مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۴/ شماره ۴/ پیاپی ۳۹/ زمستان ۱۳۹۹ (۵۳-۶۶)

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی زراعی - هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروزانه یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده

فرزین پرچمی عراقی[۱*]، فاطمه سمیع‌پور[۲] و عدنان صادقی لاری[۳]

چکیده

شیوهٔ زهکشی کنترل شده، راهکاری مؤثر برای بهبود مدیریت آب کشاورزی در اراضی فاریاب مناطق خشک و نیمه‌خشک و تخفیف آثار زیست‌محیطی زهکشی زیرزمینی است. در پژوهش حاضر، با افزودن قابلیت شبیه‌سازی زهکشی زیرزمینی کنترل شده به مدل زراعی- هیدرولوژیکی SWAP و تلفیق این مدل با گونهٔ بهبود یافته‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه (UPSO)، یک طرح مدل‌سازی زراعی-هیدورولوژیکی توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروزانه و امکان شبیه‌سازی مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده توسعه یافت. طرح مدل‌سازی توسعه یافته، در یکی از مزارع کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) با مدیریت زهکشی کنترل شده (کنترل سطح ایستابی در عمق ۷۰ سانتی‌متر) و کشت اول نیشکر طی دورهٔ شبیه‌سازی ۱۳۸۹/۴/۲۸ تا ۱۳۹۰/۹/۲۰ (به‌مدت ۴۸۱ روز) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج واسنجی و صحت‌یابی مدل توسعه یافته، حاکی از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی (با آمارهٔ ضریب بازدهی مدل، EF، به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۷۵، ۰/۹۳۳ و ۰/۷۵۱ طی مرحلهٔ واسنجی و آماره EF به‌ترتیب، برابر با ۰/۸۰۴، ۰/۷۶۰ و ۰/۷۳۹ طی مرحلهٔ صحت‌یابی)، شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی با آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده، NRMSE، به‌ترتیب برابر با ۰/۱۰۱ و ۰/۱۴۲ در مرحله واسنجی و آماره NRMSE به‌ترتیب، برابر با ۰/۰۹۲ و ۰/۱۱۹ طی مرحلهٔ صحت‌یابی) و شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز (با آمارهٔ EF به‌ترتیب، برابر با ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۶ و ۰/۹۹۹ در مرحلهٔ واسنجی) بود. بر اساس اجزای بیلان نمک شبیه‌سازی شده طی دورهٔ مطالعاتی، حدود ۳۳/۷۲ تن بر هکتار نمک از طریق آبیاری به مزرعهٔ مطالعاتی وارد و حدود ۵۴/۹۴ تن بر هکتار نمک از طریق سیستم‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی به بدنه‌های آبی پذیرنده تخلیه شد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌نویسی موازی، بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا، ریچاردز- بنیان، شوری.

ارجاع: پرچمی عراقی ف. سمیع‌پور ف. و صادقی لاری ع. ۱۳۹۹. مدل‌سازی زراعی- هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروزانه یک سیستم زارعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده. مجله پژوهش آب ایران. ۳۹: ۵۳-۶۶.

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.
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس.
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه هرمزگان.
*** نویسنده مسئول**: **f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

