واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP با استفاده از روش GLUE

مجتبی شفیعی [۱*]، بیژن قهرمان، بهرام ثقفیان، کامران داوری و مجید وظیفه‌دوست

دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

moj.shafiei@gmail.com

استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

bijan.ghahraman@yahoo.com

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

b.saghafian@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

k.davary@yahoo.com

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

majid.vazifedoust@yahoo.com

Archive of SID

چکیده

تجزیه و تحلیل عدم قطعیت پارامترها در مدل‌های هیدرولوژی و تشخیص ویژگی‌های آماری خروجی مدل براساس روابط موجود بین پارامترها و ورودی‌های مدل از مهم‌ترین موارد مدل‌سازی در هیدرولوژی به شمار می‌آید. در این پژوهش روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE) برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل آگروهیدرلوژی خاک-آب-اتمسفر-گیاه (SWAP) نسبت به داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده در یک مزرعه تحت کشت ذرت واقع در دشت قیام در استان اصفهان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد از بین شش پارامتر هیدرولیکی خاک در مدل ونگنوختن-معلم، پارامترهای θ_r و K_s در روند واسنجی از قابلیت تشخیص کمتری برخوردار بوده و بیشترین نقش در عدم قطعیت رطوبت شبیه‌سازی شده داشتند. همچنین، نتایج نشان داد که نمی‌توان پارامترهای هیدرولیکی خاک در رابطه ونگنوختن-معلم را که ماهیت برازشی دارند در فرآیند واسنجی ثابت فرض کرد. بررسی عدم قطعیت رطوبت شبیه‌سازی شده نشان داد که روش GLUE به خوبی توانست تغییرات رطوبت را در نیمرخ خاک در طول دوره رشد محصول واسنجی کند به طوری که اغلب داده‌های اندازه‌گیری شده (میانگین ۷۵ درصد) در محدوده‌ی اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفتند.

واژه های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی خاک، محدوده‌ی اطمینان

۱- آدرس نویسنده مسئول: دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی آب.

* دریافت: مهر ۱۳۹۲و پذیرش: خرداد ۱۳۹۳

www.SID.ir

مقدمه

مدل‌های آگروهیدرولوژی ابزارهایی سودمند برای شناخت فرآیندهای بیوفیزیکی حاکم بر سیستم خاک-گیاه-اتمسفر است. این مدل‌ها تغییرات بیلان آب در خاک، اثرات تغییرات آب و هوا، خصوصیات ژنوتیپ-های گیاهی، ویژگی‌های خاک و عوامل مدیریتی (آبیاری و کوددهی) را بر روی رشد گیاه شبیه‌سازی می‌کنند. از بین مدل‌های یادشده مدل SWAP[۲] (کروس و وندام، ۲۰۰۳) دارای محبوبیت بیشتری است.

این مدل در پژوهش‌های مختلف تاکنون در شرایط مختلف مزرعه از لحاظ مدیریت کمّی و کیفی و حتی در مقیاس‌های شبکه آبیاری و حوضه‌های آبریز به صورت توزیعی به طور موفقیت آمیزی استفاده شده است.از جمله، مهم‌ترین کاربردهای مدل SWAP در ایران مواردی انتخاب شده است: اکبری و همکاران (۱۳۸۶) برای ارزیابی اثر تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری محصول پنبه بر بیلان آب و املاح در منطقه رودشت اصفهان از این مدل استفاده کردند.

وظیفه‌دوست و همکاران (۲۰۰۸) و حقایقی مقدم و فرزام‌نیا (۱۳۹۱) به منظور افزایش بهره‌وری آب محصولات مختلف و برنامه‌ریزی آبیاری از مدل SWAP استفاده کرده‌اند، نوری و همکاران (۲۰۱۱) برای ارزیابی عملکرد گندم و ذرت در شبکه آبیاری و زهکشی وشمگیر در شرایط محدویت توام آب و شوری مدل SWAP را ارزیابی کرده‌اند و همچنین دهقان و همکاران (۱۳۸۹) مؤلفه‌های بیلان آب را در مقیاس مزرعه در منطقه نیشابور به وسیله‌ی SWAP شبیه‌سازی کردند.

در اغلب تحقیقات و کاربردهای مدل SWAP از روش‌های سنتی تعیین پارامترهای مدل (واسنجی) عمدتاً شامل روش جستجو با سعی و خطا که اغلب وقت‌گیر بوده و در آن نااطمینانی در رسیدن به جواب بهینه وجود دارد یا استفاده از مدل‌های رگرسیون غیرخطی برای واسنجی پارامترها مانند PEST که داری محدودیت-هایی از جمله تعداد پارامترهای واسنجی و حساس بودن نسبت به تخمین اولیه پارامترها می‌باشد استفاده کرده‌اند (عابدینی و همکاران، ۱۳۸۲). در واقع، در فرآیند مدل-سازی همواره نااطمینانی به طور ذاتی و اجتناب‌ناپذیری وجود دارد که به سبب وجود عدم قطعیت و خطا در داده‌های ورودی مدل، پارامترها و ساختار مدل است (بی-ون، ۱۹۹۶). بنابراین، به کمیّت درآوردن میزان عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها برای رسیدن به پیش‌بینی‌های مطمئن در مدل‌سازی امری اجتناب ناپذیر است. هدف از این پژوهش تحلیل عدم قطعیت در واسنجی پارامترهای مدل SWAP است.

عدم قطعیت به صورت بازه‌های محتمل از احتمالات وقوع یک پدیده تعریف می‌شود. یکی از روش‌هایی که به طور گسترده برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های هیدرولوژی استفاده می‌شود، روش عمومی عدم قطعیت تشابهات (GLUE[۳]) است (بی‌ون و باینلی، ۱۹۹۲). در این روش، با فرض عدم وجود پارامترهای بهینه منحصر به فرد (یکتا)، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو چندین سری پارامترهای مختلف ایجاد شده، نتایج حاصل از سری‌های مختلف براساس نسبت اعتمادشان وزن گرفته و سپس از این وزن‌ها برای تعیین توزیع احتمالاتی پیش‌بینی استفاده می-شود.

تا به حال اغلب کاربردهای روش GLUE در واسنجی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژی و در مقیاس حوضه‌های آبریز بوده است. هدف از این پژوهش بررسی عدم قطعیت در واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل SWAP با استفاده از روش GLUE در مقیاس مزرعه و برآورد میزان عدم قطعیت در نتایج مدل SWAP در شبیه‌سازی رطوبت خاک در یک مزرعه تحت کشت ذرت است.

[2] Soil Water Atmospheric Plant

[3] Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

Archive of SID

www.SID.ir

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مزرعه انتخابی در واحد کشت و دام قیام، در شبکه آبیاری برخوار واقع در شمال شهر اصفهان و در حوضه آبریز زاینده رود واقع شده است. این منطقه دارای اقلیم خشک تا نیمه خشک با متوسط بارندگی سالانه ۱۶۵ میلی‌متر است. در این منطقه، وجود خاک ریزبافت به همراه دسترسی به آب‌های زیرزمینی و سطحی با کیفیت خوب شرایط مناسبی را برای رشد محصولات فراهم آورده است. در این پژوهش یک مزرعه تحت کشت ذرت در مشخصات جغرافیایی ′۵۱ °۳۱ و ′۳۸ °۵۷ با مساحت حدود یک هکتار که اطلاعات و داده‌های آنها در طول فصل زراعی ۸۴-۱۳۸۳ جمع‌آوری شده مورد مطالعه قرار گرفت. 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 ۱۵-۰، ۳۰-۱۵ و ۶۰-۳۰ در زمان‌های مختلف در طول دوره رشد به صورت هفتگی با روش وزنی تعیین شده‌اند. در این پژوهش از مقادیر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده برای واسنجی پارامترهای مدل استفاده شد. روش آبیاری در مزرعه مورد مطالعه تحت کشت ذرت به صورت غرقابی بوده و تعداد هشت بار آبیاری با عمق متوسط ۱۶ سانتی-متر در طول دوره رشد صورت گرفته است.

مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP

مدلSWAP، مدلی بر مبنای اصول فیزیکی بوده که به صورت یک بعدی برای شبیه‌سازی زنجیره پیوسته آب-خاک گیاه و اتمسفر تدوین شده است (کروس و وندام، ۲۰۰۳). با استفاده از این مدل جریان آب، املاح و حرارت به صورت عمودی در ستون خاک در طول دوره رشد گیاه در مقیاس مزرعه شبیه‌سازی می‌شود. هسته‌ی اصلی مدل شبیه‌سازی جریان عمودی آب در خاک در حالت اشباع یا غیراشباع به وسیله حل عددی معادله ریچاردز می‌باشد:

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

که در آن:

θ رطوبت خاک (cm^3cm^{-3})، t زمان (روز)، h پتانسیل ماتریک خاک (cm)، z ارتفاع عمودی (cm)، K هدایت هیدرولیکی که تابعی از رطوبت خاک است ($cm\ d^{-1}$) و S مولفه مربوط به جذب آب به وسیله ریشه گیاه (d^{-1}) است. حل عددی رابطه (۱) با توجه به شرایط مرزی بالادست و پایین دست و روابط تحلیلی بین تغییرات رطوبت خاک، مکش و هدایت هیدرولیکی خاک می-باشد.شرایط اولیه نیز به صورت رطوبت حجمی یا مکش برای مدل تعریف می‌شود. توابع هیدرولیکی خاک در مدل SWAP برای حل عددی ریچادرز براساس توابع تحلی ونگنوختن-معلم (ونگوختن، ۱۹۸۰) می‌باشند:

$$K(\theta) = K_s S_e^{\lambda} [1 - (1 - S_e^{n/n-1})]^2 \quad (۲)$$

$$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^{\frac{n-1}{n}} \quad (۳)$$

که در آن‌ها: K_s هدایت هیدرولیکی اشباع ($cm\ d^{-1}$)، S_e اشباع نسبی، θ_r رطوبت باقی مانده (cm^3cm^{-3})، θ_s رطوبت اشباع (cm^3cm^{-3})، α (cm^{-1})، n و λ ضرایب تجربی (بدون بعد) هستند. شرایط مرزی بالادست توسط تبخیر-تعرق، آبیاری و بارندگی تعیین می‌شود. شرایط مرزی پایین به صورت زهکشی آزاد به آب زیرزمینی عمیق در نظر گرفته شده است. همچنین، در این مطالعه از مدل شبیه‌سازی رشد گیاه ساده در SWAP استفاده شد (کروس و وندام، ۲۰۰۳).

انتخاب پارامترهای واسنجی مدل

در این پژوهش برای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک، نیمرخ خاک در مزرعه مورد مطالعه در عمق دو متر به صورت همگن فرض شده است. منابع (مثلا جوهرر و همکاران، ۲۰۰۲ و سینگ و همکاران،

Archive of SID

www.SID.ir

۲۰۱۰) تایید می‌کنند که همگن فرض کردن نیمرخ خاک در کاربرد مدل SWAP تاثیری معنی‌دار بر تغییر مؤلفه-های بیلان آب شبیه‌سازی شده در مقایسه با حالت چند لایه (غیرهمگن) ندارد. علاوه بر این، این فرض باعث کاهش تعداد پارامترهای واسنجی نیز خواهد شد.پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل پارامترهای روابط ونگنوختن و معلم (روابط ۲ و ۳) می‌شوند.

نتایج مطالعات گذشته نشان داده‌اند که پارامترهای هیدرولیکی خاک پارامترهای حساس مدل SWAP می‌باشند و بر خروجی رطوبت و بیلان آب مدل SWAP تاثیرگذار هستند (اینس و همکاران، ۲۰۰۲؛ هاپت و همکاران، ۲۰۰۳). در اغلب مطالعات یاد شده پارامترهای θ_s، α، n و K_s را حساس‌ترین پارامترها در نظر گرفته و واسنجی کرده‌اند و برای دو پارامتر λ و θ_r مقادیر ثابتی را فرض کرده‌اند.

پارامترهای معادله ونگنوختن–معلم پارامترهایی هستند که با برازش بر منحنی رطوبتی و منحنی تغییرات هدایت هیدرولیکی غیراشباع بدست می‌آیند و صرفاً مقادیر اندازه‌گیری شده مانند رطوبت اشباع یا هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از روش‌های مرسوم اندازه-گیری مستقیم یا غیرمستقیم نمی‌توانند بیانگر مقدار آن‌ها باشند (ونگنوختن و نیلسن، ۱۹۸۵؛ شاپ و همکاران، ۲۰۰۳).

از سویی، چون این پارامترها به صورت برازش بر منحنی رطوبتی بدست می‌آیند، ثابت فرض کردن یک یا چند پارامتر به علت وجود همبستگی بین برخی پارامترها می‌تواند موجب خطا در برآورد سایر پارامترها شود (اسچرانگرال و همکاران، ۲۰۱۱). به طور مثال، در بیشتر مطالعات پارامتر λ در معادله ونگنوختن–معلم اغلب ۰/۵ یا ۱– ثابت فرض شده است (شاپ و همکاران، ۲۰۰۳). اسچرانگرال و همکاران (۲۰۱۱) نیز تاکید کرده‌اند که ثابت فرض کردن یک یا چند پارامترهای هیدرولیکی خاک (مانند λ و θ_r) می‌تواند موجب خطا در برآورد سایر پارامترها شود. بنابراین، در این پژوهش هر شش پارامتر مورد واسنجی قرار گرفته است.

روش GLUE در تحلیل عدم قطعیت

مشکل اصلی در شناخت فرآیندهای طبیعی، وجود عامل احتمال و برخی عوامل غیرقابل کنترل است که در این راستا تحلیل عدم قطعیت برای هر پدیده درکی واقعی از پارامترهای آن را مشخص کرده و شناختی درست از نقش عوامل تاثیرگذار بر پدیده را میسر می‌سازد (تانگ و ین، ۲۰۰۶). عمده مشکل مدل‌های هیدرولوژی و آگروهیدرولوژی تعداد زیاد پارامترهای مربوط به این مدل‌ها است. برخی از این پارامترها مفهوم فیزیکی داشته و قابل اندازه‌گیری هستند (از جمله پارامترهای گیاهی مانند شاخص سطح برگ).

برخی دیگر امکان اندازه‌گیری آن‌ها به راحتی وجود ندارد (مانند ضرایب معادله ونگنوختن) یا برخی پارامترها (مانند برخی ضرایب گیاهی) ماهیت مفهومی دارند و این امر سبب می‌شود که واسنجی مدل امری اجتناب ناپذیر باشد. در این مورد، اغلب یافتن یک سری منحصر به فرد پارامترهای بهینه غیرممکن است، بدین معنی که سری‌های مختلف پارامترها (مجموعه پارامتر[4]ها) دارای نتایج یکسانی در روند واسنجی بوده که اصل برابری نتایج (هم‌پایانی[5]) نامیده می‌شود و نمی‌توان یک سری پارامتر یکتا را به عنوان پارامترهای واسنجی شده در شبیه‌سازی بکار برد (بی‌ون و بایلی، ۱۹۹۲).

روش GLUE برای حل مشکل روش‌های واسنجی مرسوم ارائه شده است و بر این مبنا است که یافتن یک سری منحصر به فرد پارامترهای بهینه غیرممکن است و این امر به سبب وجود خطا در پارامترهای ورودی و ساختار مدل‌ها می‌باشد (بی‌ون و همکاران، ۲۰۰۷). در ادامه مراحل اجرای روش GLUE در این پژوهش ارائه شده است.

[4] Parameter set
[5] Equfinality

Archive of SID

www.SID.ir

گام اول: تعیین محدوده‌ی تغییرات اولیه (یا توزیع پیشین[6]) پارامترهای واسنجی مدل می‌باشد که در این مطالعه به صورت تابع توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش، دامنه اولیه پارامترهای هیدرولیکی خاک با توجه به درصد ذرات خاک در مزرعه مورد مطالعه با استفاده از برنامه ROSETTA 1.1 (شاپ و همکاران، ۲۰۰۱) که برآورد پارامتر خاک (p) را همراه با انحراف معیار (σ) تخمین آن می‌دهد، تعیین شده است. در این مطالعه برای اطمینان از داشتن دامنه اولیه بزرگ حد پایین دامنه به صورت p-4σ و حد بالای دامنه به صورت p+4σ در نظر گرفته شده است.

گام دوم: تعداد N مجموعه پارامتر تصادفی براساس روش‌های مبتنی بر مونت‌کارلو که در این پژوهش از روش نمونه‌گیری مربع‌لاتین[7] (LHS) استفاده شده است. در واقع روش LHS با نمونه‌گیری در فواصل مساوی در فضای هر پارامتر (چهار فاصله مساوی) باعث افزایش دقت در شبیه‌سازی مونت کارلو بدون افزایش در تعداد نمونه‌ها می‌شود. در این پژوهش ۱۰۰،۰۰۰ نمونه یا به عبارتی مجموعه پارامتر تولید شده است.

گام سوم: اجرای مدل SWAP با استفاده از مجموعه پارامترهای تولید شده در گام قبل و محاسبه مقدار درست‌نمایی[8] (L) براساس مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت با استفاده از مدل و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در مزرعه می‌باشد. در این پژوهش از رابطه‌ی معکوس واریانس خطا (بی‌ون و باینلی، ۱۹۹۲) به عنوان معیار درست‌نمایی استفاده شد:

$$L = \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} \left(O_j - Y(\theta_i)\right)^2}{n-2} \right)^{-1} \qquad (۵)$$

که در آن:

θ_i مجموعه پارامتر iام، O_j مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده، $Y(\theta_i)$ خروجی مدل به ازای هر مجموعه پارامتر و n تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت است. مقادیر بزرگتر درست‌نمایی نشان دهنده تطابق بیشتر بین رطوبت-های شبیه‌سازی شده ($Y(\theta_i)$) و واقعی (O_j) است.

