

مقاله علمی - پژوهشی

تحلیل عدم قطعیت چندهدفه مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی از طریق شبیه‌سازی‌های مهار شده مونت کارلو

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۶

چکیده

شبیه‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی در معرض درجات مختلفی از عدم قطعیت قرار دارد. در این رابطه، تحلیل عدم قطعیت می‌تواند بینش مفیدی در خصوص درجه استحکام خروجی‌های مدل فراهم آورد. در این مطالعه، با تلفیق روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تمهیم یافته (GLUE) و گونه یکپارچه‌سازی شده الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) یک طرح تحلیل عدم قطعیت چندهدفه ترکیبی (GLUE-UPSO) مبتنی بر شبیه‌سازی‌های مهار شده مونت کارلو توسعه یافت. طرح توسعه یافته به منظور تحلیل عدم قطعیت مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی با استفاده از مدل SWAP برای یک مزرعه نیشکر با زهکشی زیرزمینی، واقع در کشت و صنعت نیشکر شعبیه، خوزستان مورد کاربرد قرار گرفت. نتایج این بررسی حاکی از غیریکتایی قوی اکثر پارامترهای واسنجی شده و اهمیت تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل SWAP بود. وجود ضرایب همبستگی قوی بین پارامترهای واسنجی شده حاکی از اهمیت واسنجی مولفه‌های مختلف مدل به‌ازای داده‌های اندازه‌گیری شده معیار متنوع به‌صورت هم‌زمان بود. محدوده‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد اشتقاق یافته برای مولفه‌های هیدرولوژی (رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه آب خروجی از زهکش زیرزمینی)، انتقال املاح (نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه آب) و بیوفیزیکی مدل (شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز) به ترتیب، بین ۶۷ تا ۹۰، ۲۳ تا ۷۱ و ۷۵ تا ۱۰۰ درصد از کل داده‌های اندازه‌گیری شده (اعم از هر دو مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی) را با r -factor بین ۰/۵۸ تا ۱/۳۴، ۰/۴۳ تا ۱/۰۷ و ۰/۷۰ تا ۰/۹۸ در بر گرفتند. نتایج این مطالعه، حاکی از سطح قابل قبول عدم قطعیت مدل و قابلیت روش تلفیقی توسعه یافته در واسنجی و کمی‌سازی عدم قطعیت مولفه‌های مختلف مدل به‌طور هم‌زمان بود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه، شوری، مدل SWAP، مدل‌سازی معکوس

مقدمه

شبیه‌سازی‌های صورت گرفته افزایش یافته است. با این حال، بهبود توان تبیین‌گری مدل‌های شبیه‌سازی عمدتاً، به‌قیمت افزایش تعداد پارامترهای مجهول تعبیه شده در مدل‌های شبیه‌سازی محقق شده است. معمولاً، مقادیر پارامترهای مجهول این مدل‌ها با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی و از طریق مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با داده‌های واسنجی اندازه‌گیری شده به‌شیوه‌ای معکوس استنباط می‌شود. با این وجود، محتوای اطلاعاتی داده‌های واسنجی قابل دسترس پژوهشگران متناسب با روند پیچیده‌تر شدن مدل‌ها و افزایش تعداد پارامترهای مجهول آنها بهبود نیافته است (Beven, 2009). این روند در بسیاری از مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی امروزی به چالش بیش‌پارامتره شدن مدل و هم‌پایانی ختم شده است. به این معنا که در این شرایط، مدل به‌ازای ترکیب‌های مختلفی از مقادیر پارامترهای واسنجی به عملکردی قابل قبول در بازسازی داده‌های

با بهبود روزافزون توان محاسبات کامپیوتری، پیچیدگی مدل‌های شبیه‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی نیز با هدف تبیین بهتر پیچیدگی‌های فرآیندهای حاکم بر سیستم‌های زراعی-هیدرولوژیکی و هرچه مستحکم‌تر شدن پشتوانه علمی نتایج حاصل از

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، ایران
۲- استادیار عضو هیات علمی دانشگاه هرمزگان، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، هرمزگان، ایران

(* نویسنده مسئول: Email: f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.3.6.0

توزیع احتمال یکنواخت به عنوان تابع توزیع احتمال پیشین پارامترها استفاده می‌شود. این امر به معنای جستجوی کورکورانه فضای پارامترها می‌باشد. در این شرایط، دستیابی به برآوردهای هرچه واقع‌بینانه‌تر از عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل، لزوم افزایش تعداد نمونه‌گیری‌ها از فضای پارامترها را می‌طلبد که این امر به معنای افزایش مفرط حجم محاسبات مورد نیاز خواهد بود (Tolson and Shoemaker, 2008). بنابراین، در این شرایط، اشتقاق تمامی دسته پارامترهای رفتاری مورد نیاز به‌منظور دستیابی به برآوردی هرچه معتبرتر از عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل تضمین شده نخواهد بود. روش‌های بهینه‌سازی تکاملی با یک هزینه محاسباتی به‌مراتب معقول‌تر از GLUE قادر به یافتن نواحی رفتاری فضای پارامتر و جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس هستند. از این‌رو، تلفیق روش GLUE با روش‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌عنوان راهکاری جهت مهار کردن شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو، بهبود بهینگی محاسبات تحلیل عدم قطعیت مدل‌های شبیه‌سازی، جستجوی بهتر نواحی رفتاری فضای پارامترها و بهبود استحکام نتایج آنالیز عدم قطعیت مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، دسته پارامترهای رفتاری از طریق یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مورد جستجو قرار گرفته و سایر مراحل محاسبات عدم قطعیت مشابه روش اصلی GLUE می‌باشد. پژوهش‌های صورت گرفته در این رابطه، حاکی از برتری روش‌های ترکیبی در برآورد عدم قطعیت پیش‌بینی مدل‌های شبیه‌سازی با حجم محاسباتی به‌مراتب کمتر از GLUE بوده و این برتری با افزایش تعداد پارامترهای مجهول مدل به‌شدت افزایش می‌یابد (Mugunthan and Shoemaker, 2006; Tolson and Shoemaker, 2008; Cho and Olivera, 2014).

از سوی دیگر، یکی از کاستی‌های اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی آن است که در اکثر این مطالعات تنها از یک نوع داده واسنجی (مانند رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی یا جریان آبراهه‌ها در سطح حوضه‌های آبریز) استفاده شده و انجام تحلیل عدم قطعیت به‌صورت چندهدفه (استفاده از بیش از یک نوع داده واسنجی) چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالیست که تنوع داده‌های مورد استفاده در واسنجی مدل، موثرترین راهکار در جهت بهبود محتوای اطلاعاتی داده‌های واسنجی و کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل محسوب می‌گردد (Beven, 2009).

مدل SWAP (Kroes et al., 2017) یکی از مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی ریچاردز-بنیان می‌باشد که تا کنون به‌طور گسترده‌ای در ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت آب و شوری در سیستم‌های زراعی مورد استفاده قرار گرفته است (Xu et al., 2019). با توجه به تعدد پارامترهای مجهول این مدل، بررسی عدم قطعیت نتایج حاصل از آن حایز اهمیت است (Wesseling et al., 2020). با این حال،

واسنجی دست می‌یابد (Beven and Binley, 1992). این امر، عدم قطعیت برآورد پارامترهای مجهول و متعاقباً، نتایج شبیه‌سازی‌های مدل را به‌دنبال خواهد داشت.

به‌علاوه، منابع دیگری از عدم قطعیت، شامل عدم قطعیت ناشی از ساختار مدل شبیه‌سازی (به‌لحاظ فرضیات ساده‌سازی اتخاذ شده در توسعه مدل، شرایط اولیه و مرزی انتخابی، نحوه منفصل‌سازی معادلات دیفرانسیلی در حوضه زمان/مکان و روش حل عددی مورد استفاده)، داده‌های ورودی به مدل (نظیر داده‌های هواشناسی) و داده‌های واسنجی، شبیه‌سازی‌های مدل را متاثر می‌کند. این امر سبب گردیده است که پیش‌بینی‌های مدل‌های شبیه‌سازی تعیینی همواره با درجه‌ای از عدم قطعیت آمیخته باشد. روش‌های تحلیل عدم قطعیت ابزاری مفید به‌منظور کمی‌سازی اثر منابع مختلف عدم قطعیت یاد شده بر عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل به‌شمار می‌روند. یکی از رایج‌ترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، روش برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم یافته^۱ (GLUE) (Beven and Binley, 1992) می‌باشد. اساس این روش، نفی ایده وجود یک مجموعه منحصر به‌فرد از پارامترهای بهینه مدل طی فرآیند واسنجی و معرفی اصل همپایانی است. در روش GLUE، اثر تمامی منابع عدم قطعیت مورد اشاره در برآورد عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل قابل کمی‌سازی است (Yang et al., 2008). در روش GLUE، با تعریف یک تابع توزیع احتمال برای هریک از پارامترهای مجهول مدل (که به توزیع پیشین معروف است) و از طریق اجرای شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو با یک حجم نمونه از پیش تعیین شده، نسبت به نمونه‌گیری تصادفی از فضای پارامترهای مجهول مدل (فضای حاصل از دامنه تغییرات لحاظ شده برای پارامترهای مجهول در واسنجی مدل) اقدام می‌شود. متعاقباً، مدل شبیه‌سازی به‌ازای هریک از دسته پارامترهای نمونه‌گیری شده اجرا می‌شود. همچنین، با انتخاب یک معیار درست‌نمایی 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 می‌گردند. در ادامه، مجموعه دسته پارامترهای رفتاری به‌دست آمده مورد تحلیل قرار می‌گیرد. یکی از کاستی‌های روش GLUE آن است که به‌دلیل 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 بلااستفاده خواهد بود (Mugunthan and Shoemaker, 2006). همچنین، از آنجا که در اغلب موارد، تابع توزیع احتمال پیشین پارامترها خود مجهول بوده و اطلاعاتی در خصوص آن در دست پژوهشگران نیست، معمولاً از تابع

(شکل ۱) و با استفاده از بانک اطلاعات مزرعه‌ای گردآوری شده توسط صادقی لاری (۱۳۹۱) صورت گرفت. مجموعه داده‌های مورد استفاده در واسنجی و صحت‌سنجی مدل در جدول ۱ ارائه گردیده است. مزرعه مطالعاتی مجهز به زهکش زیرزمینی آزاد (با متوسط عمق کارگذاری ۲/۱ متر) بود.