مقدمه

در اراضی فاریاب مستعد شوری و ماندابی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، زهکشی ابزاری ضروری برای استفاده بهتر از زمین و توسعه هرچه بیشتر کشاورزی است (اسمیدما، ۲۰۰۰). از سوی دیگر، زهکش‌های زیرزمینی به‌عنوان یک مسیر جریان ترجیحی در خاک، منجر به کاهش زمان باقی ماندن آب در سیستم خاک و به‌همراه زهکش‌های سطحی سبب تسهیل انتقال زه‌آب شور و سایر آلاینده‌های کشاورزی به‌منابع آب سطحی پذیرندهٔ پایین‌دستی می‌شوند (دیانی و همکاران، ۲۰۱۰). تا جایی که حجم زه‌آب خروجی از سیستم‌های زهکشی و بار آلاینده‌های آن، به یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی اراضی فاریاب تبدیل شده است و فعالیت پایدار شبکه‌های آبیاری و زهکشی را تهدید می‌کند (تانجی و کیلن، ۲۰۰۲). در این رابطه، رویکرد زهکشی کنترل شده به‌دلیل متأثر ساختن الگوی جریان آب زیرزمینی کم‌عمق به‌طرف زهکش‌ها می‌تواند منجر به کاهش حجم و غلظت نمک زه‌آب و سایر آلاینده‌های کشاورزی و افزایش بهره‌وری مصرف آب و دیگر نهاده‌های کشاورزی شود (آیارز و هنسون، ۲۰۱۴؛ سعادت و همکاران، ۲۰۱۸). مدل‌های زراعی- هیدرولوژیکی تعیینی می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تدوین استراتژی‌های بهینهٔ مدیریت یکپارچهٔ آب و زه‌آب کشاورزی و عملی کردن شیوهٔ مدیریتی کاهش منبع، به‌عنوان یکی از موثرترین شیوه‌های مدیریت زه‌آب و تبعات زیست محیطی سیستم‌های زهکشی به‌کار گرفته شوند. از مدل‌های شبیه‌ساز فرآیندهای حاکم بر سیستم آب خاک-گیاه-آتمسفر، مدل ریچاردز-بنیان SWAP (کروز و همکاران، ۲۰۰۸) است. بر اساس پژوهش‌های متعدد انجام شده، این مدل از کارآمدترین و معتبرترین مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی اجزای بیلان آب، انتقال املاح و متغیرهای بیوفیزیکی در شرایط تنش‌های خشکی، شوری و اکسیژن در مقیاس مزرعه‌ای/منطقه‌ای است (سینگ، ۲۰۰۵؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۱). در مقایسه با مدل DRAINMOD (اسکگز، ۱۹۸۰)، دیگر مدل نام آشنا در زمینهٔ زهکشی کشاورزی، مدل SWAP دارای دو مزیت اصلی، شامل ۱) امکان کمی‌سازی صریح نیم‌رخ مکش ماتریک (و لذا، صعود شعریه)، رطوبت و شوری خاک طی دوره شبیه‌سازی و ۲) زیرروال شبیه‌سازی رشد گیاه خبره‌تر در مدل SWAP است. با توجه به این مزایا می‌توان گفت مدل SWAP گزینهٔ مناسب‌تری برای تحلیل سناریوهای مدیریت یکپارچهٔ آب و زه‌آب کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است؛ با این وجود، این مدل فاقد امکان شبیه‌سازی ساده شیوهٔ زهکشی کنترل شده است. از سوی دیگر، کاربرد نسخهٔ فعلی این مدل در مزارع کشت نیشکر واقع در واحدهای هفت‌گانهٔ شرکت توسعهٔ نیشکر و صنایع جانبی در استان خوزستان که به‌دلیل مساحت قابل توجه هر یک از مزارع (بیش از ۲۰ هکتار)، امکان آبیاری یکباره آن‌ها فراهم نیست و کامل شدن یک نوبت آبیاری هر مزرعه، ممکن است تا بیش از پنج روز به‌طول بیانجامد، دشوار است. چراکه در این وضعیت، مشخص‌سازی و تجمیع فرآیندهای زراعی- هیدرولوژیک غیرهمگن حاکم بر سیستم زراعی در قالب یک ستون خاک منفرد پرسش‌برانگیز خواهد بود. از سوی دیگر، با توجه به تغییرات زمانی سریع اجزای بیلان آب حین رویدادهای آبیاری در این مزارع، به‌نظر می‌رسد شبیه‌سازی زیرروزانه اجزای بیلان آب و املاح و لحاظ کردن زمان اندازه‌گیری مقادیر معیار مورد استفاده در واسنجی و صحت‌یابی مدل (به‌ویژه، نیم‌رخ رطوبت و شوری خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی) می‌تواند منجر به دستیابی به شبیه‌سازی‌های هرچه واقع‌بینانه‌تر از سیستم زراعی مطالعاتی شود. تاکنون، در تمامی مطالعات مشابه صورت انجام شده در اراضی کشت نیشکر استان خوزستان (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ سمیع‌پور و همکاران، ۱۳۸۹؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ نوذری و همکاران، ۱۳۹۷)، واسنجی مدل زراعی- هیدرولوژیکی بر اساس اتخاذ گام محاسباتی روزانه برای مقادیر شبیه‌سازی شده انجام شده است. این امر به‌معنای واسنجی مدل بر اساس مقایسهٔ مقادیر کمیت‌های معیار اندازه‌گیری شده طی ساعات مختلف شبانه‌روز با مقادیر شبیه‌سازی شده در ساعت ۲۴:۰۰ (به‌وقت محلی) است؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، عملی کردن کاربرد مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی در وضعیت واقعی بهره‌برداری از مزارع وسیع مجهز به سیستم(های) زهکش زیرزمینی با مدیریت تلفیقی زهکشی زیرزمینی آزاد و کنترل شده در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعیبیه)، خوزستان بوده است. بدین منظور، از طریق تلفیق نسخهٔ تصحیح شده‌ای از مدل SWAP و نمونه یکپارچه‌سازی شدهٔ

الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO)، یک طرح مدل‌سازی زراعی- هیدورولوژیکی ریچاردز- بنیان به‌شیوهٔ توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروزانه توسعه یافت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در یکی از مزارع (مزرعهٔ B1117) تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعیبیه) و با استفاده از بانک اطلاعات مزرعه‌ای گردآوری شده توسط صادقی‌لاری (۱۳۹۱) انجام شد. مزرعه مطالعاتی مجهز به زهکش زیرزمینی آزاد بود که در آن، مدیریت زهکشی کنترل شده (با عمق کنترل سطح ایستابی ۷۰ سانتی‌متر) طی بخشی از دورهٔ رشد گیاه نیشکر (از اردیبهشت تا آبان ماه ۱۳۹۰) اعمال شد.

در پژوهش حاضر، کد منبع مدل SWAP برای در نظر گرفتن طول مدت زمان رویدادهای آبیاری، شبیه‌سازی زیرروزانه برگاب و محصول تولیدی در وضعیت 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) اصلاح شد. از طریق تلفیق مدل SWAP با چارچوب ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۵)، امکان شبیه‌سازی تبخیر-تعرق زیرروزانه در مقیاس‌های زمانی دلخواه فراهم شد. برای فراهم شدن امکان مدل‌سازی زهکشی کنترل شده طی دوره‌های زمانی دلخواه از طول دورهٔ شبیه‌سازی، ماژول زهکشی مدل SWAP تصحیح شد. طول دوره شبیه‌سازی برای مزرعهٔ مورد مطالعه از ