

## تحلیل عدم قطعیت در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در دو مزرعه فاریاب در منطقه خشک

مجتبی شفییعی<sup>۱</sup> - بیژن قهرمان<sup>۲\*</sup> - بهرام ثقفیان<sup>۳</sup> - کامران داوری<sup>۴</sup> - مجید وظیفه‌دوست<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۳۰

### چکیده

تحلیل عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌های آب در خاک این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اطلاعات بیشتری در مورد خروجی‌های مدل پیش‌بینی به‌دست آورده و با اطمینان بیشتری از نتایج آن‌ها در فرآیندهای تصمیم‌گیری استفاده کرد. در این مطالعه، از مدل آگروهیدرولوژی SWAP جهت شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در خاک در دو مزرعه تحت کشت گندم و ذرت در منطقه‌ی خشک اصفهان استفاده شد. ابتدا میزان عدم قطعیت در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در مزارع مذکور با کاربرد روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) با یکدیگر مقایسه و سپس براساس نتایج به‌دست آمده از عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک، تاثیر عدم قطعیت در شبیه‌سازی رطوبت خاک بر مؤلفه‌های جریان آب در خاک بررسی شده است. نتایج نشان داد که در شرایط فاریاب، دقت برآورد تبخیر-تعرق واقعی تحت شرایط عدم قطعیت در شبیه‌سازی رطوبت خاک، نسبتاً بالا بوده به‌طوری‌که ضریب تغییرات آن برای هر دو مزرعه کم‌تر از ۴ درصد به‌دست آمد. درحالی‌که دقت برآورد مقادیر نفوذ عمقی در هر دو مزرعه کم‌تر بوده و به شدت تحت تاثیر مقادیر نامطمئن هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: واسنجی، SWAP، تبخیر-تعرق واقعی، نفوذ عمقی

### مقدمه

عدم قطعیت تشابهات (GLUE<sup>v</sup>) برای برآورد پارامترهای خاک و ژنوتیپ در مدل گیاهی CERES-Maize استفاده کرده و عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی عملکرد ماده‌ی خشک، تاریخ گلدهی و تاریخ برداشت برای ذرت شیرین را در شمال فلوریدا توسط داده‌های مزرعه‌ای موجود از داده‌های خاک و ضرایب ژنوتیپ ارزیابی کردند. ازومی و همکاران (۱۲) در مقیاس منطقه‌ای از روش MCMC برای بهینه‌سازی مجموعه پارامترها و کمی‌سازی مقدار میزان عدم قطعیت در تخمین عملکرد محصول برنج در ژاپن استفاده کرده و نتیجه گرفتند که عدم قطعیت در تخمین عملکرد محصول در شرایط گرم شدن هوا بیش‌تر از شرایط معمول می‌باشد.

مدل SWAP از جمله مدل‌هایی است که به‌طور گسترده جهت شبیه‌سازی تغییرات بیلان آب در خاک (۱)، شبیه‌سازی رشد گیاهان (۲)؛ همچنین جهت بررسی عوامل مدیریتی (آبیاری و کوددهی) در مزارع به‌کار رفته است (۳). اما تاکنون در مطالعات و کاربردهای مدل SWAP به مسئله‌ی وجود عدم قطعیت، مقدار آن و تاثیرات آن در شبیه‌سازی‌های مرتبط بررسی نشده است. در بیش‌تر تحقیقات مرتبط با کاربرد مدل SWAP از روش‌های سعی و خطا و به‌صورت دستی (مأ و همکاران (۱۶) و دهقان و همکاران (۱)) یا روش‌های متعین

مدل‌سازی امری ضروری جهت شناخت سیستم و کسب اطلاعات لازم در مورد کارکرد آن در شرایط مختلف می‌باشد. مدل‌سازی فرآیندها در سیستم خاک-گیاه-اتمسفر در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. این مدل‌ها، مدل‌های آگروهیدرولوژی، در سطح وسیع و با اهداف مختلف تهیه شده‌اند. مدل آگروهیدرولوژی خاک-آب-اتمسفر-گیاه (SWAP<sup>6</sup>) از جمله مدل‌هایی است که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (۸، ۱۵ و ۱۷). از طرف دیگر در سال‌های اخیر ضرورت افزایش آگاهی و توانایی کمی‌سازی عدم قطعیت‌های ذاتی در مدل‌سازی‌های کشاورزی-هیدرولوژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۱۴). هی و همکاران (۹) از روش عمومی

۱، ۲ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

\* - نویسنده مسئول: (Email: bijangh@um.ac.ir)

۳- استاد گروه مهندسی عمران آب، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

۵- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

آب در خاک در حالت اشباع/غیراشباع توسط حل عددی معادله‌ی ریچاردز می‌باشد (۱۵). توابع هیدرولیکی خاک در مدل SWAP (برای حل عددی ریچاردز) براساس توابع تحلیلی ونگنوختن-معلم (۲۱) تعریف شده‌اند:

$$K(\theta) = K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{n/n-1})]^2 \quad (۱)$$

$$S_e = \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[ \frac{1}{1 + |ah|^n} \right]^{n-1} \quad (۲)$$

در روابط فوق،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع ( $\text{cm d}^{-1}$ )،  $S_e$  اشباع نسبی،  $\theta_r$  رطوبت باقی‌مانده ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )،  $\theta_s$  رطوبت اشباع ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )،  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ )،  $n$  و  $\lambda$  ضرایب تجربی (بدون بعد) هستند.

شرایط مرزی بالادست توسط تبخیر-تعرق، آبیاری و/یا بارندگی تعیین شده و تبخیر-تعرق پتانسیل ( $ET_p$ ) توسط رابطه‌ی پنمن-مونتیث محاسبه می‌شود (۴). مدل SWAP برای محاسبه‌ی عملکرد گیاه هم دارای مدل شبیه‌سازی رشد گیاه در حالت ساده و هم پیشرفته است. در این مطالعه از مدل شبیه‌سازی رشد گیاه ساده در SWAP استفاده شده که در آن رشد محصول توسط مقادیر اندازه-گیری شده‌ی شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و عمق ریشه در طول دوره‌ی رشد، که تغییرات آن‌ها از شروع رشد تا برداشت به‌صورت خطی فرض شده است، شبیه‌سازی می‌شود.

### مزارع مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه مزارع انتخابی در واحد کشت و دام قیام، در شبکه‌ی آبیاری برخوار واقع در شمال شهر اصفهان و در حوضه‌ی آبریز زاینده رود می‌باشد. این منطقه دارای اقلیم خشک تا نیمه خشک با متوسط بارندگی سالانه‌ی ۱۶۵ میلی‌متر می‌باشد. در این منطقه وجود خاک ریزبافت (رسی لومی تا لوم سیلتی رسی) به همراه دسترسی به آب‌های زیرزمینی و سطحی با کیفیت خوب ( $EC < 2$  dSm<sup>-1</sup>) شرایط مناسبی را برای رشد محصولات فراهم آورده است. در این تحقیق دو مزرعه‌ی تحت کشت گندم زمستانه و ذرت که اطلاعات و داده‌های آن‌ها در طول فصل زراعی ۸۴-۱۳۸۳ جمع‌آوری شده (۲۳) مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌های اندازه‌گیری شده شامل: بافت خاک و چگالی ظاهری که یک بار در ابتدای دوره اندازه-گیری شده‌اند، تغییرات رطوبت خاک که در سه عمق ۱۵-۳۰-۱۵ و ۳۰-۶۰ در زمان‌های مختلف در طول دوره‌ی رشد به‌صورت هفتگی با روش وزنی تعیین شده‌اند، عمق آب آبیاری و تاریخ آبیاری، مشخصات گیاهی (شامل ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ و عمق ریشه) در طول دوره‌ی رشد اندازه‌گیری شده‌اند.

مانند کد PEST (سینگ و همکاران (۱۷) و وظیفه‌دوست و همکاران (۳)) جهت واسنجی (یعنی تخمین پارامترها) مدل استفاده است. مرور اغلب مطالعات گذشته نشان می‌دهد که تخمین پارامترهای مدل SWAP اغلب توسط داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت در خاک رخ بوده است و سپس از مدل واسنجی شده جهت بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی و تصمیم‌گیری‌ها استفاده شده است. برای مثال اینس و دروگرز (۱۱) پارامترهای مدل SWAP (که شامل پارامترهای هیدرولیکی خاک هستند) را نسبت به تغییرات رطوبت خاک واسنجی کرده‌اند. بر پایه‌ی نتایج آنها استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت خاک جهت واسنجی پارامترها نسبت به تبخیر-تعرق نتایج دقیق‌تری می‌دهد. هرچند که برخی تحقیقات (۱۳ و ۱۸) که بیشتر آن‌ها در مقیاس منطقه‌ای بوده‌اند پارامترهای مدل را با استفاده از تبخیر-تعرق واقعی که توسط روش‌های سنجش از دور به‌دست آمده نیز واسنجی کرده‌اند.

معمولاً پس از تخمین پارامترهای مدل (واسنجی)، جهت افزایش بهره‌وری آب در مزارع اقدام به سناریوسازی می‌شود، در حالی که عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌سازی نادیده گرفته می‌شود. هدف این مقاله، بررسی عدم قطعیت در برآورد مؤلفه‌های بیلان آب (تبخیر-تعرق واقعی و نفوذ عمقی) در دو مزرعه‌ی فاریاب ذرت و گندم در منطقه‌ی خشک اصفهان می‌باشد. در بیشتر کاربردهای مدل SWAP در مزارع، پارامترهای مدل براساس داده‌های برداشت شده‌ی رطوبت خاک واسنجی می‌شوند. بنابراین به سبب وجود ناطمینانی (وجود خطا) در تخمین پارامترها، زمانی که مدل واسنجی شده برای پیش-بینی مؤلفه‌های بیلان آب در خاک استفاده می‌شود، بررسی تاثیر این ناطمینانی ضروری است. هدف این تحقیق علاوه بر مقایسه‌ی میزان عدم قطعیت در واسنجی مدل SWAP در دو مزرعه با شرایط متفاوت (مانند نوع گیاه، دوره رشد و مدیریت آب آبیاری)، به این پرسش پاسخ خواهد داد که با توجه به شرایط اقلیمی و مدیریتی منطقه‌ی مورد مطالعه، با چه دقتی می‌توان پس از این که مدل SWAP نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت خاک واسنجی شد از آن برای پیش‌بینی مؤلفه‌های بیلان آب (تبخیر-تعرق واقعی و نفوذ عمقی) در مقیاس مزرعه استفاده کرد.

### مواد و روش‌ها

#### مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP

مدل SWAP، مدلی فیزیکی جهت شبیه‌سازی زنجیره‌ی پیوسته‌ی آب-خاک-گیاه و اتمسفر می‌باشد (۱۵). با استفاده از این مدل جریان آب، املاح و حرارت به‌صورت عمودی در ستون خاک و به‌صورت یک بعدی در طول دوره‌ی رشد گیاه در مقیاس مزرعه شبیه‌سازی می‌شود. هسته‌ی اصلی مدل، شبیه‌سازی جریان عمودی

## ورودی‌ها و پارامترهای مدل SWAP

اطلاعات ورودی هواشناسی روزانه شامل درجه‌حرارت و رطوبت نسبی است که از ایستگاه سینوپتیک شرق اصفهان (در سال ۲۰۰۵) نزدیک به منطقه برای محاسبه‌ی تبخیر-تعرق گیاه مرجع توسط رابطه‌ی پنمن-مونتیت در مدل استفاده شده است. در مزرعه‌ی مورد مطالعه تحت کشت گندم زمستانه و ذرت به ترتیب تعداد ۶ و ۸ بار آبیاری صورت گرفته که به‌طور متوسط هر بار با عمق‌های ۱۷ و ۱۴ سانتی‌متر (۲۳) وارد مدل شده‌اند. به طوری که مجموع عمق آبیاری برای مزرعه گندم و ذرت به ترتیب ۱۰۲۰ و ۱۱۲۰ میلی‌متر بوده است. به سبب آبیاری غرقابی در مزارع مورد مطالعه، مشاهده شده که در برخی موارد بعد از آبیاری، شرایط ماندابی<sup>۱</sup> بر روی سطح خاک به‌وجود می‌آید که مقدار آن در قالب پارامتری به‌نام حداکثر ارتفاع ماندابی برابر ۵ سانتی‌متر در مدل SWAP وارد شده است. شرط مرزی پایین‌دست برای این مطالعه به سبب عمق زیاد آب زیرزمینی (بیش از ۱۰۰ متر) در منطقه به‌صورت زهکشی آزاد در نظر گرفته شده است. براساس مطالعات گذشته (۱۰، ۱۱ و ۱۳) در حالت استفاده از مدل گیاهی ساده در SWAP پارامترهای مدل که نیاز به واسنجی دارند، پارامترهای هیدرولیکی خاک (روابط ۱ و ۲) می‌باشند. لذا در این تحقیق نیز شش پارامتر معادلات ونگنوخن-معلم (به عبارتی  $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s$  و  $\lambda$ ) با فرض همگن بودن خاک‌رخ در طول دوره‌ی رشد (۱۰) استفاده شده است.

## تحلیل عدم قطعیت

عدم قطعیت به‌صورت بازه‌های محتمل از احتمالات وقوع پدیده تعریف شده و به‌طور کلی منابع ایجاد کننده‌ی آن به سه دسته تقسیم می‌شوند: الف) عدم قطعیت در ساختار مدل که به‌واسطه‌ی ساده‌سازی‌های انجام شده در ارائه‌ی فرآیندهای فیزیکی می‌باشد، ب) عدم قطعیت در اطلاعات ورودی مدل که در واقع داده‌هایی را شامل می‌شود که یا به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری شده یا از طریق پیش‌بینی به‌عنوان ورودی‌های مدل استفاده می‌شوند مانند داده‌های بارندگی یا درجه‌حرارت و پ) عدم قطعیت در پارامترهای مدل که اغلب توسط واسنجی برآورد می‌شوند و تعدادی هم از طریق اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی پدیده تعیین می‌گردند اما در عمل هر دو شیوه منجر به عدم قطعیت در پارامترها می‌شود (۱۹). بنابراین در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل و به کمیّت درآوردن میزان عدم قطعیت در خروجی مدل جهت رسیدن به پیش‌بینی‌های مطمئن در مدل‌سازی ضروری است. روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) از جمله روش‌هایی است که به‌طور گسترده در این مورد استفاده شده است (۶). همچنین این روش با محاسبه‌ی مقادیر درست‌نمایی عملکرد

مدل را که در اثر ترکیب‌های مختلف پارامترهای آن می‌باشد بررسی می‌کند (۲۴). مراحل انجام روش GLUE که جهت واسنجی مدل SWAP در این مطالعه استفاده شده، به شرح زیر است.

**گام اول:** محدوده‌ی تغییرات اولیه (یا توزیع پیشین<sup>۲</sup>) پارامترهای واسنجی مدل تعیین می‌شود که در صورت فقدان اطلاعات کافی، از تابع توزیع یکنواخت استفاده می‌شود.

**گام دوم:** براساس روش‌های مبتنی بر مونت کارلو، مانند روش نمونه‌گیری مربع‌لاتین<sup>۳</sup> (LHS)، تعداد N مجموعه پارامتر تصادفی تولید می‌شود. این روش با نمونه‌گیری در فواصل مساوی در فضای هر پارامتر بدون افزایش در تعداد نمونه‌ها باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت کارلو می‌شود (۲۰).

**گام سوم:** مدل SWAP با استفاده از مجموعه پارامترهای تولید شده در گام قبل و محاسبه‌ی مقدار درست‌نمایی<sup>۴</sup> (L) براساس مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی رطوبت توسط مدل و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در مزرعه اجرا می‌شود. در این‌جا از رابطه‌ی معکوس واریانس خطا (Y) به‌عنوان معیار درست‌نمایی استفاده شده است:

$$L = \left( \frac{\sum_{j=1}^n (O_j - Y(\theta_i))^2}{n-2} \right)^{-1} \quad (3)$$

که در آن  $\theta_i$  مجموعه پارامتر  $\theta_i$ ،  $O_j$  مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده،  $Y(\theta_i)$  خروجی مدل به ازای هر مجموعه پارامتر و n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت می‌باشد. مقادیر بزرگ‌تر درست‌نمایی نشان دهنده‌ی تطابق بیشتر بین رطوبت‌های شبیه‌سازی شده ( $Y(\theta_i)$ ) و واقعی ( $O_j$ ) می‌باشد.

