

کاربرد مدل SWAP برای مدل‌سازی یک سامانه زراعی با زهکشی زیرزمینی کنترل شده در یک مزرعه نیشکر

فرزین پرچمی عراقی^{۱*}، فاطمه سمیع پور 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@areco.ac.ir

دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس.

fatemeh.samipour@gmail.com

استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه هرمزگان، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب.

adnansadeghi@yahoo.com

چکیده

به دلیل تغییرات زمانی سریع تراز آب زیرزمینی کم عمق و اجزای بیلان آب و نیز به لحاظ وسعت قابل توجه (حدود ۲۰ هکتار) هر قطعه از مزارع نیشکر با زهکشی زیرزمینی در استان خوزستان، شبیه‌سازی واقع‌بینانه فرآیندهای زراعی-هیدرولوژیکی حاکم بر این مزارع چالش برانگیز است. در پژوهش حاضر، از طریق کاربرد نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP و گونه بهبود یافته‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه (UPSO)، یک طرح مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروزانه با امکان شبیه‌سازی زهکشی زیرزمینی کنترل شده ساخته شد. طرح مدل‌سازی مزبور در یکی از مزارع کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) با مدیریت زهکشی کنترل شده (کنترل سطح ایستابی در عمق ۹۰ سانتی‌متر) و کشت اول نیشکر (رقم CP48-103) طی دوره شبیه‌سازی ۱۳۸۹/۴/۲۸ تا ۱۳۹۰/۹/۲۰ (به مدت ۴۸۱ روز) به کار برده شد. نتایج واسنجی و صحت‌یابی مدل مزبور حاکی از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی (با آماره ضریب راندمان مدل، EF، به ترتیب، برابر با ۰/۸۲۹، ۰/۹۲۲ و ۰/۸۵۷ طی مرحله واسنجی و آماره EF به ترتیب، برابر با ۰/۸۷۷، ۰/۷۸۱ و ۰/۷۱۲ طی مرحله صحت‌یابی)، شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (با آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده، NRMSE، به ترتیب، برابر با ۰/۱۲۴ و ۰/۰۷۹ در مرحله واسنجی و آماره NRMSE به ترتیب، برابر با ۰/۱۵۲ و ۰/۰۷۲ طی مرحله صحت‌یابی) و شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز (با آماره EF به ترتیب، برابر با ۰/۹۹۷، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۸۸ در مرحله واسنجی) بود. بر اساس اجزای بیلان املاح شبیه‌سازی شده طی دوره مطالعاتی، حدود ۳۰/۱۰ تن نمک بر هکتار از طریق آبیاری به مزرعه مطالعاتی وارد و حدود ۴۶/۲۵ تن نمک بر هکتار از طریق سیستم‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی به بدنه‌های آبی پذیرنده تخلیه شد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌نویسی موازی، بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا، پنمن-ماتیت ASCE، شوری، هیدرولوژی محیط غیراشباع

۱- آدرس نویسنده مسئول: بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان).

*- دریافت: مهر ۱۳۹۸ و پذیرش: بهمن ۱۳۹۸

مقدمه

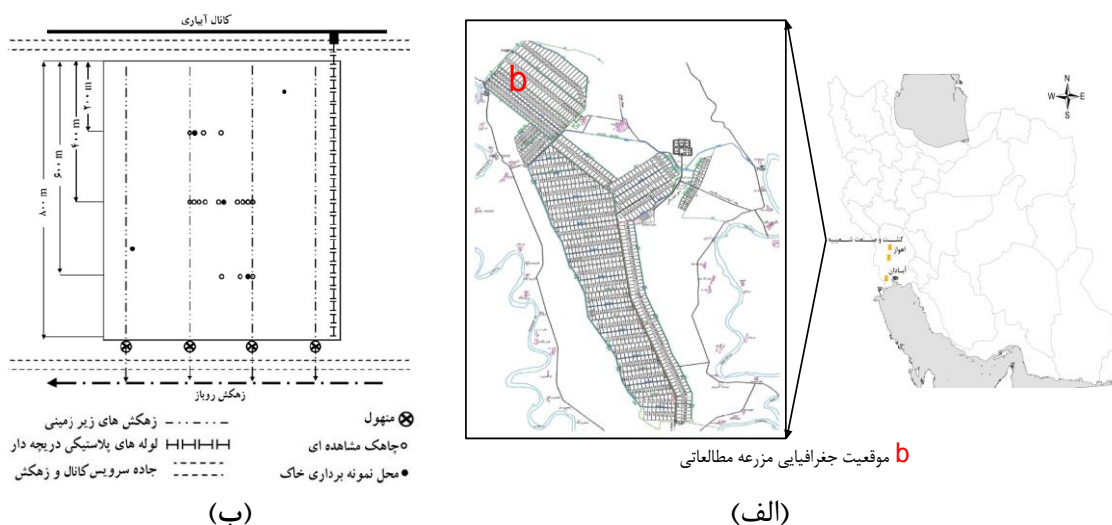
زهکشی ابزاری ضروری در راستای مبارزه با شوری و ماندابی و لذا، استفاده بهتر از زمین و توسعه هرچه بیشتر کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (اسمیدما، ۲۰۰۰). با این وجود، زهکشی از یک سو، دارای نقشی اساسی در پایداری آبیاری و تولید محصول بوده و از دیگر سو، خود عامل تسهیل‌کننده و یا حتی تشدیدکننده نمود اثرات منفی زیست‌محیطی شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌باشد. در این رابطه، اعمال زهکشی کنترل شده به دلیل متاثر ساختن الگوی جریان آب زیرزمینی به طرف زهکش‌ها می‌تواند منجر به کاهش حجم و غلظت نمک زه‌آب و افزایش بهره‌وری آب کشاورزی شود (آیاز و هنسون، ۲۰۱۴؛ جوانی جونی، ۲۰۱۸). از سوی دیگر، مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی تعیینی ابزاری کارآمد در راستای تدوین استراتژی‌های بهینه مدیریت یکپارچه آب و زه‌آب کشاورزی و عملی ساختن شیوه مدیریتی کاهش منبع به‌عنوان یکی از موثرترین شیوه‌های مدیریت زه‌آب و تبعات زیست‌محیطی سیستم‌های زهکشی به‌شمار می‌روند. یکی از مدل‌های شبیه‌ساز فرآیندهای حاکم بر سیستم آب-خاک-گیاه-آتمسفر، مدل ریچاردز-بنیان SWAP (کروز و همکاران، ۲۰۰۸) می‌باشد. بر اساس پژوهش‌های متعدد صورت گرفته، این مدل به‌عنوان یکی از کارآمدترین و معتبرترین مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی به‌منظور شبیه‌سازی اجزای بیلان آب، انتقال املاح و متغیرهای بیوفیزیکی در شرایط تنش‌های خشکی، شوری و اکسیژن در مقیاس مزرعه‌ای/منطقه‌ای به‌شمار می‌رود (سینگ، ۲۰۰۵ و نوری و همکاران، ۲۰۱۱). با این حال، این مدل فاقد امکان شبیه‌سازی شیوه زهکشی کنترل شده است. از سوی دیگر، کاربرد نسخه فعلی این مدل در مزارع کشت نیشکر واقع در واحدهای هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی، استان خوزستان که به دلیل مساحت قابل توجه هریک از مزارع (بیش از ۲۰ هکتار)، امکان آبیاری یکباره آن‌ها (که به روش شیاری صورت می‌گیرد) فراهم نیست

