

# واسنجی مدل SWAP برای شبیه‌سازی عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و کارایی مصرف آب سویا

حسین بابازاده<sup>۱\*</sup> و مهدی سرائی تبریزی<sup>۲</sup>

\* - نویسنده مسئول، استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی آب، تهران، ایران

[h\\_babazadeh@srbiau.ac.ir](mailto:h_babazadeh@srbiau.ac.ir)

<sup>۲</sup> - باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۰/۹/۲۰

## چکیده

مدل SWAP را یک مدل آگروهیدرولوژیکی، زراعی-هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی می‌نامند. در این تحقیق مدل SWAP در برآورد عملکرد محصول و عملکرد بیولوژیکی سویا و درصد رطوبت موجود در خاک طی فصل کشت مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق ابتدا مدل SWAP بر اساس نتایج مزرعه‌ای حاصل از کشت سویا برای چهار سناریوی آبیاری شیاری در سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷ تحلیل حساسیت و واسنجی شد. سپس بر اساس نتایج مزرعه‌ای سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ مورد اعتباریابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که این مدل عملکرد دانه را بهتر از عملکرد بیولوژیکی سویا شبیه‌سازی می‌کند. همچنین نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل SWAP نسبت به داده‌های ورودی رطوبت باقی‌مانده و هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار حساس است و با کوچکترین تغییر در داده‌های ورودی خاک شامل ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع و رطوبت باقی‌مانده نتایج خروجی به شدت تغییر می‌کند. به استناد تحلیل‌های آماری با وجود متغیرهای متعدد ورودی، مدل SWAP مقدار رطوبت خاک، شاخص سطح برگ، کارایی مصرف آب و عملکرد محصول را به خوبی برآورد می‌کند، زیرا در همه موارد ضریب تبیین بالاتر از  $0/8$  (به ترتیب برابر  $0/87$ ،  $0/89$ ،  $0/93$ ) و میانگین مربعات خطا کمتر از انحراف معیار داده‌ها می‌باشد و آزمون مقایسه میانگین T-test تفاوت معنی‌دار را بین مقادیر شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی شده نشان نداد.

کلید واژه‌ها: عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی، شاخص سطح برگ، مدل SWAP.

## مقدمه

از روش‌های نوین کشاورزی که در دو دهه اخیر در کارهای پژوهشی، بهینه‌سازی، مدیریت کشاورزی، ارتقای بهره‌وری منابع به ویژه آب و خاک کاربرد داشته است، استفاده از مدل‌های مختلف شبیه‌سازی می‌باشد. به لحاظ این که 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<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷).

رشد روزافزون جمعیت جهان و در نتیجه نیاز بیشتر به تولیدات کشاورزی از مسائل مهمی است که امروزه بشر با آن روبه‌رو است. در این ارتباط محدودیت منابع آب و خاک به عنوان بستر اصلی تولیدات کشاورزی نیز مطرح بوده به نحوی که هم اکنون استفاده بهینه از منابع آب در اولویت‌های فعالیت‌های کشورهای مختلف قرار گرفته است. در حال حاضر کشور ایران همچون سایر کشورهای واقع در کمربند خشک کره زمین دچار کم‌آبی بوده و پیش‌بینی می‌شود طی نیم قرن آتی از جمله ۶۶ کشور باشد که از تنش آبی رنج می‌برد (نوروزی و همکاران، ۱۳۷۸). بنابراین باید برای مصرف آب‌های در دسترس و مدیریت استفاده از آنها به عنوان یک کالای با ارزش اهمیت بیشتری قائل شد.

می‌گیرد. این مدل در کشور هلند (دانشگاه کشاورزی واگنینگن<sup>۳</sup> و در موسسه تحقیقاتی آلترا<sup>۴</sup>) توسعه داده شده است. این مدل قادر است تحلیل تأثیر متقابل میان حرکت آب، رشد محصول و انتقال مواد محلول و گرما در شرایط اشیاع و غیر اشیاع خاک، پیش‌بینی عملکرد محصول تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری و شوری و برنامه‌ریزی آبیاری را انجام دهد (کروس و همکاران<sup>۵</sup>، ۱۹۹۹).

مدل SWAP جانشین مدل آگروهیدرولوژیکی<sup>۶</sup> مشهور SWATR که توسط فِدِس و همکاران<sup>۷</sup> (۱۹۸۷) ارائه شده بود، می‌باشد. نسخه‌های منتشر شده قبلی مدل SWAP به ترتیب با نام (SWATR(E) توسط فِدِس و همکاران<sup>۸</sup> (۱۹۸۷)، بلمنز و همکاران<sup>۹</sup> (۱۹۸۳) و وسلینگ و همکاران<sup>۱۰</sup> (۱۹۹۱) و با نام SWACROP به وسیله کابات و همکاران<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۲) و با نام SWAP93 به وسیله ون دم و همکاران<sup>۱۱</sup> (۱۹۹۴) و با نام SWAP 2.0 توسط ون دم و همکاران (۱۹۹۷) و 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 به خوبی به کار برده شده است (ون دم و همکاران، ۱۹۹۷؛ ون دم، ۲۰۰۰). این مدل با اصلاحاتی که در آن طی سال‌های گذشته صورت گرفته به ترتیب به صورت 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. در حال حاضر آخرین نسخه مدل با نام SWAP 3.2.36 توسط کروس و ون دم (۲۰۱۱) منتشر شده است.

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 اعتباریابی مدل، مشاهده کردند که مدل عملکرد را به طور متوسط ۱۰ درصد کمتر از مقادیر

اصولاً ساده‌سازی سیستم‌های پیچیده به طور منظم به صورت یک مدل روش مناسبی است زیرا به کار بردن روش قدیمی آزمون و خطا و روش در نظر گرفتن یک راه حل برای یک مشکل نمی‌تواند قابل اطمینان باشد. به کمک مدل، اجزای یک سیستم و تأثیر روابط متقابل آنها شناخته شده و این تأثیر به صورت کمی و با فرمول‌های ریاضی بیان می‌شوند (میمندی‌نژاد، ۱۳۷۷). مدل‌ها اهداف مختلفی را در پی دارند. هدف اصلی و اولیه هر مدل افزایش اطلاعات درباره سیستم تحت بررسی است. اما به طور 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 تأثیر گذار هستند. پیشرفت فن‌آوری کامپیوتر این امکان را به وجود آورده است که بتوان تأثیر تجمعی و متقابل این فاکتورها را هم‌زمان مورد ملاحظه و مطالعه قرار داد (بنایان و کروت<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹، نصیری محلاتی، ۱۳۷۹).

مدل‌ها پژوهشگران را قادر ساخته‌اند تا دیدگاه‌های کمی و محکمی را در مورد فرآیندهای هم‌زمان که دارای اثرهای متقابل بر روی هم هستند، مطالعه کنند. به این طریق می‌توان تئوری‌هایی که از طریق مطالعات مختلف حاصل می‌شود به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای رشد به کار گرفت و در سایه این قوام و استحکام، تئوری‌های مذکور را آزمون کرد. با وجود تمام این شرایط باید توجه داشت که مدل‌ها الزاماً نمایش ساده‌ای از واقعیت رفتار سیستم هستند و بنابراین قادر به بیان طیف کامل رفتار سیستم در شرایط واقعی نخواهند بود (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 مزرعه‌ای<sup>۲</sup> است که عوامل مهمی مانند خاک، آب، اتمسفر و گیاه را در نظر

3- Wageningen  
4- Altera  
5- Kroes et al.  
6- Agrohydrological  
7- Feddes et al.  
8- Belmans et al.  
9- Wesseling et al.  
10- Kabat et al.  
11- Van Dam et al.

1- Bannayan and Cruot  
2- Field scale

زارع ابیانه 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 قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که این مدل می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد و سودمند برای ارزیابی و بهینه‌سازی رطوبت توزیع‌شده در خاک در ناحیه ریشه گیاهان زراعی مورد استفاده 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 توام محدودیت آب و شوری مورد مطالعه قرار دادند. 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.

کوهی‌چله‌کران 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 چهار 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 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.

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی، تحلیل حساسیت، واسنجی مدل SWAP در کشت سویا تحت تیمارهای مختلف آبیاری و اعتباریابی آن در سال زراعی بعدی می‌باشد. این تحقیق به صورت دو ساله انجام شده است که نتایج ارزیابی‌ها را می‌تواند با دقت بیشتری ارائه نماید.

### مواد و روش‌ها

**الف) منطقه اجرای طرح و قالب طرح آزمایشی کشاورزی**  
این تحقیق در دو سال زراعی متوالی ۸۸-۱۳۸۷ و ۸۹-۱۳۸۸ در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. منطقه مورد مطالعه در موقعیت طول جغرافیایی ۵۱ درجه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۶

اندازه‌گیری شده برآورد کرد و آزمون T-test تفاوت معنی‌دار را بین عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل و عملکرد اندازه‌گیری شده نشان نداد.

وظیفه‌دوست و همکاران (۲۰۰۸) در منطقه برخوار اصفهان تحت شرایط محدودیت کمی آب آبیاری با استفاده از مدل SWAP، افزایش بهره‌وری آب محصولات گندم، آفتابگردان، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند را مورد بررسی قرار دادند. آنها پس از واسنجی مدل SWAP با تغییر عمق و دور آبیاری توابع بهره‌وری آب را برای محصولات مورد مطالعه استخراج و بر اساس آنها و تغییر برنامه آبیاری، بهره‌وری آب محصولات را افزایش دادند.

پرجمی عراقی و همکاران (۱۳۸۸) در شهرستان اراک با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای جمع‌آوری شده منطقه امان آباد برای گیاه ذرت علوفه‌ای مدل SWAP را واسنجی و صحت‌یابی کردند. نتایج نشان داد که با اعمال دور ۱۰ روز در شرایط فعلی (۹۰۰ میلی‌متر آب قابل دسترس) راندمان مصرف آب به میزان ۳۲ درصد افزایش پیدا کرد. با استفاده از اجزای شبیه‌سازی شده بیلان آب و محصول تولیدی، مقادیر شاخص‌های تعرق نسبی، شاخص سهم آبیاری و شاخص نفوذ عمقی به ترتیب برابر ۰/۹۱، ۱/۷۵ و ۰/۱۵ به دست آمد. همچنین شاخص سودمندی آب مصرف شده در فرآیند تعرق (WPT)، شاخص سودمندی آب مصرف شده در فرآیند تبخیر و تعرق (WPEt) و شاخص سودمندی آب آبیاری (WPT) به ترتیب برابر ۳، ۲/۷ و ۱/۵۵ به دست آمد.

