نشریه زراعت

شماره ۱۰۲، بهار ۱۳۹۳

(پژوهش و سازندگی)

ارزیابی کارائی مدل CROPWAT 8.0 در پیش‌بینی و برآورد مصرف آب و میزان عمل‌کرد محصول سویا با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای در منطقه کرج

• **مهدی سرائی تبریزی،** باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
• **مسعود پارسی نژاد،** دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
• **حسین بابازاده،** دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم وتحقیقات تهران، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، تهران، ایران

تاریخ دریافت: بهمن ماه ۱۳۸۹ تاریخ پذیرش: خرداد ماه ۱۳۹۱
تلفن تماس نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۵۹۰۰۷۴۷
Email: m.sarai@srbiau.ac.ir

چکیده

محدودیت‌های فعلی در منابع آبی قابل دسترس به‌ویژه برای استفاده در بخش کشاورزی نشان می‌دهد که توجه بیش‌تر به مدیریت آب آبیاری غیرقابل اجتناب است. کم‌آبیاری به عملیاتی گفته می‌شود که برای بهبود استفاده از واحد حجم آب انجام می‌گیرد. در این تحقیق کارایی مدل CROPWAT 8.0 در مقابل داده‌های مزرعه سویا (که تحت مدیریت کم‌آبیاری قرار گرفته بود) ارزیابی شد. این آزمایش در سال های زراعی ۸۸-۱۳۸۷ و ۸۹-۱۳۸۸ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و چهار تیمار آبیاری سطحی جویچه‌ای آتیمار کم‌آبیاری سنتی درحد ۵۰ و ۷۵ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک، تیمار آبیاری بخشی منطقه ریشه (Partial Root Drying) درحد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک و تیمار آبیاری کامل (شاهد) آ روی سویا رقم ویلیامز در کرج انجام شد. مقادیر واقعی ضرایب گیاهی در مدل جایگزین شدند. مقدار کارایی مصرف آب و عمل‌کرد محصول در تیمار شبیه‌سازی‌شده آبیاری کامل (شاهد) تقریباً مشابه با داده‌های واقعی بود. شاخص‌های ارزیابی مدل (RMSE، CRM و SD) در سال زراعی ۸۷ به‌ترتیب برابر ۳/۴۷، ۰/۱۴- و ۱۵/۲ و در سال زراعی ۸۸ نیز به‌ترتیب معادل ۴/۲۲، ۰/۱۱- و ۱۲/۵۹ بود. هم‌چنین نشان داده شد که مدل قادر است میزان کاهش عمل‌کرد محصول را نزدیک به مقادیر واقعی تخمین بزند. مقادیر مثبت به دست آمده برای شاخص EF (۰/۸۷ و ۰/۹۱) نشان دهندهٔ کارایی بالای مدل در پیش‌بینی عمل‌کرد محصول بود. این تحقیق نشان داد که کاربرد مدل CROPWAT 8.0 با اصلاح ضرایب گیاهی در مراحل مختلف رشد گیاه، و با استفاده از خصوصیات خاک و گیاه توانست در پیش‌بینی، تخمین و تعیین میزان مصرف آب و مقدار عمل‌کرد محصول به طور معنی‌داری مؤثر واقع شود.

واژه‌های کلیدی: سویا، برآورد عمل‌کرد، کارایی مصرف آب، مدل آبیاری، CROPWAT 8.0

Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi) No:102 pp: 161-170

Performance Evaluation of CROPWAT 8.0 Model to Predict and Estimate Water Consumption and Soybean Yield Using Field Data in Karaj

By:M. Sarai Tabrizi, (Corresponding Author; Tel: 09125900747), Young Researchers and Elites Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, M. Parsinejad, Associate Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, H. Babazadeh, Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Received: February 2011 **Accepted: May 2012**

Present limitations on available water resources especially for use in agriculture sector, shows that more attention to irrigation water management is inevitable. Deficit irrigation is a practice to improve use of unit volume of water. In this research, efficacy of CROPWAT 8.0 model was evaluated against field data under deficit irrigation management on soybean in Karaj. In 2008 and 2009 agronomical years, this experiment was conducted in the form of complete randomized blocks design. Furrow surface irrigation treatments consisted of conventional deficit irrigation treatments at 75% and 50% soil moisture deficit compensation ($DI_{75\%}$ and $DI_{50\%}$), partial root drying treatment at 50% soil moisture deficit compensation ($PRD_{50\%}$) and full irrigation treatment (FI). The actual amounts of crop coefficient which we got in our research studies were substituted in the model. The results showed that the model evaluation indices RMSE, CRM and SD were equal to 3.47, -0.14 and 15.2 respectively in agronomical year 2008 and were equal to 4.22, -0.11 and 3.77 in agronomical year 2009. Also, the estimated yield reduction by the model was very close to actual results. These conclusions were achieved by replacing some management parameters in the model such as crop coefficients for the recommended values of the model. Positive amounts were obtained for EF index (0.87 and 0.91) which indicates the high efficacy of model in predicting crop yield. This study showed that application of CROPWAT 8.0 model by adjusting crop coefficients in the different growth stages, length of plant growth period during planting, and soil and plant characteristics can lead to acceptable results.

Keywords: CROPWAT 8.0, estimation of yield, irrigation model, soybean, water use efficiency

مقدمه

کمبود منابع آبی در کشور یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید گیاهان می‌باشد. مطالعه واکنش گیاه نسبت به شرایط تنش آبی و تعیین پارامترهای مرتبط برای تدوین یک برنامهٔ آبیاری کارا جهت دست‌یابی به یک مدیریت اثربخش در سطح مزرعه امری ضروری است (ایزانلو و همکاران، ۱۳۸۴). مدل‌های رایانه‌ای ازجمله ابزارهایی هستند که این‌گونه مطالعات را امکان‌پذیر می‌نمایند. جهت انجام محاسبات مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری، تاکنون مدل‌های رایانه ای متعددی تهیه شده که برنامه CROPWAT در زمره آن‌ها قرار دارد (FAO, 1992). در این برنامه روش‌های محاسبات مربوط به نیاز آبی محصولات مختلف و نیازمندی‌های آبیاری عمدتاً بر مبنای روش‌های ارائه‌شده در نشریات FAO در مورد آبیاری و زهکشی (شماره ۵۶ تحت عنوان تبخیر و تعرق گیاه) پی‌ریزی شده است (Allen et al., 1998; FAO, 1979). این برنامه امکان انجام موارد ذیل را تأمین می‌نماید: ۱) تدوین و طرح‌ریزی جدول‌های شاخص آبیاری که با شرایط عملی مزرعه هم‌آهنگ و هم‌ساز گردیده‌اند. ۲) برآورد برنامه‌های آبیاری مزرعه در قالب کارایی مصرف آب و تولید محصول و هم‌چنین تنظیم مدل آبیاری مزرعه تحت شرایط کم‌آبی ۳) شرایط وجود بارندگی و استفاده از آن، آبیاری‌های تکمیلی و غیره (Karimi and Panahande, 1388; Kuo et al., 2006; Kirda, 2004; FAO, 1992; English, 1990). محاسبات مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری در این برنامه بر پایه تراز آبی استوار است؛ که طی آن جریان آب ورودی و خروجی (تبخیر، بارندگی، آبیاری) در منطقه ریشه گیاه و در خاک به‌صورت روزانه تعیین و کنترل می‌گردد. کاربرد مدل‌های رایانه‌ای در مطالعات آبیاری و زه‌کشی زمانی نتایج قابل قبول و موفقیت‌آمیزی در بر خواهد داشت که اطلاعات اولیه مورد نیاز آن‌ها به طور دقیق برآورد شده باشد. با توجه به اهمیت این مطلب، پارامترهای اولیه مورد نیاز برنامه CROPWAT جهت محاسبات جدول آبیاری مورد بررسی و برآورد قرار می‌گیرد و سپس بر پایه این اطلاعات برنامه‌ریزی آبیاری شامل محاسبه عمق آبیاری، دور آبیاری، زمان آبیاری و غیره انجام می‌شود. مدل CROPWAT می‌تواند کاهش عمل‌کرد در نتیجهٔ اعمال کم‌آبیاری را شبیه‌سازی نماید. این مدل به درستی، حساسیت نسبی گیاه در مراحل مختلف رشد و اثر منفی تنش آبی بر عمل‌کرد محصول را نشان داده و امکان ارائه توصیه‌های عملی را برای کشاورزان و کسانی که پیوسته روی برنامه‌ریزی کم‌آبیاری تحت شرایط مختلف تأمین آب و شرایط مختلف مدیریت محصول کار می‌کنند

فراهم می‌نماید (Ramezani Eatedali et al., 1388; FAO, 1992) قابلیت مدل‌های مدیریتی آبیاری ازجمله مدل CROPWAT در داخل و خارج از کشور با مطالعات گسترده‌ای ارزیابی شده است. برای ارزیابی قابلیت اجرای این مدل در برنامه‌ریزی کم‌آبیاری، یک پروژهٔ تحقیقاتی هم‌آهنگ[1] تحت همکاری و کمک مالی بخش مشترک مدیریت آب و خاک و تغذیهٔ محصول سازمان خواربار و کشاورزی سازمان ملل متحد[2] و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی[3] بر روی تعداد زیادی از محصولات مزرعه‌ای (شامل: پنبه، گندم، چغندرقند، سویا، نیشکر، سیب‌زمینی و ذرت) برای چهار سال اجرا شد؛ و موارد لازم بررسی گردید. این مطالعه نشان داد که مدل مزبور می‌تواند در حد قابل قبولی تأثیر تنش آبی را پیش‌بینی نماید؛ اما صحت خروجی آن به اصلاح پارامترهای مدیریتی مدل و واسنجی پارامترهای اصلی گیاهی وابسته است. هم‌چنین این مدل می‌تواند در مطالعات تحقیقاتی به بهبود طراحی روش‌های تجربی و تشخیص تناقض‌ها در روش‌ها و نتایج حاصله کمک نماید. به علاوه این مدل امکان تجزیه و تحلیل اصولی‌تر نتایج و ارائه یک‌نواخت‌تر داده‌ها و نتایج قابل استنادتر را داشته و به عنوان یک ابزار قوی در پیش‌بینی برنامه‌ریزی کم‌آبیاری و نتایج حاصل از آن تحت شرایط مختلف منابع آب، خاک و مدیریت محصول مطرح می‌باشد (Smith and Kivumbi, 2004; FAO, 1992). اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۷) عمل‌کرد مدل CROPWAT را با شرایط صحرایی کم‌آبیاری ذرت در منطقه قزوین و شهرکرد مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که توانایی مدل در برآورد نیاز آبیاری نسبت به عمل‌کرد ماده خشک محصول، صحیح‌تر و در پیش‌بینی عمل‌کرد ماده خشک نسبت به عمل‌کرد دانه، دقیق‌تر بوده است. هم‌چنین این مدل در شبیه‌سازی نتایج مزرعه‌ای حاصل از منطقه شهرکرد نسبت به شبیه‌سازی نتایج مزرعه‌ای حاصل از منطقه قزوین عمل‌کرد مناسب‌تری از خود نشان داده است. این مسئله می‌تواند با مدیریت بهتر طرح آزمایشی و اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر مزرعه‌ای در منطقه شهرکرد مرتبط باشد. رمضانی اعتدالی و همکاران (۱۳۸۸) توانایی مدل CROPWAT را در مدیریت کم‌آبیاری دو محصول گندم و جو در منطقه کرج مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که کاربرد این مدل بدون واسنجی کردن ضرایب گیاهی و خصوصیات خاک می‌تواند خطاهای قابل‌ملاحظه‌ای را ایجاد نماید. Shujiang و همکاران (۲۰۰۹) برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق مرجع، و تبخیر و تعرق گندم زمستانه در دو منطقه تگزاس در ایالات متحدهٔ آمریکا و منطقه هینان در چین از سه مدل CROPWAT، MODWht و CERES-Wheat استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل CROPWAT با حداقل داده‌های مشاهده‌ای در سطح مزرعه شامل ارتفاع متوسط گیاه، ضرایب گیاهی واقعی در چهار مرحله اصلی رشد، تاریخ کاشت، طول مراحل مختلف رشد محصول و مشخصات فیزیکی خاک می‌تواند نتایج قابل قبولی را نسبت به دو مدل دیگر که واسنجی مشکل‌تری دارند ارائه نماید. هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی قابلیت مدل مدیریتی CROPWAT در برآورد عمل‌کرد محصول سویا با اعمال مدیریت کم‌آبیاری با استفاده از مقایسه نتایج میدانی (مزرعه‌ای) با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در منطقه کرج بوده است. ویژگی این تحقیق، جایگزینی مقادیر واقعی پارامترهای گیاهی مرتبط با برنامه‌ریزی آبیاری شامل: ضرایب گیاهی، متوسط ارتفاع گیاه، طول دوره‌های زمانی رشد محصول در طول فصل کشت، تاریخ کاشت برای گیاه سویا رقم ویلیامز، عمق توسعه ریشه‌ها و مشخصات فیزیکی خاک بر مبنای مقادیر اندازه‌گیری‌شده در سطح مزرعه به جای مقادیر پیش‌فرض مدل بود.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای ارزیابی توانایی مدل CROPWAT 8.0 از نتایج مطالعهٔ صحرایی که روی گیاه سویا در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران در دو سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷ و ۸۹-۱۳۸۸ انجام شده بود استفاده شد. محل اجرای این مطالعه در محدوده طول جغرافیایی ۵۱ درجه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا واقع شده است. برای این ارزیابی یک دورهٔ آماری ۲۴ ساله هواشناسی (۱۳۸۸-۱۳۶۴) در نظر گرفته شد. در این دورهٔ آماری متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد بود. بافت خاک مزرعه سویا، لومی، متوسط ظرفیت زراعی (θ_{fc}) ۳۲/۲٪ حجمی و جرم مخصوص ظاهری آن ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب (برای عمق تا ۶۰ سانتی‌متری خاک) بود. متوسط شوری خاک با توجه به آنالیز شیمیایی خاک مزرعه، ۴/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر برآورد گردید. منبع آب مورد استفاده مزرعه دانشکده، آب زیرزمینی است که توسط پمپاژ از چاه تأمین می‌گردد. کیفیت آب مورد استفاده بر اساس تقسیم بندی آزمایشگاه شوری خاک آمریکا در کلاس C_1S_1 قرار می‌گیرد. آزمایش به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و چهار تیمار آبیاری روی رقم ویلیامز گیاه سویا انجام شده بود. هر کرت آزمایشی، ۵/۲ مترمربع (۲/۶×۲) مساحت داشته و دارای چهار خط کاشت به طول ۲ متر و دور آبیاری ۷ روز بوده است. برای پیش‌بینی زمان آبیاری، از شاخص کنترلی اندازه‌گیری منظم درصد رطوبت حجمی خاک در طول فصل کشت با فواصل زمانی دو روز با استفاده از اوگر و با تعیین اختلاف بین نقصان رطوبتی خاک و ضریب تخلیه مجاز (MAD) استفاده گردید. فواصل بین ردیف‌ها ۶۵ سانتی‌متر و فواصل بین بوته‌ها در هر ردیف ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای حذف اثرات ناشی از نفوذ آب از تیمارهای مختلف روی یک‌دیگر و از بین بردن اثرات حاشیه‌ای، فواصل طولی و عرضی بین کرت‌ها به‌ترتیب۰/۹ و ۰/۷۵ متر در نظر گرفته شد؛ و اندازه‌گیری‌ها فقط از دو خط کاشت وسط هر کرت انجام شد. به علت کوتاهی جویچه‌های داخل کرت، انتهای شیارها (که در وسط پشته‌ها قرار داشتند) بسته در نظر گرفته شد. تیمارهای آبیاری شیاری اعمال‌شده شامل آبیاری بخشی منطقه ریشه (Partial Root Drying) درحد جبران ۵۰ درصد نقصان رطوبتی خاک ($PRD_{50\%}$)، آبیاری کامل [درحد ۱۰۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (FI)]، کم‌آبیاری سنتی درحد جبران ۵۰ درصد نقصان رطوبتی خاک ($DI_{50\%}$) و کم آبیاری سنتی درحد جبران ۷۵ درصد نقصان رطوبتی خاک ($DI_{75\%}$) بودند. کشت محصول در تاریخ ۱۲ و ۹ خردادماه بعد از یک شخم سطحی به‌ترتیب در سال ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ انجام شد. برداشت محصول در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ به‌ترتیب در هشتم و سوم مهرماه صورت گرفت. مقادیر تبخیر و تعرق مرجع و گیاهی [که به‌ترتیب به روش فائو- پنمن- مانتیث (FAO-PM) و روش مستقیم بر اساس نمایه خاک (SMD) اندازه‌گیری گردیدند]، ضرایب گیاهی بر اساس نسبت تبخیر و تعرق گیاهی به تبخیر و تعرق مرجع، و برنامه‌ریزی آبیاری انجام‌شده (تحت شرایط مزرعه) به عنوان داده‌های پایه برای مدل CROPWAT 8.0 در نظر گرفته شدند. محاسبات تبخیر و تعرق مرجع به روش فائو- پنمن- مانتیث (FAO-PM) به‌صورت روزانه و با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانهٔ ایستگاه

