

تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP در یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل

شده در کشت و صنعت شعیبیه

فرزین پرچمی عراقی و عدنان صادقی لاری

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، ایران.

f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

adnansadeghi@yahoo.com

دریافت: فروردین ۱۴۰۰ و پذیرش: شهریور ۱۴۰۰

چکیده

از آنجا که نتایج شبیه‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی با درجات مختلفی از عدم قطعیت همراه است، لذا ارزیابی عدم قطعیت آن‌ها حایز اهمیت است. تحلیل عدم قطعیت نتایج مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی می‌تواند اطلاعات مفیدی در خصوص درجه اطمینان از نتایج مدل فراهم آورد. در این بررسی، تحلیل عدم قطعیت کاربرد توزیعی مدل SWAP برای یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل شده (واقع در کشت و صنعت نیشکر شعیبیه، خوزستان) با استفاده از یک روش ترکیبی حا صل از تلفیق روش برآورد عدم قطعیت در ست‌نمایی تعمیم یافته (GLUE) با گونه یکپارچه سازی شده الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) انجام شد. نتایج حاکی از تغییرپذیری قابل توجه مقادیر رفتاری پارامترهای واسنجی و ضرورت ارزیابی عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل SWAP بود. وجود ضرایب همبستگی قوی بین مجموعه پارامترهای رفتاری، مبین ضرورت واسنجی هم‌زمان پارامترهای مختلف مدل به‌ازای داده‌های اندازه‌گیری شده معیار متنوع بود. محدوده‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی (رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی)، انتقال املاح (نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب) و بیوفیزیکی (شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز) به ترتیب، بین ۸۰-۷۳٪، ۵۸-۴۵٪ و ۱۰۰-۷۵٪ از کل داده‌های اندازه‌گیری شده (مشمول بر هر دو مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی) را با r-factor (نسبت متوسط ضخامت محدوده 95PPU به انحراف معیار داده مشاهداتی متناظر آن) بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۸، ۱/۴۳ تا ۱/۹۶ و ۰/۷۵ تا ۱/۱۱ در بر گرفتند. میزان ضخامت محدوده 95PPU محاسباتی برای شبیه‌سازی‌های بیوفیزیکی در طول دوره شبیه‌سازی دارای روندی افزایشی بود.

واژه‌های کلیدی: برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته، بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه، پارامترهای هیدرولوژیکی خاک،

شوری خاک

رایج‌ترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت در کاربردهای مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته^۱ (GLUE) (بی‌ون و بینلی، ۱۹۹۲) است. در روش GLUE، اثر تمامی منابع عدم قطعیت مورد اشاره در برآورد عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل لحاظ شده و این روش، فاقد فرضیات آماری سخت (که کاربرد روش را به شرایط خاصی محدود می‌کنند) است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸).

در روش GLUE، با تعریف یک تابع توزیع احتمال پیشین برای هر یک از پارامترهای مجهول مدل و از طریق اجرای شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو با یک حجم نمونه از پیش تعیین شده، نسبت به نمونه‌گیری تصادفی از فضای پارامترهای مجهول مدل (فضای شکل یافته از دامنه تغییرات مجاز پارامترهای مجهول در واسنجی مدل) اقدام می‌شود. سپس، مدل شبیه‌سازی به‌ازای هر یک از دسته پارامترهای نمونه‌گیری شده اجرا شده و شبیه‌سازی‌های متناظر با هر دسته پارامتر تولید می‌شود. با انتخاب یک معیار درست‌نمایی مانند ضریب کارایی مدل (رابطه (۴)) و تعیین یک مقدار آستانه‌ای برای آن، شبیه‌سازی‌های قابل قبول و غیرقابل قبول مدل (که به ترتیب، به شبیه‌سازی‌های رفتاری و غیررفتاری معروف هستند) از یکدیگر متمایز می‌شوند. در ادامه، با اطلاق یک وزن درست‌نمایی w_i (رابطه (۱)) به هر یک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده، تابع توزیع احتمال شبیه‌سازی‌های رفتاری (که به توزیع پسین معروف است) اشتقاق یافته و از طریق آن، کران‌های عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل در قالب صدک‌های توزیع پسین محاسبه می‌شود (عباسپور، ۲۰۰۸):

$$w_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{i=1}^M L(\theta_i)} \quad (1)$$

که در آن:

w_i وزن درست‌نمایی مربوط به دسته پارامتر رفتاری i ام، $L(\theta_i)$ معیار درست‌نمایی متناظر با دسته پارامتر رفتاری θ_i و M تعداد کل دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده است.

نتایج شبیه‌سازی‌های مدل‌های شبیه‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی تعیینی همواره تحت تاثیر منابع مختلف عدم قطعیت، شامل عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل شبیه‌سازی، پارامترهای مجهول مدل، داده‌های ورودی، شرایط اولیه و مرزی و نیز داده‌های مورد استفاده در واسنجی و صحت‌یابی مدل قرار قرار دارد (بی‌ون، ۲۰۰۶). از این رو، ارزیابی درجه عدم قطعیت نتایج مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی اهمیت پیدا می‌کند (وسلینگ و همکاران، ۲۰۲۰a). عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل شبیه‌سازی با فرضیات ساده‌سازی اتخاذ شده در توسعه مدل، شرایط اولیه و مرزی انتخابی، نحوه منفصل‌سازی معادلات دیفرانسیلی در حوزه زمان/مکان و روش حل عددی مورد استفاده در مدل مرتبط است. عدم قطعیت پارامترهای مدل ناشی از این حقیقت است که مدل‌های شبیه‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی دارای تعداد قابل توجهی از پارامترهای مجهول هستند که به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نبوده و با خطایی نامعلوم برآورد می‌شوند (گورگوگیون و همکاران، ۲۰۱۹). این امر منجر به چالش‌های غیریکتایی پارامترهای مجهول برآورد شده از طریق فرآیند واسنجی خواهد شد. به‌گونه‌ای که در این شرایط، فرآیند واسنجی پارامترهای مجهول مدل به یک جواب منحصر به فرد ختم نشده و ترکیبات مختلفی از مقادیر پارامترهای مجهول به عملکرد قابل قبول مدل شبیه‌سازی در بازسازی داده‌های واسنجی می‌انجامد (بی‌ون، ۲۰۰۶).

روش‌های تحلیل عدم قطعیت به‌عنوان راهکاری برای ارزیابی اثر منابع مختلف عدم قطعیت یاد شده بر عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل به‌شمار می‌روند. این روش‌ها به‌لحاظ فرضیات آماری اتخاذ شده در توسعه آنها، منابع عدم قطعیت قابل کمی‌سازی از طریق روش ارائه شده، حجم محاسبات مورد نیاز و سهولت به‌کارگیری و پیاده‌سازی آنها با یکدیگر متفاوت هستند. یکی از

یکی از کاستی‌های روش GLUE آن است که مشخص‌سازی سراسر نواحی رفتاری فضای پارامترها (که به رویه تابع در دستنمایی معروف است) نیازمند انتخاب یک حجم نمونه‌گیری بالا از فضای پارامترهای مدل است. از سوی دیگر، تعیین حجم نمونه مورد نیاز نیز یکی دیگر از چالش‌های کاربرد این روش بوده و عملاً، مقدار آن بر اساس معیارهای ادراکی انتخاب می‌شود (بی‌ون، ۲۰۰۶). همین‌طور، به دلیل آن که در اغلب موارد، تابع توزیع احتمال پیشین پارامترها، خود مجهول بوده و اطلاعاتی در خصوص آن در دست پژوهشگران نیست، معمولاً از تابع توزیع احتمال یک‌نواخت به‌عنوان تابع توزیع احتمال پیشین پارامترها استفاده می‌شود. این امر به معنای جستجوی کورکورانه فضای پارامترها است؛ بنابراین، در نتیجه نمونه‌گیری‌های کاملاً تصادفی از فضای پارامترها، تعداد قابل توجهی از دسته پارامترهای نمونه‌گیری شده به شبیه‌سازی‌های رفتاری ختم نشده و لذا، نتایج آنها در گام‌های بعدی محاسبات عدم قطعیت فاقد کاربرد خواهد بود (موگانتن و شومیکر، ۲۰۰۶). بدین ترتیب، اشتقاق تمامی دسته پارامترهای رفتاری مورد نیاز به‌منظور دستیابی به برآوردی هرچه معتبرتر از عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل تضمین شده نخواهد بود. در این شرایط، تنها راهکار برای دستیابی به برآوردهای هرچه واقع‌بینانه‌تر از عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل، افزایش تعداد نمونه‌گیری‌ها از فضای پارامترها است که این امر افزایش دفعات اجرای مدل و لذا، افزایش مفراط حجم محاسبات را در پی خواهد داشت (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). تا جایی که این کاستی روش GLUE یکی از محدودیت‌های کاربرد آن در مورد مدل‌های شبیه‌سازی با حجم محاسباتی بالا به‌شمار می‌رود. الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی با دارا بودن قابلیت پیاده‌سازی یک جستجوی احتمالاتی، سراسری و در عین حال هدفمند فضای پارامترها، قادر به یافتن نواحی رفتاری و نیز جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس با یک هزینه محاسباتی به مراتب معقول‌تر از GLUE هستند. به‌همین دلیل، تلفیق روش GLUE با

روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌عنوان راهکاری برای بهینه‌سازی حجم محاسبات تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی مورد توجه واقع شده است (موگانتن و شومیکر، ۲۰۰۶؛ تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸؛ عباسپور، ۲۰۰۸؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲). در این رویکرد، نواحی رفتاری فضای پارامترها به جای نمونه‌گیری‌های کاملاً تصادفی از طریق یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مورد جستجو قرار گرفته و سایر مراحل محاسبات عدم قطعیت مشابه روش اصلی GLUE است. نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در این رابطه، حاکی از برتری روش‌های تلفیقی بر روش اصلی GLUE بوده و این برتری با افزایش تعداد پارامترهای مجهول مدل به‌شدت نمود می‌یابد (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). تا جایی که موگانتن و شومیکر (۲۰۰۶) با تلفیق GLUE و یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی و به‌کارگیری آن برای تحلیل عدم قطعیت یک مدل جریان آب زیرزمینی نشان دادند که روش ترکیبی ارائه شده علاوه بر قابلیت یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس، در یافتن نواحی رفتاری فضای پارامترهای واسنجی مدل نسبت به روش GLUE برتر داشت. این برتری حتی با ۱۰ برابر کردن حجم نمونه‌گیری‌های مورد استفاده در روش GLUE نسبت به روش ترکیبی همچنان باقی بود.

بنابراین، با توجه به قابلیت‌های به اثبات رسیده رویکردهای ترکیبی فوق در تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل‌های ریاضی حجیم، به‌نظر می‌رسد که تلفیق روش GLUE با یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی گزینه مناسبی برای آنالیز عدم قطعیت مدل‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی با صرف یک هزینه محاسباتی معقول باشد. طی پژوهشی، پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) با کاربرد نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP (کروز و همکاران، ۲۰۱۷)، یک طرح مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروزانه را توسعه دادند. چارچوب توسعه یافته به‌منظور مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی یک مزرعه نیشکر با زهکشی

زیرزمینی کنترل شده در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، خوزستان با موفقیت مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج حاکی از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب مدل در (۱) شبیه‌سازی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی (با آماره ضریب کارایی مدل، EF، به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۳، ۰/۹۲ و ۰/۸۶ طی مرحله واسنجی و آماره EF به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۸، ۰/۷۸ و ۰/۷۱ طی مرحله صحت‌یابی)، (۲) شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (با آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده، NRMSE، به‌ترتیب، برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۸ در مرحله واسنجی و آماره NRMSE به‌ترتیب، برابر با ۰/۱۵ و ۰/۰۷ طی مرحله صحت‌یابی) و (۳) شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز (با آماره EF به‌ترتیب، برابر با ۰/۹۹۷، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۸۸ در مرحله واسنجی) بود. هدف از پژوهش حاضر، تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته در پژوهش فوق از طریق تلفیق GLUE با گونه یکپارچه الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) (پاراسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴) بوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: پژوهش حاضر در یکی از مزارع (مزرعه B1115) تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، بین طول جغرافیایی $48^{\circ}37'$ تا $48^{\circ}50'$ شرقی و عرض جغرافیایی $31^{\circ}37'$ تا $32^{\circ}00'$ شمالی) و با استفاده از بانک اطلاعات مزرعه‌ای گردآوری شده توسط صادقی لاری (۱۳۹۱) صورت گرفت. مزرعه مطالعاتی مجهز به زهکش زیرزمینی آزاد (با متوسط عمق کارگذاری ۲/۱ متر، طول ۸۴۵ متر و به‌فواصل تقریبی ۷۵ متر از یکدیگر) است که طی بخشی از دوره رشد گیاه (از اردیبهشت تا آبان ماه ۱۳۹۰) تحت سامانه زهکشی کنترل شده با عمق کنترل

سطح ایستابی ۹۰ سانتی‌متر قرار گرفت. کشت قلمه‌های نیشکر در مزرعه مطالعاتی در شهریور ماه ۱۳۸۹ انجام شد. **برپاسازی مدل برای مزرعه مطالعاتی:** دوره شبیه‌سازی برای مزرعه مورد مطالعه یک دوره کامل رشد کشت اول گیاه نیشکر (به مدت ۴۸۱ روز) را در بر می‌گرفت. ستون خاک در نظر گرفته شده برای مزرعه مطالعاتی دارای عمق ۵۵۰ سانتی‌متر (معادل با عمق وقوع لایه محدود کننده) و مشتمل بر دو لایه خاک متمایز بود (جدول ۱). مقادیر ۱۵ دقیقه‌ای تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی گیاه نیشکر با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه مزرعه نمونه منطقه مطالعاتی و چارچوب ریزمقیاس‌سازی اطلاعات هواشناسی (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴ ب) و ویرایش تصحیح شده مدل پنمن-مانتیث ASCE برای منطقه مطالعاتی (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴ الف) برآورد شد.

به‌دلیل وسعت قابل توجه مزرعه مطالعاتی (حدود ۲۱ هکتار) و ناهمگنی مکانی برنامه‌ریزی آبیاری اعمال شده در سطح مزرعه، مدل SWAP با تعریف ۱۰ واحد شبیه‌سازی همگن (موسوم به هیدروتوپ) به شیوه توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت. به‌منظور در نظر گرفتن زمان‌های اعمال رویدادهای آبیاری طی ساعات شبانه‌روز، رویدادهای آبیاری محقق شده در مزرعه به‌صورت داده‌های زیرروزانه به مدل معرفی شد.

شرط مرزی پایین‌دست در مدل SWAP
به صورت مقادیر از پیش تعیین شده جریان از کف نیم‌رخ خاک با میزان شوری معین تعریف شد. برای این منظور، میزان جریان از کف در پنج مقطع زمانی طی دوره شبیه‌سازی (با فواصل زمانی یکسان) از طریق مدل‌سازی معکوس و در مورد سایر گام‌های زمانی دیگر از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد شد. میزان شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیم‌رخ خاک، هریک به‌عنوان یک پارامتر مجهول یکتا از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. به‌منظور مدل‌سازی سامانه زهکشی

مطالعاتی توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) تشریح شده است.

تحلیل عدم قطعیت مدل: در این بررسی، با

برنامه‌نویسی فرتون و ++C چندپردازشی و تلفیق روش GLUE با الگوریتم UPSO یک طرح تحلیل عدم قطعیت ترکیبی توسعه یافت. طرح توسعه یافته با کد منبع تصحیح شده‌ای از مدل SWAP (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۹) یکپارچه سازی شد. فرآیند واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، با در نظر گرفتن مجموعاً، ۴۵ پارامتر مجهول (جدول ۳) صورت گرفت. دامنه تغییرات مجاز پارامترهای مجهول مدل بر اساس منابع علمی (شاپ و لیژ، ۱۹۹۸؛ کروز و همکاران، ۲۰۱۷) و مشاهدات مزرعه‌ای تعیین شد (جدول ۳). کران پایین دامنه تغییرات مجاز پارامتر رطوبت اشباع، θ_{sat} ، بر اساس حداکثر مقدار رطوبت حجمی مشاهده شده تعیین شد. فرآیند واسنجی پارامترهای مجهول مدل به‌ازای ۳۰۰ ذره (دو برابر تعداد ذرات در نظر گرفته شده در پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹)) و ۴۵۰ تکرار (با احتساب ۱۰ هیدروتوپ در نظر گرفته شده، مجموعاً، ۱/۳۵ میلیون مرتبه اجرای مستقل مدل SWAP) انجام شد. مجموعه داده‌های مورد استفاده در واسنجی و صحت سنجی مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در جدول ۲ ارائه شده است. از مجموع وزنی آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده (NRMSE، رابطه (۳)) حاصل از مقایسه مقادیر هریک از مجموعه داده‌های واسنجی با داده‌های شبیه‌سازی شده با ضرایب وزنی یکسان به‌عنوان تابع برازش مساله مدل‌سازی معکوس تک‌هدفه استفاده شد. پس از اجرای مدل به‌ازای هریک از دسته پارامترهای تولید شده از طریق طرح ترکیبی GLUE-UPSو، عملکرد مدل در باز سازی داده‌های واسنجی با استفاده از آماره‌های NRMSE و ضریب کارایی مدل، EF، مورد ارزیابی قرار گرفت. آماره‌های فوق به‌شرح زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{m}} / \bar{O} \quad (3)$$

از رویکرد زهکشی چند گانه مبتنی بر مفهوم مقاومت زهکشی (کروز و همکاران، ۲۰۱۷) استفاده شد.

مزرعه مطالعاتی علاوه بر دارا بودن سامانه زهکشی زیرزمینی، در مجاورت یک زهکش جمع‌کننده روباز نیز قرار داشت؛ بنابراین، در فرآیند مدل سازی، یک سامانه زهکشی زیرزمینی و یک سامانه زهکشی سطحی (با ویژگی‌های یکسان برای هر ۱۰ هیدروتوپ) در نظر گرفته شد. زه آب خروجی از هر هیدروتوپ از طریق رابطه ساده زیر روندیابی شد:

$$T_{iHdrt}^{delay} = \frac{L_{outlet}^{iHdrt}}{\text{Max}\{L_{outlet}^{iHdrt}\}_{iHdrt=1}} \quad (2)$$

که در آن:

L_{outlet}^{iHdrt} و T_{iHdrt}^{delay} به ترتیب، طول مسیر (متر) و زمان تاخیر (ساعت) رسیدن زه آب خروجی از هیدروتوپ $iHdrt$ ام به نقطه خروجی، T_c متوسط زمان انتقال زه آب به خروجی سیستم زهکشی (ساعت) و $nHdrt$ بیانگر تعداد هیدروتوپ‌های متصل به نقطه خروجی مورد نظر است.

مدل سازی انتقال املاح با لحاظ کردن دو فرآیند انتقال توده‌ای و جذب سطحی املاح (مبتنی بر ایزوترم جذب خطی) صورت گرفت. به‌منظور شبیه سازی رشد گیاه نیشکر و عملکرد محصول از مدل گیاهی WOFOST (سوویت و همکاران، ۱۹۹۴) استفاده شد. پارامترهای حساس این مدل بر اساس پژوهش‌های مشابه گذشته (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۳) شناسایی شد و مقادیر آن‌ها از طریق مدل سازی معکوس برآورد شد (جدول ۳). با توجه به طولانی بودن دوره رشد و توسعه گیاه نیشکر (حدود ۱۵ ماه) مقادیر پارامترهای گیاهی A_{max} و SLA (جدول ۳) هریک در نه مقطع از دوره رشد گیاه (با فواصل مساوی و به‌عنوان تابعی از مجموع دما) از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر ایام از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد شد. جزئیات بیشتر در خصوص روش شناسایی برپاسازی مدل برای مزرعه

از مقادیر تابع برازش مساله مدل سازی معکوس محاسباتی برای هر یک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده به عنوان معیار درست‌نمایی در محاسبه وزن‌های درست‌نمایی (رابطه (۱)) استفاده شد. وزن‌های درست‌نمایی محاسبه شده به منظور تعیین محدوده‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) برای به هر یک از سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده داده‌های واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. محدوده‌های عدم قطعیت اشتقاق یافته با استفاده از آماره‌های p-factor و r-factor مورد ارزیابی قرار گرفت (عباسپور، ۲۰۰۸):

$$p - factor = \frac{100 \left| \{O_i | P_i^{2.5\%} \leq O_i \leq P_i^{97.5\%}; i=1,2,\dots,m\} \right|}{m} \quad (5)$$

$$r - factor = \frac{\sum_{i=1}^m (P_i^{97.5\%} - P_i^{2.5\%})}{m \sigma_{obs}} \quad (6)$$

که در آن‌ها:

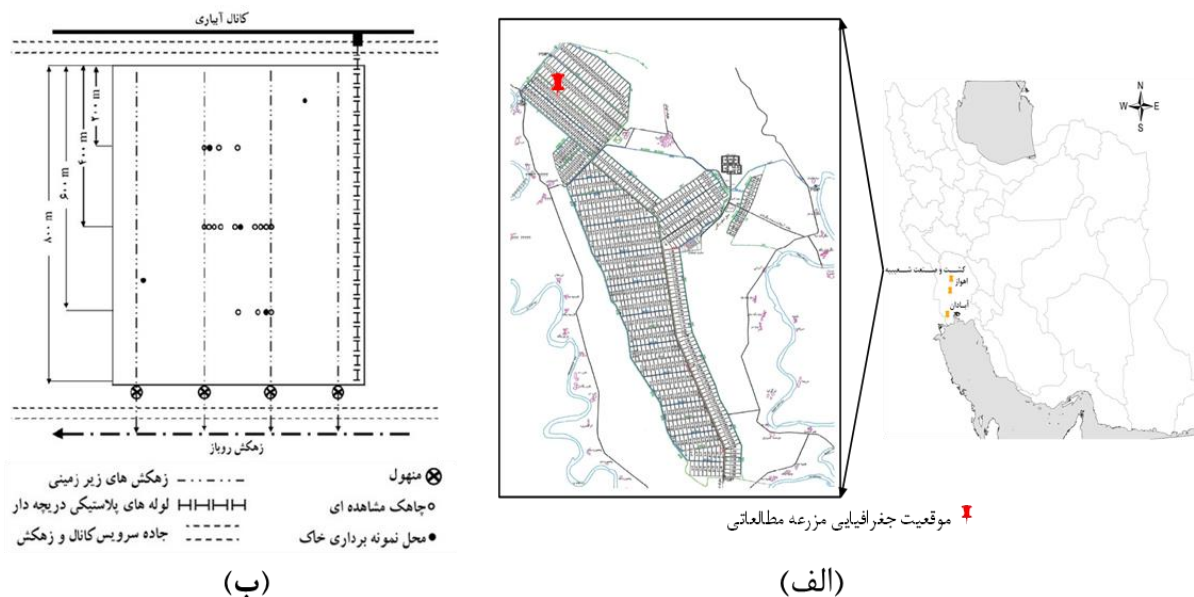
$P_i^{97.5\%}$ و $P_i^{2.5\%}$ به ترتیب، کران‌های پایین و بالای محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) و σ_{obs} انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است. آماره p-factor بیانگر درصدی از داده‌های اندازه‌گیری شده واقع در محدوده 95PPU است. آماره r-factor بیانگر نسبت متوسط ضخامت محدوده 95PPU به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده است (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸). در شرایط ایده‌آل، مقدار آماره‌های p-factor و r-factor به ترتیب، برابر با ۱۰۰ درصد و صفر است.

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^m (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (4)$$

که در آن‌ها:

O مقدار اندازه‌گیری شده، P مقدار شبیه‌سازی شده و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و m تعداد مقایسه‌ها است. مقادیر آماره NRMSE در دامنه ۰/۰۰ تا ۰/۱۰، ۰/۱۰ تا ۰/۲۰، ۰/۲۰ تا ۰/۳۰ و بزرگتر از ۰/۳۰ به ترتیب، به عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده معیار در نظر گرفته می‌شود (لوگ و گرین، ۱۹۹۱). مقادیر آماره ضریب کارایی مدل در دامنه ۰/۸ تا ۱/۰، ۰/۷ تا ۰/۸، ۰/۵ تا ۰/۷ و کوچکتر از ۰/۵ به ترتیب، به عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده معیار در نظر گرفته می‌شود (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷).

پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که در صورت بروز تناقض در ارزیابی عملکرد مدل بر اساس آماره‌های EF و NRMSE، ملاک قرار دادن این دو آماره به ترتیب، برای قضاوت در خصوص عملکرد مدل در بازسازی داده‌های واسنجی با واریانس بالا و واریانس پایین نسبت به دیگری دارای ارجحیت است؛ بنابراین، به منظور متمایز ساختن دسته پارامترهای رفتاری و غیررفتاری از یکدیگر، دسته پارامتری که شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با استفاده از آن تمامی معیارهای وضع شده در جدول ۲ را به طور هم‌زمان برآورده ساخت، به عنوان یک دسته پارامتر رفتاری در نظر گرفته شد. درجه حساسیت تابع برازش نسبت به هر یک از پارامترهای واسنجی مدل با استفاده از آماره ضریب تغییرات (CV) محاسبه شده برای مجموعه پارامترهای رفتاری مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر آماره ضریب تغییرات (CV) کوچکتر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد و بزرگتر از ۷۵ درصد به ترتیب، به عنوان تغییرپذیری ناچیز، بینابینی و تغییرپذیری بالای کمیت مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود (یوان‌ای‌بی، ۲۰۱۵).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزرعه مطالعاتی (الف) و سیمای سیستم آبیاری و زهکشی در مزرعه مطالعاتی (ب)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نیم‌رخ خاک مزرعه مطالعاتی

عمق (cm)	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم ویژه ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	کربن آلی (%)	آهک (%)	pH (-)	شوری عصاره اشباع ($dS\ m^{-1}$)
۰-۳۰	لوم رسی-سیلتی	۱۳/۰۰	۵۱/۰۰	۳۶/۰۰	۱/۶۲	۱/۶۸	۴۰/۷۶	۷/۶۴	۲/۳۰
> ۳۰	لوم رسی-سیلتی	۱۳/۶۷	۴۸/۶۷	۳۷/۶۷	۱/۶۲	۰/۸۵	۴۳/۹۶	۷/۷۸	۱/۷۸

جدول ۲- مجموعه داده‌های مورد استفاده در فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی و معیارهای تعریف شده شناسایی شبیه‌سازی‌های رفتاری

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

نتایج و بحث

مقادیر بهینه‌سازی شده پارامترهای مجهول لحاظ شده برای واسنجی مدل به همراه آماره‌های توصیفی مربوط به مجموعه پارامترهای رفتاری حاصل از طرح تحلیل عدم قطعیت GLUE-UPS0 (حاوی تعداد ۵۹۴۳ دسته پارامتر رفتاری منحصر به فرد) در جدول ۳ ارائه شده است. حصول نتایج مشابه با پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) برای مقادیر بهینه پارامترهای مجهول مدل نشان دهنده قابلیت بالای الگوریتم UPS0 در جستجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس است. بر اساس ضریب تغییرات مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک (جدول ۳)، پارامترهای α و K_{sat} در مقایسه با پارامترهای n و θ_{sat} از تغییر پذیری بالاتری برخوردار بوده‌اند. بر این اساس، می‌توان مطرح نمود در مقایسه با پارامترهای n و θ_{sat} ، تابع برازش مدل‌سازی معکوس از حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای α و K_{sat} برخوردار بوده است. در این رابطه، نتایج مشابهی در پژوهش‌های مرتبط گذشته گزارش شده است (هورکمپ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲؛ شفیع و همکاران، ۲۰۱۴).

به عنوان نمونه، اندرکنش مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی دو لایه خاک لحاظ شده در مدل SWAP در شکل ۲ ارائه شده است. این شکل حاکی از غیریکتایی مشهود مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک است که این نتیجه با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های مشابه گذشته (بینلی و بی‌ون، ۲۰۰۳؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲؛ شفیع و همکاران، ۲۰۱۴؛ وسلینگ و همکاران، ۲۰۲۰b)؛ انطباق دارد. نحوه پراکنش مقادیر رفتاری پارامتر θ_{sat} در محدوده تغییرات مجاز و ضعیف شده (شکل ۲) حاکی از آن است که وضع کران پایین تغییرات مجاز پارامتر θ_{sat} بر اساس حداکثر مقدار رطوبت خاک مشاهداتی در کاهش عدم قطعیت برآورد این پارامتر موثر بوده است. در این مطالعه، دامنه تغییرات مجاز سایر

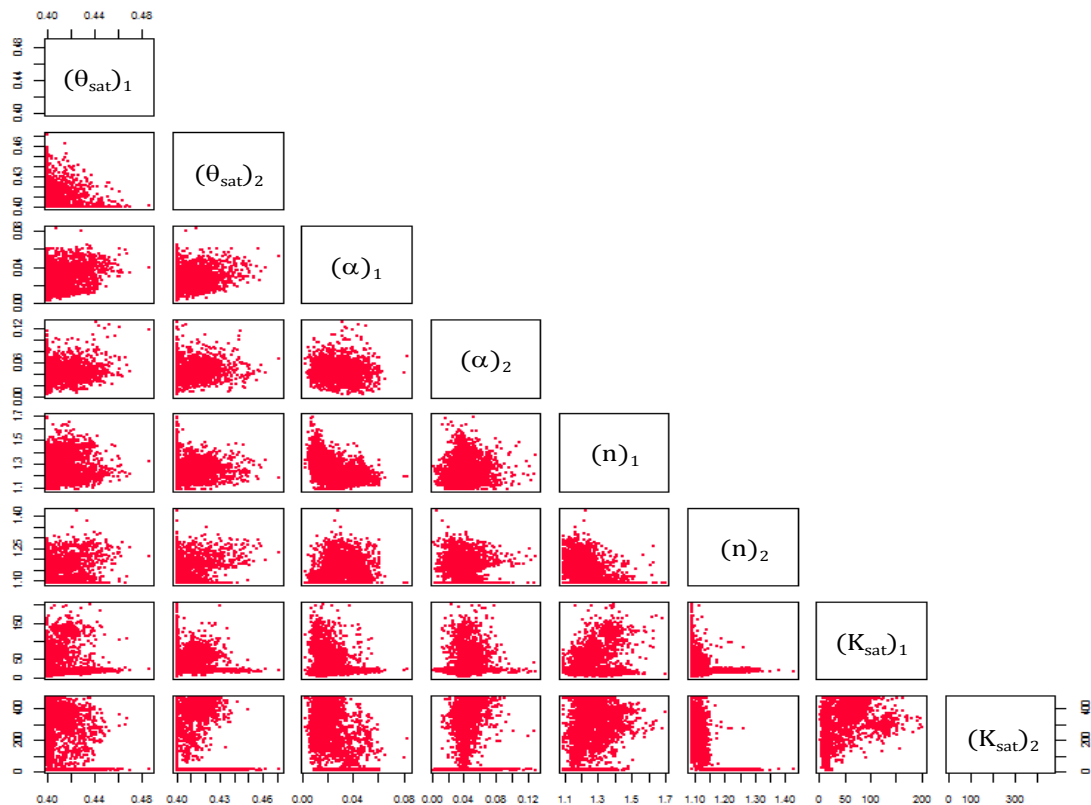
پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد بررسی با در نظر گرفتن دامنه تغییرات مجاز فیزیکی آن‌ها بر اساس بانک اطلاعات خاک گردآوری شده توسط شاپ و لیژ (۱۹۹۸) تعیین شد. این امر مبین اهمیت استفاده از داده‌های مشاهداتی در کاهش عدم قطعیت پارامترهای برآورد شده و در نتیجه شبیه‌سازی‌های مدل است.

در مقایسه با لایه خاک زیرسطحی، مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی لایه سطحی خاک از تغییر پذیری کمتری برخوردار بوده‌اند (جدول ۳). یکی از دلایل این امر را می‌توان به داده‌های رطوبت خاک مورد استفاده در واسنجی مدل نسبت داد که تنها بخش‌های سطحی نیم‌رخ خاک (عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متری) را در بر می‌گرفتند. همچنین، رطوبت خاک شبیه‌سازی شده برای این محدوده، مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت املاح آب خاک و متغیرهای بیوفیزیکی را متاثر می‌سازد

جدول ۳- مقادیر دامنه تغییرات مجاز، بهترین برآورد پارامترهای واسنجی و آماره‌های توصیفی مجموعه پارامترهای رفتاری برای مدل توسعه یافته در مزرعه مطالعاتی.^(*)