گام چهارم: در این مرحله با در نظر گرفتن آستانه قابل پذیرش[9] (ASR) مجموعه پارامترهایی که منجر به عملکرد بهتر مدل شده‌اند (مجموعه پارامترهای قابل قبول[10]) از سایر مجموعه پارامترها جدا می‌شوند. به عبارت دیگر، با مرتب کردن مقادیر درست‌نمایی (L) محاسبه شده در گام قبل به همراه مجموعه پارامترهای (θ) مرتبط به آن به صورت کاهشی، درصدی از اجراهای مدل با عملکرد بالاتر به عنوان مجموعه پارامترهای قابل قبول انتخاب می‌شود.

در این مطالعه، آستانه قابل پذیرش به صورت درصدی از تعداد نمونه‌گیری‌ها (N) به میزان یک درصد در نظر گرفته شده که منطبق با مطالعات گذشته در مورد کاربرد روش GLUE (فوروخت و همکاران، ۲۰۰۸) انتخاب شده است. به عبارت دیگر، در این مطالعه از ۱۰۰۰۰۰ مجموعه پارامتر تولید شده و اجرا شده با استفاده از مدل SWAP، تعداد ۱۰۰۰ مجموعه پارامتر به عنوان مجموعه پارامترهای قابل قبول استخراج شده و از خصوصیات آماری (مانند فراوانی و پراکندگی) این مجموعه برای تعیین توزیع پسین[11] پارامترها، همچنین استخراج دامنه‌ی بهینه مقادیر واسنجی شده پارامترها و در نهایت محاسبه میزان عدم عدم قطعیت در خروجی رطوبت مدل SWAP (گام بعدی) استفاده شده است.

گام پنجم: محاسبه عدم قطعیت خروجی مدل با محاسبه وزن‌های درست‌نمایی[12] برای مجموعه پارامترهای (θ) قابل قبول:

[6] Prior Distribution
[7] Latin Hypercube
[8] Likelihood Function
[9] Acceptable Sample Rate
[10] Behavioral Parameter sets
[11] Posterior Distribution
[12] Likelihood Weight

Archive of SID

www.SID.ir

$$p_i = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^{N} L_i} \qquad (۶)$$

که در آن:

p_i احتمال یا وزن درست‌نمایی مربوط به iامین مجموعه پارامتر می‌باشد و N تعداد مجموعه پارامترهای قابل قبول است. مجموع این وزن‌ها برابر با یک بوده و این مقادیر (یعنی وزن‌ها) تشکیل تابع چگالی احتمال[13] (PDF) را می‌دهند. سپس، بازه اطمینان ۹۵ درصد (95CI[14]) برای خروجی شبیه‌سازی شده‌ی مدل استخراج می‌شود. به طوری ۲/۵ درصد حدود بالا و پایین آن به عنوان شبیه‌سازی‌های پرت کنار گذاشته می‌شود و محدوده عدم قطعیت یا 95CI بدست می‌آید. محدوده عدم قطعیت بدست آمده در روش GLUE تقریبی از همه انواع منابع خطا را در فرآیند مدل‌سازی را منعکس ساخته و عدم قطعیت‌های مربوط را در پیش‌بینی مدل نشان می‌دهد (وروخت و همکاران، ۲۰۰۸).

نتایج و بحث

روش GLUE با استفاده از برنامه‌ای که در نرم‌افزار Matlab تهیه شد، به مدل SWAP متصل شده است. در این بخش، ابتدا تحلیل عدم قطعیت و واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل ارائه شده است. سپس نتایج عدم قطعیت در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت در مزرعه مورد مطالعه، در طول دوره رشد ذرت ارائه و بحث شده است.

تحلیل عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک

عدم قطعیت پارامترهای مدل با استفاده از توابع توزیع پسین آنها بررسی می‌شود. توابع توزیع پسین نشان دهنده میزان عدم قطعیت باقی‌مانده در پارامترهای تخمین زده شده توسط روش GLUE است. این میزان عدم قطعیت طبق قانون بیز به توابع توزیع پیشن پارامترها و همچنین عدم قطعیت در داده‌های اندازه‌گیری شده بستگی دارد. جدول (۱) دامنه اولیه (توزیع پیشین) پارامترها را نشان می‌دهد (گام اول روش GLUE). پس از اجرای روش GLUE، توزیع‌های مقادیر احتمالی پسین بر مبنای مجموعه پارامترهای قابل قبول استخراج شده در شکل (۱) نشان داده شده است. مقایسه توابع پیشین و پسین نشان می‌دهد که تنها دامنه‌ی پارامترهای θ_s و n به طور معنی‌داری نسبت به کران بالا و پایین توزیع پشین آنها جدول (۱) کوچکتر شده و سایر پارامترها تغییر قابل توجهی نداشته‌اند. این امر نشان دهنده عدم قطعیت بالا در پارامترهای خاک مدل SWAP (به ویژه Ks و θ_r) می‌باشد.

شکل توابع پسین پارامترهای θ_s و n به صورت لوگ نرمال بوده به طوری که به سمت یک دامنه (مقدار مشخص) با فراوانی بیشتر همگرا شده است که نشان دهنده تخمین مناسب آنها با توجه به داده‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک است. همچنین، شکل توزیع پسین سایر پارامترها به صورت نمایی می‌باشد به طوری که مقادیر با چگالی بالا در یکی از دو دنباله توزیع واقع شده‌اند.

علی‌رغم اینکه در این پژوهش بر اساس اطلاعات موجود دامنه‌ی اولیه (کران بالا و پایین توزیع پیشین) پارامترها تا حد امکان بزرگ فرض شده است، این امر براساس پژوهش وروخت و همکاران (۲۰۰۸) می‌تواند نشان دهنده خطا در داده‌های ورودی مدل (در این پژوهش مانند عمق آبیاری یا برخی پارامترهای اندازه‌گیری شده فیزیکی گیاه) یا به سبب جبران برخی خطاهای ساختاری مدل، به عبارتی ساده‌سازی‌های انجام شده در مدل مانند نحوه محاسبه تبخیر واقعی یا شبیه‌سازی جذب آب در ریشه، می‌باشد. هاپت و همکاران (۲۰۰۳) نیز گزارش کردند که حساسیت بسیار پایین پارامترهای جذب آب ریشه در مدل SWAP نسبت به تغییرات رطوبت در خاک به دلیل اثر جبرانی جریان غیراشباع عمودی آب در خاک است.

[13] Probability Density Function
[14] 95% Confidence Interval

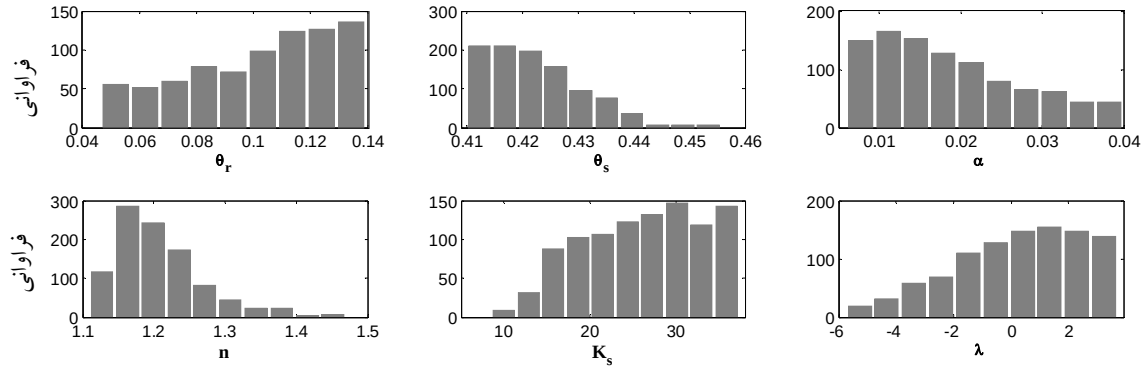
Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱- دامنه اولیه تعیین شده پارامترهای هیدرولیکی خاک بر مبنای مدل ون گنوختن-معلم و مقدار تخمین‌زده شده آنها توسط ROSETTA

پارامتر	مقدار متوسط*	حد پایین	حد بالا
θ_r (cm^3cm^{-3})	۰/۱ (۰/۰۱۳)	۰/۰۴	۰/۱۵۰
θ_s (cm^3cm^{-3})	۰/۴۷۰ (۰/۰۱۴)	۰/۴۰	۰/۵۳
α (cm^{-1})	۰/۰۱۵ (۰/۱۰۷)	۰/۰۰۵	۰/۰۴۰
n (-)	۱/۳۲ (۰/۱۹۰)	۱/۱۰	۱/۵۷
K_s (cmd^{-1})	۳/۵ (۰/۲۵۸)	۰/۳۲	۳۷/۵
λ (-)	−۰/۹۸ (۱/۱۹)	−۵/۸	۳/۷

* مقادیر داخل پرانتز انحراف معیارهایی است که ROSETTA پیش‌بینی کرده است و برای پارامتر سوم تا پنجم در مبنای لگاریتمی است



شکل ۱- توزیع پسین پارامترهای هیدرولیکی خاک در مزرعه مورد مطالعه

در جدول (۲) نیز خصوصیات آماری مربوط به توزیع‌های پسین پارامترها آمده است. مقایسه مقادیر میانگین توابع توزیع پسین با مقادیر میانگین پارامترهایی که توسط ROSETTA تخمین زده شده‌اند جدول (۱) نشان می‌دهد که به جز θ_r بین سایر پارامترها تفاوت زیادی وجود دارد. به طور مثال، مقدار تخمین زده شده K_s (۳/۵ $cm\ d^{-1}$) توسط ROSETTA کوچکتر از میانگین بدست آمده در واسنجی است. این امر نشان می‌دهد که استفاده از توابع انتقالی مرسوم خاک (مانند ROSETTA) نمی‌توانند برای شرایط مزرعه دقیق باشد. این موضوع توسط اسنوولد و همکاران (۲۰۰۳) و حقیقی و همکاران (۲۰۱۰) نیز اشاره شده است که برای اراضی تحت کشاورزی که خاک دستخوش تغییرات زیادی در مکان و زمان می‌شود اغلب توابع انتقالی قابلیت استفاده را ندارند. با مقایسه مقادیر ضریب تغییرات هر کدام از توابع پسین پارامترها در جدول (۲) می‌توان درجه حساسیت پارامترها را بررسی کرد. به طوری که تابع توزیعی که یکنواخت‌تر بوده و دامنه تغییرات آن به دامنه اولیه نزدیک‌تر باشد، حساسیت آن پارامتر کمتر خواهد بود و ضریب تغییرات بیشتری دارد. بنابراین، با توجه به جدول (۲) پارامترهای θ_s (کمترین ضریب تغییرات) و λ (بیشترین ضریب تغییرات) به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را دارند. همچنین، بعد از θ_s پارامترهای n و θ_r در رتبه‌های بعدی از نظر حساسیت قرار دارند. این امر نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه برخی مطالعات (از جمله اینس و همکاران، ۲۰۰۲ و سینگ و همکاران، ۲۰۱۰) پارامتر θ_r را در واسنجی غیر حساس در نظر گرفته و مقدار آنها را ثابت فرض کرده‌اند، این طور نیست بلکه

Archive of SID

www.SID.ir

مقادیر این پارامتر در ترکیب با سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک تاثیر گذار می‌باشد. بنابراین، از آنجایی که پارامترهای هیدرولیکی خاک VGM ماهیت برازشی دارند، نمی‌توان آنها را در فرآیند واسنجی ثابت فرض کرد. این موضوع توسط اسچرناگال و همکاران (۲۰۱۱) نیز تایید شده است.

جدول ۲- مشخصات آماری توابع توزیع پسین بدست آمده پارامترهای هیدرولیکی خاک

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (٪)
θ_r (cm^3cm^{-3})	۰/۱۱	۰/۰۲۹	۲۶/۲
θ_s (cm^3cm^{-3})	۰/۴۲	۰/۰۰۸	۲/۰
α (cm^{-1})	۰/۰۱۸	۰/۰۰۹	۴۷/۴
n (-)	۱/۲۰	۰/۰۶۲	۵/۰
K_s (cmd^{-1})	۲۶/۱۰	۶/۹	۲۶/۶
λ (-)	۰/۲۱	۲/۲	۱۰۱/۰

یکی از عواملی که موجب ایجاد عدم قطعیت در خروجی مدل‌ها می‌شود، وجود مجموعه پارامترهای مختلف است که سبب نتایج یکسان (عملکرد برابر) در پیش‌بینی‌های مدل می‌شود که به اصل برابری نتایج (هم-پایانی) معروف است. به طور کلی، در فرآیند واسنجی پارامترهای مدل، امکان تعیین یک مجموعه پارامتر بهینه (یکتا) وجود ندارد، بنابراین تشخیص مجموعه پارامترهای قابل‌قبول که موجب نتایج نسبتاً خوب و برابر می‌شوند اهمیت داشته و روش GLUE که بر این مبنا ارائه شده، می‌تواند این مجموعه پارامترها را مشخص کند. در شکل (۲) پراکندگی مقادیر پارامترهای قابل قبول (که توزیع پسین آنها بررسی شد) نشان داده شده است.

محور عمودی در شکل (۲) تغییرات تابع درست‌نمایی رابطه (۵) را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۳) چند نمونه از مجموعه پارامترهایی که موجب عملکرد یکسان مدل می‌شود نیز ارائه شده است. در این جدول، عملکرد مدل در ازای چند مجموعه پارامتر مختلف براساس معیار خطای مجموع مربعات خطا (RMSE[۱۵]) و ضریب راندمان نش-ساتکلیف (NS[۱۶]) ارائه شده است. هدف از ترسیم شکل (۲) بررسی قابل شناسایی بودن[۱۷] پارامترها در فرآیند واسنجی و همچنین استخراج (شناسایی) دامنه بهینه[۱۸] پارامترها بعد از واسنجی می‌باشد. دامنه بهینه، بخشی از محدوده‌ی پسین پارامتر می‌باشد که بیشترین مقادیر تابع درست‌نمایی (L) را دارد.نتایج نشان می‌دهد پارامترهای θ_r و K_s از قابلیت شناسایی کمتری برخوردار می‌باشند به طوری که نمی‌توان دامنه بهینه مشخص برای آنها یافت. از طرف دیگر دامنه بهینه پارامترهای θ_s، α و n قابل شناسایی می‌باشد. در جدول (٤) دامنه بهینه پارامترها بعد از واسنجی ارائه شده است.

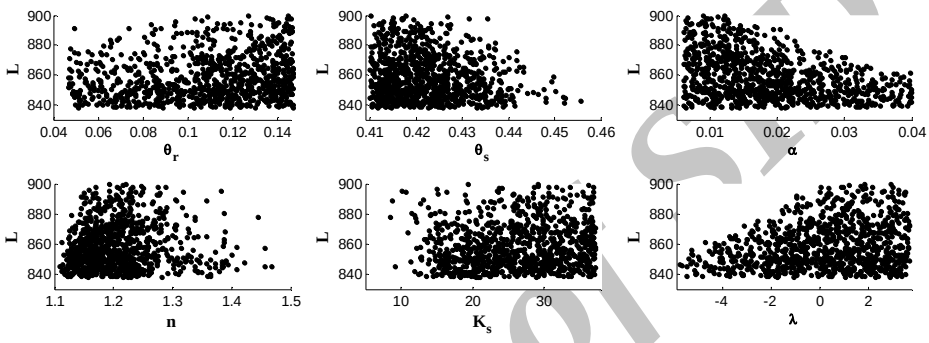
[15] Root Mean Square Error
[16] Nash- Sutcliffe
[17] Identifiable
[18] Optimal range

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- نمونه‌ای از اصل برابری نتایج در پارامترهای مدل SWAP

معیار خطا		پارامترهای هیدرولیکی خاک					
RMSE	NS	λ	K_s	n	α	θ_s	θ_r
۰/۰۳۱۰	۰/۶۵۵۹	۳/۶	۲۷/۳	۱/۱۷	۰/۰۰۷	۰/۴۱	۰/۰۶
۰/۰۳۱۰	۰/۶۵۵۹	۲/۲	۱۲/۵	۱/۲۸	۰/۰۰۹	۰/۴۱	۰/۱۴
۰/۰۳۱۰	۰/۶۵۵۹	۱/۸	۳۲/۷	۱/۱۸	۰/۰۱۰	۰/۴۱	۰/۱۲
۰/۰۳۲۱	۰/۶۵۵۷	۱/۲	۳۳/۴	۱/۲۰	۰/۰۰۹	۰/۴۲	۰/۱۱
۰/۰۳۲۱	۰/۶۵۵۷	۱/۸	۱۹/۴	۱/۱۹	۰/۰۰۸	۰/۴۱	۰/۱۲
۰/۰۳۲۱	۰/۶۵۵۷	۱/۷	۲۹/۲	۱/۲۴	۰/۰۰۶	۰/۴۱	۰/۱۳



شکل ۲- تغییرات مقادیر تابع درست‌نمایی (رابطه‌ی ۵) برای پارامترهای هیدرولیکی خاک

جدول ۴- دامنه بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک

پارامتر	حد پایین	حد بالا
θ_r (cm^3cm^{-3})	۰/۱۰	۰/۱۴
θ_s (cm^3cm^{-3})	۰/۴۱	۰/۴۳
α (cm^{-1})	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵
n (-)	۱/۱۳	۱/۲۷
K_s (cmd^{-1})	۲۰	۳۶
λ (-)	−۱/۵	۳/۲

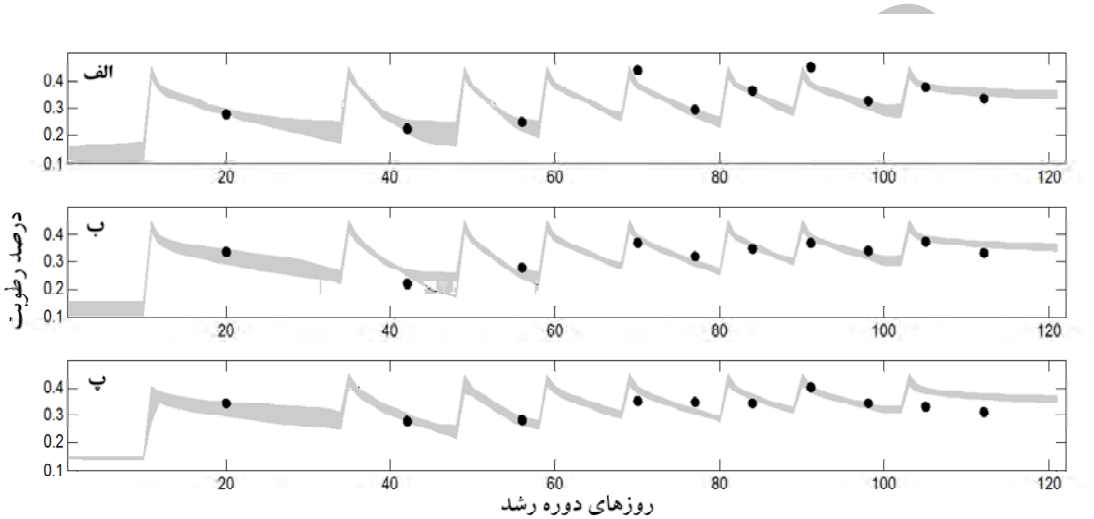
عدم قطعیت در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت

در شکل (۳) نتایج شبیه‌سازی شده رطوبت توسط SWAP در عمق‌های مختلف در فرآیند واسنجی توسط روش GLUE به صورت محدوده عدم قطعیت ۹۵٪ (95CI) به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت در طول دوره رشد ذرت (از تاریخ ۱۲ تیر تا ۹ آبان ۱۳۸٤) نشان شده است. میزان عدم قطعیت پیش‌بینی شده در رطوبت شبیه‌سازی شده در شکل (۳) نشان دهنده میزان عدم قطعیت کل (به عبارتی مجموع عدم قطعیت داده‌های ورودی، پارامترها و ساختار مدل) می‌باشد که با استفاده از پارامترهای قابل‌قبول بدست آمده در روش GLUE و درنظر گرفتن وزن‌های درست‌نمایی آنها بدست آمده‌اند. در جدول (۵) میانگین ضخامت بازه اطمینان (spread)، به همراه درصدی از داده‌های اندازه-گیری شده که در بازه اطمینان قرار دارند، (coverage) ارائه شده است. با توجه به مقادیر معیارهای بدست آمده در جدول (۵)، روش GLUE به خوبی توانسته رطوبت

Archive of SID

www.SID.ir

را در لایه‌های مختلف خاک واسنجی کند به طوری که اغلب داده‌های اندازه‌گیری شده در داخل بازه اطمینان قرار گرفته و ضخامت بازه اطمینان نسبتاً کم می باشد. همچنین، با توجه به شکل (۳) و جدول (۵)، نتایج نشان می‌دهد: ۱) میزان عدم قطعیت پیش‌بینی شده رطوبت (بر اساس مقادیرspread) در هر سه عمق تقریباً باهم یکسان هستند. این امر ممکن است به سبب همگن فرض کردن نیمرخ خاک باشد. ۲) میزان عدم قطعیت خروجی مدل در رطوبت‌های بیشتر که بعد از آبیاری مزرعه می‌باشند، کمتر است و عدم قطعیت بیشتری در شبیه‌سازی رطوبت‌های کم وجود دارد که این مسئله ممکن است به دلیل تعامل پیچیده بین تغییرات رطوبت خاک و پارامترهای هیدرولیکی خاک به دلیل فرضیات ساده کننده در حل عددی معادله ریچاردز رابطه(۱) باشد (تولر و همکاران، ۱۹۹۹).



شکل ۳- بازه اطمینان ۹۵٪ رطوبت پیش‌بینی شده (بخش سایه‌خورده) و مقادیر اندازه‌گیری شده (نقاط) آن (در عمق‌های الف: ۱۵-۰، ب: ۳۰-۱۵ و پ: ۶۰-۳۰ سانتی‌متر)

جدول ۵- مقادیر معیارهای سنجش عدم قطعیت

عمق (cm)	Coverage (%)	Spread (cm^3cm^{-3})
۱۵-۰	۸۰	۰/۰۳۷
۳۰-۱۵	۸۰	۰/۰۳۵
۶۰-۳۰	۶۰	۰/۰۳۴

نتیجه‌گیری

عدم قطعیت، خصوصیت ذاتی در ساختار مدل‌های پیش‌بینی، داده‌های ورودی و پارامترهای مدل است. به همین دلیل تخمین پارامترهای مدل (یا واسنجی) به خصوص در برخی مدل‌هایی که روابط بین پارامترهای آنها به شدت غیرخطی است به سادگی امکان‌پذیر نبوده و یافتن یک مجموعه پارامتر بهینه معقول نیست. روش‌های تحلیل عدم قطعیت این امکان را فراهم می‌کنند که بتوان اطلاعات بیشتری در مورد خروجی‌های مدل پیش‌بینی بدست آورد و ابزاری هستند که خطاهای موجود در مدل‌سازی به صورت بازه‌های اطمینان ارائه می‌کنند.

