نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۵ شماره ۲ صفحه‌های ۱۶۵ تا ۱۷۹/ سال ۱۳۹۴

ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد، اجزای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب سویا

حسین بابازاده*[۱]، مهدی سرائی تبریزی[۲]

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۵/۲۸

[۱]- دانشیار، گروه مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
[۲]- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، مدل SWAP در برآورد عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص سطح برگ و بهره‌وری مصرف آب سویا و همچنین رطوبت موجود در نیم‌رخ خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل SWAP بر اساس نتایج مزرعه‌ای حاصل از کشت سویا برای چهار تیمار آبیاری شیاری شامل آبیاری کامل، کم آبیاری سنتی در حد ۷۵ و ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک و آبیاری بخشی منطقه ریشه در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک در سال زراعی ۸۸-۸۷ تحلیل حساسیت شد. سپس بر اساس نتایج مزرعه‌ای سال زراعی ۸۹-۸۸، مورد واسنجی، اعتبارسنجی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که این مدل، عملکرد دانه را بهتر از عملکرد بیولوژیک شبیه‌سازی می‌کند. بهترین شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب سویا در تیمار آبیاری بخشی منطقه ریشه و بدترین شبیه‌سازی در تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک به‌دست آمد. بر اساس نتایج آماره‌های محاسبه‌شده در این پژوهش، بهترین شبیه‌سازی مدل که بیشترین مطابقت را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت به‌ترتیب در عملکرد دانه، بهره‌وری مصرف آب، شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و مقدار رطوبت حجمی خاک به‌دست آمد (کمترین میزان *RMSE* و *ME* و بیشترین میزان ضریب تبیین). همچنین نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان‌داد که مدل SWAP نسبت به داده‌های ورودی رطوبت باقی‌مانده و هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار حساس می‌باشد و با کوچک‌ترین تغییر در این داده‌های ورودی خاک، نتایج خروجی (مقادیر پارامترهای شبیه‌سازی‌شده) به‌شدت تغییر می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری بخشی منطقه ریشه، اعتبارسنجی مدل، تحلیل حساسیت ، کم‌آبیاری سنتی

Evaluation of SWAP Model for Simulating Soybean Yield, Yield Components and Water Productivity

H Babazadeh[*1], M Sarai Tabrizi[2]

Received: 4 August 2012 Accepted: 19 August 2014
[1-]Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[2-]Ph.D. Graduate, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[*]Corresponding Author, Email: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

Abstract

In this research, SWAP model was evaluated to estimate soybean grain yield, biological yield, leaf area index, water productivity, and available soil water content in soil profile. The sensitivity of SWAP model was analyzed based on the field results obtained from soybean planting with four furrow irrigation treatments including full irrigation, conventional deficit irrigation at 75% and 50% soil moisture deficit compensation, and partial root zone drying at 50% soil moisture deficit compensation in 2008 agronomical year. Then it was calibrated, validated and evaluated based on the field results of the agronomical year 2009. The results of this study indicated that this model simulated grain yield better than biological yield. The best and the worst simulations of soybean water productivity were obtained at partial root zone drying and conventional deficit irrigation treatments at 50% soil moisture deficit compensation, respectively. Based on calculated statistical indices in this research, the best simulations of the model that had the best fitting with the measured data, were at grain yield, water productivity, leaf area index, biological yield, and volumetric soil water content (the least *RMSE* and *ME* and the highest R^2), respectively. Also the results of the model sensitivity analysis showed that SWAP model was sensitive to soil input data, i.e. residual moisture and saturated hydraulic conductivity, and with any little change in these input data, output results (the amounts of simulated parameters) varied greatly.

Keywords: Conventional deficit irrigation, Model validation, Partial root zone drying, Sensitivity analysis

مقدمه

افزایش جمعیت، نیاز به غذای بیش‌تر و همچنین محدودیت منابع آب و خاک به‌عنوان بستر اصلی تولیدات کشاورزی، بشر را به‌سمت استفاده بهینه از منابع آب سوق داده است. در حال حاضر کشور ایران همچون سایر کشورهای واقع در کمربند خشک کره زمین دچار کم‌آبی بوده و پیش‌بینی می‌شود طی نیم‌قرن آتی ازجمله ۶۶ کشوری باشد که مشکل کمبود آب دارد (لتی و همکاران ۱۹۸۵، نوروزی و همکاران ۱۳۷۸). بنابراین باید برای مصرف آب‌های در دسترس و مدیریت استفاده از آن‌ها به‌عنوان یک کالای با ارزش اهمیت بیشتری قائل شد.

از روش‌های نوین کشاورزی که در دو دهه اخیر در مدیریت آب کشاورزی و ارتقاء بهره‌وری مصرف آب

کاربرد داشته است، استفاده از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی می‌باشد. به لحاظ این‌که فاکتورهای مؤثر بر سیستم تولید محصولات زراعی و ستاده‌های بخش کشاورزی متعدد بوده و حتی این فاکتورها گاهی اثر متقابل روی یکدیگر دارند، لذا استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی سیستم تولید محصولات زراعی قدمی اساسی و صحیح در امر مدیریت و تصمیم‌گیری زراعی می‌باشد (لیو و همکاران ۲۰۰۷). مدل‌ها اهداف مختلفی را دنبال می‌کنند. هدف اصلی و اولیه هر مدل افزایش اطلاعات درباره سیستم تحت بررسی است. اما به‌طورکلی می‌توان اهداف یک مدل را در چهار جنبه آموزشی، تحقیقاتی، اقتصادی و مدیریتی تعیین نمود. با کمک مدل‌ها می‌توان عملکرد محصول را در شرایط مختلف پیش‌بینی نمود. برای معرفی گیاه یا رقم جدید در یک منطقه و یا تعیین مناطق مناسب برای گیاه از مدل‌ها استفاده می‌شود. مدل‌ها فاکتورهای مؤثر بر رشد را بهینه کرده و بهترین زمان مصرف نهاده‌ها را برای تولید و عملکرد مطلوب مشخص می‌نمایند. در حقیقت سیستم خاک و گیاه بسیار پیچیده بوده و عوامل متعددی بر فرآیندهای مختلف آن تأثیرگذار هستند. پیشرفت فن‌آوری کامپیوتر این امکان را به‌وجود آورده است که بتوان اثرات تجمعی و متقابل این فاکتورها را هم‌زمان مورد ملاحظه و مطالعه قرارداد (بنایان و کروت ۱۹۹۹، نصیری محلاتی ۱۳۷۹).

مدل SWAP یک مدل شبیه‌سازی بیلان آب و املاح در یک خاک تحت کشت یا آیش با انواع مختلفی از شرایط مرزی و با در نظر گرفتن امکان‌پذیری زهکشی مصنوعی و آبیاری می‌باشد. این مدل، یک مدل در مقیاس مزرعه[1] می‌باشد که عوامل مهمی مانند خاک، آب، اتمسفر و گیاه را در نظر می‌گیرد. در کشور هلند (دانشگاه کشاورزی واگنینگن[2] و در مؤسسه تحقیقاتی آلترا[3]) توسعه داده‌شده است و قادر است تحلیل اثرات متقابل میان حرکت آب، رشد محصول و انتقال املاح و گرما در شرایط اشباع و غیراشباع خاک، پیش‌بینی عملکرد محصول تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری و شوری و برنامه‌ریزی آبیاری را انجام دهد (کروس و همکاران ۱۹۹۹).

مدل SWAP جانشین مدل اگروهیدرولوژیکی[4] مشهور SWATR می‌باشد (فِدِس و همکاران ۱۹۸۷). نسخه‌های منتشرشده قبلی مدل SWAP به‌ترتیب با نام SWATR(E) (فِدِس و همکاران ۱۹۸۷، بلمنز و همکاران ۱۹۸۳، وسلینگ و همکاران ۱۹۹۱) و با نام SWACROP (کابات و همکاران ۱۹۹۲) و با نام SWAP93 (ون دام و همکاران ۱۹۹۴) و با نام SWAP 2.0 (ون دام و همکاران ۱۹۹۷، کروس و همکاران ۲۰۰۱) توسعه داده شده است. در سال‌های اخیر مدل SWAP 2.0 برای بررسی مفاهیم انتقال مواد محلول، تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی و صحرایی به‌خوبی به‌کاربرده شده است (ون دام و همکاران ۱۹۹۷، ون دام ۲۰۰۰). این مدل با اصلاحاتی که در آن طی سال‌های گذشته صورت گرفته به‌ترتیب به‌صورت مدل SWAP 2.07d، SWAP 2.09d، SWAP 3.0.3، SWAP 3.0.3a، SWAP 3.2.11، SWAP 3.2.14، SWAP 3.2.16 و SWAP 3.2.26، SWAP 3.2.36 می‌باشد.

مدلSWAP در مناطق مختلف جهان از جمله ایران مورد ارزیابی، واسنجی و صحت‌یابی قرار گرفته است و نتایج مطلوبی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای از خود نشان‌داده است. خانی قریه گپی و همکاران (۱۳۸۶) در خراسان رضوی در کشت چغندرقند با استفاده از مدل SWAP پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، مشاهده کردند که مدل عملکرد را به‌طور متوسط ۱۰ درصد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرد و آزمون t-test تفاوت معنی‌داری را بین عملکرد پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده نشان نداد.

امیری و همکاران (۱۳۸۸) در رشت در مؤسسه تحقیقات برنج کشور مدل‌های ORYZA2000، SWAP و WOFOST را تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری مورد ارزیابی قراردادند. نتایج این تحقیق نشان داد که شبیه‌سازی مقدار عملکرد نهایی با مدل ORYZA2000 نسبت به دو مدل دیگر دقت بیشتری دارد.

وردی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۹) برای آزمایش‌های مزرعه‌ای بر روی محصولات زراعی در شبکه‌های

[1] Field scale
[2] Wageningen
[3] Altera
[4] Agrohydrological

آبیاری آبشار و رودشت اصفهان مدل SWAP را به‌روش مدل‌سازی معکوس واسنجی کردند و توابع تولید- آب- شوری را تعیین نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان سود خالص با افزایش عمق آب آبیاری، ابتدا روند صعودی و سپس روند نزولی دارد. در حالت محدودیت آب، برای یک مقدار معین آب قابل‌دسترس، بیشینه سود خالص از کشت محصول پیاز حاصل شد.

زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۹) در منطقه بسطام شاهرود در کشت پیاز مجهز به سامانه آبیاری قطره‌ای عملکرد محصول و وضعیت رطوبت خاک را به‌کمک مدل SWAP شبیه‌سازی کرده و در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، موردمطالعه قراردادند. نتایج این تحقیق نشان داد که این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی و بهینه‌سازی رطوبت توزیع‌شده در خاک در ناحیه ریشه گیاهان زراعی مورداستفاده قرار گیرد.

نوری و همکاران (۲۰۱۱) در شبکه آبیاری و زهکشی وشمگیر در استان گلستان عملکرد مدل SWAP را در شبیه‌سازی عملکرد محصول، پروفیل شوری و رطوبت خاک در شرایط توأم محدودیت آب و شوری موردمطالعه قراردادند. نتایج این مطالعه نشان داد که این مدل به‌خوبی و با تطابق قابل‌توجهی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین نتایج نشان داد که لحاظ کردن شرایط مرزی پایین در برآورد بهتر پروفیل شوری و رطوبت خاک بسیار مؤثر می‌باشد.

کوهی‌چله‌کران و همکاران (۱۳۹۰) در منطقه ارزوئیه کرمان در کشت ذرت به‌مدت دو سال متوالی به‌صورت طرح اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار که در آن مقدار آب مصرفی در چهار سطح به‌عنوان فاکتور اصلی و رقم در سه سطح به‌عنوان فاکتور فرعی انجام شد و با استفاده ازمدل SWAP عملکرد محصول، شاخص سطح برگ و حجم آب آبیاری شبیه‌سازی‌شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. نتایج نشان داد که داده‌های اندازه‌گیری شده در رقم سینگل کراس ۷۰۳ کمترین اختلاف را با داده‌های شبیه‌سازی‌شده داشتند.

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی، تحلیل حساسیت و واسنجی مدل SWAP در کشت سویا جهت برآورد بهره‌وری مصرف آب و عملکرد و اجزای عملکرد محصول تحت تیمارهای مختلف آبیاری و اعتبارسنجی آن در سال زراعی بعدی می‌باشد. این تحقیق به‌صورت دوساله انجام‌شده است که نتایج ارزیابی‌ها را می‌تواند با دقت بیشتری ارائه نماید. نوآوری این پژوهش، ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد گیاه سویا می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه اجرای طرح و قالب طرح آزمایشی کشاورزی

این تحقیق در دو سال زراعی متوالی ۸۸-۱۳۸۷ و ۸۹-۱۳۸۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. منطقه موردمطالعه در موقعیت طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا قرارگرفته است. بافت خاک مزرعه لوم برای عمق خاک ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک بود و متوسط درصد حجمی رطوبت درحد ظرفیت زراعی (θ_{fc}) ۳۲/۲، درحد نقطه پژمردگی (θ_{wp}) ۱۶ و جرم مخصوص ظاهری (ρ_b) ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ضریب تخلیه مجاز مدیریتی رطوبت (MAD) برای سویا ۶۵٪ (بر اساس توصیه نشریه تخصصی آبیاری و زهکشی شماره ۵۶ فائو، آلن و همکاران ۱۹۹۸) در نظر گرفته شد.

آزمایش به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و چهار تیمار آبیاری بر روی سویا رقم ویلیامز انجام شد. برای حذف اثرات ناشی از نفوذ آب از تیمارهای مختلف روی یکدیگر و از بین بردن اثرات حاشیه‌ای، فواصل طولی بین کرت‌ها ۰/۹ متر، فواصل عرضی بین کرت‌ها ۰/۷۵ متر و اندازه‌گیری‌ها فقط از دو خط کاشت وسط هر کرت انجام شد. خطوط کاشت در وسط پشته‌ها قرار گرفت. به‌علت کوتاهی جویچه‌های داخل کرت، انتهای شیارها بسته در نظر گرفته شد. تیمارهای آبیاری جویچه‌ای اعمال شده عبارت بودند از: تیمار آبیاری بخشی منطقه ریشه (Partial Root Drying)

در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (PRD50%)، تیمار آبیاری کامل (تیمار شاهد FI)، تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (DI50%) و تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۷۵ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (DI75%). به‌علت کوتاهی طول جویچه‌های آبیاری و جلوگیری از تشکیل رواناب، انتهای شیارها بسته در نظر گرفته شد. با استفاده از یک مته نمونه‌برداری در طول فصل کشت به‌صورت منظم به فواصل دو روز دو روز یک نمونه خاک از هر تکرار تیمار آبیاری کامل در سه عمق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتی‌متر از سطح خاک تهیه شد. سپس با تعیین درصد رطوبت وزنی متوسط و از طرفی با داشتن جرم مخصوص ظاهری خاک و همچنین درصد رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی از تجزیه فیزیکی خاک مزرعه قبل از کشت، درصد رطوبت حجمی و نقصان رطوبتی خاک تعیین شد. با تعیین اختلاف بین نقصان رطوبتی خاک و ضریب تخلیه مجاز مقدار و زمان آبیاری و درنتیجه نیاز آبی و برنامه‌ریزی آبیاری برای این دو سال زراعی محاسبه شد. اعمال تیمارهای کم آبیاری درست پس از پنج‌برگی شدن گیاه انجام شد. میزان تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده در تیمارهای FI، $DI_{75\%}$، $DI_{50\%}$ و $PRD_{50\%}$ به‌ترتیب برابر ۶۵۶/۳، ۵۸۶/۳، ۴۹۶/۶ و ۴۵۷/۲ می‌باشد. پارامترهای گیاهی موردنیاز مدل و مشخصات عمومی گیاه در جداول ۱، ۲ و ۳ آورده شده است (سرائی تبریزی و همکاران ۱۳۸۹، بابازاده و همکاران ۱۳۸۹، سرائی تبریزی و همکاران ۱۳۹۱، سرائی تبریزی و همکاران ۲۰۱۲، بابازاده و سرائی تبریزی ۲۰۱۳).

جدول ۱- برنامه‌ریزی آبیاری برای گیاه سویا در دور آبیاری ۷ روز طی دو سال زراعی (سرائی تبریزی و همکاران ۱۳۸۹).

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

توصیف مدل SWAP

مدل SWAP یک مدل شبیه‌سازی بیلان آب و املاح در خاکی تحت کشت یا آیش با انواع مختلفی از شرایط مرزی و لحاظ زهکشی مصنوعی و آبیاری می‌باشد. این مدل، یک مدل مزرعه‌ای است که عوامل مهمی مانند: خاک، آب، اتمسفر و گیاه را در نظر می‌گیرد (کروس و همکاران ۲۰۰۳). SWAP مدلی یک‌بعدی است که معادلهٔ ریچاردز مربوط به حرکت قائم آب در سامانه ناهمگن خاک- ریشهٔ گیاه را به‌روش تفاضل محدود، حل می‌کند (ون دم و همکاران ۱۹۹۷):

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)-S(h)\right] \qquad [۱]$$

که در آن، h بار فشاری خاک برحسب سانتی‌متر، Z بار ثقل برحسب سانتی‌متر، t زمان‌بر حسب روز، K هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر بر روز)، θ رطوبت حجمی خاک (درصد) و S میزان جذب آب توسط ریشه‌ها در روز (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب در روز) می‌باشد.

پارامتر S(h) میزان جذب آب توسط ریشه‌ها را شبیه‌سازی می‌کند و بستگی به بار فشاری خاک و بیشینه نرخ جذب آب (S_{max}) دارد.

$$S(h)=\alpha(h)S_{\max} \qquad [۲]$$

که در آن، $\alpha(h)$ عامل کاهش جذب آب توسط ریشه و S_{max} بیشینه نرخ جذب آب ریشه‌ها می‌باشد. در این معادله فرض‌شده است بیشینه نرخ جذب آب ریشه‌ها به‌صورت یکنواخت در عمق مؤثر ریشه‌ها توزیع می‌گردد.

$$S_{\max}=\frac{T_P}{Z} \qquad [۳]$$

که در آن، T_p نرخ تعرق پتانسیل (متر در روز)، Z عمق مؤثر ریشه‌ها (عمقی که ۸۰ درصد ریشه مشاهده شود) (متر) می‌باشد.

جدول۲- مقادیر پارامترهای گیاهی ورودی موردنیاز برای مدل (بابازاده و همکاران ۱۳۸۹).

پارامتر گیاهی موردنیاز	مقادیر
مجموع دمای روزانه از مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی(^oC)	۶۰۰
مجموع دما از مرحله گل‌دهی تا برداشت (^oC)	۱۰۰۰
سطح برگ ویژه ($cm^2\ g^{-1}$)*	۰/۰۰۲۵
بیشینه افزایش نسبی در سطح برگ**	۰/۰۰۸
کارایی مصرف نور ($kg\ CO_2\ J^{-1}$)***	۰/۴
بیشینه شدت جذب CO_2 ($kg\ ha^{-1}\ hr^{-1}$)****	۳۸

*نسبت سطح برگ به وزن خشک برگ می‌باشد و این پارامتر از داده‌های آزمایش اندازه‌گیری شد.

**یکی از پارامترهای مدیریتی برای شبیه‌سازی رفتار گیاه می‌باشد که پس از انتخاب نوع گیاه و وارد کردن مقدار شاخص سطح برگ و سطح برگ ویژه، مدل SWAP مقدار آن را برآورد می‌نماید.

***یک راهکار مؤثر و کارا برای کمّی کردن تجمع ماده خشک است و به‌صورت افزایش ماده خشک به‌ازای جذب هر واحد تابش فعال فتوسنتزی تعریف‌شده و اغلب به‌صورت شیب رگرسیون خطی زیست‌توده در مقابل تابش جذب‌شده تجمعی محاسبه می‌شود.

**** بر اساس نوع گیاه، بیشینه تبخیر و تعرق تجمعی ده‌روزه، داده‌های اقلیمی ورودی مدل و شاخص سطح برگ، این پارامتر توسط مدل برآورد می‌گردد (کنری و همکاران ۱۹۹۹، کروس و همکاران ۲۰۰۳، اکمل و جانسنس ۲۰۰۴).

جدول ۳- مشخصات عمومی گیاه سویا رقم ویلیامز در مزرعه موردمطالعه (سرائی تبریزی و همکاران ۱۳۹۱، سرائی تبریزی و همکاران ۲۰۱۲، بابازاده و سرائی تبریزی ۲۰۱۳).

