مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۵/ شماره ۳/ پیاپی ۴۲/ پاییز ۱۴۰۰ (۳۷-۴۹)

مقاله پژوهشی

تحلیل عدم‌قطعیت مدل‌سازی زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروزانهٔ یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل‌شده

فرزین پرچمی عراقی[1*] و عدنان صادقی لاری[2]

چکیده

با وجود قابلیت بالای مدل‌های زراعی- هیدرولوژیکی مزرعه-مقیاس در شبیه‌سازی اندرکنش رشد گیاه با انتقال آب و املاح، نتایج حاصل از آن‌ها در معرض درجات مختلفی از عدم‌قطعیت قرار دارد؛ ازاین‌رو، تحلیل عدم‌قطعیت این مدل‌ها به‌منظور در دست داشتن برآوردی کمّی از درجهٔ استحکام نتایج مدل اهمیت می‌یابد. در این مطالعه، عدم‌قطعیت کاربرد توزیعی و زیرروزانهٔ نسخهٔ تصحیح‌شده‌ای از مدل SWAP برای یک مزرعهٔ نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل‌شده (واقع در کشت و صنعت نیشکر شعیبیه، خوزستان) از طریق تلفیق روش برآورد عدم‌قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته (GLUE) با گونهٔ یکپارچه‌سازی‌شدهٔ الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) مورد ارزیابی قرار گرفت. در روش تلفیقی GLUE-UPSO، نمونه‌گیری از فضای پارامترهای واسنجی مدل از طریق الگوریتم UPSO و سایر مراحل محاسبات عدم‌قطعیت براساس روش GLUE صورت گرفت. نتایج تحلیل عدم‌قطعیت مدل حاکی از غیریکتایی قابل‌توجه پارامترهای واسنجی‌شده و وجود همبستگی‌های قوی بین آن‌ها بود. نتایج حاکی از اهمیت استفاده از داده‌های واسنجی متنوع در کاهش عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل بود. محدوده‌های عدم‌قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) محاسبه‌شده برای مؤلفه‌های هیدرولوژی (رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی)، انتقال املاح (نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب) و بیوفیزیکی مدل (شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز) به‌ترتیب، بین ۴۱ تا ۸۷، ۱۸ تا ۶۷ و ۷۵ تا ۱۰۰ درصد از کل داده‌های اندازه‌گیری‌شده (مشتمل‌بر هر دو مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی) را با r-factor بین ۰/۷۱ تا ۱/۱۴، ۰/۳۳ تا ۱/۱۴ و ۰/۸۴ تا ۰/۹۸ دربر گرفتند. نتایج این مطالعه، مؤید قابلیت روش تلفیقی GLUE-UPSO در واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت مؤلفه‌های مختلف مدل SWAP به‌طور هم‌زمان و در شرایط تعدد پارامترهای واسنجی بود.

واژه‌های کلیدی: برآورد عدم‌قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته، بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه، شوری، مدل SWAP.

ارجاع: پرچمی عراقی ف. و صادقی لاری ع. ۱۴۰۰. تحلیل عدم‌قطعیت مدل‌سازی زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروزانهٔ یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل‌شده. مجله پژوهش آب ایران. ۴۲: ۳۷-۴۹.

۱. استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل.
۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان.
*** نویسنده مسئول**: **f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

مقدمه

مدل‌های شبیه‌سازی زراعی- هیدرولوژیکی ابزارهای کارآمدی در راستای تسهیل فرایندهای تصمیم‌سازی در مسائل مدیریت منابع آب و حفاظت از محیط زیست محسوب می‌شوند. با این وجود، ازآنجاکه این مدل‌ها خود بیان ساده‌سازی‌شده‌ای از فرایندهای حاکم‌بر سیستم‌های زراعی هستند، پیش‌بینی‌های حاصل از آن‌ها همواره در معرض درجات مختلفی از عدم‌قطعیت قرار دارد؛ بنابراین به‌کارگیری پیش‌بینی‌های این مدل‌ها در فرایندهای تصمیم‌سازی برای مدیریت بهینهٔ سیستم‌های زراعی، نیازمند به در دست داشتن برآوردی از عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل است (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). به‌طورکلی، منابع عدم‌قطعیت مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، شامل عدم‌قطعیت ناشی از ساختار مدل شبیه‌سازی (به‌لحاظ فرضیات ساده‌سازی اتخاذی در توسعهٔ مدل، شیوهٔ منفصل‌سازی معادلات دیفرانسیلی و روش حل عددی مورد استفاده)، پارامترهای مجهول مدل (پارامترهایی که مقدار آن‌ها ازطریق واسنجی مدل برآورد می‌شود) و خطای آزمایشی مستتر در داده‌های ورودی به مدل (مانند داده‌های هواشناسی)، شرایط اولیه و مرزی و داده‌های مورد استفاده در واسنجی و صحت‌سنجی مدل است (بی‌ون، ۲۰۰۶). افزایش تعداد پارامترهای مجهول مدل و وجود محدودیت در فراوانی و تنوع داده‌های مورد استفاده در فرایند واسنجی، منجر به خودنمایی چالش بیش‌پارامترشدن مدل و هم‌پایانی نتایج واسنجی خواهد شد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۳)؛ بدین معنا که در این شرایط، مدل شبیه‌سازی به‌ازای ترکیب‌های کاملاً متفاوتی از مقادیر پارامترهای واسنجی‌شده به عملکردی قابل‌قبول در بازسازی داده‌های واسنجی دست می‌یابد (بی‌ون و بینلی، ۱۹۹۲). این امر، عدم‌قطعیت برآورد پارامترهای مجهول و به‌دنبال آن، نتایج شبیه‌سازی‌های مدل را به‌دنبال خواهد داشت. روش برآورد عدم‌قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته[1] (GLUE) (بی‌ون و بینلی، ۱۹۹۲)، یکی از رایج‌ترین روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی محسوب می‌شود. این روش فاقد فرضیه‌های آماری محدودکننده بوده و از طریق آن، اثر تمامی منابع عدم‌قطعیت مورد اشاره بر عدم‌قطعیت کل شبیه‌سازی‌های مدل قابل‌کمّی‌سازی است (بی‌ون، ۲۰۰۶).

در روش GLUE، ابتدا برای هر یک از پارامترهای مجهول مدل، یک تابع توزیع احتمال (که به توزیع پیشین معروف است) تعریف می‌شود. سپس، براساس یک حجم نمونهٔ ازپیش‌تعیین‌شده و اجرای شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو از فضای پارامترهای مجهول مدل (فضای حاصل از دامنهٔ تغییرات لحاظ‌شده برای پارامترهای مجهول در واسنجی مدل) نمونه‌گیری تصادفی صورت می‌گیرد. متعاقباً، مدل شبیه‌سازی به‌ازای هریک از دسته پارامترهای نمونه‌گیری‌شده اجرا می‌شود. با تعریف یک معیار درست‌نمایی و تعیین یک مقدار آستانه‌ای برای آن، شبیه‌سازی‌های قابل‌قبول و غیرقابل‌قبول مدل (که به‌ترتیب، به شبیه‌سازی‌های رفتاری و غیررفتاری معروف هستند) از یکدیگر متمایز می‌شوند.

