



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

صفحه‌های ۱۲۱-۱۳۳

توسعه مدل گیاهی ترکیبی بر پایه مدل CSM-CERES-Maize برای مدیریت آبیاری و ارزیابی شبیه‌سازی شاخص‌های رشد ذرت

حمزه دوکوهکی^۱، مهدی قیصری^{۲*}، سیدفرهاد موسوی^۳، شاهرخ زند پارسا^۴، گریت هوگنوم^۵

۱. کارشناس ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان - ایران.
۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان - ایران.
۳. استاد بازنشسته گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان - ایران.
۴. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز - ایران.
۵. استاد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه ایالتی واشینگتن، واشینگتن - آمریکا.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۰۳/۱۲

چکیده

در این بررسی، با هدف طراحی مدلی توانمند و منطبق بر نیازهای داخلی کشور، مدل‌های پرکاربرد CSM-CERES-Maize از بسته نرم‌افزاری DSSAT نسخه ۴ و مدل SWAP به یکدیگر متصل شدند تا هر یک از مدل‌ها از ویژگی‌های منحصر به فرد مدل دیگر استفاده کند. در مدل ترکیبی توسعه داده شده با نام پیشنهادی CERES-Maize-hbased، مدل CERES-Maize از مقادیر روزانه رطوبت خاک، تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل و جذب آب توسط ریشه محاسبه شده توسط مدل SWAP بهره می‌گیرد و پارامترهای روزانه رشد ریشه و شاخص سطح برگ را محاسبه و به آن ارسال می‌کند. برای ارزیابی مدل از داده‌های ذرت کشت شده در منطقه ورامین استفاده شد. مقایسه نسخه اصلی مدل و نسخه توسعه یافته مدل در پیش‌بینی مقدار ماده خشک نشان داد که هر دو مدل به خوبی ماده خشک را شبیه‌سازی می‌کنند. تفاوت معناداری بین عملکرد دو مدل در مقدار متوسط و مقدار نهایی مجموع ماده خشک مشاهده شد. مقدار متوسط و مجموع خطای مطلق نسخه توسعه یافته و اصلی مدل در شبیه‌سازی ماده خشک نهایی در ۱۲ تیمار بررسی شده، به ترتیب ۱۰۲۱، ۴۲۰۷ کیلوگرم بر هکتار و ۱۲۷۱ و ۵۹۷۸ کیلوگرم بر هکتار بود. در کل به دلیل عملکرد موفق مدل توسعه یافته در شبیه‌سازی پارامتر هدف (ماده خشک)، می‌توان نتیجه گرفت که اتصال دو مدل با موفقیت صورت گرفته و مدل ترکیبی جدید، آماده استفاده در پژوهش‌های مرتبط با رشد ذرت است.

کلیدواژه‌ها: آب خاک، تبخیر - تعرق، CERES-Maize-hbased، DSSAT، SWAP.

مقدمه

امروزه به سبب عدم تطابق فرضیه‌های اولیه در تهیه مدل‌های گیاهی در سرتاسر جهان با شرایط خشک و نیمه‌خشک، به‌کارگیری این مدل‌ها با هدف شبیه‌سازی شرایط واقعی رشد گیاه، با دشواری‌های فراوانی روبه‌روست (۱۰). به سبب کمبود منابع آب باکیفیت برای آبیاری در این مناطق، تنش‌های خشکی و شوری، همواره جزئی اجتناب‌ناپذیر از رشد واقعی گیاه بوده است.

مدل CSM-CERES-Maize به‌عنوان پرکاربردترین مدل گیاهی شبیه‌سازی رشد روزانه ذرت و جزئی از بسته DSSAT، یکی از این مدل‌های گیاهی است که در سراسر جهان، بیش از ۳۰ سال در زمینه آن بررسی و تحقیق شده است. مدل CERES-Maize می‌تواند تأثیرات گونه گیاهی، تراکم کشت، آب‌وهوا، آب خاک و نیتروژن را بر رشد، توسعه و عملکرد غلات شبیه‌سازی کند (۱۳). این مدل در پژوهش‌های فراوانی از جمله ارزیابی عملکرد در شرایط اقلیمی نیمه‌خشک مدیترانه‌ای (۱۸)، شبیه‌سازی آبشویی نترات (۵) و راهکارهای بهینه آبی (۱۵) استفاده شده و کارایی و توانمندی آن به اثبات رسیده است (۲۰)، اما با توجه به ساده‌سازی‌های صورت‌گرفته در بخش شبیه‌سازی آب و خاک و تبخیر-تعرق بسته DSSAT، برای شبیه‌سازی مناسب رشد ذرت در شرایط خاص مناطق خشک و نیمه‌خشک، دچار مشکلاتی است (۹، ۱۵). تحقیقات فراوان در زمینه عملکرد این مدل نشان می‌دهد که در صورت تغییر ساختار و الگوریتم به‌کاررفته در بخش آب و خاک و تبخیر-تعرق این مدل و ایجاد تغییراتی در آن با هدف نزدیک کردن دیدگاه مدل به شرایط مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌توان کارایی آن را در شبیه‌سازی محصول نهایی گیاه ذرت تا حد زیادی افزایش داد (۱۰). همان‌طور که اشاره شد، نتایج تحقیقات متفاوت در زمینه آب و خاک و تبخیر-تعرق این مدل نشان می‌دهد که در صورت استفاده از روش‌های جایگزین بر پایه فیزیکی

خاکی در شبیه‌سازی این مقادیر در فرایند رشد گیاه و تأثیر شدت شوری بر مقدار جذب آب ریشه، می‌توان این مدل را برای استفاده در داخل کشور بهینه کرد. این مدل برای شبیه‌سازی مقدار آب خاک از روشی کاملاً مفهومی (بیلان حجمی) بر پایه مقدار رطوبت خاک استفاده می‌کند. این دیدگاه می‌تواند مدل را از در نظر گرفتن صحیح مقادیر جریان آب در خاک و همچنین مقادیر صحیح جذب آب توسط ریشه که همگی بر اساس مقدار مکش آب در خاک تعریف می‌شوند، بازدارد.

از طرفی کارایی مدل SWAP در پیش‌بینی مباحث بیلان آب در خاک و تبخیر-تعرق، به‌عنوان نوعی مدل آگروهیدرولوژیک، به سبب استفاده از روشی کاملاً علمی بر اساس روابط فیزیکی آب و خاک در شبیه‌سازی رطوبت خاک، در تحقیقات فراوانی به اثبات رسیده است (۱۳۸، ۱۳). در این مدل از یک روش ضمنی پسرو اختلاف محدود برای حل عددی معادله ریچاردز با هدف شبیه‌سازی مقدار رطوبت در اعماق؛ از روش پیشنهادی فلدس و همکاران (۱۹۷۸) و ماس و هافمن (۱۹۷۷) به‌عنوان روش‌هایی تأییدشده و معتبر برای در نظر گرفتن اثر تنش شوری و خشکی بر شرایط رشد گیاه؛ و نیز از روش پنمن ماتیس برای محاسبه مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود (۱۲، ۱۴، ۱۶).

با در نظر گرفتن شرایط یادشده، می‌توان انتظار داشت مدل ترکیبی جدید، راهگشای بسیاری از مشکلات در زمینه تصمیم‌سازی در حوزه مدیریت زراعی و نشان‌دهنده مسیرهای تحقیقاتی جدید و فراوانی درباره مدل‌سازی گیاهی در کشور باشد. براین اساس، هدف تحقیق حاضر، طراحی و توسعه مدل گیاهی ترکیبی بر پایه مدل CSM-CERES-Maize با توانایی استفاده از قابلیت‌های مدل SWAP و همچنین ارزیابی عملکرد مدل توسعه‌یافته در وضعیت‌های مختلف آب و کود است.

مدیریت آب و آبیاری

مواد و روش‌ها

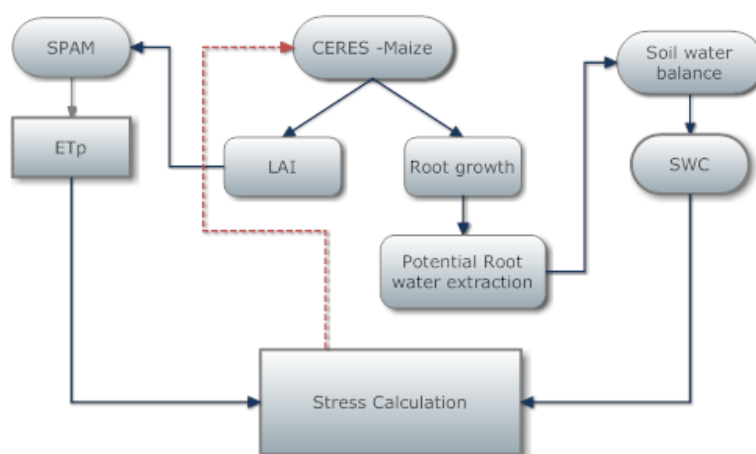
معرفی مدل پایه

این مدل برای شبیه‌سازی رشد گیاه ذرت در قالب محیط DSSAT (سامانه پشتیبانی مدیریت انتقال علم کشاورزی) طراحی شده است. مدل CERES-Maize می‌تواند تأثیرات گونه گیاهی، تراکم کشت، آب‌وهوا، آب خاک و نیتروژن را بر رشد، توسعه و عملکرد غلات شبیه‌سازی کند. این مدل برای شرایط محیطی متنوع طراحی شده است و به ورودی‌های محدودی از داده‌های در دسترس مزرعه‌ای نیاز دارد (۱۳).

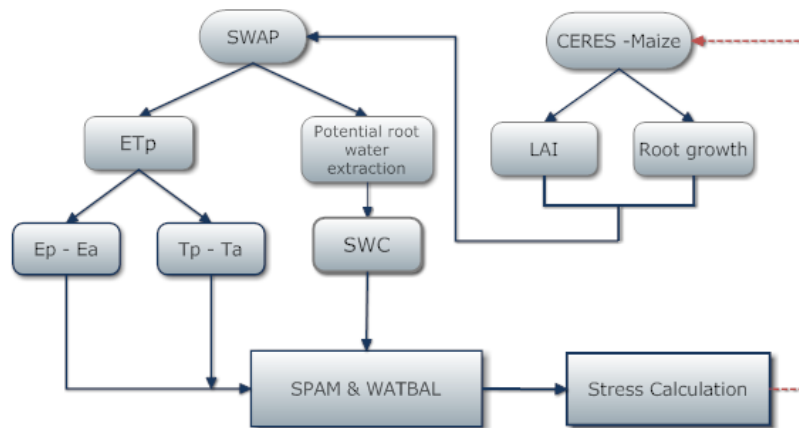
ترکیب دو مدل

اتصال دو مدل بر اساس قرار گرفتن مدل CSM-CERES-Maize به‌عنوان مدل پایه و انتقال روزانه مقادیر پارامترها بین دو مدل انجام گرفت. با در نظر گرفتن الگوریتم ساده‌شده شکل ۱ به‌عنوان بخشی از الگوریتم به‌کاررفته در بسته DSSAT، می‌توان گفت دیدگاه در نظر گرفته‌شده برای ایجاد تغییر در مدل پایه، جابه‌جایی ماژول شبیه‌سازی رطوبت و ماژول SPAM (ماژول محاسبه‌کننده مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل و واقعی و مقدار جذب آب ریشه) با

مقادیر حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل SWAP است. در شکل ۱، ETp، LAI و SWC به‌ترتیب معرف مقادیر تبخیر - تعرق پتانسیل، شاخص سطح برگ و مقدار رطوبت آب خاک است. این شکل نشان می‌دهد که ماژول SPAM وظیفه محاسبه مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل و مقدار پتانسیل جذب آب توسط ریشه را بر عهده دارد. پس از محاسبه مقدار رطوبت توسط ماژول مربوط و همچنین پارامترهای عنوان‌شده توسط ماژول SPAM از نسبت‌های مقادیر محاسبه‌شده، دو پارامتر تنشی SWFAC و TURFAC محاسبه می‌شود (۱۵). این دو پارامتر تنشی در نهایت در حلقه روزانه به مدل گیاهی ارسال شده و برای محاسبات روز بعد استفاده می‌شوند و فرایند شبیه‌سازی مقدار کل ماده خشک و رشد برگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در تحقیق یادشده، با پیشنهاد الگوریتم نشان‌داده‌شده در شکل ۲، زیربرنامه‌های مرتبط با فرایندهای شبیه‌سازی رطوبت آب در خاک، مقدار تبخیر - تعرق پتانسیل و مقدار جذب آب از خاک اصلاح شده و نسخه‌ای از مدل CSM-CERES-Maize معرفی شد که قابلیت استفاده از مزایای مدل SWAP را فراهم می‌آورد.



شکل ۱. بخشی از الگوریتم استفاده‌شده در بسته DSSAT



شکل ۲. بخشی از الگوریتم پیشنهادی و استفاده شده در بسته اصلاحی DSSAT

مقدار رطوبت خاک و تبخیر - تعرق واقعی و پتانسیل را که شامل مقدار شاخص سطح برگ و رشد ریشه است، به مدل ارسال می‌کند و در مقابل، مقدار رطوبت محاسبه شده به روش حل عددی از رابطه ریچاردز، تبخیر - تعرق محاسبه شده به روش پنمن ماتنیس و مقدار جذب آب گیاه محاسبه شده بر پایه مقدار مکش خاک برای محاسبه ضرایب تنشی، به مدل پایه بازگردانده می‌شود. به این ترتیب، مدل CERES-Maize-based از الگوریتم قدرتمند مدل گیاهی CERES-Maize بهره می‌برد و البته ضعف آن، یعنی زیرمآزول‌های محاسبه‌کننده تبخیر - تعرق و مقدار رطوبت خاک با بهره‌گیری از توانایی‌های مدل SWAP پوشانده می‌شود. مدل SWAP می‌تواند تأثیر شدت شوری بر مقدار جذب آب توسط گیاه را به کمک روش ماس و هافمن (۱۹۷۷) و نیز تأثیر شرایط وجود زهکش بر رشد گیاه را محاسبه کند. ورودی‌های مدل توسعه داده شده ترکیبی از ورودی‌های هر دو مدل است که از جمله آنها می‌توان به پارامترهای هواشناسی مورد نیاز رابطه پنمن ماتنیس، ضرایب ونگنوختن لایه‌های خاک تعریف شده، شرایط کشت مزرعه‌ای از جمله مقدار آب و کود و در نهایت ضرایب ژنتیکی رقم مورد نظر و ضریب گیاهی در طول

برای ایجاد این اتصال، ابتدا بخش‌هایی از مدل SWAP به منظور آمادگی قرارگیری در بسته نرم‌افزاری DSSAT تصحیح یا اصلاح شدند که از آن جمله می‌توان به حذف بخش‌های حرکت گرما و مواد حل‌شدنی، حذف بخش خلل و فرج بزرگ و تغییر تعداد زیادی از ورودی‌های مدل از جمله تغییر نحوه معرفی واحد ورودی خاک به واحد مورد انتظار در بسته DSSAT اشاره کرد. پس از فراهم کردن شرایط اتصال مدل، با کدنویسی در زیر مآزول‌های لازم، قابلیت اجرای مدل SWAP در دل مدل پایه فراهم شد. در نهایت، زیربرنامه مرتبط با انتقال مقادیر توسعه یافت و عملیات همگام‌سازی زمانی و مکانی متغیرها در مدل‌ها با دقت فراوان اجرا شد.

معرفی مدل ترکیبی

مدل مرکب، حاصل قرار گرفتن مدل CSM-CERES-Maize از بسته نرم‌افزاری DSSAT نسخه ۴ به عنوان مدل پایه و استفاده از قابلیت‌های مدل SWAP توسعه یافته است. مدل ترکیبی در محیط کاربری بسته DSSAT اجرا می‌شود و همزمان و به صورت روزانه از نتایج اجرای هر دو مدل استفاده می‌کند. در هر روز مدل CERES-Maize پارامترهای گیاهی لازم و دخیل در محاسبات مربوط به

دوره رشد اشاره کرد. خروجی‌های مدل نیز بی‌گمان، مجموع پارامترهای خروجی هر دو مدل از جمله پارامترهای رشد گیاه از مدل CERES-Maize و پارامترهای مرتبط با رطوبت خاک و تبخیر - تعرق از مدل SWAP است. در این تحقیق، به منظور ارزیابی عملکرد مدل از ضرایب ژنتیکی رقم سینگل کراس ۷۰۴ که در تحقیقات پیشین برای منطقه ورامین تعیین شده بود استفاده شد. همچنین ضرایب گیاهی برای تیمار ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار برای هر تیمار آبیاری تعیین و در بقیه تیمارها به کار گرفته شد (۴).

فرایند واسنجی مدل توسعه یافته

فرایند واسنجی مدل توسعه یافته، مشتمل بر تعیین ضرایب ژنتیکی مدل CSM-CERES-Maize و ضرایب گیاهی مورد نیاز مدل SWAP برای تبدیل تبخیر - تعرق مرجع به تبخیر - تعرق گیاه ذرت خواهد بود. در این تحقیق از ضرایب ژنتیکی استخراج شده در تحقیقات پیشین برای منطقه تحت مطالعه برای مدل CERES-Maize استفاده شد (۴) و ضرایب گیاهی نیز طی دوره رشد برای تیمارهای مختلف آبیاری در اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای ثبت شده بودند که با اندکی تغییر در مدل استفاده شدند (۵).

منطقه تحقیق

طرح آزمایشی در قطعه زمینی با ابعاد 205×85 متر واقع در ایستگاه تحقیقاتی سازمان تحقیقات کشاورزی ورامین و در سال ۱۳۸۳ انجام گرفت (۵). ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۹۷۳ متر و طول و عرض جغرافیایی آن به ترتیب $38^{\circ} 2' 51''$ شرقی و $38^{\circ} 20' 35''$ شمالی است. طرح آزمایشی در چهار سطح آبیاری شامل یک سطح تنش آبی شدید (W_1) تأمین ۷۰ درصد کمبود رطوبت خاک (SMD 0.7)، سطح تنش آبی ملایم (W_2) (SMD 0.85)، یک سطح

آبیاری کامل (W_3) (SMD 1.0)، و یک سطح بیش آبیاری (W_4) (SMD 1.13)، در سه تکرار در قالب بلوک‌های نواری اجرا شد. همچنین طرح آزمایش، دارای سه سطح صفر (N_0)، ۱۵۰ (N_{150}) و ۲۰۰ (N_{200}) کیلوگرم کود نیتروژن در هکتار بود و در کل با توجه به سطوح آبیاری، ۱۲ تیمار متفاوت داشت. تا زمان استقرار کامل گیاه، تمام تیمارها یکسان آبیاری شدند (۱۲). پس از آن، تیمارهای آبیاری تا پایان فصل رشد ذرت اعمال شدند. زمان آبیاری تیمار شاهد و سایر تیمارهای آبیاری یکسان بود. زمانی که ۵۰ درصد آب قابل استفاده از عمق توسعه ریشه ذرت در تیمار شاهد تخلیه شد، تمام تیمارها آبیاری شدند. عمق آب آبیاری در تیمار شاهد برای رفع کمبود آب خاک در عمق توسعه ریشه تا حد رطوبت ظرفیت زراعی محاسبه شد. سایر تیمارهای آبیاری، درصدی از عمق آب تیمار شاهد را دریافت می‌کردند. از یک سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت - آبپاش متحرک برای آبیاری استفاده شد. برای مدیریت آبیاری، با استفاده از نوترون‌متر رطوبت در نیم‌رخ خاک تا عمق ۱۸۰ سانتی‌متری به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. منبع نیتروژن، کود اوره بود که از طریق سیستم آبیاری با مدیریت کود آبیاری طی دوره رشد در اختیار گیاه قرار داده شد. شاخص سطح برگ و وزن ماده خشک طی دوره رشد و همچنین حداکثر شاخص سطح برگ و وزن ماده خشک نهایی در زمان برداشت اندازه‌گیری شد (۵). قطر ساقه و ارتفاع بوته در زمان برداشت اندازه‌گیری شد. تمام مراحل رویشی و زایشی ذرت طی دوره رشد ثبت شد و همچنین، مقدار ضریب گیاهی ذرت در طول دوره رشد در سال ۱۳۸۳ محاسبه شد (۶).

چگونگی ارزیابی مدل

نتایج میدانی و شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های نسخه اصلی و نسخه ترکیبی با استفاده از شاخص‌های آماری مقایسه

شاخص سطح برگ

در جدول ۱ نتایج شبیه‌سازی شاخص سطح برگ به همراه شاخص‌های آماری آن ارائه شده است. همان‌طور که مقادیر تحلیل آماری نشان می‌دهند، اگرچه عملکرد هر دو مدل در محدوده غیرقابل قبول قرار دارد، در این سال نسخه توسعه یافته در پنج تیمار عملکرد بهتری داشت، در حالی که در چهار تیمار، نتایج ضعیف‌تری را عرضه کرده بود. در بین تیمارهای دوازده‌گانه، نتایج هر دو مدل در سه تیمار تا دو رقم اعشار یکسان بود که نشان‌دهنده عملکرد بسیار نزدیک مدل در این سال است. همچنان آزمون‌های آماری اختلاف بین مقادیر خطا دو مدل را معنادار ندانستند که این مطلب نیز مؤید عملکرد بسیار نزدیک این دو مدل در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ در سال ۱۳۸۳ بود. در نهایت، مناسب بودن شاخص تطابق ویلموت در شبیه‌سازی توسط هر دو مدل برای تمام تیمارها ممکن است حاکی از این باشد که هر دو مدل، روند تغییرات شاخص سطح برگ را در دوره رشد درمی‌یابند و به خوبی شبیه‌سازی می‌کنند، اما شاید مقدار پیش‌بینی شده آنها با مقدار مزرعه‌ای در یک روز خاص اختلاف داشته باشد. در تحقیقی که به منظور ارزیابی مدل جدید توسعه داده شده با نام پیشنهادی RZWQM-CERES انجام گرفت، خطای RMSE مدل توسعه یافته در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ بین ۱/۳۷ تا ۱/۸۱ عنوان شد، در حالی که RMSE تولید شده توسط مدل CERES-Maize-hbased در بین تمام تیمارها و طول سال در دامنه ۱/۰۴ تا ۱/۵۸ قرار گرفت (۱۷). در پژوهش آن محققان، عملکرد نسخه اصلی مدل CERES-Maize در برآورد همین شاخص در دامنه ۱ تا ۱/۹۲ قرار داشت، در صورتی که مقدار RMSE تولید شده توسط نسخه اصلی در این تحقیق، بین ۰/۹۸ تا ۱/۶۲ قرار گرفته بود.

شد. به این منظور از شاخص همبستگی حاصل از رگرسیون ساده خطی و شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE و d برای بررسی بیشتر دقت شبیه‌سازی استفاده شد. شاخص‌های آماری RMSE و NRMSE بیانگر میانگین تفاوت بین داده شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای است که از رابطه زیر محاسبه می‌شوند (۱۹):

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

$$NRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{O}} \quad (2)$$

در رابطه‌های بالا، P_i مقادیر شبیه‌سازی، O_i مقادیر مشاهده شده، N تعداد مشاهده‌ها و \bar{O} مقدار میانگین مشاهده‌هاست. شاخص آماری توافق ویلموت (d) دارای مقداری بین صفر تا یک است که مقدار یک، بیانگر بهترین برازش است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۱۹):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (3)$$

بحث و نتایج

تاریخ‌های فنولوژیک

دو مدل نسخه اصلی و نسخه توسعه یافته در برآورد تاریخ‌های گلدهی^۱ و رسیدگی کامل^۲، نتایج رضایت‌بخش و یکسانی داشتند. در سال ۱۳۸۳ ذرت کشت شده در پنجاه و هفتمین روز کشت به مرحله گلدهی رفت که هر دو مدل، روز پنجاه و چهارم را برای رسیدن به این مرحله در تمام تیمارها پیش‌بینی کردند. همچنین در همین سال، رسیدگی کامل، ۱۰۳ روز پس از کشت در مزرعه رخ داده بود که هر دو مدل روز نود و هشتم را به عنوان زمان رسیدگی فیزیولوژیک در تمام تیمارها پیش‌بینی کردند.

1 - Anthesis date
2 - Maturity date

توسعه مدل گیاهی ترکیبی بر پایه مدل CSM-CERES-Maize برای مدیریت آبیاری و ارزیابی شبیه‌سازی شاخص‌های رشد ذرت

جدول ۱. نتایج شبیه‌سازی متوسط شاخص سطح برگ در طول دوره رشد به وسیله مدل CSM-CERES-Maize و مدل مرکب توسعه یافته در سال ۱۳۸۳

نسخه اصلی مدل			نسخه مرکب توسعه یافته			تیمار
NRMSE (%)	d-index	RMSE	NRMSE (%)	d-index	RMSE	
۰/۶۲	۰/۴۷	۱/۲۹	۰/۶۱	۰/۵۲	۱/۲۷	N0W1
۰/۵۹	۰/۵۳	۱/۲۸	۰/۵۸	۰/۵۶	۱/۲۶	N0W2
۰/۵۶	۰/۵۷	۱/۴۲	۰/۵۵	۰/۵۹	۱/۳۹	N0W3
۰/۵۷	۰/۵۸	۱/۶۲	۰/۵۶	۰/۵۹	۱/۵۸	N0W4
۰/۵۷	۰/۶۹	۱/۲۴	۰/۶	۰/۶۹	۱/۳	N150W1
۰/۵۳	۰/۷۸	۱/۲۳	۰/۵۸	۰/۷۷	۱/۳۴	150W2
۰/۴۷	۰/۸۱	۱/۳	۰/۴۷	۰/۸۱	۱/۳	N150W3
۰/۳۶	۰/۸۷	۱/۰۴	۰/۳۶	۰/۸۷	۱/۰۴	N150W4
۰/۴۴	۰/۷۴	۱/۰۰	۰/۴۷	۰/۷۶	۱/۰۷	N200W1
۰/۴۱	۰/۸۴	۰/۹۸	۰/۴۸	۰/۸۲	۱/۱۵	N200W2
۰/۳۸	۰/۸۵	۱/۰۹	۰/۳۸	۰/۸۶	۱/۰۷	N200W3
۰/۳۵	۰/۸۷	۱/۰۵	۰/۳۵	۰/۸۷	۱/۰۵	N200W4

RMSE: شاخص متوسط مربعات خطا
d-index: شاخص تطابق ویلموت

NRMSE: شاخص نرمال شده متوسط مربعات خطا

شبیه‌سازی وزن ماده خشک

مبحث ارزیابی عملکرد، دو مدل CERES-Maize و CERES-Maize-hbased به دو بخش اصلی بررسی توانایی هر دو نسخه توسعه یافته و اصلی مدل در تخمین مقدار متوسط وزن ماده خشک اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد و پیش‌بینی مقدار وزن ماده خشک در زمان برداشت علوفه‌ای محصول تقسیم شده است. از آنجا که این پارامتر به عنوان پارامتر هدف، از ابتدا انگیزه ایجاد تغییر در مدل بود، به تفصیل در مورد نحوه شبیه‌سازی آن توسط هر دو مدل صحبت خواهد شد.

در جدول ۲ عملکرد مدل مرکب توسعه یافته و مدل اصلی CERES-Maize در شبیه‌سازی متوسط وزن ماده

خشک طی دوره رشد در قالب پارامترهای آماری برای سال ۱۳۸۳ در تمام تیمارهای دوازده‌گانه ارائه شده است. در سال ۱۳۸۳ حداکثر خطا در مدل نسخه اصلی CERES-Maize در تیمار آبیاری کامل بدون کود با مقدار ۲۲ درصد خطای NRMSE صورت پذیرفت و بیشترین خطا در نسخه مرکب توسعه یافته نیز در همین تیمار با ۲۰ درصد خطا در شبیه‌سازی اتفاق افتاده است. البته متوسط مقادیر خطای RMSE تولید شده توسط نسخه مرکب در این تحقیق بین همه تیمارها در سال ۱۳۸۳، ۸۴۵ کیلوگرم بر هکتار بود. مقدار متناظر این خطا در نسخه اصلی مدل CERES-Maize، ۱۰۱۶ کیلوگرم بود.

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

جدول ۲. نتایج شبیه‌سازی متوسط ماده خشک در طول دوره رشد به وسیله مدل CSM-CERES-Maize و مدل مرکب توسعه یافته در سال ۱۳۸۳

نسخه اصلی مدل			نسخه مرکب توسعه یافته مدل			تیمار
NRMSE (%)	d-index	RMSE (kg/ha)	NRMSE (%)	d-index	RMSE (kg/ha)	
۰/۱۳	۰/۹۹	۹۲۳/۶	۰/۰۹	۰/۹۹	۵۹۶/۱۹	N0W1
۰/۱۶	۰/۹۸	۱۳۶۰/۵	۰/۱۱	۰/۹۹	۹۲۲/۷	N0W2
۰/۲۲	۰/۹۷	۲۰۰۵/۵	۰/۲	۰/۹۸	۱۷۶۸/۲	N0W3
۰/۲	۰/۹۷	۱۸۴۸/۶	۰/۱۷	۰/۹۸	۱۵۹۹/۳	N0W4
۰/۱	۰/۹۹	۷۲۶/۳	۰/۰۹	۰/۹۹	۶۹۸/۲	N150W1
۰/۱	۰/۹۹	۹۳۰/۳	۰/۱	۰/۹۹	۹۱۳/۱	N150W2
۰/۰۶	۰/۹۹	۵۹۸/۲	۰/۰۶	۰/۹۹	۵۹۷/۸	N150W3
۰/۰۹	۰/۹۹	۹۴۴/۷	۰/۰۹	۰/۹۹	۹۴۳/۵	N150W4
۰/۰۸	۰/۹۹	۶۷۴/۹	۰/۰۷	۰/۹۹	۵۶۲/۷	N200W1
۰/۰۹	۰/۹۹	۸۵۸	۰/۰۷	۰/۹۹	۶۹۴/۵	N200W2
۰/۰۴	۰/۹۹	۴۳۰/۲	۰/۰۲	۰/۹۹	۲۴۳/۶	N200W3
۰/۰۸	۰/۹۹	۹۰۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۹۹	۹۰۰/۱	N200W4

RMSE: شاخص متوسط مربعات خطا

NRMSE: شاخص نرمال شده متوسط مربعات خطا

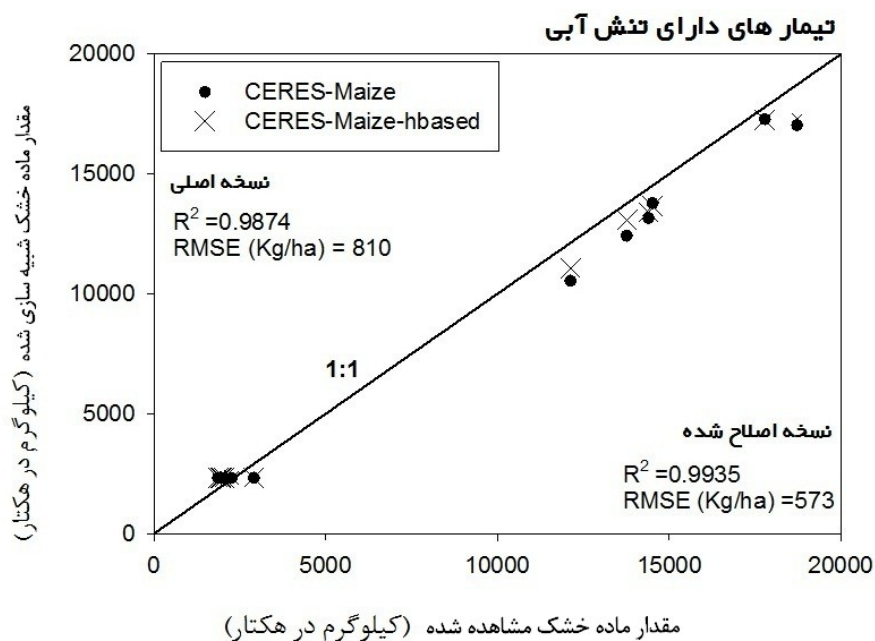
d-index: شاخص تطابق ویلموت

توسعه یافته از شرایط تیمارهای آبیاری است. مجموع و متوسط خطای مدل CERES-Maize-hbased در بین شش تیمار کم آبیاری (W_1 و W_2 در سه سطح کودی) به ترتیب ۴۰۹۹ و ۵۷۳ کیلوگرم در هر هکتار، و برای نسخه اصلی مدل به ترتیب ۵۴۷۰ و ۸۱۰ کیلوگرم در هر هکتار بود (شکل ۳). در کل معنادار شدن اختلاف خطاهای بین دو مدل در سطح اطمینان یک درصد، نشان دهنده عملکرد بهتر مدل مرکب توسعه یافته در سال ۱۳۸۳ است.

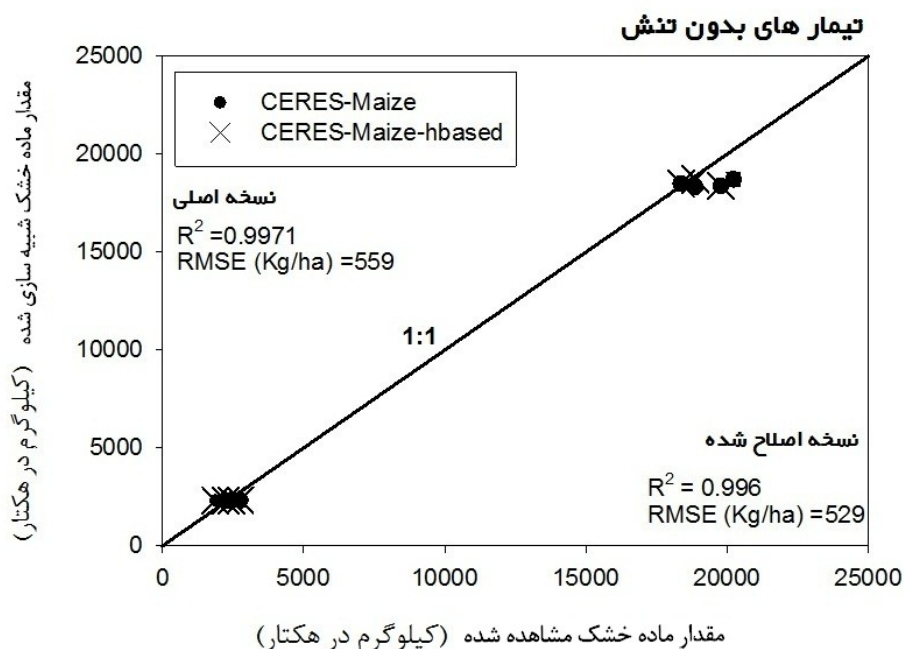
شکل های ۳ و ۴ نشان دهنده عملکرد بهتر مدل مرکب توسعه یافته در تیمارهای کم آبیاری و همچنین بدون تنش در مقایسه با نسخه اصلی است.

در سال ۱۳۸۳، عملکرد هر دو مدل در شبیه سازی متوسط ماده خشک بسیار نزدیک به هم بود، به نحوی که مجموع خطا در تیمارهای دوازده گانه برای مدل اصلی و مرکب توسعه یافته به ترتیب ۱۲۲۰۰ و ۱۰۴۳۹ کیلوگرم بر هکتار بود. در این سال، مدل مرکب توسعه یافته در هفت تیمار از دوازده تیمار، عملکردی بهتر؛ در سه تیمار، عملکردی ضعیف تر؛ و البته در دو تیمار، عملکردی بسیار نزدیک نسبت به مدل اصلی داشت. البته روند مشخصی بین تیمارهای برتر یا ضعیف تر از نظر عملکرد بین دو مدل شناسایی نشد. مقایسه عملکرد هر دو مدل در تیمارهای کم آبیاری نیز در این سال نشان دهنده درک بهتر مدل مرکب

توسعه مدل گیاهی ترکیبی بر پایه مدل CSM-CERES-Maize برای مدیریت آبیاری و ارزیابی شبیه‌سازی شاخص‌های رشد ذرت



شکل ۳. مقادیر متوسط وزن ماده خشک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده طی دوره رشد برای تیمارهای تنش آبی به وسیله دو مدل اصلی و مرکب توسعه یافته

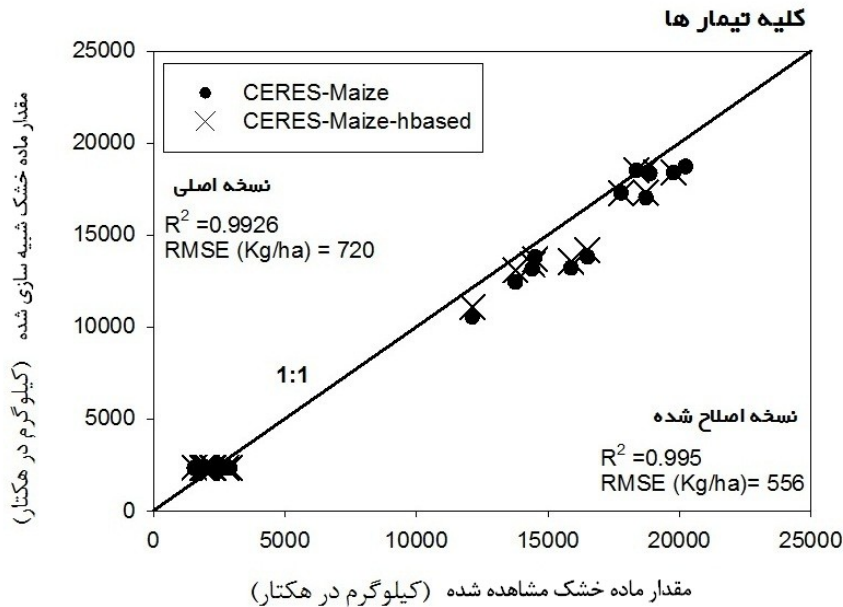


شکل ۴. مقادیر متوسط وزن ماده خشک مشاهده شده و شبیه‌سازی شده طی دوره رشد برای تیمارهای بدون تنش به وسیله دو مدل اصلی و مرکب توسعه یافته

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

حمزه دوکوهکی، مهدی قیصری، سیدفرهاد موسوی، شاهرخ زند پارسا، گریت هوگنبوم



شکل ۵. مقادیر متوسط وزن ماده خشک مشاهده شده و شبیه سازی شده طی دوره رشد برای همه تیمارها به وسیله دو مدل اصلی و مرکب توسعه یافته

شبیه سازی، در ۱۰ تیمار عملکرد بهتری دارد. این مدل در سال ۱۳۸۳ در تیمارهای کم آبیاری شدید و کم آبیاری ملایم در سطح کودی ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار عملکرد ضعیف تری داشت. متوسط خطای تولید شده توسط مدل مرکب توسعه یافته و نسخه اصلی مدل CERES-Maize در شبیه سازی محصول نهایی در سال ۱۳۸۳ به ترتیب ۱۰۲۱ و ۱۲۷۱ کیلوگرم بر هکتار بوده است، اما در نهایت معنادار شدن اختلاف مقادیر خطای دو مدل در شبیه سازی این شاخص در سطح یک درصد در سال ۱۳۸۳ نشان دهنده عملکرد بهتر مدل مرکب توسعه یافته و دستیابی به هدف اولیه این پژوهش بوده است. عملکرد بهتر مدل مرکب توسعه یافته CERES-Maize در شبیه سازی محصول نهایی در تیمارهای تنش آبی نسبت به نسخه اصلی، نشان از درک بهتر مدل از وضعیت کم آبیاری دارد، به طوری که مجموع خطای مطلق مدل مرکب توسعه یافته و نسخه اصلی در شبیه سازی محصول نهایی در این تیمارها در سال ۱۳۸۳ به ترتیب ۴۲۰۷ و ۵۹۷۸ کیلوگرم بر هکتار بوده است.

برای رسم شکل های ۳، ۴ و ۵، تیمارهای W_1 و W_2 از هر سه سطح کودی به عنوان تیمارهای با تنش خشکی، و تیمارهای W_3 و W_4 از سطح کودی ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار به عنوان تیمارهای بدون تنش در نظر گرفته شدند. البته عملکرد هر دو مدل در شبیه سازی شرایط بدون تنش به یکدیگر بسیار نزدیک بود، به طوری که اختلاف خطای RMSE بین دو مدل تمام تیمارها ۳۰ کیلوگرم بر هکتار بود. در کل کم بودن مقدار خطای RMSE و همچنین بیشتر بودن مقدار شاخص همبستگی در بین همه تیمارها یا به عبارت دیگر، نزدیک تر بودن مقادیر ماده خشک شبیه سازی شده توسط نسخه مرکب توسعه یافته به خط یک به یک، نشان از عملکرد دقیق تر مدل در مقایسه با نسخه پیشین دارد. در جدول ۳ نیز مقادیر ماده خشک نهایی شبیه سازی شده توسط هر دو مدل در زمان رسیدگی کامل نشان داده شده است. همان طور که از مقایسه این مقادیر مشخص است، مدل مرکب توسعه یافته از ۱۲ تیمار

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

جدول ۳. مقادیر خطای مطلق و ماده خشک نهایی شبیه‌سازی شده به وسیله مدل

CSM-CERES-Maize و مدل مرکب توسعه یافته در سال ۱۳۸۳

نسخه اصلی		نسخه مرکب توسعه یافته		تیمار
اختلاف مطلق (kg/ha)	محصول نهایی (kg/ha)	اختلاف مطلق (kg/ha)	محصول نهایی (kg/ha)	
۱۱۱۵	۱۱۱۷۸	۷۱۸	۱۱۵۷۵	N0W1
۱۹۹۳	۱۳۱۴۹	۱۲۷۱	۱۳۸۷۱	N0W2
۲۹۲۹	۱۴۰۴۹	۲۵۶۲	۱۴۴۱۶	N0W3
۲۵۰۵	۱۴۷۵۸	۲۱۰۶	۱۵۱۵۷	N0W4
۶۳۸	۱۴۹۹۰	۲۱۰	۱۴۵۶۲	N150W1
۵۲۸	۱۸۹۷۵	۵۳	۱۸۵۰۰	N150W2
۱۳۰	۲۰۴۹۶	۶۶	۲۰۳۰۰	N150W3
۱۰۵۹	۲۰۳۶۶	۱۰۵۴	۲۰۳۷۱	N150W4
۴۸۲	۱۴۳۲۰	۵۳۵	۱۴۲۶۷	N200W1
۱۲۲۲	۱۸۷۸۹	۱۴۲۰	۱۸۵۹۱	N200W2
۸۷۲	۲۰۳۶۲	۷۰۸	۲۰۵۲۶	N200W3
۱۷۷۵	۲۰۵۱۷	۱۵۵۲	۲۰۷۴۰	N200W4