گیاه	سال زراعی	تعداد آبیاری	تاریخ کاشت	تاریخ برداشت	بیشینه عملکرد محصول در تیمار شاهد($ton\ ha^{-1}$)	متوسط عملکرد محصول در تیمار شاهد($ton\ ha^{-1}$)
سویا	۸۸-۱۳۸۷	۱۷	۱۲ خرداد	۸ مهر	۳۸۹۹/۶	۳۷۹۷/۶
سویا	۸۹-۱۳۸۸	۱۷	۹ خرداد	۳ مهر	۴۰۴۷/۲	۴۰۴۲/۲

پارامترهای موردنیاز مدل

هر مدل کامپیوتری نیاز به شرایط مرزی دارد که به‌عنوان ورودی به مدل داده می‌شود. در مدلSWAP شرایط مرزی بالا تبخیر و تعرق پتانسیل (بر اساس معادله پنمن- مانتیث) و مجموع بارندگی و آبیاری تعریف‌شده است. مرز پایینی به‌علت پایین بودن سطح ایستابی در منطقه به‌صورت زهکشی آزاد برای مدل تعریف شد. در مدلSWAP برای شبیه‌سازی مراحل رویشی گیاه، از یک مدل دقیق همراه با تمام جزئیات[1] به‌جای مدل ساده[2] که فقط عملکرد نسبی محصول را شبیه‌سازی می‌نماید، استفاده شد.

برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک نیاز به داده‌های خاک‌شناسی شامل: توابع هیدرولیکی خاک، رطوبت قابل نگهداشت خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی نسبت به رطوبت خاک است که از مدل ون‌گنوختن و همکاران (۱۹۹۱) در برنامه RetC[3] استفاده‌شده است. این برنامه با استفاده از پارامترهای بافت خاک (درصد سیلت، شن و رس)، چگالی ظاهری خاک و درصد مواد آلی با استفاده از توابع انتقالی[4] یا شبکه عصبی مصنوعی[5] توابع هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند.

ارزیابی مدل SWAP

برای ارزیابی مدل از شاخص انحراف معیار (SD)[6]، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)[7]، میانگین خطای مطلق (MAE)[8] و ضریب مقدار باقیمانده (CRM)[9] که در معادله‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ ارائه‌شده‌اند، استفاده شد:

$$SD = \left\{ \sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2 / n \right\} \qquad [۴]$$

$$RMSE = \left\{ \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2 / n \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad [۵]$$

$$MAE = \left\{ \sum_{i=1}^{n} |O_i - P_i| \right\} / n \qquad [۶]$$

$$CRM = \left\{ \sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i \right\} / \sum_{i=1}^{n} O_i \qquad [۷]$$

که در آن، P، O، $\overline{O}$ و n به‌ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده، اندازه‌گیری‌شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری‌شده و تعداد داده‌ها می‌باشند و شاخص i نیز نشان‌دهندهٔ هر یک از داده‌هاست. مقدار $RMSE$ نشان می‌دهد که تا چه حد اختلاف بین هر یک از مقادیر پیش‌بینی‌شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده متناظر، صرف‌نظر از این‌که کمتر یا بیشتر باشد، وجود دارد. شاخص MAE نشان‌دهنده خطای مطلق مدل و مقدار CRM نشان‌دهندهٔ تمایل مدل برای برآورد بالاتر یا پایین‌تر در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. 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. درصورتی‌که همه مقادیر پیش‌بینی‌شده برابر مقادیر اندازه‌گیری‌شده باشند، شاخص $RMSE$، MAE، SD و CRM برابر با صفر خواهند شد (لوگ و گرین ۱۹۹۱). ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده پروفیل خاک و پارامترهای

[1] Detailed model
[2] Simple model
[3] Retention curve
[4] Pedotransfer functions (PTF)
[5] Artificial neural network (ANN)
[6] Standard deviation
[7] Root mean square error
[8] Mean absolute error
[9] Coefficient of residual mass

معادله ون‌گنوختن استخراج‌شده از مدل RetC در جدول۴ ارائه‌شده است.

تحلیل حساسیت[1]، واسنجی[2] و اعتبارسنجی[3] مدل SWAP

برای تحلیل حساسیت مدل SWAP، ابتدا با استفاده از رابطه ضریب حساسیت (رابطه ۸)، این مدل تحلیل حساسیت شده و پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی نتایج (داده‌های خروجی) حاصل از شبیه‌سازی مدل دارند مشخص‌شده و بر اساس این داده‌ها و تغییر آن و مقایسه خروجی مدل با داده‌های واقعی حاصل از مطالعه میدانی در سطح مزرعه، تا حدی که نتایج شبیه‌سازی مدل نسبت به مقادیر واقعی اختلاف ناچیزی نشان‌دهند که اصطلاحاً بتوان گفت پارامترهای که بیشترین تأثیر را روی نتایج خروجی مدل دارند به‌خوبی تعیین‌شده و مدل تحلیل حساسیت شده است.

$$Sc = \left[(\frac{\Delta W}{\overline{W}}) / (\frac{\Delta P}{\overline{P}}) \right] \qquad [۸]$$

که در آن Sc ضریب حساسیت بدون بعد، ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، $\overline{W}$ متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و $\overline{P}$ متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل می‌باشد. برای استفاده از رابطه ۸ برای تحلیل حساسیت مدل دامنه تغییرات ضریب حساسیت توسط لیو و همکاران (۲۰۰۷) و هنگ و همکاران (۲۰۰۹) پیشنهاد شده است.

برای واسنجی مدل در منطقه موردمطالعه از داده‌های سال اول آزمایش استفاده شد. داده‌های استفاده‌شده برای واسنجی مدل عبارت از: شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه بود. سطح برگ در سه مرحله حساس رشد و در پنج نوبت اندازه‌گیری شد. مقدار این شاخص توسط مدل هم برآورد شده است. عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک نیز در مرحله برداشت محصول تعیین شد. جهت واسنجی مدل از تحلیل لوگ و گرین (۱۹۹۱) (محاسبه آماره‌های مختلف *RMSE*، *MAE*، *CRM* و مقایسه آن‌ها با یکدیگر بر اساس تعریف‌ها و دامنه‌های تعیین‌شده) استفاده شد. جهت اعتبارسنجی مدل SWAP که برای داده‌های سال اول کشت تحلیل حساسیت و واسنجی شده بود، از داده‌های سال دوم زراعی استفاده گردید.

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت مدل SWAP

نتایج مقادیر تحلیل حساسیت مدل نشان می‌دهد مدل نسبت به پارامترهای رطوبت باقی‌مانده در خاک، سطح برگ ویژه و ارتفاع متوسط گیاه بسیار حساس است. بنابراین خطای حاصل از اندازه‌گیری آن داده‌ها در سطح مزرعه قابل اغماض نمی‌باشد. همچنین حساسیت مدل نسبت به تغییرات بیشینه افزایش نسبی در سطح برگ، هدایت هیدرولیکی و عمق آب آبیاری هم نسبتاً متوسط است، بنابراین بایستی این داده‌ها با دقت قابل ملاحظه‌ای اندازه‌گیری شوند زیرا در غیر این صورت خطای قابل‌توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مدل به‌وجود می‌آید. همچنین بر اساس مقادیر ضریب حساسیت (S_c)، بیشترین حساسیت مدل مربوط به رطوبت باقی‌مانده خاک (به‌ویژه در تیمار آبیاری بخشی منطقه ریشه) و کمترین حساسیت مدل مربوط به عمق آب آبیاری (به‌ویژه در تیمار آبیاری کامل) می‌باشد. این نتیجه نشان‌دهنده آن است که مدل SWAP به کاهش رطوبت خاک بسیار حساس می‌باشد که از این حیث با نتایج کروس و همکاران (۲۰۰۱) و لیو و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت دارد. در جدول ۶ درجه حساسیت مدل SWAP نسبت به تغییرات عوامل ورودی مدل ارائه شده است.