از کاستی‌های روش GLUE، غیربهینگی آن به‌لحاظ بودجهٔ محاسباتی موردنیاز و درنتیجه، محدودشدن کاربرد این روش در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، به‌ویژه در مورد مدل‌های ریاضی حجیم است (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). روش‌های بهینه‌سازی تکاملی با یک هزینهٔ محاسباتی به‌مراتب معقول‌تر از GLUE قادر به یافتن نواحی رفتاری فضای پارامتر و جواب بهینهٔ سراسری مسئلهٔ مدل‌سازی معکوس هستند؛ ازاین‌رو، تلفیق روش GLUE با روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌منظور بهبود بهینگی محاسبات تحلیل عدم‌قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی و جستجوی هدفمندتر فضای پارامترهای مدل، مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، دسته پارامترهای رفتاری ازطریق یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مورد جستجو قرار می‌گیرند و سایر مراحل محاسبات عدم‌قطعیت، مشابه روش اصلی GLUE است. پژوهش‌های صورت‌گرفته در این رابطه، حاکی از برتری گونه‌های ترکیبی GLUE در تحلیل عدم‌قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی به‌ازای حجم محاسبات به‌مراتب کمتر از روش اصلی GLUE بوده است (موگانتن و شومیکر، ۲۰۰۶؛ تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸؛ چو و اولیویرا، ۲۰۱۴). از سوی دیگر، نشان داده شده است که این برتری با افزایش تعداد پارامترهای مجهول در واسنجی مدل به‌شدت نمود می‌یابد (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). با توجه به قابلیت‌های به‌اثبات‌رسیده، گونه‌های تلفیقی GLUE در تحلیل عدم‌قطعیت شبیه‌سازی مدل‌های ریاضی حجیم، به‌نظر می‌رسد که تلفیق روش GLUE با یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی، راهکار مناسبی برای

1- Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

آنالیز عدم‌قطعیت مدل‌سازی‌های زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی با صرف یک هزینهٔ محاسباتی معقول باشد. طی پژوهشی، پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) با کاربرد نسخهٔ تصحیح‌شده‌ای از مدل SWAP (کروز و همکاران، ۲۰۱۷)، یک طرح مدل‌سازی زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروزانه و امکان شبیه‌سازی زهکشی زیرزمینی کنترل‌شده را توسعه دادند. طرح مدل‌سازی توسعه‌یافته در یکی از مزارع کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعیبیه) خوزستان با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل‌شده با موفقیت مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. هدف از پژوهش حاضر، تحلیل عدم‌قطعیت مدل توسعه‌یافته در پژوهش فوق ازطریق تلفیق GLUE با گونهٔ یکپارچهٔ الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) (پارسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴) بود.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در یکی از مزارعِ (مزرعه B1117) تحت‌کشت گیاه نیشکر (کشت اول، رقم CP48-103) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعیبیه، بین طول جغرافیایی ′۳۷،°۴۸ تا ′۵۰،°۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی ′۳۷،°۳۱ تا ′۰۰،°۳۲ شمالی) و با استفاده از بانک اطلاعات مزرعه‌ایِ گردآوری‌شده توسط صادقی لاری (۱۳۹۱) صورت گرفت (جدول ۱). مزرعهٔ مطالعاتی مجهز به زهکش زیرزمینی آزاد (با متوسط عمق کارگذاری ۲/۱ متر) بود. مدیریت زهکشی کنترل‌شده (با عمق کنترل سطح ایستابی ۷۰ سانتی‌متر) طی بخشی از دورهٔ رشد نیشکر (از اردیبهشت تا آبان ۱۳۹۰) اعمال شد. طول دورهٔ شبیه‌سازی از ۲۸ تیر ۱۳۸۹ تا ۲۰ آذر ۱۳۹۰ (۴۸۱ روز) درنظر گرفته شد. برای مزرعهٔ مطالعاتی، ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر (معادل با عمق وقوع لایهٔ محدودکننده) و متشکل از دو لایه با ویژگی‌های ذکرشده در جدول ۲ درنظر گرفته شد. داده‌های هواشناسی دورهٔ مطالعاتی از ایستگاه هواشناسی مزرعهٔ نمونهٔ منطقهٔ مطالعاتی جمع‌آوری شد. به‌منظور محاسبهٔ تبخیر-تعرق زیرروزانه (با مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه‌ای) از چارچوب ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانهٔ توسعه‌یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۴الف) و ویرایش تصحیح‌شدهٔ مدل پنمن-مانتیث ASCE (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴ب) برای منطقهٔ مطالعاتی استفاده شد. به‌دلیل وسعت قابل‌توجه مزرعهٔ مطالعاتی (حدود ۲۱ هکتار) و به‌منظور درنظرگرفتن ناهمگنی مکانی برنامه‌ریزی آبیاری اعمال‌شده در سطح مزرعه، مدل SWAP از طریق تعریف تعداد ۱۰ واحد شبیه‌سازی همگن (موسوم به هیدروتوپ) به‌شیوهٔ توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت. همچنین، با تعریف زمان آغاز و پایان هر یک از رویدادهای آبیاری محقق‌شده در مزرعه، امکان درنظرگرفتن زمان‌های اعمال رویدادهای آبیاری طی ساعات مختلف شبانه‌روز در بخش‌های مختلف مزرعه فراهم شد. شرط مرزی پایین‌دست نیم‌رخ خاک به‌صورت مقادیر ازپیش‌تعیین‌شدهٔ جریان از کف نیم‌رخ خاک با شوری معیّن درنظر گرفته شد. میزان جریان از کف در پنج مقطع زمانی از طول دورهٔ شبیه‌سازی از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر مقاطع زمانی از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد شد. میزان شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیم‌رخ خاک، هر یک به‌عنوان یک پارامتر مجهول یکتا در سراسر دورهٔ شبیه‌سازی از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد.

به‌منظور مدل‌سازی انتقال املاح در مزارع مطالعاتی، دو فرایند انتقال توده‌ای و جذب سطحی املاح (مبتنی‌بر ایزوترم جذب خطی) درنظر گرفته شد. مدل‌سازی سیستم زهکشی از طریق رویکرد سیستم زهکشی چندگانه مبتنی‌بر مفهوم مقاومت زهکشی (کروز و همکاران، ۲۰۱۷) صورت گرفت. مزرعهٔ مطالعاتی علاوه‌بر دارابودن سیستم زهکشی زیرزمینی، در مجاورت یک زهکش جمع‌کنندهٔ روباز نیز قرار داشت؛ بنابراین در فرایند مدل‌سازی، یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی (با ویژگی‌های یکسان برای هر ۱۰ هیدروتوپ) درنظر گرفته شد. زه‌آب خروجی از هر هیدروتوپ ازطریق معادلهٔ سادهٔ زیر روندیابی شد:

$$T_{d,i} = T_c \, L_{outlet,i} / L_{outlet,max} \qquad (۱)$$

که در آن: $L_{outlet,i}$ و $T_{d,i}$ به‌ترتیب، طول مسیر (متر) و زمان تأخیر (روز) رسیدن زه‌آب خروجی از هیدروتوپ iام به نقطهٔ خروجی، T_c متوسط زمان انتقال زه‌آب به خروجی سیستم زهکشی (ساعت) و $L_{outlet,max}$ بیانگر فاصلهٔ دوردست‌ترین هیدروتوپ از نقطهٔ خروجی (متر) است. شبیه‌سازی متغیرهای بیوفیزیکی با استفاده از مدل گیاهی WOFOST (سوپیت و همکاران، ۱۹۹۴) صورت گرفت.

پارامترهای حساس این مدل براساس پژوهش‌های مشابه گذشته (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۳) شناسایی شده (جدول ۳) و مقادیر آن‌ها از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. به‌دلیل طولانی‌بودن دورهٔ رشد و توسعهٔ گیاه نیشکر (حدود ۱۵ ماه)، مقادیر پارامترهای گیاهی S_{LA} و A_{max} (جدول ۳) در نُه مقطع از دورهٔ رشد گیاه ازطریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر مقاطع بازهٔ زمانی رشد گیاه از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر واسنجی‌شده برآورد شد. جزئیات کامل نحوهٔ برپاسازی مدل برای مزرعهٔ مطالعاتی توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) تشریح شده است. در پژوهش حاضر، ازطریق برنامه‌نویسی فرترن و C++ چندپردازشی و تلفیق روش GLUE با الگوریتم UPSO یک طرح تحلیل عدم‌قطعیت ترکیبی توسعه یافت و با کد منبع تصحیح‌شده‌ای از مدل SWAP (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۹) یکپارچه‌سازی شد.