پارامترهای رفتاری				پارامترهای رفتاری							
شرح	پارامتر	دامنه تغییرات مجاز (حداکثر - حداقل)	مقدار بهینه	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)	شرح	پارامتر	دامنه تغییرات مجاز (حداکثر - حداقل)	مقدار بهینه	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)
پارامترهای هیدرولیکی خاک	$(\theta_{sat})_1$	۰/۴۰ - ۰/۵۴۰	۰/۴۰۴	۰/۴۰۸	۲/۶	پارامترهای گیاهی	$(\theta_{sat})_2$	۰/۴۰ - ۰/۵۴۰	۰/۴۰۰	۰/۴۰۵	۲/۲
	$(\alpha)_1$	۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۳۵	۰/۰۲۳	۵۲/۸		$(\alpha)_2$	۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۴۲	۰/۰۴۵	۲۵/۴
	$(n)_1$	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۱۴۰	۱/۲۶۷	۸/۳		$(n)_2$	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۱۲۴	۱/۱۵۳	۴/۰
	$(K_{sat})_1$	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۲۰/۰۰۵	۳۳/۶۷۵	۹۶/۳		$(K_{sat})_2$	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۲۲۷/۰۷۶	۱۳/۴۳۳	۷۶/۳
	$(q_{Bot})_1$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۵	۳۵/۵		$(q_{Bot})_2$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳	۳۵/۸
	$(q_{Bot})_3$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۴۱/۱		$(q_{Bot})_4$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	۵۴/۸
	$(q_{Bot})_5$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	۷۸/۵		$(D_{dis})_1$	۰/۵۰۰ - ۶۵/۰۰۰	۳۰/۱۰۷	۲۹/۵۱۸	۳۰/۲
	$(D_{dis})_2$	۰/۵۰۰ - ۶۵/۰۰۰	۴۵/۴۰۸	۴۰/۵۴۲	۱۷/۶		$(K_f)_1$	۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۲۶/۲۸۹	۲۹/۶۳۰	۵۱/۵
	(C_{gw1})	۱/۳۰۰ - ۳/۵۰۰	۲/۰۴۰	۲/۵۰۴	۱۷/۹		$(K_f)_2$	۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۳۹/۱۶۸	۲۹/۶۳۰	۸۴/۰
	C_{Bot}	۱/۳۰۰ - ۵/۵۰۰	۴/۶۹۶	۳/۹۱۴	۲۲/۱		γ_{drain}	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۱۷۲/۱۳۳	۱۷۲/۱۳۳	۸/۲
	γ_{drain2}	۱۰۰۰/۰۰۰ - ۱۰۰۰۰/۰۰۰	۴۸۷۴/۸۱۵	۴۲۴۰/۹۷۶	۳۵/۲		$\gamma_{drain, Ctrl}$	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۱۰۴/۳۶۸	۱۰۴/۳۶۸	۷/۹
	T_c	۰/۸۰۰ - ۲/۰۰۰	۱/۴۹۸	۱/۷۲۳	۱۲/۶						
	$(A_{max})_1$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۰/۰۵۷	۱۸/۵۷۴	۹۹/۷		$(A_{max})_2$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۱۵/۷۵۲	۱۵/۷۵۲	۳۲/۸
	$(A_{max})_3$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۵/۶۳۱	۱۴/۶۹۹	۱۳۱/۲		$(A_{max})_4$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۷۷/۳۵۲	۷۷/۳۵۲	۱۸/۴
	$(A_{max})_5$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۶۶/۲۸۵	۷۲/۳۲۱	۱۱/۴		$(A_{max})_6$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۳۶/۳۴۷	۳۶/۳۴۷	۶۸/۳
	$(A_{max})_7$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۵۵/۹۱۹	۲۳/۷۴۶	۱۱۲/۵		$(A_{max})_8$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۱/۰۷۷	۴۱/۰۷۷	۱۰۴/۷
	$(A_{max})_9$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۱/۰۳۹	۳۴/۷۲۱	۱۰۱/۴						

^(*) در جدول فوق، θ_{sat} رطوبت خاک در حالت اشباع ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، α (cm^{-1})، n (بدون بعد)، m (بدون بعد)، λ (بدون بعد) ضرایب شکل، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع (cm d^{-1}) مورد استفاده در مدل‌های معلم و ون گنوختن، D_{dis} و K_f به ترتیب، ضریب انتشارپذیری (cm)، ضریب ایزوترم جذب خطی ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)، q_{Bot} جریان از کف (cm d^{-1})، C_{Bot} شوری جریان از کف (mg cm^{-3})، γ_{drain1} ، γ_{drain2} و T_c به ترتیب، مقاومت زهکشی سیستم زیرزمینی (d)، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی روباز و زمان تاخیر رسیدن زه‌آب به خروجی C_{gw} ، (h) شوری آب زیرزمینی (mg cm^{-3})، T_{SUMAM} ، T_{SUMEA} ، RGR_LAI ، SLA و A_{max} به ترتیب، بیانگر مجموع دما از مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی ($^{\circ}\text{C}$)، مجموع دما از مرحله گل‌دهی تا بلوغ ($^{\circ}\text{C}$)، حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)، سطح ویژه برگ (ha kg^{-1})، حداکثر شدت جذب دی‌اکسید کربن ($\text{kg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) و راندمان مصرف نور در یک برگ منفرد ($\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1} / \text{J m}^2 \text{s}^{-1}$) است.



شکل ۲- ماتریس نمودارهای پراکنش مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک (جدول ۳)، حاوی ۵۹۴۳ دسته پارامتر رفتاری منحصر به فرد

جدول ۴- آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه‌سازی^(*)

آماره ارزیابی				CV	M	مجموعه داده	داده معیار اندازه‌گیری شده
r-factor	p-factor	EF	NRMSE				
۰/۹۳	۸۲	۰/۸۲۹	۰/۰۲۹	۷	۱۷	واسنجی	رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
۱/۱۸	۷۷	۰/۸۷۷	۰/۰۳۷	۱۰	۱۳	صحت‌سنجی	
۰/۹۸	۸۰	۰/۸۷۵	۰/۰۳۲	۹	۳۰	کل مجموعه داده	
۰/۶۲	۶۶	۰/۹۲۲	۰/۱۷۰	-۶۱	۹۸	واسنجی	عمق سطح ایستابی (cm)
۱/۱۶	۷۹	۰/۷۸۱	۰/۲۱۷	-۴۶	۱۲۲	صحت‌سنجی	
۰/۸۳	۷۳	۰/۸۷۷	۰/۱۹۴	-۵۵	۲۲۰	کل مجموعه داده	
۰/۶۹	۷۵	۰/۸۵۷	۰/۲۱۸	۵۸	۸۱	واسنجی	جریان زه‌آب خروجی (cm d^{-1})
۰/۹۹	۷۱	۰/۷۱۲	۰/۲۸۵	۵۳	۱۲۹	صحت‌سنجی	
۰/۸۷	۷۳	۰/۷۷۴	۰/۲۶۱	۵۵	۲۱۰	کل مجموعه داده	
۱/۸۷	۶۷	-۰/۳۹۹	۰/۱۲۴	۱۱	۱۲	واسنجی	نیمرخ غلظت املاح آب خاک (dS m^{-1})
۲/۲۶	۵۸	-۰/۶۵۳	۰/۱۵۲	۱۲	۱۲	صحت‌سنجی	
۱/۹۶	۵۸	-۰/۴۴۳	۰/۱۳۹	۱۲	۲۴	کل مجموعه داده	
۱/۰۰	۲۰	-۰/۴۳۳	۰/۰۹۱	۸	۱۵	واسنجی	شوری زه‌آب (dS m^{-1})
۱/۹۷	۶۱	-۰/۰۸۸	۰/۰۸۴	۸	۲۳	صحت‌سنجی	
۱/۴۳	۴۵	-۰/۰۰۶	۰/۰۸۷	۹	۳۸	کل مجموعه داده	
۱/۱۱	۹۵	۰/۹۹۷	۰/۰۳۷	۶۴	۳۹	واسنجی	شاخص سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
۰/۷۵	۷۵	۰/۹۹۳	۰/۰۴۷	۵۷	۴	واسنجی	عملکرد نی (ton ha^{-1})
۰/۸۴	۱۰۰	۰/۹۸۸	۰/۰۶۵	۵۸	۴	واسنجی	عملکرد ساکارز (ton ha^{-1})

^(*) در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه‌گیری شده و m تعداد مشاهدات است

همان‌طور که از جدول ۳ قابل استنباط است، در مقایسه با پارامتر مقاومت زهکشی جمع‌کننده سطحی، $\gamma_{\text{drain}2}$ تابع هدف مدل‌سازی معکوس از حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای مقاومت زهکشی زیرزمینی در شرایط زهکشی آزاد و کنترل شده (به ترتیب، γ_{drain} و $\gamma_{\text{drain, Ctrl}}$) برخوردار بوده است. همچنین، محدود کردن دامنه تغییرات مجاز پارامتر T_c از طریق مشاهدات مزرعه‌ای، سبب عدم قطعیت پایین برآورد این پارامتر شده است.