**گام چهارم:** در این مرحله با در نظر گرفتن آستانه‌ی قابل پذیرش<sup>۵</sup> (ASR)، مجموعه پارامترهایی که منجر به عملکرد بهتر مدل شده‌اند (مجموعه پارامترهای قابل قبول<sup>۶</sup>) از سایر مجموعه پارامترها جدا می‌شوند. به عبارت دیگر با مرتب کردن مقادیر درست-نمایی (L) محاسبه شده در گام قبل به همراه مجموعه پارامترهای ( $\theta$ ) مرتبط به آن به‌صورت کاهشی، بخشی از اجراهای مدل با عملکرد بالاتر به‌عنوان مجموعه پارامترهای قابل قبول انتخاب می‌شود. در این مطالعه آستانه‌ی قابل پذیرش به‌صورت درصدی از تعداد نمونه‌گیری‌ها (N) به میزان ۱٪ (۲۵) در نظر گرفته شده است. خصوصیات آماری (مانند فراوانی و پراکندگی) این مجموعه برای

2- Prior distribution  
3- Latin hypercube  
4- Likelihood Function  
5- Acceptable Sample Rate  
6- Behavioral parameter sets

1- Ponding

تعیین توزیع پسین<sup>۱</sup> پارامترها و استخراج دامنه‌ی بهینه‌ی مقادیر واسنجی شده‌ی پارامترها استفاده می‌شود.

**گام پنجم:** توسط محاسبه‌ی وزن‌های درست‌نمایی<sup>۲</sup> برای مجموعه پارامترهای ( $\theta$ ) قابل قبول، عدم قطعیت خروجی مدل محاسبه می‌شود:

$$p_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (4)$$

که در آن  $p_i$  احتمال یا وزن درست‌نمایی مربوط به نامین مجموعه پارامتر و  $n$  تعداد مجموعه پارامترهای قابل قبول است. مجموع این وزن‌ها برابر با یک بوده و این مقادیر (یعنی وزن‌ها) تشکیل تابع چگالی احتمال<sup>۳</sup> (pdf) را می‌دهند. سپس برای خروجی شبیه‌سازی شده‌ی مدل، بازه‌ی اطمینان ۹۵٪ (95CI) استخراج می‌شود، به طوری که ۲/۵ درصد حدود بالا و پایین آن به‌عنوان شبیه‌سازی‌های پرت کنار گذاشته شده تا محدوده‌ی عدم قطعیت یا 95CI به‌دست آید. محدوده‌ی عدم قطعیت به‌دست آمده در روش GLUE تقریبی از تمامی انواع منابع خطا در فرآیند مدل‌سازی را منعکس ساخته و عدم قطعیت‌های مربوط را در پیش‌بینی مدل نشان می‌دهد (۷ و ۲۵). در این تحقیق تعداد مجموعه پارامترهای تصادفی در گام دوم ۱۰۰۰۰۰ ( $M$ ) در نظر گرفته شد که در این صورت تعداد مجموعه پارامترهای قابل قبول در گام پنجم ( $n$ ) برابر ۱۰۰۰ خواهد بود.

با انجام روش GLUE در مزارع مورد مطالعه، پارامترهای مدل SWAP نسبت به رطوبت خاک واسنجی می‌شوند. سپس با توجه به نتایج به‌دست آمده از گام چهارم (در این تحقیق ۱۰۰۰ مجموعه پارامتر قابل قبول)، مؤلفه‌های بیلان آب توسط SWAP محاسبه شده و نتایج آن که به‌صورت تابع چگالی احتمال قابل نمایش است، نشان‌دهنده‌ی عدم قطعیت در مؤلفه‌های بیلان آب خواهد بود.

## نتایج و بحث

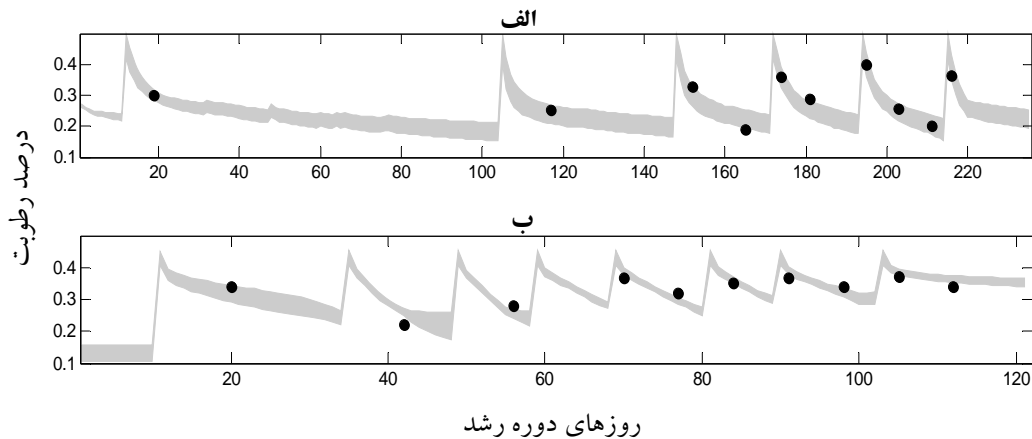
### نتایج تحلیل عدم قطعیت

در این بخش نتایج تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و پارامترهای مدل در دو مزرعه‌ی گندم و ذرت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. عدم قطعیت پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت در فرآیند واسنجی توسط روش GLUE به‌صورت محدوده اطمینان ۹۵٪ (95CI) به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت در تاریخ‌های مختلف در طول دوره‌ی رشد (از تاریخ ۱۸ آبان تا ۱ تیر

