

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 به دست آمد. بر اساس نتایج آماره‌های محاسبه‌شده در این پژوهش، بهترین شبیه‌سازی مدل که بیشترین مطابقت را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت به ترتیب در عملکرد دانه، بهره‌وری مصرف آب، شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیک و مقدار رطوبت حجمی خاک به دست آمد (کمترین میزان $RMSE$ و بیشترین میزان ضریب تبیین). همچنین نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد 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) به شدت تغییر می‌کنند.

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

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

H Babazadeh^{*1}, M Sarai Tabrizi²

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

آتی از جمله 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

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

و شوری و برنامه‌ریزی آبیاری را انجام دهد (کروس و همکاران ۱۹۹۹).

مدل SWAP جانشین مدل آگروهیدرولوژیکی^۴ مشهور SWATR می‌باشد (فدیس و همکاران ۱۹۸۷). نسخه‌های منتشرشده قبلی مدل SWAP به‌ترتیب با نام SWATR(E) (فدیس 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. مدل SWAP 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 نشان داده است. خانی قریه‌گپی و همکاران (۱۳۸۶) در خراسان رضوی در کشت چغندر قند 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 SWAP، ORYZA2000 و WOFOST را تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری مورد ارزیابی قرار دادند. 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

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 به‌طور کلی 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 (بنیان 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^۱ می‌باشد که عوامل مهمی مانند خاک، آب، اتمسفر و گیاه را در نظر می‌گیرد. در کشور هلند (دانشگاه کشاورزی واگنینگن^۲ و در مؤسسه تحقیقاتی آلترا^۳) توسعه داده شده 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

¹ Field scale

² Wageningen

³ Altera

⁴ Agrohydrological

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 به صورت دوساله انجام شده 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 مورد مطالعه در موقعیت طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۲۵ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا قرار گرفته است. بافت خاک مزرعه لوم برای عمق خاک ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری خاک بود و متوسط درصد حجمی رطوبت در حد ظرفیت زراعی (θ_{fc}) ۳۲/۲، در حد 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 به صورت 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. به علت 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)

آبیاری آبشار و رودشت اصفهان مدل SWAP را به روش 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 ایبانه و همکاران (۱۳۸۹) در منطقه بسطام شاهرود در کشت پیاز مجهز به سامانه آبیاری قطره‌ای عملکرد محصول و وضعیت رطوبت خاک را به کمک مدل SWAP شبیه‌سازی کرده و در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، مورد مطالعه قراردادند. نتایج این تحقیق نشان داد که این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی و بهینه‌سازی رطوبت توزیع شده در خاک در ناحیه ریشه گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گیرد.

نوری و همکاران (۲۰۱۱) در شبکه آبیاری و زهکشی و شمگیر در استان گلستان عملکرد مدل SWAP را در شبیه‌سازی عملکرد محصول، پروفیل شوری و رطوبت خاک در شرایط توأم محدودیت آب و شوری مورد مطالعه قراردادند. نتایج این مطالعه نشان داد که این مدل به خوبی و با تطابق قابل توجهی 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.

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

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 در نتیجه 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%} به ترتیب برابر ۶۵۶/۳، ۵۸۶/۳، ۴۹۶/۶ و ۴۵۷/۲ می‌باشد. پارامترهای گیاهی مورد نیاز مدل و مشخصات عمومی گیاه در جداول ۱، ۲ و ۳ آورده شده است (سرائی تبریزی و همکاران ۱۳۸۹، بابازاده و همکاران ۱۳۹۱، سرائی تبریزی و همکاران ۲۰۱۲، بابازاده و سرائی تبریزی ۲۰۱۳).

در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (PRD_{50%})، تیمار آبیاری کامل (تیمار شاهد FI)، تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (DI_{50%}) و تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۷۵ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (DI_{75%})، به علت 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 به صورت منظم به فواصل دو روز دو روز یک نمونه خاک از هر تکرار تیمار آبیاری کامل در سه عمق ۲۰-، ۴۰- و ۶۰- 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

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

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

توصیف مدل SWAP

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.

$$S(h) = \alpha(h)S_{max} \quad [2]$$

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

$$S_{max} = \frac{T_p}{Z} \quad [3]$$

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

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 معادله ریچاردز مربوط به حرکت قائم آب در سامانه ناهمگن خاک- ریشه گیاه را به روش تفاضل محدود، حل می‌کند (ون دم و همکاران ۱۹۹۷):

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

که در آن، h بار فشاری خاک برحسب سانتی‌متر، Z بار ثقل برحسب سانتی‌متر، t زمان بر 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.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای گیاهی ورودی موردنیاز برای مدل (بابازاده و همکاران ۱۳۸۹).

مقادیر	پارامتر گیاهی موردنیاز
۶۰۰	مجموع دمای روزانه از مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی ($^{\circ}\text{C}$)
۱۰۰۰	مجموع دما از مرحله گل‌دهی تا برداشت ($^{\circ}\text{C}$)
۰/۰۰۲۵	سطح برگ و یژه ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) [*]
۰/۰۰۸	بیشینه افزایش نسبی در سطح برگ ^{**}
۰/۴	کارایی مصرف نور ($\text{kg CO}_2 \text{J}^{-1}$) ^{***}
۳۸	بیشینه شدت جذب CO_2 ($\text{kg ha}^{-1} \text{hr}^{-1}$) ^{****}

^{*} 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 و یژه، مدل SWAP مقدار آن را برآورد می‌نماید.

^{***} یک راهکار مؤثر و کارا برای کمی کردن تجمع ماده خشک است و به صورت افزایش ماده خشک به‌ازای جذب هر واحد تابش فعال فتوسنتزی تعریف شده و اغلب به صورت شیب رگرسیون خطی زیست‌توده در مقابل تابش جذب‌شده جمع‌سایه محاسبه می‌شود.

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

جدول ۳- مشخصات عمومی گیاه سویا رقم ویلیامز در مزرعه مورد مطالعه (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	۱۳۸۷-۸۸	۱۷	۱۲ خرداد	۸ مهر	۳۸۹۹/۶	۳۷۹۷/۶
سویا	۱۳۸۸-۸۹	۱۷	۹ خرداد	۳ مهر	۴۰۴۷/۲	۴۰۴۲/۲

پارامترهای مورد نیاز مدل

هر مدل کامپیوتری نیاز به شرایط مرزی دارد که به عنوان ورودی به مدل داده می‌شود. در مدل SWAP شرایط مرزی بالا تبخیر و تعرق پتانسیل (بر اساس معادله پنمن-مانتیث) و مجموع بارندگی و آبیاری تعریف شده است. مرز پایینی به علت پایین بودن سطح ایستابی در منطقه به صورت زهکشی آزاد برای مدل تعریف شد. در مدل SWAP برای شبیه‌سازی مراحل رویشی گیاه، از یک مدل دقیق همراه با تمام جزئیات^۱ به جای مدل ساده^۲ 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^۳ استفاده شده 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^۴ یا شبکه عصبی مصنوعی^۵ توابع هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند.

ارزیابی مدل SWAP

برای ارزیابی مدل از شاخص انحراف معیار (SD)^۶، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۷، میانگین خطای مطلق (MAE)^۸ و ضریب مقدار باقیمانده (CRM)^۹

(CRM)^۹ که در معادله‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ ارائه شده‌اند، استفاده شد:

$$SD = \left\{ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / n \right\} \quad [4]$$

$$RMSE = \left\{ \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right\}^{1/2} \quad [5]$$

$$MAE = \left\{ \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \right\} / n \quad [6]$$

$$CRM = \left\{ \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right\} / \sum_{i=1}^n O_i \quad [7]$$

که در آن، P ، O ، \bar{O} و n به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده، اندازه‌گیری شده، متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و تعداد داده‌ها می‌باشند و شاخص i نیز نشان‌دهنده هر یک از داده‌هاست. مقدار $RMSE$ نشان می‌دهد که تا چه حد اختلاف بین هر یک از مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر، صرف‌نظر از این‌که کمتر یا بیشتر باشد، وجود دارد. شاخص MAE نشان‌دهنده خطای مطلق مدل و مقدار CRM نشان‌دهنده 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 اندازه‌گیری شده دارد. در صورتی‌که همه مقادیر پیش‌بینی شده برابر مقادیر اندازه‌گیری شده باشند، شاخص $RMSE$ ، MAE ، SD و CRM برابر با صفر خواهند شد (لوگ و گرین ۱۹۹۱). ویژگی‌های اندازه‌گیری شده 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

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 CRM , MAE , $RMSE$ 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.

معادله وزن‌گن‌وختن استخراج‌شده از مدل RetC در جدول ۴ ارائه شده است.

تحلیل حساسیت^۱، واسنجی^۲ و اعتبارسنجی^۳ 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 مشخص شده 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.

$$S_c = \left[\frac{\Delta W}{\bar{W}} \right] / \left[\frac{\Delta P}{\bar{P}} \right] \quad [8]$$

که در آن S_c ضریب حساسیت بدون بعد، ΔW اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، \bar{W} متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، ΔP اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و \bar{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 مورد مطالعه 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

¹ Sensitivity analysis

² Calibration

³ Validation

جدول ۴- مشخصات فیزیکی پروفیل خاک و پارامترهای معادله ونگنوختن استخراج شده از مدل RetC.

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

* 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_c) می‌باشد.

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

دامنه تغییرات	$S_c = 0$	$0 < S_c < 0.3$	$0.3 < S_c < 1/5$	$S_c > 1/5$
شدت حساسیت	بدون حساسیت	حساسیت کم	حساسیت متوسط	حساسیت زیاد

جدول ۶- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل SWAP.

پارامترهای ورودی مدل	مقدار S_c در حالت ۲۵٪ +	مقدار S_c در حالت ۲۵٪ -	درجه حساسیت
سطح برگ ویژه	۰/۵۲	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
FI	۰/۴۶	۰/۶۸	متوسط-متوسط
$DI_{75\%}$	۰/۱۸	۱/۵۲	کم-زیاد
$DI_{50\%}$	۰/۱۱	۱/۷۸	کم-زیاد
$PRD_{50\%}$	۰/۰۹	۱/۹۹	کم-زیاد
K_{sat}	۰/۴۲	۰/۵۱	متوسط-متوسط
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

همچنین ضریب $RMSE$ در سطح پایینی است. ضریب $RMSE$ برای شاخص سطح برگ کمتر از انحراف معیار (SD) شده که این نشان‌دهنده 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 ارزشی کرمان نتیجه گرفتند که مدل SWAP شاخص سطح برگ را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

نتایج شبیه‌سازی مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه در جداول ۷، ۸ و ۹ ارائه شده است. مطابق جداول ۷ و ۸ کلیه مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ در کلیه تیمارها کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به دست آمد. بر اساس جدول ۹ نتایج این تحقیق دوساله نشان داد که همبستگی نسبتاً خوبی بین مشاهدات مزرعه‌ای و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مدل SWAP وجود دارد اما برآورد مدل کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بوده و

جدول ۷- مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف آبیاری سال ۸۷-۸۸.

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

جدول ۸- مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در تیمارهای مختلف آبیاری سال ۸۸-۸۹.

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

جدول ۹- ارزیابی آماری شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده.

سال زراعی ۸۸-۸۹	سال زراعی ۸۷-۸۸	آماره
۰/۸۷	۰/۸۴	R^2 (-)
۶/۳۶	۷/۶۹	$RMSE$ (%)
۸/۵۰	۱۰/۵۷	MAE (%)
۳/۸۰	۴/۲۰	CRM (-)
۱۰/۴۰	۱۲/۷۰	SD (%)

انحراف معیار می‌باشد که این نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی داده‌ها و واسنجی قابل قبول 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.

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 دو سال زراعی در حد پایین و کمتر از

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

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

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

سال زراعی ۸۸-۸۹	سال زراعی ۸۷-۸۸	آماره
۱۵/۶۰	۱۱/۴۰	(%) <i>RMSE</i>
۱۰/۱۰۰	۱۲/۹۰	(%) <i>MAE</i>
-۰/۷۳	-۰/۶۰	(-) <i>CRM</i>
۱۶/۲۰	۱۸/۵۰	(%) <i>SD</i>

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

درصد انحراف مقادیر		عملکرد دانه شبیه‌سازی شده (kg ha^{-1})		عملکرد دانه اندازه‌گیری شده (kg ha^{-1})		تیمار آبیاری
سال ۸۸-۸۹	سال ۸۷-۸۸	سال ۸۸-۸۹	سال ۸۷-۸۸	سال ۸۸-۸۹	سال ۸۷-۸۸	
۳/۱۷	۱/۹۳	۴۳۰۲/۵	۳۸۷۲/۴	۴۱۶۵/۷	۳۷۹۷/۶	FI
۲/۹۳	۳/۴۱	۴۰۲۰	۳۷۹۶/۵	۳۹۰۲/۵	۳۶۶۷/۱	DI _{75%}
۶/۹۱	۵/۳۷	۳۶۶۴/۳	۳۴۵۵/۲	۳۴۱۱	۳۲۶۹/۵	DI _{50%}
۶/۰۷	۳/۲۱	۳۵۴۱/۵	۳۲۹۲/۸	۳۲۲۶/۶	۳۱۸۷/۱	PRD _{50%}

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

سال زراعی	<i>CRM</i> (-)	<i>RMSE</i> (%)	<i>MAE</i> (%)
۸۷-۸۸	-۰/۲۲	۳/۲۱	۴/۳۷
۸۸-۸۹	-۰/۳۵	۴/۴۶	۴/۹۳

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.

بر اساس جداول ۱۴ و ۱۵، در هر دو سال 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

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

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

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

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

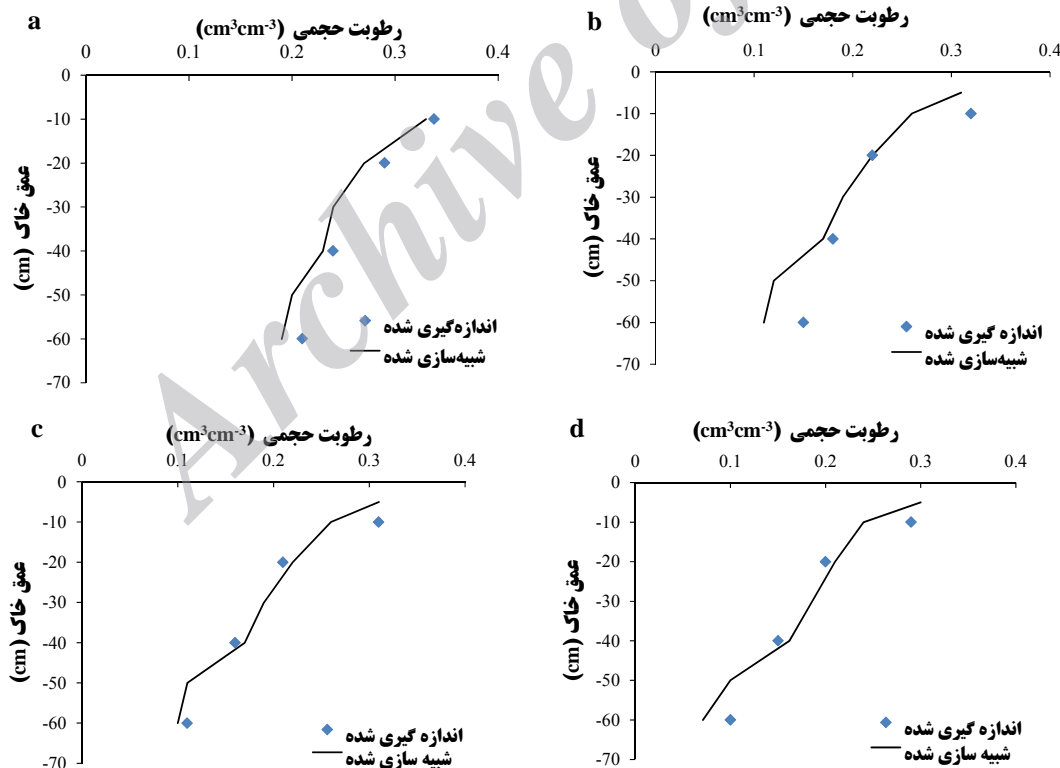
تغییرات رطوبت

با استفاده از نرم افزار SAS بین زوج مرتب‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رابطه رگرسیونی برقرار شد و با انجام آزمون t-test مشخص شد که بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده از نظر آماری در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد (جدول ۱۶). نتایج حاصل از شبیه‌سازی رطوبت خاک در طول دوره رشد در اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری توسط مدل SWAP و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. مقدار $RMSE$ ، MAE و ضریب تبیین نشان‌دهنده شبیه‌سازی نسبتاً قابل قبول رطوبت خاک توسط مدل SWAP در سه عمق فوق در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد که

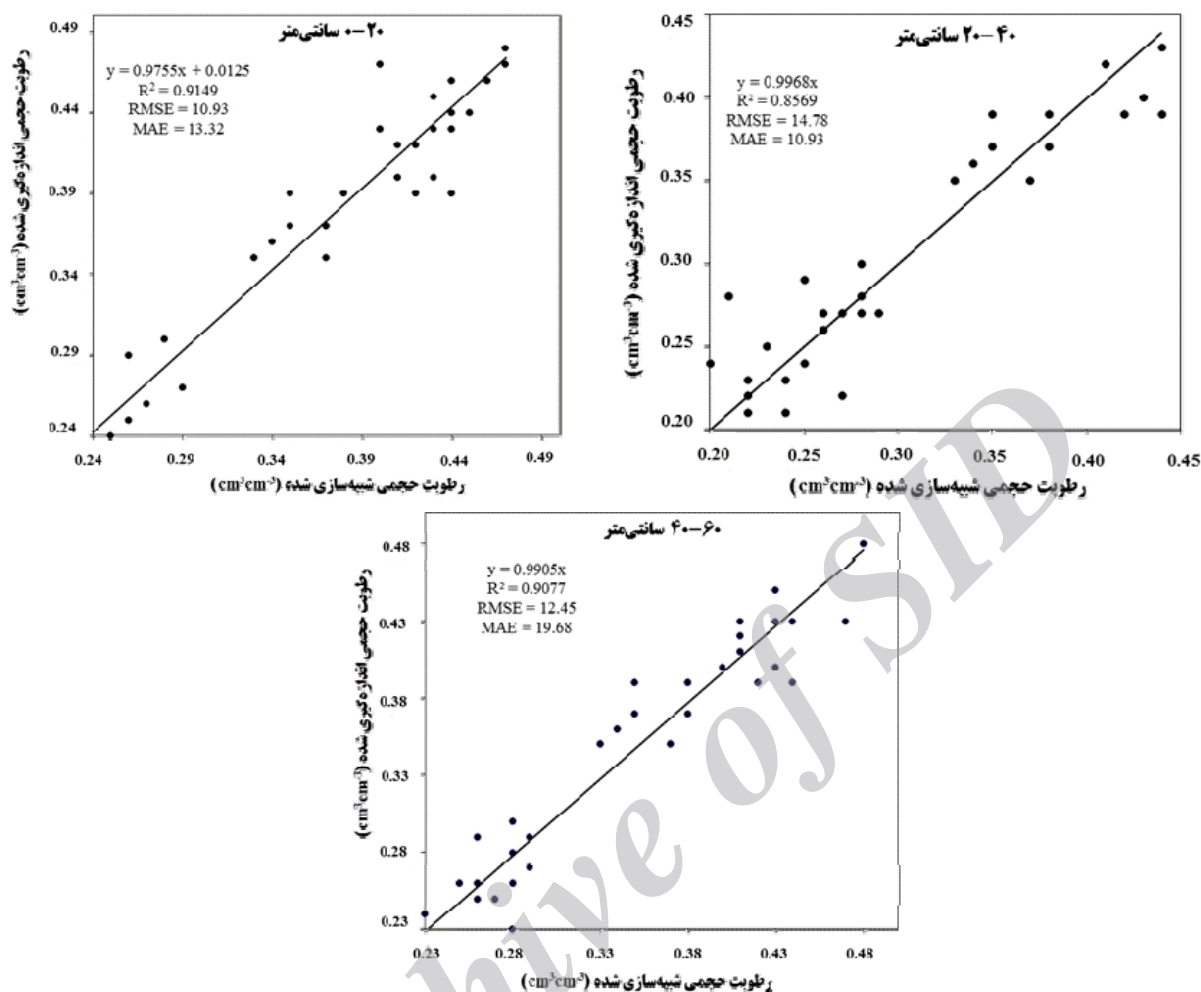
با نتایج پژوهش کوهی چله کران و همکاران (۱۳۹۰) همخوانی دارد.

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

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



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



شکل ۲- مقایسه مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در عمق‌های مختلف خاک.

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 قابل قبول 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.

نتیجه‌گیری کلی

مقدار بهره‌وری مصرف آب، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک شبیه‌سازی شده توسط مدل در هر دو سال زراعی بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به‌دست آمد ولی مقادیر شبیه‌سازی شده 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.

منابع مورد استفاده

- امیری ا، کاوسی م و کاوه ف، ۱۳۸۸. ارزیابی مدل‌های گیاهی ORYZA2000، 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 چغندر قند 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 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)، 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 مدل SWAP. 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 forecasting 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 CO₂ 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, Alterra 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 Wageningen, 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, Wageningen, 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.