

مقاله پژوهشی

تحلیل عدم قطعیت مدل سازی زراعی - هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروانه یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده

فرزین پرچمی عراقی^{۱*} و عدنان صادقی لاری^۲

چکیده

با وجود قابلیت بالای مدل های زراعی- هیدرولوژیکی مزرعه-مقیاس در شبیه سازی اندرکنش رشد گیاه با انتقال آب و املاح، نتایج حاصل از آن ها در معرض درجات مختلفی از عدم قطعیت قرار دارد؛ از این رو، تحلیل عدم قطعیت این مدل ها به منظور در دست داشتن برآوردی کمی از درجه استحکام نتایج مدل اهمیت می یابد. در این مطالعه، عدم قطعیت کاربرد توزیعی و زیرروانه نسخه تصحیح شده ای از مدل SWAP برای یک مزرعه نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده (واقع در کشت و صنعت نیشکر شعیبیه، خوزستان) از طریق تلفیق روش برآورد عدم قطعیت درست نمایی تعمیم یافته (GLUE) با گونه یکپارچه سازی شده الگوریتم بهینه سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) مورد ارزیابی قرار گرفت. در روش تلفیقی GLUE-UPSO، نمونه گیری از فضای پارامترهای واسنجی مدل از طریق الگوریتم UPSO و سایر مراحل محاسبات عدم قطعیت براساس روش GLUE صورت گرفت. نتایج تحلیل عدم قطعیت مدل حاکی از غیریکتایی قابل توجه پارامترهای واسنجی شده و وجود همبستگی های قوی بین آن ها بود. نتایج حاکی از اهمیت استفاده از داده های واسنجی متنوع در کاهش عدم قطعیت شبیه سازی های مدل بود. محدوده های عدم قطعیت پیش بینی ۹۵ درصد (95PPU) محاسبه شده برای مؤلفه های هیدرولوژی (رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی)، انتقال املاح (نیم رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه آب) و بیوفیزیکی مدل (شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز) به ترتیب، بین ۴۱ تا ۸۷، ۱۸ تا ۶۷ و ۷۵ تا ۱۰۰ درصد از کل داده های اندازه گیری شده (مشمول بر هر دو مجموعه داده های واسنجی و صحت سنجی) را با r^2 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 عدم قطعیت مؤلفه های مختلف مدل SWAP به طور هم زمان و در شرایط تعدد پارامترهای واسنجی بود.

واژه های کلیدی: برآورد عدم قطعیت درست نمایی تعمیم یافته، بهینه سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه، شوری، مدل SWAP.

ارجاع: پرچمی عراقی ف. و صادقی لاری ع. ۱۴۰۰. تحلیل عدم قطعیت مدل سازی زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروانه یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده. 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 پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۰

مقدمه

مدل های شبیه سازی زراعی - هیدرولوژیکی ابزارهای کارآمدی در راستای تسهیل فرایندهای تصمیم سازی در مسائل مدیریت منابع آب و حفاظت از محیط زیست محسوب می شوند. با این وجود، از آنجاکه این مدل ها خود بیان ساده سازی شده ای از فرایندهای حاکم بر سیستم های زراعی هستند، پیش بینی های حاصل از آن ها همواره در معرض درجات مختلفی از عدم قطعیت قرار دارد؛ بنابراین به کارگیری پیش بینی های این مدل ها در فرایندهای تصمیم سازی برای مدیریت بهینه سیستم های زراعی، نیازمند به در دست داشتن برآوردی از عدم قطعیت شبیه سازی های مدل است (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). به طور کلی، منابع عدم قطعیت مدل سازی های هیدرولوژیکی، شامل عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل شبیه سازی (به لحاظ فرضیات ساده سازی اتخاذی در توسعه مدل، شیوه منفصل سازی معادلات دیفرانسیلی و روش حل عددی مورد استفاده)، پارامترهای مجهول مدل (پارامترهایی که مقدار آن ها از طریق واسنجی مدل برآورد می شود) و خطای آزمایشی مستتر در داده های ورودی به مدل (مانند داده های هواشناسی)، شرایط اولیه و مرزی و داده های مورد استفاده در واسنجی و صحت سنجی مدل است (بیون، ۲۰۰۶). افزایش تعداد پارامترهای مجهول مدل و وجود محدودیت در فراوانی و تنوع داده های مورد استفاده در فرایند واسنجی، منجر به خودنمایی چالش بیش پارامتره شدن مدل و هم پایانی نتایج واسنجی خواهد شد (باستیانسن و همکاران، ۲۰۰۳)؛ بدین معنا که در این شرایط، مدل شبیه سازی به ازای ترکیب های کاملاً متفاوتی از مقادیر پارامترهای واسنجی شده به عملکردی قابل قبول در بازسازی داده های واسنجی دست می یابد (بیون و بینلی، ۱۹۹۲). این امر، عدم قطعیت برآورد پارامترهای مجهول و به دنبال آن، نتایج شبیه سازی های مدل را به دنبال خواهد داشت. روش برآورد عدم قطعیت درست نمایی تعمیم یافته^۱ (GLUE) (بیون و بینلی، ۱۹۹۲)، یکی از رایج ترین روش های تحلیل عدم قطعیت مدل سازی های هیدرولوژیکی محسوب می شود. این روش فاقد فرضیه های آماری محدودکننده بوده و از طریق آن، اثر تمامی منابع عدم قطعیت مورد اشاره بر عدم قطعیت کل شبیه سازی های مدل قابل کمی سازی 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 می شود. سپس، براساس یک حجم نمونه آزمایش تعیین شده و اجرای شبیه سازی های مونت کارلو از فضای پارامترهای مجهول مدل (فضای حاصل از دامنه تغییرات لحاظ شده برای پارامترهای مجهول در واسنجی مدل) نمونه گیری تصادفی صورت می گیرد. متعاقباً، مدل شبیه سازی به ازای هریک از دسته پارامترهای نمونه گیری شده اجرا می شود. با تعریف یک معیار درست نمایی و تعیین یک مقدار آستانه ای برای آن، شبیه سازی های قابل قبول و غیر قابل قبول مدل (که به ترتیب، به شبیه سازی های رفتاری و غیر رفتاری معروف هستند) از یکدیگر متمایز می شوند.