روش تحقیق: طول دوره شبیه‌سازی برای مزرعه مورد مطالعه از ۲۸ تیر ۱۳۸۹ تا ۲۰ آذر ۱۳۹۰ (به مدت ۴۸۱ روز) در نظر گرفته شد. برای مزرعه مطالعاتی، ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر (معادل با عمق وقوع لایه محدود کننده) و متشکل از دو لایه با ویژگی‌هایی مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شد. داده‌های هواشناسی مربوط به دوره مطالعاتی از ایستگاه هواشناسی مزرعه نمونه منطقه مطالعاتی جمع‌آوری گردید. به منظور محاسبه تبخیر-تعرق زیرروزانه (با مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه‌ای) از چارچوب ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۴الف) و ویرایش تصحیح شده مدل پنمن-مانتیت ASCE (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴ب) برای منطقه مطالعاتی استفاده شد. با توجه به وسعت قابل توجه مزرعه مطالعاتی (حدود ۲۱ هکتار) و عدم امکان آبیاری یکباره آن، به منظور در نظر گرفتن اثر آبیاری تدریجی مزرعه بر شبیه‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی، مدل SWAP از طریق تعریف تعداد ۱۰ واحد شبیه‌سازی همگن (موسوم به هیدروتوپ) به شیوه توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت. همچنین، با تعریف زیرروزانه هریک از رویدادهای آبیاری محقق شده در مزرعه، امکان در نظر گرفتن زمان‌های اعمال رویدادهای آبیاری طی ساعات شبانه‌روز در بخش‌های مختلف مزرعه فراهم گردید.

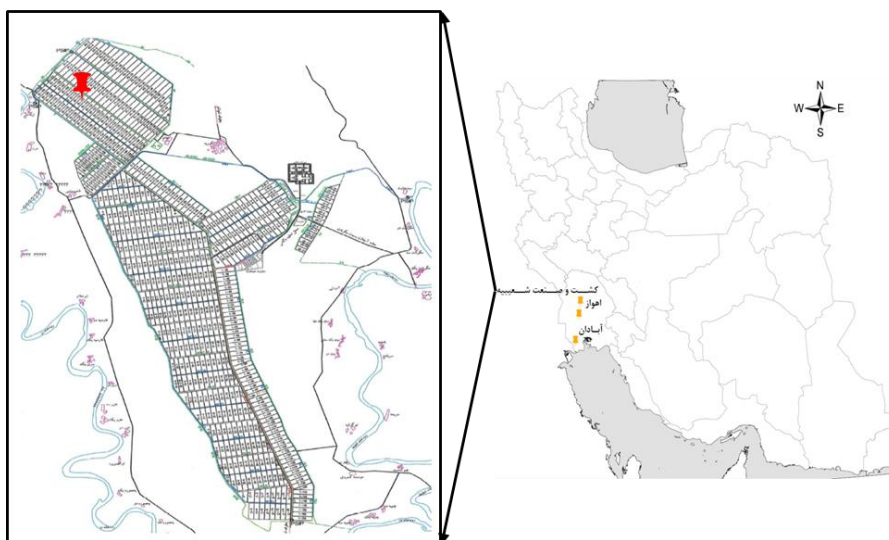
مقادیر از پیش تعیین شده جریان از کف نیم‌رخ خاک با میزان شوری معین (شرط مرزی نیومن) به عنوان شرط مرزی پایین دست نیم‌رخ خاک در نظر گرفته شد. میزان جریان از کف در پنج مقطع زمانی از طول دوره شبیه‌سازی (با فواصل زمانی مساوی) از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر گام‌های زمانی از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد گردید. میزان شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیم‌رخ خاک، هریک به عنوان یک پارامتر مجهول از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. به منظور مدل‌سازی سیستم زهکشی از رویکرد سیستم زهکشی چندگانه (Kroes et al., 2017) استفاده شد. مزرعه مطالعاتی علاوه بر مجهز بودن به سیستم زهکشی زیرزمینی، در مجاورت یک زهکش جمع‌کننده روباز نیز قرار داشت. بنابراین، برای سیستم زهکشی مزرعه، یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی (با ویژگی‌های یکسان برای هر ۱۰ هیدروتوپ) در نظر گرفته شد.

به دلایل مختلفی از جمله حجم محاسبات مورد نیاز و بعضاً دشواری پیاده‌سازی روش‌های تحلیل عدم قطعیت، پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه تحلیل عدم قطعیت مدل SWAP انگشت‌شمار بوده‌اند (Ines and Mohanty, 2008; Pollacco and Mohanty, 2012; Shafiei et al., 2014; Wesseling et al., 2020). یکی از کاستی‌های معدود پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل SWAP، تمرکز صرف پژوهشگران بر تحلیل عدم قطعیت پارامترهای هیدرولیکی خاک و فرض بر معلوم بودن سایر پارامترهای مدل بوده است. این در حالی است نتایج مطالعات متعدد نشان داده است که به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب مدل، اهمیت واسنجی دیگر پارامترهای مجهول مدل نظیر پارامترهای گیاهی، پارامترهای انتقال املاح و سایر پارامترهای دخیل در شبیه‌سازی انتقال آب در خاک (نظیر ویژگی‌های سیستم زهکشی و شرایط مرزی) کمتر از اهمیت واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک نیست (Singh et al., 2006; Vazifedoust et al., 2008; Jiang et al., 2019; Xu et al., 2016). بنابراین، در این شرایط، نتایج حاصل از آنالیز عدم قطعیت مدل عملاً، واقع‌بینانه نخواهد بود.

طی پژوهشی، پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) با کاربرد نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP (Kroes et al., 2017)، یک طرح مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی ریچاردز-بنیان به شیوه توزیعی و با قابلیت واسنجی زیرروزانه را توسعه دادند. چارچوب توسعه یافته در شرایط واقعی بهره‌برداری از مزارع وسیع مجهز به زهکش‌های فرعی زیرزمینی و جمع‌کننده سطحی در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، خوزستان با موفقیت مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. هدف از پژوهش حاضر، افزودن مولفه تحلیل عدم قطعیت چندهدفه مبتنی بر شبیه‌سازی‌های مهار شده مونت‌کارلو از طریق تلفیق GLUE با گونه یکپارچه الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا^۱ (UPSO) (Parsopoulos and Vrahatis, 2004) به طرح مدل‌سازی توسعه یافته بوده است. به گونه‌ای که از طریق آن بتوان عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های توزیعی/غیرتوزیعی مدل SWAP را در شرایط استفاده از ترکیب‌های دلخواهی از پارامترهای مجهول مدل و داده‌های واسنجی و با استفاده از کامپیوترهایی با توان محاسباتی متعارف و قابل دسترس برای محققان کشور مورد بررسی قرار داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: پژوهش حاضر در یکی از مزارع تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول، رقم CP48-103) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، بین طول جغرافیایی ۳۷°، ۴۸' تا ۴۸°، ۵۰' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱°، ۳۷' تا ۳۲°، ۰۰' شمالی)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزرعه مطالعاتی

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزرعه مطالعاتی در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه).

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

مؤلفه مورد ارزیابی مدل	داده واسنجی	مرحله واسنجی	مرحله صحت‌سنجی	معیار شناسایی
شبیه‌سازی انتقال آب	نیم‌رخ رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	✓	✓	$EF > 0.7$
	عمق سطح ایستابی (cm)	✓	✓	
	جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی (cm d^{-1})	✓	✓	
شبیه‌سازی انتقال املاح	شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی (dS m^{-1})	✓	✓	$NRMSE < 0.2$
	نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک (dS m^{-1})	✓	✓	
شبیه‌سازی متغیرهای بیوفیزیکی	شاخص سطح برگ ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$)	✓	✓	$EF > 0.7$
	عملکرد ماده خشک نی (ton ha^{-1})	✓	✓	
	عملکرد ماده خشک ساکارز (ton ha^{-1})	✓	✓	

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه.

عمق (cm)	بافت خاک	شن سیلت رس (%)	جرم ویژه ظاهری کربن آلی آهک pH شوری عصاره اشباع (g cm^{-3})	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
۳۰ -	لوم رسی سیلتی	۱۰/۰۰	۵۷/۰۰	۳۳/۰۰	۱/۶۶	۱/۵۵	۳۶/۴۲	۷/۹۰
۳۰ >	لوم رسی سیلتی	۱۱/۳۳	۵۰/۶۷	۳۸/۰۰	۱/۶۶	۰/۷۶	۳۶/۱۶	۷/۹۸

زه‌آب (متر) است.

به‌منظور مدل‌سازی انتقال املاح، دو فرآیند انتقال توده‌ای و جذب سطحی املاح (مبتنی بر ایزوترم جذب خطی) در نظر گرفته شد. به‌منظور شبیه‌سازی متغیرهای بیوفیزیکی از مدل گیاهی WOFOST (Supit et al., 1994) استفاده شد. پارامترهای حساس این مدل بر اساس پژوهش‌های مشابه گذشته (Bessembinder et al., 2003) شناسایی شده و مقادیر آن‌ها از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد گردید. با توجه به طول دوره زمانی قابل توجه رشد و توسعه گیاه

زه‌آب خروجی از هر هیدروتوپ با مشخص بودن طول مسیر انتقال زه‌آب به سمت نقطه خروجی سیستم زهکش زیرزمینی از طریق رابطه ساده زیر روندیابی گردید:

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

که در آن: $T_{d,i}$ و $L_{outlet,i}$ به ترتیب، طول مسیر (متر) و زمان تاخیر (ساعت) رسیدن زه‌آب خروجی از هیدروتوپ i ام به نقطه خروجی، T_c متوسط زمان انتقال زه‌آب به خروجی سیستم زهکشی (ساعت) و $L_{outlet,max}$ بیانگر فاصله دور دست‌ترین هیدروتوپ از نقطه خروجی

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 (Loague and Green, 1991).

پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که در صورت بروز تناقض در ارزیابی عملکرد مدل بر اساس آماره‌های EF و NRMSE، استفاده از آن‌ها به ترتیب، برای ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌های واسنجی با واریانس بالا و واریانس پایین نسبت به دیگری ارجح است. بر این اساس، به منظور متمایز ساختن دسته پارامترهای رفتاری و غیررفتاری از یکدیگر، دسته پارامتری که شبیه‌سازی‌های حاصل از آن به طور هم‌زمان تمامی معیارهای وضع شده در جدول ۱ را برآورده ساخت، به عنوان یک دسته پارامتر رفتاری در نظر گرفته شد. از مقادیر تابع برازش مساله مدل‌سازی معکوس مربوط به هر یک از دسته پارامترهای رفتاری شناسایی شده به عنوان معیار درست‌نمایی در محاسبه مقادیر وزن‌های درست‌نمایی (رابطه (۴)) استفاده شد. بدین ترتیب، با اطلاق یک وزن درست‌نمایی w_i به هر یک از دسته پارامترهای رفتاری اشتقاقی، کران‌های عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل در قالب صدک‌های توابع توزیع احتمال تجمعی استنتاجی (که به توزیع پسین معروف است) محاسبه شد.

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

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

متعاقباً، از وزن‌های درست‌نمایی محاسباتی به منظور تعیین محدوده‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) مربوط به هر یک از سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده داده‌های واسنجی استفاده شد. محدوده‌های عدم قطعیت اشتقاق یافته با استفاده از آماره‌های p-factor و r-factor مورد ارزیابی قرار گرفتند (Abbaspour, 2008):

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

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

که در آنها: $P_i^{97.5\%}$ 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 می‌باشد. آماره p-factor بیانگر درصدی از داده‌های اندازه‌گیری شده است که در داخل محدوده 95PPU واقع گردیده‌اند. آماره r-factor بیانگر نسبت متوسط ضخامت محدوده 95PPU به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده

نیشکر (حدود ۱۵ ماه) مقادیر پارامترهای گیاهی S_{LA} و A_{max} () در نه مقطع از دوره رشد گیاه (با فواصل مساوی و بر اساس مجموع دما) از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر ایام از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد گردید.

تحلیل عدم قطعیت مدل: در این مطالعه، از طریق برنامه‌نویسی فترن و ++C چندپردازشی و با ترکیب روش GLUE و الگوریتم UPSO یک طرح تحلیل عدم قطعیت ترکیبی مبتنی بر شبیه‌سازی‌های مهبار شده مونت کارلو توسعه یافت. به منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، مجموعاً، ۴۴ پارامتر مجهول (جدول ۳) در نظر گرفته شد. محدوده تغییرات مجاز پارامترهای مجهول مدل بر اساس منابع علمی (Schaap and Leij, 1998; Scarpore, 2011; Kroes et al., 2017) مزرعه‌ای تعیین گردید (جدول ۳). کران پایین دامنه تغییرات مجاز پارامتر رطوبت اشباع، θ_{sat} ، بر اساس حداکثر مقدار رطوبت حجمی مشاهداتی تعیین شد. فرآیند واسنجی پارامترهای مجهول مدل توسعه یافته 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 مفروض، مجموعاً، ۱/۳۵ میلیون مرتبه اجرای مستقل مدل (SWAP) صورت گرفت. مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است. در پژوهش حاضر، از مجموع وزنی آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده (NRMSE، رابطه (۲)) حاصل از مقایسه مقادیر داده‌های واسنجی با داده‌های شبیه‌سازی شده با ضرایب وزنی یکسان به عنوان تابع برازش مساله مدل‌سازی معکوس تک‌هدفه استفاده شد. پس از اجرای مدل به‌ازای هر یک از دسته پارامترهای تصادفی تولید شده، عملکرد مدل در بازسازی داده‌های واسنجی با استفاده از آماره‌های NRMSE و ضریب کارایی مدل، EF، مورد ارزیابی قرار گرفت. آماره‌های فوق به شرح زیر قابل محاسبه می‌باشند (Parchami-Araghi et al., 2013):

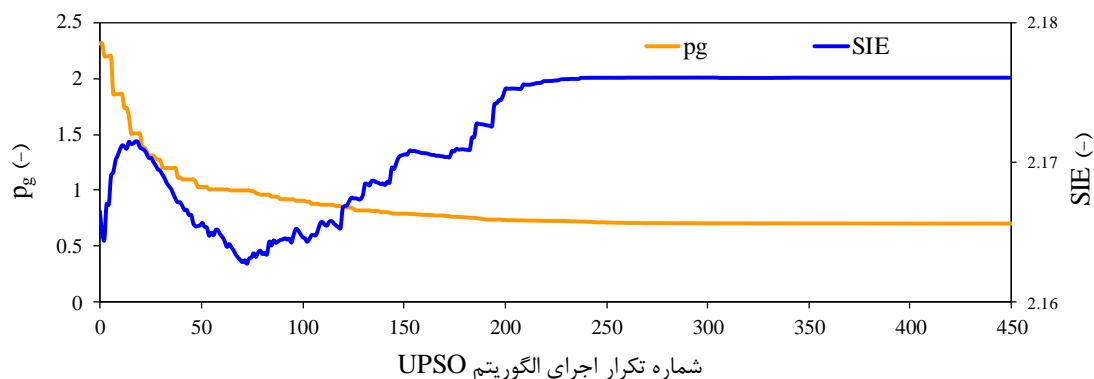
$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{m}} / \bar{O} \quad (2)$$

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

که در آنها: O مقدار اندازه‌گیری شده، P مقدار شبیه‌سازی شده و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و m تعداد مقایسه‌ها می‌باشد. مقادیر آماره ضریب کارایی مدل در دامنه ۰/۸ تا ۱/۰، ۱/۰ تا ۰/۷، ۰/۷ تا ۰/۵ 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 (Moriassi et al., 2007). همچنین،

جواب‌های یافت شده ذرات ازدحام در هر تکرار به سرعت در حال تغییر هستند. بر اساس شکل ۲، مقادیر آماره SIE حاکی از آن است که از تکرار ۲۵۰ به بعد، مقادیر تابعی بهترین موقعیت‌های تجربه شده ذرات ازدحام تغییرات قابل توجهی نداشته است. بدین معنا که از تکرار فوق به بعد، تغییر قابل توجهی در مقادیر تابعی بهترین موقعیت‌های تجربه شده توسط ذرات مختلف رخ نداده است که این امر در مورد مقادیر بهینه‌سازی شده تابع هدف نیز صدق می‌کند.

مقادیر بهینه پارامترهای مجهول لحاظ شده در طرح مدل‌سازی معکوس به همراه آماره‌های توصیفی مجموعه پارامترهای رفتاری (حاوی تعداد ۷۹۱۴ دسته پارامتر رفتاری منحصر به فرد) استنتاجی از طرح تحلیل عدم قطعیت توسعه یافته در جدول ۳ ارائه شده است. حصول نتایج مشابه با پژوهش پرجمعی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) برای مقادیر بهینه‌سازی شده پارامترهای مجهول مدل حاکی از قابلیت بالای الگوریتم UPSO در جستجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس طرح‌ریزی شده است.



شکل ۲- تغییرات بهترین مقدار سراسری تابع هدف (p_g) و نمایه انتروپی اطلاعات شانن (SIE) طی تکرارهای مدل‌سازی معکوس.

مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک حاکی از غیریکتایی قوی پارامترهای هیدرولیکی برآورد شده می‌باشد. این نتیجه با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های مشابه گذشته (Binley and Beven, 2003; Shafiei et al., 2012; Pollacco and Mohanty, 2014) مطابقت دارد. دلیل اصلی پایین بودن ضریب تغییرات پارامتر θ_{sat} را می‌توان به محدود کردن دامنه تغییرات مجاز این پارامتر از طریق حداکثر مقدار داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک نسبت داد. همان‌طور که از شکل ۳ نیز قابل استنباط است، مقادیر رفتاری این پارامتر ضمن پوشش دادن بخش عمده‌ای از دامنه تغییرات مجاز در نظر گرفته شده برای آن، بر کران پایین دامنه تغییرات این پارامتر متمرکز شده‌اند. این در حالی است که دامنه تغییرات مجاز سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد بررسی با در نظر گرفتن دامنه تغییرات مجاز فیزیکی آن‌ها بر اساس بانک اطلاعات خاک گردآوری

می‌باشد (Yang et al., 2008). در شرایط ایده‌آل، مقدار آماره‌های p -factor و r -factor به ترتیب، برابر با ۱۰۰ درصد و صفر است. در کاربردهای مدل‌سازی هیدرولوژیکی منطقه‌ای و شبیه‌سازی جریان آب‌سراهه، p -factor $> 70\%$ و r -factors $< 1/5$ به عنوان نتایج رضایت‌بخش در نظر گرفته می‌شود (Abbaspour et al., 2007).

نتایج و بحث

روند تغییرات بهترین مقدار سراسری تابع هدف مساله مدل‌سازی معکوس (p_g) و نمایه انتروپی اطلاعات شانن (SIE) طی تکرارهای فرآیند واسنجی پارامترهای مجهول مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. نمایه SIE معیاری از پراکنش مقادیر تابعی بهترین موقعیت‌های تجربه شده هریک از ذرات ازدحام در هر تکرار بوده و اطلاعاتی در خصوص رفتار الگوریتم بهینه‌سازی در یافتن نواحی امیدبخش فضای پارامتر فراهم می‌آورد. تغییرات شدید SIE طی تکرارهای اجرای الگوریتم مبین آن است که بهترین

به‌طور کلی، مقادیر آماره ضریب تغییرات (CV) کوچکتر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد و بزرگتر از ۷۵ درصد به ترتیب، به‌عنوان تغییرپذیری ناچیز، بینابینی و تغییرپذیری بالای کمیت مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود (UNEP, 2015). مقایسه ضریب تغییرات مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک در مزرعه مطالعات (جدول ۳) حاکی از تغییرپذیری بالاتر پارامترهای α و K_{sat} در مقایسه با پارامترهای n (به جز در مورد لایه دوم خاک) و θ_{sat} می‌باشد. بنابراین، می‌توان گفت در مقایسه با پارامترهای n و θ_{sat} ، تابع برازش مورد استفاده در مدل‌سازی معکوس از حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای α و K_{sat} برخوردار بوده است. به‌عنوان نمونه، اندرکنش مقادیر رفتاری پارامترهای هیدرولیکی مربوط به دو لایه خاک در نظر گرفته شده برای مزرعه مطالعاتی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این مشاهده می‌شود، نحوه پراکنش

سطح حساسیت پارامترهای S_{LA} و A_{max} طی دوره رشد گیاه حاکی از اهمیت در نظر گرفتن مقادیر این پارامترها به‌عنوان تابعی از مرحله رشد گیاه است. این در حالیست که در اکثر مطالعات مشابه، مدل بر اساس فرض یک مقدار یکتا برای پارامترهای فوق‌واسنجی شده است (Li and Ren, 2019; Vazifedoust et al., 2008).

مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون در ماتریس همبستگی محاسبه شده برای پارامترهای رفتاری در دامنه بین -0.95 تا 0.97 متغیر بود. به‌طور کلی، مقادیر مطلق ضریب همبستگی پیرسون در بازه‌های $0/0$ تا $0/2$ ، $0/4$ تا $0/7$ ، $0/7$ تا $0/9$ و $0/9$ تا $1/0$ به‌ترتیب، به‌عنوان وجود همبستگی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی بین دو متغیر مورد بررسی دسته‌بندی می‌شود (Soleimannejad, 2004). بر این اساس، $0.18/0.25$ و $0.2/0.4$ درصد از ضرایب همبستگی در ماتریس همبستگی محاسبه شده به‌ترتیب، در کلاس‌های همبستگی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و بسیار قوی قرار داشتند. این امر حاکی از اندرکنش قابل توجه بین پارامترهای لحاظ شده در تحلیل عدم قطعیت مدل و توانایی طرح تحلیل عدم قطعیت توسعه یافته در جستجوی سراسری و متمرکز نواحی رفتاری فضای پارامترهای مجهول و نمایان ساختن این اندرکنش است. مقادیر آماره‌های مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر آماره EF حاکی از عملکرد بسیار خوب و خوب مدل به‌ترتیب، در بازسازی مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی عمق سطح ایستابی، جریان زه‌آب خروجی، شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز است. همچنین، مقادیر آماره NRMSE حاکی از عملکرد بسیار خوب مدل در بازسازی هر دو مجموعه داده واسنجی و صحت‌سنجی رطوبت خاک، نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب می‌باشد.

مقادیر آماره p-factor (جدول ۳) حاکی از آن است که محدوده‌های 95PPU اشتقاق یافته برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده مرتبط با مولفه هیدرولوژی مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی (رطوبت خاک، نوسانات سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی) بین ۵۷ تا ۹۴ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و بین ۷۲ تا ۸۵ درصد از مجموعه داده‌های صحت‌سنجی را در بر گرفته‌اند. بنابراین، می‌توان گفت 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 ۳) مربوط به محدوده 95PPU اشتقاق یافته برای سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده فوق‌برای مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب، بین 0.51 تا $1/11$ و $0/67$ تا $1/97$ متغیر بود.

شده توسط شاپ و لیژ (Schaap and Leij, 1998) تعیین گردید. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر n عملاً، حساس‌ترین پارامتر هیدرولوژیکی خاک بوده است. این یافته با نتیجه پژوهش‌های گذشته که نشان دادند پارامتر n تنها پارامتر مدل ونگنوختن است که می‌تواند بیانگر بافت خاک باشد، مطابقت دارد (Haverkamp et al., 2005).

بر اساس جدول ۳، در مقایسه با لایه خاک زیرسطحی، مقادیر پارامترهای هیدرولوژیکی لایه سطحی خاک از تغییرپذیری کمتری برخوردار بوده‌اند. 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. این نتیجه بیانگر اهمیت محتوای اطلاعاتی داده‌های واسنجی در کاهش عدم قطعیت برآورد پارامترهای مجهول مدل است. این امر در مورد ضریب تغییرات مقادیر رفتاری ترم‌های جریان از کف (جدول ۳) نیز صادق است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، ضریب تغییرات این ترم (و لذا، عدم قطعیت برآورد آن) در مقطع زمانی چهارم دوره شبیه‌سازی که دارای بیشترین فراوانی داده‌های واسنجی بوده است (شکل ۴ تا شکل ۶)، به حداقل مقدار خود رسیده است. ضرایب تغییرات مقادیر رفتاری پارامترهای انتقال املاح نیز حاکی از عدم قطعیت بالای پارامترهای برآورد شده است. در مقایسه با سایر پارامترهای انتقال املاح لحاظ شده در تحلیل عدم قطعیت، پارامتر ضریب ایزوترم جذب خطی برای لایه زیرسطحی خاک، $(K_p)_2$ ، 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 تغییرات شوری عصاره اشباع خاک و زه‌آب خروجی، برداشت آب از طریق ریشه گیاه و لذا، 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 حاکی از تغییرپذیری اندک آنها و لذا، حساسیت قابل توجه تابع هدف مساله مدل‌سازی معکوس نسبت به پارامترهای فوق‌برده است. بر همین اساس، می‌توان گفت که در مقایسه با ترم مقاومت زهکشی جمع‌کننده سطحی، $\gamma_{\text{drain}2}$ ، تابع هدف مدل‌سازی معکوس از حساسیت قابل توجهی نسبت به ترم مقاومت زهکشی زیرزمینی برخوردار بوده است. همچنین، مقدار اندک ضریب تغییرات مقادیر رفتاری پارامتر T_c حاکی از عدم قطعیت پایین برآورد این پارامتر است که دلیل اصلی این امر ناشی از محدود کردن دامنه تغییرات مجاز آن بر اساس مشاهدات مزرعه‌ای است.

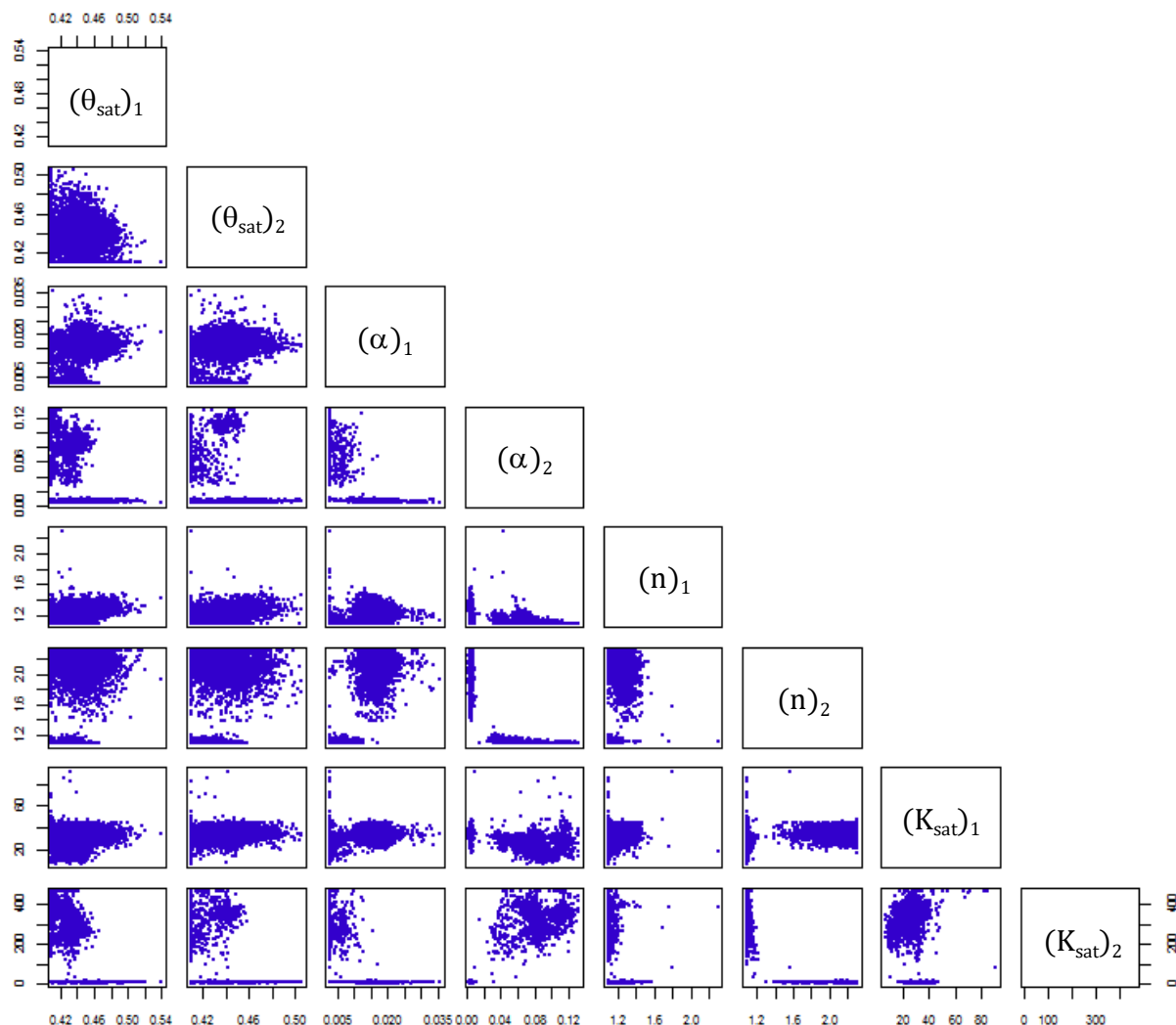
همین‌طور، ضریب تغییرات مقادیر رفتاری پارامترهای گیاهی برآورد شده نیز حاکی از حساسیت قابل توجه پارامترهای T_{SUMEA} ، S_{LA} (در بخش عمده‌ای از دوره رشد گیاه)، EFF و A_{max} (در مقاطع چهارم و پنجم از دوره رشد گیاه) می‌باشد. تغییرات مقادیر بهینه و

جدول ۳- مقادیر دامنه تغییرات مجاز، بهترین پارامترهای واسنجی و آماره‌های توصیفی مجموعه پارامترهای رفتاری برای مدل توسعه یافته در مزرعه مطالعاتی. (۹)

پارامترهای رفتاری		دامنه تغییرات مجاز (حداکثر - حداقل)		پارامترهای رفتاری		دامنه تغییرات مجاز (حداکثر - حداقل)		پارامترهای واسنجی		شرح	
ضریب تغییرات (درصد)	میانگین	مقدار بهینه	مقدار بهینه	ضریب تغییرات (درصد)	میانگین	مقدار بهینه	مقدار بهینه	ضریب تغییرات (درصد)	میانگین	شرح	پارامتر
۱/۱	۵۲۸۷/۵۲۰	۵۵۲۲/۴۹۹	۵۴۰۰/۱۰۰۰ - ۶۰۰۰/۱۰۰۰	۴/۱	۰/۴۴۰	۰/۴۴۸	۰/۴۰۰ - ۰/۵۴۰	۴/۱	۰/۴۴۰		$(\theta_{sat})_1$
۵۴/۶	۱۹۸۴/۳۴۱	۱۳۹۰/۹۵۹	۶۴۲/۱۰۰۰ - ۴۵۰۰/۱۰۰۰	۴/۴	۰/۴۴۱	۰/۴۴۲	۰/۴۰۰ - ۰/۵۴۰	۴/۴	۰/۴۴۱		$(\theta_{sat})_2$
۲۹/۷	۰/۳۳۲	۰/۳۲۸	۰/۰۱۵۰ - ۰/۰۵۰۰	۶۲/۳	۰/۰۱۱	۰/۰۱۷	۰/۰۰۳ - ۰/۰۱۳۲	۶۲/۳	۰/۰۱۱		$(\alpha)_1$
۴۵/۴	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۱۰/۷/۶	۰/۰۳۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳ - ۰/۰۱۳۲	۱۰/۷/۶	۰/۰۳۵		$(\alpha)_2$
۴۳/۵	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۷/۳	۱/۸۸۸	۱/۸۳۶	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۷/۳	۱/۸۸۸		$(n)_1$
۱۸/۳	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۳۰/۲	۱/۷۱۴	۲/۱۴۳	۱/۰۹۰ - ۲/۳۰۰	۳۰/۲	۱/۷۱۴		$(n)_2$
۱۴/۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۲۳/۵	۲۹/۵۰۲	۳۳/۶۹۳	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۱۰۰۰	۲۳/۵	۲۹/۵۰۲		$(K_{sat})_1$
۱۲/۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۱۱۵/۹	۱۴۱/۴۹۸	۱۱/۲۲۰	۰/۴۸۰ - ۴۶۵/۱۰۰۰	۱۱۵/۹	۱۴۱/۴۹۸		$(K_{sat})_2$
۲۹/۲	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۷۷/۷	۰/۰۱۷	۰/۰۰۹	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۷۷/۷	۰/۰۱۷		$(q_{Bot})_1$
۳۱/۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۶۰/۸	۰/۰۲۰	۰/۰۱۶	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۶۰/۸	۰/۰۲۰		$(q_{Bot})_2$
۷۴/۵	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۱۰۸/۳	۰/۰۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۱۰۸/۳	۰/۰۱۰		$(q_{Bot})_3$
۲۷/۴	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۴ - ۰/۰۰۱۹	۳۵/۹	۰/۰۱۰	۰/۰۱۰	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۳۵/۹	۰/۰۱۰		$(q_{Bot})_4$
۱۶/۸	۰/۵۷۱۶	۰/۵۱۳۳	۰/۰۳۰۰ - ۰/۰۸۰۰	۷۲/۵	۰/۰۱۶	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰ - ۰/۰۴۱	۷۲/۵	۰/۰۱۶		$(q_{Bot})_5$
۴۲/۶	۳۹/۳۳۲	۲۹/۹۷۹	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۷۲/۸	۲۶/۶۰۹	۴۰/۸۹۱	۰/۵۰۰ - ۶۵/۱۰۰۰	۷۲/۸	۲۶/۶۰۹		$(D_{dis})_1$
۶۳/۰	۱۳/۰۴۲	۱۸/۹۱۷	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۸۴/۰	۱۳/۴۵۶	۳/۷۰۳	۰/۵۰۰ - ۶۵/۱۰۰۰	۸۴/۰	۱۳/۴۵۶		$(D_{dis})_2$
۶۸/۶	۴/۸۱۹	۵/۳۹۹	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۱۴۲/۵	۳۰/۴۵۵	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰ - ۹۹/۱۰۰۰	۱۴۲/۵	۳۰/۴۵۵		$(K_f)_1$
۲۱/۰	۵۵/۴۷۳	۶۱/۸۶۹	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۲۲/۰	۷۰/۷۰۷	۸۲/۰۹۶	۰/۰۰۰ - ۹۹/۱۰۰۰	۲۲/۰	۷۰/۷۰۷		$(K_f)_2$
۱۶/۷	۶۸/۹۸۶	۷۷/۰۳۲	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۱۷/۲	۲/۳۹۸	۲/۳۹۷	۱/۳۰۰ - ۳/۵۰۰	۱۷/۲	۲/۳۹۸		C_{gw1}
۶۴/۸	۳۰/۳۴۰	۴۱/۵۶۵	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۲۰/۷	۳/۶۵۴	۳/۳۹۸	۱/۳۰۰ - ۵/۵۰۰	۲۰/۷	۳/۶۵۴		C_{Bot}
۶۴/۳	۲۷/۵۹۷	۳۹/۰۶۰	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۶/۷	۱۳۰/۵۹۲	۱۲۵/۹۲۸	۵۰/۱۰۰۰ - ۲۵۰/۱۰۰۰	۶/۷	۱۳۰/۵۹۲		γ_{drain}
۷۱/۴	۲۷/۸۵۹	۲۴/۲۸۶	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۳۵/۹	۵۵۴/۹۰۳	۴۰۴/۰۵۲	۱۰۰۰/۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰/۱۰۰۰	۳۵/۹	۵۵۴/۹۰۳		γ_{drain2}
۱۳۲/۹	۲/۹۷۴	۱/۹۹۱	۰/۰۰۰ - ۸۵/۱۰۰۰	۱۴/۶	۱/۵۵۴	۱/۶۶۱	۰/۸۰۰ - ۲/۱۰۰۰	۱۴/۶	۱/۵۵۴		T_c

(۹) در جدول فوق، θ_{sat} رطوبت خاک در حالت اشباع $(cm^3 cm^{-3})$ ، α ، n ، (cm^{-1}) ، (cm^{-1}) ، (cm^{-1}) ، m (بدون بعد)، λ (بدون بعد)، K_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع $(cm d^{-1})$ مورد استفاده در مدل‌های معلم و ون گیوختن، D_{dis} و K_f به ترتیب ضریب انتشارپذیری (cm) ، ضریب ایزوترم جذب خطی $(cm^3 g^{-1})$ ، q_{Bot} جریان از کف $(cm d^{-1})$ ، C_{Bot} ضریب جریان از کف $(mg cm^{-3})$ ، d_{min2} ، γ_{drain2} و γ_{drain} به ترتیب مقاومت ضریب زهکشی سیستم، ضریب زهکشی مقاوم (d) ، مقاومت زهکشی جمع کننده روباز (d) و متوسط زمان انتقال زهاب به خروجی سیستم زهکشی (h) ، C_{gw} ضریب آب زیرزمینی $(m^2 m^{-2} d^{-1})$ ، S_{LA} ، RGR_LAI ، J_{SUMAM} ، T_{SUMEA} ، J_{SUMAM} ، T_{SUMEA} ، EFF به ترتیب بیانگر مجموع دما از مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی $(^{\circ}C)$ ، مجموع دما از مرحله گل‌دهی تا بلوغ $(^{\circ}C)$ ، حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ $(m^2 m^{-2} d^{-1})$ ، سطح ویژه برگ $(ha kg^{-1})$ ، حداکثر شدت جذب دی‌اکسید کربن $(kg CO_2 m^{-2} d^{-1})$ و راندمان مصرف نور در یک برگ منفرد $(J m^{-2} s^{-1} / J m^2 ha^{-1} s^{-1})$ می‌باشد.

پارامترهای سیستم زهکشی



شکل ۳- ماتریس نمودارهای پراکنش مجموعه رفتاری پارامترهای هیدرولیکی خاک (Error! Reference source not found.)، مشتمل بر ۷۹۱۴ دسته پارامتر رفتاری منحصر به فرد.

است. با این حال، بر اساس آماره r-factor ضخامت محدوده 95PPU طی دوره صحت‌یابی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است.

این امر از شکل ۵ نیز قابل استنباط است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، دلیل اصلی حصول مقدار بالای آماره r-factor ناشی از ضخامت قابل توجه محدوده 95PPU مربوط به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای لایه سطحی خاک (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) می‌باشد. بر اساس شکل ۵، با افزایش عمق از سطح خاک، ضخامت محدوده 95PPU کاهش یافته است. بر اساس مقادیر آماره‌های p-factor و r-factor مربوط به شبیه‌سازی‌های مدل برای شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه (جدول ۳) و نیز شکل ۶ می‌توان گفت که به‌دلیل ضخامت ناچیز محدوده 95PPU به‌دست آمده برای شبیه‌سازی‌های فوق، بخش اندکی از مجموعه

بر اساس مقادیر این آماره و شکل ۴ می‌توان گفت که در اغلب موارد، ضخامت محدوده‌های 95PPU اشتقاق یافته 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 به‌قیمت افزایش مفرط ضخامت این محدوده صورت نگرفته است. این امر بیانگر سطح قابل قبول عدم قطعیت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از طریق مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی و نیز عملکرد موفقیت‌آمیز چارچوب تحلیل عدم قطعیت توسعه یافته در کمی‌سازی اثر بخش عمده‌ای از منابع عدم قطعیت بر شبیه‌سازی‌های مولفه هیدرولوژی مدل است. بر اساس آماره p-factor (جدول ۳)، محدوده 95PPU اشتقاق یافته برای شبیه‌سازی‌های نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک به‌ترتیب، ۹۲ و ۵۸ درصد از مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی را در بر گرفته

دلایل این امر از ساده‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی انتقال املاح در مدل SWAP به لحاظ مدل‌سازی یک‌بعدی جریان آب و املاح در خاک و عدم مدل‌سازی منطقه‌ای آب زیرزمینی ناشی می‌شود.

داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی (به ترتیب، ۱۳ و ۲۸ درصد) در این محدوده قرار گرفته‌اند. این امر حاکی از وجود محدودیت در انعکاس یافتن اثر منابع مختلف عدم قطعیت شبیه‌سازی شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه در پارامترهای مجهول مدل است. یکی از

جدول ۳- 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				
۱/۱۱	۹۴	۰/۹۰۱	۰/۰۲۷	۹	۱۷	واسنجی	رطوبت خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
۱/۹۷	۸۵	۰/۵۱۴	۰/۰۴۱	۶	۱۳	صحت‌سنجی	
۱/۳۴	۹۰	۰/۸۱۰	۰/۰۳۴	۸	۳۰	کل مجموعه داده	
۰/۵۶	۵۷	۰/۸۳۷	۰/۱۷۷	-۴۳	۹۴	واسنجی	عمق سطح ایستابی (cm)
۱/۰۵	۷۵	۰/۷۹۸	۰/۲۱۵	-۴۸	۱۲۲	صحت‌سنجی	
۰/۷۸	۶۷	۰/۸۳۷	۰/۱۹۶	-۴۷	۲۱۶	کل مجموعه داده	
۰/۵۱	۶۲	۰/۸۷۷	۰/۲۰۷	۵۹	۸۱	واسنجی	جریان زه‌آب خروجی (cm d^{-1})
۰/۶۷	۷۲	۰/۶۷۲	۰/۲۷۴	۴۸	۱۲۹	صحت‌سنجی	
۰/۵۸	۶۸	۰/۷۶۲	۰/۲۶۴	۵۴	۲۱۰	کل مجموعه داده	
۰/۸۸	۹۲	۰/۹۸۰	۰/۰۳۹	۲۸	۱۲	واسنجی	نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک (dS m^{-1})
۳/۴۵	۵۸	-۲/۱۱۴	۰/۱۵۴	۹	۱۲	صحت‌سنجی	
۱/۰۷	۷۱	۰/۸۴۰	۰/۱۰۲	۲۵	۲۴	کل مجموعه داده	
۰/۲۶	۱۳	-۰/۲۰۴	۰/۰۸۶	۸	۱۵	واسنجی	شوری زه‌آب (dS m^{-1})
۰/۵۸	۲۸	-۰/۰۶۲	۰/۰۶۶	۶	۲۵	صحت‌سنجی	
۰/۴۳	۲۳	-۰/۱۰۹	۰/۰۷۴	۷	۴۰	کل مجموعه داده	
۰/۹۸	۹۰	۰/۹۹۵	۰/۰۴۸	۶۹	۳۹	واسنجی	شاخص سطح برگ ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
۰/۷۰	۷۵	۰/۹۹۹	۰/۰۱۴	۵۷	۴	واسنجی	عملکرد نی (ton ha^{-1})
۰/۷۲	۱۰۰	۰/۹۷۲	۰/۰۹۶	۵۸	۴	واسنجی	عملکرد ساکارز (ton ha^{-1})

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

برای شبیه‌سازی‌های متغیرهای بیوفیزیکی است. این نکات از شکل ۴ نیز قابل استنباط است. در این شکل، مقدار شاخص سطح برگ برابر با صفر در روزهای انتهایی دوره شبیه‌سازی به معنای مرگ گیاه و لذا، توقف فرآیندهای تعرق، فتوسنتز و تولید ماده خشک می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، دامنه عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های عملکرد ماده خشک نی و ساکارز در طول دوره رشد گیاه به‌طور تدریجی افزایش یافته و در مراحل انتهایی به حداکثر میزان خود رسیده است. با توجه به اینکه در مدل SWAP، میزان عملکرد محصول شبیه‌سازی شده به‌صورت تجمعی در طول فصل رشد گیاه محاسبه می‌شود، ویژگی‌های رشد گیاه در مراحل آغازین و میانی رشد، می‌تواند طول دوره رشد گیاه و لذا، میزان نهایی محصول تولیدی را به‌شدت متاثر نماید. این امر بیانگر اهمیت استفاده از اطلاعات گیاهی متنوع اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد و توسعه گیاه در واسنجی پارامترهای گیاهی مدل باشد. این در حالیست که در

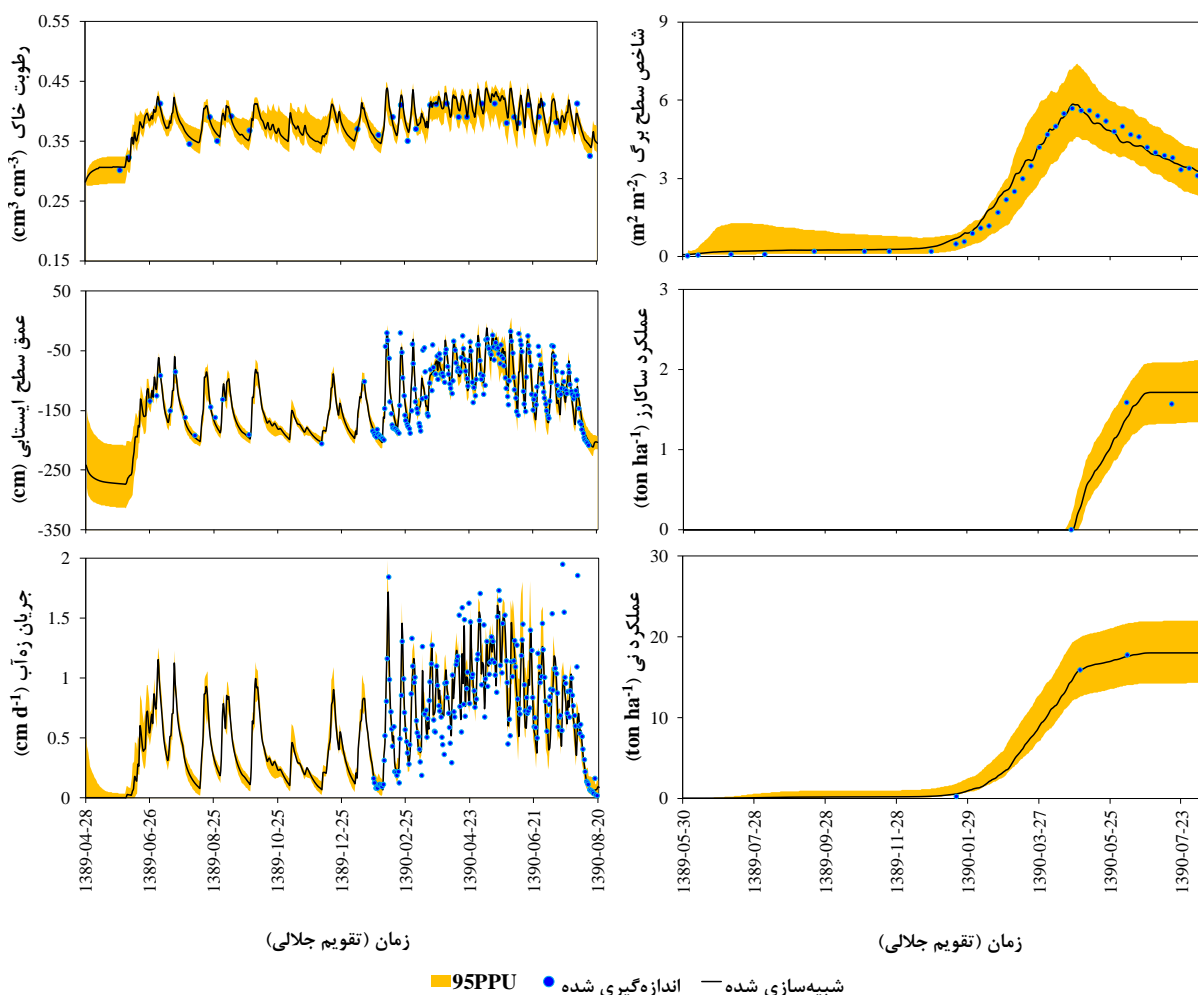
دلیل دیگر این امر را می‌توان به استفاده از داده‌های واسنجی متنوع و لزوم برآورده شدن هم‌زمان تمامی معیارهای وضع شده برای متمایز ساختن شبیه‌سازی‌های رفتاری و غیررفتاری (جدول ۱) از یکدیگر نسبت داد. به عبارت دیگر، در این شرایط، افزایش ضخامت محدوده 95PPU برای شبیه‌سازی‌های شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه به‌قیمت برآورده نشدن حداقل یکی از معیارهای وضع شده صورت می‌گیرد. این محدودیت به‌طور مشهودی سبب تغییرپذیری اندک مقادیر رفتاری پارامتر $(K_f)_2$ (جدول ۳) گردیده است.

در مورد شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای متغیرهای بیوفیزیکی، مقادیر آماره‌های p-factor و r-factor به ترتیب، بین ۷۵ تا ۱۰۰ درصد و ۰/۷۰ تا ۰/۹۸ متغیر بود. مقادیر آماره‌های فوق حاکی از انعکاس بخش عمده منابع عدم قطعیت در پارامترهای واسنجی و در عین حال، ضخامت قابل قبول محدوده 95PPU اشتقاق یافته

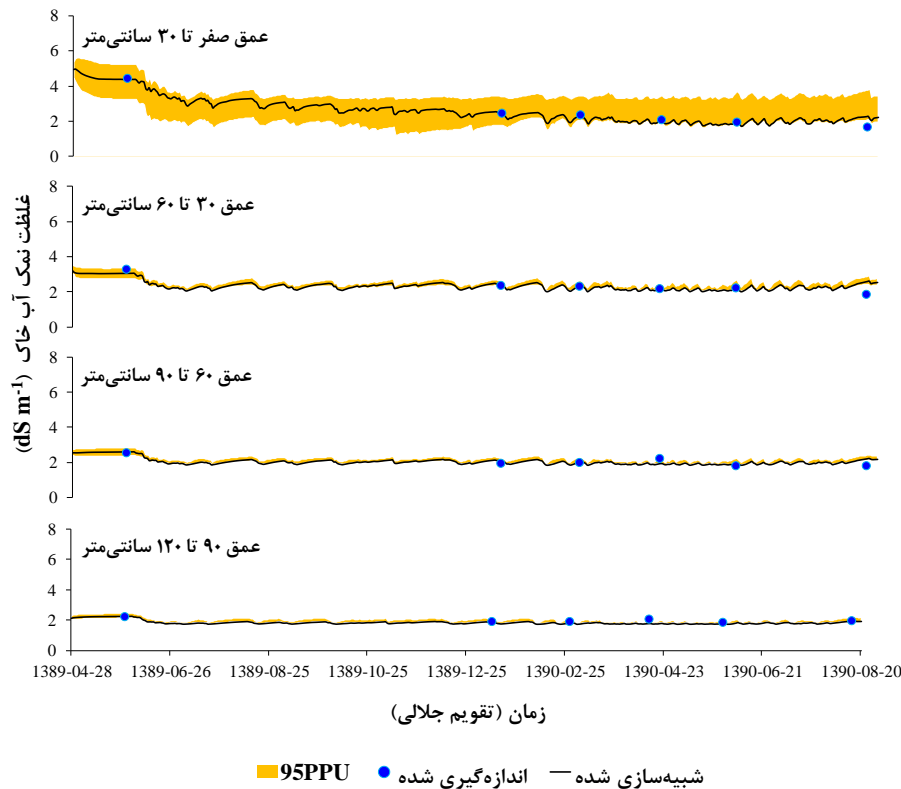
نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، از طریق تلفیق روش تحلیل عدم قطعیت GLUE با الگوریتم UPSO یک طرح ترکیبی تحلیل عدم قطعیت چندهدفه مبتنی بر شبیه سازی های مهار شده مونت کارلو توسعه یافت. از طرح توسعه یافته به منظور تحلیل عدم قطعیت شبیه سازی های حاصل از کاربرد توزیعی و زیرروانه نسخه تصحیح شده ای از مدل SWAP در یک مزرعه نیشکر با زهکش زیرزمینی و جمع کننده سطحی استفاده شد. در این مطالعه، به منظور اطمینان بیشتر از جستجوی سراسری فضای پارامترهای مجهول مدل (مشمول بر ۳۴ پارامتر) و هرچه بارزتر شدن خصیصه اکتشاف الگوریتم UPSO، تعداد ذرات جستجوگر مورد استفاده در این الگوریتم به دو برابر مقدار انتخابی در مطالعه پرچی عراقی و همکاران (۱۳۹۹) افزایش یافت.

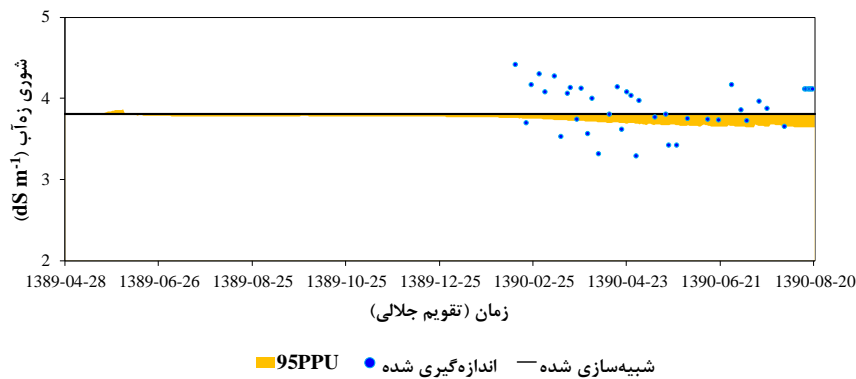
اکثر پژوهش های مشابه صورت گرفته با استفاده از مدل WOFOST، پارامترهای این مدل با استفاده صرف از داده های اندازه گیری شده عملکرد نهایی محصول تولیدی واسنجی گردیده است. بدین ترتیب، عملکرد مدل در شبیه سازی دیگر ویژگی های گیاهی، خصوصاً شاخص سطح برگ که از نقش تعیین کننده ای در حصول شبیه سازی واقع بینانه طول دوره رشد گیاه برخوردار بوده و عملاً اجزای شبیه سازی شده بیلان آب و املاح را متاثر می سازد، مورد بررسی قرار نگرفته است. این امر، افزایش عدم قطعیت برآورد پارامترهای گیاهی را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۴- سری زمانی های مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده و محدوده عدم قطعیت پیش بینی ۹۵ درصد (95PPU) کمیت های معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته در شبیه سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه سازی. مقادیر عملکرد محصول تولیدی بر حسب وزن ماده خشک می باشد



شکل ۵- سری زمانی‌های مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی



شکل ۶- سری زمانی مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد (95PPU) شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی در مزرعه مطالعاتی.

همبستگی قوی بین پارامترهای واسنجی شده حاکی از اهمیت واسنجی مدل با استفاده از داده‌های واسنجی متنوع به صورت موازی و هم‌زمان است. لذا، اتخاذ یک رویکرد گام به گام برای واسنجی جداگانه مدل در شبیه‌سازی انتقال آب، انتقال املاح و متغیرهای بیوفیزیکی منجر به مخدوش شدن نتایج واسنجی مدل در گام ماقبل و اریب شدن پارامترهای واسنجی خواهد شد. با این وجود، به دلیل دشواری واسنجی هم‌زمان مولفه‌های مختلف مدل و در شرایط تعدد

نتایج مشابه به دست آمده از مطالعه حاضر و پژوهش فوق برای مقادیر بهینه پارامترهای مجهول مدل حاکی از قابلیت بالای الگوریتم UPSO در جستجوی فضای پارامترهای مجهول و یافتن جواب بهینه سراسری مساله مدل‌سازی معکوس طرح‌ریزی شده است. نتایج این بررسی حاکی از غیریکتابی قوی پارامترهای واسنجی شده و اهمیت تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل SWAP در برآورد کران‌های عدم قطعیت پیش‌بینی‌های حاصل از آن بود. وجود ضرایب

صادقی لاری، ع. ۱۳۹۱. بررسی اثرات کنترل سطح ایستابی بر روی میزان جریان، نیتروژن و فسفر خروجی از زهکش‌های زیرزمینی نامه در نواحی خشک (مطالعه موردی: شعبیه خوزستان). پایان دکتري. دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۱۷۸ ص

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.

Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of hydrology*. 333(2): 413-430.

Besseminder, 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*. Alterra, Wageningen, The Netherlands, pp. 59-82.

Beven, K.J. 2009. *Environmental modelling: an uncertain future?* CRC Press, Boca Raton, USA.

Beven, K.J. and Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes*. 6(3): 279-298.

Binley, A. and Beven, K. 2003. Vadose zone flow model uncertainty as conditioned on geophysical data. *Groundwater*. 41(2): 119-127.

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.

Haverkamp, R., Leij, F.J., Fuentes, C., Sciortino, A. and Ross, P. 2005. Soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*. 69(6): 1881-1890.

Ines, A.V.M. and Mohanty, B.P. 2008. Parameter conditioning with a noisy Monte Carlo genetic algorithm for estimating effective soil hydraulic properties from space. *Water resources research*. 44(8): W08441, doi:10.1029/2007WR006125.

Jiang, J., Feng, S., Ma, J., Huo, Z. and Zhang, C. 2016. Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model. *Field Crops Research*. 196: 85-97.

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

پارامترهای مجهول، واسنجی مدل بر اساس یک اسلوب گام به گام رویکردی رایج است. بر اساس نتایج پژوهش حاضر، به نظر می‌رسد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی نظیر UPSO از قابلیت بالایی برای مرتفع ساختن این چالش برخوردار باشند. همین‌طور، روند افزایشی عدم قطعیت برآوردهای عملکرد محصول حاکی از اهمیت استفاده از داده‌های واسنجی گیاهی اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد گیاه به جای استفاده از مقادیر نهایی عملکرد محصول بود. در مقایسه با مولفه انتقال املاح، نتایج تحلیل عدم قطعیت مولفه هیدرولوژی و بیوفیزیکی مدل SWAP رضایت‌بخش‌تر بود. محدوده‌های عدم قطعیت به دست آمده برای دو مولفه فوق علاوه بر در بر گرفتن بخش عمده داده‌های اندازه‌گیری شده، از ضخامت قابل قبولی برخوردار بودند. این امر بیانگر اهمیت استفاده از داده‌های واسنجی متنوع در کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی‌های مدل و نیز نقش شبیه‌سازی‌های مهار شده مونت‌کارلو در جستجوی متمرکز نواحی رفتاری فضای پارامترهای مدل است. نتایج این مطالعه، حاکی از دامنه محدود شبیه‌سازی‌های رفتاری شوری زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی بود. این امر موید اهمیت بررسی جداگانه صحت شبیه‌سازی‌های غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی به منظور ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی انتقال املاح در شرایط وجود زهکش زیرزمینی است. به بیان دیگر، عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی تنها نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک یا شوری زه‌آب نمی‌تواند به رضایت‌بخش بودن کلی عملکرد مدل در شبیه‌سازی انتقال املاح تعمیم یابد.

منابع

پرچمی عراقی، ف.، سمیع‌پور، ف. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۹. کاربرد توزیعی مدل SWAP برای مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی زیرروانه یک سیستم زراعی با زهکشی زیرزمینی، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱۴(۴): ۱۱۳۶-۱۱۲۱.

پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش.، وظیفه‌دوست، م. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴الف. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس‌سازی به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروانه: ۲- برآورد تبخیر-تعرق زیرروانه با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه ریزمقیاس شده، نشریه آب و خاک، ۳۹(۶): ۱۷۳۴-۱۷۲۱.

پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴ب. مقایسه تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانیت ASCE و پنمن-مانیت فائو-۵۶ در مقیاس‌های زمانی زیرروانه مختلف: یک مطالعه عددی. نشریه آب و خاک. ۳۹(۵): ۱۱۸۹-۱۱۷۳.

- assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: A case study in a dry region. *Agricultural Water Management*. 146: 324-334.
- Shannon, C.E. 1964. *The mathematical theory of communication*. Champaign, University of Illinois Press, USA.
- Singh, R., Jhorar, R.K., van Dam, J.C. and Feddes, R.A. 2006. Distributed ecohydrological modelling to evaluate irrigation system performance in Sirsa district, India II: Impact of viable water management scenarios. *Journal of Hydrology*. 329(3-4): 714-723.
- Soleimannejad, F. 2004. *Six Sigma, Basic Steps and Implementation*. AuthorHouse, Bloomington, Indiana, USA, 248 pp.
- 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.
- 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.
- 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>).
- 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.
- 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 I: Theory, methods and case descriptions. *Computers Electronics in Agriculture*. 170: 105054.
- Xu, X., Jiang, Y., Liu, M., Huang, Q. and Huang, G. 2019. Modeling and assessing agro-hydrological processes and irrigation water saving in the middle Heihe River basin. *Agricultural water management*. 211: 152-164.
- 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.
- description and user manual. Technical Report. Wageningen Environmental Research, ESG Report 2780, Alterra, Wageningen, The Netherlands.
- 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.
- 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.
- 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. *Transaction of the ASAE*. 50(3): 885-900.
- Mugunthan, P. and Shoemaker, C.A. 2006. Assessing the impacts of parameter uncertainty for computationally expensive groundwater models. *Water Resources Research*. 42(10): W10428.
- Parchami-Araghi, F., Mirlatifi, S.M., Ghorbani Dashtaki, S. and Mahdian, M.H. 2013. Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*. 481: 35-47.
- Parsopoulos, K.E. and Vrahatis, M.N. 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.
- 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).
- Scarpore, F.V. 2011. Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, Brazil, 163 pp.
- Schaap, M.G. and Leij, F.J. 1998. Database-related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Science*. 163(10): 765-779.
- Shafiei, M., Ghahraman, B., Saghafian, B., Davary, K., Pande, S. and Vazifedoust, M. 2014. Uncertainty

Multi-Objective Uncertainty Analysis of Agro-Hydrological Modeling of a Sugarcane Farming System with Subsurface Drainage through Restrained Monte-Carlo Simulations

F. Parchami-Araghi^{1*} and A. Sadeghi-Lari²

Received: Mar.03, 2020

Accepted: Apr.05, 2021

Abstract

The agro-hydrologic simulations are subject to varying degrees of uncertainty. In this regard, uncertainty analysis can provide useful insights into the level of robustness of the model outputs. In this study, a hybrid multi-objective uncertainty analysis scheme, GLUE-UPSO, based on strained Monte-Carlo simulations was developed, combining Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) and Unified Particle Swarm Optimization (UPSO). The developed scheme was used for uncertainty analysis of distributed agro-hydrological modeling with SWAP for a sugarcane farming system with subsurface drainage located at Shoaybiyeh Sugarcane Agro-industrial Company farms, Khuzestan, Iran. The results highlighted the strong nonuniqueness of most of the calibrated parameters and the importance of uncertainty analysis of the SWAP simulations. Strong parameter correlations revealed the need for the simultaneous calibration of the model parameters against diverse calibration data. The 95% prediction uncertainty bands obtained for the model's hydrology (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) components enveloped 67%-90%, 23%-71%, and 75%-100% of the corresponding observed data (including both calibration and validation datasets), respectively, with an r-factor of 0.58-1.34, 0.43-1.07, and 0.70-0.98. The results of the study indicated the acceptable level of model uncertainty and the capability of the developed framework for simultaneous calibration and uncertainty quantification of model components.

Keywords: Inverse modeling, Salinity, SWAP model, Unified Particle Swarm Optimization

1 - Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ardabil, Iran

2 - Assistant Professor, Department of Agriculture, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

(* - Corresponding Author: f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir)