K., 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 Journal*, 101, 448-459.
- Jones, C. A. and Kiniry, J. R. (1986). CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. *Texas A&M University Press*, College Station, Texas.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., and Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18, 235-265.
- Khoshravesh, M., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., and Kiani, A. R. (2013). AquaCrop model simulation under different irrigation water and nitrogen strategies. *Water Science and Technology*, 67.1: 232: 238. doi: 10.2166/wst.2012.564.
- Kropff, M. J., Cassman, K. G., Van Laar, H. H., and Peng, S. (1993). Nitrogen and yield potential of irrigated rice. *Plant and Soil*, 155/156, 391-394.
- Majdam, M., Naderi, A., Nourmohammadi, GH., Siyadat, A., Aynehband, A., and Mousavi, H. (2008). Effect of water stress values and mode of distribution of nitrogen on yield and nitrogen output of maize. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 39(1), 97-106. (In Farsi)
- Majidian, M., Ghalvand, A., Karimiyan, N., and Kamgar-haghighi, A. A. (2008). Effects of nitrogen different amounts, manure and irrigation water on yield and yield components of corn. *Electronic Journal of Crop Production*, 1(2), 67-85. (In Farsi)
- Majidian, M. and Ghadiri, H. (2002). Effect of water stress and different levels of nitrogen fertilizer during different growth stages on grain yield, yield components, water use efficiency and some physiological characteristics of Corn (*Zea Mays* L.). *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 33(3): 521-533. (In Farsi)
- Majnooni, A., Zand-parsa, SH., Sepaskhah, A. R., Kamgar, A., and Yasrebi, J. (2011). Modification and validation of maize simulation model (MSM) at different applied water and nitrogen levels under furrow irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 57(4), 401-420.
- McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., and Freebairn, D. M. (1996). APSIM: A novel software system for model development, model testing, and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, 50, 255-271.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE: American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3): 885-900.
- Nielsen, D., Juan, J., Garcia, M., and Lyon, J. (2012). Canopy cover and leaf area index relationships for Wheat, Triticale, and Corn. *American Society of Agronomy J.*, 104, 1569-1573.
- Norwood, C. A. (2000). Water use and yield of limited irrigated and dry land corn. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 365-370.
- Patel, J. B., Patel V. J., and Patel, J. R. (2006). Influence of different methods of irrigation and nitrogen levels on crop growth rate and yield of maize (*Zea mays* L.). *Indian Journal of Crop Science*, 1(1-2), 175-177.
- 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. *American Society of 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.
- Rabie, M., Mirlatifi, S. M., and Gheysari, M. (2012a). Calibration and evaluation of the CSM-CERES-MAIZE model for maize hybrid 704 single-cross in Varamin. *Journal of Water and Soil*, 26 (2): 290-299. (In Farsi)
- Rabie, M., Gheysari, M., and Mirlatifi, S. M. (2012b). Evaluation of DSSAT model for nitrate leaching under different water and nitrogen rates in maize field. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources (Water and Soil Science)*, 17 (63): 71-80. (In Farsi)
- Rahimikhoob, H., Sotoodehnia, A., and Massahbavani, A. R. (2014). Calibration and evaluation of Aquacrop for Maize in Qazvin region. *Iranian Journal of irrigation and Drainage*, 8(1), 108-115. (In Farsi)
- Singh A. K., Tripathy, R., and Chopra, U. K. (2008). Evaluation of CERESWheat and CropSystmodels for water-Nitrogen interactions in Wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95: 776-786.
- 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. *Journal of Agronomy*, 101, 426-437.
- Stockle, C. O. and Nelson, R. L. (1994). Cropsyst User's manual (Version 1.0). *Biological Systems Engineering Dept.*, Washington State University, Pullman, WA, USA.
- Zand-Parsa, Sh., Sepaskhah, A. R., and Rownaghi, A. (2006). Development and evaluation of integrated water and nitrogen model for maize. *Agricultural Water Management*, 81, 227-256.