[1] Sensitivity analysis
[2] Calibration
[3] Validation

جدول۴- مشخصات فیزیکی پروفیل خاک و پارامترهای معادله ون‌گنوختن استخراج‌شده از مدل RetC.

عمق خاک (cm)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	رس (درصد)	θ_{sat} ($m^3\ m^{-3}$)	θ_{res} ($m^3\ m^{-3}$)	K_{sat}^* (cm d^{-1})	α (cm^{-1})	n	λ
۰-۲۰	۳۰/۱	۴۶/۲	۲۳/۷	۰/۳۹	۰/۰۶	۹/۶۶	۰/۰۱	۱/۴۱	۰/۱۷
۲۰-۴۰	۳۰	۳۴/۴	۳۵/۷	۰/۳۹	۰/۰۸	۳/۸۶	۰/۰۲	۱/۳۲	۰/۱۷
۴۰-۶۰	۳۵/۱	۴۲/۸	۲۲/۱	۰/۳۸	۰/۱۲	۸/۷	۰/۰۱	۱/۴۵	۰/۱۷

*** در مدل SWAP، دو ضریب K تعریف می‌شود که یکی ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat}) و دیگری متوسط ضریب تنش آبی در تیمارهای مدیریتی کم آبیاری (K_s) می‌باشد.**

جدول ۵- طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای دامنه تغییرات ضریب حساسیت (لیو و همکاران ۲۰۰۷).

دامنه تغییرات	S_c=۰	۰< S_c < ۰/۳	۰/۳< S_c < ۱/۵	S_c>۱/۵
شدت حساسیت	بدون حساسیت	حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت زیاد

جدول ۶- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل SWAP .

	پارامترهای ورودی مدل	مقدار Sc در حالت ۲۵٪ +	مقدار Sc در حالت ۲۵٪-	درجه حساسیت
پارامترهای گیاهی	سطح برگ ویژه	۰/۵۳	۱/۵۷	متوسط- زیاد
	بیشینه افزایش نسبی در سطح برگ	۰/۶۹	۰/۲۸	متوسط- کم
	ارتفاع متوسط گیاه	۰/۷۱	۱/۹۶	متوسط-زیاد
رطوبت باقی‌مانده	FI	۰/۴۶	۰/۶۸	متوسط- متوسط
	$DI_{75\%}$	۰/۱۸	۱/۵۳	کم- زیاد
	$DI_{50\%}$	۰/۱۱	۱/۷۸	کم- زیاد
	$PRD_{50\%}$	۰/۰۹	۱/۹۹	کم- زیاد
K_{sat}	هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی	۰/۴۳	۰/۵۱	متوسط- متوسط
عمق آب آبیاری	FI	۰/۱	۰/۰۳	کم- ندارد
	$DI_{75\%}$	۰/۰۲	۰/۳۶	کم- متوسط
	$DI_{50\%}$	۰/۰۸	۰/۳۹	کم- متوسط
	$PRD_{50\%}$	۰/۲۹	۱/۴۸	کم- متوسط

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

نتایج شبیه‌سازی مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه در جداول ۷، ۸ و ۹ ارائه‌شده است. مطابق جداول ۷ و ۸ کلیه مقادیر شبیه‌سازی‌شده شاخص سطح برگ در کلیه تیمارها کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به‌دست آمد. بر اساس جدول ۹ نتایج این تحقیق دوساله نشان داد که همبستگی نسبتاً خوبی بین مشاهدات مزرعه‌ای و نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مدلSWAP وجود دارد اما برآورد مدل کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بوده و همچنین ضریب *RMSE* در سطح پایینی است. ضریب *RMSE* برای شاخص سطح برگ کمتر از انحراف معیار (*SD*) شده که این نشان‌دهندهٔ کارکرد مطلوب مدل است. ضریب *CRM* بزرگ و مثبت شده و تمایل مدل را در برآورد کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. کوهی چله کران و همکاران (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای دوساله بر روی هیبریدهای ذرت دانه‌ای در ارزوئیه کرمان نتیجه گرفتند که مدلSWAP شاخص سطح برگ را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده برآورد می‌کند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

جدول۷- مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف آبیاری سال ۸۸-۸۷.

مرحله نمونه‌برداری	شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده (-)				شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده (-)			
	FI	$DI_{75\%}$	$DI_{50\%}$	$PRD_{50\%}$	FI	$DI_{75\%}$	$DI_{50\%}$	$PRD_{50\%}$
گل‌دهی	۳/۷۴	۳/۵۳	۲/۷۶	۲/۴۶	۳/۲۶	۳/۳۳	۱/۹۸	۱/۴۴
تشکیل غلاف	۴/۷۱	۳/۴۴	۲/۸۹	۲/۴۹	۴/۱۲	۳/۱۰	۲/۱۷	۲/۰۵
پرشدن غلاف	۵/۶۸	۳/۷۹	۲/۹۵	۲/۵۷	۴/۹۶	۳/۲۵	۲/۵	۲/۲۳

جدول۸- مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف آبیاری سال ۸۹-۸۸.

مرحله نمونه‌برداری	شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده (-)				شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده (-)			
	FI	$DI_{75\%}$	$DI_{50\%}$	$PRD_{50\%}$	FI	$DI_{75\%}$	$DI_{50\%}$	$PRD_{50\%}$
گل‌دهی	۳/۲۹	۳/۱۱	۲/۶۱	۲/۲۵	۳/۱۰	۲/۸۴	۱/۹۸	۱/۴۴
تشکیل غلاف	۴/۲۷	۳/۵۲	۲/۸۳	۲/۶۲	۳/۹۳	۳/۱۵	۲/۱۷	۲/۰۵
پرشدن غلاف	۴/۶۹	۳/۹۸	۲/۹۰	۲/۷۸	۴/۳۶	۳/۶۶	۲/۵۰	۲/۲۳

جدول۹- ارزیابی آماری شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده.

آماره	سال زراعی۸۸-۸۷	سال زراعی۸۹-۸۸
R^2 (-)	۰/۸۴	۰/۸۷
$RMSE$ (٪)	۷/۶۹	۶/۳۶
MAE (٪)	۱۰/۵۷	۸/۵۰
CRM (-)	۴/۲۰	۳/۸۰
SD (٪)	۱۲/۷۰	۱۰/۴۰

عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در جداول ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ ارائه شده‌است. بر اساس نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داده شد که همبستگی نسبتاً خوبی بین مشاهدات مزرعه‌ای و نتایج به‌دست‌آمده از مدل در هر دو سال آزمایش وجود دارد. ضریب *RMSE* برحسب کیلوگرم در هکتار برای عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک در هر دوسال زراعی در حد پایین و کمتر از انحراف معیار می‌باشد که این نشان‌دهندهٔ عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی داده‌ها و واسنجی قابل‌قبول مدل می‌باشد. در تمام تیمارها مدل عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرده است (*CRM* منفی). این نتایج با نتایج حاصل از مطالعات امیری و همکاران (۱۳۸۸)، وردی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۹) و کوهی چله کران و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد.