۱۳۸۴ برای گندم و از تاریخ ۱۲ تیر تا ۹ آبان ۱۳۸۴ برای ذرت) در لایه‌ی میانی (۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک) آورده شده است. در واقع میزان عدم قطعیت پیش‌بینی شده در رطوبت شبیه‌سازی شده در شکل ۱ نشان دهنده‌ی میزان عدم قطعیت کل (به عبارتی مجموع عدم قطعیت داده‌های ورودی، پارامترها و ساختار مدل) می‌باشد که توسط مجموعه پارامترهای قابل قبول به‌دست آمده در روش GLUE و در نظر گرفتن وزن‌های درست‌نمایی (رابطه‌ی ۴) به‌دست آمده‌اند. با توجه به شکل ۱، بیش‌تر داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت در داخل محدوده‌ی اطمینان قرار دارند به طوری که برای مزرعه‌ی گندم ۱۰۰ و ذرت ۸۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده توسط محدوده‌ی 95CI دربرگرفته شده‌اند. این امر نشان دهنده‌ی واسنجی مناسب مدل SWAP توسط روش GLUE در مزارع مذکور می‌باشد. علت پایین‌تر بودن عملکرد واسنجی در مزرعه‌ی ذرت ممکن است به‌دلیل وجود خطا در داده‌های اندازه‌گیری شده باشد. متوسط ضخامت 95CI (یا به عبارتی عدم قطعیت پیش‌بینی شده) برای مزرعه‌ی گندم ( $0.054 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) بیش‌تر از مزرعه‌ی ذرت ( $0.035 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) می‌باشد. علت این امر می‌تواند: الف) طولانی‌تر بودن دوره‌ی رشد گندم (۲۳۵ روز) نسبت به ذرت (۱۲۰ روز) در شبیه‌سازی باشد. ب) میزان بارندگی در طول دوره‌ی رشد گندم ۳۳ میلی‌متر و ذرت ۰/۰ میلی‌متر بوده است که این امر وجود یک عامل عدم قطعیت ورودی بیش‌تر در شبیه‌سازی رطوبت در دوره‌ی رشد گندم را نشان می‌دهد.

عدم قطعیت پارامترهای مدل توسط توابع توزیع پسین آن‌ها بررسی می‌شود. توابع توزیع پسین نشان‌دهنده‌ی میزان عدم قطعیت باقی‌مانده در پارامترهای تخمین زده شده توسط روش GLUE می‌باشد. این عدم قطعیت پارامترها به‌صورت کران بالا و پایین توزیع پسین هر پارامتر تعریف شده است. جدول ۱ دامنه‌ی نهایی پارامترها بعد از واسنجی توسط روش GLUE (کران بالا و پایین توزیع پسین که بیشترین مقادیر درست‌نمایی را دارند) را نشان می‌دهد. همچنین دامنه‌ی اولیه‌ی (توزیع پیشین) پارامترها قبل از واسنجی نیز آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیش‌تر پارامترها در هر دو مزرعه نسبت به دامنه‌ی اولیه‌شان کاهش یافته‌اند. مقایسه‌ی نتایج در دو مزرعه نشان می‌دهد که ضریب  $\alpha$  در مزرعه‌ی ذرت بهتر واسنجی شده و عدم قطعیت کم‌تری در مقایسه با مقدار آن در مزرعه‌ی گندم دارد. هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) در مزرعه‌ی ذرت نسبت به مزرعه‌ی گندم با عدم قطعیت بیشتری (بیش از ۲ برابر) به‌دست آمده است. سایر پارامترها در هر دو مزرعه تقریباً با توجه به دامنه‌ی اولیه‌شان، عدم قطعیت به طور تقریباً برابر تخمین زده شده‌اند. عوامل متعددی در میزان عدم قطعیت پارامترها و تخمین دقیق‌تر آن‌ها نقش دارند. زمانی که دامنه‌ی نهایی پارامتری کوچک باشد، نشان دهنده‌ی این است که داده‌های مشاهده‌ای که برای واسنجی مدل به‌کار رفته‌اند از اطلاعات کافی جهت تخمین پارامتر مذکور برخوردار بوده‌اند

- 1- Posterior distribution
- 2- Likelihood weight
- 3- Probability Density Function
- 4- 95% Confidence Interval



شکل ۱- بازه‌ی اطمینان ۹۵٪ رطوبت پیش‌بینی شده (بخش سایه‌خورده) و مقادیر اندازه‌گیری شده (نقاط) آن در مزرعه‌ی گندم (الف) و ذرت (ب)

جدول ۱- دامنه‌ی اولیه و نهایی پارامترهای واسنجی شده مدل SWAP

بعد از واسنجی		قبل از واسنجی		پارامتر	واحد
کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین		
۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۱۳	۰/۰۵	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	مغز
۰/۴۹	۰/۴۶	۰/۵۰	۰/۴۲	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	
۰/۰۲۴	۰/۰۱۰	۰/۰۲۹	۰/۰۰۷	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	
۱/۴۸	۱/۴۴	۱/۵۵	۱/۱۷	$n$ (-)	
۱۴	۷	۳۴/۰	۰/۳۳	$K_s$ ( $\text{cmd}^{-1}$ )	
-۴/۰	-۵/۰	۳/۶	-۵/۴	$\lambda$ (-)	
۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۵	۰/۰۴	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	ذرت
۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۴۰	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	
۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۴۰	۰/۰۰۵	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	
۱/۲۷	۱/۱۳	۱/۵۷	۱/۱۰	$n$ (-)	
۳۶	۲۰	۳۷/۵	۰/۳۲	$K_s$ ( $\text{cmd}^{-1}$ )	
۳/۲	-۱/۵	۳/۷	-۵/۸	$\lambda$ (-)	

