نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی
سال هشتم / شماره چهارم / زمستان ۱۳۹۷

شبیه‌سازی رشد، عملکرد، نیتروژن دانه و کارایی مصرف آب ارقام ذرت دانه‌ای با استفاده از مدل CERES-Maize

یاسر اسماعیلیان[۱*]، محمود رمرودی[۲] و محمد گلوی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱/۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۲)

چکیده

در این پژوهش، مدل CERES-Maize برای ارقام هیبرید ذرت در شرایط اقلیمی گناباد مورد واسنجی، اعتبارسنجی و ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور آزمایشی به‌صورت کرت‌های دوبار خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام گرفت. عامل اصلی شامل سه رژیم آبیاری (آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید)، عامل فرعی در چهار سطح کود نیتروژن (صفر، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و عامل فرعی متشکل از سه رقم هیبرید ذرت (۳۷۰ DC، ۶۷۷ ZP و۷۰۴ SC) بود. مدل CERES-Maize با دقت بالایی حداکثر شاخص سطح برگ ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای را شبیه‌سازی کرد، هرچند مقادیر پیش‌بینی شده در اغلب حالات کمتر از مقادیر واقعی بود. علاوه بر این، مدل به‌طور قابل قبولی عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده را برای سه رقم هیبرید مذکور پیش‌بینی کرد. روند تغییرات نیتروژن دانه ارقام هیبرید ذرت در رژیم‌های مختلف آبی و کودی توسط مدل، بسیار خوب شبیه‌سازی شد. البته مقادیر به‌دست آمده از مدل در اغلب تیمارها کمتر از مقادیر به‌دست آمده از آزمایش مزرعه‌ای بود. مدل به‌خوبی افزایش کارایی مصرف آب را در نتیجه کاهش فراهمی آب و افزایش کاربرد کود نیتروژن شبیه‌سازی کرد. با این حال؛ دقت مدل برای پیش بینی کارایی مصرف آب ذرت با افزایش سطح تنش خشکی به مقدار کمی کاهش یافته و اختلاف بین دو سری داده بیشتر شد. با توجه به نتایج این پژوهش، مدل CERES-Maize را می‌توان برای گرفتن تصمیمات مدیریتی در زراعت ذرت برای مناطق اقلیمی مشابه با محل این آزمایش توصیه کرد.

واژه‌های کلیدی: تشتک تبخیر، تنش خشکی، رشد، مدل شبیه‌سازی

۱. استادیار، گروه کشاورزی، مجتمع آموزش عالی گناباد
۲ و ۳. به‌ترتیب دانشیار و استاد، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: y.esmaeilian@gonabad.ac.ir

مقدمه

بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در جهان مطرح است. کشاورزی حدود ۷۰ درصد آب شیرین و باکیفیت را مصرف می‌کند. از طرف دیگر به‌دلیل محدودیت منابع آبی، تأمین غذای کافی برای جمعیت در حال رشد جهان و نیازهای دیگر آنها از چالش‌های مهم به‌حساب می‌آید. آب همیشه به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده تولیدات زراعی در بسیاری از مناطق جهان که بارندگی کافی نیست، مطرح بوده است. بنابراین اصلاح کارایی آبیاری در دهه‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است (۲۸). امروزه کشاورزان با فشارهای اقتصادی و محیطی زیادی مواجه هستند. در مناطقی که در نواحی خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته‌اند (که منابع آب به‌دلیل بروز خشکی‌های دوره‌ای و فصلی که به‌شدت بر منابع آبی و پایداری آنها تأثیر می‌گذارند کمیاب است)، مشکلات تأمین آب بیشتر است (۱۴). این مسائل و مشکلات در مورد گیاهان زراعی بهاره مانند ذرت به‌خاطر اینکه مراحل رشد آنها در شرایط تقاضای تبخیر اتمسفری بالایی قرار دارد و در نتیجه نیاز آبی بیشتری دارند، شدیدتر است. بنابراین در چنین مناطقی مدیریت آبیاری بایستی با حساسیت بیشتری گرفته شود. یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای دستیابی به این هدف برنامه‌ریزی آبیاری و اعمال روش‌های کم‌آبیاری است. مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی می‌توانند بیشترین کمک برای رسیدن به این اهداف داشته باشند. مدل‌های شبیه‌سازی مختلفی برای آنالیز پاسخ گیاهان زراعی به تنش‌های محیطی و عملیات مدیریت محصولات زراعی توسعه یافته‌اند (۸ و ۴۰). به‌طور خاص، یک مدل گیاه زراعی با در اختیار داشتن مجموعه‌ای از ویژگی‌های ژنتیکی و متغیرهای محیطی می‌تواند به‌صورت یک نمایش کمی برای پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد یک گیاه زراعی به‌کار رود (۲۹). ذرت سال‌هاست که به‌عنوان نمونه‌ای برای تمرکز بر مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌های مربوط به ذرت، مدل CERES است. مدل CERES-Maize یک مدل ارزشمند برای دستیابی به استراتژی‌های مدیریت آبیاری ذرت است (۲۶). نتایج پژوهشی مشخص کرد که شبیه‌سازی مدل CERES-Maize در کرت‌هایی که به‌طور کامل آبیاری شده بودند، با مقادیر اندازه‌گیری شده در مورد مراحل رشدی و عملکرد ذرت مشابه بود. تحت شرایط تنش خشکی ملایم، تفاوت‌هایی در مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مشاهده شد و این تفاوت با افزایش سطح تنش خشکی افزایش یافت (۳۱). پژوهشگران دیگری این مدل را برای بررسی نقش تنش آب بر رشدونمو ذرت به‌کار برده و روش‌هایی برای تعیین مقادیر مطلوب نیتروژن و تراکم گیاهی در چندین مزرعه معرفی کرده‌اند (۳۳).

مدیریت بهینه مصرف نیتروژن برای افزایش عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن و نیز برای جلوگیری از هدرروی این عنصر اهمیت زیادی داشته که در حقیقت این مهم توسط مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی قابل دستیابی است (۶). استفاده از مدل CERES-Maize به‌عنوان روشی مهم برای مطالعه اثرات مدیریت کود نیتروژن در مورد گیاه ذرت شناخته شده است (۳ و ۳۳). گزارش‌ها حاکی از آن است که مدل CERES-Maize قادر است با دقت قابل قبولی تغییرات عملکرد، جذب نیتروژن و واکنش گیاه ذرت به نیتروژن را پیش‌بینی کند (۵ و ۳۲). نتایج پژوهشی نشان داده است که مدل مذکور پیش‌بینی‌های قابل قبولی از تبدیل و انتقال نیتروژن، جذب نیتروژن توسط گیاه، تجمع نیتروژن و توزیع نیترات در نیمرخ خاک به‌دست آورد (۲۴). همچنین مدل CERES-Maize به‌عنوان یک مدل مناسب برای پیش‌بینی تعادل آب و نیتروژن در خاک پیشنهاد شده است (۳۸). ذرت با سطح زیر کشت حدود ۴۳۰ هکتار در منطقه (آمار گرفته شده از جهاد کشاورزی گناباد)، بخشی از نهاده‌های غذایی مورد نیاز دام و طیور در شهرستان گناباد را تأمین می‌کند. از طرفی با توجه به محدودیت و مشکلات تأمین آب و بهینه‌سازی مصرف کود، لزوم تحقیقات کاربردی در حوزه مدیریت مصرف آب و کود (به‌خصوص کودهای ازته) بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. لذا، هدف از انجام این پژوهش واسنجی و اعتبارسنجی مدل CERES-Maize برای

شبیه‌سازی اثرات رژیم‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن بر ارقام مختلف هیبرید ذرت دانه‌ای تحت شرایط اگرواکولوژیکی گناباد بود.

مواد و روش‌ها

آزمایش در سال ۱۳۹۰ در مزرعه تحقیقاتی ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گناباد با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و طول ۵۸ درجه و ۴۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۱۵۰ متر از سطح دریا انجام گرفت. اطلاعات هواشناسی منطقه در طول دوره رشد ارقام ذرت در جدول ۱ آمده است. آزمایش به صورت کرت‌های دوبار خرد شده و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. براساس توصیه ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گناباد و نیز با در نظر گرفتن دور آبیاری مطلوب برای زراعت ذرت در منطقه (۳۹)، سطوح آبیاری به‌صورت آبیاری مطلوب (I_1: آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A)، تنش ملایم (I_2: آبیاری پس از ۱۰۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) و تنش شدید (I_3: آبیاری پس از ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) به‌عنوان عامل اصلی انتخاب شدند. عامل فرعی شامل چهار سطح کود نیتروژن (N_1: ۰، N_2: ۱۲۰، N_3: ۱۸۰ و N_4: ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار) و عامل فرعی فرعی از سه رقم هیبرید ذرت (V_1: DC ۳۷۰، V_2: ZP ۶۷۷ و V_3: SC ۷۰۴) تشکیل شده بود. قبل از پیاده کردن نقشه طرح و اعمال تیمارها از نقاط مختلف مزرعه نمونه‌گیری خاک صورت گرفته و پس از تهیه نمونه مرکب برای آنالیز خاک به آزمایشگاه منتقل شد. جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش را نشان می‌دهد. ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای در ردیف‌هایی با فواصل بین ردیف ۷۵ و فاصله روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر کشت شدند. خصوصیات ارقام هیبرید مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است. آبیاری هر تیمار با توجه به داده‌های تشتک تبخیر کلاس A و به روش سطحی انجام گرفت. در طول دوره رشد، مراحل نموی شامل تاریخ سبز شدن، شروع گل‌دهی، شروع تشکیل بلال و رسیدگی فیزیولوژیکی برای هر رقم هیبرید ثبت شد. اندازه‌گیری حداکثر شاخص سطح برگ ارقام ذرت نیز در مرحله ظهور تاسل به‌وسیله دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (Delta-T Devices) صورت گرفت. عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه پس از رسیدگی هر رقم هیبرید با برداشت بوته‌های دو متر مربع وسط هر کرت محاسبه شد. نیتروژن دانه پس از اندازه‌گیری غلظت این عنصر توسط دستگاه کجلدال و با در اختیار داشتن عملکرد دانه بر مبنای کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

کارایی مصرف آب هر رقم نیز از تقسیم عملکرد دانه در واحد سطح بر مجموع مقدار آب دریافت شده در واحد سطح به‌دست آمد.

تشریح مدل

مدل CERES-Maize (۱۷، ۲۲ و ۳۷) یک مدل رشد گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در مدل سیستم زراعی (CSM: Cropping System Model) است که در سیستم حمایت از تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی (DSSAT: Decision Support System for Agrotechnology Transfer) قرار دارد (۲۱ و ۴۳). DSSAT-CSM تمام مدل‌های ویژه برای تعداد زیادی از گیاهان زراعی را با یکدیگر ترکیب می‌کند. مدل CERES شامل پارامترهای زیادی است که فرایندهای مربوط به گیاه زراعی و خاک را توصیف و مشخص می‌کنند که معمولاً لازم است شماری از آنها به‌وسیله آزمایش‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری شوند. مدل CERES-Maize می‌تواند به‌طور گسترده‌ای برای مشخص کردن اینکه چگونه شرایط محیطی، تصمیم‌های مدیریتی و ژنتیک گیاه زراعی با یکدیگر برهمکنش داشته و چگونه رشد و نمو گیاه ذرت را تحت تأثیر قرار می‌دهند، استفاده شود (۱۶). این مدل قواعد و اصول مربوط به تعادل کربن، نیتروژن و آب را برای شبیه‌سازی فرایندهای روزانه که در طول دوره رشدونمو گیاه ذرت اتفاق می‌افتد، استفاده می‌کند. سپس، عملکرد نهایی ذرت برای دوره رشد شبیه‌سازی شده در تاریخ برداشت محاسبه می‌شود. بر طبق گزارش‌های

جدول ۱. میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی در طول دوره رشد ارقام ذرت

	بارندگی (mm)	درجه حرارت حداقل (°C)	درجه حرارت حداکثر (°C)	رطوبت نسبی حداقل (%)	رطوبت نسبی حداکثر (%)	تشعشع ($MJ/m^2/d$)	سرعت باد (m/s)
اردیبهشت	۱۶	۱۹/۱	۳۲/۵	۲۴/۵	۴۵/۲	۱۱/۱	۸/۴
خرداد	۰	۲۳/۱	۳۶/۵	۱۶/۴	۳۰/۲	۱۲/۵	۷/۹
تیر	۰	۲۲/۷	۳۶/۵	۱۳/۸	۲۶/۵	۱۳/۹	۷/۹
مرداد	۰	۲۲/۶	۳۷/۰	۱۳/۳	۲۶/۱	۱۳/۶	۷/۴
شهریور	۰	۱۷/۵	۳۱/۵	۱۹/۰	۳۴/۵	۱۲/۷	۷/۵

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

pH	EC	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	نیتروژن کل	ماده آلی	بافت خاک
–	(dS/m)	(mg/kg)	(mg/kg)	(%)	(%)	–
۸/۲	۲/۴	۱۸۷	۱۸	۰/۰۶	۰/۲	رسی– شنی

جدول ۳. برخی از خصوصیات ارقام هیبرید مورد مطالعه

هیبرید	منشأ	مورد مصرف	گروه رسیدگی	ارتفاع بوته (cm)	روز تا رسیدگی (Day)	عملکرد دانه پتانسیل (t/ha)
DC ۳۷۰	ایران	دانه‌ای – علوفه‌ای	میان رس	۱۸۰–۲۰۰	۹۰–۱۰۰	۹–۱۱
ZP ۶۷۷	صربستان	دانه‌ای – علوفه‌ای	دیررس	۲۵۰–۲۸۰	۱۲۰–۱۳۵	۱۳–۱۶
SC ۷۰۴	ایران	دانه‌ای – علوفه‌ای	دیررس	۲۵۰–۳۰۰	۱۲۵–۱۳۵	۱۳–۱۵

موجود، این مدل به‌طور قابل قبولی رشد، نمو و عملکرد ذرت را در سطح یک کرت، مزرعه و در مقیاس ناحیه‌ای در بسیاری از مناطق جهان شبیه‌سازی کرده است (۴۲). مدل نمو ریشه، رشد و پیری برگ و ساقه، تجمع بیوماس و تسهیم آن بین ریشه و اندام هوایی، شاخص سطح برگ و رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه را شبیه‌سازی می‌کند (۳۶). همچنین مدل دمای خاک، دسترسی آب در خاک، انتقال نیترات و تغییرات کربن و نیتروژن خاک را به‌خوبی محاسبه می‌کند (۱۵).

داده‌های ورودی مورد نیاز

پارامترهای ورودی مورد نیاز برای مدل CERES-Maize عبارتند از: داده‌های مربوط به اطلاعات آب‌وهوایی، خاک، خصوصیات گیاهی و مدیریت گیاه زراعی. حداقل ورودی‌های مربوط به آب‌وهوا شامل تابش خورشیدی روزانه، درجه حرارت حداقل و حداکثر هوا، و بارندگی است. مدل نیازمند ورودی‌های خاک شامل ضرایب زهکشی و رواناب، خصوصیات مرتبط با نگهداری آب در خاک، بافت خاک، تعداد و عمق هر یک از لایه‌های خاک، عمق نفوذ ریشه، محتوای رطوبت اشباع خاک و محتوای اولیه آب خاک است. خصوصیات گیاهی نیز تحت عنوان ضرایب ژنتیکی وارد مدل می‌شوند.

واسنجی مدل

واسنجی مدل عبارت از تنظیم برخی پارامترها و کارکردها در مدل است، به‌صورتی که مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده

مشابه بوده و یا تناسب خوبی با یکدیگر داشته باشند (۳۴). در مورد مدل CERES-Maize واسنجی شامل تعیین ضرایب ژنتیکی برای هر رقم هیبرید است که در یک مکان خاص رشد می‌کند. این ضرایب شامل P_1: درجه روز رشد (GDD) از مرحله جوانه‌زنی تا انتهای مرحله جوانی براساس دمای پایه هشت درجه سانتی‌گراد (۲۰)، P_2: اثر مدت روشنایی، میزان تأخیر در رشد ذرت در صورت عدم تأمین طول روز مطلوب که با قرار گرفتن گیاه در طول روزی با یک ساعت کوتاه‌تر از طول روز مطلوب اتفاق می‌افتد، P_5: مقدار درجه روز از زمان ظهور کاکل تا رسیدن فیزیولوژیک بر حسب درجه سانتی‌گراد، PHINT: مقدار درجه روز مورد نیاز برای ظاهر شدن یک برگ جدید یا به عبارتی زمان حرارتی بین ظاهر شدن دو برگ متوالی بر حسب درجه سانتی‌گراد، G_2: حداکثر تعداد دانه در گیاه و G_3: سرعت رشد دانه در مرحله پرشدن دانه در شرایط بهینه رشد برحسب میلی‌گرم در روز است. در این آزمایش واسنجی مدل با استفاده از تیمارهای مربوط به رژیم آبیاری مطلوب (آبیاری پس از ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A) و مقایسه بین داده‌های پیش‌بینی شده و شبیه‌سازی شده برای عملکرد دانه، زیست‌توده و شاخص سطح برگ انجام شد.

اعتبار سنجی و ارزیابی مدل

دقت پیش‌بینی‌های مدل توسط ضریب تعیین (R^2) و شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE: Normalized root mean square error) براورد شد. nRMSE به‌عنوان بهترین معیار ارزیابی دقت مدل، بیانگر میانگین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل است که از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

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

در رابطه بالا P_i: مقادیر پیش‌بینی شده، O_i: مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{O}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و تعداد مشاهدات است. اگر مقدار nRMSE کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی بسیار خوب، اگر بیشتر از ۱۰ درصد و کمتر از ۲۰ درصد باشد شبیه‌سازی خوب، بیشتر از ۲۰ درصد و کمتر از ۳۰ درصد شبیه‌سازی نسبتاً خوب و بالای ۳۰ درصد شبیه‌سازی ضعیف ارزیابی می‌شود (۲). همچنین هرچه مقادیر R^2 به یک نزدیک‌تر باشند، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل و تطابق بیشتر بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده است.

نتایج و بحث

واسنجی مدل

نتایج واسنجی که با استفاده از تیمارهای مربوط به آبیاری مطلوب انجام گرفت نشان داد که مدل CERES-Maize با دقت بالایی مراحل فنولوژیکی از قبیل تاریخ گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیکی را برای سه رقم هیبرید ذرت به‌کار رفته در آزمایش مطابق با مشاهده‌های مزرعه‌ای شبیه‌سازی کرد. همچنین تطابق مناسبی بین داده‌های پیش‌بینی شده برای عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده و شاخص سطح برگ با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه برای ارقام هیبرید ذرت وجود داشت. مدل تاریخ گل‌دهی سه رقم هیبرید ۳۷۰ DC، ۶۷۷ ZP و ۷۰۴ SC را به‌ترتیب دو روز بیشتر، سه روز کمتر و دو روز کمتر از تاریخ ثبت شده در مزرعه محاسبه کرد. همچنین تاریخ رسیدگی فیزیولوژیکی برای این سه رقم هیبرید به‌ترتیب یک روز بیشتر، یک روز کمتر و دو روز کمتر براورد شد.

اعتبارسنجی و ارزیابی مدل

پس از واسنجی مدل، توانایی و قدرت مدل برای پیش‌بینی حداکثر شاخص سطح برگ، عملکرد دانه، زیست‌توده، نیتروژن دانه و کارایی مصرف آب ارقام مختلف هیبرید ذرت دانه‌ای در رژیم‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن ارزیابی شد.

حداکثر شاخص سطح برگ

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل در اغلب حالات میزان

حداکثر شاخص سطح برگ را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برای هر رقم هیبرید پیش‌بینی می‌کند. البته روند تغییرات حداکثر شاخص سطح برگ براساس تغییرات در سطح آبیاری و کود نیتروژن مشابه با روند اندازه‌گیری شده در مزرعه بود، هرچند میزان بزرگی افزایش و یا کاهش آن در برابر افزایش و یا کاهش تیمارهای آزمایش کمی متفاوت بود (جدول ۳). نتایج شبیه‌سازی در مورد رقم هیبرید DC ۳۷۰ مشخص کرد، بیشترین خطای نسبی بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده در تیمار عدم مصرف کود در تمام سطوح آبیاری وجود داشت که مشخص می‌کند، مدل این پارامتر را در این سطح کودی به خوبی سایر تیمارها شبیه‌سازی نکرده و مقدار آن را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده، گزارش می‌کند. اما در سایر سطوح کود نیتروژن مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بسیار به یکدیگر نزدیک بودند. تخمین دقیق شاخص سطح برگ به‌دلیل اینکه فتوسنتز کانوپی و در پی آن تجمع ماده خشک گیاه زراعی به‌شدت متأثر از توسعه سطح برگ است، دارای اهمیت است (۴). محققان دیگری نیز با ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی LAI ذرت به این نتیجه رسیدند که اگرچه مدل با دقت قابل قبولی این شاخص را پیش‌بینی کرد، ولی مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر به‌دست آمده بود (۹). بزرگی و کوچکی داده‌های خطای نسبی تعیین‌کننده وجود و یا عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین دو سری داده مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است به‌طوری که خطای نسبی پایین نشان‌دهنده نزدیکی داده‌های خروجی مدل با مقادیر واقعی بود که در نهایت روی نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی مدل و تعیین کارایی آن در شبیه‌سازی هر پارامتر مؤثر است (۳۵). مدل به‌ویژه در تمام تیمارهای کودی سطح تنش ملایم خشکی مقادیر سطح برگ را کمتر از مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در مزرعه تخمین زد (جدول ۴). محققان دیگری نیز با شبیه‌سازی سطح برگ ذرت در سطوح مختلف تنش خشکی اظهار داشتند که مدل CERES-Maize در شرایط کمبود آب ملایم، سطح برگ را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی کرد (۳۱). بر طبق نتایج ارزیابی مدل، R^2 به‌دست آمده (۰/۸۹) بیان‌کننده این است که مدل CERES-Maize حداکثر شاخص سطح برگ را در ذرت رقم DC ۳۷۰ در شرایط آزمایش گناباد با دقت نسبتاً خوبی شبیه‌سازی کرده است. همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده به‌دست آمده (nRMSE=٪۷/۲۸) نشان‌دهنده دقت بالای مدل برای پیش‌بینی حداکثر شاخص سطح برگ این هیبرید تحت شرایط رژیم‌های آبیاری و کودی است (جدول ۹).

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل به‌خوبی روند افزایش شاخص سطح برگ را درنتیجه افزایش مصرف کود نیتروژن در رقم هیبرید ZP ۶۷۷ متناسب با روند مشاهده شده در مزرعه شبیه‌سازی کرد. شاخص ضریب تعیین (R^2=۰/۹۶) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE=٪۶/۷۶) نیز نشان‌دهنده همبستگی و تطابق بالای مقادیر به‌دست آمده و پیش‌بینی شده توسط مدل و نیز کارایی و دقت بالای مدل CERES-Maize برای پیش‌بینی واکنش سطح برگ رقم هیبرید مذکور به مدیریت آب و نیتروژن است (جدول ۹).

در مورد رقم هیبرید SC ۷۰۴ نیز نتایج نشان داد که بین مقادیر به‌دست آمده و پیش‌بینی شده تناسب خوبی وجود داشت. به غیر از سطح کودی مصرف ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در تنش خشکی ملایم، مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود (جدول ۴). به‌طورکلی مقادیر حداکثر شاخص سطح برگ مشاهده شده به‌ویژه در تیمارهای تنش خشکی پایین‌تر از حد انتظار بود که دلیل آن احتمال دارد مربوط به شدت تابش نور خورشید و درجه حرارت‌های بالا در طول دوره رشد گیاهان و اثرات تنش خشکی بر افزایش تعرق، کاهش آماس سلولی، کاهش فتوسنتز و کاهش تعداد و اندازه برگ باشد (۳۰ و ۴۴). مقدار R^2 برای رقم هیبرید SC ۷۰۴ در شرایط مختلف سطوح تنش خشکی و مصرف نیتروژن ۰/۹۴ به‌دست آمد. nRMSE نیز برای این رقم ۷/۱۵ درصد به‌دست آمد. این نتایج نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ این رقم هیبرید است (جدول ۹).

جدول ۴. مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل

تیمار	هیبرید DC ۳۷۰			هیبرید ZP ۶۷۷			هیبرید SC ۷۰۴		
	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	خطای نسبی (%)	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	خطای نسبی (%)	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	خطای نسبی (%)
I_1N_1	۲/۰۷	۱/۷۸	۱۴	۲/۱۰	۲/۰۰	۵	۲/۴۳	۱/۹۷	۱۹
I_1N_2	۲/۹۰	۲/۸۲	۳	۳/۰۰	۲/۷۳	۹	۲/۹۳	۲/۸۵	۳
I_1N_3	۳/۲۰	۳/۰۸	۴	۳/۳۷	۲/۹۵	۱۲	۳/۱۰	۳/۰۰	۳
I_1N_4	۳/۳۴	۳/۳۶	-۱	۳/۴۱	۳/۱۴	۸	۳/۳۷	۳/۱۶	۶
I_2N_1	۲/۱۷	۱/۸۳	۱۶	۲/۰۱	۱/۹۹	۱	۲/۳۷	۱/۹۸	۱۶
I_2N_2	۳/۰۳	۲/۷۴	۱۰	۲/۹۰	۲/۷۰	۷	۲/۸۳	۲/۷۱	۴
I_2N_3	۳/۲۰	۲/۹۳	۸	۳/۰۰	۲/۹۹	۰	۳/۱۲	۳/۰۰	۴
I_2N_4	۳/۴۰	۳/۱۵	۷	۲/۳۲	۳/۲۱	۳	۳/۳۰	۳/۲۳	۲
I_3N_1	۱/۹۹	۱/۷۴	۱۳	۱/۹۳	۱/۹۱	۱	۲/۰۰	۱/۹۰	۵
I_3N_2	۲/۷۰	۲/۶۷	۱	۲/۸۵	۲/۶۶	۷	۲/۷۱	۲/۶۳	۳
I_3N_3	۲/۸۰	۲/۸۱	۰	۳/۰۰	۲/۹۳	۲	۳/۰۵	۲/۸۹	۵
I_3N_4	۳/۰۰	۲/۹۸	۱	۳/۳۳	۳/۱۹	۴	۳/۲۰	۳/۱۳	۲

I_1، I_2، I_3: به‌ترتیب آبیاری پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A، N_1، N_2، N_3 و N_4: به‌ترتیب کاربرد صفر، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار

عملکرد دانه

مقایسه خروجی شبیه‌سازی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد هرچند پاسخ مدل به افزایش سطوح نیتروژن برای عملکرد دانه در بسیاری از حالات با آنچه در آزمایش مزرعه‌ای اندازه‌گیری شده بود، مطابقت کامل نداشت و افزایش عملکرد دانه در نتیجه افزایش سطوح نیتروژن کمتر از افزایش عملکرد مشاهده شده در مزرعه بود، اما مدل روند افزایش عملکرد دانه را نسبت به تغییر سطوح نیتروژن و آبیاری به‌خوبی شبیه‌سازی کرد. نتایج پیش‌بینی مدل به‌خوبی و همانند نتایج مشاهده شده در آزمایش مزرعه‌ای، گویای اثر منفی معنی‌دار و قابل توجه تنش خشکی ناشی از کم‌آبیاری بر عملکرد دانه ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای است (جدول ۵). مطالعات دیگری با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در مورد ذرت در شرایط آبیاری غرقاب نشان داده است که ۵۰ تا ۷۰ درصد تغییرات عملکرد ذرت می‌تواند به‌میزان دسترسی به آب نسبت داده شود (۱۰). جدول ۵ بیانگر نزدیکی مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده برای رقم DC ۳۷۰ در آزمایش مزرعه‌ای است. روند کاهش عملکرد دانه پیش‌بینی شده در نتیجه کمبود رطوبت خاک در اثر اعمال کم آبیاری به‌میزان قابل قبولی متناسب با شرایط مشاهده شده در مزرعه است. همچنین شبیه‌سازی واکنش این رقم به کمبود نیتروژن خاک و از طرف دیگر افزایش فراهمی آن در بیشتر حالات به‌خوبی توسط مدل صورت گرفته است.

نتایج اعتبارسنجی و ارزیابی مدل (جدول ۹) نشان داد که بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر عملکرد ثبت شده در آزمایش مزرعه‌ای، همبستگی و توافق خوبی وجود دارد (R^2=۰/۹۷). همچنین nRMSE=٪۵/۹۰ بیان‌کننده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه این رقم است. چنین تطابق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل CERES-Maize با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (۱۰).

در مورد رقم هیبرید ZP ۶۷۷، در تمام تیمارهای مربوط به رژیم‌های آبیاری (به غیر از تیمار مصرف ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در شرایط تنش خشکی شدید) مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در مقایسه با مقادیر حاصل از آزمایش مزرعه‌ای پایین‌تر بود. جدول ۵ نشان می‌دهد شبیه‌سازی واکنش این رقم به فراهمی آب و نیتروژن با تناسب خوبی نسبت به شرایط مزرعه توسط مدل صورت گرفته است. یافته‌های مشابه با این آزمایش اخیراً گزارش شده است (۲۷). ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده محاسبه شده برای این رقم (جدول ۹) در میان تمام تیمارها به‌ترتیب برابر با ۰/۹۷ و ۹/۲۵ درصد بود. این نتایج نشان‌دهنده شبیه‌سازی قابل قبول عملکرد دانه رقم هیبرید ZP ۶۷۷ در شرایط مدیریت آب و نیتروژن بود.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی عملکرد رقم هیبرید SC ۷۰۴ در سطوح مختلف آبیاری و مصرف نیتروژن در جدول ۵ آمده است. همان‌طور که مشخص است در اغلب موارد به‌جز سطوح کودی سوم و چهارم در رژیم آبیاری تنش شدید، مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از اندازه‌گیری شده بود، هرچند مقادیر مذکور به یکدیگر نزدیک بودند. البته این اختلاف در مورد تیمارهای عدم مصرف کود در تمام رژیم‌های آبیاری نسبت به سایر تیمارها به‌طور محسوس و معنی‌داری بیشتر بود. ضریب همبستگی ۰/۹۸ و nRMSE برابر با ۸/۴۶ درصد بیانگر توانایی بالای مدل به‌کار رفته برای پیش‌بینی عملکرد دانه ذرت رقم هیبرید SC ۷۰۴ در تیمارهای مورد بررسی و شرایط اقلیمی مکان این آزمایش است (جدول ۹). اسدی و کلمنت (۱) نیز به دقت و کارایی بالای مدل CERES-Maize، برای پیش‌بینی عملکرد ذرت در شرایط سطوح مختلف نیتروژن و آب آبیاری اشاره کرده‌اند.

عملکرد زیست‌توده

مقایسه عملکرد زیست‌توده پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده رقم هیبرید DC ۳۷۰ در جدول ۶ آورده شده است. مدل CERES-Maize به‌جز در مورد تیمار مصرف ۱۸۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار در شرایط تنش شدید، عملکرد زیست‌توده را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین زد. البته این اختلاف

جدول ۵. مقادیر عملکرد دانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل

تیمار	هیبرید DC ۳۷۰			هیبرید ZP ۶۷۷			هیبرید SC ۷۰۴		
	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)
I_1N_1	۳۷۰۷	۳۵۵۷	۴	۵۷۳۴	۵۲۹۶	۸	۶۰۴۴	۵۲۸۹	۱۲
I_1N_2	۵۳۲۹	۵۴۷۹	-۳	۸۷۶۷	۸۱۶۵	۷	۸۶۰۰	۸۱۶۲	۵
I_1N_3	۶۰۲۹	۵۷۷۱	۴	۹۲۹۳	۸۶۱۸	۷	۸۹۹۴	۸۵۱۹	۵
I_1N_4	۶۶۵۶	۶۰۶۴	۹	۹۳۳۳	۸۹۹۲	۴	۹۷۰۰	۸۸۴۱	۹
I_2N_1	۳۱۵۳	۲۹۵۰	۶	۴۵۴۴	۴۲۵۳	۶	۵۰۴۲	۴۲۳۱	۱۶
I_2N_2	۴۶۰۰	۴۶۲۷	-۱	۶۰۴۲	۵۸۷۴	۳	۶۴۴۵	۵۹۵۹	۸
I_2N_3	۵۰۳۳	۴۹۹۰	۱	۷۲۵۱	۶۳۳۸	۱۳	۶۸۶۷	۶۴۲۹	۶
I_2N_4	۵۲۱۳	۵۱۲۸	۲	۷۵۲۰	۶۳۶۹	۱۵	۶۸۲۱	۶۴۸۴	۵
I_3N_1	۲۲۳۳	۲۲۸۶	-۲	۲۷۴۷	۲۲۶۰	۱۸	۲۶۶۷	۲۱۷۲	۱۹
I_3N_2	۳۵۷۷	۳۵۲۳	۲	۴۲۱۵	۳۹۶۵	۶	۳۹۴۱	۳۷۸۴	۴
I_3N_3	۳۹۶۲	۳۶۲۸	۸	۴۶۳۱	۴۳۶۲	۶	۴۰۵۳	۴۰۸۶	-۱
I_3N_4	۴۱۶۷	۳۷۱۵	۱۱	۴۱۸۸	۴۵۹۱	-۱۰	۴۱۴۹	۴۲۵۹	-۳

I_1، I_2، I_3: به‌ترتیب آبیاری پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A، N_1، N_2، N_3 و N_4: به‌ترتیب کاربرد صفر، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار

در اغلب حالات ناچیز بود، همچنین تغییرات زیست‌توده در تیمارهای مختلف روند مشابهی را نشان داد. مقادیر R^2 و nRMSE (به‌ترتیب ۰/۹۷ و ۴/۸۶ درصد) برای این هیبرید مشخص کننده شبیه‌سازی خوب و قابل قبول مدل به‌کار رفته برای پیش‌بینی عملکرد زیست‌توده است (جدول ۹). درنتیجه یک بررسی برای ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی واکنش ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف آبیاری و کود نیتروژن به شبیه‌سازی با دقت بالای این مدل در تخمین روند تغییرات عملکرد زیست‌توده در رژیم‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن اشاره شده است (۲۷).

در مورد رقم هیبرید ZP ۶۷۷، نزدیکی مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده در تیمارهای مربوط به سطح تنش ملایم خشکی نسبت به سایر رژیم‌های آبیاری بیشتر بود. بیشترین اختلاف بین این مقادیر در تیمار عدم مصرف کود در شرایط تنش شدید خشکی مشاهده شد (جدول ۶). نتایج ارزیابی مدل (جدول ۹) توافق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای صفت مذکور در این هیبرید را نشان داد (R^2=۰/۹۳ و nRMSE=٪۶/۶۹).

نتایج شبیه‌سازی مشخص کرد که واکنش شبیه‌سازی شده عملکرد زیست‌توده ذرت رقم هیبرید SC ۷۰۴ نسبت به آبیاری و کاربرد کود نیتروژن روند مشابه با واکنش اندازه‌گیری شده در مزرعه را نشان داد، البته در مقدار بزرگی واکنش اختلاف کمی مشاهده شد، به‌طوری که مدل آن را در تمام تیمارها کمتر از مقادیر ثبت شده در مزرعه محاسبه کرد (جدول ۶). تولید زیست توده توسط مدل به‌عنوان تابعی از تشعشعات فعال فتوسنتزی دریافت شده توسط گیاه تخمین زده می‌شود که خود به‌عنوان تابعی از شاخص سطح برگ است. بنابراین، عملکرد زیست‌توده پایین‌تر پیش‌بینی شده توسط مدل احتمالاً می‌تواند درنتیجه پیش‌بینی شاخص سطح برگ کمتر در مورد این هیبرید باشد (۱۲). همچنین این ممکن است به‌دلیل اشتباه در تخمین ضرایب تسهیم باشد که منجر به بیشتر شدن شاخص برداشت و نیز پیش‌بینی پایین‌تر زیست‌توده در موقع واسنجی می‌شود و یا به‌دلیل اشتباه مدل در تخمین محتوای آب خاک باشد که هدرروی نیتروژن به‌دلیل آبشویی را نسبت به شرایط واقعی مزرعه بیشتر نشان داده که نهایتاً، زیست‌توده گیاهی را در اثر کاهش محتوای نیتروژن قابل دسترس گیاه زراعی، کمتر تخمین می‌زند. (۴۱). مقدار R^2 برای رقم هیبرید SC ۷۰۴ عدد ۰/۹۸ را نشان داد. همچنین nRMSE در میان تمام رژیم‌های آبیاری و کود نیتروژن ۸/۱۲ درصد بود که نشان داد مدل CERES-Maize عملکرد زیست‌توده را با دقت مطلوبی شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۹).

نیتروژن دانه

نیتروژن دانه معیار خوبی برای تعیین کیفیت دانه غلات است. برای اینکه مدل‌های شبیه‌سازی به تولید کنندگان برای تعیین استراتژی‌های مناسب مدیریت نیتروژن کمک کنند باید تخمین دقیقی از میزان نیتروژن دانه داشته باشند (۲۳). نتایج شبیه‌سازی در مورد رقم هیبرید DC ۳۷۰ (جدول ۷) مشخص کرد که روند افزایش نیتروژن دانه در پاسخ به افزایش فراهمی آب و نیتروژن به‌طور قابل قبولی توسط مدل CERES-Maize شبیه‌سازی شده است. مدل نیتروژن دانه را در سطح آبیاری مطلوب بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین زد. اما در بیشتر حالات در سطوح دیگر آبیاری مقادیر پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر به‌دست آمده از آزمایش مزرعه‌ای بود. ضریب تعیین ۰/۹۴ و ریشه میانگین مربعات خطای ۷/۲۶ درصد بیانگر توانایی بالای مدل در پیش‌بینی عملکرد نیتروژن این هیبرید در رژیم‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن است (جدول ۹).

داده‌های جدول ۷ نشان می‌دهند که میزان نیتروژن دانه رقم هیبرید ZP ۶۷۷ بالاتر از هیبرید DC ۳۷۰ است که از سویی می‌تواند به بالاتر بودن محتوای نیتروژن دانه و از طرف دیگر به بیشتر بودن عملکرد دانه این هیبرید نسبت به هیبرید دیگر نسبت داده شود. البته مقایسه عملکرد نیتروژن شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده این دو هیبرید نشان می‌دهد که رقم ZP ۶۷۷ نسبت به DC ۳۷۰ تأثیر منفی بیشتری از تنش خشکی اعمال شده گرفته است و عملکرد نیتروژن آن کاهش نسبی بیشتری

جدول ۶. مقادیر عملکرد زیست‌توده شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل

تیمار	هیبرید DC ۳۷۰			هیبرید ZP ۶۷۷			هیبرید SC ۷۰۴		
	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)
I_1N_1	۹۵۷۷	۱۰۳۶۶	-۸	۱۲۵۶۴	۱۲۱۸۱	۳	۱۳۲۶۵	۱۲۲۲۸	۸
I_1N_2	۱۴۳۰۵	۱۴۵۸۹	-۲	۱۷۹۹۸	۱۶۲۱۹	۱۰	۱۷۸۳۳	۱۶۶۹۵	۶
I_1N_3	۱۵۲۳۰	۱۵۴۴۰	-۱	۱۸۹۴۲	۱۷۵۲۶	۷	۱۸۴۳۳	۱۷۷۴۶	۴
I_1N_4	۱۶۱۸۰	۱۶۳۲۹	-۱	۱۸۱۸۰	۱۸۶۰۰	-۲	۱۹۱۲۰	۱۸۶۹۴	۲
I_2N_1	۸۷۶۰	۹۴۳۶	-۸	۱۰۱۶۰	۱۰۶۶۷	-۵	۱۲۲۵۳	۱۰۷۶۹	۱۲
I_2N_2	۱۲۲۹۶	۱۳۰۸۶	-۶	۱۳۵۲۶	۱۳۵۶۶	۰	۱۴۸۷۰	۱۳۷۲۷	۸
I_2N_3	۱۲۶۳۶	۱۳۸۰۸	-۹	۱۴۸۸۲	۱۴۶۶۴	۱	۱۶۵۷۷	۱۴۷۸۲	۱۱
I_2N_4	۱۳۸۳۰	۱۴۳۸۶	-۴	۱۴۷۲۲	۱۵۳۶۱	-۴	۱۶۷۵۰	۱۵۵۴۰	۷
I_3N_1	۷۶۷۰	۸۲۱۲	-۷	۹۱۶۷	۷۹۶۲	۱۳	۹۱۹۰	۷۹۷۴	۱۳
I_3N_2	۱۰۵۴۰	۱۰۸۷۲	-۳	۱۰۹۲۳	۱۰۳۸۶	۵	۱۱۲۶۰	۱۰۴۹۸	۷
I_3N_3	۱۱۴۹۰	۱۱۱۰۷	۳	۱۲۶۹۶	۱۱۱۸۰	۱۲	۱۲۴۳۰	۱۱۰۹۱	۱۱
I_3N_4	۱۱۵۱۳	۱۱۵۹۲	-۱	۱۱۹۰۰	۱۱۸۳۹	۱	۱۳۰۲۰	۱۱۶۹۷	۱۰

I_1، I_2، I_3: به‌ترتیب آبیاری پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A، N_1، N_2، N_3 و N_4: به‌ترتیب کاربرد صفر، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار

جدول ۷. مقادیر نیتروژن دانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل

تیمار	هیبرید DC ۳۷۰			هیبرید ZP ۶۷۷			هیبرید SC ۷۰۴		
	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/ha)	شبیه‌سازی شده (kg/ha)	خطای نسبی (%)
I_1N_1	۵۰	۵۱	-۲	۷۲	۶۷	۷	۶۶	۶۸	-۳
I_1N_2	۷۷	۸۴	-۹	۱۰۷	۱۰۷	۰	۱۰۵	۱۰۹	-۴
I_1N_3	۸۹	۹۱	-۲	۱۲۷	۱۱۸	۷	۱۲۳	۱۱۸	۴
I_1N_4	۹۵	۱۰۰	-۵	۱۳۲	۱۲۸	۳	۱۳۵	۱۲۷	۶
I_2N_1	۴۱	۳۸	۷	۵۱	۴۶	۱۰	۴۳	۴۶	-۷
I_2N_2	۵۹	۶۷	-۱۴	۸۶	۷۱	۱۷	۸۶	۷۲	۱۶
I_2N_3	۷۸	۷۴	۵	۱۰۲	۸۳	۱۹	۱۰۱	۸۳	۱۸
I_2N_4	۸۹	۸۰	۱۰	۱۰۵	۹۰	۱۴	۱۰۳	۹۱	۱۲
I_3N_1	۳۴	۳۰	۱۲	۳۰	۲۶	۱۳	۳۱	۲۵	۱۹
I_3N_2	۵۷	۶۰	-۵	۷۱	۵۹	۱۷	۵۱	۵۷	-۱۲
I_3N_3	۶۴	۶۴	۰	۷۵	۷۱	۵	۷۶	۶۷	۱۲
I_3N_4	۷۰	۶۷	۴	۷۸	۸۱	-۴	۷۹	۷۵	۵

I_1، I_2، I_3: به‌ترتیب آبیاری پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A، N_1، N_2، N_3 و N_4: به‌ترتیب کاربرد صفر، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار

داشته است. جدول ۷ به‌خوبی نشان می‌دهد که مدل CERES-Maize روند کاهش نیتروژن دانه رقم ZP ۶۷۷ در نتیجه اعمال تنش خشکی را مشابه با حالتی که در مزرعه مشاهده شد، پیش‌بینی کرد. همچنین تغییرات نیتروژن دانه در اثر تغییر سطوح کود نیتروژن با شرایط مزرعه تطابق و همسانی مناسبی داشت. هرچند مدل در اغلب حالات نیتروژن دانه را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایش مزرعه‌ای شبیه‌سازی کرد که دلیل آن می‌تواند به پیش‌بینی کمتر از مقدار واقعی عملکرد دانه در این هیبرید نسبت داده شود (جدول ۵). ضریب تعیین محاسبه شده (۰/۹۵) گویای همبستگی خوب بین داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده در شرایط آزمایش مزرعه‌ای است. nRMSE محاسبه شده (۱۱/۳۰ درصد) هرچند بیشتر از هیبرید DC ۳۷۰ به‌دست آمد، اما می‌تواند گواه بر دقت خوب مدل در پیش‌بینی روند تغییرات نیتروژن دانه در تیمارهای آبیاری و نیتروژن در شرایط این آزمایش باشد (جدول ۹).

مقایسه داده‌های خروجی مدل برای نیتروژن رقم هیبرید SC ۷۰۴ نشان داد که مدل CERES-Maize به‌خوبی اثرات سطوح مختلف فراهمی آب و نیتروژن بر نیتروژن این هیبرید را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج نشان داد که در بیشتر حالات (به‌خصوص برای سطح تنش ملایم) مدل مقادیر کمتری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده به‌دست آورد (جدول ۷). محقق دیگری نیز با شبیه‌سازی نیتروژن دانه نشان داد که پیش‌بینی مدل کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود، اما روند افزایش نیتروژن دانه در نتیجه افزایش مصرف کود نیتروژن کاملاً مطابق با مقادیر واقعی به‌دست آمده بود (۷). مدل همچنین به‌خوبی اثرات تنش خشکی بر میزان نیتروژن دانه را مطابق با شرایط آزمایش مزرعه‌ای شبیه‌سازی کرد. ضریب تعیین برای تمام تیمارهای مربوط به رقم هیبرید SC ۷۰۴ عدد ۰/۹۴ را نشان داد که گویای همبستگی و تطابق خوب بین داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده است. محاسبه nRMSE نیز عدد ۱۰/۶۹ درصد را حاصل کرد که پیش‌بینی با دقت نسبتاً بالای نیتروژن دانه در پاسخ به تیمارهای این آزمایش توسط مدل CERES-Maize را نشان می‌دهد (جدول ۹). در آزمایشی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی پویایی نیتروژن تحت اثرات مدیریت آب و نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل به‌خوبی جذب نیتروژن را در ذرت در منطقه گرمسیری شبیه‌سازی کرد (۱).

کارایی مصرف آب

مقایسه بین داده‌های کارایی مصرف آب حاصل از خروجی مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش مزرعه‌ای در جدول ۸ آورده شده است. همان‌طور که از نتایج جدول مشخص است تطابق و نزدیکی بسیار خوبی بین دو سری داده در مورد رقم هیبرید DC ۳۷۰ وجود داشت. بیشترین مطابقت در بین تیمارهای مربوط به سطح دوم آبیاری مشاهده شد. مدل روند تغییرات کارایی مصرف آب در پاسخ به تغییرات فراهمی آب و نیتروژن این هیبرید را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد. همان‌طور که قابل انتظار بود، کاهش دفعات آبیاری اثر معنی‌داری بر افزایش کارایی مصرف آب گذاشت، چنان که در مجموع بیشترین مقادیر مربوط به سطح سوم آبیاری و کمترین مقادیر متعلق به آبیاری مطلوب بود. محقق دیگری نیز اظهار داشت اگر اعمال کم‌آبیاری در یک دوره رشدی خاص رخ ندهد، کارایی مصرف آب گرایش به افزایش خواهد داشت (۱۹). در مورد تیمارهای نیتروژن نیز نتایج قابل قبولی به‌دست آمد. نتایج پیش‌بینی مدل و داده‌های حاصل از آزمایش به‌خوبی گویای اثر مثبت و معنی‌دار کاربرد نیتروژن بر افزایش کارایی مصرف آب هیبرید مذکور است. این تأثیر به‌ویژه در تیمارهای تنش خشکی محسوس‌تر بود. در مورد نتایج مدل و آزمایش مزرعه‌ای در ارتباط با بهترین تیمار نسبت به مقادیر واقعی اختلاف وجود داشت. به‌صورتی که با توجه به نتایج مدل بهترین تیمار برای دستیابی به بالاترین کارایی مصرف آب تیمار I_3N_4 بود، اما نتایج مزرعه‌ای نشان داد بهترین تیمار در این ارتباط تیمار I_2N_4 بود. نتایج ارزیابی مدل (جدول ۹) مقدار

جدول ۸. مقادیر کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای و درصد خطای نسبی شبیه‌سازی توسط مدل

تیمار	هیبرید DC ۳۷۰			هیبرید ZP ۶۷۷			هیبرید SC ۷۰۴		
	مشاهده شده (kg/mm)	شبیه‌سازی شده (kg/mm)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/mm)	شبیه‌سازی شده (kg/mm)	خطای نسبی (%)	مشاهده شده (kg/mm)	شبیه‌سازی شده (kg/mm)	خطای نسبی (%)
I_1N_1	۵/۴۵	۵/۲۳	۴	۶/۲۳	۶/۰۳	۳	۶/۶۸	۶/۱۷	۸
I_1N_2	۷/۸۴	۸/۰۶	-۳	۹/۵۳	۹/۰۷	۵	۹/۳۵	۹/۲۲	۱
I_1N_3	۹/۱۶	۸/۴۹	۷	۱۰/۱۰	۹/۸۱	۳	۹/۷۸	۹/۹۷	-۲
I_1N_4	۹/۷۹	۸/۹۲	۹	۱۰/۱۴	۱۰/۲۴	-۱	۱۰/۵۶	۱۰/۵۴	۰
I_2N_1	۷/۱۷	۷/۲۴	-۱	۸/۴۱	۹/۰۲	-۷	۱۱/۰۰	۹/۲۲	۱۶
I_2N_2	۱۰/۴۵	۱۰/۴۲	۰	۱۱/۱۹	۱۳/۳۲	-۱۹	۱۳/۷۹	۱۳/۴۴	۳
I_2N_3	۱۱/۴۴	۱۱/۲۴	۲	۱۳/۴۳	۱۴/۶۵	-۹	۱۴/۹۹	۱۴/۸۶	۱
I_2N_4	۱۱/۸۵	۱۱/۸۲	۰	۱۳/۹۳	۱۵/۷۵	-۱۳	۱۵/۸۸	۱۵/۹۹	-۱
I_3N_1	۶/۹۸	۷/۱۴	-۲	۷/۶۳	۶/۵۸	۱۴	۷/۴۱	۶/۷۶	۹
I_3N_2	۱۱/۱۸	۱۱/۰۱	۲	۱۱/۷۱	۱۱/۴۰	۳	۱۰/۹۵	۱۱/۷۴	-۷
I_3N_3	۱۲/۳۸	۱۱/۳۴	۸	۱۲/۸۶	۱۱/۹۸	۷	۱۱/۲۶	۱۲/۲۵	-۹
I_3N_4	۱۳/۰۲	۱۱/۶۱	۱۱	۱۱/۶۳	۱۲/۴۴	-۷	۱۱/۵۳	۱۲/۶۰	-۹

I_1، I_2، I_3: به‌ترتیب آبیاری پس از ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر کلاس A، N_1، N_2، N_3 و N_4: به‌ترتیب کاربرد صفر، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار

جدول ۹. ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل CERES-Maize برای پارامترهای ارقام هیبرید ذرت دانه‌ای

	O_{mean}	P_{mean}	R^2	T test	RMSE	nRMSE (%)
	هیبرید ۳۷۰ DC					
شاخص سطح برگ	۲/۸۲	۲/۶۶	۰/۸۹	۰/۲۳	۰/۲۱	۷/۲۸
عملکرد دانه (kg/ha)	۴۴۷۱	۴۳۰۹	۰/۹۷	۰/۳۷	۲۴۶	۵/۹۰
عملکرد زیست‌توده (kg/ha)	۱۲۰۰۲	۱۲۴۳۵	۰/۹۷	۰/۳۴	۵۸۴	۴/۸۶
نیتروژن دانه (kg/ha)	۶۶/۹	۶۷/۲	۰/۹۴	۰/۴۹	۴/۹	۷/۲۶
کارایی مصرف آب (kg/mm)	۹/۷۳	۹/۳۸	۰/۹۶	۰/۳۶	۰/۶۱	۶/۲۸
	هیبرید ۶۷۷ ZP					
شاخص سطح برگ	۲/۸۵	۲/۷۰	۰/۹۶	۰/۲۴	۰/۱۹	۶/۷۶
عملکرد دانه (kg/ha)	۶۱۸۹	۵۷۵۶	۰/۹۷	۰/۳۱	۵۷۲	۹/۲۵
عملکرد زیست‌توده (kg/ha)	۱۳۸۰۵	۱۳۳۴۵	۰/۹۳	۰/۳۶	۹۲۴	۶/۶۹
نیتروژن دانه (kg/ha)	۸۶/۳	۷۸/۹	۰/۹۵	۰/۲۷	۹/۸	۱۱/۳۰
کارایی مصرف آب (kg/mm)	۱۰/۵۷	۱۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۴۰	۱/۰۳	۹/۷۳
	هیبرید ۷۰۴ SC					
شاخص سطح برگ	۲/۸۷	۲/۷۰	۰/۹۴	۰/۱۹	۰/۲۱	۷/۱۵
عملکرد دانه (kg/ha)	۶۱۱۰	۵۶۸۴	۰/۹۸	۰/۳۲	۵۱۷	۸/۴۶
عملکرد زیست‌توده (kg/ha)	۱۴۵۸۳	۱۳۴۵۳	۰/۹۸	۰/۲۰	۱۱۸۴	۸/۱۲
نیتروژن دانه (kg/ha)	۸۳/۲	۷۸/۲	۰/۹۴	۰/۳۵	۸/۹	۱۰/۶۹
کارایی مصرف آب (kg/mm)	۱۱/۱۰	۱۱/۰۶	۰/۹۳	۰/۴۹	۰/۷۵	۶/۷۹

nRMSE برابر با ۶/۲۸ درصد را نشان داد که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب این هیبرید است. ضریب تعیین به‌دست آمده (۰/۹۶) نیز مبین همبستگی خوب بین داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی است.

دقت مدل در براورد کارایی مصرف آب رقم هیبرید ۶۷۷ ZP نیز خوب ارزیابی شد، هرچند همبستگی داده‌ها نسبت به رقم هیبرید ۳۷۰ DC کمتر بود. کمترین خطای نسبی در تیمارهای مربوط به سطح اول آبیاری و بیشترین خطای نسبی در تیمارهای مربوط به سطح دوم مشاهده شد (جدول ۸). در نتیجه تحقیقات دیگری نیز مشخص شده است که پیش‌بینی مدل در شرایط آبیاری مطلوب نسبت به تیمارهای تنش خشکی از دقت بیشتری برخوردار است (۱۳). با توجه به جدول ۸ آبیاری بیشتر باعث کاهش کارایی مصرف آب شده و از طرف دیگر کاهش تعداد آبیاری‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر این شاخص افزود. نتیجه مشابهی در مورد گیاه گندم گزارش شده است (۴). نتایج نشان داد عدم مصرف کود نیتروژن به شدت بر کارایی مصرف آب این هیبرید تأثیر گذاشته و باعث کاهش آن شد. درصورتی که با افزایش کاربرد کود، این شاخص به‌تدریج افزایش نشان داد که این افزایش از سطح کود صفر تا ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به بقیه سطوح کودی بیشتر بود. پژوهشگران دیگری نیز با شبیه‌سازی اثرات کاربرد نیتروژن بر ذرت به اثرات مثبت نیتروژن بر کارایی مصرف آب ذرت اشاره کرده‌اند (۲۵). در مورد بهترین

تیمار بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مزرعه‌ای هماهنگی خوبی وجود داشت و بر طبق نتایج، تیمار I_2N_4 بیشترین تأثیر مثبت بر کارایی مصرف آب این هیبرید گذاشت. نتایج ارزیابی مدل (R^2=۰/۹۱ و nRMSE=٪۹/۷۳) مشخص کننده کارایی و دقت بالای مدل برای شبیه‌سازی کارایی مصرف آب رقم هیبرید ZP ۶۷۷ در شرایط اقلیمی، مدیریتی و خاکی این آزمایش است (جدول ۹). ارتباط و تطابق خوب داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل CERES-Maize و داده‌های مزرعه‌ای و کارایی بالای این مدل در پیش‌بینی کارایی مصرف آب ذرت با RMSE پایین در نتیجه تحقیقات دیگری نیز گزارش شده است (۱۱).

اثرات تغییر در میزان دسترسی به آب و نیتروژن بر کارایی مصرف آب رقم هیبرید SC ۷۰۴ مطابق با شرایط مزرعه‌ای توسط مدل پیش‌بینی شد، هرچند اختلاف کمی بین دو سری داده وجود داشت. دقت این پیش‌بینی‌ها در مورد سطح اول آبیاری نسبت به سایر سطوح بیشتر بود. در مورد این هیبرید نیز اعمال کم‌آبیاری در نتیجه کاهش دفعات آبیاری اثرات مثبت قابل‌توجهی بر کارایی مصرف آب گذاشت. قمری و همکاران (۱۷) نیز در نتیجه آزمایشی که در خوزستان انجام دادند گزارش کردند مدل CERES-Maize کارایی مصرف آب ذرت رقم SC ۷۰۴ را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد و بیان داشتند مقادیر این شاخص با کاهش حجم آب مصرفی افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی اثرات نیتروژن بر این صفت نیز گویای افزایش محسوس و معنی‌دار آن در نتیجه افزایش کاربرد نیتروژن (به‌خصوص در رژیم‌های آبی دوم و سوم) بود. مطابق با دو هیبرید دیگر، افزایش نیتروژن از سطح اول تا دوم تأثیر زیادی بر افزایش کارایی مصرف آب گذاشت و با افزایش کاربرد نیتروژن از سطح دوم تا چهارم این افزایش نسبت به سطح اول کمتر بود و روند نزولی نشان داد. همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات مزرعه‌ای نشان می‌دهند تیمار I_2N_4 باعث حصول بیشترین مقدار کارایی مصرف آب در بین تیمارهای مختلف آبی و کودی شد (جدول ۸). آنالیز رگرسیون (جدول ۹) نشان داد که مطابقت و همبستگی خوبی بین داده‌های حاصل از پیش‌بینی مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده در شرایط مزرعه‌ای وجود داشت (R^2=۰/۹۳). همچنین کارایی مدل در پیش‌بینی کارایی مصرف آب این رقم هیبرید بسیار خوب گزارش شد (nRMSE=٪۶/۷۹). توانایی و دقت بالای مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب ذرت در تحقیقات دیگری نیز به‌دست آمده است (۲۵).

نتیجه‌گیری

بررسی نتایج خروجی مدل CERES-Maize و ارزیابی و اعتبارسنجی آن با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده پس از واسنجی قابل قبول این مدل گواه بر کارایی و دقت بالای آن در پیش‌بینی تغییرات پارامترهای مورد مطالعه (شاخص سطح برگ، عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده، نیتروژن دانه و کارایی مصرف آب) سه رقم هیبرید ذرت دانه‌ای در پاسخ به سطوح متفاوت فراهمی آب و نیتروژن در شرایط اقلیمی و خاکی منطقه گناباد است. اگرچه اختلافاتی بین داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهده شده در شرایط مزرعه‌ای وجود داشت و اغلب مدل پارامترها را کمتر از مقادیر ثبت شده در آزمایش مزرعه‌ای تخمین می‌زد، اما روند تغییرات این متغیرها و اثرات تنش خشکی و کود دهی نیتروژن به‌خوبی و مطابق با شرایط مزرعه، شبیه‌سازی شد. بنابراین، استفاده از مدل شبیه‌سازی CERES-Maize برای بررسی استراتژی‌های مدیریت آب و نیتروژن در کشت ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی و خاکی مشابه با منطقه گناباد قابل توصیه است.

سپاسگزاری

بدین وسیله مراتب تشکر و سپاسگزاری خود را به‌خاطر همکاری صمیمانه و بی دریغ مسئولین و کارکنان ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گناباد در فراهم کردن امکانات مزرعه‌ای انجام آزمایش اعلام می‌داریم.

منابع مورد استفاده

1. Asadi, M. E. and R. S. Clement. 2003. Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield and soil moisture content under tropical conditions. *Journal of Food and Agricultural Engineering Research* 1(3/4): 270-276.
2. Bannayan, M. and G. Hoogenboom. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research* 111: 290-302.
3. Batchelor, W. D., B. Basso and J. O. Paz. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 141-158.
4. Behera, S. K. and R. K. Panda. 2009. Integrated management of irrigation water and fertilizers for wheat crop using field experiments and simulation modeling. *Agricultural Water Management* 96: 1532-1540.
5. Bert, F. E., C. E. Laciana, G. P. Podestá, E. H. Satorre and A. N. Menéndez. 2007. Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. *Agricultural Systems* 94: 41-50.
6. Bhusal, T. N., A. Lamsal and L. P Amgain. 2010. Simulations of nitrogen dynamism in maize and rice by using CSM-CERES-maize and rice models under Chitwan, Nepal. *Agronomy Journal of Nepal* 1: 94-102.
7. Bodley, M. K. 2004. Fertility requirements of no-till corn in a semi-arid environment. MSc. Thesis. Washington State Univ, Pullman.
8. Boote, K. J., J. W. Jones and N. B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88: 704-716.
9. Castrignanò, A., N. Katerji, F. Karam, M. Mastrorilli and A. Hamdy. 1998. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. *Ecological Modeling* 111: 107-120.
10. Cavero, J., E. T. Medina, M. Puig and A. Martínez-Cob. 2009. Sprinkler irrigation changes maize canopy microclimate and crop water status, transpiration, and temperature. *Agronomy Journal* 101: 854-864.
11. DeJonge, K. 2011. Evaluation and improvement of CERES-maize evapotranspiration simulations under full and limited irrigation treatments in Northern Colorado. PhD. Thesis. Colorado State University. Fort Collins, Colorado.
12. Egeh, M. H. 1998. Modeling corn growth, development and yield under Ciuebec conditions. MSc. Thesis. Macdonald Campus of McGill University Ste-Anne de Bellevue. Qubbec, Canada.
13. Evett, S. R. and J. A. Tolk. 2009. Introduction: Can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management? *Agronomy Journal* 101: 423-425.
14. Fereres, E. and D. Connnor. 2004. Sustainable water management in agriculture. PP: 157-170. *In:* E. Cabrera and R. Cobacho (Ed.) Challenges of the new water policies for the XXI century. Swets and Zeitlinger, Lisse, The Netherlands.
15. Gabrielle, B. and L. Kengni. 1996. Analysis and field evaluation of the CERES-Maizes' soil components: nitrogen transfer and transformations. *Soil Society of America Journal* 60: 142-149.
16. Garrison, M. V., W. D. Batchelor, R. S. Kanwar and J. T Ritchie. 1999. Evaluation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile-drained conditions. *Agricultural Systems* 62: 189-200.
17. Ghamari, M., B. Andarzian, A. Bakhshandeh, M. Gharineh and G. Fathi. Simulating effects of drought and nitrogen stress on yield, water and nitrogen use efficiency of corn using CERES-Maize simulating model. *Scientific Journal of Crop Physiology* 3(11): 21-31. (In Farsi).
18. Hoogenboom, G., J. W. Jones, C. H. Porter, P. W. Wilkens, K. J Boote, W. D. Batchelor, L. A. Hunt and G. Y. Tsuji. 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (Eds). Version 4.0: Overview, vol. 1. University of Hawaii, Honolulu, HI.
19. Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal* 93: 281-289.
20. Jagtap, S. S., F. J. Abamu and J. G. Kling. 1999. Long-term assessment of nitrogen and variety technologies on attainable maize yields in Nigeria using CERES-maize. *Agricultural Systems* 60: 77-86.
21. Jones, J., G. Hoogenboom, C. Porter, K. Boote, W. Batchelor, L. Hunt, P. Wilkens, U. Singh, A. Gijsman and J. Ritchie. 2003. The DSSAT model cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18(3-4): 235-265.
22. Jones, C. A. and J. R. Kiniry. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press. College Station, Texas.
23. Kemanian, A. R., C. O Stockle and D. R Huggins. 2007. Estimating grain and straw nitrogen concentration in grain crops based on aboveground nitrogen concentration and harvest index. *Agronomy Journal* 99: 158-165.
24. Kovacs, G. J., T. Nemeth and J. T. Ritchie. 1995. Testing simulation models for the assessment of crop production and nitrate leaching in Hungary. *Agricultural Systems* 49: 385-397.
25. Lenka, S. and A. K. Singh. 2011. Simulating interactive effect of irrigation and nitrogen on crop yield and water productivity in maize-wheat cropping system. *Current Science* 101(11): 1451-1461.
26. Llewelyn, R. V. and A. M. Featherstone. 1997. A comparison of crop production functions using simulated data for irrigated corn in western Kansas. *Agricultural Systems* 54: 521-538.

27. Ma, L., G. Hoogenboom, L. R. Ahuja, J. C. Ascough and S. A. Saseendran. 2006. Evaluation of the RZWQM-CERES-Maize hybrid model for maize production. *Agricultural Systems* 87: 274-295.
28. Molden, D. 2007. Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Earthscan, London, UK.
29. Monteith, J. L. 1996. The quest for balance in crop modelling. *Agronomy Journal* 88: 695-697.
30. Naderi Darbaghshahi, M. R., G. Mohammadi, E. Majidi, F. Darvish, A. H. Shiranirad and H. Madani. 2004. Effects of drought stress and plant density on ecophysiological traits of three safflower lines in summer planting in Isfahan. *Seed and Plant Improvement Journal* 20(3): 281-296. (In Farsi).
31. Nouna, B. B., N. Katerji and M. Mastrorilli. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid mediterranean environment. Evaluation of model performance. *European Journal of Agronomy* 13: 309-322.
32. Pang, X. P., J. Letey and L. Wu. 1997. Yield and nitrogen uptake prediction by CERES-maize model under semiarid conditions. *Soil Science Society of America Journal* 61: 254-256.
33. Paz, J. O., W. D. Batchelor, B. A Babcock, T. S Colvin, S. D. Logsdon, T. C. Kaspar and D. L. Karlen. 1999. Model-based technique to determine variable rate nitrogen for corn. *Agricultural Systems* 61: 69-75.
34. Penning de Vries, F. W. T., D. M. Jansen, H. F. M Ten Berge and A. Bakema. 1989. Simulation of Ecophysiological Progresses of Growth in Several Annual Crops. Simulation Monographs 29. Wageningen, The Netherlands, PUDOC.
35. Pouryazdankhah, H. and M. R. Khaledian. 2013. Improving model efficiency of HYDRUS-2D by considering temporal variability in soil hydraulic properties. *Journal of Water and Soil* 26(6): 1440-1449. (In Farsi).
36. Quiring, S. M. and D. R. Legates. 2008. Application of CERES-Maize for within-season prediction of rainfed corn yields in Delaware, USA. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 964-975.
37. Ritchie, J. T. 1998. Soil water balance and plant water stress. PP. 41-54. *In:* Tsuji, G. Y., G. Hoogenboom and P. K. Thornton. (Eds.), Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands,
38. Sadler, E. J., B. K Gerwig, D. E Evans, W. J. Busscher and P. J. Bauer. 2000. Site-specific modeling of corn yield in the SE coastal plain. *Agricultural Systems* 64: 189-207.
39. Shojaei, A., M. Hasanzadeh, S. Khavari and J. Mohammadpour. 2013. Evaluation the effects of Azotobacter and nitrogen fertilizer on growth and yield of corn SC 704 under different irrigation levels. *In:* Proceeding of 10th National Iranian Environment Researches Conference. Hamedan, Iran.
40. Sinclair, T. R. and N. G. Seligman. 1996. Crop modeling: From infancy to maturity. *Agronomy Journal* 88: 698-704.
41. Singh, A. K., R. Tripathy and U. K. Chopra. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management* 95: 776-786.
42. Thorp, K. R., W. D. Batchelor, J. O. Paz, B. L. Steward and P. C. Caragea. 2006. Methodology to link production and environmental risks of precision nitrogen management strategies in corn. *Agricultural Systems* 89: 272-298.
43. Tsuji, G. Y., G. Hoogenboom and P. K. Thornton. 1998. Systems Approach for Sustainable Agricultural Development. Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
44. Yordanov, I. 1995. Responses of photosynthesis to stress and plant growth regulators. *Bulgarian Journal of Plant Physiology* 21(3): 51-70.

Journal of Crop Production and Processing
Vol. 8, No. 4, Winter 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Simulation of Growth, Yield, Grain Nitrogen and Water Use Efficiency of Maize Hybrids by CERES-Maize Model

Y. Esmaeilian[1*], M. Ramroudi[2] and M. Galavi[3]

(Received: March 29-2017; Accepted: April 11-2018)

Abstract

In this research, CERES-Maize crop model was calibrated, validated and evaluated for different maize hybrids under climatic conditions of Gonabad, east of Iran. For this purpose, an experiment was carried out based on a split-split plot randomized complete blocks design. Main factor consisted of three irrigation regimes (optimum irrigation, moderate drought stress, and severe drought stress), subplot factor included of four levels of nitrogen fertilizer (0, 120, 180, and 240 kg/ha) and sub-subplot factor consisted of three maize varieties (DC 370, ZP 677, and SC 704). CERES-Maize model simulated maximum leaf area index of maize varieties with high precision. However, in most of situations predicted values underestimated as compared with actual values. In addition, the model predicted kernel yield and biological yield of three mentioned maize varieties, reasonably. Variations of kernel nitrogen yield of maize varieties under different water and nitrogen regimes were simulated very well by the model. Although, in most of treatments model data values were lower than measured data from field experiment. Model simulated the increases of water use efficiency due to decrease of water supply and increase of nitrogen application, reasonably. Yet, the model accuracy for prediction of water use efficiency of maize with increase of drought stress level was slightly decreased and deviation of the two data sets was increased. According to the results of this research, the CERES-Maize model could be suggested for decision making in maize production for climatic regions similar to location of this experiment.

Keywords: Drought stress, Evaporation pan, Growth, Simulation model

1. Assistant Professor, Department of Agriculture, University of Gonabad, Gonabad, Iran.
2, 3. Associate Professor and Professor, Respectively, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.
*: Corresponding Author, Email: y.esmaeilian@gonabad.ac.ir