همین‌طور، ضریب تغییرات مقادیر رفتاری پارامترهای گیاهی برآورد شده نیز حاکی از حساسیت قابل توجه اکثر پارامترهای لحاظ شده در تحلیل عدم قطعیت است. تغییرات مقادیر بهینه و درجه حساسیت پارامترهای S_{LA} و A_{max} در طول دوره رشد گیاه حاکی از اهمیت در نظر گرفتن مقادیر این پارامترها به عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه است. این در حالی است که در اکثر مطالعات مشابه، مدل بر اساس فرض یک مقدار یکتا برای پارامترهای فوق واسنجی شده است (وظیفه‌دوست و همکاران، ۲۰۰۸؛ لی و رن، ۲۰۱۹).

مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون در ماتریس همبستگی محاسبه شده برای پارامترهای رفتاری اشتقاقی از تحلیل عدم قطعیت مدل در دامنه بین ۰/۹۱- تا ۰/۹۱ متغیر بود. مقادیر مطلق ضریب همبستگی پیرسون در دامنه 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 به ترتیب، بیانگر وجود همبستگی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی بین دو متغیر مورد بررسی است (سلیمان‌نژاد، ۲۰۰۴). بر این اساس، حدود ۳۲/۷، ۲۸/۲، ۲۹/۳، ۹/۴ و ۰/۴ درصد از ضرایب مربوط به ماتریس همبستگی محاسبه شده به ترتیب، در کلاس‌های همبستگی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی قرار داشتند. این نتیجه بیانگر اندرکنش قابل توجه بین پارامترهای مورد بررسی در تحلیل عدم قطعیت مدل و توانایی طرح تحلیل عدم قطعیت توسعه یافته در جستجوی سراسری و متمرکز نواحی رفتاری فضای

از سوی دیگر، در نتیجه اثر آب زیرزمینی کم‌عمق، بخش عمده لایه زیرسطحی طی سراسر دوره شبیه‌سازی در حالت اشباع بوده و تغییرات زمانی اندک محتوای آب خاک در این ناحیه منجر به کاهش حساسیت پارامترهای مربوط به این لایه خاک شده است. ضریب تغییرات مقادیر رفتاری ترم‌های جریان از کف در جدول ۳ حاکی از کاهش تدریجی حساسیت آن‌ها در طول دوره شبیه‌سازی است. دلیل این امر را می‌توان به فعال شدن زهکشی کنترل شده و شدت یافتن رویدادهای آبیاری در دوره‌های میانی و انتهایی شبیه‌سازی و ناچیز شدن سهم این ترم در بیلان آب نسبت داد. از سوی دیگر، همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه‌سازی شده و میانگین مقادیر رفتاری ترم جریان از کف ستون خاک طی دوره زمانی غیرفعال بودن سامانه زهکشی زیرزمینی کنترل شده (دوره ابتدایی شبیه‌سازی) بیشتر از دوره زمانی فعال شدن زهکشی کنترل شده بوده است. این امر می‌تواند مبین نقش زهکشی کم‌عمق در کاهش جریان خروجی از زهکش‌های زیرزمینی و شدت مشکلات زیست‌محیطی آن‌ها باشد که توسط پژوهشگران متعددی مورد اشاره قرار گرفته است (جوانی جونی و همکاران، ۲۰۱۸).

در مقایسه با سایر پارامترهای انتقال املاح مورد بررسی در تحلیل عدم قطعیت، پارامتر ضریب انتشارپذیری برای لایه زیرسطحی خاک، $(D_{\text{dis}})_2$ ، از بیشترین حساسیت نسبت به تابع هدف مساله مدل‌سازی معکوس برخوردار بوده است (جدول ۳). دلیل این امر را می‌توان به تاثیر مقدار این پارامتر بر تبادل املاح بین بخش‌های اشباع و غیراشباع نیم‌رخ خاک و در نتیجه، تغییرات شوری عصاره اشباع خاک و زه‌آب خروجی، برداشت آب از طریق ریشه گیاه (و به تبع آن، متاثر شدن متغیرهای بیوفیزیکی و اجزای بیلان آب شبیه‌سازی شده) نسبت داد. ضریب تغییرات مقادیر رفتاری پارامترهای شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیز بیانگر حساسیت قابل توجه تابع هدف مساله مدل‌سازی معکوس نسبت به این دو پارامتر بوده است.

پارامترهای مجهول و آشکار ساختن اندرکنش بین پارامترهای مدل است.

آماره‌های مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر آماره EF حاکی از عملکرد بسیار خوب و خوب تا بسیار خوب مدل به ترتیب، در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی، جریان زه‌آب خروجی است. بر اساس مقدار این آماره، عملکرد مدل در بازسازی مجموعه داده واسنجی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز بسیار خوب ارزیابی می‌شود. مقادیر آماره NRMSE حاکی از عملکرد خوب تا بسیار خوب مدل در بازسازی هر دو مجموعه داده واسنجی و صحت‌سنجی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب است.

بر اساس مقادیر آماره p-factor (جدول ۴)، محدوده‌های 95PPU تعیین شده برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده مرتبط با مولفه هیدرولوژی مدل (شامل رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی) بین ۶۶ تا ۸۲ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و بین ۷۱ تا ۷۹ درصد از مجموعه داده‌های صحت‌سنجی را در بر گرفته‌اند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که اثر بخش عمده‌ای از منابع موثر بر عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مولفه‌های هیدرولوژی مدل در عدم قطعیت پارامترهای واسنجی نمود یافته است. مقادیر آماره r-factor (جدول ۴) مربوط به محدوده 95PPU به دست آمده برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده فوق برای مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌یابی به ترتیب، بین ۰/۶۲ تا ۰/۹۳ و ۰/۹۹ تا ۱/۱۸ متغیر بود. بر این اساس می‌توان مطرح نمود که در اغلب موارد، ضخامت محدوده‌های 95PPU به دست آمده برای شبیه‌سازی‌های مرتبط با مولفه هیدرولوژی مدل قابل قبول بوده است. بنابراین، در بر گرفته شدن بخش عمده مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در

محدوده‌های 95PPU به قیمت افزایش مفرط ضخامت این محدوده صورت نگرفته است.

این امر از شکل ۳ نیز که در آن مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی مولفه‌های هیدرولوژیکی و بیوفیزیکی مدل به همراه محدوده‌های 95PPU متناظر با هریک ارائه شده است نیز قابل استنباط است. این نتیجه، بیانگر سطح قابل قبول عدم قطعیت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی صورت گرفته از طریق مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی و نیز عملکرد رضایت‌بخش چارچوب تحلیل عدم قطعیت توسعه یافته در کمی‌سازی اثرات بخش عمده‌ای از منابع عدم قطعیت بر شبیه‌سازی‌های مولفه هیدرولوژی مدل است.

بر اساس آماره p-factor (جدول ۴)، محدوده 95PPU مربوط به شبیه‌سازی‌های نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک به ترتیب، ۶۷ و ۵۸ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی را با آماره r-factor به ترتیب، برابر با ۱/۸۷ و ۲/۲۶ در بر گرفته است. در این مورد، دلیل اصلی حصول مقادیر بالای آماره r-factor ناشی از تغییرپذیری اندک مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت املاح آب خاک (جدول ۴) بوده است. این امر از شکل ۴ نیز قابل استنباط است. بر اساس این شکل، با افزایش عمق از سطح خاک، ضخامت محدوده 95PPU رو به کاهش نهاده است. همچنین، محدوده 95PPU مربوط به شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه به ترتیب، به میزان ۲۰ و ۶۱ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی را با آماره r-factor به ترتیب، برابر با ۱/۰۰ و ۱/۹۷ در بر گرفته است. به طور مشابه، دلیل اصلی حصول مقادیر نسبتاً بالای آماره r-factor برای شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه (مجموعه داده صحت‌سنجی) نیز ناشی از تغییرپذیری اندک مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر بوده است (جدول ۴). این امر از شکل ۴ نیز قابل استنباط است. مقادیر پایین آماره p-factor مربوط به شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب

شبهه سازی شده در مدل SWAP به صورت تجمعی در طول فصل رشد گیاه محاسبه می شود، محاسبات رشد و توسعه گیاه در مراحل آغازین و میانی رشد، می تواند طول دوره رشد گیاه و نیز میزان نهایی محصول تولیدی را متاثر نماید. این امر بیانگر اهمیت استفاده از اطلاعات گیاهی متنوع اندازه گیری شده در طول دوره رشد و توسعه گیاه در واسنجی پارامترهای گیاهی مدل باشد. این در حالی است که در اکثر پژوهش های مشابه صورت گرفته، پارامترهای مدل WOFOST، با استفاده صرف از داده های اندازه گیری شده عملکرد نهایی محصول تولیدی واسنجی شده است.