از کاستی های روش GLUE، غیربهنیگی آن به لحاظ بودجه محاسباتی مورد نیاز و در نتیجه، محدود شدن کاربرد این روش در مدل سازی های هیدرولوژیکی، به ویژه در مورد مدل های ریاضی حجیم است (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). روش های بهینه سازی تکاملی با یک هزینه محاسباتی به مراتب معقول تر از GLUE قادر به یافتن نواحی رفتاری فضای پارامتر و جواب بهینه سراسری مسئله مدل سازی معکوس هستند؛ از این رو، تلفیق روش GLUE با روش های بهینه سازی تکاملی به منظور بهبود بهیگی محاسبات تحلیل عدم قطعیت مدل های شبیه سازی و جستجوی هدفمندتر فضای پارامترهای مدل، مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، دسته پارامترهای رفتاری از طریق یک الگوریتم بهینه سازی تکاملی مورد جستجو قرار می گیرند و سایر مراحل محاسبات عدم قطعیت، مشابه روش اصلی GLUE است. پژوهش های صورت گرفته در این رابطه، حاکی از برتری گونه های ترکیبی GLUE در تحلیل عدم قطعیت مدل های هیدرولوژیکی به ازای حجم محاسبات به مراتب 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 به شدت نمود می یابد (تالسن و شومیکر، ۲۰۰۸). با توجه به قابلیت های به اثبات رسیده، گونه های تلفیقی GLUE در تحلیل عدم قطعیت شبیه سازی مدل های ریاضی حجیم، به نظر می رسد که تلفیق روش GLUE با یک الگوریتم بهینه سازی تکاملی، راهکار مناسبی برای

همکاران، ۱۳۹۴) برای منطقه مطالعاتی استفاده شد. به دلیل وسعت قابل توجه مزرعه مطالعاتی (حدود ۲۱ هکتار) و به منظور در نظر گرفتن ناهمگنی مکانی برنامه ریزی آبیاری اعمال شده در سطح مزرعه، مدل SWAP از طریق تعریف تعداد ۱۰ واحد شبیه سازی همگن (موسوم به هیدروتوپ) به شیوه توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت. همچنین، با تعریف زمان آغاز و پایان هر یک از رویدادهای آبیاری محقق شده در مزرعه، امکان در نظر گرفتن زمانهای اعمال رویدادهای آبیاری طی ساعات مختلف شبانه روز در بخشهای مختلف مزرعه فراهم شد. شرط مرزی پایین دست نیم رخ خاک به صورت مقادیر از پیش تعیین شده جریان از کف نیم رخ خاک با شوری معین در نظر گرفته شد. میزان جریان از کف در پنج مقطع زمانی از طول دوره شبیه سازی از طریق مدل سازی معکوس و برای سایر مقاطع زمانی از طریق درون یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد شد. میزان شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیم رخ خاک، هر یک به عنوان یک پارامتر مجهول یکتا در سراسر دوره شبیه سازی از طریق مدل سازی معکوس برآورد شد.

به منظور مدل سازی انتقال املاح در مزارع مطالعاتی، دو فرایند انتقال توده ای و جذب سطحی املاح (مبتنی بر ایزوترم جذب خطی) در نظر گرفته شد. مدل سازی سیستم زهکشی از طریق رویکرد سیستم زهکشی چندگانه مبتنی بر مفهوم مقاومت زهکشی (کروز و همکاران، ۲۰۱۷) صورت گرفت. مزرعه مطالعاتی علاوه بر دارا بودن سیستم زهکشی زیرزمینی، در مجاورت یک زهکش جمع کننده روباز نیز قرار داشت؛ بنابراین در فرایند مدل سازی، یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی (با ویژگیهای یکسان برای هر ۱۰ هیدروتوپ) در نظر گرفته شد. زه آب خروجی از هر هیدروتوپ از طریق معادله ساده زیر روندیابی شد:

$$T_{d,i} = T_c L_{outlet,i} / L_{outlet,max} \quad (1)$$

که در آن: $L_{outlet,i}$ و $T_{d,i}$ به ترتیب، طول مسیر (متر) و زمان تأخیر (روز) رسیدن زه آب خروجی از هیدروتوپ نام به نقطه خروجی، T_c متوسط زمان انتقال زه آب به خروجی سیستم زهکشی (ساعت) و $L_{outlet,max}$ بیانگر فاصله دوردست ترین هیدروتوپ از نقطه خروجی (متر) است. شبیه سازی متغیرهای بیوفیزیکی با استفاده از مدل گیاهی WOFOST (سوپیت و همکاران، ۱۹۹۴) صورت گرفت.

آنالیز عدم قطعیت مدل سازی های زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی با صرف یک هزینه محاسباتی معقول باشد. طی پژوهشی، پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) با کاربرد نسخه تصحیح شده ای از مدل SWAP (کروز و همکاران، ۲۰۱۷)، یک طرح مدل سازی زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروانه و امکان شبیه سازی زهکشی زیرزمینی کنترل شده را توسعه دادند. طرح مدل سازی توسعه یافته در یکی از مزارع کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه) خوزستان با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده با موفقیت مورد واسنجی و صحت سنجی قرار گرفت. هدف از پژوهش حاضر، تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته در پژوهش فوق از طریق تلفیق GLUE با گونه یکپارچه الگوریتم بهینه سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) (پارسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴) بود.

مواد و روش ها

پژوهش حاضر در یکی از مزارع (مزرعه B1117) تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول، رقم CP48-103) 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 مزرعه ای گردآوری شده توسط صادقی لاری (۱۳۹۱) صورت گرفت (جدول ۱). مزرعه مطالعاتی مجهز به زهکش زیرزمینی آزاد (با متوسط عمق کارگذاری ۲/۱ متر) بود. مدیریت زهکشی کنترل شده (با عمق کنترل سطح ایستابی ۷۰ سانتی متر) طی بخشی از دوره رشد نیشکر (از اردیبهشت تا آبان ۱۳۹۰) اعمال شد. طول دوره شبیه سازی از ۲۸ تیر ۱۳۸۹ تا ۲۰ آذر ۱۳۹۰ (۴۸۱ روز) در نظر گرفته شد. برای مزرعه مطالعاتی، ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی متر (معادل با عمق وقوع لایه محدود کننده) و متشکل از دو لایه با ویژگیهای ذکر شده در جدول ۲ در نظر گرفته شد. داده های هواشناسی دوره مطالعاتی از ایستگاه هواشناسی مزرعه نمونه منطقه مطالعاتی جمع آوری شد. به منظور محاسبه تبخیر-تعرق زیرروانه (با مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه ای) از چارچوب ریزمقیاس سازی داده های هواشناسی روزانه توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۴ الف) و ویرایش تصحیح شده مدل پنمن-مانتیت ASCE (پرچمی عراقی و

برآورد شد. جزئیات کامل نحوه برپاسازی مدل برای مزرعه مطالعاتی توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) تشریح شده است. در پژوهش حاضر، از طریق برنامه نویسی فرترن و ++C چندپردازشی و تلفیق روش GLUE با الگوریتم UPSO یک طرح تحلیل عدم قطعیت ترکیبی توسعه یافت و با کد منبع تصحیح شده ای از مدل SWAP (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۹) یکپارچه سازی شد.

پارامترهای حساس این مدل براساس پژوهش های مشابه گذشته (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۳) شناسایی شده (جدول ۳) و مقادیر آنها از طریق مدل سازی معکوس برآورد شد. به دلیل طولانی بودن دوره رشد و توسعه گیاه نیشکر (حدود ۱۵ ماه)، مقادیر پارامترهای گیاهی S_{LA} و A_{max} (جدول ۳) در نه مقطع از دوره رشد گیاه از طریق مدل سازی معکوس و برای سایر مقاطع بازه زمانی رشد گیاه از طریق درون یابی خطی بین مقادیر واسنجی شده

جدول ۱- مجموعه داده های مورد استفاده در فرایند واسنجی و صحت سنجی و معیارهای شناسایی شبیه سازی های رفتاری

مؤلفه مورد ارزیابی مدل	داده واسنجی	مرحله واسنجی	مرحله صحت سنجی	معیار شناسایی شبیه سازی های رفتاری
شبیه سازی انتقال آب	نیم رخ رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	ū	ū	$EF > 0.7$
	عمق سطح ایستابی (cm)	ū	ū	
	جریان زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی (cm d^{-1})	ū	ū	
شبیه سازی انتقال املاح	شوری زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی (ds m^{-1})	ū	ū	$NRMSE < 0.2$
	نیم رخ غلظت املاح آب خاک (ds m^{-1})	ū	ū	
شبیه سازی متغیرهای بیوفیزیکی	شاخص سطح برگ ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$)	ū	ū	$EF > 0.7$
	عملکرد ماده خشک نی (ton ha^{-1})	ū	ū	
	عملکرد ماده خشک ساکارز (ton ha^{-1})	ū	ū	

جدول ۲- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

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

مجموعه داده های واسنجی (جدول ۱) با داده های شبیه سازی شده با ضرایب وزنی یکسان به عنوان تابع برازش مسئله مدل سازی معکوس تک هدفه استفاده شد. پس از اجرای مدل به ازای هر یک از دسته پارامترهای تولید شده از طریق الگوریتم تلفیقی GLUE-UPSO، عملکرد مدل در بازسازی داده های واسنجی با استفاده از آماره های NRMSE و ضریب کارایی مدل، EF، به شرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفت:

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

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^m (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (3)$$

که در آنها: O مقدار اندازه گیری شده، P مقدار شبیه سازی شده و $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه گیری شده و m تعداد مقایسه ها است. مقادیر آماره NRMSE در دامنه ۰/۰۰ تا ۰/۱۰، ۰/۱۰ تا ۰/۲۰، ۰/۲۰ تا ۰/۳۰ و بزرگ تر از ۰/۳۰ به ترتیب به عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب،

فرایند واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، با در نظر گرفتن مجموعاً ۴۵ پارامتر مجهول (جدول ۳) انجام شد. دامنه تغییرات مجاز پارامترهای مجهول مدل براساس منابع علمی (شاپ و لیژ، ۱۹۹۸؛ کروز و همکاران، ۲۰۱۷) و مشاهده های مزرعه ای تعیین شد (جدول ۳). جزئیات کامل نحوه برپاسازی مدل برای مزرعه مطالعاتی توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) تشریح شده است. کران پایین دامنه تغییرات مجاز پارامتر رطوبت اشباع خاک، q_{sat} ، براساس حداکثر مقدار رطوبت حجمی مشاهداتی تعیین شد. فرایند واسنجی پارامترهای مجهول مدل به ازای ۳۰۰ ذره (دو برابر تعداد ذرات در نظر گرفته شده در پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) و ۴۵۰ تکرار (مجموعاً ۱/۳۵ میلیون مرتبه اجرای مستقل مدل SWAP) صورت گرفت. از مجموع وزنی آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده (NRMSE، معادله ۲) حاصل از مقایسه مقادیر هر یک از

از مقادیر تابع برازش مسئله مدل سازی معکوس محاسباتی برای هر یک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده به عنوان معیار درست‌نمایی در محاسبه وزن‌های درست‌نمایی (معادله (۴)) استفاده شد. وزن‌های درست‌نمایی محاسبه شده به منظور تعیین محدوده‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) برای هر یک از سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده داده‌های واسنجی مورد استفاده قرار گرفت. محدوده‌های عدم قطعیت محاسباتی با استفاده از آماره‌های p-factor و r-factor مورد ارزیابی قرار گرفت (عباسپور، ۲۰۰۸):

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

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

که در آن‌ها $P_i^{2.5\%}$ و $P_i^{97.5\%}$ 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). مقادیر ایده‌آل آماره‌های p-factor و r-factor به ترتیب برابر با ۱۰۰ درصد و صفر است.

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). به منظور متمایز ساختن دسته پارامترهای رفتاری و غیررفتاری از یکدیگر، دسته پارامتری که شبیه‌سازی‌های متناظر با آن، تمامی معیارهای وضع شده در جدول ۱ را به طور هم‌زمان برآورده ساخت، به عنوان یک دسته پارامتر رفتاری در نظر گرفته شد. در ادامه، مجموعه دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده مورد پردازش قرار گرفته و با اطلاق یک وزن درست‌نمایی w_i (معادله (۴)) به هر یک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده، کران‌های عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل در قالب صدک‌های توابع توزیع احتمال تجمعی (که به توزیع پسین معروف است) محاسبه شد.

$$w_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{i=1}^M L(\theta_i)} \quad (4)$$

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.

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

شرح	کد پارامتر	پارامتر	دامنه 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	۳/۱
	P2	$(\theta_{sat})_2$	۰/۴۰۰ - ۰/۵۴۰	۰/۴۱۸	۳/۰
	P3	$(\alpha)_1$	۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۲۶	۲۸/۸
	P4	$(\alpha)_2$	۰/۰۰۳ - ۰/۱۳۲	۰/۰۱۳	۵۳/۷
	P5	$(n)_1$	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۲۸۷	۵/۱
	P6	$(n)_2$	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۱/۲۹۲	۸/۶
	P7	$(K_{sat})_1$	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۲۰/۳۶۲	۵۹/۴
	P8	$(K_{sat})_2$	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۰۰۰	۱۵/۷۷۱	۱۰۵/۵
جریان از کف در پنج مقطع زمانی	P9	$(q_{Bot})_1$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	۶۸/۰
	P10	$(q_{Bot})_2$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	۵۲/۳
	P11	$(q_{Bot})_3$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۸	۵۷/۵
	P12	$(q_{Bot})_4$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۶	۶۹/۷
	P13	$(q_{Bot})_5$	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۰/۰۰۴	۱۱۴/۴

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

شرح	کد پارامتر	پارامتر	دامنه 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
	P15	$(D_{dis})_2$	۰/۵۰۰ - ۶۵/۰۰۰	۲۰/۱۳۸	۲۷/۰۹۰
	P16	$(K_f)_1$	۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۲۴/۴۲۷	۴۸/۸۷۲
	P17	$(K_f)_2$	۰/۰۰۰ - ۹۹/۰۰۰	۲۳/۸۷۴	۴۰/۰۱۲
	P18	C_{gw1}	۱/۳۰۰ - ۳/۵۰۰	۲/۶۰۵	۲/۴۳۸
ترم‌های شوری	P19	C_{Bot}	۱/۳۰۰ - ۵/۵۰۰	۴/۱۸۸	۳/۶۷۲
	P20	γ_{drain}	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۱۳۱/۷۴۱	۱۴۳/۶۷۴
پارامترهای سیستم زهکشی	P21	γ_{drain2}	۱۰۰۰/۰۰۰ - ۱۰۰۰۰/۰۰۰	۴۷۳۶/۶۸۴	۳۹۰۶/۸۲۹
	P22	$g_{drain, Ctrl}$	۵۰/۰۰۰ - ۲۵۰/۰۰۰	۷۵/۶۵۹	۷۸/۰۳۰
	P23	T_c	۰/۸۰۰ - ۲/۰۰۰	۱/۳۶۷	۱/۵۴۳
	P24	T_{SUMEA}	۵۴۰۰/۰۰۰ - ۶۰۰۰/۰۰۰	۵۵۸۴/۰۲۴	۵۵۸۴/۴۳۸
پارامترهای گیاهی	P25	T_{SUMAM}	۶۴۲/۰۰۰ - ۴۵۰۰/۰۰۰	۱۳۰۳/۳۸۰	۱۶۹۴/۸۸۴
	P26	RGR _{LAI}	۰/۰۱۵ - ۰/۰۵۰	۰/۰۲۹	۰/۰۳۰
	P27	$(S_{LA})_1$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷
	P28	$(S_{LA})_2$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷
	P29	$(S_{LA})_3$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۶
	P30	$(S_{LA})_4$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰
	P31	$(S_{LA})_5$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۴
	P32	$(S_{LA})_6$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۵
	P33	$(S_{LA})_7$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳
	P34	$(S_{LA})_8$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۸
	P35	$(S_{LA})_9$	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۶
	P36	EFF	۰/۳۰۰ - ۰/۸۰۰	۰/۵۰۱	۰/۴۸۸
	P37	$(A_{max})_1$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۳۶/۲۷۹	۳۴/۶۵۱
	P38	$(A_{max})_2$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۱۸/۵۹۷	۱۴/۳۲۱
	P39	$(A_{max})_3$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۷/۶۹۰	۲۰/۷۲۵
	P40	$(A_{max})_4$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۶۴/۶۷۹	۶۳/۰۴۱
	P41	$(A_{max})_5$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۷۳/۴۵۴	۶۳/۱۷۴
	P42	$(A_{max})_6$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۳/۸۹۹	۴۳/۴۸۲
	P43	$(A_{max})_7$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۳۵/۱۴۵	۲۹/۵۳۰
	P44	$(A_{max})_8$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۴۳/۷۰۴	۳۱/۴۷۳
	P45	$(A_{max})_9$	۰/۰۰۰ - ۸۵/۰۰۰	۵/۸۹۳	۴/۲۶۰

^(*) در جدول فوق، q_{sat} رطوبت خاک در حالت اشباع ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، 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 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})، T_c به ترتیب، مقاومت زهکشی زیرزمینی آزاد، کنترل شده و جمع کننده روباز (d) و متوسط زمان انتقال زه آب به خروجی سیستم زهکشی (h)، C_{gw} شوری آب زیرزمینی (mg cm^{-3})، RGR_{LAI} ، T_{SUMAM} ، T_{SUMEA} ، EFF به ترتیب، بیانگر مجموع دما از مرحله جوانه زنی تا گل دهی ($^{\circ}\text{C}$)، مجموع دما از مرحله گل دهی تا بلوغ ($^{\circ}\text{C}$)، حداکثر افزایش نسبی شاخص برگ ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)، سطح ویژه برگ (ha kg^{-1})، حداکثر شدت جذب دی اکسید 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.

نتایج و بحث

پارامتر رفتاری منحصربه فرد از طریق طرح تحلیل

عدم قطعیت توسعه یافته در جدول ۳ ارائه شده است.

حصول نتایج مشابه با پژوهش پرچمی عراقی و همکاران

(۱۳۹۹) برای مقادیر بهینه سازی شده پارامترهای مجهول

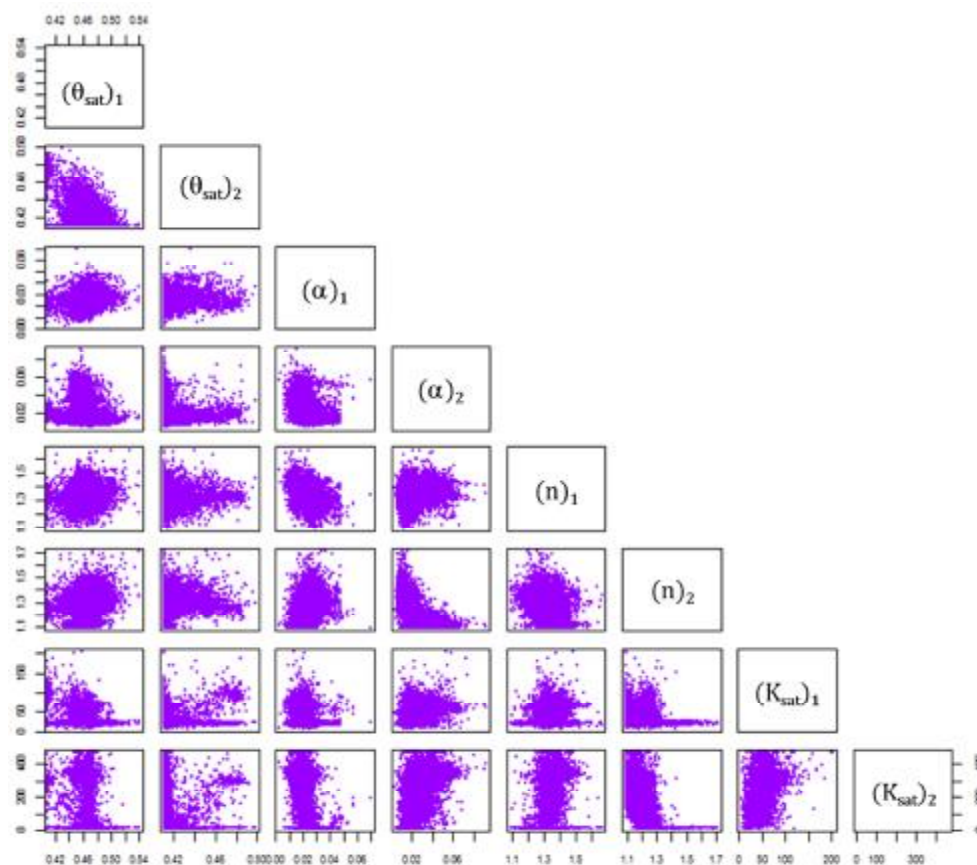
مقادیر بهینه پارامترهای مجهول وارد شده در طرح

مدل سازی معکوس و آماره های توصیفی مجموعه

پارامترهای رفتاری شناسایی شده (حاوی ۱۲۱۲۸ دسته

نسبت به پارامترهای a و K_{sat} برخوردار بوده است؛ به عنوان نمونه، اندرکنش مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی دو لایه خاک در نظر گرفته شده برای مزرعه مطالعاتی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، نحوه پراکنش مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک حاکی از غیریکتایی قابل توجه پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده است. این نتیجه با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های مشابه گذشته (بینلی و بی‌ون، ۲۰۰۳؛ پولاکو و ماهانی، ۲۰۱۲؛ شفیع و همکاران، ۲۰۱۴) مطابقت دارد. یکی از دلایل پایین بودن ضریب تغییرات پارامتر q_{sat} را می‌توان به محدود کردن دامنه تغییرات مجاز این پارامتر از طریق حداکثر مقدار مشاهداتی رطوبت خاک نسبت داد.

مدل حاکی از قابلیت بالای الگوریتم UPSO در جست‌وجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینه سراسری مسئله مدل‌سازی معکوس است. مقادیر آماره ضریب تغییرات 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 (یوان‌ای‌پی، ۲۰۱۵). مقایسه 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



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

در کاهش عدم قطعیت برآورد این پارامتر مؤثر بوده است. این امر بیانگر اهمیت بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی در کاهش عدم قطعیت پارامترهای برآورد شده و در نتیجه، شبیه‌سازی‌های مدل است. این در حالی است که دامنه تغییرات مجاز سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد

مطابق با شکل ۱ مقدار پارامتر q_{sat} در بخش قابل توجهی از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده بر کران پایین دامنه تغییرات مجاز وضع شده برای این پارامتر تمرکز یافته است؛ بنابراین، وضع کران پایین تغییرات مجاز پارامتر q_{sat} براساس حداکثر مقدار رطوبت خاک مشاهداتی

بررسی با در نظر گرفتن کل دامنه تغییرات مجاز فیزیکی آن‌ها براساس بانک اطلاعات خاک گردآوری شده توسط شاپ و لیژ (۱۹۹۸) تعیین شد. در این شرایط، مقادیر رفتاری پارامتر n از تغییرپذیری و عدم قطعیت اندکی برخوردار بود؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر n عملاً، حساس‌ترین پارامتر هیدرولیکی خاک بوده است. این یافته با نتیجه پژوهش‌های گذشته مطابقت دارد که نشان دادند پارامتر n تنها پارامتر مدل ون گنوختن است که می‌تواند بیانگر بافت خاک باشد (هورکمپ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پولاکو و ماهانتی، ۲۰۱۲، شفیع و همکاران، ۲۰۱۴؛ وسلینگ و همکاران، ۲۰۲۰). میزان تغییرپذیری مقادیر رفتاری ترم‌های جریان از کف (جدول ۳)، بیانگر کاهش تدریجی حساسیت آن‌ها در طول دوره شبیه‌سازی است. علت این امر را می‌توان به شدت یافتن رویدادهای آبیاری در دوره‌های میانی و انتهایی شبیه‌سازی و ناچیز شدن سهم این ترم در بیلان آب نسبت داد. در مقایسه با پارامتر ضریب ایزوترم جذب خطی (K_f)، پارامتر ضریب انتشارپذیری برای لایه زیرسطحی خاک (D_{dis}) از حساسیت بیشتری نسبت به تابع هدف مدل سازی معکوس برخوردار بوده است (جدول ۳). دلیل این امر را می‌توان به کاهش عمق کنترل آب زیرزمینی شور در زهکشی کنترل شده و افزایش حساسیت پارامترهای مؤثر بر انتقال املاح نسبت به 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 قابل توجه تابع هدف مدل سازی معکوس نسبت به این دو پارامتر است. در مقایسه با مقاومت زهکشی جمع‌کننده سطحی، γ_{drain2} تابع هدف مدل سازی معکوس از حساسیت بیشتری نسبت به پارامترهای مقاومت زهکشی زیرزمینی آزاد و کنترل شده (به ترتیب، 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 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، برای پارامترهای بالا، یک مقدار ثابت در نظر 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 محاسبه شده برای پارامترهای رفتاری در دامنه 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 به ترتیب به عنوان وجود همبستگی 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 محاسبه شده به ترتیب در کلاس‌های همبستگی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی قرار گرفتند. این نتیجه بیانگر اندرکنش قابل توجه بین پارامترهای واسنجی شده و توانایی طرح تحلیل عدم قطعیت مورد استفاده در این مطالعه به لحاظ جستجوی سراسری و متمرکز نواحی رفتاری فضای پارامترهای مجهول و نمایان ساختن این اندرکنش است.

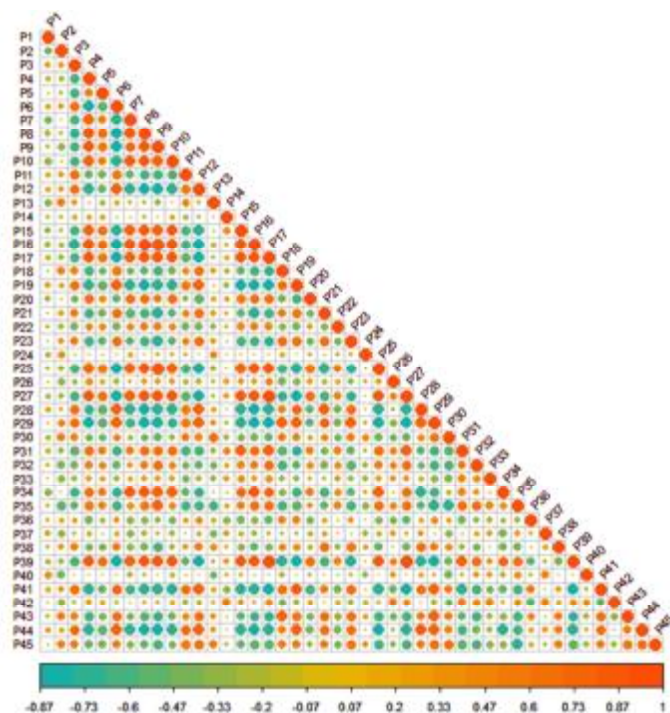
مقادیر آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ ارائه شده است. آماره EF حاکی از عملکرد خوب تا بسیار خوب مدل در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی، جریان زه آب خروجی، شاخص سطح برگ، عملکرد نی و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

مقادیر آماره r-factor (جدول ۴) مربوط به محدوده 95PPU محاسباتی برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده فوق برای مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌یابی به ترتیب

محاسبه شده برای شبیه سازی های شوری زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی، بخش اندکی از مجموعه داده های واسنجی و صحت سنجی (به ترتیب ۲۰ و ۱۷ درصد) در این محدوده قرار گرفته اند. دلیل اصلی حصول این نتیجه را می توان به استفاده از داده های واسنجی متنوع و لزوم برآورده شدن هم زمان تمامی معیارهای وضع شده برای تمایز شبیه سازی های رفتاری و غیر رفتاری از یکدیگر (جدول ۱) نسبت داد؛ چراکه در این شرایط، افزایش ضخامت محدوده 95PPU برای شبیه سازی های شوری زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه، به قیمت برآورده نشدن حداقل یکی از معیارهای وضع شده در جدول ۱ صورت خواهد گرفت. براساس مقادیر آماره p -factor، محدوده های 95PPU محاسباتی برای شبیه سازی های متغیرهای بیوفیزیکی با یک ضخامت قابل قبول (r -factor) بین ۰/۸۴ تا ۰/۹۸) بین ۷۵ تا ۱۰۰ درصد از داده های واسنجی را دربر گرفته اند. این نتیجه بیانگر انعکاس مؤثر بخش عمده منابع عدم قطعیت در پارامترهای واسنجی است.

بین ۰/۵۲ تا ۱/۰۶ و ۰/۸۷ تا ۱/۳۵ متغیر بود. براساس مقادیر این آماره و شکل ۳ می توان گفت که دربرگرفته شدن بخش عمده مجموعه داده های واسنجی و صحت سنجی در محدوده های 95PPU، به قیمت افزایش مفراط ضخامت این محدوده صورت نگرفته است. این نتیجه بیانگر سطح قابل قبول عدم قطعیت شبیه سازی های هیدرولوژیکی است. براساس آماره p -factor، محدوده 95PPU اشتقاق یافته برای شبیه سازی های نیم رخ غلظت املاح آب خاک ۶۷ درصد از مجموعه داده های واسنجی و صحت سنجی را با r -factor به ترتیب برابر با ۱/۱۶ و ۲/۶۷ دربرگرفته است (جدول ۴).

باین حال، همان طور که در جدول ۴ نیز قابل مشاهده است، دلیل اصلی حصول مقدار بالای آماره r -factor در مرحله صحت سنجی، نه به دلیل افزایش ضخامت محدوده 95PPU، بلکه به دلیل کاهش شدید تغییرپذیری مجموعه داده صحت سنجی رخ داده است. شکل ۵ و مقادیر آماره های p -factor و r -factor (جدول ۴)، حاکی از آن است که به دلیل ضخامت ناچیز محدوده 95PPU

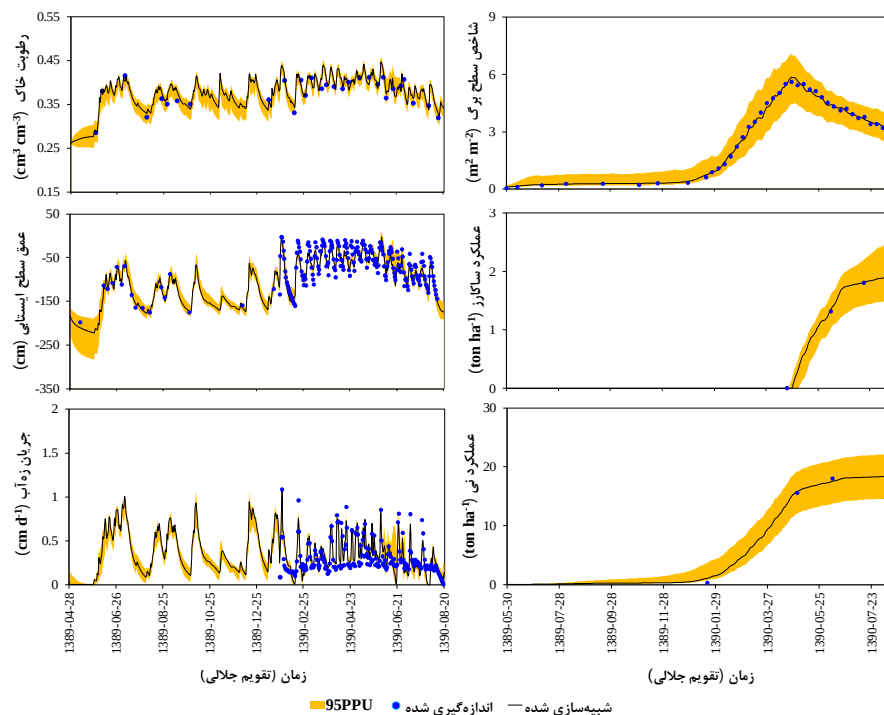


شکل ۲- نمودار ماتریس همبستگی پارامترهای واسنجی رفتاری. نمادهای P1 تا P45 بیانگر کدهای مربوط به هریک از پارامترهای واسنجی (جدول ۳) هستند.

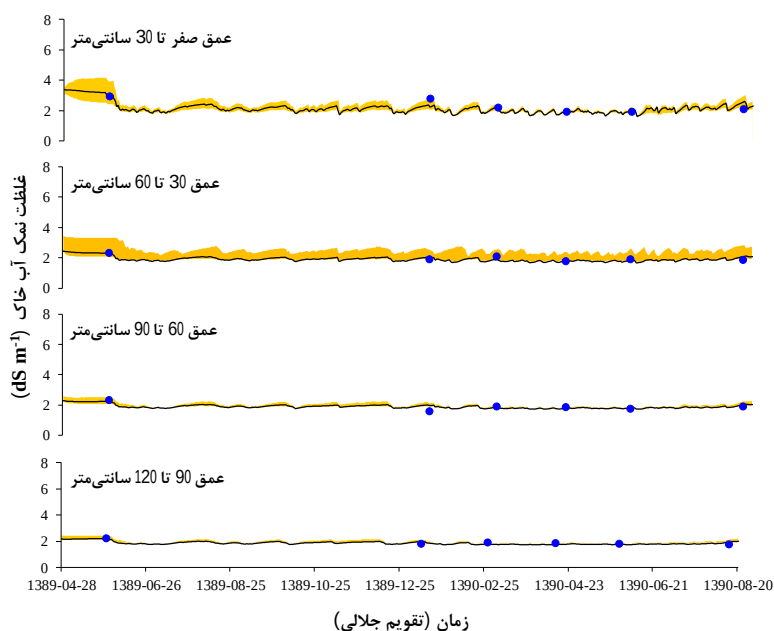
جدول ۴- مقادیر آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب، املاح و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه‌سازی^(*)

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

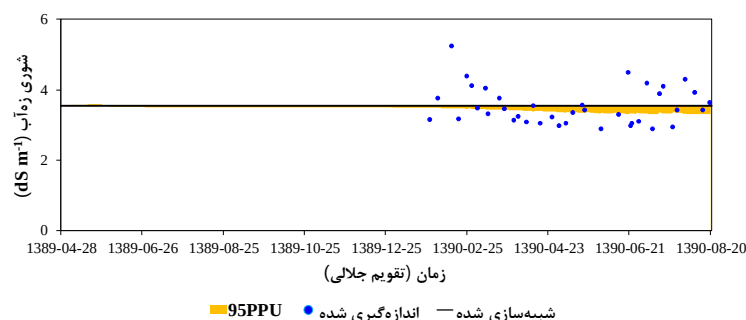
^(*) در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه‌گیری شده و m تعداد مشاهدات است.



شکل ۳- سری زمانی‌های مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) کمیت‌های معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه‌یافته در شبیه‌سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه‌سازی. مقادیر عملکرد محصول تولیدی برحسب وزن ماده خشک است.



شکل ۴- سری زمانی های مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده و محدوده عدم قطعیت پیش بینی ۹۵ درصد (95PPU) نیم رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی



شکل ۵- سری زمانی مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده و محدوده عدم قطعیت پیش بینی ۹۵ درصد (95PPU) شوری زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی در مزرعه مطالعاتی

نتیجه گیری

در این پژوهش، عدم قطعیت شبیه سازی های توزیعی و زیرروانه (انجام محاسبات با گام های زمانی کوتاه تر از ۲۴ ساعت شبانه روز) مدل SWAP برای یک مزرعه وسیع نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده از طریق روش تلفیقی GLUE-UPSO مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی حاکی از غیریکتابی قابل توجه پارامترهای واسنجی شده، اهمیت تحلیل عدم قطعیت شبیه سازی های مدل SWAP و درست داشتن برآوردی از کران های عدم قطعیت پیش بینی های مدل بود. وجود ضرایب همبستگی قوی بین

پارامترهای واسنجی شده حاکی از اهمیت واسنجی مؤلفه های مختلف مدل (هیدرولوژی، انتقال املاح/گرما و بیوفیزیکی) با استفاده از داده های واسنجی متنوع به صورت موازی و همزمان است؛ از این رو اتخاذ یک رویکرد گام به گام برای واسنجی جداگانه مدل در شبیه سازی انتقال آب، انتقال املاح و متغیرهای بیوفیزیکی منجر به مخدوش شدن نتایج واسنجی مدل در گام ماقبل و آرب شدن پارامترهای واسنجی خواهد شد. با این حال، به دلیل دشواری واسنجی مدل در شرایط وجود تعداد زیادی از پارامترهای مجهول، واسنجی مؤلفه های مختلف مدل SWAP براساس یک اسلوب گام به گام رویکردی رایج

یک مطالعه عددی، نشریه آب و خاک، ۲۹(۵): ۱۱۷۳-۱۱۸۹.

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 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

است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که الگوریتم های بهینه سازی تکاملی نظیر UPSO از قابلیت بالایی برای واسنجی مدل در شرایط تعدد پارامترهای مجهول برخوردار هستند. در مقایسه با شبیه سازی های مرتبط با انتقال املاح، نتایج تحلیل عدم قطعیت شبیه سازی های مؤلفه های هیدرولوژی و بیوفیزیکی مدل SWAP رضایت بخش تر بود. محدوده های عدم قطعیت به دست آمده برای این دو مؤلفه، علاوه بر دربرگرفتن بخش عمده داده های اندازه گیری شده، از ضخامت قابل قبولی نیز برخوردار بودند. این امر بیانگر اهمیت استفاده از داده های واسنجی متنوع در کاهش عدم قطعیت شبیه سازی های مدل است. عملکرد متفاوت مدل در بازسازی داده های اندازه گیری شده غلظت املاح آب خاک و شوری زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی مؤید آن است که قضاوت در خصوص عملکرد مؤلفه شبیه سازی انتقال املاح مدل از طریق بررسی عملکرد مدل در بازسازی، تنها یکی از دو مجموعه داده فوق کفایت نمی کند؛ به عبارت دیگر، عملکرد قابل قبول مدل در شبیه سازی نیم رخ غلظت املاح آب خاک لزوماً، به معنای عملکرد مناسب آن در شبیه سازی شوری زه آب خروجی نیست و برعکس.

منابع

۱. پرچمی عراقی ف. سمیع پور ف. و صادقی لاری ع. ۱۳۹۹. مدل سازی زراعی - هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروانه یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/ کنترل شده. مجله پژوهش آب ایران، ۳۹(۴): ۵۳-۶۶.
۲. پرچمی عراقی ف. میرلطیفی س. م. قربانی دشتکی ش. وظیفه دوست م. و صادقی لاری ع. ۱۳۹۴ الف. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس سازی به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروانه: ۲- برآورد تبخیر-تعرق زیرروانه با استفاده از داده های هواشناسی روزانه ریزمقیاس شده. نشریه آب و خاک، ۲۹(۶): ۱۷۲۱-۱۷۳۴.
۳. پرچمی عراقی ف. میرلطیفی س. م. قربانی دشتکی ش. و صادقی لاری ع. ۱۳۹۴ ب. مقایسه تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت ASCE و پنمن-مانتیت فائو-۵۶ در مقیاس های زمانی زیرروانه مختلف:

- 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 the terms of the water balance: Some case studies with default R packages. Part II: 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.
 - 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