جدول ۱- مجموعه داده‌های مورد استفاده در فرایند واسنجی و صحت‌سنجی و معیارهای شناسایی شبیه‌سازی‌های رفتاری

مؤلفهٔ مورد ارزیابی مدل	دادهٔ واسنجی	مرحلهٔ واسنجی	مرحلهٔ صحت‌سنجی	معیار شناسایی شبیه‌سازی‌های رفتاری
شبیه‌سازی انتقال آب	نیم‌رخ رطوبت خاک ($cm^3\ cm^{-3}$)	ü	ü	EF > ۰/۷
	عمق سطح ایستابی (cm)	ü	ü	
	جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی ($cm\ d^{-1}$)	ü	ü	
شبیه‌سازی انتقال املاح	شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی ($dS\ m^{-1}$)	ü	ü	NRMSE < ۰/۲
	نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک ($dS\ m^{-1}$)	ü	ü	
شبیه‌سازی متغیرهای بیوفیزیکی	شاخص سطح برگ ($cm^2\ cm^{-2}$)	ü		EF > ۰/۷
	عملکرد مادهٔ خشک نی ($ton\ ha^{-1}$)	ü		
	عملکرد مادهٔ خشک ساکارز ($ton\ ha^{-1}$)	ü		

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعهٔ مورد مطالعه

عمق (cm)	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم ویژهٔ ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	کربن آلی (%)	آهک (%)	pH (-)	شوری عصارهٔ اشباع ($dS\ m^{-1}$)
۰-۳۰	لوم رسی-سیلتی	۱۴/۰۰	۵۲/۰۰	۳۴/۰۰	۱/۶۶	۱/۸۵	۳۹/۶۰	۷/۶۸	۲/۹۸
۳۰ <	لوم رسی-سیلتی	۱۰/۶۷	۵۲/۳۳	۳۷/۰۰	۱/۶۶	۰/۷۳	۴۰/۱۶	۷/۸۶	۲/۴۲

فرایند واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت مدل توسعه‌یافته برای مزرعهٔ مطالعاتی، با درنظرگرفتن مجموعاً ۴۵ پارامتر مجهول (جدول ۳) انجام شد. دامنهٔ تغییرات مجاز پارامترهای مجهول مدل براساس منابع علمی (شاپ و لیژ، ۱۹۹۸؛ کروز و همکاران، ۲۰۱۷) و مشاهده‌های مزرعه‌ای تعیین شد (جدول ۳). جزئیات کامل نحوهٔ برپاسازی مدل برای مزرعهٔ مطالعاتی توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) تشریح شده است. کران پایین دامنهٔ تغییرات مجاز پارامتر رطوبت اشباع خاک، q_{sat}، براساس حداکثر مقدار رطوبت حجمی مشاهداتی تعیین شد. فرایند واسنجی پارامترهای مجهول مدل به‌ازای ۳۰۰ ذره (دو برابر تعداد ذرات درنظرگرفته‌شده در پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) و ۴۵۰ تکرار (مجموعاً ۱/۳۵ میلیون مرتبه اجرای مستقل مدل SWAP) صورت گرفت. از مجموع وزنی آمارهٔ ریشهٔ میانگین خطای نرمال‌شده (NRMSE، معادلهٔ (۲) حاصل از مقایسهٔ مقادیر هر یک از مجموعه داده‌های واسنجی (جدول ۱) با داده‌های شبیه‌سازی‌شده با ضرایب وزنی یکسان به‌عنوان تابع برازش مسئلهٔ مدل‌سازی معکوس تک‌هدفه استفاده شد. پس از اجرای مدل به‌ازای هر یک از دسته پارامترهای تولیدشده از طریق الگوریتم تلفیقی GLUE-UPSO، عملکرد مدل در بازسازی داده‌های واسنجی با استفاده از آماره‌های NRMSE و ضریب کارآیی مدل، EF، به‌شرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i)^2}{m}} \Big/ \bar{O} \qquad (۲)$$

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{m}(O_i - \bar{O})^2}\right) \qquad (۳)$$

که در آن‌ها: O مقدار اندازه‌گیری‌شده، P مقدار شبیه‌سازی‌شده و $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و m تعداد مقایسه‌ها است. مقادیر آمارهٔ NRMSE در دامنهٔ ۰/۰۰ تا ۰/۱۰، ۰/۱۰ تا ۰/۲۰، ۰/۲۰ تا ۰/۳۰ و بزرگ‌تر از ۰/۳۰ به‌ترتیب به‌عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب،

قابل‌قبول و غیرقابل‌قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری‌شده معیار درنظر گرفته می‌شود (لوگ و گرین، ۱۹۹۱). مقادیر آمارهٔ ضریب کارآیی مدل در دامنهٔ ۰/۸ تا ۱/۰، ۰/۷ تا ۰/۸، ۰/۵ تا ۰/۷ و کوچک‌تر از ۰/۵ به‌ترتیب به‌عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل‌قبول و غیرقابل‌قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری‌شده معیار درنظرگرفته می‌شود (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

به‌منظور متمایز ساختن دستهٔ پارامترهای رفتاری و غیررفتاری از یکدیگر، دستهٔ پارامتری که شبیه‌سازی‌های متناظر با آن، تمامی معیارهای وضع‌شده در جدول ۱ را به‌طور هم‌زمان برآورده ساخت، به‌عنوان یک دسته پارامتر رفتاری درنظر گرفته شد. در ادامه، مجموعه دسته پارامترهای رفتاری شناسایی‌شده مورد پردازش قرار گرفته و با اطلاق یک وزن درست‌نمایی w_i (معادلهٔ (۴)) به هر یک از دستهٔ پارامترهای رفتاری شناسایی‌شده، کران‌های عدم‌قطعیت پیش‌بینی‌های مدل در قالب صدک‌های توابع توزیع احتمال تجمعی (که به توزیع پسین معروف است) محاسبه شد.

$$w_i = \frac{L(\vartheta_i)}{\sum_{i=1}^{M} L(\vartheta_i)} \qquad (۴)$$

که در آن: w_i وزن درست‌نمایی مربوط به دستهٔ پارامتر رفتاری i ام، $L(\vartheta_i)$ معیار درست‌نمایی متناظر با دستهٔ پارامتر رفتاری ϑ_i و M تعداد کل دستهٔ پارامترهای رفتاری شناسایی شده است.

از مقادیر تابع برازش مسئلهٔ مدل‌سازی معکوس محاسباتی برای هر یک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی‌شده به‌عنوان معیار درست‌نمایی در محاسبهٔ وزن‌های درست‌نمایی (معادلهٔ (۴)) استفاده شد. وزن‌های درست‌نمایی محاسبه‌شده به‌منظور تعیین محدوده‌های عدم‌قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) برای هر یک از سری زمانی‌های شبیه‌سازی‌شده داده‌های واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. محدوده‌های عدم‌قطعیت محاسباتی با استفاده از آماره‌های p-factor و r-factor مورد ارزیابی قرار گرفت (عباسپور، ۲۰۰۸):

$$p-factor = 100 \times \frac{\left|\{O_i |\, P_i^{2.5\%} \le O_i \le P_i^{97.5\%}; i = 1,2,\dots,m\}\right|}{m} \qquad (۵)$$

$$r-factor = \frac{\sum_{i=1}^{m}\left(P_i^{97.5\%} - P_i^{2.5\%}\right)}{m\,\sigma_{obs}} \qquad (۶)$$

که در آن‌ها $P_i^{2.5\%}$ و $P_i^{97.5\%}$ به‌ترتیب کران‌های پایین و بالای محدودهٔ عدم‌قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) و σ_{obs} انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است. آمارهٔ p-factor بیانگر درصدی از داده‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ واقع در محدودهٔ 95PPU است. آمارهٔ r-factor بیانگر نسبت متوسط ضخامت محدودهٔ 95PPU به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). مقادیر ایده‌آل آماره‌های p-factor و r-factor به‌ترتیب برابر با ۱۰۰ درصد و صفر است.