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 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 کمی آب، برای یک مقدار معین آب قابل دسترس، حداکثر سود خالص از کشت محصول پیاز حاصل شد.

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

سال ۱۳۸۸-۸۹					سال ۱۳۸۷-۸۸				
PRD <sub>50%</sub> (mm)	DI <sub>50%</sub> (mm)	DI <sub>75%</sub> (mm)	FI (mm)	زمان آبیاری	PRD <sub>50%</sub> <sup>****</sup> (mm)	DI <sub>50%</sub> <sup>***</sup> (mm)	DI <sub>75%</sub> <sup>**</sup> (mm)	FI <sup>*</sup> (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

\* تیمار آبیاری کامل (Full Irrigation, FI)، \*\* تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۷۵ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (Deficit Irrigation, DI<sub>75%</sub>)، \*\*\* تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (Deficit Irrigation, DI<sub>50%</sub>) و \*\*\*\* تیمار آبیاری بخشی منطقه ریشه در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (Partial Root Drying, PRD<sub>50%</sub>).

یکدیگر و از بین بردن اثر 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 انتهایی شیارها بسته در نظر گرفته شد. تیمارهای آبیاری جویچه‌ای اعمال شده عبارت بودند از: تیمار آبیاری بخشی منطقه ریشه<sup>۱</sup> در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (PRD<sub>50%</sub>)، تیمار آبیاری کامل (تیمار شاهد) (FI)، تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۵۰ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک (DI<sub>50%</sub>) و تیمار کم آبیاری سنتی در حد ۷۵ درصد جبران نقصان رطوبتی خاک

درجه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا قرار گرفته است. بافت خاک مزرعه لوم و متوسط درصد حجمی رطوبت در حد ظرفیت زراعی ( $\theta_{fc}$ ) ۳۲/۲، درصد نقطه پژمردگی ( $\theta_{wp}$ ) ۱۶ و جرم مخصوص ظاهری ( $\rho_b$ ) ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب برای عمق تا ۶۰ سانتی‌متری خاک بود و ضریب مدیریتی تخلیه مجاز رطوبت (MAD) ۶۵ درصد در نظر گرفته شد.

آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و چهار تیمار آبیاری روی یک رقم سویا به نام ویلیامز انجام شد. هر کدام از کرت‌های آزمایشی دارای ۲ متر طول و ۲/۶ متر عرض و چهار خط کاشت در آن وجود داشت. برای حذف اثر ناشی از نفوذ آب از تیمارهای مختلف روی

## جدول ۲- مقادیر پارامترهای گیاهی ورودی مورد نیاز برای مدل

مقادیر	پارامتر گیاهی مورد نیاز
۶۰۰	مجموع دمای روزانه از مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی (°C)
۱۰۰۰	مجموع دما از مرحله گل‌دهی تا برداشت (°C)
۰/۰۰۲۵	سطح برگ ویژه (kg ha <sup>-1</sup> )
۰/۰۰۸	بیشینه افزایش نسبی در سطح برگ
۰/۴	کارایی مصرف نور (Kg CO <sub>2</sub> J <sup>-1</sup> )
۳۸	بیشینه شدت جذب CO <sub>2</sub> (kg/ha/hr)

## جدول ۳- مشخصات عمومی گیاه سویا رقم ویلیامز در مزرعه مورد مطالعه

گیاه	سال زراعی	تعداد آبیاری	تاریخ کاشت	تاریخ برداشت	حداکثر عملکرد محصول (تن در هکتار)	متوسط عملکرد محصول (تن در هکتار)
سویا	۱۳۸۷-۸۸	۱۷	۱۲ خرداد	۸ مهر	۳/۸۹۹۶	۳/۷۹۷۶
سویا	۱۳۸۸-۸۹	۱۷	۹ خرداد	۳ مهر	۴/۰۴۷۲	۴/۰۴۲۲

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

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

که در آن،  $h$ : بار فشاری خاک (cm)،  $Z$ : بار ثقل (cm)،  $t$ : زمان (day)،  $K$ : هدایت هیدرولیکی (cm day<sup>-1</sup>)،  $\theta$ : درصد رطوبت حجمی خاک و  $S$ : میزان جذب آب توسط ریشه‌ها در روز می‌باشد.

پارامتر  $S(h)$  میزان جذب حجم آب در حجم خاک توسط ریشه‌ها در واحد زمان را شبیه‌سازی می‌کند و بستگی به بار فشاری خاک و حداکثر نرخ جذب آب ( $S_{max}$ ) دارد:

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

که در آن،  $\alpha(h)$ : ضریب کاهش و  $S_{max}$ : حداکثر نرخ جذب آب ریشه‌ها می‌باشد. در این معادله فرض شده است نرخ جذب آب توسط ریشه در عمق مؤثر به صورت معادله (۳) می‌باشد:

(DI<sub>75%</sub>) با استفاده از یک آگر در طول فصل کشت به صورت منظم به فواصل دو روز یک نمونه خاک از هر تکرار تیمار آبیاری کامل در سه عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ 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 تجزیه فیزیکی خاک قبل از کشت، درصد رطوبت حجمی و نقصان رطوبتی خاک (SMD)<sup>۱</sup> تعیین شد. برنامه‌ریزی آبیاری برای این دو سال زراعی، پارامترهای گیاهی مورد نیاز مدل و مشخصات عمومی گیاه در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است (سرانی تبریزی و همکاران، ۱۳۸۹؛ بابازاده و همکاران، ۱۳۸۹؛ و سرانی تبریزی و همکاران، ۲۰۱۲).

## ب) 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 ون دم، ۲۰۱۱). SWAP مدلی یک بعدی است که معادله ریچاردز مربوط به

$$SD = \left\{ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / n \right\} \quad (۴)$$

$$S_{\max} = \frac{T_p}{Z} \quad (۳)$$

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (۵)$$

$$MAE = \left\{ \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \right\} / n \quad (۶)$$

$$CRM = \left\{ \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right\} / \sum_{i=1}^n O_i \quad (۷)$$

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 این که 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  $SD$  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 صورتی که همه مقادیر پیش‌بینی شده برابر مقادیر اندازه‌گیری شده باشند، شاخص  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $SD$  و  $CRM$  برابر با صفر خواهند شد (لوگ و گرین<sup>۱۰</sup>، ۱۹۹۱). دامنه تغییرات  $RMSE$  برای تفسیر داده‌های شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر  $RMSE$  کم‌تر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بیش‌تر از ۱۰ درصد و کم‌تر از ۳۰ درصد باشد شبیه‌سازی خوب و بیش‌تر از ۳۰ درصد به این معنی است که شبیه‌سازی ضعیف می‌باشد (جامیسون و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۱۹۹۱). برای انجام آزمون مقایسه میانگین  $t$ -test و همچنین تعیین ضریب تبیین از نرم‌افزار SAS استفاده شد.

که در آن،  $T_p$ : نرخ تعرق پتانسیل (متر در روز)،  $Z$ : عمق مؤثر ریشه‌ها، عمقی که ۷۰ تا ۸۰ درصد ریشه مشاهده شود (متر) و  $\alpha$ : ضریب کاهش است که بین صفر و یک متغیر می‌باشد.

### ج) 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-مانتیش) 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 رویش گیاه، از یک مدل تفضیلی 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 وان گنوختن و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۱) در برنامه  $RetC^2$  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<sup>۲</sup> یا شبکه عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> توابع هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند.

### د) ارزیابی مدل SWAP

برای ارزیابی مدل از ضریب همبستگی<sup>۵</sup> ( $R$ )، شاخص انحراف معیار<sup>۶</sup> ( $SD$ )، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۷</sup> ( $RMSE$ )، میانگین خطای مطلق<sup>۸</sup> ( $MAE$ ) و ضریب مقدار باقیمانده<sup>۹</sup> ( $CRM$ ) که در معادله‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ ارائه شده‌اند، استفاده شد.

- 1-
- 2- Retention Curve
- 3- Pedotransfer Functions (PTF)
- 4- Artificial Neural Network (ANN)
- 5- Correlation Coefficient
- 6- Standard Division
- 7- Root Mean Square Error
- 8- Mean Absolute Error
- 9- Coefficient Residual Mass

10- Loague and Green

11- Jamieson et al.

جدول ۴- مشخصات اندازه‌گیری شده پروفیل خاک و پارامترهای معادله وان گنوختن استخراج شده از مدل RetC

$\lambda$	n	$\alpha$ (1/cm)	$K_{sat}$ (cm/d)	$\theta_{res}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	$\theta_{sat}$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	رس (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	عمق خاک (cm)
۰/۱۷۲	۱/۴۱۲۸	۰/۰۱۴۸	۹/۶۶	۰/۰۶۴۳	۰/۳۹۳۵	۲۳/۷	۴۶/۲	۳۰/۱	۰-۲۰
۰/۱۶۷	۱/۳۱۶۹	۰/۰۱۵۳	۳/۸۶	۰/۰۷۶۸	۰/۳۹۳۳	۳۵/۷	۳۴/۴	۳۰	۲۰-۴۰
۰/۱۷۴	۱/۴۴۷۷	۰/۰۱۲۶	۸/۷	۰/۰۶۲۱	۰/۳۸۶۸	۲۲/۱	۴۲/۸	۳۵/۱	۴۰-۶۰

جدول ۵- طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای دامنه تغییرات ضریب حساسیت

$S_c > 1/5$	$0/3 < S_c < 1/5$	$0 < S_c < 0/3$	$S_c = 0$	دامنه تغییرات
حساسیت زیاد	حساسیت متوسط	حساسیت کم	بدون حساسیت	شدت حساسیت

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 (جدول ۵).

برای واسنجی مدل در منطقه مورد مطالعه از داده‌های سال اول آزمایش استفاده شد. داده‌های استفاده شده برای واسنجی مدل شامل: شاخص سطح برگ، عملکرد بیولوژیکی و عملکرد محصول بود. سطح برگ در سه مرحله حساس رشد و در پنج نوبت اندازه‌گیری شد. مقدار این شاخص توسط مدل هم برآورد شده است. عملکرد محصول و عملکرد بیولوژیکی نیز در مرحله برداشت محصول تعیین شد. جهت واسنجی مدل از تحلیل لوگ و گرین (۱۹۹۱) استفاده شد. جهت اعتباریابی مدل SWAP که برای داده‌های سال اول کشت تحلیل حساسیت و واسنجی شده بود، از داده‌های سال دوم زراعی استفاده گردید.

## نتایج و بحث

### الف) تحلیل حساسیت مدل SWAP

نتایج مقادیر تحلیل حساسیت مدل نشان داد که 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 قابل توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مدل به وجود می‌آید.

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده پروفیل خاک و پارامترهای معادله وان گنوختن استخراج شده از مدل RetC در جدول (۴) ارائه شده است.

### ب) تحلیل حساسیت، واسنجی<sup>۱</sup> و اعتباریابی<sup>۲</sup> 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 نشان دهند که اصطلاحاً بتوان گفت پارامترهای که بیشترین تأثیر را روی نتایج خروجی مدل دارند به خوبی تعیین شده و مدل تحلیل حساسیت شده است:

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{\bar{W}}}{\frac{\Delta P}{\bar{P}}} \quad (۸)$$

که در آن  $S_c$ : ضریب حساسیت بدون بعد،  $\Delta W$ : اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی،  $\bar{W}$ : متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی،  $\Delta P$ : اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و  $\bar{P}$ : متوسط

- 1- Sensitivity Analysis
- 2- Calibration
- 3- Validation

جدول ۶- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل SWAP

پارامترهای ورودی مدل	در حالت $S_e \pm 25\%$	در حالت $S_e - 25\%$	درجه حساسیت
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
FI	۰/۴۶	۰/۶۸	متوسط-متوسط
DI <sub>75%</sub>	۰/۱۸	۱/۵۳	کم-زیاد
DI <sub>50%</sub>	۰/۱۱	۱/۷۸	کم-زیاد
PRD <sub>50%</sub>	۰/۰۹	۱/۹۹	کم-زیاد
K <sub>sat</sub>	۰/۴۳	۰/۵۱	متوسط-متوسط
هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی	۰/۱	۰/۰۳	کم-ندارد
FI	۰/۰۲	۰/۳۶	کم-متوسط
DI <sub>75%</sub>	۰/۰۸	۰/۳۹	کم-متوسط
DI <sub>50%</sub>			

جدول ۷- مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف آبیاری سال ۸۸-۱۳۸۷

شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده				شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده				مرحله نمونه‌برداری
PRD <sub>50%</sub>	DI <sub>50%</sub>	DI <sub>75%</sub>	FI	PRD <sub>50%</sub>	DI <sub>50%</sub>	DI <sub>75%</sub>	FI	
۱/۴۴	۱/۹۸	۳/۳۳	۳/۲۶	۲/۴۶	۲/۷۶	۳/۵۳	۳/۷۴	گل‌دهی
۲/۰۵	۲/۱۷	۳/۱	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

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 دو سال بر روی هیبریدهای ذرت دانه‌ای در ارزوئیه کرمان نتیجه گرفتند که مدل SWAP شاخص سطح برگ را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند و همچنین نتیجه گرفتند که این مدل عملکرد دانه را به خوبی شبیه‌سازی می‌نماید که با این تحقیق همخوانی خوبی دارد. بر اساس آزمون مقایسه میانگین T-test تفاوت معنی‌دار بین عملکرد محصول شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود نداشت. عملکرد بیولوژیکی، عملکرد محصول و کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای به همراه تحلیل‌های آماری در جدول‌های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است. بر اساس تحلیل لوگ و گرین (۱۹۹۱) نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که همبستگی نسبتاً خوبی بین مشاهدات مزرعه‌ای و نتایج به دست آمده از مدل در هر دو سال آزمایش وجود دارد. ضریب RMSE برای عملکرد محصول و عملکرد

حساسیت مدل به عمق آب آبیاری در تیمار با تنش آبی شدید بیشتر می‌شود ولی به طور کلی نسبت به تغییرات عمق آب آبیاری زیاد حساس نبود. در جدول (۶) درجه حساسیت مدل SWAP نسبت به تغییرات عوامل ورودی مدل ارائه شده است.

#### ب) واسنجی و اعتباریابی مدل

نتایج شبیه‌سازی مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه در جدول‌های (۷)، (۸) و (۹) ارائه شده است. مطابق جدول (۷) و جدول (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 دو ساله 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 و همچنین ضریب RMSE در سطح پایینی است. ضریب RMSE برای شاخص سطح برگ کمتر از انحراف معیار (SD) شده که این نشان‌دهنده کارکرد



را در برآورد بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج پژوهش‌های کیانی و همائی (۱۳۸۶)، کوهی چله کران و همکاران (۱۳۹۰) و نوری و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی خوبی دارد.

بیولوژیکی 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 قابل قبول مدل می‌باشد. ضریب CRM کوچک و منفی است و تمایل مدل

**جدول ۸- مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف آبیاری سال ۸۹-۱۳۸۸**

شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده				شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده				مرحله نمونه‌برداری
PRD <sub>50%</sub>	DI <sub>50%</sub>	DI <sub>75%</sub>	FI	PRD <sub>50%</sub>	DI <sub>50%</sub>	DI <sub>75%</sub>	FI	
۱/۴۴	۱/۹۸	۲/۸۴	۳/۱	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	۲/۵	۳/۶۶	۴/۳۶	۲/۷۸	۲/۹	۳/۹۸	۴/۶۹	پرشدن غلاف

**جدول ۹- ارزیابی آماری شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP**

سال زراعی ۱۳۸۸-۸۹	سال زراعی ۱۳۸۷-۸۸	ضریب
۰/۸۷	۰/۸۴	R <sup>2</sup>
۶/۳۶	۷/۶۹	RMSE
۸/۵	۱۰/۵۷	MAE
۳/۸	۴/۲	CRM
۱۰/۴	۱۲/۷	SD

**جدول ۱۰- مقادیر عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال زراعی ۸۸-۸۷ و ۸۹-۸۸**

درصد انحراف مقادیر		عملکرد بیولوژیکی شبیه‌سازی شده (kg/ha)		عملکرد بیولوژیکی اندازه‌گیری شده (kg/ha)		تیمار آبیاری
سال ۱۳۸۸-۸۹	سال ۱۳۸۷-۸۸	سال ۱۳۸۸-۸۹	سال ۱۳۸۷-۸۸	سال ۱۳۸۸-۸۹	سال ۱۳۸۷-۸۸	
۲/۷	۱/۱۲	۱۰۲۴۰/۹	۹۸۰۷/۸	۹۹۶۴/۲	۹۶۹۷/۷	FI
۱/۱۱	۲/۸۹	۹۸۰۹/۹	۹۱۰۰/۵	۹۷۰۰/۶	۸۸۳۷/۸	DI <sub>75%</sub>
۴/۹۱	۱۲/۸	۶۳۳۷/۸	۶۳۲۰/۴	۶۰۲۶	۵۵۱۱/۲	DI <sub>50%</sub>
۹/۶۶	۱۴/۵۱	۶۰۰۰	۶۲۰۱/۹	۵۴۲۰/۵	۵۳۰۱/۷	PRD <sub>50%</sub>

**جدول ۱۱- ارزیابی آماری عملکرد بیولوژیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP**

سال زراعی ۱۳۸۸-۸۹	سال زراعی ۱۳۸۷-۸۸	ضریب
۱۵/۶	۱۱/۴	RMSE
۱۰	۱۲/۹	MAE
-۰/۷۳	-۰/۶	CRM
۱۶/۲	۱۸/۵	SD
۰/۸۸	۰/۸۱	R <sup>2</sup>

جدول ۱۲- مقادیر عملکرد محصول اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در سال زراعی ۱۳۸۸-۸۹ و ۱۳۸۷-۸۸

درصد انحراف مقادیر		عملکرد دانه شبیه‌سازی شده (kg/ha)		عملکرد دانه اندازه‌گیری شده (kg/ha)		تیمار آبیاری
سال ۱۳۸۸-۸۹	سال ۱۳۸۷-۸۸	سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹	سال ۱۳۸۷-۱۳۸۸	سال ۱۳۸۸-۸۹	سال ۱۳۸۷-۸۸	
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 <sub>75%</sub>
۶/۹۱	۵/۳۷	۳۶۶۴/۳	۳۴۵۵/۲	۳۴۱۱	۳۲۶۹/۵	DI <sub>50%</sub>
۶/۰۷	۳/۲۱	۳۵۴۱/۵	۳۲۹۲/۸	۳۲۲۶/۶	۳۱۸۷/۱	PRD <sub>50%</sub>

جدول ۱۳- مقدار آماره‌های محاسبه شده برای تعیین قابل اعتماد بودن مدل SWAP در برآورد عملکرد دانه

سال زراعی	CRM	RMSE	MAE	SD	R <sup>2</sup>
۱۳۸۷-۱۳۸۸	-۰/۲۲	۳/۲۱	۴/۳۷	۷/۸۶	۰/۹۱
۱۳۸۸-۱۳۸۹	-۰/۳۵	۴/۴۶	۴/۹۳	۹/۳۵	۰/۹۳

جدول ۱۴- مقادیر کارایی مصرف آب سویا اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

در سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹ و ۱۳۸۷-۱۳۸۸

درصد انحراف مقادیر		کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده (kg/m <sup>3</sup> )		کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده (kg/m <sup>3</sup> )		تیمار آبیاری
سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹	سال ۱۳۸۷-۱۳۸۸	سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹	سال ۱۳۸۷-۱۳۸۸	سال ۱۳۸۸-۱۳۸۹	سال ۱۳۸۷-۱۳۸۸	
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 <sub>75%</sub>
۸/۶۴	۹/۲۱	۰/۷۴	۰/۶۹	۰/۸۱	۰/۷۶	DI <sub>50%</sub>
۵/۰۹	۲/۷۲	۱/۴۹	۱/۴۳	۱/۵۷	۱/۴۷	PRD <sub>50%</sub>

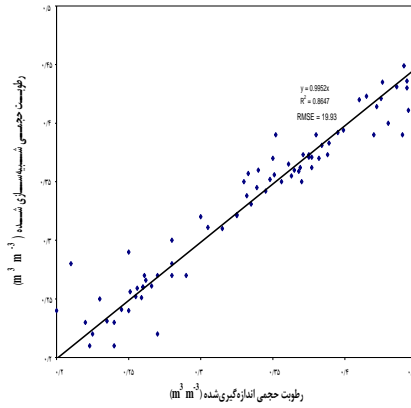
جدول ۱۵- ارزیابی آماری کارایی مصرف آب شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP

سال زراعی	RMSE	SD	R <sup>2</sup>
۱۳۸۷-۱۳۸۸	۴/۷۶	۹/۱	۰/۸۴
۱۳۸۸-۱۳۸۹	۵/۸	۱۰/۲	۰/۸۹

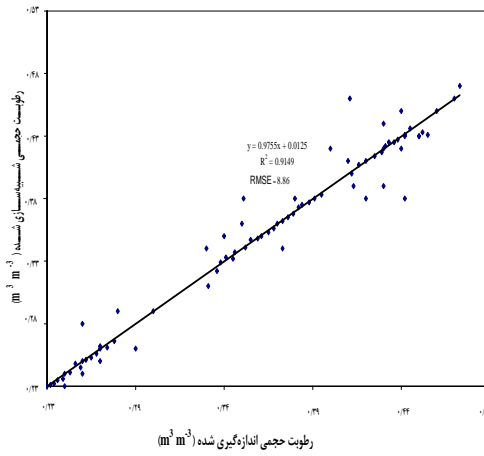
وجود ندارد که نشان‌دهنده شبیه‌سازی نسبتاً قابل قبول رطوبت خاک توسط مدل SWAP در سه عمق فوق است. (شکل ۱، شکل ۲ و شکل ۳). مطابق با شکل‌های (۱) تا (۳)، بهترین شبیه‌سازی (حداقل RMSE و حداکثر R<sup>2</sup>) در عمق ۴۰-۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک به‌دست آمده است.

### ج) تغییرات رطوبت

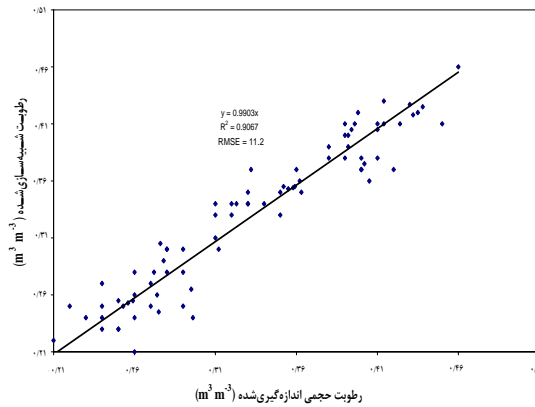
با استفاده از نرم‌افزار SAS بین زوج مرتب‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رگرسیون گرفته شد و مشخص شد مقدار ضریب R<sup>2</sup> از لحاظ آماری معنی‌دار است. بر اساس آزمون مقایسه میانگین T-test تفاوت معنی‌دار بین X و Y از نظر آماری در سطح یک درصد



شکل ۱- مقایسه مقادیر رطوبت برآورد شده توسط مدل SWAP و اندازه گیری شده در عمق ۲۰-۴۰



شکل ۲- مقایسه مقادیر رطوبت برآورد شده توسط مدل SWAP و اندازه گیری شده در عمق ۴۰-۶۰



شکل ۳- مقایسه مقادیر رطوبت برآورد شده توسط مدل SWAP و اندازه گیری شده در عمق ۶۰-۸۰

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مقدار عملکرد محصول و عملکرد بیولوژیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل در هر دو سال زراعی بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به دست آمد ولی مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ پایین‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود که ممکن است دلیل این امر بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، حساسیت زیاد مدل در تغییر حتی بسیار جزئی در برخی از پارامترهای ورودی مشخصات خاک مانند رطوبت باقی‌مانده و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و همچنین پارامترهای گیاهی متعدد به ویژه ارتفاع متوسط گیاه و سطح برگ ویژه باشد که باید به صورت بسیار دقیق اندازه‌گیری شوند. درصد رطوبت برآورد شده با مدل در سه

عمق مختلف خاک دارای  $R^2$  نسبتاً قابل قبولی بود و در نهایت با توجه به تحلیل‌های آماری ارائه شده نتایج واسنجی مدل نسبتاً مطلوب است. توصیه می‌شود عملکرد مدل SWAP با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای در سطح مزارع کشاورزان مورد بررسی قرار گیرد و با توجه به قابلیت این مدل در اتصال به برنامه GIS از ابزارهای مدیریتی روز دنیا مانند تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از دور استفاده و با تفسیر تصاویر، مدیریت یکپارچه آب در سطح شبکه آبیاری و زهکشی انجام گردد تا با به روز رسانی اطلاعات ورودی بتوان پیش‌بینی مناسبی از عملکرد محصول به دست آورد.