نتایج این پژوهش نشان داد که نمی‌توان یک مجموعه پارامتر بهینه برای مدل SWAP در مزرعه مورد مطالعه بدست آورد. در واقع این امر ویژگی منحصر به مدل SWAP یا داده‌های این پژوهش نیست و در مطالعات متعددی در گذشته در ارتباط با سایر مدل‌ها با

Archive
www.SID.ir

پیچیدگی کمتر یا بیشتر نیز نشان داده شده است. قابلیت شناسایی پارامترهای هیدرولیکی خاک در واسنجی مدل SWAP نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای θ_r و K_s در روند واسنجی از قابلیت تشخیص کمتری برخوردار بوده و نقش بیشتری در عدم قطعیت رطوبت شبیه‌سازی شده در مدل SWAP دارند. همچنین، نتایج نشان داد که پارامترهای هیدرولیکی خاک VGM که ماهیت برازشی دارند را نمی‌توان در فرآیند واسنجی ثابت فرض کرد.

برای کاهش عدم قطعیت پارامترها بهتر است مدل نسبت به سایر متغیرها از جمله تعرق یا تبخیر-تعرق نیز واسنجی شود تا بتوان با سطح اطمینان بیشتری از مدل برای برنامه‌ریزی آبیاری یا تحلیل سناریوهای مدیریتی در سطح مزرعه استفاده کرد. بررسی میزان عدم قطعیت در خروجی رطوبت مدل توسط روش GLUE در عمق‌های مختلف نشان داد که علی رغم وجود عدم قطعیت بالا در تعیین برخی پارامترها، رطوبت شبیه‌سازی شده دارای عدم قطعیت نسبتاً کمی می‌باشد. در نظر گرفتن چارچوب تحلیل عدم قطعیت با روش GLUE این امکان را فراهم می‌کند تا پیش‌بینی‌های مدل را به صورت بازه اطمینان بیان کرد. این امر در مراحل بعدی مدل‌سازی مانند سناریوسازی یا بهینه‌سازی مدیریت آبیاری و تحلیل ریسک اهمیت ویژه‌ای دارد.

فهرست منابع

۱. اکبری، م.، دهقانی سانیچ، ح.، و ترابی، م. ۱۳۸٦. بررسی شوری در مزرعه با استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAP (منطقه رودشت اصفهان). مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۲۱ (۲). ص ۱۰۵ - ۱۱٤.

۲. 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 ۲٤، شماره ٦، ص ۱۲۷٦-۱۲٦٥.

۳. حقایقی مقدم، ا.، و فرازام نیا، م. ۱۳۹۱. تاثیر برنامه ریزی آبیاری بر شاخص های بهره وری آب، مطالعه موردی: دشت نیشابور. پژوهش آب در کشاورزی. سال ۲٦ (۲). ص ۱٤۲-۱۲۹.

٤. عابدینی، م.ج. و رحیمی، ی. ۱۳۸۲. مدل بارندگی-رواناب Hec-Hms با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک و مدل متعین PEST. ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان. مجموعه مقالات. ص ۱۰-۱.

5. Beven K. J. and A. Binley. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 6(3): 279-298.
6. Beven, K.J. 1996. Equifinality and Uncertainty in Geomorphological Modelling, in B L Rhoads and C E Thorn (Eds.), the Scientific Nature of Geomorphology, Wiley: Chichester, 289-313.
7. Haghighi F., Gorji M. and M. Shorafa. 2010. A study of the effects of land use change on soil physical properties. Land Degradation and Development, 21: 492-502.
8. Hupet, F., Lambot, S., Feddes, R.A., van Dam, J.C. and M. Vanclooster. 2003. Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data. Water Resource Research. 39: (11) doi: 10.129/2003WR002046.
9. Ines, A. and P. Droogers. 2002. Inverse modeling estimating soil hydraulic functions: A genetic algorithm approach, Hydrology and Earth System Sciences., 6, 49–65.
10. Jhorar, R.K., van Dam, J.C., Bastiaanssen, W.G.M. and R.A. Feddes. 2004. Calibration of effective soil hydraulic parameters of heterogeneous soil profiles. Journal of Hydrology. 285, 233–247.

Archive of SID

www.SID.ir

11. Kroes, J.G. and J. van Dam. 2003. Reference manual SWAP version 3.0.3, Alterra-report. 773 pp.
12. Noory, H., van der Zee, S.E. A.T.M., 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.
13. Schaap, M.G., Leij, F.J. and M. Van Genuchten. 2001. ROSETTA: A computer program for estimation soil hydraulic parameters. Journal of Hydrology, 251:163–176.
14. Scharnagl, B., Vrugt, J., Vereecken, H. and M. Herbst. 2011. Inverse modelling of in situ soil water dynamics: investigating the effect of different prior distributions of the soil hydraulic parameters. Hydrology and Earth System Sciences, 15: 3043–3059.
15. Singh, U., and L. Kang. 2010. Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model. Agricultural Water Management, 97: 1210-1220.
16. Sonneveld, M.P.W., Bachx, M.A.H.M. and J. Bouma. 2003. Simulation of soil water regimes including pedotransfer functions and land use related preferential flow. Geoderma, 112: 97-110.
17. Tuller, M., Or, D. and L.M. Dudley. 1999. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configurations in angular pores. Water Resource. Research, 35: 1949–1964.
18. Tung, Y. and B. Yen. 2006. Hydrosystem engineering uncertainty analysis. McGraw-Hill Book Company, NY, USA.
19. Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of soil. Soil Science American journal, 44:892–898.
20. Van Genuchten, M.T. and D.R. Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils, Ann. Geophys., 3, 615–628, 1985, http://www.ann-geophys.net/3/615/.
21. 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: 89–102.
22. Vrugt, J.A., ter Braak, C. J.F., Gupta, H.V. and B.A. Robinson. 2008. Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches to hydrologic modeling, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23: 1059 –1060.

Archive of SID

www.SID.ir