سینوپتیک کرج واقع در مزرعه دانشکده کشاورزی انجام شد. به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق گیاهی به روش نقصان رطوبتی خاک، محاسبات روش مستقیم بر اساس نمایه خاک (SMD) و با استفاده از یک اوگر در طول فصل کشت (از سه عمق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتی‌متری خاک) صورت گرفت. اندازه‌گیری دبی ورودی به هر شیار در هر کرت و کنترل مقدار آب آبیاری در هر تیمار با تعیین ارتفاع سطح آب داخل یک بشکه ۲۲۰ لیتری که به یک مانومتر متصل شده بود انجام شد. کود مصرفی در هکتار به‌میزان ۵۰ کیلوگرم اوره قبل از مرحله گل‌دهی و ۱۰۰ کیلوگرم فسفات قبل از کشت به زمین مورد آزمایش داده شد. تیمارها در این تحقیق پس از ۵ برگی شدن گیاه (در نوبت آبیاری ششم) در تاریخ هفدهم تیرماه ۱۳۸۷ و (در نوبت آبیاری پنجم) در تاریخ هفتم تیرماه ۱۳۸۸ اعمال گردیدند. در طول فصل کشت هیچ بارشی رخ نداد؛ ولی در طول دوره ۲۴ ساله آماری، بیشینه بارش خارج از فصل کشت در فروردین‌ماه و در داخل فصل کشت در خردادماه (به‌میزان ۲/۹ میلی‌متر) اتفاق افتاده است. در این تحقیق برای استفاده از مدل، ۶ فاکتور ذیل در نظر گرفته شد: ۱) عمق توسعه ریشه‌های گیاه [که با توجه به حداکثر عمق خاک زراعی دانشکده (حدود ۰/۶ تا ۰/۹ متر) از ۱ متر پیشنهادشده توسط مدل برای گیاه مزبور به ۰/۹ متر اصلاح گردید.] ۲) متوسط ارتفاع گیاه [که بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای از ۰/۶ به ۰/۹ تبدیل شد]. ۳) ضرایب گیاهی سویا (به‌ترتیب از مقادیر ۰/۴، ۱/۱۵ و ۰/۴ که توسط مدل توصیه شده بود به مقادیر واقعی ۰/۳۴، ۱ و ۰/۴۴ که در سطح مزرعه برآورد شده بود اصلاح شد) (Sarai Tabrizi et al., 2012; Sarai Tabrizi et al., 1389). در بخش مشخصات خاک پس از انتخاب بافت خاک (لوم)، مشخصات خاک مزرعه (شامل: مقدار اختلاف رطوبت حجمی درحد ظرفیت زراعی و رطوبت حجمی خاک درحد نقطه پژمردگی برحسب میلی‌متر بر متر و حداکثر سرعت نفوذ آب در خاک) که از طریق تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک تهیه شده بود، جانشین مقادیر پیش‌فرض مدل گردید. تاریخ کاشت مطابق با طرح آزمایشی انجام‌شده در مدل اصلاح شد. هم‌چنین طول دوره رشد گیاه در مراحل چهارگانه رشد (مرحلهٔ ابتدایی رشد، مرحلهٔ رشد و توسعهٔ گیاه، مرحلهٔ میانی و نهایی رشد) بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای و رقم زراعی اصلاح گردید. در این مطالعه شبیه‌سازی مدیریت آبیاری گیاه سویا با استفاده از آخرین نسخهٔ موجود نرم‌افزار CROPWAT 8.0 انجام شد. برنامه ریزی آبیاری در این مطالعه از نظر زمانی و کمی در جدول ۱ آورده شده است.