جدول ۳- مقادیر دامنهٔ تغییرات مجاز، بهترین برآورد پارامترهای واسنجی و آماره‌های توصیفی مجموعه پارامترهای رفتاری برای مدل توسعه‌یافته در مزرعهٔ مطالعاتی(*)

شرح	کد پارامتر	پارامتر	دامنهٔ تغییرات مجاز (حداکثر- حداقل)	مقدار بهینه	پارامترهای رفتاری	
					میانگین	ضریب تغییرات (درصد)
پارامترهای هیدرولیکی خاک	P1	$(\theta_{sat})_1$	۰/۴۰۰ - ۰/۵۴۰	۰/۴۷۴	۰/۴۶۶	۳/۱
	P2	$(\theta_{sat})_2$	۰/۴۰۰ - ۰/۵۴۰	۰/۴۱۸	۰/۴۱۶	۳/۰
	P3	$(\alpha)_1$	۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۲۶	۰/۰۲۳	۲۸/۸
	P4	$(\alpha)_2$	۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۱۳	۰/۰۲۳	۵۳/۷
	P5	$(n)_1$	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۲۸۷	۱/۳۳۵	۵/۱
	P6	$(n)_2$	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۲۹۲	۱/۲۴۱	۸/۶
	P7	$(K_{sat})_1$	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۲۰/۳۶۲	۳۸/۶۶۹	۵۹/۴
	P8	$(K_{sat})_2$	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۱۵/۷۷۱	۱۴۵/۳۹۶	۱۰۵/۵
جریان از کف در پنج مقطع زمانی	P9	$(q_{Bot})_1$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۷	۶۸/۰
	P10	$(q_{Bot})_2$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۵۲/۳
	P11	$(q_{Bot})_3$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶	۵۷/۵
	P12	$(q_{Bot})_4$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۶۹/۷
	P13	$(q_{Bot})_5$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۱۱۴/۴

ادامه جدول ۳- مقادیر دامنهٔ تغییرات مجاز، بهترین برآورد پارامترهای واسنجی و آماره‌های توصیفی مجموعه پارامترهای رفتاری برای مدل توسعه‌یافته در مزرعهٔ مطالعاتی(*)

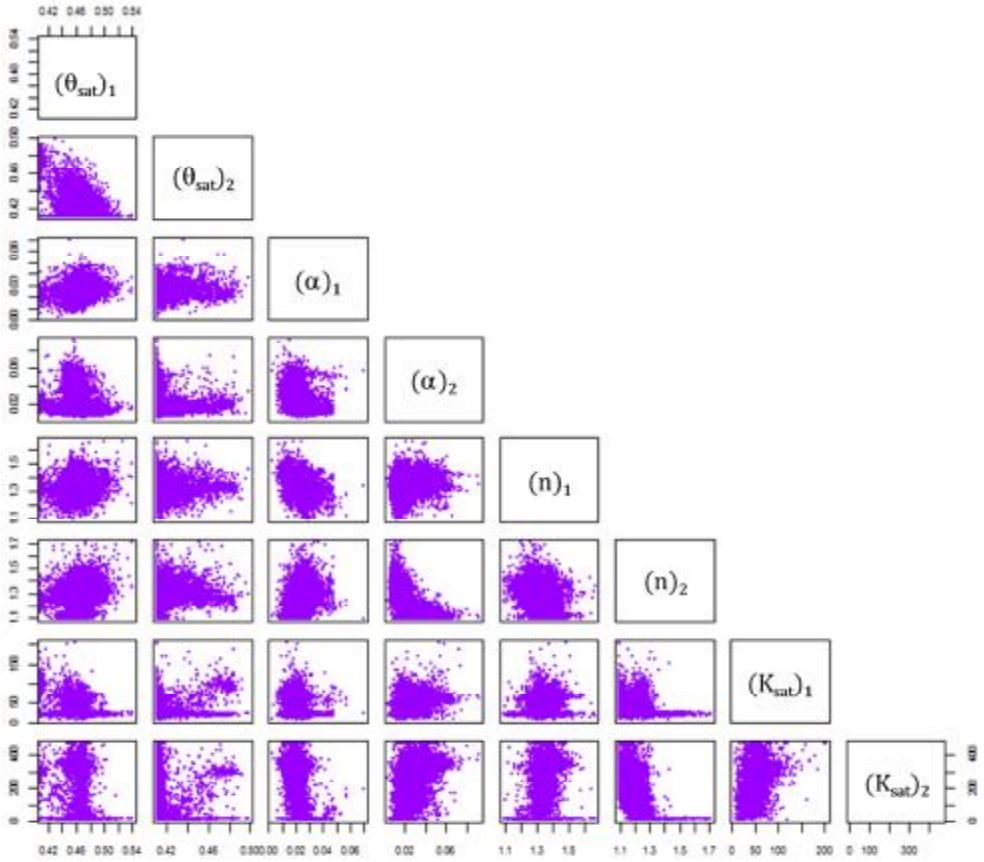
شرح	کد پارامتر	پارامتر	دامنهٔ تغییرات مجاز (حداکثر- حداقل)	مقدار بهینه	پارامترهای رفتاری	
					میانگین	ضریب تغییرات (درصد)
پارامترهای انتقال املاح در خاک	P14	$(D_{dis})_1$	۰/۵۰۰ - ۶۵/۰۰۰	۲۵/۲۵۳	۲۴/۰۱۶	۳۲/۶
	P15	$(D_{dis})_2$	۰/۵۰۰ - ۶۵/۰۰۰	۲۰/۱۳۸	۲۷/۰۹۰	۳۸/۱
	P16	$(K_f)_1$	۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۲۴/۴۲۷	۴۸/۸۷۲	۵۹/۵
	P17	$(K_f)_2$	۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۲۳/۸۷۴	۴۰/۰۱۲	۵۵/۴
ترم‌های شوری	P18	C_{gwl}	۱/۳۰۰ - ۳/۵۰۰	۲/۶۰۵	۲/۴۳۸	۱۳/۱
	P19	C_{Bot}	۱/۳۰۰ - ۵/۵۰۰	۴/۱۸۸	۳/۶۷۲	۲۰/۸
پارامترهای سیستم زهکشی	P20	γ_{drain}	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۱۳۱/۷۴۱	۱۴۳/۶۷۴	۹/۴
	P21	γ_{drain2}	۱۰۰۰/۰۰۰ - ۱۰۰۰۰/۰۰۰	۴۷۳۶/۶۸۴	۳۹۰۶/۸۲۹	۲۸/۴
	P22	$g_{drain,Ctrl}$	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۷۵/۶۵۹	۷۸/۰۳۰	۶/۰
	P23	T_c	۰/۸۰۰ - ۲/۰۰۰	۱/۳۶۷	۱/۵۴۳	۱۷/۸
پارامترهای گیاهی	P24	T_{SUMEA}	۵۴۰۰/۰۰۰ - ۶۰۰۰/۰۰۰	۵۵۸۴/۰۲۴	۵۵۸۴/۴۳۸	۰/۸
	P25	T_{SUMAM}	۶۴۲/۰۰۰ - ۴۵۰۰/۰۰۰	۱۳۰۳/۳۸۰	۱۶۹۴/۸۸۴	۲۷/۵
	P26	RGRLAI	۰/۰۱۵ - ۰/۰۵۰	۰/۰۲۹	۰/۰۳۰	۹/۶
	P27	$(S_{LA})_1$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷	۳۳/۳
	P28	$(S_{LA})_2$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷	۲۷/۳
	P29	$(S_{LA})_3$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۶	۲۸/۲
	P30	$(S_{LA})_4$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۱۴/۱
	P31	$(S_{LA})_5$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۴	۱۲/۲
	P32	$(S_{LA})_6$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۵	۱۰/۹
	P33	$(S_{LA})_7$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳	۸/۳
	P34	$(S_{LA})_8$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸	۲۷/۸
	P35	$(S_{LA})_9$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۶	۱۷/۰
	P36	EFF	۰/۳۰۰ - ۰/۸۰۰	۰/۵۰۱	۰/۴۸۸	۹/۲
	P37	$(A_{max})_1$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۳۶/۲۷۹	۳۴/۶۵۱	۱۵/۳
	P38	$(A_{max})_2$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۱۸/۵۹۷	۱۴/۳۲۱	۶۵/۳
	P39	$(A_{max})_3$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۷/۶۹۰	۲۰/۷۲۵	۸۳/۰
	P40	$(A_{max})_4$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۶۴/۶۷۹	۶۳/۰۴۱	۱۰/۳
	P41	$(A_{max})_5$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۷۳/۴۵۴	۶۳/۱۷۴	۲۱/۰
	P42	$(A_{max})_6$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۳/۸۹۹	۴۳/۴۸۲	۱۸/۸
	P43	$(A_{max})_7$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۳۵/۱۴۵	۲۹/۵۳۰	۳۱/۲
	P44	$(A_{max})_8$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۳/۷۰۴	۳۱/۴۷۳	۴۹/۸
	P45	$(A_{max})_9$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۵/۸۹۳	۴/۲۶۰	۸۹/۸

(*) در جدول فوق، q_{sat} رطوبت خاک در حالت اشباع ($cm^3\ cm^{-3}$)، a (cm^{-1})، n (بدون بُعد)، m (بدون بُعد)، l (بدون بُعد) ضرایب شکل، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع ($cm\ d^{-1}$) مورد استفاده در مدل‌های معلم و ون‌گنوختن، D_{dis} و K_f به‌ترتیب، ضریب انتشارپذیری (cm)، ضریب ایزوترم جذب خطی ($cm^3\ g^{-1}$)، q_{Bot} جریان از کف ($cm\ d^{-1}$)، C_{Bot} شوری جریان از کف ($mg\ cm^{-3}$)، g_{drain1}، g_{drain2}، $g_{drain,Ctrl}$ و T_c به‌ترتیب، مقاومت زهکشی زیرزمینی آزاد، کنترل شده و جمع‌کنندهٔ روباز (d) و متوسط زمان انتقال زه‌آب به خروجی سیستم زهکشی (h)، C_{gw} شوری آب زیرزمینی ($mg\ cm^{-3}$)، T_{SUMEA}، T_{SUMAM}، $RGRLAI$، S_{LA}، A_{max} و EFF به‌ترتیب، بیانگر مجموع دما از مرحلهٔ جوانه‌زنی تا گل‌دهی (°C)، مجموع دما از مرحلهٔ گل‌دهی تا بلوغ (°C)، حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ ($m^2\ m^{-2}\ d^{-1}$)، سطح ویژهٔ برگ ($ha\ kg^{-1}$)، حداکثر شدت جذب دی‌اکسیدکربن ($kg\ CO_2\ m^{-2}\ d^{-1}$) و راندمان مصرف نور در یک برگ منفرد ($kg\ ha^{-1}\ h^{-1}\ /\ J\ m^2\ s^{-1}$) است.

نتایج و بحث

مقادیر بهینهٔ پارامترهای مجهول واردشده در طرح مدل‌سازی معکوس و آماره‌های توصیفی مجموعه پارامترهای رفتاری شناسایی‌شده (حاوی ۱۲۱۲۸ دسته پارامتر رفتاری منحصربه‌فرد) از طریق طرح تحلیل عدم‌قطعیت توسعه‌یافته در جدول ۳ ارائه شده است. حصول نتایج مشابه با پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) برای مقادیر بهینه‌سازی‌شده پارامترهای مجهول

مدل حاکی از قابلیت بالای الگوریتم UPSO در جست‌وجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینهٔ سراسری مسئلهٔ مدل‌سازی معکوس است. مقادیر آمارهٔ ضریب تغییرات کوچک‌تر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد و بزرگ‌تر از ۷۵ درصد به‌ترتیب به‌عنوان تغییرپذیری ناچیز، بینابینی و تغییرپذیری بالای کمیت مورد بررسی درنظر گرفته می‌شود (یوان‌ای‌پی، ۲۰۱۵). مقایسهٔ ضریب تغییرات مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک (جدول ۳) حاکی از تغییرپذیری بالاتر پارامترهای a و K_{sat} در مقایسه با پارامترهای n و q_{sat} است؛ بنابراین می‌توان گفت در مقایسه با پارامترهای n و q_{sat}، تابع برازش مدل‌سازی معکوس از حساسیت کمتری نسبت‌به پارامترهای a و K_{sat} برخوردار بوده است؛ به‌عنوان نمونه، اندرکنش مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی دو لایهٔ خاک درنظر گرفته‌شده برای مزرعهٔ مطالعاتی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، نحوهٔ پراکنش مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک حاکی از غیریکتایی قابل‌توجه پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده است. این نتیجه با نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های مشابه گذشته (بینلی و بی‌ون، ۲۰۰۳؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲؛ شفیعی و همکاران، ۲۰۱۴) مطابقت دارد. یکی از دلایل پایین‌بودن ضریب تغییرات پارامتر q_{sat} را می‌توان به محدودکردن دامنهٔ تغییرات مجاز این پارامتر از طریق حداکثر مقدار مشاهداتی رطوبت خاک نسبت داد.



شکل ۱- ماتریس نمودارهای پراکنش مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک (جدول ۳)، حاوی ۱۲۱۲۸ دسته پارامتر رفتاری منحصربه‌فرد

مطابق با شکل ۱ مقدار پارامتر q_{sat} در بخش قابل‌توجهی از دستهٔ پارامترهای رفتاری شناسایی‌شده بر کران پایین دامنهٔ تغییرات مجاز وضع‌شده برای این پارامتر تمرکز یافته است؛ بنابراین، وضع کران پایین تغییرات مجاز پارامتر q_{sat} براساس حداکثر مقدار رطوبت خاک مشاهداتی در کاهش عدم‌قطعیت برآورد این پارامتر مؤثر بوده است. این امر بیانگر اهمیت بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی در کاهش عدم‌قطعیت پارامترهای برآورد شده و درنتیجه، شبیه‌سازی‌های مدل است. این در حالی است که دامنهٔ تغییرات مجاز سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد

بررسی با درنظرگرفتن کل دامنهٔ تغییرات مجاز فیزیکی آن‌ها براساس بانک اطلاعات خاک گردآوری‌شده توسط شاپ و لیژ (۱۹۹۸) تعیین شد. در این شرایط، مقادیر رفتاری پارامتر n از تغییرپذیری و عدم‌قطعیت اندکی برخوردار بود ؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر n عملاً، حساس‌ترین پارامتر هیدرولیکی خاک بوده است. این یافته با نتیجهٔ پژوهش‌های گذشته مطابقت دارد که نشان دادند پارامتر n تنها پارامتر مدل ون‌گنوختن است که می‌تواند بیانگر بافت خاک باشد (هورکمپ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲، شفیعی و همکاران، ۲۰۱۴؛ وسلینگ و همکاران، ۲۰۲۰). میزان تغییرپذیری مقادیر رفتاری ترم‌های جریان از کف (جدول ۳)، بیانگر کاهش تدریجی حساسیت آن‌ها در طول دورهٔ شبیه‌سازی است. علت این امر را می‌توان به شدت‌یافتن رویدادهای آبیاری در دوره‌های میانی و انتهایی شبیه‌سازی و ناچیزشدن سهم این ترم در بیلان آب نسبت داد. در مقایسه با پارامتر ضریب ایزوترم جذب خطی (K_f)، پارامتر ضریب انتشارپذیری برای لایهٔ زیرسطحی خاک (D_{dis}) از حساسیت بیشتری نسبت‌به تابع هدف مدل‌سازی معکوس برخوردار بوده است (جدول ۳). دلیل این امر را می‌توان به کاهش عمق کنترل آب زیرزمینی شور در زهکشی کنترل‌شده و افزایش حساسیت پارامترهای مؤثر بر انتقال املاح نسبت‌به پارامترهای مؤثر بر نگه‌داشت املاح در خاک نسبت داد. ضریب تغییرات مقادیر رفتاری پارامترهای شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف (جدول ۳) بیانگر حساسیت قابل‌توجه تابع هدف مدل‌سازی معکوس نسبت‌به این دو پارامتر است. در مقایسه با مقاومت زهکشی جمع‌کنندهٔ سطحی، γ_{drain2}، تابع هدف مدل‌سازی معکوس از حساسیت بیشتری نسبت‌به پارامترهای مقاومت زهکشی زیرزمینی آزاد و کنترل‌شده (به‌ترتیب، γ_{drain} و $\gamma_{drain,Ctrl}$) برخوردار بوده است (جدول ۳). تغییرات مقادیر بهینه و درجه حساسیت پارامترهای S_{LA} و A_{max} در طول دورهٔ رشد گیاه حاکی از اهمیت درنظرگرفتن مقادیر این پارامترها به‌عنوان تابعی از مرحلهٔ رشد گیاه است.

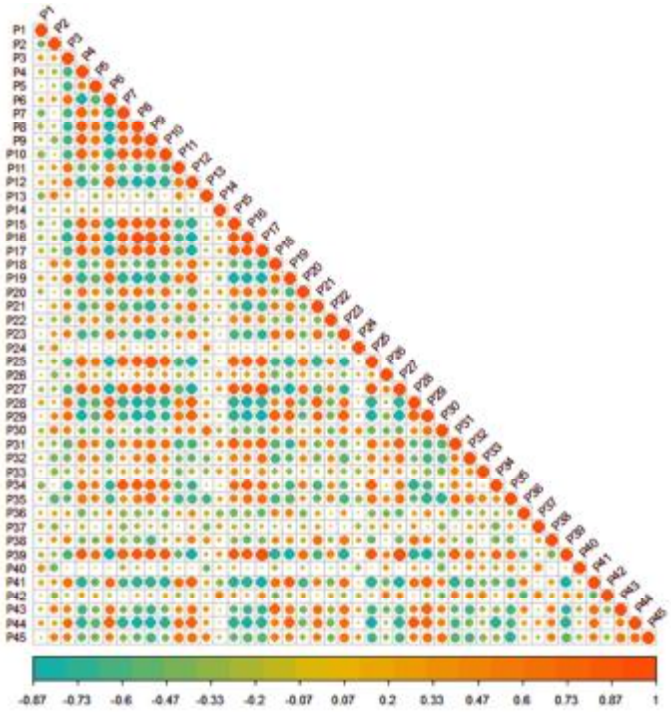
این در حالی است که در اکثر مطالعات مشابه، برای پارامترهای بالا، یک مقدار ثابت درنظر گرفته شده است (وظیفه‌دوست و همکاران، ۲۰۰۸؛ لی و رن، ۲۰۱۹). ساختار همبستگی بین مقادیر رفتاری پارامترهای واسنجی در شکل ۲ ارائه شده است. مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون در ماتریس همبستگی محاسبه‌شده برای پارامترهای رفتاری در دامنهٔ بین ۰/۸۷- تا ۰/۹۲ متغیر بود. مقادیر مطلق ضریب همبستگی پیرسون در بازه‌های ۰/۰ تا ۰/۲، ۰/۲ تا ۰/۴، ۰/۴ تا ۰/۷، ۰/۷ تا ۰/۹ و ۰/۹ تا ۱/۰ به‌ترتیب به‌عنوان وجود همبستگیِ بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی بین دو متغیر مورد بررسی دسته‌بندی می‌شود (سلیمان‌نژاد، ۲۰۰۴). بر این اساس، ۲۰/۴، ۲۰/۶، ۳۹/۲، ۱۹/۴ و ۰/۴ درصد از ضرایب ماتریس همبستگی محاسبه‌شده به‌ترتیب در کلاس‌های همبستگیِ بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی قرار گرفتند. این نتیجه بیانگر اندرکنش قابل‌توجه بین پارامترهای واسنجی‌شده و توانایی طرح تحلیل عدم‌قطعیت مورد استفاده در این مطالعه به‌لحاظ جستجوی سراسری و متمرکز نواحی رفتاری فضای پارامترهای مجهول و نمایان‌ساختن این اندرکنش است.

مقادیر آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل توسعه‌یافته برای مزرعهٔ مطالعاتی در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ ارائه شده است. آمارهٔ EF حاکی از عملکرد خوب تا بسیار خوب مدل در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی، جریان زه‌آب خروجی، شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز است (جدول ۴). مقادیر آمارهٔ NRMSE بیانگر عملکرد خوب تا بسیار خوب مدل در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب است. براساس مقادیر آمـــارهٔ p-factor (جدول ۴)، محدوده‌های 95PPU محاسباتی برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی‌شدهٔ مرتبط با مؤلفهٔ هیدرولوژی مدل (رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی) بین ۳۷ تا ۸۸ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و بین ۴۴ تا ۸۵ درصد از مجموعه داده‌های صحت‌سنجی را دربرگرفته‌اند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که اثر بخش عمده‌ای از منابع مؤثر بر عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های مؤلفه‌های هیدرولوژی مدل در عدم‌قطعیت پارامترهای واسنجی نمود یافته است.

مقادیر آمارهٔ r-factor (جدول ۴) مربوط به محدودهٔ 95PPU محاسباتی برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی‌شدهٔ فوق برای مجموعه‌داده‌های واسنجی و صحت‌یابی به‌ترتیب

بین ۰/۵۲ تا ۱/۰۶ و ۰/۸۷ تا ۱/۳۵ متغیر بود. براساس مقادیر این آماره و شکل ۳ می‌توان گفت که دربرگرفته‌شدن بخش عمدهٔ مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده‌های 95PPU، به قیمت افزایش مفرط ضخامت این محدوده صورت نگرفته است. این نتیجه بیانگر سطح قابل‌قبول عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی است. براســـاس آمارهٔ p-factor، محدودهٔ 95PPU اشتقاق‌یافته برای شبیه‌سازی‌های نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک ۶۷ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی را با r-factor به‌ترتیب برابر با ۱/۱۶ و ۲/۶۷ دربرگرفته است (جدول ۴).

بااین‌حال، همان‌طور که در جدول ۴ نیز قابل‌مشاهده است، دلیل اصلی حصول مقدار بالای آمارهٔ r-factor در مرحلهٔ صحت‌سنجی، نه به دلیل افزایش ضخامت محدودهٔ 95PPU، بلکه به‌دلیل کاهش شدید تغییرپذیری مجموعه دادهٔ صحت‌سنجی رخ داده است. شکل ۵ و مقادیر آماره‌های p-factor و r-factor (جدول ۴)، حاکی از آن است که به‌دلیل ضخامت ناچیز محدودهٔ 95PPU محاسبه‌شده برای شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی، بخش اندکی از مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی (به‌ترتیب ۲۰ و ۱۷ درصد) در این محدوده قرار گرفته‌اند. دلیل اصلی حصول این نتیجه را می‌توان به استفاده از داده‌های واسنجی متنوع و لزوم برآورده‌شدن هم‌زمان تمامی معیارهای وضع‌شده برای تمایز شبیه‌سازی‌های رفتاری و غیررفتاری از یکدیگر (جدول ۱) نسبت داد؛ چراکه در این شرایط، افزایش ضخامت محدودهٔ 95PPU برای شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه، به قیمت برآورده‌نشدن حداقلِ یکی از معیارهای وضع‌شده در جدول ۱ صورت خواهد گرفت. براساس مقادیر آمارهٔ p-factor، محدوده‌های 95PPU محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های متغیرهای بیوفیزیکی با یک ضخامت قابل‌قبول (r-factor بین ۰/۸۴ تا ۰/۹۸) بین ۷۵ تا ۱۰۰ درصد از داده‌های واسنجی را دربر گرفته‌اند. این نتیجه بیانگر انعکاس مؤثر بخش عمدهٔ منابع عدم‌قطعیت در پارامترهای واسنجی است.

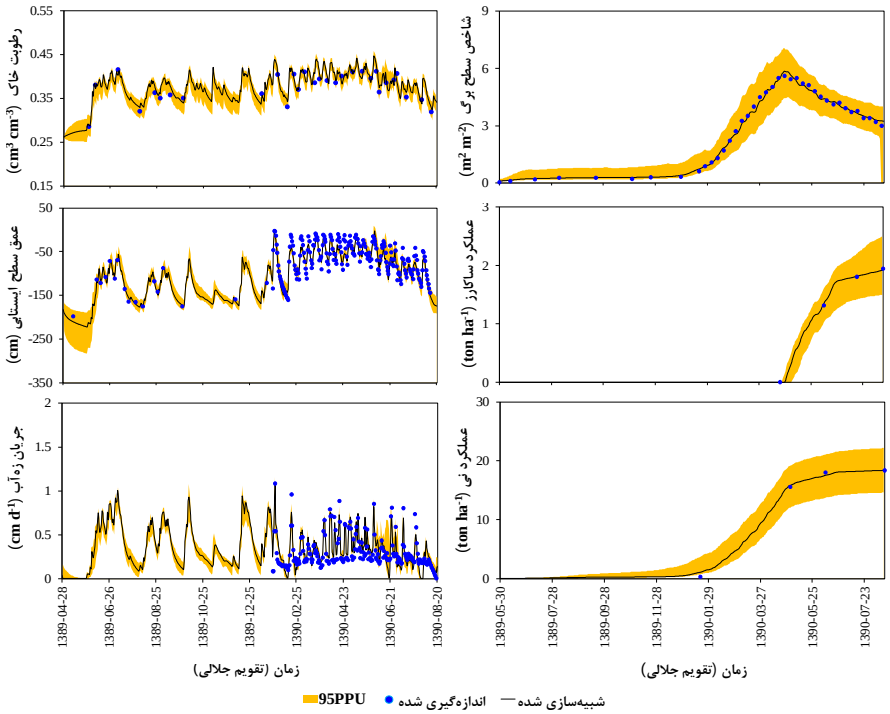


شکل ۲- نمودار ماتریس همبستگی پارامترهای واسنجی رفتاری. نمادهای P1 تا P45 بیانگر کدهای مربوط به هریک از پارامترهای واسنجی (جدول ۳) هستند.

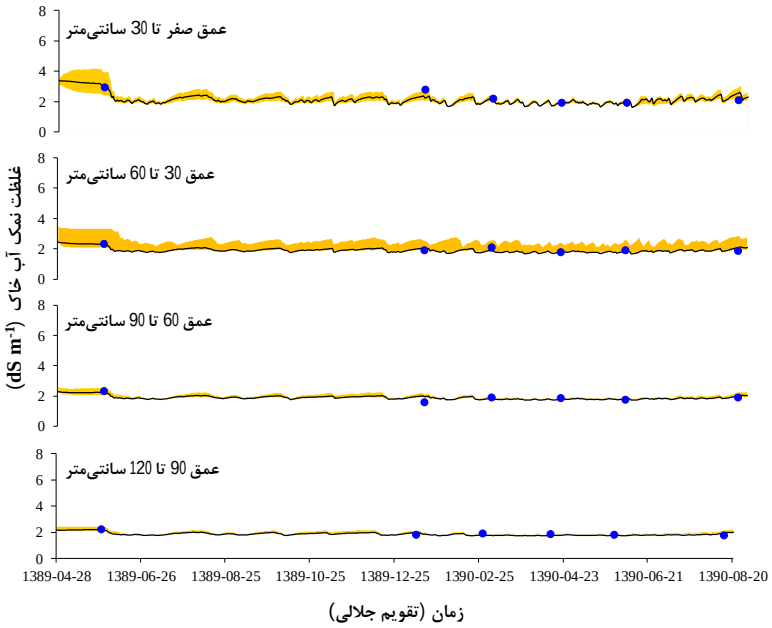
جدول ۴- مقادیر آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در تحلیل عدم‌قطعیت مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و متغیرهای بیوفیزیکی طی دورهٔ شبیه‌سازی(*)

داده معیار اندازه‌گیری‌شده	مجموعه داده	m	CV	آمارهٔ ارزیابی			
				NRMSE	EF	p-factor	r-factor
رطوبت خاک ($cm^3\ cm^{-3}$)	واسنجی	۱۷	۹	۰/۰۳۳	۰/۸۷۵	۸۸	۱/۰۶
	صحت‌سنجی	۱۳	۷	۰/۰۳۳	۰/۸۰۴	۸۵	۱/۳۵
	کل مجموعه داده	۳۰	۹	۰/۰۳۳	۰/۸۵۷	۸۷	۱/۱۴
عمق سطح ایستابی (cm)	واسنجی	۹۸	-۶۴	۰/۱۶۵	۰/۹۳۳	۶۳	۰/۵۲
	صحت‌سنجی	۱۲۲	-۴۹	۰/۲۳۹	۰/۷۶۰	۶۱	۰/۹۹
	کل مجموعه داده	۲۲۰	-۵۸	۰/۲۰۴	۰/۸۷۶	۶۲	۰/۷۱
جریان زه‌آب خروجی ($cm\ d^{-1}$)	واسنجی	۸۱	۶۷	۰/۳۳۲	۰/۷۵۱	۳۷	۰/۵۶
	صحت‌سنجی	۱۲۹	۵۶	۰/۲۸۵	۰/۷۳۹	۴۴	۰/۸۷
	کل مجموعه داده	۲۱۰	۶۰	۰/۳۰۴	۰/۷۴۴	۴۱	۰/۷۴
نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک ($dS\ m^{-1}$)	واسنجی	۱۲	۱۷	۰/۱۰۱	۰/۶۶۴	۶۷	۱/۱۶
	صحت‌سنجی	۱۲	۵	۰/۰۹۲	-۲/۴۸۷	۶۷	۲/۶۷
	کل مجموعه داده	۲۴	۱۵	۰/۰۹۸	۰/۶۰۳	۶۷	۱/۱۴
شوری زه‌آب ($dS\ m^{-1}$)	واسنجی	۱۵	۱۶	۰/۱۵۹	-۰/۰۳۵	۲۰	۰/۱۹
	صحت‌سنجی	۲۳	۱۴	۰/۱۴۳	-۰/۰۵۲	۱۷	۰/۴۶
	کل مجموعه داده	۳۸	۱۵	۰/۱۵۰	-۰/۰۰۲	۱۸	۰/۳۳
شاخص سطح برگ ($m^2\ m^{-2}$)	واسنجی	۳۹	۶۴	۰/۰۴۲	۰/۹۹۶	۹۵	۰/۹۸
عملکرد نی ($ton\ ha^{-1}$)	واسنجی	۴	۵۷	۰/۰۳۵	۰/۹۹۶	۷۵	۰/۸۵
عملکرد ساکارز ($ton\ ha^{-1}$)	واسنجی	۴	۶۱	۰/۰۱۸	۰/۹۹۹	۱۰۰	۰/۸۴

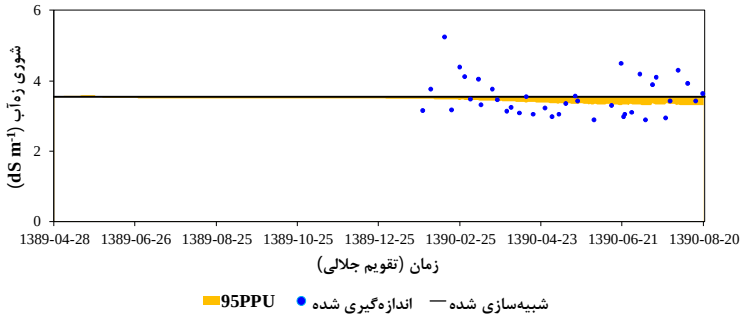
(*) در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه‌گیری‌شده و m تعداد مشاهدات است.



شکل ۳- سری زمانی‌های مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده و محدودهٔ عدم‌قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) کمیت‌های معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه‌یافته در شبیه‌سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دورهٔ شبیه‌سازی. مقادیر عملکرد محصول تولیدی برحسب وزن مادهٔ خشک است.



شکل ۴- سری زمانی‌های مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده و محدودهٔ عدم‌قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعهٔ مطالعاتی



شکل ۵- سری زمانی مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده و محدودهٔ عدم‌قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی در مزرعهٔ مطالعاتی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های توزیعی و زیرروزانه (انجام محاسبات با گام‌های زمانی کوتاه‌تر از ۲۴ ساعت شبانه‌روز) مدل SWAP برای یک مزرعهٔ وسیع نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل‌شده از طریق روش تلفیقی GLUE-UPSO مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی حاکی از غیریکتایی قابل‌توجه پارامترهای واسنجی‌شده، اهمیت تحلیل عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل SWAP و دردست‌داشتن برآوردی از کران‌های عدم‌قطعیت پیش‌بینی‌های مدل بود. وجود ضرایب همبستگی قوی بین پارامترهای واسنجی‌شده حاکی از اهمیت واسنجی مؤلفه‌های مختلف مدل (هیدرولوژی، انتقال املاح/گرما و بیوفیزیکی) با استفاده از داده‌های واسنجی متنوع به‌صورت موازی و هم‌زمان است؛ ازاین‌رو اتخاذ یک رویکرد گام‌به‌گام برای واسنجی جداگانهٔ مدل در شبیه‌سازی انتقال آب، انتقال املاح و متغیرهای بیوفیزیکی منجر به مخدوش‌شدن نتایج واسنجی مدل در گام ماقبل و اُریب‌شدن پارامترهای واسنجی خواهد شد. بااین‌حال، به‌دلیل دشواری واسنجی مدل در شرایط وجود تعداد زیادی از پارامترهای مجهول، واسنجی مؤلفه‌های مختلف مدل SWAP براساس یک اسلوب گام‌به‌گام رویکردی رایج

است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی نظیر UPSO از قابلیت بالایی برای واسنجی مدل در شرایط تعدد پارامترهای مجهول برخوردار هستند، در مقایسه با شبیه‌سازی‌های مرتبط با انتقال املاح، نتایج تحلیل عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های مؤلفه‌های هیدرولوژی و بیوفیزیکی مدل SWAP رضایت‌بخش‌تر بود. محدوده‌های عدم‌قطعیت به‌دست‌آمده برای این دو مؤلفه، علاوه‌بر دربرگرفتن بخش عمدهٔ داده‌های اندازه‌گیری‌شده، از ضخامت قابل‌قبولی نیز برخوردار بودند. این امر بیانگر اهمیت استفاده از داده‌های واسنجی متنوع در کاهش عدم‌قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل است. عملکرد متفاوت مدل در بازسازی داده‌های اندازه‌گیری‌شده غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مؤید آن است که قضاوت در خصوص عملکرد مؤلفهٔ شبیه‌سازی انتقال املاح مدل از طریق بررسی عملکرد مدل در بازسازی، تنها یکی از دو مجموعه‌دادهٔ فوق کفایت نمی‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر، عملکرد قابل‌قبول مدل در شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک لزوماً، به‌معنای عملکرد مناسب آن در شبیه‌سازی شوری زه‌آب خروجی نیست و برعکس.

منابع

۱. پرچمی عراقی ف، سمیع‌پور ف، و صادقی لاری ع. ۱۳۹۹. مدل‌سازی زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروزانهٔ یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/ کنترل‌شده. مجلهٔ پژوهش آب ایران. ۳۹(۴): ۵۳-۶۶.

۲. پرچمی عراقی ف، میرلطیفی س. م، قربانی دشتکی ش، وظیفه‌دوست م، و صادقی لاری ع. ۱۳۹۴الف. توسعهٔ یک چارچوب ریزمقیاس‌سازی به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه: ۲- برآورد تبخیر-تعرق زیرروزانه با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانهٔ ریزمقیاس‌شده. نشریهٔ آب و خاک. ۲۹(۶): ۱۷۲۱-۱۷۳۴.

۳. پرچمی عراقی ف، میرلطیفی س. م، قربانی دشتکی ش، و صادقی لاری ع. ۱۳۹۴ب. مقایسهٔ تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیث ASCE و پنمن-مانتیث فائو-۵۶ در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مختلف: یک مطالعهٔ عددی. نشریهٔ آب و خاک. ۲۹(۵): ۱۱۷۳-۱۱۸۹.

۴. صادقی لاری ع. ۱۳۹۱. بررسی اثرات کنترل سطح ایستابی برروی میزان جریان، نیتروژن و فسفر خروجی از زهکش‌های زیرزمینی در نواحی خشک (مطالعهٔ موردی: شعیبیه خوزستان). پایان‌نامهٔ دکتری. دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۱۷۸ ص.

5. Abbaspour K. C. 2008. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual, 2. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland. 95 p.
6. Bastiaanssen W. Tahir Z. Kijne J. W. Barker R. and Molden D. 2003. Upscaling water productivity in irrigated agriculture using remote-sensing and GIS technologies. In: Kijne J.W., Barker R., and Molden D. (Eds.), Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement. Wallingford: CABI, pp. 289-300.
7. Bessembinder J. J. E. Dhindwal A. S. Leffelaar P. A. Ponsioen T. and Singh S. 2003. Analysis of crop growth. In: van Dam J. C. and Malik R. S. (Eds.), Water Productivity of Irrigated Crops in Sirsa District, India: Integration of remote sensing, crop and soil models and geographical information systems. Wageningen: Alterra. 59-82.
8. Beven K. 2006. A manifesto for the equifinality thesis. Journal of Hydrology. 320(1-2): 18-36.
9. Beven K. J. and Binley A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes. 6(3): 279-298.
10. Binley A. and Beven K. 2003. Vadose zone flow model uncertainty as conditioned on geophysical data. Groundwater. 41(2): 119-127.
11. Cho H. and Olivera F. 2014. Application of multimodal optimization for uncertainty estimation of computationally expensive hydrologic models. Journal of Water Resources Planning and Management. 140(3): 313-321.
12. Haverkamp R. Leij F. J. Fuentes C. Sciortino A. and Ross P. 2005. Soil water retention: I. Introduction of a Shape Index. Soil Science Society of America Journal. 69(6): 1881-1890.
13. Kroes J. van Dam J. Bartholomeus R. Groenendijk P. Heinen M. Hendriks R. Mulder H. Supit I. and van Walsum P. 2017. SWAP version 4, Theory description and

user manual. Technical Report. Wageningen Environmental Research, ESG Report 2780, Alterra, Wageningen, The Netherlands.
14. Li P. and Ren L. 2019. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: I. Parameter sensitivity analysis, calibration and model validation. Journal of Hydrology. 574: 497-516.
15. Loague K. and Green R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of contaminant hydrology. 7(1): 51-73.
16. Moriasi D. N. Arnold J. G. van Liew M. W. Bingner R. L. Harmel R. D. and Veith T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASAE 50(3): 885-900.
17. Mugunthan P. and Shoemaker C. A. 2006. Assessing the impacts of parameter uncertainty for computationally expensive groundwater models. Water Resources Research. 42(10): W10428.
18. Parsopoulos K. E. and Vrahatis M. N. 2004. UPSO: A unified particle swarm optimization scheme. In: Simos T. and Maroulis G. (Eds.), Proceedings of international conference on computational methods in sciences and engineering (ICCMSE 2004). Lecture Series on Computer and Computational Sciences, Zeist: VSP International Science Publishers. 868-873.
19. Pollacco J. A. P. and Mohanty B. P. 2012. Uncertainties of water fluxes in soil–vegetation–atmosphere transfer models: Inverting surface soil moisture and evapotranspiration retrieved from remote sensing. Vadose Zone Journal. 11(3): vzj2011. 0167.
20. Schaap M. G. and Leij F. J. 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. Soil Science. 163(10): 765-779.
21. Shafiei M. Ghahraman B. Saghafian B. Davary K. Pande S. and Vazifedoust M. 2014. Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: A case study in a dry region. Agricultural Water Management. 146: 324-334.
22. Soleimannejad F. 2004. Six Sigma, Basic Steps and Implementation. AuthorHouse, Bloomington, Indiana, USA, 248 p.
23. Supit I. Hooijer A. A. and van Diepen C. A. 1994. System description of the Wofost 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Joint research centre; European commission.
24. Tolson B. A. and Shoemaker C. A. 2008. Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models. Water Resources Research. 44(4): W04411.
25. United Nations Environment Programme (UNEP). 2015. Nile River Basin: Nile Basin Adaptation to Water Stress: Comprehensive Assessment of Flood & Drought Prone Areas. (Available at: http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/14067).
26. Vazifedoust M. van Dam J.C. Feddes R. A. and Feizi M. 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agricultural Water Management. 95(2): 89-102.
27. Wesseling J. Kroes J. Oliveira T. C. and Damiano F. 2020. The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on theterms of the water balance: Some case studies with default R packages. PartII: Results and discussion. Computers Electronics in Agriculture. 170: 105072.
28. Yang J. Reichert P. Abbaspour K. C. Xia J. and Yang H. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. Journal of Hydrology. 358(1): 1-23.