تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۵، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۳ (ص ۴۴۵-۴۳۵)

بررسی عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize در برآورد اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت

غزاله ضیایی[۱]، حسین بابازاده[۲*] فریبرز عباسی[۳]، فریدون کاوه[۴]

۱. کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۳. استاد پژوهشی، مرکز تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج

۴. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۵ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۶/۱۷)

چکیده

اهمیت آب در کشاورزی در کنار رشد روزافزون جمعیت و ضرورت تأمین غذای مورد نیاز، استفادهٔ بهینه از منابع آب را ضرورت می‌بخشد. مدل AquaCrop، ارائه‌شده از سوی سازمان خواربار جهانی، از مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی است که سعی می‌کند با استفاده از کاهش تعداد دادهٔ ورودی سهولت کاربری این نرم‌افزار را افزایش دهد. در این مطالعه، علاوه بر واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای گیاه ذرت در منطقهٔ کرج، با استفاده از روش بیلان آب خاک، عملکرد مدل با مدل تخصصی گیاه ذرت (CERES-Maize) مقایسه شد. نتایج نشان داد عملکرد هر دو مدل مناسب است؛ طوری که شاخص توافق برای مدل AquaCrop در برآورد محتوای آب خاک بین ۸۵ تا ۹۴ درصد و برای مدل CERES-Maize بین ۵۸ تا ۶۴ درصد متغیر است. شاخص RMSE در برآورد عملکرد محصول برای مدل AquaCrop بین ۲۰ تا ۴۰ درصد و برای مدل CERES-Maize بین ۲۰ تا ۸۰ درصد بود. در نهایت مدل AquaCrop، با توجه به نتایج خروجی، برای استفادهٔ کشاورزان و برنامه‌ریزان در سطح منطقه توصیه می‌شود.

کلیدواژگان: بیلان آب خاک، عملکرد ذرت، AquaCrop، CERES-Maize

مقدمه

بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب در دنیاست. مدیریت آب در مزرعه و تأثیر آن بر عملکرد محصول از نکات قابل توجه در این بخش است. بررسی بیلان آب خاک در مزارع تحت کشت یکی از روش‌های موجود برای ارزیابی آبیاری انجام‌شده و نحوهٔ مدیریت آب در مزرعه است. ورود علوم جدید به کشاورزی برای استفادهٔ هر چه بهتر از نهاده‌های مختلف و رسیدن به حداکثر محصول در سال‌های اخیر روندی رو به رشد داشته است. مدل‌های تهیه‌شده بر مبنای معادلات متفاوت از ابزارهای پرکاربرد در کشاورزی مدرن است. تعیین برنامهٔ آبیاری و پیش‌بینی عملکرد محصول به وسیلهٔ این مدل‌ها از روش‌های متداول در کشاورزی صنعتی است.

با توجه به تفاوت مبانی محاسبات و شبیه‌سازی مدل‌های مختلف و تنوع مدل‌های موجود، انتخاب مناسب‌ترین مدل در هر منطقه، با توجه به سطح آگاهی کشاورزان و بهره‌برداران منطقه، ضروری است. همچنین مدل‌های گیاهی پیش از استفاده برای مدیریت آبیاری باید ارزیابی شوند (Cavero *et al*, 2000).

مدل AquaCrop

AquaCrop مدلی آب‌محور است که برای اولین بار سازمان خواربار جهانی (FAO) در سال ۲۰۰۹ معرفی کرد (Araya *et al*, 2010). این مدل بر پایهٔ نشریهٔ شمارهٔ ۳۳ فائو و با هدف تحت پوشش قراردادن گسترهٔ وسیعی از محصولات باغی و زراعی و بدون داشتن نگاه اقلیمی و منطقه‌ای، با قابلیت استفاده در سرتاسر دنیا، گسترش یافت.

مدل AquaCrop با توجه به مقدار آب مصرف‌شده توسط گیاه میزان عملکرد محصول را بدون نیاز به تعداد قابل توجهی دادهٔ ورودی برآورد می‌کند. علاوه بر آن، این مدل توانایی برآورد اجزای بیلان آب خاک را در طول فصل زراعی دارد. مبنای محاسبات عملکرد در مدل AquaCrop از رابطهٔ ۱ تبعیت می‌کند:

$$\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} = K_Y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \qquad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

* نویسندهٔ مسئول: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

Y_x حداکثر عملکرد، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر و تعرق حداکثر، ET_a تبخیر و تعرق واقعی، و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است.

مدل AquaCrop با تفکیک اجزای تبخیر و تعرق گیاه (ET) به مقدار واقعی تعرق گیاه (T_r) و مقدار تبخیر از خاک (E_x) دو هدف اصلی را در طول محاسبات دنبال می‌کند. ابتدا با استفاده از مقادیر محاسبه‌شدهٔ تبخیر از خاک و مقادیر آب ورودی در قالب داده‌های ورودی به تکمیل و محاسبهٔ اجزای بیلان آب خاک می‌پردازد. در بخش دیگر با استفاده از مقدار تعرق واقعی عملکرد محصول (Y_x) را با اتکا به شاخص برداشت (HI) محاسبه می‌کند. بدین ترتیب که با استفاده از شاخص بهره‌وری آب (WP) میزان زیست‌تودهٔ تولیدی (B) محاسبه و با کمک شاخص برداشتْ عملکرد محصول محاسبه می‌شود. پارامتر شاخص برداشت در این مدل جایگزین شاخص سطح برگ (LAI) است که عموماً در سایر مدل‌ها استفاده می‌شود. میزان پوشش تاج (CC) در محاسبات تبخیر از خاک و تعرق گیاه تأثیر فراوانی دارد.

داده‌های مورد نیاز مدل به چهار دسته داده‌های آب‌وهوا، داده‌های خاک، داده‌های محصول، و داده‌های مدیریتی تقسیم می‌شود. داده‌های آب‌وهوا شامل حداقل و حداکثر دما، داده‌های بارندگی، داده‌های تبخیر و تعرق مرجع، و میانگین سالیانهٔ تجمع دی‌اکسید کربن است. داده‌های حداقل و حداکثر دما تعیین‌کنندهٔ میزان توسعه و تغییرات محصول است. یکی دیگر از داده‌های ورودی مورد نیاز مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل است. در این مطالعه برای محاسبهٔ داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل از مدل ETоCalculator استفاده شد. خروجی این مدل به نحوی است که می‌تواند به صورت مستقیم به عنوان دادهٔ ورودی برای مدل AquaCrop استفاده شود. همهٔ داده‌های ورودی هر دو مدل ETоCalculator و AquaCrop می‌تواند به صورت روزانه، ۱۰ روزه، یا ماهیانه باشد. دقت داده‌های ورودی بر نتایج حاصل از مدل تأثیرگذار خواهد بود. مدل، با استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق ورودی و همچنین میزان توسعهٔ تاج گیاه در طول مراحل مختلف، میزان تبخیر و تعرق را متناسب با دقت داده‌های ورودی به تفکیک محاسبه می‌کند. در خصوص داده‌های میانگین سالیانهٔ تجمع دی‌اکسید کربن در جوّ اطلاعات جمع‌آوری‌شده از رصدخانهٔ مانولوآ[1] در هاوایی در طول سال‌های گذشته، از سال ۱۹۵۹ تا ۲۰۰۹، در مدل موجود است و کاربر می‌تواند با تحلیل آینده‌نگرانهٔ تغییر اقلیم و میزان دی‌کسید کربن در سال‌های آینده گزینهٔ مورد نظر را انتخاب کند. گفتنی است، در غیاب داده‌های روزانهٔ هواشناسی، مدل از روش میان‌یابی Gommes (1983) برای به‌دست‌آوردن داده‌های روزانهٔ دمایی و تبخیر و تعرق پتانسیل بر مبنای داده‌های ۱۰ روزه یا ماهیانه استفاده می‌کند.

دستهٔ دومِ داده‌های ورودی داده‌های نیم‌رخ خاک‌اند. داده‌های مورد نیاز در این دسته عبارت‌اند از تعداد افق‌های مختلف خاک و ضخامت هر یک از آن‌ها و مشخصات فیزیکی هر لایه؛ مانند هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع، ظرفیت مزرعه‌ای، و نقطهٔ پژمردگی دائم. به عبارت دیگر، مدل به سه نقطهٔ رطوبتی مهم از منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک در هر لایه نیاز دارد. در خصوص لایهٔ سطحی خاک، علاوه بر اطلاعات فوق، شمارهٔ منحنی خاک و میزان آب تبخیر در دسترس نیز لازم است. میزان آب قابل تبخیر در دسترس با استفاده از نقاط منحنی مشخصهٔ رطوبتی قابل محاسبه است؛ که نحوهٔ محاسبهٔ آن در ادامه می‌آید. اطلاعات لایهٔ نفوذناپذیر در صورت وجود منابع آب زیرزمینی، شامل عمق ثابت یا متغیر، به منزلهٔ مؤلفه‌های مؤثر در بیلان آب خاک در محدودهٔ ریشه استفاده می‌شود. در محاسبات آب زیرزمینی و صعود مویینگی حاصل از آن از قوانین دارسی استفاده شد.

دستهٔ سوم داده‌ها داده‌های محصول است. سازمان غذا و کشاورزی پارامترهای مدل را بر اساس محصولات کشاورزی به تفکیک و بدون وابستگی به مکانی خاص واسنجی کرده است. این مقادیر، که به صورت پیش‌فرض در مدل قرار داده شد، ثابت‌اند. اما برای ارقام مختلف و در صورت بروز تنش‌های مختلف پاسخ گیاه متفاوت است. می‌توان از این داده‌ها به مثابهٔ مقادیر پایه برای محصولاتی که پارامترهای مورد نیاز آن‌ها به صورت اختصاصی اندازه‌گیری نشده استفاده کرد. مؤلفه‌های حداکثر عمق توسعهٔ ریشه، تاریخ کشت، طول دوره‌های مختلف مراحل رشد، تنش‌های دمایی، و حداکثر پوشش تاج سبز گیاه سایر داده‌های ورودی هستند که با توجه به امکان تغییر در شرایط مختلف آب‌وهوایی امکان حداکثر مطابقت با شرایط منطقه‌ای در مدل را فراهم می‌کنند.

داده‌های مدیریتی به دو دسته قابل تقسیم‌اند. دستهٔ اول مربوط به میزان و نحوهٔ کوددهی و استفاده از انواع مالچ و نوع و مقدار مورد استفاده برای کاهش تبخیر از سطح خاک است. دستهٔ دوم نیز داده‌های مربوط به آبیاری و روش و مقدار آب

1. Manoloa

Archive of SID

www.SID.ir

داده‌شده به زمین است. مقدار خالص آب آبیاری و روش آبیاری و درصد خیس‌شدهٔ زمین از اطلاعات ورودی مورد نیاز مدل است. علاوه بر اطلاعات فوق، داده‌های رواناب خروجی از مزرعه نیز، در صورت وجود، باید در مدل وارد شود. رواناب سطحی در این مدل بر اساس روش شمارهٔ منحنی شبیه‌سازی می‌شود. شمارهٔ منحنی هر لایه با توجه به رطوبت لایهٔ سطحی تصحیح و در شبیه‌سازی وارد می‌شود. روابط به‌دست‌آمده از Smedema and Rycroft (1983) مقادیر شمارهٔ منحنی را بر اساس رطوبت متناظر آن ارائه می‌دهد.

مدل AquaCrop معادلات دیفرانسیلی جریان با مجموعه‌ای از معادلات در بازه‌های محدود، که غالباً به مؤلفهٔ رطوبت خاک وابسته است، جایگزین شده است. در این مدل، شبیه‌سازی با محاسبهٔ مقدار آب زهکشی‌شده آغاز می‌شود و با محاسبهٔ مقدار آب نفوذیافته به نیم‌رخ خاک ادامه می‌یابد و در پایان میزان تبخیر و تعرق گیاه به صورت مجزا محاسبه می‌شود. در طول روند محاسبات میزان رطوبت خاک با توجه به محاسبات انجام‌شده در پایان هر مرحله به‌روزرسانی می‌شود.

مدل CERES-Maize

مدل CERES-Maize از مدل‌های گیاهی موجود در مجموعهٔ سیستم پشتیبانی تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی (DSSAT)[1] (Jones *et al*, 1998) است. این مدل مجموعه‌ای از برنامه‌های مستقل است که کنار هم استفاده می‌شوند. مدل‌های شبیه‌سازی گیاه در مرکز این تجمع قرار دارند. بانک داده‌ها در این مجموعه شامل آب‌وهوا، خاک، داده‌های مزرعه‌ای، و اطلاعات ژنوتیپ برای استفادهٔ مدل در شرایط مختلف است.

در این مطالعات مجموعهٔ DSSATV4.5، که در سال ۲۰۱۳ منتشر شد، به‌کار رفت. مدل DSSAT-CSM ساختار ماژولی دارد. این ساختار را Jones *et al* (2001) و Porter *et al* (2000) پیشنهاد و تشریح کردند. در این مدل یک برنامهٔ اصلی وجود دارد که به مثابهٔ گرداننده و کنترل‌کنندهٔ مراحل شبیه‌سازی به‌کار می‌رود. در کنار داده‌های ورودی به مدل، یک ماژول شبیه‌سازی همهٔ فرایندهای تأثیرگذار بر یک واحد زمین را در اختیار دارد. این ماژول برای محاسبات از زیرماژول‌هایی بهره می‌گیرد. زیرماژول‌ها شامل آب‌وهوا، برنامه‌های مدیریتی، خاک، روابط آب‌خاک، گیاه، و سیستم‌های مدل‌سازی گیاه است. هر ماژول ۶ مرحله فرایند دارد که اجازه می‌دهد برنامهٔ اصلی زمان‌بندی هر یک را کنترل کند. این فرایند اجازه می‌دهد هر ماژول داده‌های منحصر به خود را ثبت و شروع به محاسبات و جداسازی متغیرها به صورت مستقل از سایر ماژول‌ها کند. CERES-Maize تحت عنوان ماژول گیاهی اختصاصی برای شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه ذرت در این مجموعه قرار داده شد. این ماژول برای شبیه‌سازی فنولوژی، رشد روزانه و جزءبندی آن، نیاز کربن و نیتروژن گیاه، پیری قسمت‌های مختلف گیاه، و ... استفاده می‌شود.

از مدل‌های پرطرفدار شبیه‌سازی بیلان آب خاک در مدیریت‌های مختلف آبیاری می‌توان به مدل AquaCrop اشاره کرد. مدل AquaCrop را اولین بار در سال ۲۰۰۹ سازمان خواربار جهانی ارائه کرد و تا به حال تلاش‌های بسیار از جمله واسنجی و صحت‌سنجی این مدل در سراسر دنیا و برای محصولات مختلف صورت گرفته است. از این محصولات می‌توان به پنبه، اکوینوا، سویا، جو، گندم، آفتابگردان، برنج، و ذرت اشاره کرد. سنجش و پارامتری‌کردن مدل برای ذرت اولین بار با استفاده از داده‌های مزارع تحقیقاتی دانشگاه کالیفرنیا به مدت ۶ سال انجام شد (Hsiao *et al*, 2009). صحت‌سنجی مدل برای گیاه ذرت توسط مجموعه‌ای از داده‌ها از مناطق گینسویل، فلوریدا، تگزاس، بوشلند، و زاراگزا در اسپانیا با تفاوت بسیار در خاک و شرایط آب‌وهوایی انجام شد (Heng *et al*, 2009). بررسی‌ها نشان داد نتایج این مدل در شبیه‌سازی میزان کل مادهٔ خشک، دانه، و سطح سایه‌انداز در شرایط بدون تنش آبی رضایت‌بخش است. اما میزان دقت آن با واردشدن تنش آبی، به‌خصوص در دورهٔ پیری، کمتر شد. برای بررسی آثار تغییر اقلیم بر ذرت در منطقهٔ پاک‌دشت از این مدل استفاده شد (Roostaee *et al*. 2011). عملکرد مدل در آبیاری قطره‌ای و در منطقهٔ شمال خوزستان ارزیابی شد. نتایج نشان داد عملکرد مدل رضایت‌بخش است (Heidarinia *et al*. 2012).

در پژوهشی به بررسی کارایی عملکرد مدل AquaCrop برای گیاه ذرت در مناطق نیمه‌خشک و تحت شرایط متفاوت کودی و آبیاری پرداخته شد (Abedinpour *et al*, 2012). نتایج پژوهش نشان‌دهندهٔ دقت مناسب مدل در مراحل مختلف شبیه‌سازی برای گیاه ذرت بود. توانایی مدل در برآورد رطوبت حجمی در همهٔ عمق‌ها خوب ارزیابی شد. مدل AquaCrop برای گیاه ذرت در شرایط دیم در منطقهٔ پنسیلوانیا صحت‌سنجی شد (Mebane *et al*, 2013). مدل دیگری که امروزه در شبیه‌سازی فرایند رشد گیاه استفادهٔ گسترده پیدا کرده و برای گیاهان مختلف تهیه شده مدل CERES است.

1. Decision Support System for Agrotechnology Transfer

Archive of SID

www.SID.ir

مدل CERES-Maize، از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی ذرت از مجموعهٔ مدل DSSAT، نخستین بار توسط شبکهٔ بین‌المللی علوم با همکاری شبکهٔ سایت‌های بین‌المللی معیار (IBSSNAT) در سال ۱۹۸۹ ارائه شد. مدل DSSAT در بیش از ۹۰ کشور دنیا توزیع شد و بسیاری از محققان در اواخر دههٔ ۱۹۸۰ از آن استفاده کردند. Jones *et al* (2003) بیش از ۱۲۰ مطالعهٔ انجام‌شده با مدل DSSAT در کل دنیا را فهرست کردند. در این مطالعات مدل‌های شبیه‌ساز گیاهان زراعی DSSAT برای تعیین عملکرد مطلوب مدیریتی محصولات، مدیریت کود، مدیریت آبیاری، کشاورزی دقیق، مدیریت آفت، تنوع و تغییر اقلیم، آلودگی محیط، و آموزش استفاده شده‌اند (Soltani and Hoogenboom, 2007). بدین ترتیب، مدل‌های گیاهی موجود در بستهٔ نرم‌افزاری DSSAT و همچنین ماژول آب و خاک بارها و بارها در سراسر جهان بررسی و ارزیابی شده‌اند. تحقیقی با کاربرد مدل CERES-Maize در دشت‌های شمال چین با آب‌وهوای گرم و نیمه‌مرطوب انجام شد (Yihua *et al*, 1989). نتایج نشان داد این مدل در سال‌های خشک عملکرد محصول را کمتر و در سال‌های مرطوب بیشتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد می‌کند. اما در سال‌هایی که بارندگی به حد نرمال نزدیک بود برآورد بسیار خوبی نشان داد.

مدل CERES-Maize در ۷ منطقه در میزوری مرکزی بر اساس شرایط متفاوت موقعیت زمین، رقوم ارتفاعی، عمق خاک، لایهٔ رسی نفوذناپذیر، و مقدار محصول تولیدی واسنجی شد (Fraisse *et al*, 2001). نتایج تحقیق مذکور نشان داد برای شبیه‌سازی رشد و توسعهٔ ریشه، در خاک‌هایی با مقدار رس زیاد و لایهٔ نفوذناپذیر و محدودکننده، تصحیحاتی باید صورت گیرد. اما در تحقیق مذکور توصیه کردند، به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی، در مناطقی که جریان رو به بالا وجود دارد جریان زیرسطحی لحاظ شود. مدل CERES-Maize را برای مناطق نیمه‌خشک Nouna *et al* (2003) ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مدل در رطوبت ناکافی خاک شبیه‌سازی نامناسبی از رشد گیاه دارد. آن‌ها پیشنهاد کردند، با توجه به توابع تنش آبی برای شرایط مختلف آب‌وهوایی، مدل واسنجی شود. در ایران نیز مدل CERES-Maize برای ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در منطقهٔ ورامین واسنجی شد (Rabie et al. 2012). نتایج عملکرد مناسب مدل را در پیش‌بینی وزن زیست‌توده در شرایط مختلف نشان داد.

هدف این مطالعه واسنجی مدل AquaCrop با استفاده از اجزای بیلان آب است که در مطالعات قبلی کمتر به آن پرداخته شده است. در ادامه عملکرد دو مدل AquaCrop و CERES-Maize به مثابهٔ یک مدل با پایهٔ آب و یک مدل زراعی گیاه ذرت در برآورد بیلان آب خاک و عملکرد محصول ذرت در منطقهٔ کرج، با توجه به کاشت سطح وسیعی از این محصول در این منطقه، بررسی و مدلی مناسب توصیه می‌شود.

مواد و روش‌ها

مطالعهٔ حاضر با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه ۵۰۰ هکتاری مؤسسهٔ تحقیقات اصلاح و تهیهٔ نهال و بذر واقع در مشکین‌دشت کرج در سال زراعی ۱۳۹۰ــ ۱۳۹۱ انجام شده است. بافت و جرم مخصوص ظاهری خاک در جدول ۱ می‌آید. منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک در اعماق مختلف در آزمایشگاه تعیین شد و از میانگین وزنی آن‌ها برای کل نیم‌رخ خاک در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در مزرعهٔ مورد مطالعه

عمق نمونه	رس	سیلت	شن	بافت	چگالی ظاهری (gr/cm^3)
۲۰-۰	۲۳	۴۱	۳۶	لوم	۱/۳۲
۴۰-۲۰	۲۵	۴۱	۳۴	لوم	۱/۵۸
۶۰-۴۰	۲۳	۳۹	۳۸	لوم	۱/۵۸

جدول ۲. منحنی مشخصهٔ رطوبتی خاک در اعماق مختلف در مزرعهٔ مورد مطالعه (درصد وزنی)

عمق نمونه‌برداری	رطوبت وزنی (٪) در مکش‌های مختلف (اتمسفر)							
	۰	۰/۳	۰/۵	۱	۳	۶	۱۰	۱۵
۲۰-۰	۳۰	۱۹/۶۴	۱۷/۲۶	۱۶/۱۶	۱۲/۷۱	۱۱/۳۴	۱۰/۲۰	۹/۱۲
۴۰-۲۰	۳۷	۲۱/۶۹	۱۸/۵۳	۱۷/۶۷	۱۴/۵۲	۱۲/۶۷	۱۱/۹۸	۱۰/۲۲
۶۰-۴۰	۲۵	۲۰/۴۸	۱۶/۶۸	۱۵/۳۰	۱۲/۳۹	۱۰/۷۱	۱۰/۰۷	۹/۷۵
میانگین	۳۰/۶	۲۰/۵۴	۱۷/۴۹	۱۶/۳۸	۱۳/۲۱	۱۱/۵۷	۱۰/۷۵	۹/۷۰

Archive of SID

www.SID.ir

داده‌های مورد نیاز برای مدل‌ها در قالب دو آزمایش، با درنظرگرفتن ۵ جویچه با طول ۱۲۰ متر برای هر آزمایش، بود که از میان آن‌ها ۳ جویچه مبنای محاسبهٔ عملکرد محصول بودند. برای هر آزمایش ۴ تکرار درنظر گرفته شد. T_1 معرف آزمایش اول با روش کوددهی سنتی و T_2 معرف آزمایش دوم با استفاده از کودآبیاری است. در هر دو آزمایش ۱۰۰ درصد آب مورد نیاز گیاه تأمین شد. در یکی از آزمایش‌ها ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اورهٔ مورد نیاز به روش سنتی (۵۰ درصد قبل از کاشت و ۵۰ درصد در مرحلهٔ ۴ تا ۶ برگی) و در آزمایش دوم همان مقدار کود اوره به شکل کودآبیاری به مزرعه داده شد.

داده‌های برداشت‌شده شامل میزان آب ورودی و خروجی در هر آزمایش توسط فلوم‌های WSC در ابتدا و انتهای هر آزمایش، زمان پیش‌رَوی در هر آبیاری، عملکرد محصول، و نمونه‌های رطوبتی برداشت‌شده قبل از هر نوبت آبیاری در سه عمق ۰ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متری در طول فصل زراعی است. در این مطالعه تاریخ کاشت و تاریخ جوانه‌زنی برابر ۴ اردیبهشت و ۱۵ اردیبهشت و نیز حداکثر عمق توسعهٔ ریشه برابر ۵۰ سانتی‌متر از داده‌های ورودی مدل‌هاست.

داده‌های آب‌وهوایی مورد نیاز از ایستگاه هواشناسی محمدشهر با دقت روزانه جمع‌آوری شد. میانگین حداکثر دما در این منطقه برابر ۳۱٫۵ و میانگین حداقل دما برابر ۱۵٫۴ درجهٔ سانتی‌گراد بود. میانگین رطوبت نسبی ۳۹٫۵ درصد و میانگین ساعات آفتابی روزانه برابر ۱۰ ساعت و میانگین سرعت باد ۳ متر بر ثانیه، معادل ۱۰٫۸ کیلومتر بر ساعت، است. کل نزولات جوّی در طول دورهٔ رشد ذرت ۴۵٫۸ میلی‌متر بود که ۱۰۰ درصد آن به صورت بارندگی بود.

داده‌های مورد نیاز برای تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از مدل ETo Calculator محاسبه و به صورت فایل مجزا وارد مدل AquaCrop شد. مقادیر پارامترهای گیاهی برای اکثر گیاهان زراعی به عنوان پیش‌فرض در مدل وجود دارد. این پارامترها، که با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون اعمال محدودیت واسنجی شده‌اند، با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند. بنابراین در این مطالعه از مقادیر پیش‌فرض مدل در مراحل مختلف واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد. مؤلفه‌های کلی محصول شامل حداکثر عمق توسعهٔ ریشه، تاریخ کشت، طول مراحل مختلف رشد، و عملکرد برای هر دو آزمایش اندازه‌گیری و در طول مراحل واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌ها

واسنجی دو مدل با استفاده از روش بیلان آب خاک انجام شد. بدین منظور با استفاده از داده‌های آزمایش اول پارامترهای بیلان آب خاک محاسبه شد و به منزلهٔ ورودی در اختیار مدل قرار گرفت. در طول فصل زراعی میزان آب ورودی و خروجی برای هر آزمایش با فلوم‌های اشاره‌شده اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب، میزان آب خالص آبیاری در هر نوبت آبیاری محاسبه شد. میزان بارندگی با استفاده از داده‌های هواشناسی استخراج شد. میزان تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از مدل ET_O Calculator و داده‌های روزانهٔ هواشناسی محاسبه و به منزلهٔ مقادیر ورودی وارد دو مدل شد. با استفاده از مؤلفه‌های گیاهی اندازه‌گیری‌شده، شامل عمق توسعهٔ ریشه و طول دورهٔ مراحل مختلف رشد و همچنین عملکرد محصول در پایان فصل زراعی، تلاش شد در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نزدیک‌ترین نتایج به مقادیر مشاهده‌ای حاصل شود.

مرحلهٔ صحت‌سنجی نیز با استفاده از داده‌های آزمایش دوم انجام شد. ارزیابی عملکرد دو مدل در هر مرحله با استفاده از شاخص‌های آماری زیر صورت گرفت:

میانگین خطای نسبی

علاوه بر شاخص‌های آماری فوق از شاخص میانگین خطای نسبی (RE)[1] نیز در ارزیابی مدل‌ها استفاده شد. این شاخص نشان‌دهندهٔ میزان خطای نسبی اتفاق‌افتاده در مقادیر شبیه‌سازی بود.

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{P_i - O_i}{O_i}\right)}{N} \times 100$$ (رابطهٔ ۲)

میانگین خطای انحراف

شاخص میانگین خطای انحراف[2] (MBE) میانگین تفاوت بین مقادیر محاسبه و مقادیر اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد. مقادیر مثبت این شاخص بیانگر بیش‌تخمینی مدل و مقادیر منفی آن نشانگر کم‌تخمینی مدل‌اند.

$$MBE = \frac{\sum_{i=0}^{N}\left(P_i - O_i\right)}{N}$$ (رابطهٔ ۳)

1 Relative Error
2 Mean Bias Error

Archive of SID

www.SID.ir

ریشهٔ میانگین مربعات خطا

شاخص ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE) با رابطه ۴ قابل محاسبه است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{(رابطهٔ ۴)}$$

O_i و P_i به‌ترتیب معرف مقادیر مشاهده‌ای و اندازه‌گیری متغیر مورد مطالعه و N نشان‌دهندهٔ تعداد داده‌ها است. این شاخص متوسط پراکندگی اختلافِ مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. اما این شاخص اطلاعاتی از بیش‌تخمینی یا کم‌تخمینی یک مدل به‌دست نمی‌دهد (Jamieson *et al*, 1991).

ضریب تبیین

ضریب تبیین[1] (R^2) از شاخص‌های آماری رایج در عملکرد مدل‌هاست و نسبت پراکندگی مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد. در صورت تطابق کامل بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، مقدار این شاخص برابر ۱ خواهد بود.

(رابطهٔ ۵)

$$R^2 = \left(\frac{S_{xy}}{S_x \times S_y}\right)^2 = \left(\frac{\sum((O_i - \overline{O}) \times (P - \overline{P}))}{\sqrt{\sum(O_i - \overline{O})^2 \times \sum(P_i - \overline{P})^2}}\right)^2$$

شاخص توافق[2]

شاخص توافق (d) به شکل وسیعی در بررسی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود. این شاخص نشان‌دهندهٔ میزان انطباق بین داده‌های مشاهده‌ای و اندازه‌گیری‌شده است. هر چه مقدار شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، میزان انطباق افزایش می‌یابد (Willmott *et al*, 1985).

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[|P_i - \overline{O}| + |O_i - \overline{O}|\right]^2}\right) \quad \text{(رابطهٔ ۶)}$$

یافته‌ها و بحث

AquaCrop

واسنجی در مدل AquaCrop با استفاده از تغییراتی در شاخص برداشت و ضرایب مورد استفادهٔ مدل در تفکیک میزان تبخیر و تعرق و همچنین تغییراتی در شرایط رشد ریشه با استناد به طول دورهٔ مراحل مختلف رشد برای رسیدن به بهترین نتیجهٔ ممکن در رطوبت‌های خاک محاسبه‌شده کنار عملکرد محصول انجام شد. پارامترهای استفاده‌شده در این مرحله در جدول ۳ می‌آید. نتایج شبیه‌سازی رطوبت با مدل AquaCrop در این مرحله در شکل ۱ می‌آید. کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی شد. ریشهٔ میانگین مربع خطا در این مرحله برابر ۲/۷ درصد، شاخص توافق مدل برابر ۸۵ درصد، و خطای نسبی در این مرحله برابر ۷/۲۷ درصد است که در مقیاس رطوبت‌های اندازه‌گیری‌شده قابل توجه است. با وجود این، همبستگی بین داده‌ها در این مرحله برابر ۷۸ درصد است که همبستگی مناسب را نشان می‌دهد. شاخص MBE برابر ۰/۸۵ است که به دلیل مثبت‌بودنْ وجود بیش‌تخمینی در نتایج مدل AquaCrop را نشان می‌دهد. عملکرد مدل در برآورد رطوبت مناسب است. اما در برخی موارد خطای حاصل از شبیه‌سازی نسبتاً زیاد است و همچنین همهٔ اعداد نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده قدری بیش‌تخمینی دارند.

مرحلهٔ صحت‌سنجی برای مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های آزمایش دوم انجام شد. در این مرحله عملکرد مدل بسیار خوب ارزیابی شد؛ طوری که شاخص توافق به ۹۴ درصد و میزان میانگین مربعات خطا (RMSE) به ۲/۶۷ رسید. میزان خطا در این مرحله کاهش یافت و افزایش مقادیر سایر پارامترها قابل توجه بود. بدین ترتیب دقت مدل در برآورد محتوای آب خاک در طول فصل زراعی افزایش یافت. عملکرد مدل در این مرحله در شکل ۲ می‌آید.

پس از حصول نتایج رضایت‌بخش در برآورد اجزای بیلان آب خاک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی با مدل AquaCrop میزان کارایی مدل در برآورد عملکرد محصول به منزلهٔ یکی از قابلیت‌های اساسی مدل‌های شبیه‌ساز بررسی شد. سایر مطالعات انجام‌شده، از جمله مطالعات Mebane et al (2013)، وجود RMSE را در محدودهٔ ۱/۵ـ ۹/۸ درصد در برآورد محتوای آب خاک در مزرعه تحت کشت ذرت نشان می‌دهد.

مقادیر محاسبه‌شدهٔ عملکرد در دو آزمایش در جدول ۵ همراه مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه‌شده می‌آید. میزان عملکرد محصول شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۱۱/۰۳ و ۱۱/۴۲ تن در هکتار بود. برای بررسی دقت مدل در مرحلهٔ برآورد نیز از شاخص‌های آماری استفاده شد. میزان RMSE برآوردشده برای آزمایش T_1 برابر ۰/۲ و برای آزمایش T_2 برابر ۰/۴ تن در هکتار بود. میزان شاخص توافق برای عملکرد محصول در مراحل واسنجی و

1. Coefficient of determination
2. Index of Agreement

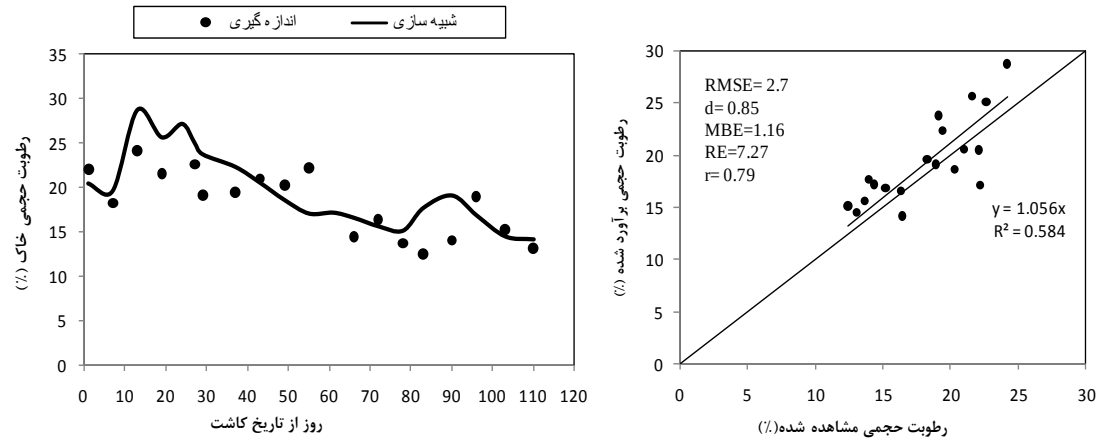
Archive of SID

www.SID.ir

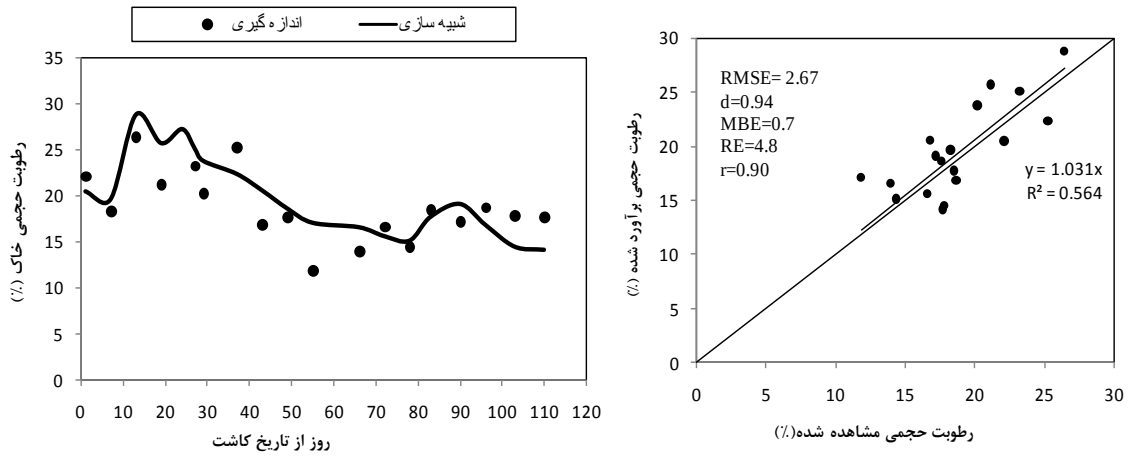
صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰٫۳۸ و ۰٫۴۱ درصد بود. مقدار شاخص MBE در مرحلهٔ واسنجی با مقدار ۰٫۰۸ نشان‌دهندهٔ بیش‌تخمینی و در مرحلهٔ صحت‌سنجی با مقدار ۰٫۲۸- نشان‌دهندهٔ کم‌تخمینی در مقدار عملکرد است.

جدول ۳. پارامترها و ضرایب اصلاح‌شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

پارامترهای استفاده‌شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی	مقادیر پارامترها	
	مدل AquaCrop	مدل CERES-Maize
تاریخ کاشت	۲۰۱۲/۴/۲۳	۲۰۱۲/۴/۲۳
تاریخ جوانه‌زنی	۲۰۱۲/۵/۳	۲۰۱۲/۵/۳
حداکثر عمق ریشه	۶۰ سانتی‌متر	۶۰ سانتی‌متر
ضریب رواناب	۶۵	۶۱
تعداد روز تا گل‌دهی	۷۰	۷۰
شاخص برداشت (HI)	٪۵۲	–
ضریب تعرق گیاه (Kc_{tr})	۱٫۰۵	–
درصد خیس‌شدگی سطح زمین در آبیاری	٪۸۰	–
میزان آب قابل تبخیر از لایهٔ سطحی	۱ میلی‌متر	–
ضریب حاصل‌خیزی (fertility factor)	–	۱
میزان زهکشی (drainage rate)	–	۰٫۹۵
راندمان (آبیاری و مدیریت آب)	–	۰٫۶



شکل ۱. نتایج شبیه‌سازی رطوبت توسط مدل AquaCrop در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متری نیم‌رخ خاک در مرحلهٔ واسنجی



شکل ۲. نتایج شبیه‌سازی رطوبت با مدل AquaCrop در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متری نیم‌رخ خاک در مرحلهٔ صحت‌سنجی

www.SID.ir

میـزان RMSE برآوردشـده توسـط Abedinpour *et al* (2012) روی ذرت در منـاطق نیمـه‌خشـک در محـدودهٔ ۰٫۴۲- ۰٫۲۹ قرار دارد که با نتایج این آزمایش مطابق اسـت. عـلاوه بـر آن، شاخص توافق بـر ذرت در مطالعـهٔ Stricevic *et al* (2011) در منطقهٔ صربستان برابر ۹۹ درصد بوده است که با شاخص ۹۵ درصد در مرحلهٔ صحت‌سنجی در این مطالعه قابل مقایسه است. این نتایج دقت مناسب مـدل AquaCrop را در بـرآورد عملکـرد ذرت نشان می‌دهد. Heng *et al* (2009) نیز در مطالعات خود به عملکرد مناسب مدل در برآورد عملکرد ذرت اشاره کرده‌اند.

اجزای بیلان آب خاک در دو آزمایش T_1 و T_2 در جـدول ۴ می‌آیـد. در ایـن جـدول مقـادیر شـبیه‌سـازی‌شـده بـا مـدل AquaCrop در کنار مقادیر اندازه‌گیری‌شده قابل مشاهده اسـت. تفاوت نفوذ تجمعی برآوردشده بـا مـدل و مقـادیر انـدازه‌گیـری حاصل خطا به دلیـل سـاده‌سـازی‌هـای صـورت‌گرفتـه در رونـد محاسبات نفوذ تجمعی بر اساس معادلات نفوذ است.

جدول ۴. اجزای بیلان آب خاک شبیه‌سازی‌شده در دو مدل

اجزای بیلان آب خاک	مرجع اخذ داده‌ها	واحد	CERES-Maize		AquaCrop	
			T_1	T_2	T_1	T_2
بارندگی	داده‌های هواشناسی	میلیمتر	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶
عمق خالص آبیاری	اندازه‌گیری	میلیمتر	۵۸۰	۵۵۰	۵۸۲	۵۵۰
تبخیر	مدل	میلیمتر	۷۳٫۴	۸۸٫۳	۸۳	۸۶
تعرق	مدل	میلیمتر	۴۵۱٫۲	۴۵۳٫۳	۵۵۹	۵۲۴
نفوذ تجمعی	مدل	میلیمتر	۶۲۹	۵۷۰	۶۲۸	۵۹۶
نفوذ تجمعی	اندازه‌گیری‌شده	میلیمتر	-	-	۶۲۹	۵۷۰
زهکشی	مدل	میلیمتر	۱۴۳٫۵	۹۵٫۶	۲۲	۱۹
تغییرات رطوبت خاک در طول فصل زراعی	مدل	میلیمتر	۴۱٫۵	۴۱٫۵	-	-

CERES-Maize

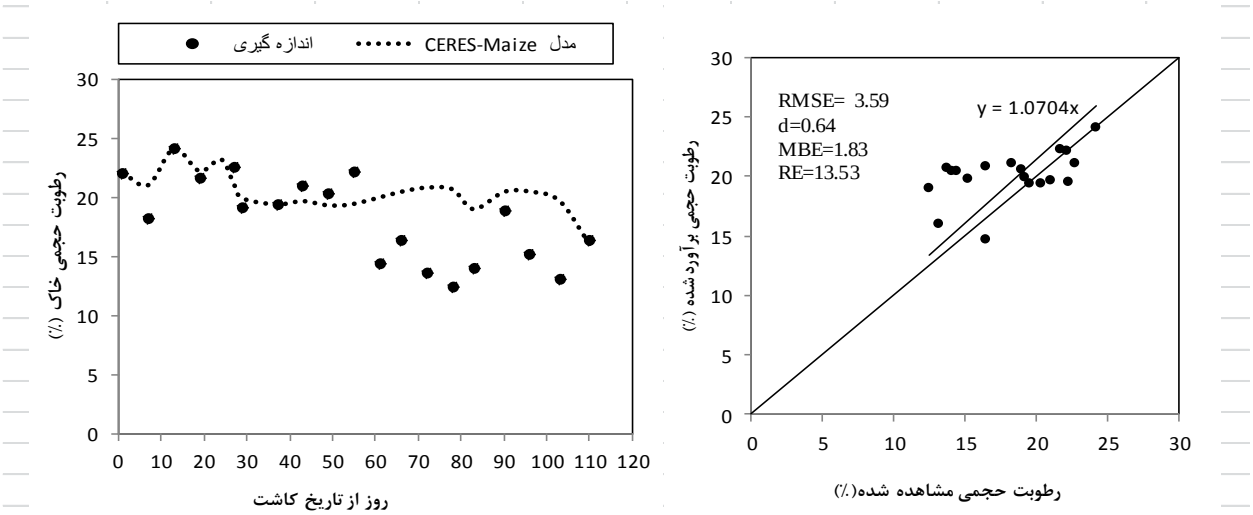
واسنجی در مـدل CERES-Maize بـا اسـتفاده از تغییراتـی در ضرایب مورد استفادهٔ مدل در شرایط رشد ریشـه بـا اسـتناد بـه طول دورهٔ مراحل مختلف رشد و حداکثر عمـق توسـعهٔ ریشـه و همچنین برخی شاخص‌های گیاهی ماننـد حـداکثر طـول گیـاه برای رسیدن بـه بهتـرین نتـایج ممکـن در رطوبـت‌هـای خـاک محاسبه‌شـده کنـار عملکـرد محصـول انجـام شـد. پارامترهـای استفاده‌شده در این مرحله در جدول ۳ می‌آید. میـزان شـاخص RMSE و شاخص توافق برای آزمایش T_1 به‌ترتیب برابـر ۳٫۵۹ و ۰٫۶۴ و برای آزمایش T_2 به‌ترتیب برابر ۳٫۶۱ و ۰٫۵۸ است. شکل ۳ و شکل ۴ نشان‌دهندهٔ عملکرد مـدل در بـرآورد محتـوای آب خـــاک در دو آزمـــایش هســـتند. گفتنـــی اســـت در مطالعات Dokoohaki *et al*., (2011) متوسط شاخص RMSE در برآورد محتوای آب خاک برابر ۱۳٫۰۷۶ است. در این مطالعـه میزان خطا کمتر برآورد شده است. همچنین در مطالعات Liu *et al* (2013) محدودهٔ تغییرات شاخص RMSE در برآورد محتوای آب خاک برابـر ۲۰-۱۵ درصـد اسـت. توانـایی مـدل در بـرآورد رطوبت خاک در دو آزمایش با اسـتفاده از شـاخص‌هـای آمـاری بررسی شده که در شکل ۳ می‌آیـد. میـزان شـاخص RMSE در برآورد عملکرد توسط مدل CERES-Maize برابـر ۰٫۱۹ و ۰٫۸۵ است.

به‌رغم توانایی مـدل CERES-Maize در بـرآورد عملکـرد ذرت با دقت قابل قبول، مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی رطوبت خـاک با نتـایج شـبیه‌سـازی بـا مـدل AquaCrop در عمـق ۰ تـا ۵۰ سـانتی‌متـر از نـیم‌رخ خـاک نشـان‌دهنـدهٔ دقـت بـالاتر مـدل AquaCrop در شـبیه‌سـازی رطوبـت خـاک نسـبت بـه مـدل CERES-Maize است. عملکرد برآوردشـده بـا مـدل CERES-Maize و شاخص‌های آماری برای ارزیابی کارایی مدل در برآورد عملکرد ذرت در جدول ۵ مـی‌آیـد. میـزان شـاخص RMSE در آزمـایش T_1 برابـر ۰٫۲۱ و در آزمـایش T_2 برابـر ۰٫۸۱ اسـت. شاخص MBE نشان‌دهندهٔ بیش‌تخمینی مدل در آزمـایش T_1 و کم‌تخمینی در آزمایش T_2 است. دقت مدل CERES-Maize در برآورد عملکرد محصول مناسب است. تفاوت عملکرد دو مدل بـا توجه به تفاوت داده‌هـای ورودی دو مـدل قابـل توضـیح اسـت. ساده‌سـازی صـورت‌گرفتـه در مـدل AquaCrop در مقایسـه بـا ساختار محاسباتی پیچیـدهٔ مـدل CERES-Maize سـبب شـده

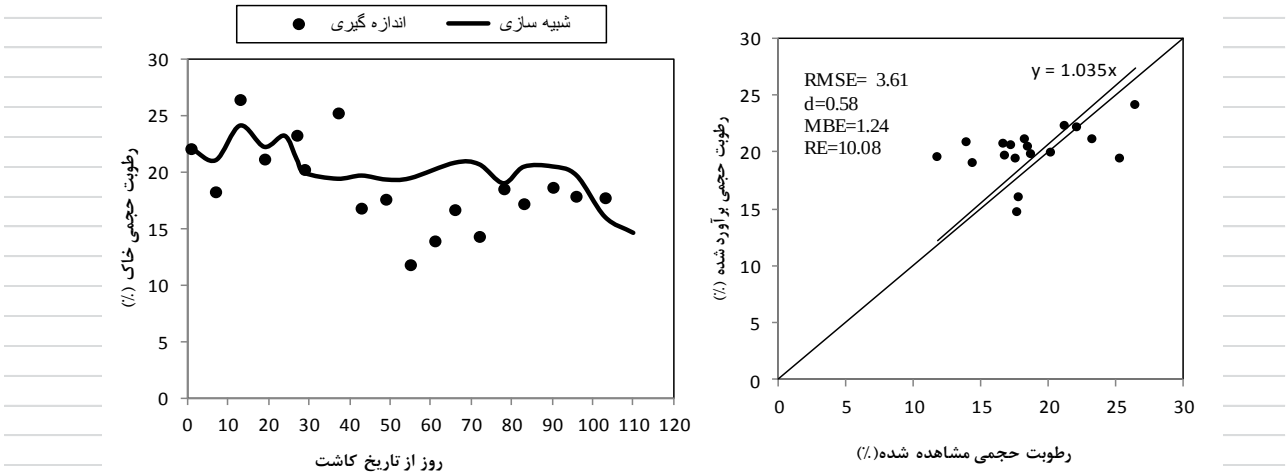
Archive of SID

www.SID.ir

دقت مدل CERES-Maize در برآورد عملکرد محصول قدری بیشتر باشد. از طرفی وجود معادلات بر پایهٔ آب و توجه خاص به میزان آب مصرف‌شده در ساختار محاسباتی مدل AquaCrop سبب شده دقت این مدل در برآورد محتوای رطوبت خاک نسبت به مدل زراعی CERES-Maize بیشتر باشد. در مطالعات Liu *et al* (2013) نیز عملکرد گیاه ذرت در مرحلهٔ واسنجی مدل با میزان RMSE ۱۷-۱۲ درصد برآورد و نتایج خوب تا متوسط ارزیابی شد، که این مقدار در مطالعات حاضر کاهش یافته است.



شکل ۳. نتایج شبیه‌سازی‌شده با مدل CERES-Maize در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متر برای آزمایش T_1



شکل ۴. نتایج شبیه‌سازی‌شده با مدل CERES-Maize در عمق ۰ تا ۵۰ سانتی‌متر برای آزمایش T_2

جدول ۵. مقایسهٔ عملکرد برآوردشده با دو مدل و مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر شاخص‌های آماری

آزمایش	AquaCrop		CERES-Maize	
	T_1	T_2	T_1	T_2
عملکرد اندازه‌گیری‌شده	۱۰٫۹۵	۱۱٫۷	۱۰٫۹۵	۱۱٫۷
عملکرد برآوردشده با مدل CERES-Maize	۱۱٫۰۳	۱۱٫۴۱	۱۱٫۰۶	۱۰٫۹۴
ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)	۰٫۲۰	۰٫۴۰	۰٫۲۱	۰٫۸۱
شاخص توافق (D)	۰٫۳۸	۰٫۴۱	۰٫۴۳	۰٫۳۲
میانگین خطای انحراف (MBE)	۰٫۰۸	-۰٫۲۸	۰٫۱۱	-۰٫۷۶
میانگین خطای نسبی (RE)	۰٫۷۶	-۲٫۴۲	۱٫۰۳	-۶٫۴۴

www.SID.ir

اجزای بیلان آب خاک در دو آزمایش T_1 و T_2 در می‌آید. در این جدول مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مدل CERES-Maize در کنار مقادیر اندازه‌گیری‌شده قابل مشاهده است. در این مدل تغییرات رطوبت در طول فصل زراعی نیز برآورد و ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد مدل توانایی برقراری بیلان آب را در طول فصل زراعی و در سطح مزرعه دارد. این مدل نسبت به مدل AquaCrop مقادیر بالاتری برای زهکشی برآورد می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو مدل AquaCrop و CERES-Maize برای برآورد عملکرد ذرت و بیلان آب خاک ارزیابی شدند. همان‌طور که مشاهده شد مدل AquaCrop نسبت به مدل CERES-Maize دقت بسیار بیشتری در برآورد بیلان آب خاک و رطوبت خاک در طول فصل زراعی دارد. دقت هر دو مدل در برآورد عملکرد محصول مناسب است. تفاوت عملکرد دو مدل با توجه به ساختار محاسباتی متفاوت قابل توجیه است. با وجود این نتایج نشان می‌دهد مدل بر پایهٔ آب AquaCrop در برآورد عملکرد جایگزین شایسته‌ای برای مدل زراعی CERES-Maize است.

در پایان با توجه به سهولت کاربرد و تعداد داده‌های مورد نیاز مدل AquaCrop و دقت بالاتر آن در برآورد محتوای آب خاک و دقت مناسب در مقایسه با مدل تخصصی CERES-Maize در عملکرد محصول، این مدل برای منطقهٔ کرج پیشنهاد می‌شود. توصیه می‌شود، برای تکمیل مطالعات و ارزیابی مدل در شرایط محدودیت‌های مختلف آب و شوری، تحقیقاتی در سطح مزارع بزرگ با راندمان‌های واقعی انجام شود.

REFERENCES

Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., and Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110: 55-66.

Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., and Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (Hordeum vulgare). *Agricultural Water Management*, 97: 1838-1846.

Cavero, J., Farre, I., Dwbaeke, P., and Faci, J. M. (2000). Simulation of maize yield under water stress with Epic phase and CropWat models *Agronomy Journal*, 92:679-690.

Dokoohaki, H., Gheysari, M., Mousavi, S. F. and Mirlatifi, S. M. (2011). Estimation soil water content under deficit irrigation by using DSSAT. *Water and Irrigation Management*. 2(1),1-14.

Fraisse, C. W., Studduth, K. A., and Kitchen, N. R. (2001). Clibration of the CERES-Maize for simulation site-specific crop development and yield on clay pan soils. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(4):547-556.

Gommes, R., 1983. Pocket computers in agrometeorology. FAO Plant production and protection paper N. 45, FAO, Rome, Italy.

Heidarinia, M., Naseri, A., Broumandnasab, S., and Azari, A. (2012). Assessing AquaCrop model application in irrigation management innorth of Khosetan_Safiabad. (CD) Proceeding of the *1st national water management in farm conference*. May 30-31. Iran.(In Farsi)

Heng, L. K., Hsiao,T. C., Evett, S., Howell, T., and Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101: 499-508.

Hsiao, T. C., Heng, L. K., Steduto, p., Rojas-Lara, B., and Fereres, E. (2009). AquaCrop_ the FAO crop model to simulate yield response to water :III. parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101: 448-459.

Jamieson B.G.M, A.N., Hodgson, and Bernard, R.T.F. (1991). Phylogenetic trends and variation in the ultrastructure of the spermatozoa of sympatme species of South African patellid limpets (Archaeogastropoda, Mollusca) Invertebr. Reprod. Dev.20:137–146

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Bachelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singly, U., Gijsmon, A. J., and Ritchie, T. J. (2003). The DSSAT cropping system model. . *European Journal of Agronomy*, 18: 235-256.

Jones, J.W., Keating, B.A., and Porter, C.H. (2001). Approaches to modular model development. *Agriculture System*, 70:421–443.

Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., Imamura, D. T., Bowen, W. T., and Singah, U. (1998). *Decision support system for agrotechnology transfer; DSSAT v3.Understanding options for Agricultural production*. Kluwer academic publishers, Dordrecht Netherlands, 157-177.

Liu, j., Yang, Y., Zhang, X. Y., Drury, F. C., Reynolds, W. D., and Hoogenboom, G. (2013). Modeling crop yield, soil water content and soil temperature for Soybean-Maize rotation under conventional and conservation tillage system in Northeast China. *Agriculture Water Management*, 123:32-44.

Meban, v. j., Day, R. L., Hamlett, J. M., Watson J. E., and Roth, G. W. (2013). Validating the FAO AquaCrop model for rain fed maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal*, 105: 419-427.

Nouna, B. B., Katerji, N., and Mastrorilli, M. (2003).

Archive of SID

www.SID.ir

Using the CERES-Maize model in semi-arid Mediterranean environment: New modeling of leaf area and water stress function. *European Journal of Agronomy*, 19:115-123.

Porter, C., Jones, J.W., and Braga, R. (2000). An approach for modular crop model development. International Consortium for Agricultural Systems Applications, 2440 Campus Rd., 527 Honolulu, HI 96822, pp. 13. Available from http://www.icasanet.org/modular/index.html

Rabie, M., Mirlatifi, S. M., and Gheysari, M. (2012). Calibration and Evaluation of the CSM-CERES-Maize model for maize hybrid 704 single-cross in varamin. *Journal of Water and Soil*. 26(2):290-299. (In Farsi)

Roostaee, M., Sohrabi, T., and Massah bavani, A. (2011). Risk analysis and impact assessment of climate change on biomass (case study: Pakdasht). (CD) Proceeding of the *1st national Climatology and Adriculture water managment conference*. November 22-23. Iran.(In Farsi)

Smedema, L.K., and Rycroft, D.W. (1983). Land drainage:Planning and design of agricultural drainage systems. Batsford Ltd., London. England.

Soltani, A. and Hoogenboom, G. (2007). Assessing crop management option with crop simulation Models on generated weather data. Field crop Pes, 103:198-207.

Stricevic, R., Djurovic, N. and Djurovic, Z. (2011). Drought classification in Northern Serbia based on SPI and statistical pattern recognition. *Meteorological Application*. 18: 60-69.

Willmott, C.J., Rykiel, C.M. and Mintz, Y. 1985. Climatology of terrestrial seasonal water circle. *Journal of Climatology*. 5:589-606.

Yihua, W., Sakamoto, C. M., and Botner, D. M. (1989). An application of CERES-Maize model to the North China plain. *Agriculture and Forest Meteorology*, 49:9-22.

Archive of SID

www.SID.ir