کارایی مصرف آب سویا (WUE[4]) بر اساس میزان عمل‌کرد در واحد سطح بر حجم آب مصرفی تعیین شد. شاخص کارایی مصرف آب می‌تواند

جدول ۱- برنامه‌ریزی آبیاری برای محصول سویا در دور آبیاری ۷ روز طی دو سال زراعی

سال ۸۸-۱۳۸۷					سال ۸۹-۱۳۸۸				
زمان آبیاری	FI ((mm	$DI_{75\%}$ (mm)	$DI_{50\%}$ (mm)	$PRD_{50\%}$ (mm)	زمان آبیاری	FI (mm)	$DI_{75\%}$ (mm)	$DI_{50\%}$ (mm)	$PRD_{50\%}$ (mm)
۱۳ خرداد	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۱۰ خرداد	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
۲۰ خرداد	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸	۱۷ خرداد	۱۹/۵	۱۹/۵	۱۹/۵	۱۹/۵
۲۷ خرداد	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۱/۵	۲۴ خرداد	۲۲/۷	۲۲/۷	۲۲/۷	۲۲/۷
۳ تیر	۳۰/۳	۳۰/۳	۳۰/۳	۳۰/۳	۳۱ خرداد	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱
۱۰ تیر	۳۴	۳۴	۳۴	۳۴	۷ تیر	۳۵/۶	۲۶/۷	۱۷/۸	۸/۹
۱۷ تیر	۳۷/۵	۲۸/۱	۱۸/۸	۹/۴	۱۴ تیر	۳۲/۷	۲۴/۵	۱۶/۴	۸/۲
۲۴ تیر	۴۲	۳۱/۵	۲۱	۱۰/۵	۲۱ تیر	۴۰/۸	۳۰/۶	۲۰/۴	۱۰/۲
۳۱ تیر	۵۵	۴۱/۳	۲۷/۵	۱۳/۸	۲۸ تیر	۵۴	۴۰/۵	۲۷	۱۳/۵
۷ مرداد	۵۱	۳۸/۳	۲۵/۵	۱۲/۸	۴ مرداد	۴۹/۹	۳۷/۴	۲۵	۱۲/۵
۱۴ مرداد	۵۰	۳۷/۵	۲۵	۱۲/۵	۱۱ مرداد	۵۱/۵	۳۸/۶	۲۵/۸	۱۲/۹
۲۱ مرداد	۶۲	۴۶/۵	۳۱	۱۵/۵	۱۸ مرداد	۴۶/۲	۳۴/۷	۲۳/۱	۱۱/۶
۲۸ مرداد	۷۱	۵۳/۳	۳۵/۵	۱۷/۸	۲۵ مرداد	۷۲/۵	۵۴/۴	۳۶/۳	۱۸/۲
۴ شهریور	۵۳	۳۹/۸	۲۶/۵	۱۳/۳	۱ شهریور	۶۰/۸	۴۵/۶	۳۰/۴	۱۵/۲
۱۱ شهریور	۴۶	۳۴/۵	۲۳	۱۱/۵	۸ شهریور	۴۸/۵	۳۶/۴	۲۴/۳	۱۲/۲
۱۸ شهریور	۳۳	۲۴/۸	۱۶/۵	۸/۳	۱۵ شهریور	۳۲/۴	۲۴/۳	۱۶/۲	۸/۱
۲۵ شهریور	۱۶	۱۲	۸	۴	۲۲ شهریور	۱۵/۳	۱۱/۵	۷/۷	۳/۹
۱ مهر	۱۴	۱۰/۵	۷	۳/۵	۲۹ شهریور	۱۳	۹/۸	۶/۵	۳/۳
مجموع مقادیر	۶۵۶/۳	۵۲۳/۹	۳۹۱/۱	۲۵۸/۷	مجموع مقادیر	۶۴۷/۴	۵۰۲/۹	۳۷۱/۱	۲۳۲/۹

برای تعیین بهترین تیمار کم‌آبیاری شاخص مناسبی باشد (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۸۸). برای بررسی نتایج حاصل از مدل و مقایسه آن با نتایج مشاهده‌ای در سطح مزرعه و ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل، از یک سری شاخص آماری شامل حداکثر خطا (ME[5])، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE[6])، ضریب باقی‌مانده (CRM[7])، ضریب تبیین (CD[8])، شاخص انحراف معیار (SD[9]) و کارایی مدل‌سازی (EF[10]) به شرح ذیل استفاده شد (Loague and Green, 1991):

که در روابط فوق P_i معادل مقادیر پیش‌بینی شده، Q_i مساوی مقادیر اندازه‌گیری‌شده (مشاهده‌ای)، n برابر با تعداد نمونه‌های

1. $ME = MAX\left|P_i - Q_i\right|$

2. $$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - Q_i\right)^2}{n}\right]^{1/2}$$

3. $$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i - \overline{Q_i}\right)^2 - \sum_{i=1}^{n}\left(P_i - Q_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i - \overline{Q_i}\right)^2}$$

4. $$CD = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - Q_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i - \overline{Q_i}\right)^2}\right]$$

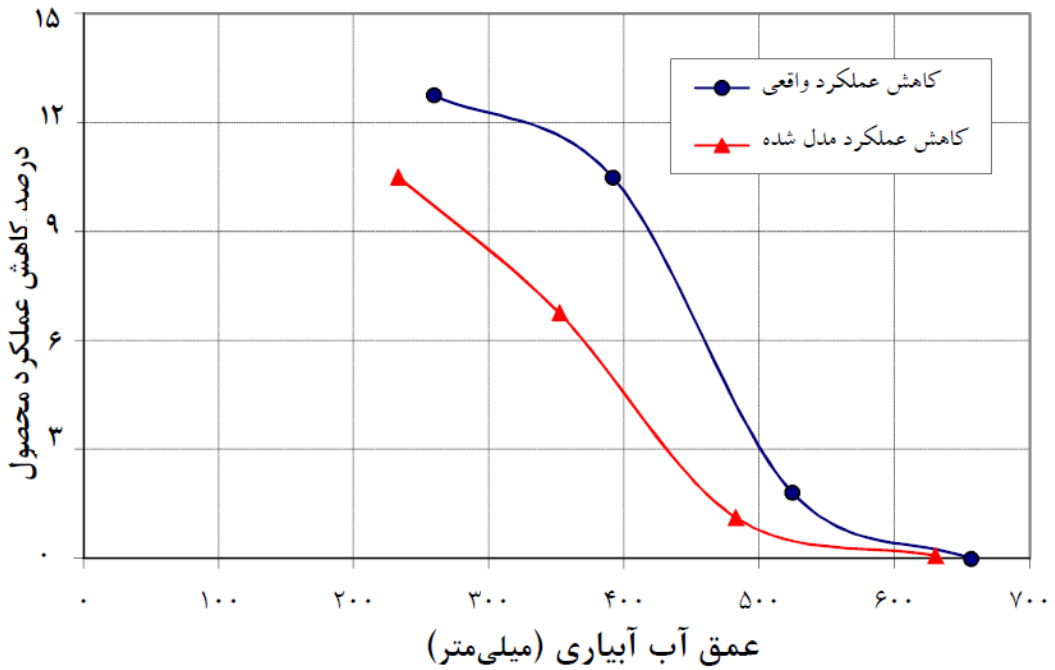
5. $$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i - \sum_{i=1}^{n} P_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_i}$$