و کامل شدن یک نوبت آبیاری هر مزرعه ممکن است تا بیش از پنج روز به‌طور بیانجامد، چالش برانگیز است. چراکه در این شرایط مشخص‌سازی فرآیندهای زراعی-هیدرولوژیکی حاکم بر سیستم زراعی در قالب یک ستون خاک واحد سوال برانگیز خواهد بود. از سوی دیگر، با توجه به تغییرات زمانی سریع اجزای بیلان آب حین رویدادهای آبیاری در این مزارع، به نظر می‌رسد که شبیه‌سازی زیرروانه اجزای بیلان آب و املاح و لحاظ کردن زمان اندازه‌گیری مقادیر معیار مورد استفاده در واسنجی و صحت‌یابی مدل (خصوصاً، نیم‌رخ رطوبت و شوری خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی) می‌تواند منجر به دستیابی به شبیه‌سازی‌های هرچه واقع‌بینانه‌تر از سیستم زراعی مطالعاتی گردد. این در حالیست که در تمامی مطالعات مشابه صورت گرفته در اراضی کشت نیشکر استان خوزستان (سمیع‌پور و همکاران، ۱۳۸۲؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۳)، واسنجی مدل زراعی-هیدرولوژیکی بر اساس اتخاذ گام محاسباتی روزانه برای مقادیر شبیه‌سازی شده صورت گرفته است. این امر به‌معنای واسنجی مدل بر اساس مقایسه مقادیر کمیت‌های معیار اندازه‌گیری شده طی ساعات مختلف شبانه‌روز با مقادیر نظیر شبیه‌سازی شده در ساعت ۲۴:۰۰ (به‌وقت محلی) می‌باشد؛ بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، توسعه یک طرح مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی ریچاردز-بنیان به‌شیوه توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروانه از طریق تلفیق نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP و گونه یکپارچه‌سازی شده الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO) با هدف عملی ساختن کاربرد مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی در شرایط واقعی بهره‌برداری از مزارع وسیع مجهز به سیستم (های) زهکش زیرزمینی کنترل شده در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، خوزستان بوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: پژوهش حاضر در یکی از مزارع واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه) (شکل ۱) با سیستم زهکشی کنترل شده با عمق کنترل سطح ایستابی ۹۰ سانتی‌متر طی بخشی از دوره رشد گیاه (از اردیبهشت تا آبان ماه ۱۳۹۰) و تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول) و با استفاده از بانک اطلاعات مزرعه‌ای گردآوری شده توسط صادقی لاری (۱۳۹۱) صورت

گرفت. هریک از مزارع این محدوده مجهز به سیستم زهکشی زیرزمینی با متوسط عمق کارگذاری ۲/۱ متر و طول ۸۴۵ متر و به فواصل تقریبی ۷۵ متر از یکدیگر می‌باشند که به جمع‌کننده‌های روباز و نهایتاً، به زهکش‌های اصلی روباز تخلیه می‌شوند (شکل ۱). مزرعه مورد مطالعه در شهریور ماه ۱۳۸۹ تحت کشت نیشکر قرار گرفته و اعمال زهکشی کنترل شده از اردیبهشت تا آبان ماه ۱۳۹۰ انجام شد.



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

مدل سازی زراعی-هیدرولوژیکی مزرعه

مطالعاتی: مدل SWAP انتقال آب، املاح و گرما در محیط غیراشباع را در اندرکنش با توسعه پوشش گیاهی شبیه‌سازی می‌کند (کروز و همکاران، ۲۰۰۸). در این مدل، معادله ریچاردز به‌ازای شرایط اولیه و مرزی معلوم و تعریف روابط بین رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی و مکش ماتریک به‌روش عددی حل می‌شود (کروز و همکاران، ۲۰۰۸). در پژوهش حاضر، کد منبع مدل SWAP به‌منظور در نظر گرفتن طول مدت زمان رویدادهای آبیاری، شبیه‌سازی برگاب و محصول تولیدی در شرایط استفاده از اطلاعات زیرروزانه هواشناسی و رویدادهای آبیاری مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفت.

همچنین، ماژول شبیه‌سازی تبخیر-تعرق این مدل بر اساس نتایج حاصل از پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۴؛ ۱۳۹۵) تصحیح گردید. از طریق ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه، امکان شبیه‌سازی تبخیر-تعرق زیرروزانه در مقیاس‌های زمانی دلخواه در نظر گرفته شد. به‌منظور مدل‌سازی سیستم‌های زهکشی کنترل شده، ماژول زهکشی مدل SWAP تصحیح گردید. طول دوره شبیه‌سازی برای مزرعه مورد مطالعه از ۲۸ تیر ۱۳۸۹ تا ۲۰ آذر ۱۳۹۰ (به‌مدت ۴۸۱ روز) در نظر گرفته شد. برای مزرعه مطالعاتی ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر (معادل با عمق وقوع لایه محدود کننده در مزرعه مطالعاتی) و متشکل از دو لایه با ویژگی‌های ارائه شده جدول ۱ در نظر گرفته شد.

جدول ۱- ویژگی‌های 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 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

مقایسه میانگین وزنی (بر اساس مساحت هر هیدروتوپ) سری زمانی‌های شبیه‌سازی شده برای همه هیدروتوپ‌های دخیل در بازسازی مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده (با مقیاس مکانی سراسر مزرعه مطالعاتی) صورت گرفت.

شرط مرزی پایین دست نیم‌رخ خاک به صورت مقادیر از پیش تعیین شده جریان از کف نیم‌رخ خاک با میزان شوری معین در نظر گرفته شد. بر این اساس، میزان جریان از کف در پنج مقطع زمانی از طول دوره شبیه‌سازی (با فواصل زمانی مساوی) از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر مقاطع زمانی از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد گردید. میزان شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیم‌رخ خاک، هر یک به‌عنوان یک پارامتر مجهول یکتا در سراسر دوره شبیه‌سازی از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. به‌منظور مدل‌سازی انتقال املاح در مزارع مطالعاتی، دو فرآیند انتقال توده‌ای و جذب سطحی املاح (مبتنی بر ایزوترم جذب خطی) در نظر گرفته شد.

ارزیابی صحت اطلاعات هواشناسی جمع‌آوری شده از ایستگاه هواشناسی مزرعه نمونه و برآورد داده‌های هواشناسی گم شده از طریق الگوریتم توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۵) در ترکیب با داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز (واقع در مجاورت منطقه مطالعاتی) صورت گرفت (جدول ۲). به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه (با مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه‌ای) از چارچوب ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۵) و ویرایش تصحیح شده مدل پنمن-مانتیت ASCE (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴) برای منطقه مطالعاتی استفاده شد. به‌منظور در نظر گرفتن اثر آبیاری تدریجی مزرعه بر شبیه‌سازی‌های زراعی-هیدرولوژیکی سیستم زراعی مطالعاتی، مدل SWAP از طریق تعریف واحدهای شبیه‌سازی همگن موسوم هیدروتوپ به‌شبهه توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت. بدین ترتیب، مدل SWAP به‌ازای هر یک از واحدهای هیدروتوپ به‌طور جداگانه اجرا شده و واسنجی مدل توسعه یافته از طریق

جدول ۲- آماره‌های توصیفی متغیرهای هواشناسی روزانه طی دوره مطالعاتی^(*)

متغیر هواشناسی	حداقل	حداکثر	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)	CI95
سرعت باد (m s ⁻¹)	۰/۶	۹/۸	۲/۳	۶۳/۱۳	۰/۱۳
دمای حداقل (°C)	۰/۴	۳۳/۰	۱۷/۷	۴۷/۷۴	۰/۷۵
دمای حداکثر (°C)	۱۰/۶	۵۱/۲	۳۵/۴	۲۸/۱۶	۰/۸۹
فشار بخار واقعی (kPa)	۰/۷	۴/۶	۲/۱	۴۵/۳۶	۰/۰۹
تشعشع خورشیدی (MJ m ⁻² d ⁻¹)	۴/۰	۲۸/۴	۱۸/۶	۳۴/۷۸	۰/۵۸
تبخیر-تعرق چمن مرجع (mm d ⁻¹)	۰/۱	۱۴/۸	۵/۶	۵۱/۵۷	۰/۲۶
بارندگی روزانه (mm d ⁻¹)	۰/۰	۴۹/۰	۰/۵	۶۴۱/۸۶	۰/۲۸

CI95^(*) بیانگر محدود اطمینان ۹۵ درصد است

زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، تبیین سیستم زهکشی مربوط به هر ۱۰ هیدروتوپ در نظر گرفته شده برای مزرعه مطالعاتی در قالب یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم

مدل‌سازی سیستم زهکشی از طریق رویکرد سیستم زهکشی چندگانه مبتنی بر مفهوم مقاومت زهکشی (کروز و همکاران، ۲۰۰۸) صورت گرفت. برای مزرعه مطالعاتی، دو سیستم زهکشی، شامل یک سیستم زهکشی

مدل‌سازی معکوس شامل داده‌های اندازه‌گیری شده نیم‌رخ رطوبت و شوری خاک، عمق سطح ایستابی، حجم و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی، شاخص سطح برگ و میزان عملکرد نی (با نظر گرفتن رطوبت ۸۰ درصد (فائو، ۲۰۱۳) برای تبدیل عملکرد محصول تازه به عملکرد ماده خشک) و ساکارز گیاه نیشکر در مراحل مختلف رشد گیاه بود. به گونه‌ای که همه داده‌های مذکور به‌طور هم‌زمان در واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. از مجموع وزنی آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده با استفاده از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده کمیت معیار (NRMSE) با ضرایب وزنی یکسان به‌عنوان تابع برازش در مدل‌سازی معکوس استفاده شد. تقسیم‌بندی داده‌های یاد شده به مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌یابی به گونه‌ای صورت گرفت که حتی الامکان، هریک از دو مجموعه داده فوق در بر گیرنده ۵۰ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده (به جز داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به شاخص سطح برگ و عملکرد محصول که به‌طور کامل در واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت) باشند.

ارزیابی عملکرد طرح مدل‌سازی توسعه یافته:

ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل توسعه یافته از طریق آماره‌های میانگین خطا (ME)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی مدل (EF) صورت گرفت (پرچمی عراقی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، سهم هریک از منابع عدم انطباق مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با استفاده از روش جزءبندی آماره میانگین مربعات خطا (MSE) به‌شرح زیر تعیین گردید (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۵):

$$RSB = 100 \frac{(\sum_{j=1}^{n_{obs}} (P_j - O_j))^2}{MSE} \quad (2)$$

$$RNU = 100 \frac{(1 - b^2) (\sum_{j=1}^{n_{obs}} (O_j - \bar{O})^2 / n_{obs})}{MSE} \quad (3)$$

$$RLC = 100 \frac{(1 - r^2) (\sum_{j=1}^{n_{obs}} (P_j - \bar{P})^2 / n_{obs})}{MSE} \quad (4)$$

زهکشی سطحی منفرد و نماینده خلاصه گردید. روندیابی جریان زه‌آب خروجی از هر هیدروتوپ از طریق رابطه ساده زیر روندیابی گردید (دیانی و همکاران، ۲۰۱۰):

$$T_{delay}^{iHdrt} = (T_c L_{outlet}^{iHdrt}) / \text{Max}\{L_{outlet}^{iHdrt}\}_{iHdrt=1}^{nHdrt} \quad (1)$$

که در آن:

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

به‌منظور شبیه‌سازی متغیرهای بیوفیزیکی از مدل گیاهی WOFOST (سوویت و همکاران، ۱۹۹۴) استفاده شد. پارامترهای حساس این مدل بر اساس پژوهش‌های مشابه گذشته (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۳) شناسایی شده (جدول ۳) و مقادیر آن‌ها از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد گردید. به دلیل دیررس بودن رقم نیشکر کشت شده در مزرعه مورد مطالعه و طول دوره زمانی قابل توجه شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه (حدود ۱۵ ماه)، مقادیر پارامترهای S_{LA} و A_{max} (جدول ۳) در نه مقطع از دوره رشد گیاه (با فواصل مساوی و بر اساس مجموع دما) از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر مقاطع بازه زمانی رشد گیاه از طریق درونیابی خطی بین مقادیر واسنجی شده برآورد گردید.

طرح مدل‌سازی معکوس: به‌منظور واسنجی مدل

SWAP، یک طرح مدل‌سازی معکوس تک‌هدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی UPSO (پارسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴)، از طریق برنامه‌نویسی فترن و ++C چندپردازی توسعه یافت. در واسنجی مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، مجموعاً، ۴۵ پارامتر مجهول (جدول ۳) از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد گردید. فرآیند واسنجی مدل توسعه یافته به‌ازای ۱۵۰ ذره و ۴۵۰ تکرار اجرای الگوریتم UPSO صورت گرفت (مجموعاً، ۶۷۵ هزار مرتبه اجرای مدل SWAP). کمیت‌های معیار مورد استفاده در طرح

که در آن‌ها:

O مقدار اندازه‌گیری شده، P : مقدار شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، n_{obs} تعداد مقایسه‌ها، b شیب خط رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده، RSB درصدی از MSE که ناشی از انتقال خط رگرسیون به بالا یا پایین خط گراف ۱:۱ می‌باشد، RNU درصدی از MSE که ناشی از دوران خط رگرسیون نسبت به خط گراف ۱:۱ می‌باشد، RLC درصدی از MSE که ناشی از کمبود همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده می‌باشد. بدیهی است که $RSB + RNU + RLC = 100$.

نتایج و بحث

مقادیر واسنجی شده پارامترهای مجهول لحاظ شده در طرح مدل‌سازی معکوس در جدول ۳ ارائه گردیده است. بر اساس این جدول، مقادیر واسنجی شده ترم جریان از کف ستون خاک طی دوره زمانی غیرفعال بودن سیستم زهکشی زیرزمینی کنترل شده (دوره ابتدایی شبیه‌سازی) بیشتر از دوره زمانی فعال شدن زهکشی کنترل شده بوده است. این امر می‌تواند بیانگر اثر زهکشی کم عمق در کاهش جریان خروجی از زهکش‌های زیرزمینی و کاهش مشکلات زیست‌محیطی آن‌ها باشد که توسط پژوهشگران متعددی مورد اشاره قرار گرفته است (آیاز و همکاران، ۲۰۱۴؛ جوانی جونی و همکاران، ۲۰۱۸). مقادیر آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در بررسی عملکرد مدل واسنجی شده در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی به‌ازای مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌یابی در جدول ۴ ارائه گردیده است. بر اساس این جدول، مقایسه مقادیر آماره‌های MAE و ME حاکی از آن است که کم‌برآوردگری یا بیش‌برآوردگری صورت گرفته در مورد هیچ‌یک داده‌های معیار اندازه‌گیری شده به‌طور پایدار رخ نداده است و بر اساس آماره‌های RSB ، RNU و RLC می‌توان گفت که بخش اعظم عدم انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده ناشی از

کمبود همبستگی بین مقادیر فوق و نارسایی مدل در بازسازی نوسانات زمانی مقادیر اندازه‌گیری شده بوده است. این نکته از شکل ۲، شکل ۳-الف و شکل ۴-الف که در آن‌ها مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده کمیت‌های معیار مورد مقایسه قرار گرفته است نیز قابل استنباط می‌باشد. بخشی از عدم انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را می‌توان به ناهمگنی مکانی در مزرعه مورد مطالعه و نیز خطای آزمایشی نسبت داد که این موارد در عمل و شرایط مزرعه غیرقابل اجتناب است (سینگ، ۲۰۰۵). بخشی دیگر از این عدم انطباق را می‌توان به فرضیات ساده‌سازی اتخاذ شده در ساختار تشریحی مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، خصوصاً به‌لحاظ صرف‌نظر کردن از اندرکنش جریان آب زیرزمینی بین هیدروتوپ‌ها و نیز خلاصه کردن سیستم زهکشی مزرعه در قالب یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی منفرد و نماینده نسبت داد.

همچنین، عدم توانایی مدل در بازسازی نوسانات مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ و عملکرد ساکارز را می‌توان ناشی از انتشار خطای بازسازی اجزای بیلان آب و املاح در شبیه‌سازی‌های رشد گیاه، نمود یافتن اثر مقادیر اندازه‌گیری شده ضرایب جزءبندی ماده خشک بین اندام‌های گیاه و نیز ساختار اعمال شده در مدل $SWAP$ مبنی بر درون‌یابی خطی ویژگی‌های مختلفی از گیاه که به‌عنوان اطلاعات ورودی مدل و به‌صورت تابعی از مراحل مختلف رشد گیاه تعریف می‌شوند (مانند ضرایب جزءبندی ماده خشک و پارامترهای گیاهی مجهول لحاظ شده در طرح مدل‌سازی معکوس) و نیز مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با میانگین وزنی مقادیر نظیر شبیه‌سازی شده مربوط به هر واحد هیدروتوپ دانست. به‌طور کلی، مقادیر ضریب کارایی مدل در دامنه ۰/۷۵ تا ۱/۰۰، ۰/۶۵ تا ۰/۷۵، ۰/۵۰ تا ۰/۶۵ و کوچکتر یا مساوی ۰/۵ به‌ترتیب، به‌عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده معیار در نظر گرفته می‌شود (موریاسی و

همکاران، ۲۰۰۷). همچنین، 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 کمیت‌های معیار اندازه‌گیری شده در نظر گرفته می‌شود (لوگ و گرین، ۱۹۹۱).

بر این اساس، مقادیر آماره EF و NRMSE (جدول ۴) به ترتیب، حاکی از عملکرد خوب تا بسیار خوب و عملکرد قابل قبول تا بسیار خوب مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در شبیه‌سازی انتقال آب در خاک و متغیرهای بیوفیزیکی به‌ازای مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌یابی است. بر اساس مقادیر آماره EF (جدول ۴) عملکرد مدل در شبیه‌سازی انتقال املاح در مزرعه مطالعاتی غیرقابل قبول ارزیابی شده و متقابلاً، مقادیر آماره NRMSE (جدول ۴) حاکی از عملکرد خوب تا بسیار خوب مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در شبیه‌سازی انتقال املاح است.

نتایج این ارزیابی حاکی از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در برخی ایام دوره شبیه‌سازی، سطح ایستابی شبیه‌سازی شده در مزرعه مطالعاتی دارای نوسانات اندکی می‌باشد که دلیل این امر، اعمال رویدادهای آبیاری در بخش‌های محدودی از مزرعه و در زمان‌های متفاوت است که لحاظ کردن این امر از طریق مدل‌سازی مزرعه در قالب یک ستون خاک منفرد امکان‌پذیر نیست.

دلیل این تناقض ناشی از نحوه بدون بعد ساختن عدم انطباق کل در دو آماره NRMSE و EF می‌باشد. در تبیین ریاضی آماره‌های ارزیابی EF و NRMSE، عدم انطباق کل مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده به ترتیب، با استفاده از واریانس و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده بدون بعد می‌شود؛ بنابراین، آماره EF به‌وضوح بیانگر این حقیقت می‌باشد که چه کسری از واریانس مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق مدل شبیه‌سازی توجیه گردیده است. لذا، می‌توان گفت که در صورت بروز تناقض در ارزیابی عملکرد مدل بر اساس دو آماره فوق، ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌های اندازه‌گیری شده با تغییرپذیری بالا بر اساس آماره EF (در مقایسه با آماره NRMSE) مناسب‌تر خواهد بود و بالعکس. 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 (یوان‌ای‌پی،

نتایج این بررسی حاکی از آن بود که عملکرد مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده نیم‌رخ رطوبت خاک بهتر از عملکرد آن در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک بوده است. این نتیجه با نتایج گزارش شده در پژوهش‌های گذشته (سینگ، ۲۰۰۵) مطابقت دارد. از سوی دیگر، در این پژوهش، فرآیند جذب سطحی نیز در مدل‌سازی انتقال املاح خاک در مزرعه مطالعاتی لحاظ گردید. دلیل این امر آن بود که نتایج بررسی‌ها نشان داد بدون در نظر گرفتن این فرآیند، مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی قادر به بازسازی قابل قبول مقادیر اندازه‌گیری شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و خصوصاً، شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی نبود. به‌طور کلی، بیلان املاح در خاک تابع عواملی چون عمق کاربرد و شوری آب آبیاری/بارندگی، صعود شعریه، راندمان آبشویی املاح و نیز عواملی که در خاک منجر به تولید املاح و شوری آن می‌شوند، می‌باشد. از میان عوامل یاد شده، اثر دو عامل نخست به‌طور صریح در مدل SWAP در نظر گرفته شده و از لحاظ کردن اثر

دو عامل دیگر، به دلیل دشواری مدل‌سازی آن‌ها، صرف‌نظر گردیده است. به‌همین دلیل و به‌منظور در نظر گرفتن ضمنی نقش دو عامل فوق بر بیلان املاح خاک در مزرعه مطالعاتی و حصول شبیه‌سازی‌های هرچه واقع‌بینانه‌تر از تغییرات شوری نیم‌رخ خاک و زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی، فرآیند جذب سطحی املاح نیز در شبیه‌سازی‌های انتقال املاح لحاظ گردید. بدین ترتیب، اثر این عوامل که نقش آن‌ها به‌طور صریح در مدل SWAP در نظر گرفته نشده است به‌همراه نقش ذرات خاک در جذب سطحی املاح در ضریب ایزوترم خطی جذب سطحی املاح خلاصه شد.

به‌منظور نشان دادن اهمیت وارد کردن فرآیند جذب سطحی املاح در مدل‌سازی انتقال املاح در مزرعه مطالعاتی، شبیه‌سازی‌های مدل توسعه یافته برای نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری در شرایط عدم اعمال فرآیند جذب سطحی املاح به‌ترتیب، در شکل ۳-ب و شکل ۴-ب نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در مقایسه با شرایط در نظر گرفتن فرآیند جذب سطحی، تغییرپذیری مقادیر شبیه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب افزایش یافته و از انطباق کمتری با مقادیر نظیر اندازه‌گیری شده برخوردار بوده‌اند. وارد کردن فرآیند جذب سطحی به مدل‌سازی انتقال املاح در خاک سبب گردیده است که در شرایط کاهش غلظت املاح در آب خاک (فاز مایع خاک)، بخشی از املاح جذب سطحی شده از فاز جامد به فاز مایع خاک انتقال یابند. به‌گونه‌ای که این امر منجر به حفظ شوری آب خاک و زه‌آب خروجی در یک دامنه معین و لذا، کاهش تغییرپذیری مقادیر شبیه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری جریان زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی طی دوره شبیه‌سازی گردیده است.

این نتایج حاکی از لزوم واسنجی و صحت‌یابی مدل‌سازی انتقال املاح در شرایط وجود آب زیرزمینی کم‌عمق شور است. این در حالیست که در پژوهش‌های صورت گرفته با استفاده از مدل SWAP در شرایط وجود سیستم‌های زهکشی (سرور و همکاران، ۲۰۰۰؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۱)، واسنجی مدل در شبیه‌سازی انتقال املاح تنها با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک صورت گرفته و بدون هیچ‌گونه بررسی بیشتر، عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک به عملکرد کلی قابل قبول آن در شبیه‌سازی انتقال املاح و لذا، شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی تعمیم یافته است. همان‌طور که در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود، در مزرعه مطالعاتی، میزان شوری نیم‌رخ خاک طی فصل زمستان کاهش یافته است که دلیل این امر اثر بارش رخ داده طی این دوره بر کاهش شوری نیم‌رخ خاک می‌باشد.

بنابراین، با مقایسه شکل ۳-الف با شکل ۳-ب و شکل ۴-الف با شکل ۴-ب می‌توان گفت که لحاظ کردن فرآیند جذب سطحی املاح در شبیه‌سازی انتقال املاح در خاک نقش مهمی در دستیابی به شبیه‌سازی‌های واقع‌بینانه‌تر نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی داشته است. از سوی دیگر، در نظر گرفتن این فرآیند به‌عنوان یک فاکتور اطمینان، منجر به اتخاذ رویکردی محتاطانه‌تر در تحلیل سناریوهای مدیریت آبیاری در مزرعه مطالعاتی خواهد شد و از توسعه سناریوهای مدیریتی مبتنی بر پیش‌بینی‌های خوش‌بینانه در خصوص کاهش قابل توجه شوری خاک و زه‌آب خروجی در اثر مدیریت آبیاری اعمال شده اجتناب خواهد گردید.

جدول ۳- مقادیر بهترین برآورد پارامترهای مجهول مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی^(*)

مقدار بهینه	پارامتر	شرح	مقدار بهینه	پارامتر	شرح
۵۵۷۴/۶۲۲۶	TSUMEA		۰/۴۰۴۳	$(\theta_{sat})_1$	
۱۲۲۲/۲۲۳۴	TSUMAM		۰/۴۰۰۰	$(\theta_{sat})_2$	
۰/۰۳۱۲	RRLAI		۰/۰۳۵۱	$(\alpha)_1$	پارامترهای هیدرولیکی خاک برای دو لایه در نظر گرفته شده برای ستون خاک
۰/۰۰۰۴	$(S_{LA})_1$		۰/۰۴۴۶	$(\alpha)_2$	
۰/۰۰۱۱	$(S_{LA})_2$		۱/۱۴۰۳	$(n)_1$	
۰/۰۰۰۷	$(S_{LA})_3$		۱/۱۵۳۳	$(n)_2$	
۰/۰۰۰۸	$(S_{LA})_4$		۲۰/۰۰۵۴	$(K_{sat})_1$	
۰/۰۰۱۴	$(S_{LA})_5$		۱۳/۴۳۲۸	$(K_{sat})_2$	
۰/۰۰۱۱	$(S_{LA})_6$	پارامترهای گیاهی	۰/۰۱۹۰	$(q_{Bot})_1$	جریان از کف در پنج مقطع زمانی
۰/۰۰۱۴	$(S_{LA})_7$		۰/۰۱۲۸	$(q_{Bot})_2$	
۰/۰۰۰۷	$(S_{LA})_8$		۰/۰۱۳۱	$(q_{Bot})_3$	
۰/۰۰۰۹	$(S_{LA})_9$		۰/۰۰۷۸	$(q_{Bot})_4$	
۰/۵۵۱۲	EFF		۰/۰۱۱۴	$(q_{Bot})_5$	
۴۰/۰۵۷۳	$(A_{max})_1$		۲۹/۵۱۷۵	$(D_{dis})_1$	پارامترهای انتقال املاح برای دو لایه در نظر گرفته شده برای ستون خاک
۱۵/۷۵۲۲	$(A_{max})_2$		۴۵/۴۰۸۰	$(D_{dis})_2$	
۵/۶۳۰۶	$(A_{max})_3$		۲۶/۲۸۸۸	$(K_f)_1$	
۷۷/۳۵۱۶	$(A_{max})_4$		۲۹/۶۳۰۵	$(K_f)_2$	
۶۶/۲۸۴۹	$(A_{max})_5$		۲/۰۴۰۲	C_{gw}	شوری آب زیرزمینی
۳۶/۳۴۶۸	$(A_{max})_6$		۴/۶۹۶۰	C_{Bot}	شوری جریان از کف
۵۵/۹۱۹۰	$(A_{max})_7$		۱۷۲/۱۳۳۱	γ_{drain}	پارامترهای سیستم زهکشی
۴۱/۰۷۷۴	$(A_{max})_8$		۴۸۷۴/۸۱۴۶	γ_{drain2}	
۱/۰۳۹۰	$(A_{max})_9$		۱۰۴/۳۶۸۰	$\gamma_{drain, Ctrl}$	
			۱/۴۹۸۰	T_{delay}	

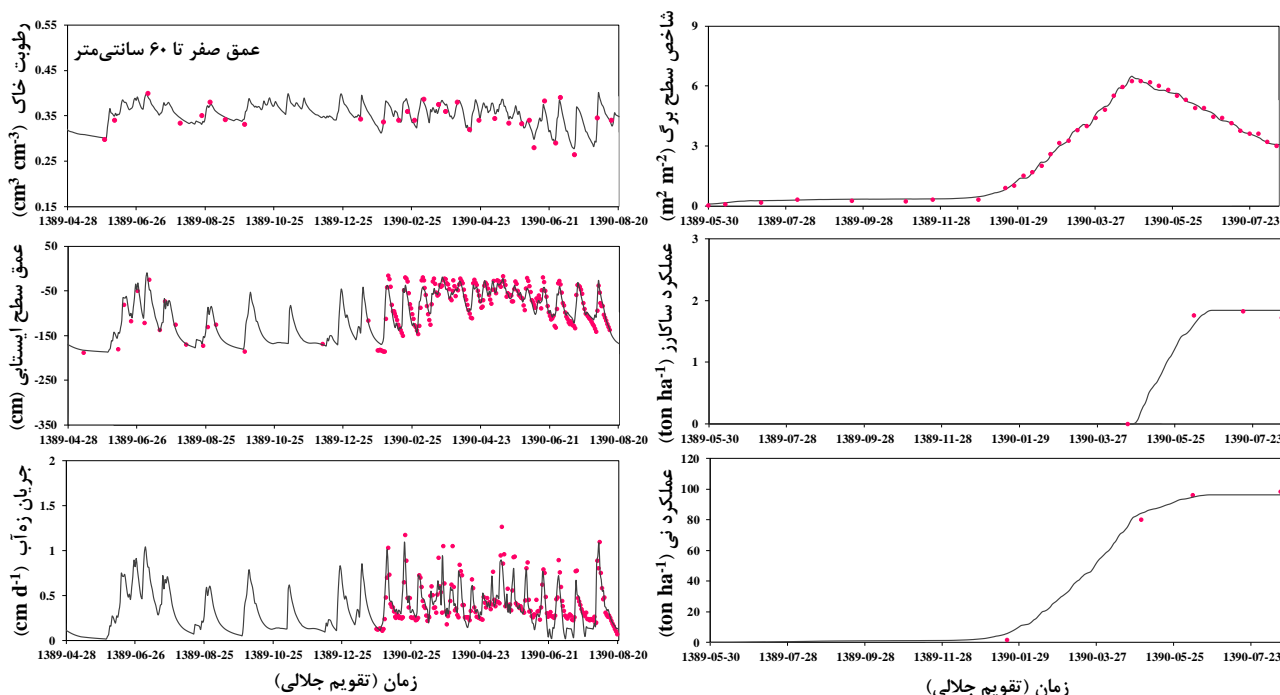
شوری آب زیرزمینی (میلی گرم بر سانتی متر مکعب)،
EFF، *A_{max}*، *S_{LA}*، *RRLAI*، *TSUMAM*، *TSUMEA*
 به ترتیب، بیانگر مجموع دما از مرحله جوانه زنی تا گل دهی
 (درجه سانتی گراد روز)، مجموع دما از مرحله گل دهی تا
 بلوغ (درجه سانتی گراد روز)، حداکثر افزایش نسبی
 شاخص سطح برگ (متر مربع بر متر مربع بر روز)، سطح
 ویژه برگ (هکتار بر کیلوگرم)، حداکثر شدت جذب
 دی اکسید کربن (کیلوگرم بر هکتار بر ساعت) و راندمان
 مصرف نور در یک برگ منفرد (کیلوگرم بر هکتار بر
 ساعت بر ژول متر مربع ثانیه) می باشد.

^(*) در جدول فوق، θ_{sat} رطوبت خاک در حالت
 اشباع ($cm^3 cm^{-3}$)، α (cm^{-1})، n (بدون بعد)، m (بدون
 بعد)، λ (بدون بعد) ضرایب شکل، K_{sat} هدایت
 هیدرولیکی اشباع ($cm d^{-1}$)، D_{dis} و K_f به ترتیب، ضریب
 انتشارپذیری (سانتی متر)، ضریب ایزوترم جذب خطی
 (سانتی متر مکعب بر گرم)، q_{Bot} جریان از کف (سانتی متر
 بر روز)، C_{Bot} شوری جریان از کف (میلی گرم بر سانتی متر
 مکعب)، γ_{drain} ، $\gamma_{drain, Ctrl}$ ، γ_{drain1} و T_{delay} به ترتیب،
 مقاومت زهکشی سیستم زهکشی زیرزمینی در شرایط آزاد
 و کنترل شده (روز)، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی
 روباز و زمان تاخیر رسیدن زه آب به خروجی (روز)، C_{gw}

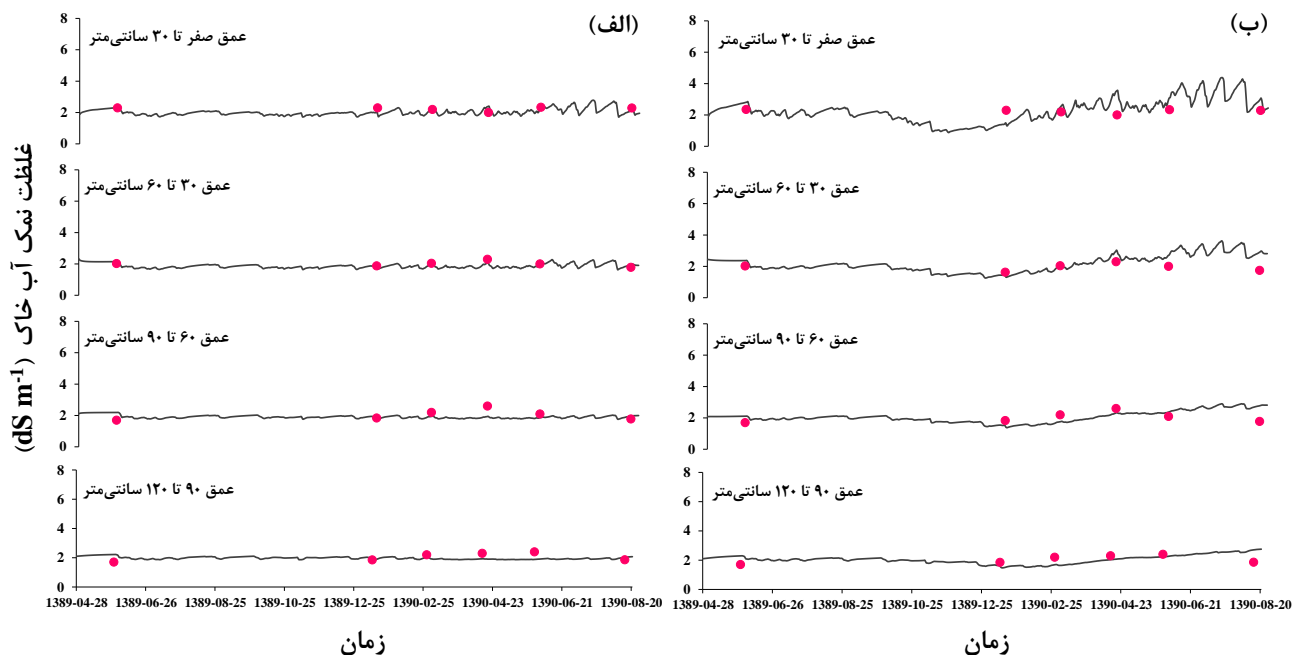
جدول ۴- مقادیر آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در بررسی عملکرد مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه‌سازی^(*)

آماره ارزیابی عملکرد مدل										مجموعه داده	کمیت معیار اندازه‌گیری شده
RLC	RNU	RSB	EF	NRMSE	RMSE	MAE	ME	CV	nobs		
۸۲/۹۷۰	۱۶/۶۷۰	۰/۳۶۰	۰/۸۲۹	۰/۰۲۹	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۱	۶/۹۴۸	۱۷	واسنجی	رطوبت خاک
۴۳/۴۶۹	۵۰/۴۵۸	۶/۰۷۳	۰/۸۷۷	۰/۰۳۷	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۱۰/۴۵۵	۱۳	صحت‌یابی	(cm ³ cm ⁻³)
۶۰/۱۴۱	۳۸/۳۷۰	۱/۴۸۹	۰/۹۲۲	۰/۱۷۰	۱۴/۶۹۱	۱۱/۳۷۰	-۱/۷۹۲	-۶۰/۷۰۶	۹۸	واسنجی	عمق سطح
۵۹/۵۳۲	۳۹/۶۸۲	۰/۷۸۶	۰/۷۸۱	۰/۲۱۷	۱۵/۸۲۲	۱۲/۱۸۸	۱/۴۰۳	-۴۶/۴۵۲	۱۲۲	صحت‌یابی	ایستایی (cm)
۶۶/۶۳۱	۳۰/۸۵۸	۲/۵۱۱	۰/۸۵۷	۰/۲۱۸	۰/۰۹۲	۰/۰۶۶	۰/۰۱۴	۵۷/۶۴۸	۸۱	واسنجی	جریان زه‌آب
۷۸/۲۹۸	۴/۸۳۵	۱۶/۸۶۷	۰/۷۱۲	۰/۲۸۵	۰/۱۱۹	۰/۰۸۶	-۰/۰۴۹	۵۳/۱۳۴	۱۲۹	صحت‌یابی	خروجی (cm d ⁻¹)
۲۸/۴۳۱	۶۸/۶۱۰	۲/۹۵۹	-۰/۳۹۹	۰/۱۲۴	۰/۲۵۱	۰/۱۸۸	۰/۰۴۳	۱۰/۵۰۴	۱۲	واسنجی	نیم‌رخ غلظت املاح
۲۲/۰۱۵	۶۱/۰۹۰	۱۶/۸۹۵	-۰/۶۵۳	۰/۱۵۲	۰/۳۲۵	۰/۲۷۶	-۰/۱۳۴	۱۱/۷۸۶	۱۲	صحت‌یابی	آب خاک (dS m ⁻¹)
۰/۰۰۰	۷۴/۱۳۲	۲۵/۸۶۸	-۰/۳۴۹	۰/۰۷۹	۰/۲۸۴	۰/۲۴۵	-۰/۱۴۴	۶/۷۷۳	۷۷	واسنجی	شوری زه‌آب
۰/۰۰۰	۸۵/۱۸۹	۱۴/۸۱۱	-۰/۱۷۴	۰/۰۷۲	۰/۳۴۴	۰/۲۰۲	۰/۰۹۴	۶/۶۷۷	۱۳۲	صحت‌یابی	(dS m ⁻¹)
۸۹/۲۹۱	۷/۰۲۶	۳/۶۸۳	۰/۹۹۷	۰/۰۳۷	۰/۱۲۰	۰/۱۰۱	۰/۰۲۳	۶۳/۵۹۷	۳۹	واسنجی	شاخص برگ (m ² m ⁻²)
۴۰/۵۰۶	۴۶/۴۴۷	۱۳/۰۴۷	۰/۹۹۳	۰/۰۴۷	۳/۲۵۴	۳/۰۲۹	۱/۱۷۵	۵۷/۳۹۹	۴	واسنجی	عملکرد نی (ton ha ⁻¹)
۹۹/۹۳۸	۰/۰۴۴	۰/۰۱۸	۰/۹۸۸	۰/۰۶۵	۰/۰۸۶	۰/۰۶۳	-۰/۰۰۱	۵۷/۷۹۷	۴	واسنجی	عملکرد ساکارز (ton ha ⁻¹)

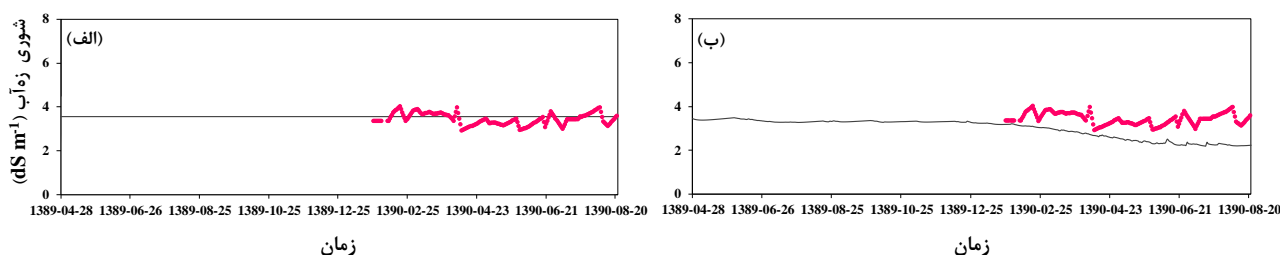
^(*) در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه‌گیری شده و Nobs تعداد مقایسه‌های صورت گرفته بین کمیت‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده می‌باشد



شکل ۲- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده کمیت‌های معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته در شبیه‌سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه‌سازی



شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی در شرایط اعمال (الف) و عدم اعمال (ب) فرآیند جذب سطحی املاح



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شورزی زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی در شرایط اعمال (الف) و عدم اعمال (ب) فرآیند جذب سطحی املاح

و آبیاری بی‌رویه) با سهمی ۷۷/۴۵ درصدی از تنش کل، عامل اصلی کاهش تعرق پتانسیل به تعرق واقعی بوده است. با توجه به جدول ۵، میزان کل آب آبیاری کاربردی در مزرعه مطالعاتی برابر با ۳۲۸/۸۴ سانتی‌متر بوده است که این مقدار فراتر از برآوردهای حداکثری گزارش شده (۳۵۰ سانتی‌متر) در اراضی کشت نیشکر در استان خوزستان (شش درصد بیشتر) است.

مقادیر نهایی شبیه‌سازی شده اجزای بیلان آب در مزرعه مطالعاتی طی دوره شبیه‌سازی در جدول ۵ و مقادیر شبیه‌سازی شده نهایی اجزای بیلان املاح و عملکرد محصول نیشکر (نی و ساکارز) در جدول ۶ ارائه گردیده است. بر اساس جدول ۵، میزان کل تبخیر-تعرق واقعی طی دوره شبیه‌سازی در مزرعه مطالعاتی ۱۴۷/۵۰ سانتی‌متر برآورد گردیده است. بر اساس جدول ۵، تنش اکسیژن وارد شده به گیاه (در اثر غرقاب شدن ناحیه توسعه ریشه

جدول ۵- مقادیر شبیه‌سازی شده اجزای بیلان آب (سانتی‌متر) در مزرعه مطالعاتی طی دوره شبیه‌سازی^(*)

مقدار	شرح	مقدار	شرح
۹۰/۳۷	کسر تبخیر-تعرق طی ساعات روز (درصد)	۱۵۸/۰۸	تبخیر پتانسیل (سانتی‌متر)
۲۳/۵۵	بارش ناخالص (سانتی‌متر)	۱۵۵/۳۸	تعرق پتانسیل (سانتی‌متر)
۲۳/۱۷	بارش خالص (سانتی‌متر)	۵۵/۳۲	تبخیر واقعی (سانتی‌متر)
۳۲۸/۸۴	آبیاری (سانتی‌متر)	۹۲/۱۸	تعرق واقعی (سانتی‌متر)
۱۵۹/۱۲	زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (سانتی‌متر)	۵۹/۰۲	تعرق نسبی $\times 100$ (-)
۴۹/۴۹	زه‌آب خروجی از سیستم زهکش سطحی (سانتی‌متر)	۷۷/۴۵	RedWet (درصد)
۲۰۸/۶۱	کل زه‌آب خروجی از سیستم زهکشی (سانتی‌متر)	۱۶/۲۴	RedDry (درصد)
۵/۹۱	جریان از کف (سانتی‌متر)	۶/۳۱	RedSlt (درصد)
۱/۸۲	ΔW (سانتی‌متر) ^(**)	۳۱۳/۴۵	تبخیر-تعرق پتانسیل (سانتی‌متر)
		۱۴۷/۵۰	تبخیر-تعرق واقعی (سانتی‌متر)

(*) در این جدول، RedWet، RedDry، RedSlt به ترتیب، بیانگر سهم (درصد) تنش اکسیژن، خشکی و شوری در کاهش تعرق پتانسیل به تعرق واقعی و ΔW تغییر در ذخیره آب نیم‌رخ خاک (سانتی‌متر) می‌باشند.

(**) محاسبه شده برای ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر

جدول ۶- مقادیر شبیه‌سازی شده اجزای بیلان املاح (تن نمک بر هکتار) و عملکرد محصول (تن بر هکتار) در مزارع مطالعاتی طی دوره شبیه‌سازی^(*)

عملکرد محصول (تن بر هکتار)		اجزای بیلان املاح (تن نمک بر هکتار)	
مقدار	شرح	مقدار	شرح
۲۰۸/۰۰	پتانسیل عملکرد نی شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۳۰/۱۰ (۱/۴۳)	بار نمک آب آبیاری
۹۶/۱۰	عملکرد واقعی نی شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۳۵/۲۷ (۳/۴۶)	بار نمک زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی
۹۸/۲۰	عملکرد نی اندازه‌گیری شده (تن بر هکتار)	۱۰/۹۷ (۳/۴۶)	بار نمک زه‌آب خروجی از سیستم زهکش سطحی
۴/۲۳	پتانسیل عملکرد ساکارز شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۴۶/۲۵ (۳/۴۶)	کل بار نمک زه‌آب خروجی از سیستم زهکشی
۱/۸۴	عملکرد واقعی ساکارز شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۲/۷۸ (۷/۳۴)	بار نمک جریان از کف
۱/۷۲	عملکرد ساکارز اندازه‌گیری شده (تن بر هکتار)	-۱۳/۳۷	تغییر ذخیره املاح در نیم‌رخ خاک ^(**)

(*) در این جدول، اعداد داخل پرانتز بیانگر میزان معادل مولفه املاح (تن نمک بر هکتار) بر حسب دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد

(**) محاسبه شده برای ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر

حدود ۴۶/۲۵ تن نمک بر هکتار از طریق سیستم‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی به بدنه‌های آبی پذیرنده تخلیه شده است. این مقادیر، بیانی کمی از اثرات زیست‌محیطی زهکشی زیرزمینی در منطقه مطالعاتی است.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ویرایش تصحیح شده‌ای از مدل SWAP به منظور مدل‌سازی توزیعی یک مزرعه کشت نیشکر با مدیریت زهکشی زیرزمینی کنترل شده (عمق کنترل ۹۰ سانتی‌متری) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، به کار گرفته شد. نتایج

میزان کل زه‌آب خروجی از دو سیستم زهکش زیرزمینی و زهکش سطحی جمع‌کننده به ترتیب، ۴۴/۴۶ و ۱۳/۸۳ درصد از کل آب ورودی به نیم‌رخ خاک مزرعه مطالعاتی را به خود اختصاص داده است (جدول ۵). همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر نهایی عملکرد محصول نیشکر بر حسب عملکرد نی و ساکارز از انطباق قابل قبولی با مقادیر نظیر اندازه‌گیری شده برخوردار هستند (با اختلاف به ترتیب، ۲/۱۴ و ۶/۹۸ درصدی). بر اساس مقادیر شبیه‌سازی شده اجزای بیلان املاح در جدول ۶، طی دوره شبیه‌سازی، حدود ۳۰/۱۰ تن نمک بر هکتار از طریق آبیاری به مزرعه مطالعاتی وارد و

زهکشی از مزرعه خارج و به بدنه‌های آبی پذیرنده تخلیه شده است. با استفاده از ویرایش واسنجی و صحت‌یابی شده مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی می‌توان سناریوهای مختلف مدیریت زه‌آب از طریق اجرای مدیریت یکپارچه آب و زه‌آب به شیوه استراتژی تقلیل منبع (که از طریق تصحیح مدیریت آبیاری مزرعه قابل تحقق است) و نیز گزینه‌های مختلف زهکشی کنترل شده را مورد بررسی قرار داد.

واسنجی و صحت‌یابی حاکی از عملکرد قابل قبول مدل توسعه یافته در کمی‌سازی فرآیندهای انتقال آب و املاح و فرآیندهای بیوفیزیکی حاکم بر سیستم زراعی مطالعاتی بود. نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط حضور آب زیرزمینی کم‌عمق، واسنجی و صحت‌یابی شبیه‌سازی‌های انتقال املاح پیش‌نیاز حصول اطمینان از شبیه‌سازی‌های واقع‌بینانه مدل می‌باشد. بر اساس اجزای بیلان املاح شبیه‌سازی شده طی دوره مطالعاتی، حدود ۳۰/۱۰ تن نمک بر هکتار از طریق آبیاری به مزرعه مطالعاتی وارد و حدود ۴۶/۲۵ تن نمک بر هکتار از طریق سیستم‌های

فهرست منابع

۱. پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش.، وظیفه‌دوست، م. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۵. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس‌سازی به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه: ۱- مقایسه عملکرد برخی مدل‌های ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه، نشریه آب و خاک، ۳۰(۲): ۳۳۴-۳۵۴.
۲. پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴. مقایسه تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانتیت ASCE و پنمن-مانتیت فائو-۵۶ در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مختلف: یک مطالعه عددی، نشریه آب و خاک، ۲۹(۵): ۱۱۸۹-۱۱۷۳.
۳. سمیع‌پور، ف.، محمدی، ک.، مهدیان، م.ح. و ناصری، ع. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل‌های زهکشی SWAP و DRAINMOD به‌منظور تعیین عمق و فاصله بهینه زهکش‌ها بر اساس بیشترین عملکرد محصول و کمترین مقدار خروجی زه‌آب، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۴): ۳۷۵-۳۸۶.
۴. صادقی لاری، ع. ۱۳۹۱. بررسی اثرات کنترل سطح ایستابی بر روی میزان جریان، نیتروژن و فسفر خروجی از زهکش‌های زیرزمینی در نواحی خشک (مطالعه موردی: شعبیه خوزستان). پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۱۷۸ ص.
۵. محمدی، س.، میرلطیفی، س.م. و اکبری، م. ۱۳۹۳. برنامه‌ریزی آبیاری نیشکر با استفاده از تلفیق داده‌های سنجنش از دور و مدل SWAP در کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان خوزستان، نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸(۱): ۳۹-۵۰.
6. Ayars, J.E., and B.R. Hanson. 2014. Integrated Irrigation and Drainage Water Management. In: Chang, A.C., and D.B. Silva (Eds.), Salinity and Drainage in San Joaquin Valley, California. Springer, Netherlands, pp. 249-276.
7. Bessembinder, J.J.E., A.S. Dhindwal, P.A. Leffelaar, T. Ponsioen, and S. Singh. 2003. Analysis of crop growth. In: van Dam, J.C., and R.S. Malik (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.
8. Dayyani, S., S.O. Prasher, A. Madani, and C.A. Madramootoo. 2010. Development of DRAIN-WARMF model to simulate flow and nitrogen transport in a tile-drained agricultural watershed in Eastern Canada. Agricultural water management, 98(1): 55-68.

9. Food and Agricultural Organisation of the United Nations (FAO). (2013). Crop Water Information: Sugarcane. (Available at: http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_sugarcane.html).
10. Javani-Jouni, H., A. Liaghat, A. Hassanoghli, and R. Henk. 2018. Managing controlled drainage in irrigated farmers' fields: A case study in the Moghan plain, Iran. *Agricultural water management*, 208: 393-405.
11. Kroes, J.G., J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks, and C.M.J. Jacobs. 2008. SWAP version 3.2: Theory description and user manual. Alterra-report 1649, Alterra, Wageningen, The Netherlands, 284 pp.
12. Loague, K., and R.E. Green. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of contaminant hydrology*, 7(1): 51-73.
13. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transaction of the ASAE*, 50(3): 885-900.
14. Noory, H., S.E.A.T.M. van der Zee, A.M. Liaghat, M. Parsinejad, and J.C. van Dam. 2011. Distributed agro-hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the Voshmgir Irrigation and Drainage Network in Northern Iran. *Agricultural Water Management*, 98(6): 1062-1070.
15. Parchami-Araghi, F., S.M. Mirlatifi, S. Ghorbani Dashtaki, and M.H. Mahdian. 2013. Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 481: 35-47.
16. Parsopoulos, K.E., and M.N. Vrahatis. 2004. UPSO: A unified particle swarm optimization scheme. In: Simos, T., and G. Maroulis (Eds.), *Lecture Series on Computer and Computational Sciences*. VSP International Science Publishers, Zeist, The Netherlands, pp. 868-873.
17. Sarwar, A., W.G.M. Bastiaanssen, T.M. Boers, and J.C. van Dam. 2000. Evaluating Drainage Design Parameters for the Fourth Drainage Project, Pakistan by using SWAP Model: Part I-Calibration. *Irrigation and Drainage Systems*, 14(4): 257-280.
18. Singels, A., and M. van der Laan. 2012. Sugarcane. In: Steduto, P., T.C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes (Eds.), *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and drainage paper 66, Food And Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, pp. 174-183.
19. Singh, R. 2005. *Water productivity analysis from field to regional scale*. Wageningen University, The Netherlands.
20. Smedema, L.K. 2000. Global drainage needs and challenges the role of drainage in todays world, Role of drainage and challenges in 21st century. *Proceedings of the Eighth ICID International Drainage Workshop*, 31 January-4 February 2000, New Delhi, India. International Commission on Irrigation and Drainage, Vol: 1, pp. 1-18.
21. Supit, I., A.A. Hooijer, and C.A. van Diepen. 1994. System description of the Wofost 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Joint research centre; European commission.
22. United Nations Environment Programme (UNEP). 2015. Nile River Basin: Nile Basin Adaptation to Water Stress: Comprehensive Assessment of Flood and Drought Prone Areas. (Available at: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/14067>).

Application of SWAP Model for Modelling a Sugarcane Farming System with Controlled Subsurface Drainage

F. Parchami-Araghi¹*, F. Samipour and A. Sadeghi-Lari

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

f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir

Former MSc Student, Dept. of Irrigation and Drainage Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

fatemeh.samipour@gmail.com

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

adnansadeghi@yahoo.com

Abstract

Realistic agro-hydrological modeling of the sugarcane fields with subsurface drainage in Khuzestan Province, Iran, is a challenging problem, due to rapid fluctuations of the shallow groundwater and, hence, water balance components, and significant size (~ 20 ha) of the fields. In this work, a distributed agro-hydrological modeling scheme was developed through the application of a modified version of the SWAP model and an improved variant of Unified Particle Swarm Optimization (UPSO) algorithm with capability of sub-daily calibration and simulation of controlled drainage. The developed modeling scheme was applied to a sugarcane (CP48-103 cultivar) field with controlled drainage (at 90 cm below ground level) in Imam Khomeini Sugarcane Agro-industrial Company farms, during 2010-2011 (481 days). The results demonstrated the success of the developed modeling scheme in retrieving the measured soil moisture, groundwater level, subsurface drainage outflow (with an EF of 0.829, 0.922, and 0.857 for calibration dataset; and 0.877, 0.781, and 0.712 for validation dataset, respectively), soil water solute concentration, subsurface drainage outflow salinity (with a NRMSE of 0.124 and 0.079 for calibration dataset; and 0.152 and 0.072 for validation dataset, respectively), Leaf Area Index, cane yield, and sucrose yield (with an EF of 0.997, 0.993, and 0.988, respectively). Based on the solute balance components simulated throughout the simulation period, ~ 30.10 ton salt ha⁻¹ was added to the soil due to saline irrigation water, and ~ 45.25 ton salt ha⁻¹ was discharged into the receiving water bodies via surface/subsurface field drains.

Keywords: Parallel programming, Particle Swarm Optimization, Penman-Monteith ASCE, Salinity, Unsaturated hydrology

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

*- Received: September 2019, and Accepted: January 2020