### منابع

- ۱- امیری، ا.، کاوسی، م.، و ف. کاوه. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل‌های گیاهی SWAP، ORYZA2000 و WOFOST در مدیریت‌های مختلف آبیاری. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۰، شماره ۳، صفحات ۲۸-۱۳.
- ۲- بابازاده، ح.، سرائی تبریزی، م.، پارس‌نژاد، م. و ع. م. مدرس ثانی. 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، صفحات: ۱۰۹-۹۹.
- ۳- پرچی عراقی، ف.، میر لطیفی، م.، و ا. گیلانی. ۱۳۸۸. ارزیابی مدیریت آبیاری با استفاده از شاخص‌های عکس‌العمل مدیریت آبیاری، کارایی مصرف آب مدل زراعی- هیدرولوژیکی SWAP. دومین همایش ملی خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، اصفهان، صفحات: ۳۶۴-۳۶۹.
- ۴- خانی قریه گپی، م.، داوری، ک.، علیزاده، ا.، هاشمی‌نیا، م. و ا. ذوالفقاران. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل SWAP در برآورد عملکرد چغندر قند تحت کمیت‌ها و کیفیت‌های مختلف آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۱، شماره ۲، صفحات: ۱۱۸-۱۰۷.
- ۵- زارع ایبانه، ح.، فرخی، ا.، وظیفه‌دوست، م. و خ. اژدری. ۱۳۸۹. برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۶، صفحات ۱۲۰۹-۱۱۹۷.
- ۶- سرائی تبریزی، م.، بابازاده، ح.، پارس‌نژاد، م. و ع. م. مدرس ثانی. 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، صفحات ۱۳-۱.
- ۷- کوهی چله‌کران، ن.، اسلامی، ا. و ر. اسدی. ۱۳۹۰. بهبود مدیریت آبیاری هیبریدهای ذرت دانه‌ای در ارزوئیه کرمان با استفاده از مدل SWAP. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۲، شماره ۱، صفحات ۳۲-۱۷.
- ۸- کیانی، ع. و م. همائی. ۱۳۸۶. ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در نیمرخ خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۸، شماره ۱، صفحات ۳۰-۱۳.
- ۹- نصیری محلاتی، م. ۱۳۷۹. مدل‌سازی فرآیندهای رشد گیاهان زراعی. چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، ۲۸۰ صفحه.
- ۱۰- میمنندی‌نژاد، م. ج. ۱۳۷۷. شالوده بوم‌شناسی. انتشارات دانشگاه تهران، ۸۰۸ صفحه.

- ۱۱- نوروزی، م.، ماهرانی، م. و م. مسچی. ۱۳۷۸. استفاده از آب‌های شور و لب شور برای آبیاری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲۶. ۷۶ صفحه.
- ۱۲- وردی‌نژاد، ح.، سهرابی، ت.، حیدری، ن.، عراقی‌نژاد، ش. و م. فیضی. ۱۳۸۹. تعیین عمق بهینه آبیاری محصولات زراعی در شرایط شوری با استفاده از مدل SWAP. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۳، صفحات: ۴۶۳-۴۷۵.
- 13- Bannayan, M. and N. M. J. Cruot. 1999. A stochastic modeling approach for real time forecasting of winter wheat yield. *Field Crop Research*, 62(4): 85-95.
- 14- Belmans, C. J., Wesseling, J. G. AND r. a. Feddes. 1983. Simulation of water balance of the cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology*, 63(4): 271-286.
- 15- Feddes, R. A., Kowalik, P. J. and H. Zaradny. 1987. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen University, Researches Report, 189p.
- 16- Heng, L. K., Hsiao, T. C., Evett, S., Howell, T. and P. Steduto. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101: 488-498.
- 17- Jamieson, P. D., Porter, J. R. and D. R. Wilson. 1991. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27: 337-350.
- 18- Kabat, P., Van den Broke, B. G. and R. A. Feddes. 1992. SWACROP: A water management and crop production simulation model. *ICID Bulletin* 92. 41(2): 61-84.
- 19- Kroes, J. G., Van Bakle, P. J. T., Huygen, J., Kroon, T. and R. Pastoorse. 2001, Actualisatie van de hydrology voor STONE 2.0, Report 298, Alterra Wageningen, 68p.
- 20- Kroes, J. G., Van Dam, J. C., Huygen, J. and R. W. Vervoot. 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, Report 81, Dept. of Water Resources, Wageningen University, 127p.
- 21- Loague, K. and R. E. Green. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7: 51-73.
- 22- Liu, H. F., Genard, M., Guichard, S. and N. Bertin. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *Journal of Experimental Botany*, 58(13): 3567-3580.
- 23- Noory, H., Van der Zee, S. E. A., Liaghat, A. M., Parsinejad, M. and J. C. Van Dam. 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.
- 24- Sarai Tabrizi, M., Parsinejad, M. and H. Babazadeh. 2012. Efficacy of partial root drying technique for optimizing soybean crop production in semi-arid regions. *Irrigation and Drainage*, 61(1): 80-88.
- 25- Vazifedoust, M., Van Dam, J. C., Feddes, R. A. and M. Feizi. 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management*, 95: 89-109.
- 26- Van Dam, J.C. 2000. Field scale, water flow and solutes transport, SWAP model concepts, Parameter Estimation and case studies. Ph.D. Thesis, Wageningen University, 167p.
- 27- Van Dam, J. C., Stricker, J. N. M. and P. Droogers. 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multi-step outflow experiment. *Soil Science Society American Journal*, 58(3): 647-652.

- 28- Van Dam, J.C., Huygen, J., Wesseling, J. G., Feddes, R. A., Kabat, P., Van Walsum, P. E. V., Groenendijk P. and C. A. Van Diepen. 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 University, 167p.
- 29- Van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 85p.
- 30- Wesseling, J. G., Elbers, J. A., Kabat, P. and B. G. Van Den Broek. 1991. SWATRE: Instructions for input. Internal Note, Winard Staring Center, Wageningen University, 98p.