6. $$SD = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i - \overline{Q})}{n}\right)$$

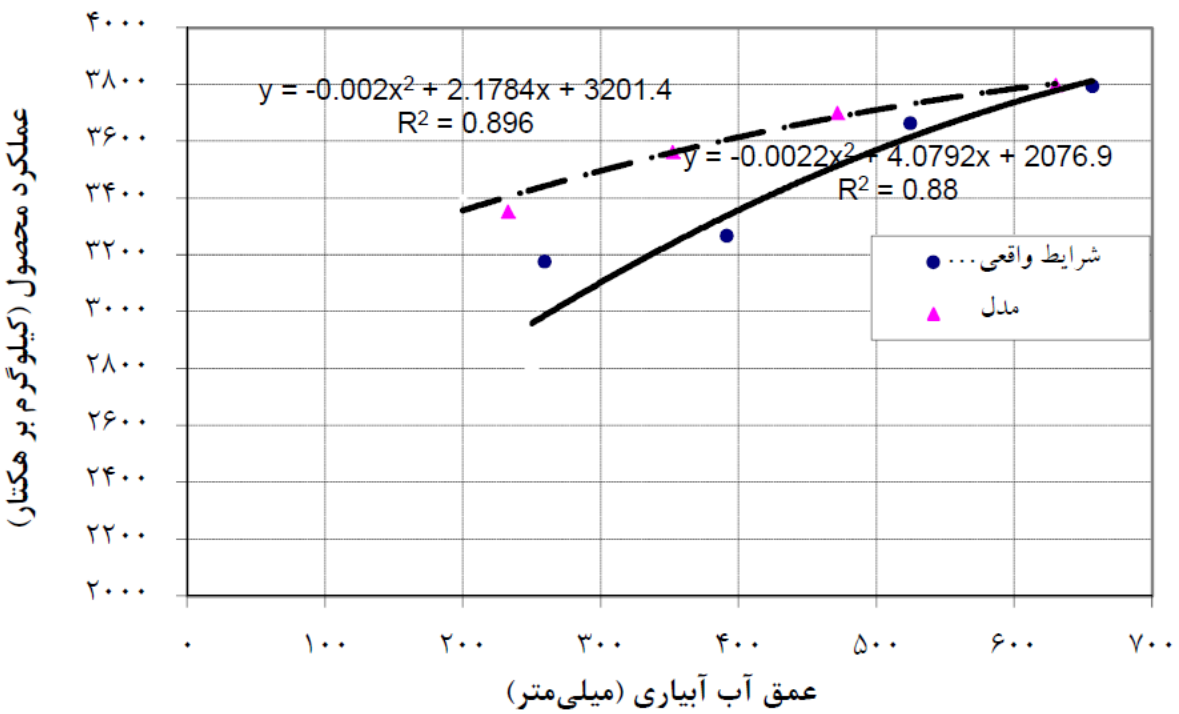
به کاررفته و Q_i معادل مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده می‌باشد. حداقل مقدار ME، RMSE و CD صفر است. حداکثر مقدار EF برابر یک می‌باشد. EFو CRM می‌توانند مقادیری منفی داشته باشند. بالا بودن مقدارME نشان‌گر بدترین حالت کارکرد مدل است؛ در حالی‌که RMSE نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کم‌تر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها) چقدر است. شاخص CD نسبت پراکندگی[11] بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد. مقدار شاخص *EF*، مقادیر پیش‌بینی‌ها را با میانگین اندازه‌گیری‌ها مقایسه می‌کند. مقدار منفی *EF* بیان‌گر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده، برآوردی بهتر از مقادیر پیش‌بینی‌شده دارد. شاخص CRM نشان‌گر تمایل مدل برای برآورد بیش از حد و یا کم‌تر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. چنان‌چه تمام مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده با هم برابر شوند، مقدار عددی شاخص‌های RMSE، ME و CRM برابر صفر و مقادیر شاخص‌هایCD و EF برابر یک می‌شوند. SD شاخص انحراف معیار است. اگر RMSE کم‌تر از SD باشد، نشان‌دهنده کارکرد مطلوب مدل است. هرگاه CRM منفی شود به معنی آن است که مدل تمایل به برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده دارد. درصورتی که همه مقادیر پیش‌بینی‌شده برابر مقادیر اندازه‌گیری‌شده باشند، مقادیر شاخص‌های RMSE، MAE، SD و CRM برابر با صفر خواهند شد (Homaee et al., 2002; Loague and Green, 1991). در این مطالعه تمامی شاخص‌های آماری بیان‌شده در مقاله برای مقایسهٔ مقادیر درصد کاهش عمل‌کرد واقعی مشاهده شده در سطح مزرعه و هم‌چنین مقادیر درصد کاهش عمل‌کرد پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای محصول سویا با دور آبیاری ۷ روز محاسبه گردید. از نرم افزار SAS برای تجزیه آماری داده‌ها استفاده گردید؛ و با مشاهده تفاوت معنی‌دار در تجزیه واریانس (ANOVA)، مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد ($P\leq0.05$) صورت گرفت.

نتایج و بحث

مقایسهٔ نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل CROPWAT 8.0 با نتایج واقعی حاصل از مطالعهٔ مزرعه‌ای (میدانی) نشان داد که مدل، درصد کاهش عمل‌کرد سویا را تحت اعمال تیمارهای مختلف آبیاری به جز آبیاری کامل (تیمار شاهد) کم‌تر از مقادیر واقعی حاصل‌شده تحت شرایط مزرعه‌ای پیش‌بینی نمود (شکل ۱). پیش‌بینی مقدار کم‌تر درصد کاهش عمل‌کرد محصول توسط مدل به عوامل مختلفی بستگی دارد. به طور مثال این مدل تنها اثر تنش آبی را لحاظ می‌کند و دیگر تنش‌ها مانند تنش شوری را در نظر نمی‌گیرد. بر اساس شکل‌های ۱ و ۲ میزان اختلاف مقادیر مشاهده شده واقعی در سطح مزرعه و مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل دارای اختلاف به نسبت اندکی هستند؛ و از روند مشابهی پیروی می‌نمایند. علت این امر، اصلاح ضرایب گیاهی سویا (بر مبنای مقادیر واقعی اندازه‌گیری‌شده در سطح مزرعه) در مدل مزبور بود. به طوری که در اصلاح طول دوره رشد گیاه در مراحل چهارگانه اصلی رشد (شامل مرحلهٔ ابتدایی رشد، مرحلهٔ رشد و توسعهٔ گیاه، مرحلهٔ میانی و نهایی رشد) به‌ترتیب ضریب‌های ۱۸، ۲۴، ۵۴ و ۲۵ روز جایگزین مقادیر پیش‌فرض مدل (۱۵، ۱۵، ۴۰ و ۱۵) گردیدند؛ و در اصلاح متوسط ارتفاع گیاه، ضریب ۰/۹ جایگزین ۰/۶ متر (پیش‌فرض مدل) گردید. برای ارزیابی قابل اعتماد بودن نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های مدل (از نظر توانایی مقایسه نتایج حاصله با نتایج واقعی مزرعه‌ای)، از شاخص‌های آماری مناسب استفاده شد. نتایج این ارزیابی در جدول ۴ آمده است. مقادیر اندک شاخص‌های کمی ME و RMSE(در همه تیمارهای آبیاری) در جدول مزبور نشان‌می‌دهد که این مدل مقدار کاهش عمل‌کرد محصول را کم‌تر از مقادیر مشاهده‌ای در سطح مزرعه برآورد کرده است. این مسئله در شکل ۱ به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. دلیل این تطابق، اصلاح برخی پارامترهای مدل است که بر برنامه‌ریزی آبیاری تأثیرگذار بوده است. شاخص تبیین (CD) در سال‌های زراعی ۸۷ و ۸۸ به‌ترتیب برابر ۰/۱۷ و ۰/۱۳ بود که با توجه به دامنه تغییرات مقادیر ضریب تبیین (۰ تا ۱) مقدار بسیار اندکی است که نشان می‌دهد مقادیر پراکندگی نتایج پیش‌بینی مدل و نتایج میدانی (مزرعه‌ای) برای مقادیر درصد کاهش عمل‌کرد بسیار اندک می‌باشد. چون از بین تنش‌های غیرزنده (تنش آبی، تنش شوری، تنش گرما، تنش تشعشع و ...) تنها تنش آبی در مدل لحاظ می‌شود و هیچ‌کدام از تنش‌های زنده (تنش حاصل از آفات، بیماری‌ها، علف‌های هرز و ...) نیز در مدل در نظر گرفته نمی‌شوند، لازم است که برای تعیین درصد کاهش عمل‌کرد در مناطق شور و سایر مناطق اقلیمی مطالعات و اصلاحات تکمیلی مدل انجام



شکل۱- درصد کاهش عمل‌کرد سویا نسبت به عمق آب آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری برای دور آبیاری ۷ روز



شکل۲- تابع تولید سویا نسبت به عمق آب آبیاری برای مدل و شرایط واقعی مزرعه در دور آبیاری ۷ روز

و موارد اصلاحی اعمال گردد. شاخص کارایی مدل‌سازی (EF) برای گیاه سویا با دور آبیاری ۷ روز در سال‌های ۸۷ و ۸۸ به‌ترتیب معادل با ۰/۸۷ و ۰/۹۱ بود؛ که نشان‌دهنده کارآمدی بالای مدل در پیش‌بینی قابل قبول درصد کاهش عمل‌کرد محصول می‌باشد. شاخص ضریب باقی‌مانده (CRM) نشان می‌دهد که مقادیر این شاخص بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل و نتایج مزرعه‌ای در تمامی تیمارها منفی بوده است. این مطلب مبین این است که این مدل درصد کاهش عمل‌کرد را برای تمامی تیمارهای آبیاری به جز آبیاری کامل (تیمار شاهد) بیش‌تر از شرایط واقعی پیش‌بینی کرده است. نتایج در تیمار آبیاری کامل تقریباً مشابه با مشاهدات مزرعه‌ای بود. اثر میزان آبیاری بر عمل‌کرد محصول سویا بر اساس داده‌های مشاهده‌ای در سطح مزرعه و مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲ ضریب تبیین و معادلات تابع تولید در هر دو نمودار مقادیر مشابهی را نشان می‌دهند هم‌چنین روند هر دو نمودار نسبتاً مشابه می‌باشد. در شرایط مزرعه‌ای بیشینه میزان کارایی مصرف آب، از تیمار آبیاری بخشی منطقه ریشه (PRD) و حداقل میزان آن از تیمار آبیاری کامل به دست آمد. نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های مدل هم همین روند را نشان می‌دهد. برای این‌که تیمار آبیاری بهینه را تحت شرایط کمبود آب تعیین نماییم یکی از شاخص‌های قابل اعتماد شاخص کارایی مصرف آب (WUE) می‌باشد. بر اساس جدول ۳ با کاهش عمق مصرف آب در گیاه سویا میزان عمل‌کرد محصول کاهش ولی میزان شاخص کارایی مصرف آب افزایش یافت. ضریب RMSE برای عمل‌کرد محصول نیز در هر دوسال زراعی در حد پایین و کم‌تر از انحراف معیار بود. این مطلب نشان‌دهندهٔ عمل‌کرد مناسب مدل در شبیه‌سازی داده‌ها و واسنجی قابل قبول آن می‌باشد. ضریب CRM کوچک و منفی است و تمایل مدل در برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهد (جدول‌های ۲، ۳، ۴ و ۵). نتایج این تحقیق، با یافته های اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۷) و رمضانی اعتدالی و همکاران (۱۳۸۸) هم خوانی داشت. مطابق شکل‌های ۳ و ۴ ضریب R^2 در هر دو سال زراعی بین مقادیر عمل‌کرد محصول شبیه‌سازی شده و مقادیر عمل‌کرد محصول اندازه‌گیری‌شده در تیمارهای مختلف آبیاری عدد قابل قبولی است. این ضریب نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری‌شده هم‌روند بوده و مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده را بیش تر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده برآورد کرده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که مدل CROPWAT 8.0 درصورت اصلاح پارامترهای مدیریتی مدل و جایگزین کردن مقادیر واقعی با مقادیر پیش‌فرض می‌تواند در تخمین درصد کاهش عمل‌کرد محصول تحت تیمارهای مختلف آبیاری نتایج قابل قبولی ارائه نماید. این مدل توانست به خوبی عمل‌کرد محصول و کارایی مصرف آب را در تیمار آبیاری کامل (تیمار شاهد) شبیه‌سازی نماید. چون مدل مزبور هیچ‌کدام از تنش‌های زنده را در نظر نمی‌گیرد و از بین تنش‌های غیرزنده نیز فقط تنش آبی را لحاظ می‌کند، بنابراین انتظار می‌رود درصورت استفاده از مدل با مقادیر پیش‌فرض، نتایج قابل قبولی حاصل نگردد. کارایی مدل در تیمارهای مختلف آبیاری مشابه نیست؛ به نحوی‌که با کاهش عمق آب آبیاری، کارایی مدل کم شده و درصد انحراف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده افزایش می‌یابد.

جدول ۲- تجزیه واریانس عمل‌کرد دانه و کارایی مصرف آب در شرایط کم آبیاری

		سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷		سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸	
منابع تغییر	درجه آزادی	عمل‌کرد دانه	کارایی مصرف آب	عمل‌کرد دانه	کارایی مصرف آب
تکرار	۲	۰/۷۷	۰/۰۰۰۰۱	۰/۸۱	۰/۰۰۰۱۲
کم آبیاری	۳	۲۷۱۳/۴**	۰/۶۳**	۳۹۸۸/۹*	۰/۵۵**
خطا	۶	۶/۰۲	۰/۰۰۰۰۸	۸/۶۶	۰/۰۰۰۰۶۲
C.V .		۰/۷۱	۰/۴۵	۰/۹۴	۰/۳۷

* و ** به ترتیب معنی دار در سطوح ۱ و ۵ درصد

جدول ۳- مقادیر عمل‌کرد محصول اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال‌های زراعی ۸۸-۸۷ و ۸۹-۸۸

	عمل‌کرد دانه اندازه‌گیری‌شده (kg/ha)		عمل‌کرد دانه شبیه‌سازی شده (kg/ha)		درصد انحراف مقادیر	
تیمار آبیاری	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸
FI	۳۷۹۷/۶ a	۴۱۶۵/۷ a	۳۸۹۹/۴	۴۱۸۹/۵	۲/۶۱	۰/۵۶
$DI_{75\%}$	۳۶۶۷/۱ b	۳۹۰۲/۵ b	۳۷۰۰/۲	۳۹۵۱/۶	۰/۸۹	۱/۲۴
$DI_{50\%}$	۳۲۶۹/۵ c	۳۴۱۱ c	۳۴۲۵/۸	۳۸۹۲/۳	۴/۵۶	۱۲/۳۶
$PRD_{50\%}$	۳۱۸۷/۱ d	۳۲۲۶/۶ d	۳۲۵۹/۹	۳۶۱۵/۴	۱۱/۸۴	۱۰/۷۵

در هر صفت و گروه مقایسه شده، تیمار هایی که با حرف یک سان نشان داده شده اند بر اساس آزمون چنددامنه‌ای دانکن ($P\leq0.05$)، دارای اختلاف معنی دار نیستند.

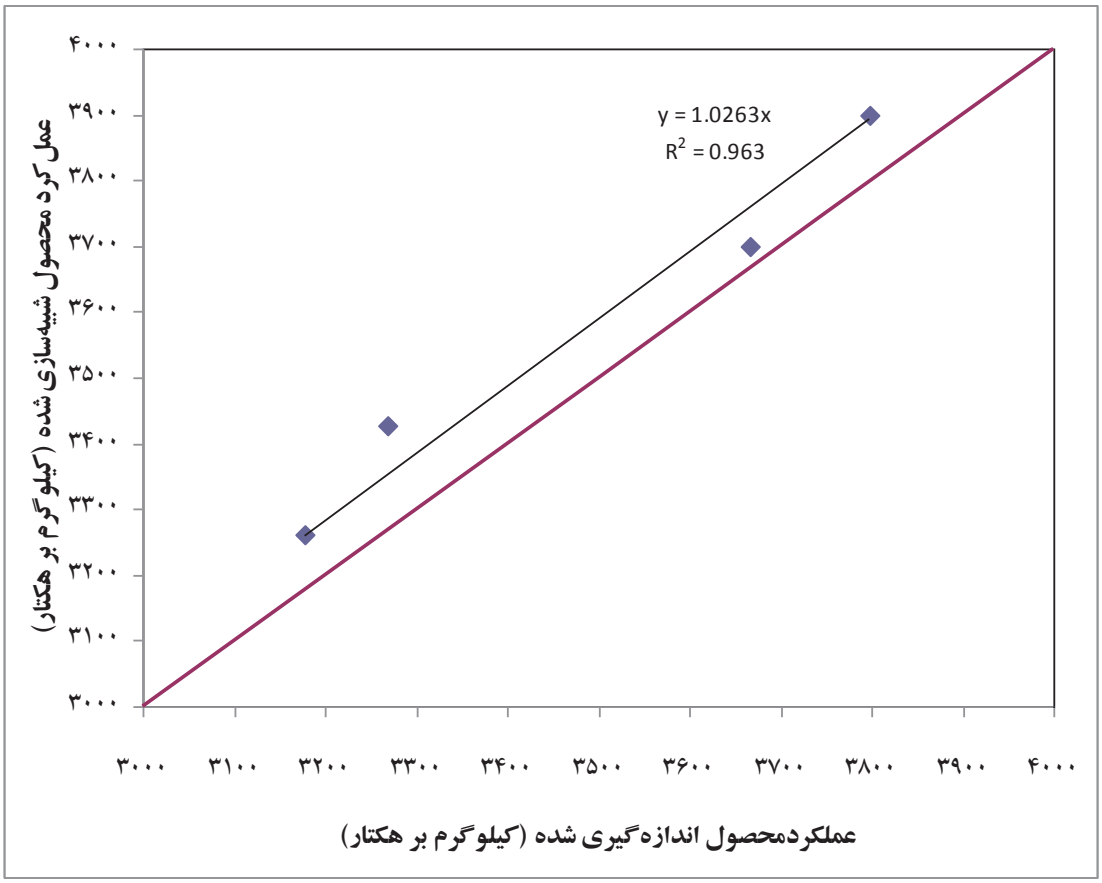
جدول ۴- ارزیابی آماری عمل‌کرد دانه شبیه‌سازی شده توسط مدل CROPWAT 8.0

ضرایب	سال زراعی ۸۸-۸۷	سال زراعی ۸۹-۸۸
CD	۰/۱۷	۰/۱۳
RMSE	۳/۴۷	۴/۲۲
ME	۶/۸۴	۳/۷۷
CRM	-۰/۱۴	-۰/۱۱
SD	۱۵/۲	۱۲/۵۹
EF	۰/۸۷	۰/۹۱

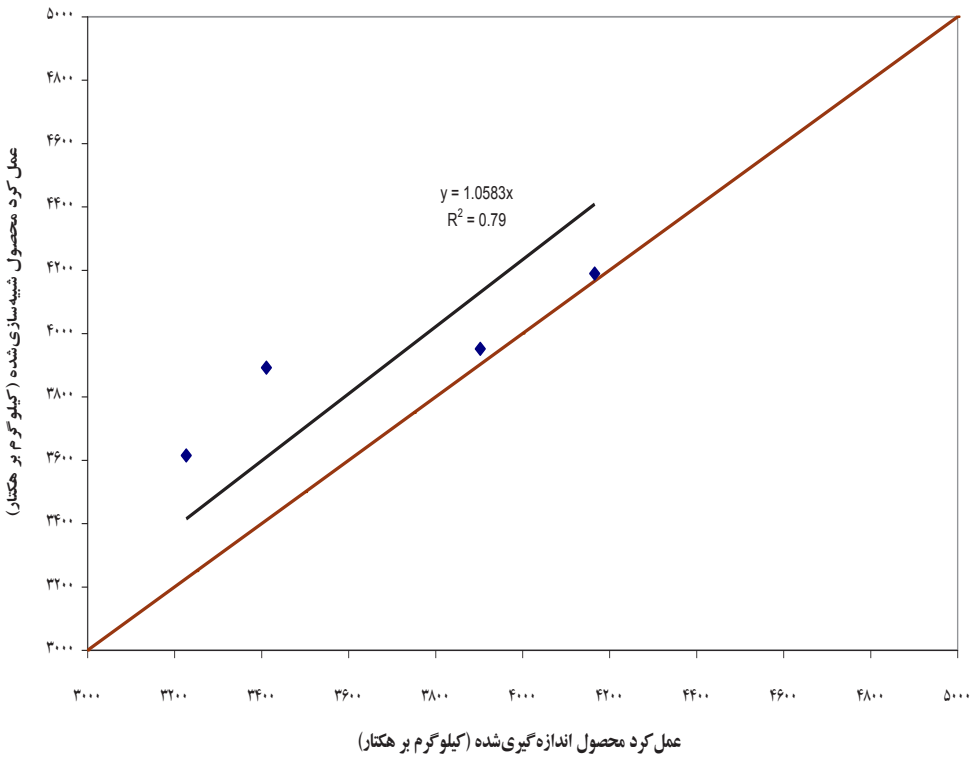
جدول ۵- مقادیر کارایی مصرف آب سویا اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال‌های ۸۸-۸۷ و ۸۹-۸۸

تیمار آبیاری	کارایی مصرف آب اندازه‌گیری‌شده (kg/m^3)		کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده (kg/m^3)		درصد انحراف مقادیر	
	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸
FI	۰/ ۴۴ [a]	۰/ ۴۹ [a]	۰/۴۵	۰/۴۸	۲/۲۲	۲/۰۸
$DI_{75\%}$	۰/۵۶ [b]	۰/۶۲ [b]	۰/۵۷	۰/۶۱	۱/۷۵	۱/۶۴
$DI_{50\%}$	۰/۷۶ [c]	۰/۸۱ [c]	۰/۸۲	۰/۸۹	۷/۳۱	۸/۹۹
$PRD_{50\%}$	۱/۴۷ [d]	۱/۵۷ [d]	۱/۵۱	۱/۶۷	۲/۶۵	۵/۹۹

در هر صفت و گروه مقایسه شده، تیمار هایی که با حرف یکسان نشان داده شده اند بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن($P\leq0.05$)، دارای اختلاف معنی دار نیستند.



شکل ۳- مقایسه مقادیر عمل‌کرد محصول برآوردشده توسط مدل و اندازه گیری شده در سال زراعی ۸۸- ۱۳۸۷



شکل ۴- مقایسه مقادیر عمل‌کرد محصول برآوردشده توسط مدل و اندازه گیری شده در سال زراعی ۸۹- ۱۳۸۸

منابع مورد استفاده

۱. اسماعیلی، س. پارسی‌نژاد، م. لیاقت، ع. و نحوی‌نیا، م.ج. ۱۳۸۷. ارزیابی مدل CROPWAT در مدیریت کم‌آبیاری ذرت. دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب، ۱۰-۸ بهمن، اهواز.

۲. ایزانلو، ع. زینالی خانقاه، ح. حسین‌زاده، ع. مجنون حسینی، ن. و سبک‌دست، م. ۱۳۸۴. بررسی عکس‌العمل ارقام تجاری سویا در شرایط تنش رطوبتی در اواخر مرحلهٔ زایشی. مجله علوم کشاورزی ایران، ۳۶ (۴): ۱۰۱۱-۱۰۲۳.

۳. بابازاده، ح. سرائی تبریزی، م. پارسی‌نژاد، م. مدرس ثانوی، ع.م. ۱۳۸۹. بررسی برخی صفات کیفی و کمی زراعی سویا (*Glycine max* L. Merrill) در شرایط تنش آبی. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۴ (۲): ۹۹-۱۰۹.

۴. رمضانی اعتدالی، ه. نظری، ب. توکلی، ع. و پارسی‌نژاد، م. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل CROPWAT در مدیریت کم آبیاری گندم و جو در منطقه کرج. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳ (۱): ۱۱۹-۱۲۹.

۵. کریمی، ش. و پناهنده، ع. ۱۳۸۸. راهنمای محاسبات استاندارد نیاز آبی گیاه با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT 8.0. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده مهندسی آب، ۲۱-۱۹ بهمن، کرمان.

۶. سرائی تبریزی، م. بابازاده، ح. پارسی‌نژاد، م. و مدرس ثانوی، ع.م. ۱۳۸۹. بهبود کارایی مصرف آب سویا با استفاده از آبیاری بخشی منطقه ریشه (Partial Root Drying). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی (علوم آب و خاک)، ۱۴ (۵۲): ۱-۱۳.

7. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO, Irrigation and Drainage paper No.56.

8. English, M. 1990. Deficit irrigation I. An Analytical Framework. J. Irrig. Drainage ASCE,116:399-412.

9. FAO. 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 26. Rome.

10. FAO. 1979. Yield Response to Water by J. Doorenbos and A.H. Kassam. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome.

11. Homaee, M., C. Dirksen and R.A. Feddes.2002. Simulation of root water uptake. I. non-uniform transient salinity stress using different macroscopic reduction functions. Agricultural Water Management, 57(2):89-109.

12. Kirda, C. 2004. Deficit irrigation scheduling based on plant

growth stages showing water stress tolerance. FAO Deficit Irrigation Practices. Water Reports 22:3-10.

13. Kuo, Sh.F., Lin, B.J. and Shieh. H.J. 2006. CROPWAT model to evaluate crop water requirements in Taiwan. International Commission on Irrigation and Drainage. 1st Asian Regional Conference, Seoul.
14. Loague, K., and Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of Contaminant Hydrology, 7: 51-73.
15. Sarai Tabrizi, M., Parsinejad, M. and Babazadeh, H. 2012. Efficacy of partial root drying technique for optimizing soybean crop production in semi-arid regions. Irrigation and Drainage Journal, 61(1): 80-88.
16. Smith, M. and Kivumbi. D. 2004. Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. joint FAO/IAEA division. FAO Deficit Irrigation Practices. Water Reports, 22: 17-27.
17. Shujiang, K. Payne, W.A. Evett, S.R. Robinson, C.A. and Stewart, B.A. 2009. Simulation of winter wheat evapotranspiration in Texas and Henan using three models of differing complexity. Agricultural Water management Journal, 96: 167-178.