نتیجه گیری

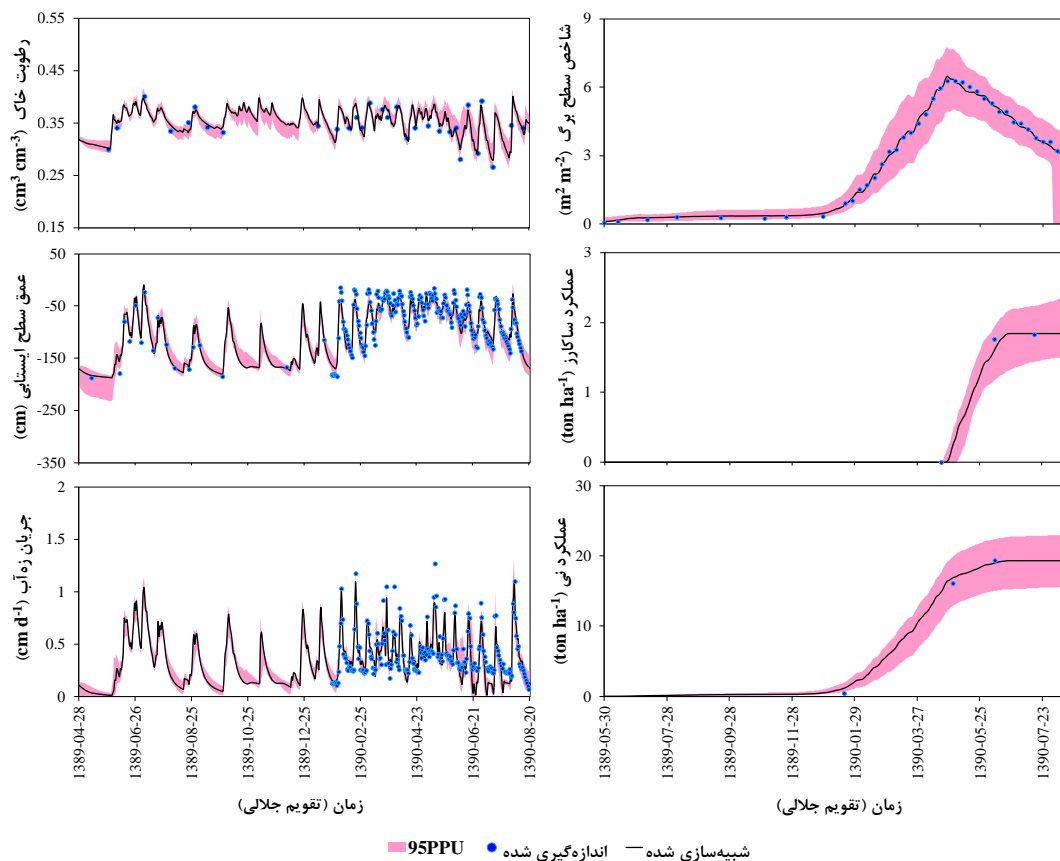
در پژوهش حاضر، عدم قطعیت شبهه سازی های توزیعی و زیرروزانه مدل SWAP برای یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی کنترل شده از طریق روش تلفیقی GLUE-UPSO مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، به منظور اطمینان بیشتر از جستجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول مدل (مشمول بر ۴۵ پارامتر) و بازتر شدن ویژگی اکتشاف الگوریتم UPSO، اندازه ازدحام مورد استفاده به دو برابر مقدار انتخابی در مطالعه پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) افزایش یافت. حصول نتایج مشابه با پژوهش فوق برای مقادیر بهینه پارامترهای مجهول مدل حاکی از قابلیت الگوریتم UPSO در جستجوی فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل سازی معکوس است. نتایج این مطالعه حاکی از غیریکتایی مشهود پارامترهای واسنجی شده و اهمیت تحلیل عدم قطعیت شبهه سازی های مدل SWAP و برآورد کران های عدم قطعیت پیش بینی های مدل بود. وجود همبستگی های قوی بین پارامترهای واسنجی شده مبین اهمیت واسنجی همه مولفه های مدل (هیدرولوژی، انتقال املاح/گرما و بیوفیزیکی) با استفاده از داده های واسنجی متنوع به صورت موازی و هم زمان به جای واسنجی هریک از مولفه های فوق بر اساس یک اسلوب ترتیبی است. چراکه در این شرایط، واسنجی ترتیبی

خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه، خصوصاً در مورد مجموعه داده های واسنجی حاکی از وجود محدودیت در انعکاس یافتن اثر منابع مختلف عدم قطعیت شبهه سازی این کمیت در پارامترهای مجهول مدل است. یکی از دلایل این امر ناشی از ساده سازی های صورت گرفته در مدل سازی انتقال املاح در مدل SWAP به لحاظ مدل سازی یک بعدی جریان آب و املاح در خاک و عدم مدل سازی منطقه ای آب زیرزمینی است. از سوی دیگر، اعمال این ساده سازی به منظور سهولت به کارگیری مدل اجتناب ناپذیر است. دلیل دیگر این امر را می توان به استفاده از داده های واسنجی متنوع و لزوم برآورده شدن هم زمان تمامی معیارهای وضع شده برای متمایز ساختن شبهه سازی های رفتاری و غیررفتاری (جدول ۲) از یکدیگر نسبت داد. چراکه در این شرایط، افزایش ضخامت محدوده 95PPU برای شبهه سازی های شوری زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه به قیمت برآورده نشدن حداقل یکی از معیارهای وضع شده خواهد گرفت. تا جایی که این محدودیت سبب تغییرپذیری اندک مقادیر رفتاری پارامتر $(D_{dis})_2$ (جدول ۳) شده است. مقادیر آماره های p-factor و r-factor برای سری زمانی های شبهه سازی شده برای متغیرهای بیوفیزیکی به ترتیب، بین ۷۵ تا ۱۰۰ درصد و ۰/۷۵ تا ۱/۱۱ متغیر بود. مقادیر این دو آماره حاکی از انعکاس بخش عمده منابع عدم قطعیت در پارامترهای واسنجی و در عین حال، ضخامت قابل قبول محدوده 95PPU اشتقاق یافته برای شبهه سازی های متغیرهای بیوفیزیکی است. این نکات از شکل ۳ نیز قابل استنباط است. در این شکل، مقدار شاخص سطح برگ برابر با صفر در انتهای دوره شبهه سازی بیانگر به معنای مرگ گیاه و در نتیجه، توقف فرآیندهای تعرق، فتوسنتز و تولید ماده خشک است.

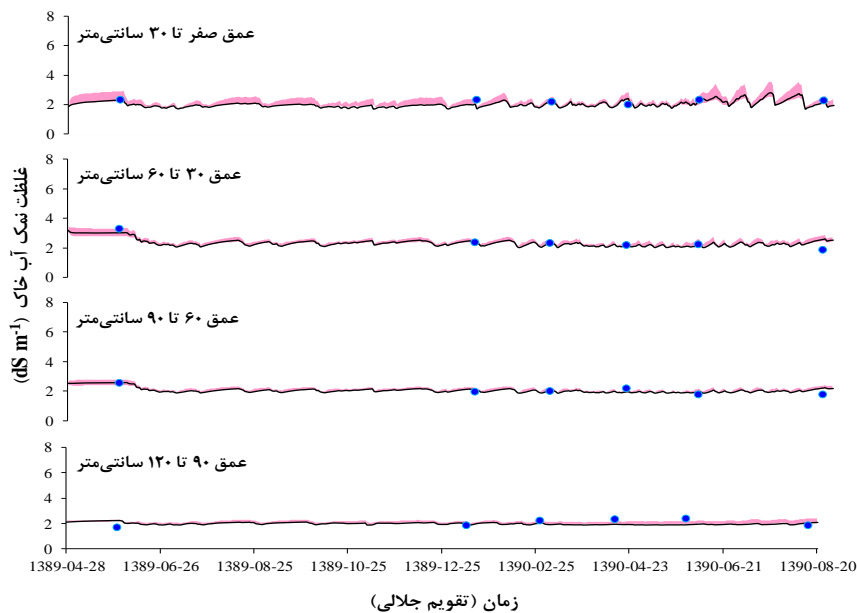
همان طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، دامنه عدم قطعیت شبهه سازی های سه متغیر بیوفیزیکی مورد بررسی در طول دوره شبهه سازی دارای روندی افزایشی بوده است. از آنجا که میزان عملکرد محصول

رفع این دشواری مفید باشد. در مقایسه با مولفه انتقال املاح در مدل SWAP، نتایج تحلیل عدم قطعیت مولفه های هیدرولوژی و بیوفیزیکی این مدل رضایت بخش تر بود. محدوده های عدم قطعیت شبیه سازی به دست آمده برای مولفه های هیدرولوژی و بیوفیزیکی مدل علاوه بر در برگرفتن بخش عمده داده های اندازه گیری شده، از ضخامت قابل قبولی برخوردار بودند. این امر مبین اهمیت استفاده هم زمان از داده های واسنجی متنوع در کاهش عدم قطعیت شبیه سازی های مدل و نیز قابلیت روش تلفیقی GLUE-UPSO در جستجوی متمرکز نواحی رفتاری فضای پارامترهای مدل است.

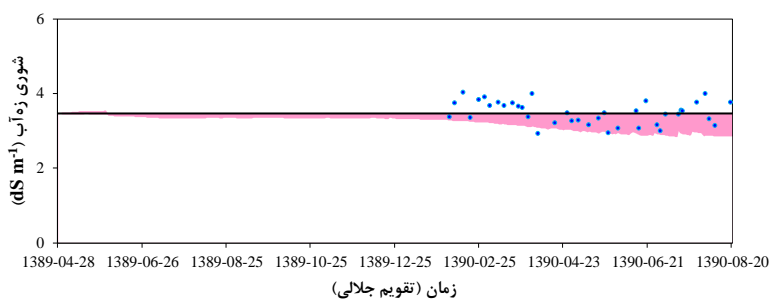
مولفه های مختلف مدل منجر به مخدوش شدن نتایج واسنجی مدل در گام ماقبل و اریب شدن پارامترهای واسنجی خواهد شد. با این حال، در اکثر پژوهش های گذشته مولفه های مختلف مدل SWAP بر اساس یک اسلوب ترتیبی واسنجی شده است. دلیل اصلی این امر دشواری واسنجی هم زمان پارامترهای مدل در واسنجی دستی مدل از یک سو و محدودیت الگوریتم های بهینه سازی با ماهیت جستجوی موضعی به لحاظ تعداد پارامترهای مجهول وارده در مساله مدل سازی معکوس از سوی دیگر است. در این مطالعه نشان داده شد که به کارگیری الگوریتم های بهینه سازی تکاملی با قابلیت جستجوی سراسری فضای پارامترهای مدل می تواند در



شکل ۳- مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده کمیت های معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته در شبیه سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه سازی به همراه محدوده عدم قطعیت پیش بینی ۹۵ درصد (95PPU) حاصل از تحلیل عدم قطعیت مدل. مقادیر عملکرد محصول تولیدی بر حسب وزن ماده خشک است



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی و محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) شبیه‌سازی شده — اندازه‌گیری شده ● 95PPU



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی در مزرعه مطالعاتی و محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) شبیه‌سازی شده — اندازه‌گیری شده ● 95PPU

فهرست منابع

۱. پرچمی عراقی، ف.، سمیع پور، ف. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۹. کاربرد مدل SWAP برای مدل سازی یک سامانه مزروعی با زهکشی زیرزمینی کنترل شده در یک مزرعه نیشکر، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۴(۱): ۶۴-۵۱.
۲. پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴الف. مقایسه تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت ASCE و پنمن-مانتیت فائو-۵۶ در مقیاس های زمانی زیرروزانه مختلف: یک مطالعه عددی، نشریه آب و خاک، ۲۹(۵): ۱۱۸۹-۱۱۷۳.
۳. پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش.، وظیفه دوست، م. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۵ب. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس سازی به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه: ۱- مقایسه عملکرد برخی مدل های ریزمقیاس سازی داده های هواشناسی روزانه، نشریه آب و خاک، ۳۰(۲): ۳۳۴-۳۵۴.
۴. صادقی لاری، ع. ۱۳۹۱. بررسی اثرات کنترل سطح ایستابی بر روی میزان جریان، نیتروژن و فسفر خروجی از زهکش های زیرزمینی در نواحی خشک (مطالعه موردی: شعبیه خوزستان). پایان نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۱۷۸ ص.
5. Abbaspour KC, 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.
6. Bessembinder JJE, Dhindwal AS, Leffelaar PA, 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. Alterra, Wageningen, The Netherlands, pp. 59-82.
7. Beven K, 2006. A manifesto for the equifinality thesis. Journal of Hydrology, 320(1-2): 18-36.
8. Beven KJ, and Binley A, 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes, 6(3): 279-298.
9. Binley A, and Beven K, 2003. Vadose zone flow model uncertainty as conditioned on geophysical data. Groundwater, 41(2): 119-127.
10. Gorgoglione A, Bombardelli FA, Pitton BJ, Oki LR, Haver DL, and Young TM, 2019. Uncertainty in the parameterization of sediment build-up and wash-off processes in the simulation of sediment transport in urban areas. Environmental Modelling & Software, 111: 170-181.
11. Haverkamp R, Leij FJ, Fuentes C, Sciortino A, and Ross P, 2005. Soil water retention. Soil Science Society of America Journal, 69(6): 1881-1890.
12. Javani-Jouni H, Liaghat A, Hassanoghli A, and Henk R, 2018. Managing controlled drainage in irrigated farmers' fields: A case study in the Moghan plain, Iran. Agricultural Water Management, 208: 393-405.
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 RE, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of Contaminant Hydrology, 7(1): 51-73.

16. Moriasi DN, Arnold JG, van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, and Veith TL, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transaction of the ASAE*, 50(3): 885-900.
17. Mugunthan P, and Shoemaker CA, 2006. Assessing the impacts of parameter uncertainty for computationally expensive groundwater models. *Water Resources Research*, 42(10): W10428.
18. Parsopoulos KE, and Vrahatis MN, 2004. UPSO: A unified particle swarm optimization scheme. In: Simos T., and Maroulis G. (Eds.), *Lecture Series on Computer and Computational Sciences*. VSP International Science Publishers, Zeist, The Netherlands, pp. 868-873.
19. Pollacco JAP, and Mohanty BP, 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).
20. Schaap MG, and Leij FJ, 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 pp.
23. Supit I, Hooijer AA, and van Diepen CA, 1994. System description of the Wofost 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Joint research centre; European commission.
24. Tolson BA, and Shoemaker CA, 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 JC, Feddes RA, 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 TC, and Damiano F, 2020. The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Part I: Theory, methods and case descriptions. *Computers Electronics in Agriculture*, 170: 105054.
28. Wesseling J, Kroes J, Oliveira TC, and Damiano F, 2020. The impact of sensitivity and uncertainty of soil physical parameters on the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Part II: Results and discussion. *Computers Electronics in Agriculture*, 170: 105072.
29. Yang J, Reichert P, Abbaspour KC, 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.

Uncertainty Analysis of the SWAP Model in a Sugarcane Field with Subsurface Controlled Drainage

F. Parchami-Araghi¹ and A. Sadeghi-Lari

Assistant Prof., Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran.

f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir

Department of Agriculture, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

adnansadeghi@yahoo.com

Received: April 2, 2021, and Accepted: September 2021

Abstract

It is important to assess the uncertainties involved in agro-hydrologic simulations because they are subject to varying degrees of uncertainty. Uncertainty analysis of the agro-hydrological models can provide useful insights into the degree of confidence in the model results. In this study, uncertainty analysis of a distributed application of the SWAP model to a sugarcane field with subsurface controlled drainage was conducted using a hybrid uncertainty analysis scheme, combining Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) and Unified Particle Swarm Optimization (UPSO). The results revealed a high variability of the calibrated parameters and the necessity of an uncertainty assessment for the SWAP simulations. Strong parameter correlations highlighted the need for calibration of the model parameters against diverse calibration data in a simultaneous manner. The 95% prediction uncertainty bands obtained for the hydrological (soil water content, water table level, sub-surface drainage outflow), solute transport (soil water solute concentration and sub-surface drainage outflow salinity), and biophysical (leaf area index, cane, and sucrose dry yield) simulations enveloped 73-80%, 45-58%, and 75-100% of the corresponding total observed data (including both calibration and validation datasets), respectively, with an r-factor (the ratio of the average thickness of the 95PPU band to the standard deviation of the corresponding measured variable) of 0.83-0.98, 1.43-1.96, and 0.75-1.11. The thickness of the derived 95PPU bands for the biophysical simulations showed an increasing trend over the simulation period.

Keywords: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, Soil salinity, Soil hydraulic parameters, Unified Particle Swarm Optimization

¹ - Corresponding author: Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran.