Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Evaluation of ceres-maize model for simulation of maize under different scenarios of irrigation and nitrogen fertilizer management

Karim Neysi[1], Aslan Egdernezhad[2]✉, Fariborz Abbasi[3]

1. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Email: karimnisie@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Email: a_eigder@ymail.com
3. Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. Email: fariborzabbasi@ymail.com.

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 22, 2022

Revised: Oct. 31, 2022

Accepted: Nov. 1, 2022

Published online: Dec. 22, 2022

Keywords:
Fertilizer Stress,
Fertilizer Splitting,
Crop Modeling,
CERES-Maize.

ABSTRACT

Crop modeling is a cheap, fast and powerful method to achieve the results of the effect of various factors on crop growth. Hence, crop models such as CERES-Maize have been developed to simulate plant performance. Given that the amounts of irrigation water and nitrogen fertilizer are two very important factors to improve corn yield; it is important to know the accuracy and error of the CERES-Maize model to simulate the yield of this crop under the mentioned treatments. Therefore, the present study was conducted at a 500-hectare farm of the Seed and Plant Breeding Research Institute located at 50.58° East longitude and 35.56° latitude on two corn cultivars (double cross 370 and single cross 260). For double cross 370, two factors including the amount of irrigation water at four levels (W1: 120, W2: 100, WI3: 80 and W4: 60 percent of water requirement) and nitrogen fertilizer at four levels (N1: 100, N2: 80, N3: 60 and N4: zero percent of nitrogen requirement) were considered. For single cross 260, four fertilizer levels (N1: 100, N2: 80 and N3: 60 and N4: 50 percent of nitrogen requirement) were studied. The results for both cultivars showed that the CERES-Maize model underestimated crop yield ($0 \geq$ MBE). The amount of error for simulating yield of double cross cultivar 370 and single cross cultivar 260 was 1.24 and 0.44 tons per hectare, respectively. The accuracy of CERES-Maize model for simulating these two cultivars was in the category of good (NRMSE = 0.13) and excellent (NRMSE = 0.06), respectively. The error of CERES-Maize model for double cross cultivar 370 and for irrigation treatments was in the range of 0.89-1.65 t/ha and for fertilizer treatments was in the range of 0.43-9.9 t/ha. No difference was observed between the model errors in two fertilizer applications. Therefore, the model was not sensitive to fertilizer apportionment, while changes in irrigation water and fertilizer amount had a great effect on its accuracy. Based on all the results, the CERES-Maize model is recommended for simulation of both corn cultivars, although its accuracy was higher for the single cross 260 cultivar.

Cite this article: Naysi, K., Egdernezhad, A., & Abbasi, F. (2022) Evaluation of CERES-Maize Model for Simulation of Maize under Different Scenarios of Irrigation and Nitrogen Fertilizer Management. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (10), 2295-2310. https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344865.669300

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344865.669300

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۳، شماره ۱۰ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

ارزیابی مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی گیاه ذرت تحت سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری و کود نیتروژن

کریم نیسی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲]✉، فریبرز عباسی[۳]

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. ایمیل: kariminisie@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران. ایمیل: a_eigder@ymail.com

۳. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران، ایمیل: fariborzabbasi@ymail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۸/۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۱

واژه‌های کلیدی:
تنش کودی،
تقسیط کود،
مدل‌سازی گیاهی،
مدل CERES-Maize.

چکیده

مدل‌سازی گیاهی روشی ارزان، سریع و توانمند برای دستیابی به نتایج اثر عوامل مختلف بر رشد گیاهان زراعی است. از این رو، مدل‌های گیاهی مانند مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان بسط داده شده است. با توجه به اینکه مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن دو عامل بسیار مهم برای بهبود عملکرد ذرت هستند؛ اطلاع از دقت و خطای مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی عملکرد این گیاه زراعی تحت تیمارهای اشاره شده اهمیت دارد. از این رو، تحقیق حاضر در مزرعه ۵۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ انجام شد. در این پژوهش دو رقم ذرت دبل کراس ۳۷۰ و سینگل کراس ۲۶۰ مورد مطالعه قرار گرفتند. در رقم دبل کراس ۳۷۰، دو عامل مقدار آب آبیاری در چهار سطح (W1: 120، W2: 100، WI3: 80 و W4: 60 درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن در چهار مقدار (N1: 100، N2: 80، N3:60 و N4: صفر درصد نیاز نیتروژن خالص) و در رقم سینگل کراس ۲۶۰ عامل سطوح کودی در چهار سطح (N1: 100، N2: 80، N3:60 و N4: 50 درصد نیاز نیتروژن خالص) تحت مطالعه قرار گرفتند. نتایج برای هر دو رقم نشان داد که مدل CERES-Maize دچار خطای کم‌برآوردی (MBE $\leq$ ۰) شد. خطای این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد رقم دبل کراس ۳۷۰ برابر با ۱/۲۴ تن در هکتار و برای رقم سینگل کراس ۲۶۰ برابر با ۰/۴۴ تن در هکتار بود. دقت مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی این دو رقم به ترتیب در دسته‌ی خوب (NRMSE = ۰/۱۳) و عالی (NRMSE = ۰/۰۶) قرار داشت. خطای مدل CERES-Maize برای تیمارهای آبی در رقم دبل کراس ۳۷۰ بین ۱/۶۵-۰/۸۹ تن در هکتار و برای تیمارهای کودی در این رقم بین ۱/۹-۰/۴۳ تن در هکتار بود. در حالی که تفاوتی بین خطای مدل در دو حالت تقسیط کود مشاهده نشد. بنابراین، مدل نسبت به تقسیط کود حساسیتی نداشت در حالی که تغییرات آب آبیاری و مقدار کود بر دقت آن اثر زیادی داشت. براساس کلیه نتایج، مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی هر دو رقم ذرت پیشنهاد می‌شود گرچه دقت آن در رقم سینگل کراس ۲۶۰ بیشتر بود.

استناد: نیسی؛ کریم، اگدرنژاد؛ اصلان، عباسی؛ فریبرز، (۱۴۰۱) ارزیابی مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی گیاه ذرت تحت سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری و کود نیتروژن، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۱۰)، ۲۳۱۰-۲۲۹۵. https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344865.669300

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344865.669300

مقدمه

با وجود اینکه غلات گوناگونی در دنیا کشت می‌شوند، اما حدود ۹۴ درصد غله مصرفی دنیا تنها از سه منبع گندم، ذرت و برنج تأمین می‌شود (FAO, 2014). ذرت یکی از گیاهان محصولات استراتژیک برای تغذیه مردم به شمار می‌رود و حدود ۲/۸ درصد از تولیدات غلات جهان را به خود اختصاص می‌دهد (FAO, 2014). این گیاه زراعی در بسیاری از مناطق معتدل جهان کشت می‌شود. این گیاه زراعی از نظر مصرف، سومین غله پرمصرف در جهان محسوب می‌شود (Abbasi *et al*., 2015). در کشور ما نیز این گیاه زراعی تقریباً در همه استان‌ها کشت می‌شود. اهمیت این گیاه زراعی سبب شده است تا در در دهه‌های اخیر مصرف آن در کشور به سرعت افزایش یابد.

کشاورزی به عنوان بزرگترین مصرف کننده آب در کشور محسوب می‌شود و به دلیل افزایش تأمین غذا برای جمعیت در حال رشد، مصرف آب در این بخش نیز در حال افزایش است. به همین دلیل مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی بسیار مهم است. به عبارت دیگر محدودیت منابع آب به علت طبیعت خشک ایران و هزینه‌های زیاد استحصال آب از منابع موجود و همچنین افزایش روزافزون تقاضا برای بالا بردن سطح زیر کشت، استفاده صحیح و برنامه ریزی برای هر قطره آب استحصال شده را امری واجب و ضروری می نماید (Ahmadee *et al*., 2021). نیاز آبی گیاه ذرت زیاد است. به همین دلیل اگر با کمبود آب آبیاری مواجه شود بهره‌وری آب آن کاهش می‌یابد (Abbasi *et al*., 2015). با کم‌آبیاری در شرایط محدودیت آب می‌توان با صرفه‌جویی در مصرف آب، سطح زیر کشت ذرت را افزایش داد و از این طریق سود بیشتری نسبت به آبیاری کامل به دست آورد. گرچه ذرت نسبت به کم‌آبیاری حساس است؛ لیکن با تعیین مقدار مناسب کاهش آب می‌توان به بهره‌وری آب کمک کرد.

ذرت علاوه بر آب، به مقدار کود نیتروژن نیز حساس است. افزایش کود نیتروژن تا سطح بهینه سبب افزایش عملکرد و اجزای عملکرد ذرت می‌گردد (Abbasi *et al*., 2011). عدم دسترسی به نیتروژن یکی از عوامل محدود کننده رشد گیاهان است زیرا از اجزای ساختاری مهم در ترکیب پروتئین‌ها، کوآنزیم‌ها، کلروفیل‌ها، پیرامیدین‌ها، پورین‌ها و اسیدهای نوکلئیک است. علاوه بر این، در بسیاری از فرایندهای متابولیک که به طور مستقیم در افزایش باروری و بهبود عملکرد گیاهان زراعی نقش دارند، درگیر می‌باشد (Barker and Pilbeam, 2007). افزایش نیتروژن منجر به تولید مقدار ماده خشک و عملکرد بیشتر می‌شود. همچنین سبب توسعه ریشه و جذب بیشتر رطوبت از خاک می‌گردد. علاوه بر این، افزایش نیتروژن باعث تسریع رشد سبزینه‌ای و افزایش حجم بخش هوایی می‌گردد (Hopkins, 2004). کاربرد نیتروژن علاوه بر افزایش عملکرد، باعث بهبود مقاومت گیاه به تنش خشکی می‌گردد (Xu *et al*., 2005). کمبود نیتروژن منجز به کاهش توانایی آنزیم‌های کلیدی درگیر در تغلیظ کربن و تثبیت دی‌اکسیدکربن در گیاهان می‌شود (Ghannoum *et al*., 2005) که در نهایت عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نیتروژن در تغذیه غلات از اهمیت زیادی برخوردار است (Mortvedt *et al*., 2001). زیرا به منظور دستیابی به حداکثر عملکرد که از نظر ویژگی‌های کیفی از قبیل درصد پروتئین غنی باشد و سمیت نیتروژنه نیز در آن دیده نشود، لازم است مقدار بهینه این عنصر مصرف گردد. مشاهده شد که تعیین مقادیر بهینه آب و نیتروژن سبب افزایش چشمگیری در عملکرد ذرت شد (Liu *et al*., 1989). در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند اقلیم ایران، نیتروژن به عنوان یکی از عوامل محدود کننده زراعت ذرت به شمار می‌رود (Osmond and Riha, 1990). از این رو، مدیریت نیتروژن می‌تواند کمیت غلات را تضمین کند (Namihira *et al*., 2011). کوددهی اگر به همراه آب آبیاری کافی در اختیار گیاه قرار نگیرد، اثرگذاری چندانی نخواهد داشت. بنابراین اطلاع از برهمکنش همزمان کود نیتروژن و آب آبیاری اثر زیادی بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی دارد. از طرف دیگر، افزایش قیمت کود نیتروژن و افزایش مشکلات دسترسی به این کود، سبب شده است مشکلات موجود در زراعت ذرت دو چندان شود. این موضوع با مقایسه بهره‌وری آب ذرت در سطح جهان (۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب) و ایران (۰/۶ کیلوگرم بر متر مکعب) اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

تعیین مقدار بهینه مصرف آب آبیاری و کود نیتروژن در مناطق مختلف کشور نیازمند انجام آزمایش‌های بسیار زیادی است که سبب صرف هزینه و زمان زیادی می‌شود. برای رفع این مشکل، لازم است از مدل‌سازی شرایط مزرعه استفاده کرد (Ahmadee *et al*., 2021; Egdernezhad *et al*., 2019, Ebrahimipak *et al*., 2018). در واقع، مدل نمایش ساده شده‌ای از رفتار یک سیستم واقعی و ابزاری برای شناخت و درک آن سیستم است (Teh, 2006). کاربرد مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی واکنش گیاهان به کم‌آبی سابقه نسبتاً طولانی دارد. این مدل‌ها ابتدا با در نظر گرفتن مکانیسم‌های بیوشیمیایی و بیوفیزیک انرژی خورشید در دسترس برای پرورده‌سازی انرژی شیمیایی و زیست‌توده گیاه به محققان معرفی شدند (Sinclair and Seligman, 1996). سپس از اواخر دهه ۶۰ میلادی و با ظهور رایانه، مرحله نوجوانی مدل‌سازی گیاهی شروع شد. مدل گیاهی The Decision Support System for Agrotechnology Transfer که به صورت اختصار به DSSAT مشهور است؛ از جمله مدل‌های پرکاربرد و با قابلیت زیاد است که نسخه‌های متعددی از آن تاکنون منتشر

شده است. این مدل گیاهی توانایی شبیه‌سازی بسیاری از گیاهان زراعی و باغی را دارد. در نسخه ۴٫۸ آن که به تازگی منتشر شده است، قابلیت شبیه‌سازی بیش از ۴۰ گیاه مختلف از جمله ذرت برای آن در نظر گرفته شده است. البته برای شبیه‌سازی هر گیاه از یک مدول شبیه‌ساز استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی ذرت از مدول CERES-Maize Plant Growth Module استفاده می‌گردد (Jones *et al*., 2003; Hoogenboom *et al*., 2019, Hoogenboom *et al*., 2021).

با توجه به اهمیت این مدل گیاهی، مطالعات مختلفی توسط محققان روی ارزیابی آن تحت مقادیر مختلف آب آبیاری و نیتروژن انجام شده است. ارزیابی عملکرد مدل DSSAT برای شبیه‌سازی ذرت در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک مدیترانه طی دو سال تحت سه وضعیت رطوبتی خاک نشان داد که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای بیشینه سطح برگ، مقدار زیست‌توده و عملکرد دانه در تیمار آبیاری کامل کمتر از ۱۰ درصد بود. اما در شرایط تنش آبی اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بین ۱۵ تا ۴۶ درصد بود (Nouna *et al*., 2001). López-Cedrón *et al*., (2008) در آزمایشی بیان کردند که مدل DSSAT در آزمایشی بیان نمودند که مدل DSSAT مقدار تبخیر–تعرق را در تیمارهای کم‌آبیاری بیشتر از مقدار مشاهده شده پیش‌بینی می‌کند. این محققان همچنین بیان کردند که روند تجمع ماده خشک شبیه‌سازی شده و مشاهده شده همگام با کاهش میزان آبیاری کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، Fu *et al*., (2020) از مدل DSSAT برای تعیین مقادیر مناسب آب آبیاری و کود نیتروژن در شمال چین استفاده کردند. این محققان پس از واسنجی این مدل گیاهی، تأکید کردند که دقت نتایج در این مرحله قابل قبول بوده و می‌توان به نتایج به دست آمده از آن اعتماد کرد. Gungula *et al*., (2003) فنولوژی رشد و نمو یک رقم ذرت را در شرایط کمبود نیتروژن با استفاده از مدل DSSAT مطالعه و مشاهده کردند که بین میزان نیتروژن و تعداد روز تا پیدایش کاکل و رسیدگی فیزیولوژیک رابطه خطی وجود دارد. Saseendran *et al*., (2005) برای بهینه‌سازی زمان کشت یک رقم ذرت از دو مدل RZWQM و DSSAT استفاده کردند. این محققان گزارش کردند که هر دو مدل قادر هستند که مقادیر شاخص سطح برگ، میزان آب خاک، میزان آب مصرفی گیاه و عملکرد را به درستی برآورد نمایند. در عین حال، مدل DSSAT در برآورد عملکرد دقت بیشتری دشت. Bert *et al*., (2007) حساسیت مدل DSSAT را برای برآورد عملکرد ذرت در واکنش به تغییر ویژگی‌های خاک و تابش‌های روزانه بررسی و مشاهده کردند که حساسیت مدل به تغییر تابش‌های روزانه بیشتر از تغییر ویژگی‌های خاک است. از جمله تحقیقاتی که در خصوص ارزیابی مدل DSSAT در خصوص ارقام ذرت انجام شده است می‌توان به مطالعات Liu *et al*., (1989) اشاره کرد. این محققان با استفاده از مدل DSSAT عملکرد یک رقم ذرت هیبریدی در برزیل را طی ۵ سال پیش‌بینی و مشاهده کردند. این محققان گزارش کردند که این مدل گیاهی قادر است عملکرد ذرت را در بازه‌ای بین ۹۰ تا ۱۰۷ درصد مقدار واقعی پیش‌بینی کند. در تحقیقی دیگر، Mubeen (2013) در ارزیابی این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی دو رقم ذرت (Monsanto-919 and Pioneer-30Y87) با استفاده از تیمارهای مختلف رطوبتی خاک در منطقه نیمه‌خشک پنجاب نشان دادند که با افزایش تنش خشکی، میزان خطا در برآورد عملکرد دانه و شاخص برداشت افزایش می‌یابد و این مدل در شرایط آبیاری محدود عملکرد دانه و شاخص سطح برگ را کمتر از مقدار مشاهده شده شبیه‌سازی می‌نماید. واریته‌های ذرت که در ایران روی آن‌ها مطالعه شده است عمدتاً شامل سینگل کراس ۷۰۴ است و در یک مطالعه نیز لاین اینبرد B73 بررسی شده است (Rabie *et al*., 2013; Dokoohaki *et al*., 2016; Paknejad *et al*., 2017; Rahmani, 2018; Mohamadzade *et al*., 2022). به همین دلیل تاکنون مطالعه‌ای روی ارزیابی این مدل گیاهی به صورت همزمان روی دو رقم دبل کراس ۳۷۰ و سینگل کراس ۲۶۰ انجام نشده است.

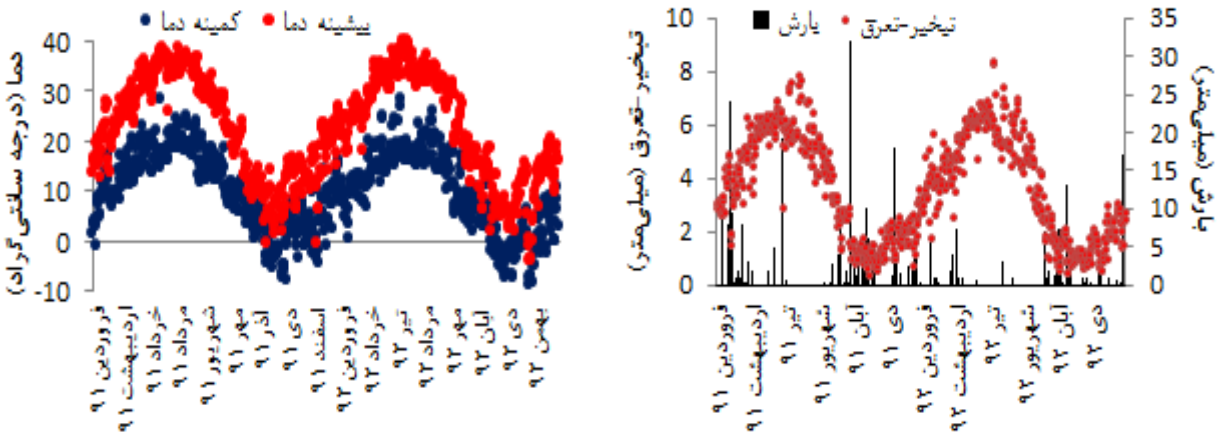
با توجه به اهمیت کود نیتروژن و آب مصرفی بر عملکرد ذرت، لازم است مقادیر مناسب برای رشد این گیاه زراعی به درستی تعیین شود. از طرفی، اهمیت مدل DSSAT برای شبیه‌سازی ذرت سبب می‌شود تا با واسنجی و ارزیابی آن بتوان از تعدد انجام عملیات مزرعه‌ای برای تعیین مقادیر بهینه نیتروژن و آب آبیاری اجتناب کرد. از این رو، هدف پژوهش حاضر واسنجی و ارزیابی مدل DSSAT تحت شرایط مختلف مصرف کود نیتروژن و آب آبیاری برای دو رقم ذرت است.

مواد و روش‌ها

روش آزمایش

این پژوهش با استفاده از داده‌های برداشت شده از دو طرح تحقیقاتی اجرا شده در بخشی از اراضی ۵۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا انجام شد (Abbasi *et al*., 2011؛ Abbasi *et al*., 2015). این منطقه از نظر آب و هوایی براساس طبقه‌بندی کوپن جز مناطق نیمه‌خشک با

زمستان سرد می‌باشد. متوسط بارندگی در این منطقه ۲۴۵ میلی‌متر و متوسط درجه هوا ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. مقادیر برخی پارامترهای هواشناسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

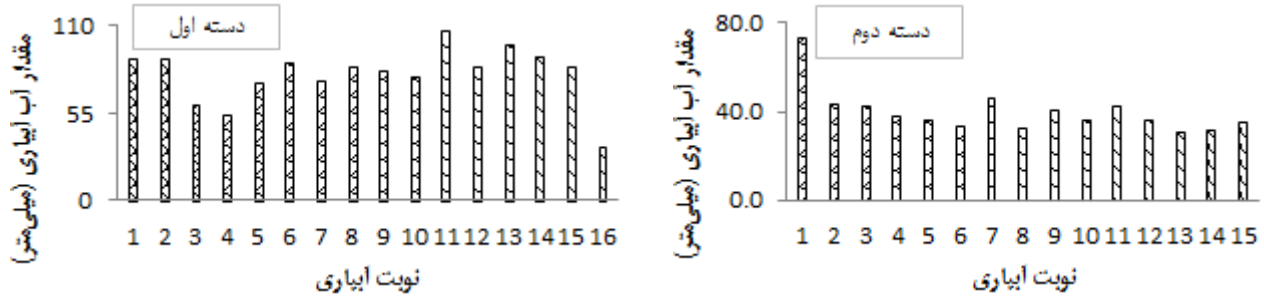


شکل ۱- داده‌های هواشناسی در محل انجام پژوهش

داده‌های برداشت شده به دو دسته تقسیم می‌شوند. در دسته نخست؛ دو عامل مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن مورد بررسی قرار گرفتند. بدین صورت که مقدار آب آبیاری در چهار سطح (W1: ۱۲۰، W2: ۱۰۰، WI3: ۸۰ و W4: ۶۰ درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن نیز در چهار سطح (N1: ۱۰۰، N2: ۸۰، N3:۶۰ و N4: صفر درصد نیاز نیتروژن خالص) در نظر گرفته شده است. نیتروژن مورد نیاز از طریق کود اوره تأمین شد. تقسیط کود نیتروژن در چهار مرحله قبل از کاشت، مرحله هفت برگی، مرحله ساقه‌رفتن و مرحله سنبل‌زدن در نظر گرفته می‌شود. برای آبیاری، از جویچه‌هایی با شیب ۰/۰۰۶ متر بر متر، عرض ۰/۷۵ متر و طول ۱۶۵ متر استفاده شد. رقم مورد استفاده در این بخش از پژوهش ذرت دانه‌ای دبل کراس ۳۷۰ بود که در دو سال زراعی در اول تیر ماه و با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار تحت کشت قرار گرفت.

در دسته دوم، دو عامل سطوح کودی در چهار سطح (N1: ۱۰۰، N2: ۸۰، N3:۶۰ و N4: ۵۰ درصد نیاز نیتروژن خالص) و زمان تقسیط آن به دو روش (T1: سه تقسیط مساوی شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی و مرحله تاسل‌دهی و T2: چهار تقسیط مساوی شامل مرحله ۶-۴ برگی، مرحله ۱۰ برگی، مرحله تاسل‌دهی و مرحله تلقیح) در نظر گرفته شد. تیمار N4 شامل روش معمول پخش کود در منطقه (۵۰ درصد توصیه کودی قبل از کاشت و ۵۰ درصد در مرحله ۶-۴ برگی به روش پخش سطحی) بود. در این دسته، تیمار آبیاری در نظر گرفته نشد و مقدار آب آبیاری براساس نیاز آبی کامل گیاه و براساس تبخیر از سطح تشت کلاس A و اعمال ضرایب تشتک و گیاهی تعیین گردید. شرایط جویچه‌ها مشابه دسته نخست بود. رقم مورد استفاده در این بخش از پژوهش ذرت دانه‌ای هیبرید سینگل کراس ۲۶۰ بود که در دو سال زراعی مورد کشت قرار گرفت. عملیات کاشت این رقم در اول اردیبهشت هر سال و با تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار کشت شد.

برای تعیین نیاز آبی از داده‌های ایستگاه هواشناسی در فاصله دو کیلومتری از مزرعه تحقیقات استفاده شد. ضریب تشتک براساس توصیه ایستگاه هواشناسی برابر با ۰/۶۵ در نظر گرفته شد (Abbasi *et al.*, 2011; Abbasi *et al.*, 2015). ضریب گیاهی نیز براساس مقادیر ارائه شده در نشریه فائو ۵۶ در نظر گرفته شد. پنج جویچه برای هر تیمار در نظر گرفته شد. سه جویچه میانی برای برداشت محصول و دو جویچه کناری برای اثر حاشیه‌ای منظور شدند. اعمال تیمارهای آبیاری ۵ روز پس از کاشت انجام شد. دبی ورودی و خروجی هر جویچه به ترتیب با استفاده از کنتور و فلوم WSC تیپ سه اندازه‌گیری شد. به دلیل اینکه تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیشتری به همراه دارد، تزریق کود در ۳۰-۲۰ دقیقه انتهای آبیاری انجام می‌شد. مشخصات خاک مزرعه نیز در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۲- میزان آب مصرفی برای هر دو دسته داده‌های مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

عمق خاک	رس	سیلت	شن	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری	رطوبت حجمی در PWP	رطوبت حجمی در FC	رطوبت اشباع	EC	pH
Cm					$g.cm^{-3}$	$cm^3.cm^{-3}$		%	$dS.m^{-1}$	-
۰-۲۰	۱۸	۳۶	۴۶	لوم	۱/۳۴	۱۵	۲۹	۴۵	۱/۱۶	۷/۷۷
۲۰-۴۰	۱۶	۳۴	۵۰	لوم	۱/۴۶	۱۵	۲۹	۴۴	۰/۸۲	۷/۶۷

مدل CERES-Maize

در این تحقیق، مدل CERES-Maize برای هر دو دسته داده‌های پژوهش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج آن‌ها با هم مقایسه می‌گردد. در مدل CERES-Maize، باید مدول‌های مورد نیاز ایجاد شوند. مهم‌ترین مدول‌ها در این مدل گیاهی شامل آب و هوا و مدیریت مزرعه است. داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدول آب و هوا از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل اجرای آزمایش کسب می‌شود. این داده‌ها شامل کمینه و بیشینه دمای روزانه، بارندگی، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی است. مدول آب و هوا، با ورود هر کدام از پارامترهای مذکور در ستون و تعریف شاخص و واحد مناسب ایجاد می‌شود. در مدول مدیریت مزرعه، داده‌های گیاهی یا Xbuild، داده‌های مربوط به طرح‌های آزمایشی مورد نظر وارد شده و به صورت فایل X ذخیره می‌شوند. عملیات انجام شده در مزرعه شامل کاشت، کاربرد کود و آبیاری در یک فایل استاندارد ایجاد می‌شوند. در بخش مدیریت آبیاری از فایل X، مقدار آب آبیاری در تاریخ‌های مشخص و پس از کاشت برای مدل CERES-Maize تعریف می‌شود. این عمل برای کوددهی به‌صورت مشابه انجام می‌گردد.

براساس توضیحات بالا، در این مدل فرض می‌شود که ۵۰ درصد کل تابش خورشیدی وارده بر حسب مگاژول بر مترمربع در روز، تابش فعال فتوسنتزی را تشکیل می‌دهد و میزان تابش فعال فتوسنتزی جذب شده براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$PAR_i = 0.5I\left[1-e^{-K\times LAI}\right]$$ رابطه ۱)

در این رابطه، LAI شاخص سطح برگ بر حسب متر مربع برگ بر متر مربع زمین و k ضریب خاموشی است که برای ذرت بین ۰/۴۳ تا ۰/۸۶ گزارش شده است.

در نهایت میزان ماده خشک خالص تولیدی از رابطه زیر برآورد می‌گردد.

$$DM = PCARB = RUE\times PAR_i$$ رابطه ۲)

در این رابطه، PCARB پتانسیل تولید زیست‌توده بر حسب گرم بر مترمربع در روز و RUE کارایی استفاده از تابش است.

در مدل CERES-Maize بیلان آب با در نظر گرفتن عوامل موثر بر تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta S = I + P - E - T - D - R$$ رابطه ۳)

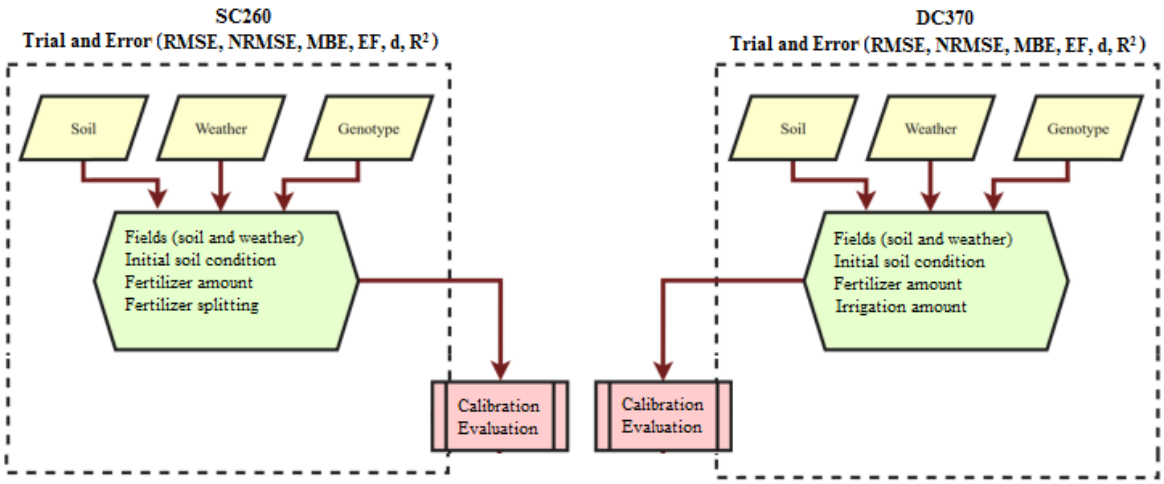
که در این تحقیق، ΔS تغییرات آب ذخیره شده در منطقه توسعه ریشه، I آبیاری، P آبیاری، E تبخیر واقعی، T تعرق واقعی، D نشت و نفوذ عمقی و R رواناب سطحی می‌باشد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل CERES-Maize

در مدل‌های گیاهی، برخی پارامترهای مربوط به ارقام مختلف گیاهان لازم است تعیین شود. در مدل CERES-Maize، شش ضریب ژنتیکی برای ذرت تحت عناوین P1، P2، P5، G2، G3 و PHINT وجود دارد. ضریب P1 درجه روز رشد در فاصله جوانی‌زنی تا پایان دوره جوانی را تعیین می‌کند. ضریب P2 واکنش رقم به طول روز را نشان می‌دهد. ضریب P5، طول دوره پر شدن دانه را با محاسبه درجه روز رشد آن‌ها به دست می‌آورد. ضریب G2 پتانسیل تولید بیشترین تعداد دانه ممکن در بوته را نشان می‌دهد. ضریب G3 سرعت بالقوه‌ی رشد دانه در شرایط مطلوب و ضریب PHINT فاصله‌ی فیلوکرونی (درجه روز رشد مورد نیاز برای پیدایش دو برگ متوالی) را تعیین می‌کنند. پیش از واسنجی مدل گیاهی CERES-Maize، تحلیل حساسیت ضرایب ژنتیکی انجام شد. این مهم برای اطلاع از حساسیت مدل CERES-Maize نسبت به تغییرات ضرایب ژنتیکی صورت گرفت. تحلیل حساسیت به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا بتوانند فهم بهتری از تغییرات نتایج مدل گیاهی داشته باشند و مرحله‌ی واسنجی سریعتر و با دقت بیشتری انجام گردد. برای تحلیل حساسیت از رابطه‌ی زیر استفاده شد (Geerts *et al.*, 2009):

$$Sc = \left|\frac{P_m - P_b}{P_b}\right| \times 100$$ رابطه ۴)

در این رابطه، Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد شده عامل مورد نظر براساس داده‌های ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد عامل مورد نظر براساس داده ورودی پایه است. به منظور تحلیل حساسیت هر عامل بر مقدار خروجی، آن عامل به میزان ۲۵ درصد مقدارش افزایش و کاهش می‌یافت. سپس مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، Sc>۱۵ حساسیت بالا، ۱۵>Sc> ۲ حساسیت متوسط و Sc<۲ حساسیت پایین اندازه‌گیری شد (Geerts *et al.*, 2009). ضرایبی که حساسیت متوسط و زیاد داشتند، واسنجی انجام شد. برای ضرایب ژنتیکی که حساسیت مدل به آن‌ها کم بود (Sc<۲) واسنجی انجام نشدند زیرا اثری روی خروجی مدل نداشتند و مقادیر پیش‌فرض برای آن‌ها در نظر گرفته شد. این مدل گیاهی در دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. برای واسنجی از همه‌ی داده‌های به دست آمده از کلیه تیمارهای مورد مطالعه در سال اول کشت استفاده شد. پس از واسنجی، صحت‌سنجی مدل براساس همه‌ی داده‌های به دست آمده در سال دوم انجام شد. دیاگرام واسنجی و صحت‌سنجی مدل CERES-Maize در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- دیاگرام واسنجی و صحت‌سنجی مدل

برای تعیین دقت مدل CERES-Maize در هر دو مرحله‌ی واسنجی و **صحت‌سنجی**، آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) مورد استفاده قرار گرفتند. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۵) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}$$ رابطه ۵)

رابطه۶)
$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}}{\overline{O_i}}$$

رابطه۷)
$$MBE = \frac{\sum_{i}^{n}(P_i - O_i)}{n}$$

رابطه ۸)
$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2}$$

رابطه ۹)
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|P_i| + |O_i|)^2}$$

رابطه ۱۰)
$$R^2 = \frac{\left(\sum(P_i - \overline{P})(O_i - \overline{O})\right)^2}{\sum(P_i - \overline{P})^2 \sum(O_i - \overline{O})^2}$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\overline{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\overline{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان دهنده‌ی دقت عالی مدل‌های مورد استفاده است. هم چنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل رشد گیاهی CERES-Maize مقدار عامل مورد نظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد عامل مورد نظر عدد کوچکتری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر شود نشان‌دهنده‌ی برازش بهتر داده‌ها است.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل حساسیت ضرایب ژنتیکی گیاه ذرت در جدول (۲) نشان داده شده است. مقادیر حساسیت این ضرایب در محدوده‌ی ۱۵>Sc>۲ برای هر دو حالت ۲۵٪ افزایش و کاهش قرار داشت. بنابراین حساسیت مدل CERES-Maize نسبت به تغییرات این ضرایب در گروه متوسط قرار داشت. از این رو این ضرایب برای داده‌های سال اول در هر دو مزرعه آزمایشی مورد واسنجی قرار گرفتند (جدول ۳). واسنجی برای رقم سینگل کراس ۲۶۰ براساس کلیه تیمارهای مورد مطالعه در سال اول زراعی در دو حالت انجام شد. حالت نخست برای زمانی است که کوددهی براساس تیمار T1 (سه مرحله کوددهی) انجام شده بود. حالت دوم واسنجی برای تیمار T2 (چهار مرحله کوددهی) صورت گرفت.

جدول ۲- ضریب حساسیت ضرایب ژنتیکی برای گیاه ذرت

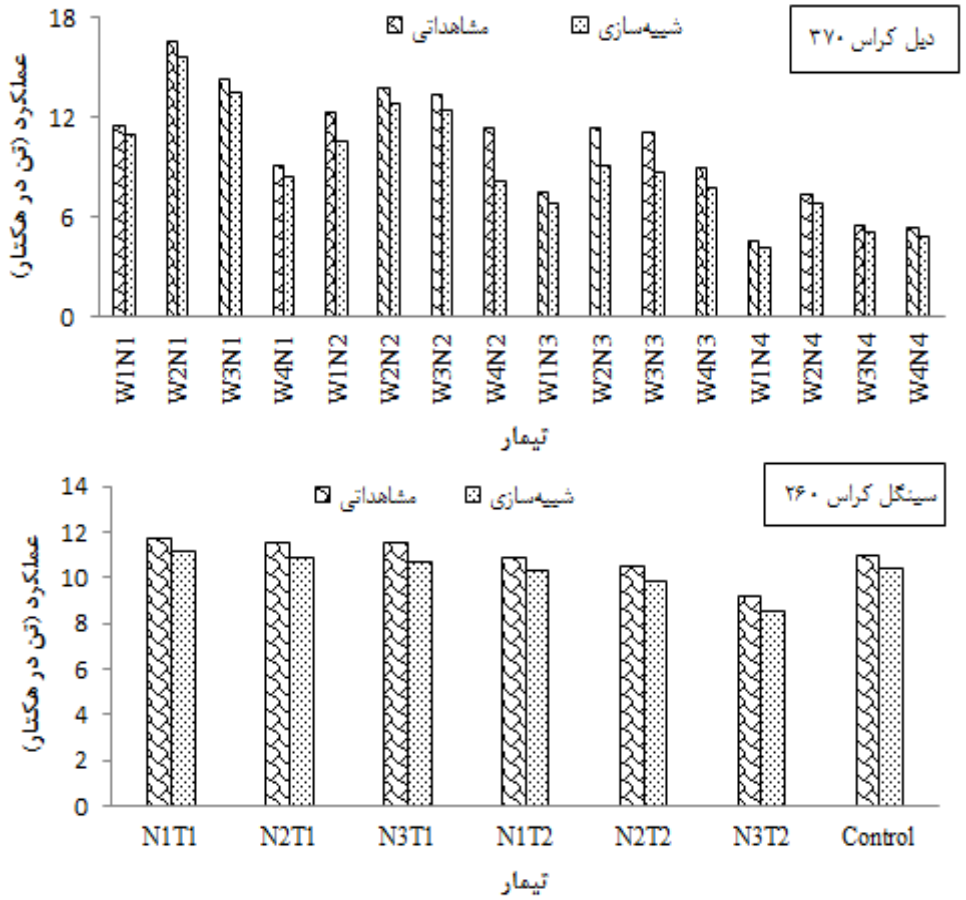
پارامتر	توضیح	مقدارSc در حالت ۲۵٪+	مقدارSc در حالت ۲۵٪-	درجه حساسیت
P1	درجه روز رشد مورد نیاز از جوانه‌زنی تا پایان دوره جوانی	۲/۴	۳/۸	متوسط
P2	ضریب حساسیت به طول روز	۴/۸	۲/۹	متوسط
P5	درجه روز رشد از ظهور سیلک تا رسیدگی فیزیولوژیک	۲/۶	۴/۷	متوسط
G2	پتانسیل حداکثر تعداد دانه در بوته	۳/۹	۲/۵	متوسط
G3	سرعت بالقوه رشد دانه در دوره رشد خطی دانه در شرایط مطلوب	۶/۲	¼	متوسط
PHINT	فاصله فیلوکرونی یا درجه درجه روز رشد لازم برای ظهور دو نوک برگ متوالی	۲/۸	۴/۰	متوسط

جدول ۳- مقادیر ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT برای ارقام مورد استفاده

پارامتر	توضیح	رقم			واحد
		دبل کراس ۳۷۰	سینگل کراس T1 – ۲۶۰	سینگل کراس T2 – ۲۶۰	
P1	درجه روز رشد مورد نیاز از جوانه‌زنی تا پایان دوره جوانی	۲۹۰	۲۶۰	۲۶۵	
P2	ضریب حساسیت به طول روز	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۴۰	°C
P5	درجه روز رشد از ظهور سیلک تا رسیدگی فیزیولوژیک	۹۶۰	۸۸۰	۸۹۵	-
G2	پتانسیل حداکثر تعداد دانه در بوته	۷۴۰	۶۸۰	۶۶۵	-
G3	سرعت بالقوه رشد دانه در دوره رشد خطی دانه در شرایط مطلوب	۷/۲	۶/۵	۶/۳	تعداد در بوته
PHINT	فاصله فیلوکرونی یا درجه روز رشد لازم برای ظهور دو نوک برگ متوالی	۵۵	۴۹	۴۹	$mg.kg^{-1}.day^{-1}$

واسنجی مدل

مقایسه عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای ذرت رقم دبل کراس ۳۷۰ در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، کلیه تیمارهای مورد مطالعه در سال اول کشت برای هر دو رقم ذرت در مرحله‌ی واسنجی، استفاده شدند. براساس این نتایج، میانگین اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی برای این رقم ذرت حدود ۱۰/۹ درصد بود. بیشترین و کمترین اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز به ترتیب ۲۸/۰ و ۴/۳ درصد برآورد شد. میانگین اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز برای رقم سینگل کراس ۲۶۰ حدود ۵/۸ درصد به‌دست آمد. حداکثر و حداقل اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز به‌ترتیب ۷/۳ و ۴/۸ درصد بود.

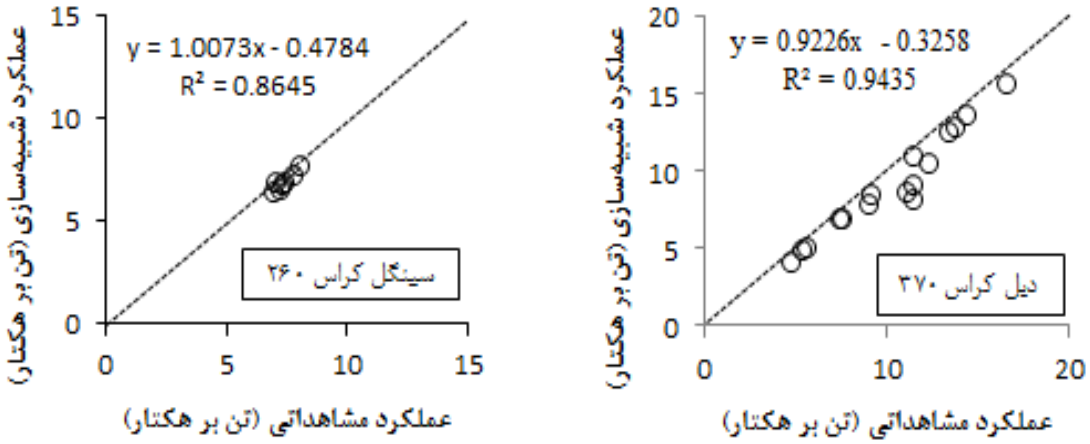


شکل ٤- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی و مشاهداتی دو رقم ذرت (تن بر هکتار) مورد بررسی در این پژوهش در مرحله واسنجی

نتایج آماری مقایسه عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی برای هر دو رقم ذرت در جدول (۴) نشان داده شده است. براساس آماره‌ی MBE، مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد هر دو رقم ذرت دچار خطای کم‌برآوردی شد. براساس آماره‌ی RMSE، خطای مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی رقم دبل کراس ۳۷۰ برابر با ۱/۳۸ تن در هکتار شد. این خطا برای رقم سینگل کراس ۲۶۰ برابر با ۰/۴۸ تن در هکتار بود. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده در شکل (۴) نیز نشان داد که خطای مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی رقم سینگل کراس ۲۶۰ کمتر بود. Esmaeilian (2014) گزارش نمود که مقادیر آماره‌ی RMSE در مرحله‌ی واسنجی برای رقم‌های مختلف ذرت بین ۰/۶–۰/۳ تن در هکتار بود. براساس آماره‌ی NRMSE، دقت این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی رقم دبل کراس ۳۷۰ در گروه خوب و برای شبیه‌سازی رقم سینگل کراس ۲۶۰ در گروه عالی قرار گرفت. این نتایج با مشاهدات Esmaeilian (2014) برای ارقام مختلف ذرت مطابقت داشت. این محقق نشان داد که مقادیر آماره‌ی NRMSE برای رقم‌های مختلف ذرت در مرحله‌ی واسنجی در محدوده‌ی ۰/۰۷–۰/۰۶ متغیر بود. نتایج دو آماره‌ی EF و d نشان داد که کارایی مدل CERES-Maize برای هر دو رقم ذرت مطلوب بود. نتایج آماره‌ی R^2 برای این دو رقم ذرت در شکل (۵) نشان داده شده و مقدار آن قابل قبول بود. Esmaeilian (2014) در مطالعات خود به این نتیجه دست یافت که در مرحله‌ی واسنجی مقدار R^2 برای رقم‌های مختلف ذرت بیشتر از ۰/۹۵ بود. در هر دو رقم ذرت، عملکرد پایین‌تر از خط یک به یک قرار داشت. بنابراین عملکرد مشاهداتی بیشتر از عملکرد شبیه‌سازی بود. این نتایج با مقادیر آماره‌ی MBE در جدول (۴) مطابقت داشت. بنابراین نتایج به‌دست آمده برای انجام مرحله صحت‌سنجی در هر دو رقم مورد استفاده در این پژوهش قابل‌قبول بود.

جدول ٤- نتایج آماره‌های مورد استفاده برای عملکرد ذرت (تن بر هکتار) در مرحله واسنجی

نام رقم	MBE	RMSE	NRMSE	EF	D
دبل کراس ۳۷۰	-۱/۱۲	۱/۳۸	۰/۱۳	۰/۸۳	۰/۹۹
سینگل کراس ۲۶۰	-۰/۳۶	۰/۴۸	۰/۰۴	۰/۳۶	۰/۹۹

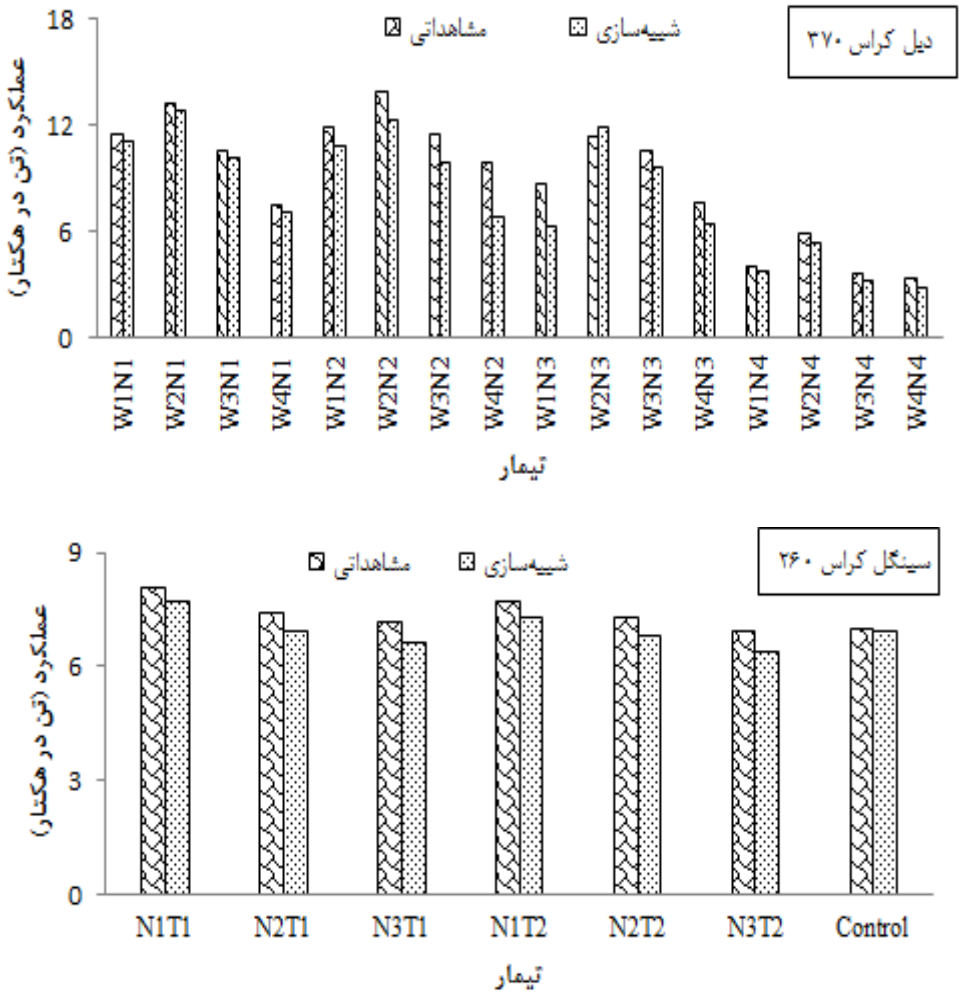


شکل ۵- همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دو رقم ذرت در مرحله واسنجی

صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت برای همه‌ی تیمارهای مورد مطالعه برای هر دو رقم ذرت در سال دوم کشت در شکل (۶) نشان داده شده است. میانگین اختلاف عملکرد در رقم دبل کراس ۳۷۰ برابر با ۱۰/۵ درصد بود. کمترین و بیشترین اختلاف عملکرد نیز به ترتیب برابر با ۱۰/۵ و ۳۰/۳ درصد به دست آمد. با تفکیک تیمارهای آبیاری، میانگین اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای W1، W2، W3 و W4 به ترتیب ۱۱/۸، ۶,۴، ۹/۲ و ۱۶/۷ درصد بود. براساس این نتایج، تیمار W4 بیشترین خطا را نسبت به سایر تیمارها داشت. با تفکیک تیمارهای کود نیتروژن برای رقم دبل کراس ۳۷۰، متوسط اختلاف عملکرد در تیمارهای N1، N2، N3 و N4 به ترتیب ۴/۳، ۱۵/۹، ۱۱/۷ و ۱۰/۳ درصد بود.

میانگین اختلاف عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای رقم سینگل کراس ۲۶۰ حدود ۵/۷ درصد بود. بیشترین و کمترین اختلاف نیز به ترتیب برابر با ۷/۹ و ۱/۴ درصد به دست آمد. میانگین اختلاف عملکرد در تیمارهای T1 و T2 به ترتیب ۶/۳ و ۶/۶ درصد بود. بیشترین و کمترین اختلاف عملکرد در تیمار T1 به ترتیب ۷/۹ و ۴/۳ درصد و در تیمار T2 به ترتیب ۷/۵ و ۵/۴ درصد به دست آمد. بنابراین دقت مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی هر دو تیمار T1 و T2 تقریباً یکسان بود.



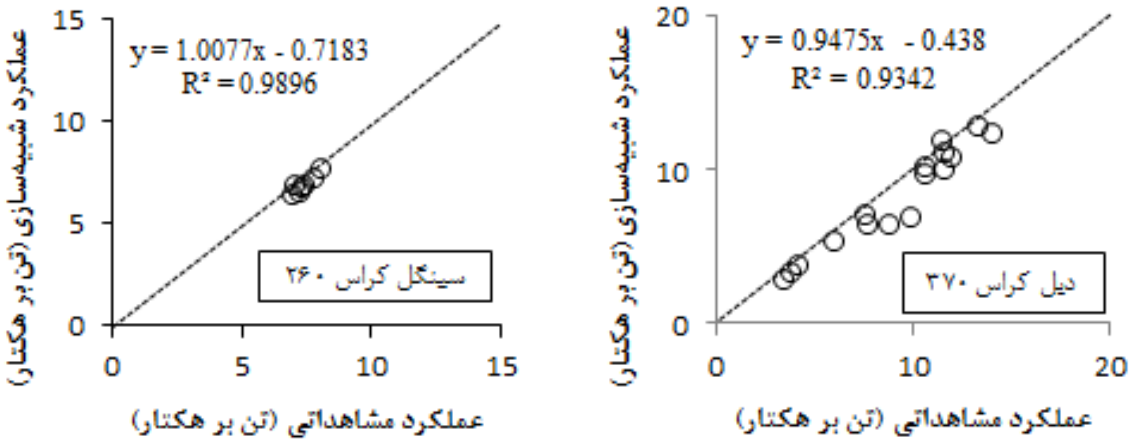
شکل ٦- مقایسه عملکرد شبیه‌سازی و مشاهداتی دو رقم ذرت (تن بر هکتار) در مرحله صحت‌سنجی

نتایج مقایسه آماری برای رقم دبل کراس ۳۷۰ نشان داد که در حالت کلی، مدل CERES-Maize دچار خطای کم‌برآوردی شد (جدول ۵). این نتایج براساس شکل (۷) نیز قابل مشاهده است زیرا مقادیر عملکرد زیر خط یک به یک قرار دارند. با توجه به معادله‌ی خط برازش داده شده برای رقم دبل کراس ۳۷۰، در هیچ مقداری مدل CERES-Maize عملکرد را بیشتر از مقدار واقعی را شبیه‌سازی نمی‌کند. همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (R^2 =۰/۹۳) حاکی از این است که مدل CERES-Maize توانایی لازم برای پیروی از تغییرات عملکرد در تیمارهای مختلف را داشت. براساس آماره‌ی RMSE، خطای مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی این رقم ذرت ۱/۲۴ تن در هکتار بود. براساس آماره‌ی NRMSE، دقت این مدل گیاهی برای رقم دبل کراس ۳۷۰ در گروه خوب قرار داشت. این نتایج با مشاهدات Miao *et al*., (2016) و Rahmani (2018) مطابقت داشت. کارایی مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی رقم دبل کراس ۳۷۰ مطلوب بود. با تفکیک نتایج آماری به تیمارهای آبیاری (W) و کودی (N) برای رقم دبل کراس ۳۷۰، مدل CERES-Maize برای همه‌ی تیمارهای آبیاری و کودی دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج براساس شکل (۸) نیز قابل مشاهده است. مقادیر عملکرد برای کلیه تیمارها پایین‌تر از خط یک به یک بود. فقط در دو تیمار W2 و N3 یک مقدار بالای خط یک به یک مشاهده شد. از این رو، مقدار آماره‌ی MBE در این دو تیمار به صفر نزدیک‌تر بود (MBE ≥ −۰/۵). همبستگی بالای بین عملکرد مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

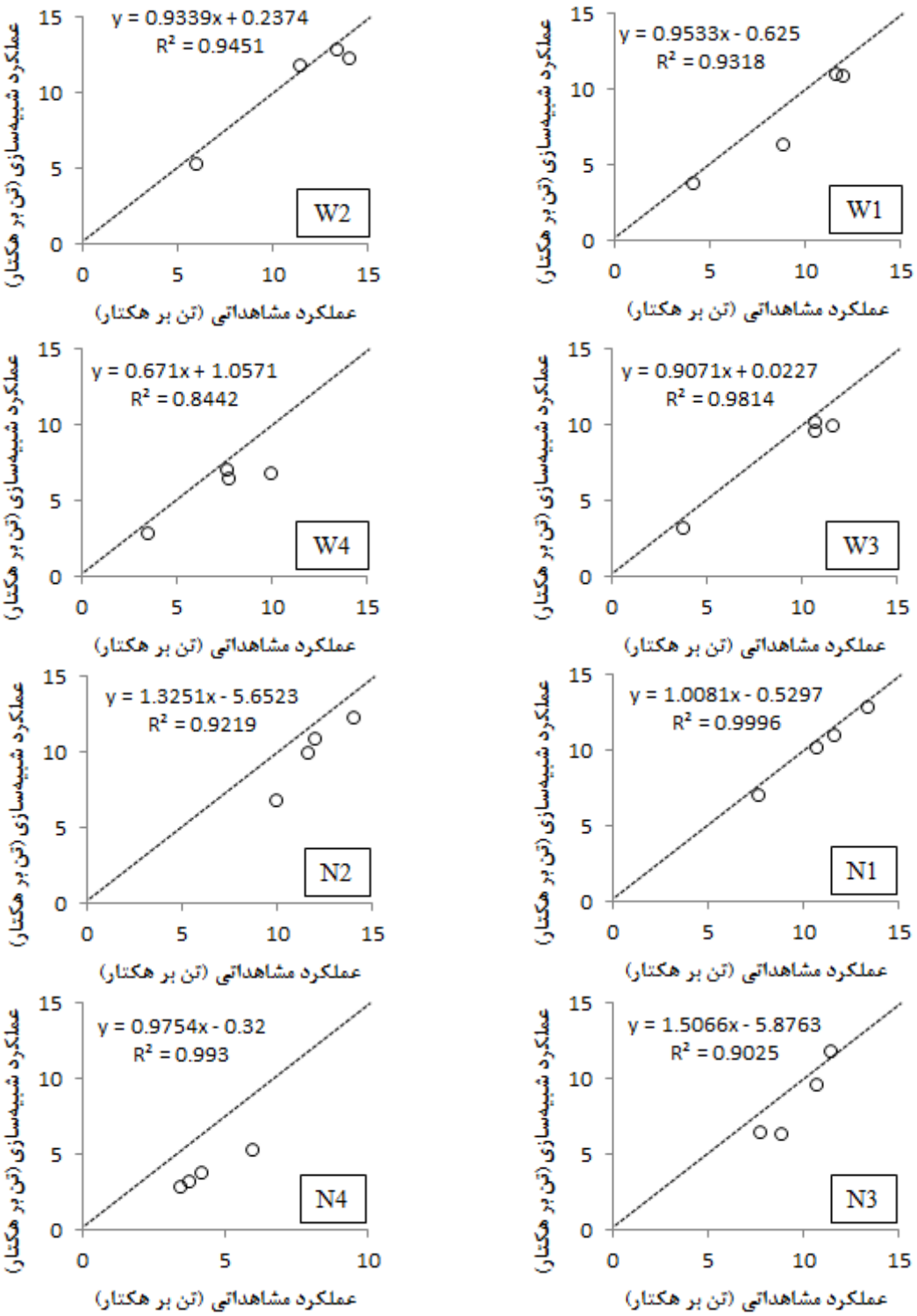
($R^2 \geq$ ۰/۸۴) نشان داد که مدل CERES-Maize در همه‌ی تیمارهای اشاره شده توانایی لازم برای پیروی از تغییرات عملکرد را داشت. این نتایج با مشاهدات Esmaeilian (2014) و Caverto *et al*., (2001) مطابقت داشت. براساس آماره‌ی RMSE، در بین تیمارهای آبیاری بیشترین خطا در تیمار W4 (۱/۶۵ تن بر هکتار) و در بین تیمارهای کودی در تیمار N3 (۱/۴۳ تن در هکتار) مشاهده شد. احتمالاً افزایش تنش آبی سبب افزایش خطای این مدل می‌شود. این نتایج در مشاهدات برخی محققان مانند Asadi and Clemente (2003) مطابقت داشت. این محققان نیز تغییرات دقت مدل CERES-Maize را در شرایط کودی مختلف یا برای ارقام مختلف ذرت گزارش کرده‌اند. در تیمارهای کودی، میزان خطا در بیشترین و کمترین نیاز کودی (N1 و N4) کم بود. براساس آماره‌ی NRMSE، دقت مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی تیمارهای آبیاری و کودی در گروه عالی و خوب قرار داشت و کمترین دقت برای تیمار W4 (۰/۲۱= NRMSE) به دست آمد. کارایی این مدل گیاهی برای کلیه‌ی تیمارهای آبیاری و کودی مطلوب بود.

جدول ۵- نتایج آماره‌های مورد استفاده برای عملکرد ذرت (تن بر هکتار) در مرحله صحت‌سنجی

تیمار	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
دبل کراس ۳۷۰					
کل	-۰/۹۱	۱/۲۴	۰/۱۳	۰/۸۵	۰/۹۹
W1	-۱/۰۵	۱/۳۳	۰/۱۴	۰/۸۱	۰/۹۹
W2	-۰/۵۰	۰/۸۹	۰/۰۸	۰/۹۲	۰/۹۹
W3	-۰/۸۲	۰/۹۶	۰/۱۰	۰/۹۰	۰/۹۹
W4	-۱/۲۹	۱/۶۵	۰/۲۱	۰/۵۲	۰/۹۹
N1	-۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۰۴	۰/۹۵	۰/۹۹
N2	-۱/۸	۱/۹	۰/۱۷	۰/۵۶	۰/۹۹
N3	-۰/۱۰	۱/۴۳	۰/۱۵	۰/۳۰	۰/۹۹
N4	-۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۰۸	۰/۹۰	۰/۹۹
سینگل کراس ۲۶۰					
کل	-۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۰۶	۰/۴۵	۰/۹۹
T1	-۰/۳۸	۰/۴۲	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۹۹
T2	-۰/۳۸	۰/۴۲	۰/۰۵	۰/۸۰	۰/۹۹



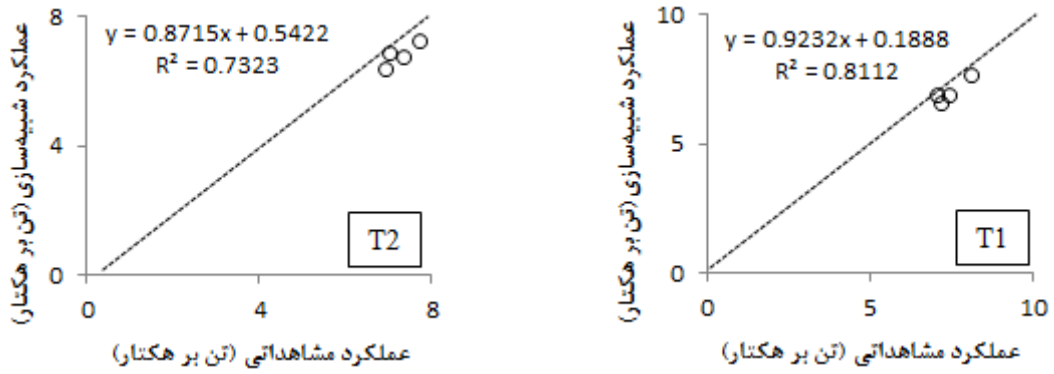
شکل ۷- همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد دو رقم ذرت در مرحله صحت‌سنجی



شکل ۸- همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت رقم دبل کراس ۳۷۰ برای تیمارهای مختلف آب آبیاری و کود نیتروژن در مرحله صحت‌سنجی

مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت رقم سینگل کراس ۲۶۰ در حالت کلی دچار خطای کم‌برآوردی شد (جدول ۵). این خطا برای هر دو تیمار T1 و T2 نیز مشاهده شد. براساس آماره‌ی RMSE، خطای مدل CERES-Maize در حالت کلی ۰/۴۴ تن بر هکتار و در تیمارهای T1 و T2 به‌ترتیب ۰/۴۲ و ۰/۴۲ تن بر هکتار بود. از این رو، دقت این مدل گیاهی برای رقم سینگل کراس ۲۶۰ در گروه عالی (NRMSE <۰/۱) قرار داشت. کارایی مدل CERES-Maize برای رقم سینگل کراس ۲۶۰ مطلوب بود. نتایج همبستگی برای دو تیمار T1 و T2 (شکل ۹) نشان داد که توانایی مدل CERES-Maize برای پیروی از تغییرات عملکرد نسبت به

تیمارهای کودی در رقم دبل کراس ۳۷۰ کمتر شد. معادله خط برازش داده شده برای تیمارهای T1 و T2 نشان داد که مدل CERES-Maize به ترتیب در عملکردهای ۲/۴۵ و ۴/۲۱ تن بر هکتار همواره دچار خطای بیش‌برآوردی می‌شود. با توجه به اینکه عملکرد ذرت در دشت کرج کمتر از ۲/۴۵ نمی‌شود، به همین دلیل مدل CERES-Maize برای برآورد عملکرد تیمار T1 هیچوقت دچار خطای بیش‌برآوردی نمی‌شود.



شکل ۹- همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده عملکرد ذرت رقم سینگل کراس ۲۶۰ برای دو تقسیط کود نیتروژن در مرحله صحت‌سنجی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی عملکرد دو رقم ذرت سینگل کراس ۲۶۰ (تحت تیمارهای مقدار و نوع تقسیط کود) و دبل کراس ۳۷۰ (تحت تیمارهای مقدار آبیاری و کود نیروژن) استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی هر دو رقم ذرت دچار خطای کم‌برآوردی (MBE $\leq$ ۰) شد. کارایی این مدل برای شبیه‌سازی هر دو رقم تحت تیمارهای مختلف مطلوب بود. خطای مدل CERES-Maize برای شبیه‌سازی عملکرد تیمار آبیاری در رقم دبل کراس ۳۷۰ در محدوده‌ی ۱/۶۵- ۰/۸۹ تن در هکتار و برای تیمار مقدار کودی در این رقم بین ۱/۹۰-۰/۴۳ تن در هکتار متغیر بود. مدل CERES-Maize نسبت به هر دو تیمار آبیاری و کود نیتروژن حساسیت داشت ولی اثر تیمارهای آبیاری بر خطای این مدل به میزان ۹/۴ درصد بیشتر از تیمارهای کودی بود. در رقم سینگل کراس ۲۶۰ تیمار آبیاری اعمال نشد و به جای آن تقسیط کود در نظر گرفته شد. براساس نتایج، تعداد تقسیط کود اثر چندانی بر خطای مدل CERES-Maize نداشت و مقدار خطای آن برای هر دو تقسیط برابر با ۰/۴۲ تن در هکتار بود. براساس کلیه نتایج، مدل CERES-Maize نسبت به تقسیط کود نیتروژن بدون حساسیت ولی نسبت به تغییرات مقدار آب آبیاری و کود نیتروژن حساس بود. با این وجود، این مدل را می‌توان مدل قابل قبولی برای شبیه‌سازی هر دو رقم ذرت معرفی کرد گرچه برای شبیه‌سازی رقم سینگل کراس ۲۶۰ از دقت بیشتر و خطای کمتری برخوردار بود. علت آن احتمالاً به دلیل عدم کم‌آبیاری در این رقم است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFRENCES

Abbasi F, Chogan R., Gheibi, M (2015). Investigating the possibility of reducing nitrogen losses in corn under furrow fertigation. Final Report of the Research Project. (in Persian).

Abbasi F, Chogan, R., Alizadeh H. A, Moeini R, Noori R, Aghaei A, Shafiei P (2011). Study on surface fertigation effect on maize water use efficiency, yield and yield criteria in Karaj. Final Report of the Research Project. (in Persian).

Ahmadee M., Ghanbarpouri M, Egdernezhad A. (2021). Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop. Water Management in Agriculture. 8(1): 15-30. (in Persian).

Alishiri R, Paknejad F, Aghayari F. (2014). Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. Bioscience. 4(4): 1-9.

Asadi M E, Clemente R S (2003). Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield and soil moisture content under tropical conditions. Journal of Food, Agriculture and Environment,

l (3&4): 270-276. (in Persian).
Barker A V, Pilbeam D. V. (2007). Handbook of Plant Nutrition, 1st Ed. CRC Press, Boca Raton.
Bert F E, Laciana C E, Podestá G. P, Satorre E H, Menéndez A. N. (2007). Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. Agricultural Systems. 94, 141-150.
Boogaard H. L., Van Diepen C. A., Rotter R. P., Cabrera J. M. C. A. Van Laar H H (1998). WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 (No. 52). SC-DLO.
Cavero J, Playan E, Zapata N, Faci J. M. (2001). Simulation of maize yield variability within a surface irrigated field. Agronomy Journal, 93: 773-782.
Dokoohaki, H., Gheysari, M., Mousavi, S. F., Zand-Parsa, Sh., Miguez, F. E., Archontoulis, S. V., H00genboom, G. (2016). Coupling and testing a new soil water module in DSSAT CERES-Maize model for maize production under semi-arid condition. Agricultural Water Management. 163: 90-99.
Ebrahimipak N, Ahmadee M, Egdernezhad A, Khashei Siuki A. (2018). Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (crocus sativus L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount, Journal of Water and Soil Resources Conservation, 8(1): 117-132. (in Persian).
Egdernezhad A, Ebrahimipak N, Tafteh A, Ahmadee M. (2019). Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain, Water Management in Agriculture, 5(2): 53-64. (in Persian).
Esmaeilian Y. (2014). Simulation the response of maize varieties to irrigation and nitrogen management under different climatic conditions. PhD Thesis. University of Zabol. (in Persian).
FAO (2014). Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome.
Fu Ch, Wang J, Gong Sh, Zhang Y, Wang Ch, Mo Y (2020). Optimization of irrigation and fertilization of drip-irrigated corn in the chernozem area of north-east China based on the CERES-Maize model. Irrigation and Drainage. 1-18.
Geerts S, Raes D, Garcia M, Miranda R, Cusicanqui JA. (2009). Simulating yield response to water of quinoa (Chenopodium quinoaWilld.) with FAO-AquaCrop. Agronomy. 101: 499-508.
Gerik T J., Rosenthal W D and Duncan R R.(1988). Simulating grain yield and plant development of ratoon grain sorghum over diverse environments. Field Crop Research.19(1): 63–74.
Ghannoum O, Evans J. R, Chow W. S, Andrews T. J, Conroy J. P, von Caemmerer S. (2005). Faster rubisco is the key to superior nitrogen-use efficiency in NADP-malic enzyme relative to NAD-malic enzyme C 4 grasses. Plant Physiology. 137: 638-650.
Gungula D, Kling J, Togun A. (2003). CERES-Maize predictions of maize phenology under nitrogen-stressed conditions in Nigeria. Agronomy Journal. 95, 892-899.
Hoogenboom G, C.H. Porter K.J., Boote V, Shelia P.W, Wilkens U, Singh J.W, White S, Asseng J.I. Lizaso, L.P. Moreno, W. Pavan, R. Ogoshi, L.A. Hunt, G.Y. Tsuji, J.W. Jones. (2019). The DSSAT crop modeling ecosystem. In: p.173-216 [K.J. Boote, editor [Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom (http://dx.doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10).
Hoogenboom, G., C.H. Porter, V. Shelia, K.J. Boote, U. Singh, J.W. White, W. Pavan, F.A.A . Oliveira, L.P. Moreno-Cadena, J.I. Lizaso, S. Asseng, D.N.L. Pequeno, B.A. Kimball, P.D . Alderman, K.R. Thorp, M.R. Jones, S.V. Cuadra, M.S. Vianna, F.J. Villalobos, T.B. Ferreira , W.D. Batchelor, J. Koo, L.A. Hunt, J.W. Jones. (2021). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.8 (www.DSSAT.net). DSSAT Foundation. Gainesville, Florida, USA.
Hopkins W. G. (2004). Introduction to Plant Physiology. 3rd Ed. John Wiely and Sons, New York.
Jones J, Keating B, Porter C. (2001). Approaches to modular model development. Agricultural Systems70, 421-443.
Liu W, Botner D, Sakamoto C. (1989). Application of CERES-Maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. Agricultural and Forest Meteorology. 45, 299-312.
López-Cedrón F.X, Boote K.J, Pineiro J, Sau F. (2008). Improving the CERES-Maize model ability to simulate water deficit impact on maize production and yield components. Agronomy Journal. 100: 296-307.
Miao Y, Mulla D J, Batchelor W. D, Paz J. O, Robert P. C. Wiebers M. (2006). Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. Agronomy Journal, 98: 545-553.
Mohamadzade, F., Gheysari, M., Eshgizadeh, H., Tabatabaei, M. S., Hoogenboom, G. (2022). The effect of water and nitrogen on drip tape irrigated silage maize grown under arid conditions: Experimental and simulations. Agricultural Water Management. 271. 107821.

Mortvedt J J, Westfall D. G. Shanahan J. F. (2001). Fertilizing spring-seeded small grains. http:// www. colostate. Edu/Depts/Coop Ext.

Mubeen M., Ahmad A., Wajid A, Khaliq T, Bakhsh A. (2013). Evaluating CSM-CERES-Maize model for irrigation scheduling in semi-arid conditions of Punjab. Pakistan. International Joural of Agricultural and Biology. 15: 1-10.

Namihira T, Shinzato N., Akamine H, Nakamura I, Maekawa H, Kawamoto Y. Matsui T. (2011). The effect of nitrogen fertilization to the sward on guineagrass (Panicum maximum Jacq cv. Gatton) silage fermentation. Asian-Aust . J. Anim. Sci. 24: 358-363.

Nouna B., Katerji N. Mastrorilli M. (2000). Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. Eur. J . Agron. 13: 309-322.

Osmond D. L, Riha S. J. (1990). Nitrogen fertilizer requirements for maize produced in the tropics: A comparison of three computer-based recommendation systems. Agr. Syst. 50:37-50.

Paknejad, F., Moayeri Por, Sh., Aghayari, F., Nabi Ilkaei, M. (2017). Simulation of maize yield with different levels of nitrogen by using dssat model. Journal of Crop Ecophysiology. 11(3): 503-518.

Rabie, M., Ghesari, M., Mirlatifi, S. M. (2013). Evaluation of DSSAT model for nitrate leaching under different water and nitrogen rates in maize field. J. Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour., Water and Soil Sci. 17(63): 71-80. (in Persian).

Rahmani M. (2018). Simulating the effect of planting date and population of B73 female parent inbredline on seed production of hybrid maize KSC704 in Karaj by DSSAT- CSM-CERES-Maize model. PhD Thesis. Guilan University. (in Persian).

Saseendran S. A, Ma L, Nielsen D, Vigil M, Ahuja L. (2005). Simulating planting date effects on corn production using RZWQM and CERES-Maize models. Agronomy Journal. 97, 58-71

Sinclair T R, Seligman N. a. G. (1996). Crop modeling: from infancy to maturity. Agronomy Journal88, 698-704.

Teh C. B. (2006). Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer model. BrownWalker Press Boca Raton, Florida USA. 526 pp..

Van Dam JC, Huygen J, Wesseling JG, Feddes RA, Kabat P, Van Walsum PEV, Groenendijk P, Van Diepen CA. (1997). Theory of SWAP Version 2.0, Report #71. Department Water Resources. Wageningen Agricultural University. 167 pp.

Xu Z. Z, Yu Z. W, Wang D. Zhang Y. L. (2005). Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes. J. Agron. Crop Sci. 191: 439-449.