منطقه ریشه‌ی گیاهان، امکان تحلیل سناریوهای مدیریتی آب در مزرعه را به راحتی فراهم می‌کنند. در تحقیقات مختلفی از این امکان جهت افزایش بهره‌وری آب در مزارع یا برنامه‌ریزی آبیاری استفاده شده است. با توجه به واسنجی مدل SWAP نسبت به داده‌های اندازه‌گیری رطوبت در این تحقیق، تحلیل اثر عدم قطعیت در برآورد پارامترهای مدل بر شبیه‌سازی مؤلفه‌های جریان، به عبارتی شار رو به بالا از سطح خاک (تبخیر-تعرق واقعی،  $ET_a$ ) و شار رو به پایین از منطقه‌ی ریشه (نفوذ عمقی،  $D_p$ )، اهمیت زیادی دارد. بر اساس توابع توزیع پسین پارامترهای واسنجی شده در بخش قبل (یا به عبارتی مجموعه پارامترهای قابل قبول از روش GLUE)، تابع توزیع احتمال مؤلفه‌های جریان به همراه ویژگی‌های آماری آن‌ها در شکل‌های ۲ و

عوامل دیگر که ممکن است در فرآیند واسنجی موجب افزایش عدم قطعیت در تخمین پارامترها شوند مربوط به منابع دیگر عدم قطعیت شامل وجود خطا در داده‌های ورودی مدل (داده‌های اقلیمی و میزان آب آبیاری در این تحقیق) و همچنین وجود اثرات جبرانی<sup>۱</sup> سایر پارامترهای مدل که مقادیر آن‌ها در واسنجی وارد نشده و ثابت فرض شده‌اند مانند اثر جبرانی پارامترهای جذب آب توسط ریشه (۱۰)، می‌باشد.

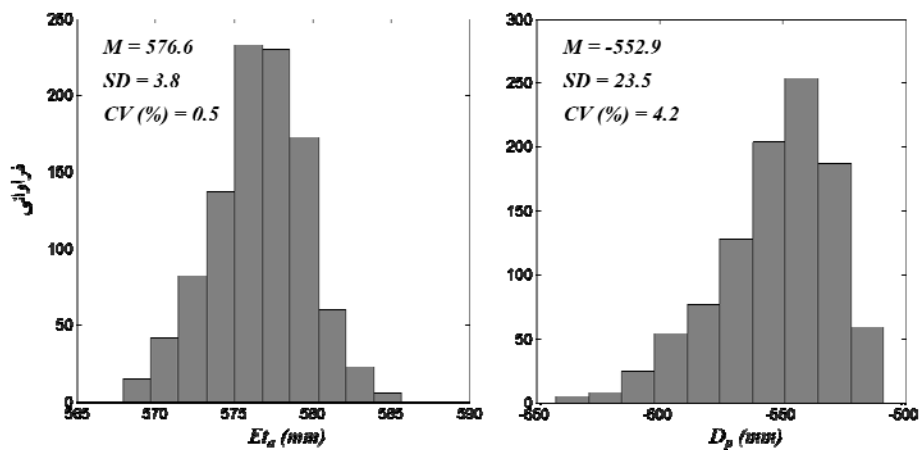
### عدم قطعیت مؤلفه‌های بیلان آب در خاک

مدل‌های آگروهیدرولوژی با شبیه‌سازی جریان آب در خاک در

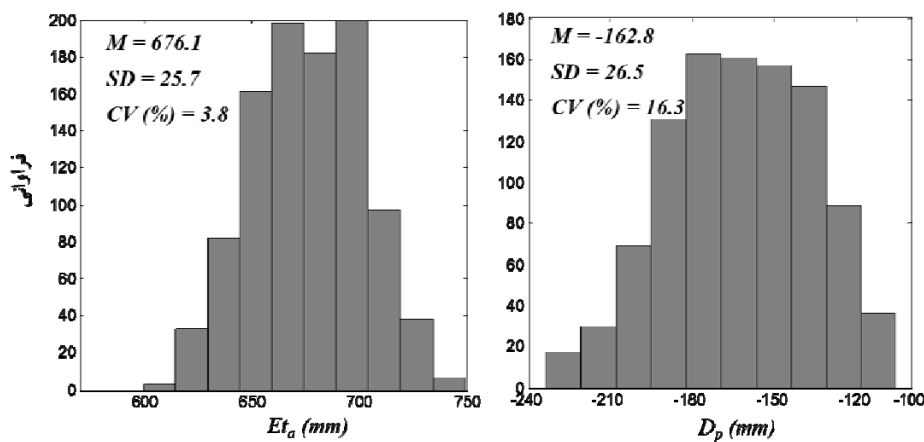
1- Compensating effect

پارامترهای خاک (به عبارتی  $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s$  و  $\lambda$  در مدل ونگنوختن-معلم) حساس است (۱۳) به علت وجود اثر جبرانی در مجموعه پارامترهای به دست آمده تاثیر عدم قطعیت بر این مؤلفه نسبت به  $D_p$  کم تر به دست آمده است. عامل دیگر مربوط به شرایط اقلیمی منطقه و مدیریت آبیاری در مزارع می باشد. چون در شرایطی که دوره های تنش رطوبت در مزارع به سبب آبیاری های متناوب کوتاه است، مقدار تبخیر-تعرق واقعی به مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل نزدیک است. بنابراین پارامترهای هیدرولیکی خاک در فرآیند تبخیر-تعرق نقشی کم رنگ داشته و تبخیر-تعرق واقعی می تواند در حداکثر مقدار خود صورت گیرد. بارنی و همکاران (۵) نیز بدین مسئله اشاره کرده و نتیجه گرفتند که در اراضی فاریاب اثر گذاری پارامترهای هیدرولیکی خاک بر  $ET_a$  معنی دار نبوده و بنابراین خروجی های مدل با مجموعه پارامترهای مختلف می تواند یکسان باشد.

۳ آورده شده است. مقادیر انحراف معیار مؤلفه های جریان در مزرعه های گندم و ذرت، اثر عدم قطعیت در شبیه سازی رطوبت خاک را بر  $ET_a$  و  $D_p$  در این مزارع نشان می دهد. برپایه ی نتایج،  $D_p$  پیش بینی شده در مزرعه ی ذرت از نااطمینانی بیشتری (به علت داشتن ضریب تغییرات بیشتر) نسبت به مقدار مشابه آن در مزرعه ی گندم برخوردار است. علت آن احتمالاً وجود عدم قطعیت بیشتر در واسنجی پارامتر  $K_s$  در مزرعه ی ذرت (در بخش ۳-۱) می باشد. چون شرایط مرزی پایین در منطقه ی مورد مطالعه زهکشی آزاد بوده است، لذا  $D_p$  طبق رابطه ی داری تحت گرادیان هیدرولیکی واحد صورت گرفته و مقدار آن تنها به هدایت هیدرولیکی بستگی دارد. بنابراین با افزایش عدم قطعیت در واسنجی پارامتر  $K_s$ ، مقدار  $D_p$  نیز نامطمئن تر پیش بینی خواهد شد. از طرف دیگر  $ET_a$  نسبت به  $D_p$  در هر دو مزرعه کم تر تحت تاثیر عدم قطعیت پارامترها بوده به طوری که ضریب تغییرات آن در هر دو مزرعه بسیار کوچک به دست آمده است. یک عامل محتمل می تواند این باشد که چون  $ET_a$  نسبت به تمامی



شکل ۲- تابع چگالی احتمال (pdf) مؤلفه های جریان در مزرعه ی گندم (M: میانگین، SD: انحراف معیار و CV: ضریب تغییرات)



شکل ۳- تابع چگالی احتمال (pdf) مؤلفه های جریان در مزرعه ی ذرت (M: میانگین، SD: انحراف معیار و CV: ضریب تغییرات)

## نتیجه‌گیری

ورودی است. همچنین نتایج نشان داد که در مناطق خشک که شرایط مرزی پایین دست به سبب آب زیرزمینی عمیق به صورت زهکشی آزاد می‌باشد، مقدار نفوذ عمقی تنها به تابع هدایت هیدرولیکی خاک (به ویژه پارامتر  $K_s$ ) وابسته می‌باشد. بنابراین تخمین (واسنجی) پارامتر  $K_s$  از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین نشان داده شد که در مناطق فاریاب که دوره‌های تنش رطوبتی عموماً کوتاه است، میزان تبخیر تعرق واقعی کمتر تحت تاثیر پارامترهای واسنجی شده (به عبارتی پارامترهای هیدرولیکی خاک) می‌باشد. بنابراین در این شرایط به خصوص، برآورد تبخیر-تعرق واقعی در مدل SWAP دقیق تر بوده و صرفاً تابع عوامل جوئی و/ یا رشد گیاه (عوامل گیاهی مانند شاخص سطح برگ) می‌باشد.

امروزه به سبب وجود منابع متعدد خطا، تحلیل عدم قطعیت به عنوان بخشی جدانشدنی در مدل سازی و بررسی خروجی‌های مدل‌ها پذیرفته شده است. این تحقیق دو هدف را مورد ارزیابی قرار داد. ۱) مقایسه‌ی میزان عدم قطعیت در پارامترها و خروجی رطوبت شبیه‌سازی شده در دو مزرعه با شرایط مرزی متفاوت (مانند نوع گیاه، دوره‌ی رشد و مدیریت آب آبیاری) و ۲) بررسی اثر عدم قطعیت در استفاده از مدل SWAP زمانی که مدل براساس داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت خاک واسنجی می‌شود. نتایج نشان داد که عدم قطعیت در شبیه‌سازی رطوبت در مزرعه‌ی گندم بیش تر از ذرت است، که احتمالاً به سبب وجود عوامل بیش تر عدم قطعیت در داده‌های