قابلیت‌های مدل SWAP در شبیه‌سازی رطوبت آب در خاک، به کاربران امکان می‌دهد که از توانمندی‌های هر دو مدل استفاده کنند. این مدل در قالب محیط بسته نرم‌افزاری DSSAT اجرا می‌شود و علاوه بر داده‌های ورودی متداول مدل CERES-Maize، به داده‌های ورودی مدل SWAP نیز نیازمند است. این مهم، امکان می‌دهد که کاربران از مازول‌های مشترک موجود در بسته DSSAT همچون در نظر گرفتن اثر فعالیت‌های زراعی در مزرعه، برهمکنش نیتروژن و کربن آلی در خاک استفاده کنند. بر اساس ارزیابی اولیه، مدل توسعه داده شده در شبیه‌سازی مقدار وزن ماده خشک، چه در طول دوره رشد و چه در پایان دوره رشد بهبود شایان توجهی داشته است. معنادار شدن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط نسخه مرکب

مقایسه نتایج این تحقیق با دیگر پژوهش‌ها، بیان‌کننده عملکرد قوی‌تر مدل مرکب توسعه یافته در این تحقیق است (۱۷). متوسط خطای مطلق در شبیه‌سازی ماده خشک نهایی توسط RZWQM-CERES در بین همه تیمارها برای مناطق فلوریدا و هاوایی به ترتیب ۲۶۸۱ و ۵۱۸۶ کیلوگرم بر هکتار بود، در حالی که متوسط شاخص خطای مطلق مدل مرکب توسعه یافته در این تحقیق در سال ۱۳۸۲، ۹۷۵ کیلوگرم در هکتار و در سال ۱۳۸۳، ۱۰۲۱ کیلوگرم در هکتار بود.

نتیجه‌گیری

اولین نتیجه تحقیق حاضر، توسعه مدل ترکیبی گیاهی بر پایه مدل CERES-Maize است که با استفاده از

مختلف کود و آب کاربردی. رساله دکتری علوم و مهندسی آبیاری. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۶. قیصری م.، میرلطیفی س. م.، همایی م. و اسدی م. ا (۱۳۸۵) تعیین نیاز آبی ذرت علوفه‌ای و ضریب گیاهی آن در مراحل مختلف رشد. تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۷(۲۶): ۱۲۵-۱۴۲.

۷. نوری ح.، لیاقت ع.، پارسی نژاد م. و وظیفه دوست م (۱۳۸۹) ارزیابی مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP در برآورد نوسانات سطح ایستابی و شدت جریان زهکشی زیرزمینی. دانش آب و خاک. ۱/۲۰(۲): ۱۵۷-۱۷۱.

8. Asadi ME and Clemente RS (2003) Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield and soil moisture content under tropical conditions. Food Agriculture and Environment. 1: 270-276.

9. DeJonge K (2011) Evaluation and improvement of CERES-Maize Evapotranspiration simulations under full and limited irrigation treatments in northern Colorado. Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University.

10. Faria RTD and Bowen WT (2003) Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions. Brazilian Archives of Biology and Technology. 46: 489-498.

11. Feddes RA, Kowalik PJ and Zaradny H (1978) Simulation of field water use and crop yield. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. 189p.

توسعه یافته با نسخه اصلی نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در این زمینه و در نتیجه موفقیت آمیز بودن این اتصال است.

تشکر و قدردانی

از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (طرح شماره ۸۸۰۰۰۸۴۱) و دانشگاه صنعتی اصفهان و جناب آقای دکتر عبدالمجید لیاقت، استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

منابع

۱. اکبری م (۱۳۸۳) بهبود مدیریت آبیاری مزارع با استفاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی SWAP. رساله دکتری آبیاری زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲. دوکوهکی ح.، قیصری م.، موسوی س. ف. و میرلطیفی س. م. (۱۳۹۱) شبیه‌سازی رطوبت خاک در شرایط کم‌آبیاری با استفاده از مدل DSSAT. مدیریت آب و آبیاری. ۲(۱): ۱-۱۴.

۳. دهقان ه.، عزیزاده ا. و حقایقی مقدم ا (۱۳۸۹) تخمین اجزای بیلان آب در مقیاس مزرعه با استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAP (مطالعه موردی: منطقه نیشابور). آب و خاک. ۲۴(۲۶): ۱۲۶۵-۱۲۷۵.

۴. ربیع م. میرلطیفی س. م. و قیصری م (۱۳۹۱) واسنجی و ارزیابی مدل CSM-CERES-Maize برای ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ در ورامین. آب و خاک. ۲۶(۲): ۲۹۰-۲۹۹.

۵. قیصری م (۱۳۸۵) تأثیر کود - آبیاری ذرت با روش آبیاری بارانی بر روی آبشویی نترات، تحت سطوح

مدیریت آب و آبیاری

12. Gheysari M, Mirlatifi SM, Bannayan M, Homae M and Hoogenboom G (2009) Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. *Agricultural Water Management*. 96: 809-821.
13. Hoogenboom G, Wilkens PW, Thornton PK, Jones JW, Hunt L A and Imamura DT (1999) Decision support system for agrotechnology transfer v3.5, DSSAT version 3, Vol. 4. University of Hawaii. Honolulu, HI.
14. Kroes JG and Van Dam JC (2003) Reference Manual SWAP version 3.03. Alterra-report 773. Alterra, Green World Research, Wageningen. ISSN 1566-7197.
15. Lopez-Cedron FX, Boote KJ, Piñeiro J and Sau F (2008) Improving the CERES-Maize model ability to simulate water deficit impact on maize production and yield components. *Agronomy*. 100: 296-307.
16. Maas EV and Hoffman GJ (1977) Crop salt tolerance current assessment. *Irrigation and Drainage Division, ASCE*. 103: 115-134.
17. Ma L, Hoogenboom G, Ahuja LR, Ascough JC and Sanseendran SA (2006) Evaluation of the RZWQM-CERES-maize hybrid model for maize production. *Agricultural Systems*. 87: 274-295.
18. Nouna BB, Katerji N and Mastrorilli M (2003) Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment: New modeling of leaf area and water stress functions. *European Journal of Agronomy*. 19: 115-123.
19. Wilmot CJ (1982) some comments on the evaluation of model performance. *Meteorological Society*. 64: 1309-1313.
20. Yihua W, Sakamoto CM and Botner DM (1989) On application of the CERES - Maize model to the north china plain. *Agriculture and Forest Meteorology*. 49: 9-22.