جدول ۱۰- مقادیر عملکرد بیولوژیک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال زراعی۸۸-۸۷ و ۸۹-۸۸.

تیمار آبیاری	عملکرد بیولوژیک اندازه‌گیری‌شده ($kg\ ha^{-1}$)		عملکرد بیولوژیک شبیه‌سازی شده ($kg\ ha^{-1}$)		درصد انحراف مقادیر	
	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸
FI	۹۶۹۷/۷۰	۹۹۶۴/۲۰	۹۸۰۷/۸۰	۱۰۲۴۰/۹۰	۱/۱۲	۲/۷۰
$DI_{75\%}$	۸۸۳۷/۸۰	۹۷۰۰/۶۰	۹۱۰۰/۵۰	۹۸۰۹/۹۰	۲/۸۹	۱/۱۱
$DI_{50\%}$	۵۵۱۱/۲۰	۶۰۲۶/۰۰	۶۳۲۰/۴۰	۶۳۳۷/۸۰	۱۲/۸۰	۴/۹۱
$PRD_{50\%}$	۵۳۰۱/۷۰	۵۴۲۰/۵۰	۶۲۰۱/۹۰	۶۰۰۰/۰۰	۱۴/۵۱	۹/۶۶

جدول ۱۱- ارزیابی آماری عملکرد بیولوژیک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده.

آماره	سال زراعی۸۸-۸۷	سال زراعی۸۹-۸۸
RMSE (٪)	۱۱/۴۰	۱۵/۶۰
MAE (٪)	۱۲/۹۰	۱۰/۰۰
CRM (-)	-۰/۶۰	-۰/۷۳
SD (٪)	۱۸/۵۰	۱۶/۲۰

جدول ۱۲- مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال‌های زراعی۸۸-۸۷ و ۸۹-۸۸.

	عملکرد دانه اندازه‌گیری‌شده ($kg\ ha^{-1}$)		عملکرد دانه شبیه‌سازی شده ($kg\ ha^{-1}$)		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	۴۱۶۵/۷	۳۸۷۲/۴	۴۳۰۲/۵	۱/۹۳	۳/۱۷
$DI_{75\%}$	۳۶۶۷/۱	۳۹۰۲/۵	۳۷۹۶/۵	۴۰۲۰	۳/۴۱	۲/۹۳
$DI_{50\%}$	۳۲۶۹/۵	۳۴۱۱	۳۴۵۵/۲	۳۶۶۴/۳	۵/۳۷	۶/۹۱
$PRD_{50\%}$	۳۱۸۷/۱	۳۲۲۶/۶	۳۲۹۲/۸	۳۵۴۱/۵	۳/۲۱	۶/۰۷

جدول ۱۳- مقدار آماره‌های محاسبه شده برای تعیین قابل‌اعتماد بودن مدل SWAP در تخمین عملکرد دانه.

سال زراعی	*CRM*(-)	*RMSE*(٪)	*MAE*(٪)
۸۸-۸۷	-۰/۲۲	۳/۲۱	۴/۳۷
۸۹-۸۸	-۰/۳۵	۴/۴۶	۴/۹۳

بر اساس جداول ۱۴ و ۱۵، در هر دوسال زراعی در حد پایین و کمتر از انحراف معیار می‌باشد که این نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی داده‌ها و واسنجی قابل‌قبول مدل می‌باشد. مقادیر شبیه‌سازی شده بهره‌وری مصرف آب نیز بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد شدند (*CRM* منفی). در این پژوهش، بهره‌وری مصرف آب سویا با آب آبیاری کاربردی در مزرعه محاسبه‌شده نه با داده‌های لایسیمتری چراکه مقادیر بهره‌وری مصرف آب آبیاری و بهره‌وری مصرف آب (با اعمال داده لایسیمتری) متفاوت است.

جدول ۱۴- مقادیر بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای سویا در سال‌های ۸۸-۸۷ و ۸۹-۸۸.

	بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری‌شده ($kg\ m^{-3}$)		بهره‌وری مصرف آب شبیه‌سازی شده ($kg\ m^{-3}$)		درصد انحراف مقادیر	
تیمار آبیاری	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸	سال ۸۸-۸۷	سال ۸۹-۸۸
FI	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۴۲	۰/۴۶	۴/۵۵	۶/۱۲
$DI_{75\%}$	۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۵۲	۰/۵۸	۷/۱۴	۶/۴۵
$DI_{50\%}$	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۶۹	۰/۷۴	۹/۲۱	۸/۶۴
$PRD_{50\%}$	۱/۴۷	۱/۵۷	۱/۴۳	۱/۴۹	۲/۷۲	۵/۰۹

جدول ۱۵- مقدار آماره‌های محاسبه شده برای تعیین قابل‌اعتماد بودن مدل **SWAP** در تخمین بهره‌وری مصرف آب.

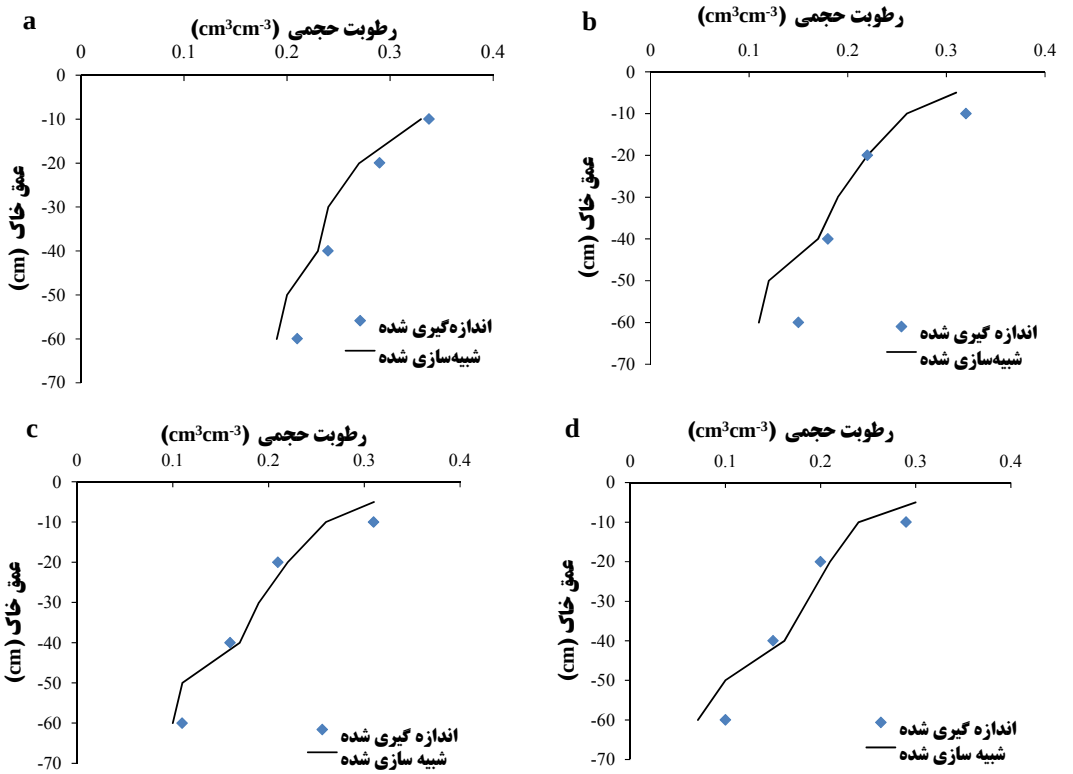
سال زراعی	*CRM* (-)	*RMSE* (٪)	*SD* (٪)	*MAE* (٪)	R^2 (-)
۸۸-۸۷	-۰/۱۹	۴/۷۶	۹/۱۴	۴/۳۷	۰/۸۵
۸۹-۸۸	-۰/۲۳	۵/۸۴	۱۰/۲۳	۴/۹۳	۰/۸۹

تغییرات رطوبت

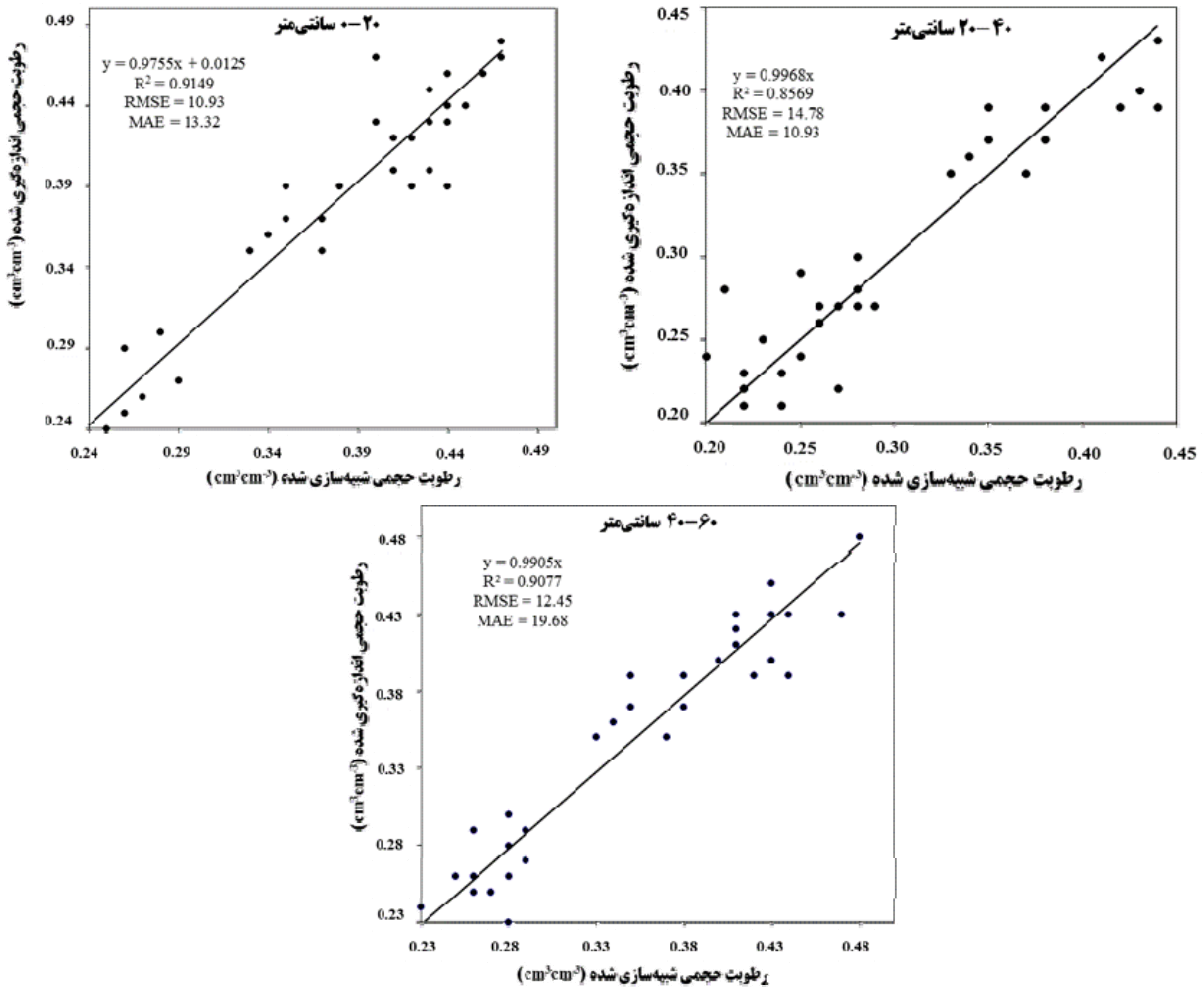
با استفاده از نرم‌افزار SAS بین زوج مرتب‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی شده رابطه رگرسیونی برقرار شد و با انجام آزمون t-test مشخص شد که بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ازنظر آماری در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد (جدول ۱۶). نتایج حاصل از شبیه‌سازی رطوبت خاک در طول دوره رشد در اعماق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ سانتی‌متری توسط مدل SWAP و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده‌شده است. مقدار *RMSE*، *MAE* و ضریب تبیین نشان‌دهنده شبیه‌سازی نسبتاً قابل‌قبول رطوبت خاک توسط مدل SWAP در سه عمق فوق در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد که با نتایج پژوهش کوهی چله کران و همکاران (۱۳۹۰) همخوانی دارد.

جدول ۱۶- تجزیه و تحلیل آزمون t-test در مقایسه نتایج حاصل از رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده در آبیاری چهارم، ششم و دهم.

عمق خاک (cm)	رطوبت خاک (٪)		P_{value}	df	معنی‌داری
	میانگین	واریانس			
۰-۲۰	۰/۳۱	۰/۰۶	۰/۰۰۲	۲۹	ns
۲۰-۴۰	۰/۲۸	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۲۹	ns
۴۰-۶۰	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۰۲۲	۲۹	ns
۰-۲۰	۰/۳۲	۰/۰۲	۰/۰۱۵	۲۹	ns
۲۰-۴۰	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۰۰۰	۲۹	ns
۴۰-۶۰	۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۰۰۳	۲۹	ns
۰-۲۰	۰/۳۳	۰/۰۷	۰/۰۱۰	۲۹	ns
۲۰-۴۰	۰/۲۹	۰/۰۳	۰/۰۰۵	۲۹	ns
۴۰-۶۰	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۰۰۷	۲۹	ns



شکل ۱- توزیع رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده تا عمق ۶۰ سانتی‌متری (a، b، c و d به‌ترتیب مربوط به تیمارهای FI، $DI_{75\%}$، $DI_{50\%}$ و $PRD_{50\%}$).



شکل۲- مقایسه مقادیر رطوبت شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده در عمق‌های مختلف خاک.

نتیجه‌گیری کلی

مقدار بهره‌وری مصرف آب، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در هر دو سال زراعی بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به‌دست آمد ولی مقادیر شبیه‌سازی‌شده شاخص سطح برگ پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود که ممکن است دلیل این امر حساسیت زیاد مدل در تغییر حتی بسیار جزئی در برخی از پارامترهای ورودی مشخصات خاک شامل رطوبت باقی‌مانده و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و همچنین پارامترهای گیاهی متعدد به‌ویژه ارتفاع متوسط گیاه و سطح برگ ویژه باشد، که باید به‌صورت بسیار دقیق اندازه‌گیری شوند. رطوبت برآورد شده با مدل در سه عمق مختلف خاک دارای R^2 نسبتاً قابل قبولی می‌باشد. آماره‌های *RMSE*، *MAE* و همچنین آزمون مقایسه میانگین‌های t-test نیز شبیه‌سازی نسبتاً قابل‌قبول رطوبت خاک را تأیید می‌کنند. توصیه می‌شود عملکرد مدل SWAP با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای به‌ویژه استفاده از تیمارهای آبیاری بخشی منطقه ریشه در سطح مزارع کشاورزان موردبررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به قابلیت این مدل در اتصال به برنامه GIS از ابزارهای مدیریتی روز دنیا مانند تصاویر ماهواره‌ای و سنجش‌ازدور استفاده شود تا نهایتاً بتوان پیش‌بینی مناسب‌تری از عملکرد و اجزای عملکرد محصول به‌دست آورد.

منابع مورد استفاده

امیری ا، کاوسی م و کاوه ف، ۱۳۸۸. ارزیابی مدل‌های گیاهیORYZA2000، SWAP و WOFOST در مدیریت‌های مختلف آبیاری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۰، شماره ۳، صفحه‌های ۱۳ تا ۲۸.

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

خانی قریه گپی م، داوری ک، علیزاده ا، هاشمی‌نیا م و ذوالفقاران ا، ۱۳۸۶. ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندرقند تحت کمیت‌ها و کیفیت‌های مختلف آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۱، شماره ۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۵.

زارع ابیانه ح، فرخی ا، وظیفه‌دوست م و اژدری خ، ۱۳۸۹. برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۶، صفحه‌های ۱۱۹۷ تا ۱۲۰۹.

سرائی تبریزی م، بابازاده ح، پارسی‌نژاد م و مدرس ثانوی ع، ۱۳۸۹. بهبود کارآیی 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)، جلد ۱۴، شماره ۵۲، صفحه‌های ۱ تا ۱۳.

سرائی تبریزی م، پارسی‌نژاد م، لیاقت، ع. و بابازاده ح، ۱۳۹۱. تعیین نیاز آبی و ضرایب گیاهی سویا در مراحل مختلف رشد. مجله پژوهش و سازندگی، جلد ۱۰۰، شماره ۴، صفحه‌های ۱۱۲-۱۲۱.

کوهی چله‌کران ن، اسلامی ا و اسدی ر، ۱۳۹۰. بهبود مدیریت آبیاری هیبریدهای ذرت دانه‌ای در ارزوئیه کرمان با استفاده از مدل SWAP. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۲، شماره ۱، صفحه‌های ۱۷ تا ۳۲.

نصیری محلاتی م، ۱۳۷۹. مدل‌سازی فرآیندهای رشد گیاهان زراعی. (ترجمه)، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، ۲۸۰ صفحه.

نوروزی م، ماهرانی م و مسچی م، ۱۳۷۸. استفاده از آب‌های شور و لب شور برای آبیاری، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲۶، ۷۶ صفحه.

وردی‌نژاد ح، سهرابی ت، حیدری ن، عراقی‌نژاد ش و فیضی م، ۱۳۸۹. تعیین عمق بهینه آبیاری محصولات زراعی در شرایط شوری با استفاده از مدلSWAP. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۳، صفحه‌های ۴۶۳ تا ۴۷۵.

Akmal M and Janssens MJ, 2004. Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies. Field Crop Research 88: 143-155.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998. FAO Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome.

Babazadeh H and Sarai Tabrizi M, 2013. Combined optimization of soybean water productivity and crop yield by Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). Irrigation and Drainage 62: 425-434.

Bannayan M and Cruot NM, 1999. A stochastic modeling approach for real time forcasting of winter wheat yield. Field Crop Research 62(4): 85-95.

Belmans CJ, Wesseling JG and Feddes RA, 1983. Simulation of water balance of the cropped soil: SWATRE. Journal of Hydrology 63(4): 271-286.

Feddes RA, Kowalik PJ and Zaradny H, 1987. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen University, Researches Report, 189 p.

Heng LK, Hsiao TC, Evett S, Howell T and Steduto P, 2009. Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal 101: 488–498.

Kabat P, Van den Broke BG and Feddes RA, 1992. SWACROP: A water management and crop production simulation model. ICID Bulletin 92, 41(2): 61-84.

Kiniry JR, Tischler, CR and van Esbroeck GA, 1999. Radiation use efficiency and leaf CO_2 exchange for divers C4 grasses. Biomass and Bioenergy 17: 95-112.

Kroes JG, Van Dam JC, Huygen J and Vervoot RW, 1999. User's guide of SWAP version 2.0, simulation of water flow, solute transfer and plant growth in the soil-atmosphere-plant environment, technical document 48, Altera Green World Research, Wageningen, Report 81, Dept. of Water Resources, Wageningen University, 127p.

Kroes JG, Van Bakle PJ, Huygen J, Kroon T and Pastoorse R, 2001. Actualisatie van de hydrology voor STONE 2.0, Report 298, Alterra Wagenningen, pp. 68.

Kroes JG, Van Dam JC, Groenendijk P, Hendriks RF and Jacobs CM, 2003. Reference manual SWAP version 3.2.36: Theory description and user manual. Wageningen University, Alterra Report 1649(02). Alterra Green World Research, Wagenningen, pp. 396.

Letey J, Dinar A and Knapp KC, 1985. Crop-water production function model for saline irrigation waters. Soil Science Society of America Journal 49: 1005-1009.

Loague K, and Green RE, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of Contaminant Hydrology 7: 51-73.

Liu HF, Genard M, Guichard S and Bertin N, 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. Journal of Experimental Botany 58(13): 3567-3580.

Noory H, Van der Zee SE, Liaghat AM, Parsinejad M and Van Dam JC, 2011. Distributed agro-hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the Voshmgir irrigation and drainage network in Northern Iran. Agricultural Water Management 98:1062–1070.

Sarai Tabrizi M, Parsinejad M and Babazadeh H, 2012. Efficiency of partial root drying technique for optimizing soybean crop production in semi-arid regions. Irrigation and Drainage 61(1): 80-88.

Van Dam JC, 2000. Field scale, water flow and solutes transport, SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD Thesis, Wageningen University, pp. 167.

Van Dam JC, Stricker JN and Droogers P, 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multi-step outflow experiment. Soil Science Society American Journal 58(3): 647-652.

Van Dam JC, Huygen J, Wesseling JG, Feddes RA, Kabat P, Van Walsum PE, Groenendijk P and Van Diepen CA, 1997. Theory of SWAP, version 2, Simulation of water flow, solute transported plant growth in the soil-water atmosphere-plant environment, Report No. 71, Dept. of Water Resource, Wageningen Agricultural University, pp. 167.

Van Genuchten Th, Leij FJ and Yates, SR, 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Report No. EPA/600/2-91/065. R. S.

Wesseling JG, Elbers JA, Kabat P and Van den Broek B, 1991. SWATRE; instructions for input. Internal note, Winard Staring Center, Wageningen, pp. 160.