## منابع

- ۱- دهقان ه، علیزاده ا، و حقایقی مقدم ا. ۱۳۸۹. تخمین اجزای بیلان آب در مقیاس مزرعه با مدل شبیه‌سازی SWAP. مجله آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۶، ص ۱۲۷۶-۱۲۶۵.
- ۲- نوری ح، لیاقت ع،، پارسى نژاد م. و وظیفه دوست م. ۱۳۸۹. برآورد عملکرد گندم و ذرت علوفه‌ای در شرایط محدودیت توام آبیاری و شوری با استفاده از مدل آگروهیدرولوژی SWAP. آب و خاک، جلد ۲۴(۶)، ص ۴۹۴-۴۸۴.
- ۳- وظیفه دوست م،، علیزاده ا،، کمالی غ. و فیضی م. ۱۳۸۶. افزایش بهره‌وری آب کشاورزی در مزارع تحت آبیاری منطقه برخوار اصفهان. آب و خاک، جلد ۲۲، شماره ۲، ص ۴۹۴-۴۸۴.
- 4- Allen R., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. FAO, Irrigation and drainage Paper 56, Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy, p. 297.
- 5- Baroni G., Facchi A., Gandolfi C., Ortuani B., Horeschi D., Van Dam J.C. 2010. Uncertainty in the determination of soil hydraulic parameters and its influence on the performance of two hydrological models of different complexity. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 251–270.
- 6- Beven K.J. and Binley A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrol. Processes*, 6(3): 279-298.
- 7- Beven K.J. and Freer J. 2001. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J. Hydrol.* 249 (1–4), 11–29.
- 8- Droogers P. 2000. Estimating actual evapotranspiration using a detailed agro-hydrological model. *J. Hydrol.* 229, 50–58.
- 9- He J., Dukes M.D., Jones J.W., Graham W.D. and Judge J. 2009, Applying GLUE for estimating CERES-Maiz genetic and soil parameters for sweet corn production, *Transactions of the ASABE* 52 6 1907–1921.
- 10- Hupet F., Lambot S., Feddes R.A., Van Dam J.C., and Vanclooster M. 2003. Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. *Water Resour. Res.* 39:(11) doi: 10.129/2003WR002046.
- 11- Ines A.V.M., and Droogers P. 2002. Inverse modeling in estimating soil hydraulic functions: A genetic algorithm approach, *Hydrol Earth Syst Sci.*, 6, 49–65.
- 12- Iizumi T, Yokozawa M., and Nishimori M. 2009, Parameter estimation and uncertainty analysis of a large scale crop model for paddy rice: Application of a Bayesian approach, *agricultural and forest meteorology* 149. 333 –348.
- 13- Jhorar R.K., Bastiaanssen W.G.M., Feddes R.A., Van Dam J.C. 2002. Inversely estimating soil hydraulic functions using evapotranspiration fluxes. *J. Hydrol.* 258, 198–213.
- 14- Juston J., Seibert J., and Johansson P.O. 2010. Temporal sampling strategies and uncertainty in calibrating a conceptual hydrological model for a small boreal catchment. *Hydrological Processes* 23 (21), 3093–3109.
- 15- Kroes J.G., and Van Dam J.C. 2003. Reference Manual SWAP version 3.0.3, *Alterra-rapport 773*, ISSN 1566–7197. 367, 93–103.
- 16- Ma Y., Feng S., Huo Z., and Song X. 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Math. Comput. Model.* 54, 1044–1052.

- 17- Singh R., Van Dam J.C., and Feddes R.A. 2006. Water Productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agric. Water Manage.* 82: 253-278.
- 18- Singh U., and Kang L. 2010. Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques. *Agric. Water Manage.* 97: 1210-1220.
- 19- Tung Y., and Yen B. 2006. *Hydrosystem Engineering Uncertainty Analysis*. McGraw-Hill Book Company, NY, USA.
- 20- Vachaud G. and Chen T. 2002. Sensitivity of a large-scale hydrologic model to quality of input data obtained at different scales; distributed versus stochastic non-distributed modeling, *J. Hydrol.*, 264, 101–112.
- 21- Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. *Soil Sci. Am. J.* 44, 892–898.
- 22- Van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., Van Walsum P.E.V., Groenendijk P., and Van Diepen C.A. 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil–Water–Atmosphere–Plant environment. Report 71, Sub department of Water Resources, Wageningen University, Technical document 45, Alterra Green World Research, Wageningen, The Netherlands, 167 pp.
- 23- Vazifedoust M. 2007. Development of an agricultural drought assessment system: integration of agrohydrological modeling, remote sensing and geographical information. Dissertation PhD thesis. Wageningen University.
- 24- Vazquez R.F., Beven K., and Feyen J. 2009. GLUE based assessment on the overall pre-dictions of a MIKE SHE application, *Water Resour. Manage.* 23, 1325–1349.
- 25- Vrugt J.A., Ter Braak C. J.F., Gupta H.V., and Robinson B.A. 2008. Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches to hydrologic modeling, *Stoch. Env. Res. Risk A.*, 23, 1059 – 1060, doi: 10.1007/s00477-008-0274-y.
- 26- Vrugt J.A., Ter Braak C.J.F., Clark M.P., Hyman J.M., Robinson B.A. 2008. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resour. Res.* 44, W00B09, doi:10.1029/2007WR006720.



## Uncertainty Analysis in Prediction of Soil Water Balance Components in two Irrigated Field in Arid Region

M. Shafiei<sup>1</sup> - B. Ghahraman<sup>2\*</sup> - B. Saghafian<sup>3</sup> - K. Davary<sup>4</sup> - M. Vazifedust<sup>5</sup>

Received:15-12-2013

Accepted:21-09-2014

### Abstract

Uncertainty analysis is a useful tool to evaluate soil water simulations in order to get more information about the models output. These information provide more confidence for decision making processes. In this study, SWAP model is applied for soil water balance simulations in two fields which are planted by wheat and maize in an arid region. First the amount of uncertainty is estimated and compared for soil moisture simulation by using Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) in the two fields. Then based on the computed parameter uncertainty, the effect of uncertainty in soil moisture simulation is evaluated on soil water balance components. Results indicated that in arid regions with irrigated agricultural fields, prediction of actual evapotranspiration is relatively precise and the coefficient of variation for the two fields are less than 4%. Moreover, the prediction of deep percolation for the two fields are influenced by the uncertain hydraulic conductivity and showed lower precision according to the actual evapotranspiration.

**Keywords:** Calibration, SWAP, Actual evapotranspiration, Deep percolation

---

1,2,4- PhD Student, Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(\* - Corresponding Author Email: [bijangh@um.ac.ir](mailto:bijangh@um.ac.ir))

3- Professor, Technical and Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

5- Assistant Professor, of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Guilan University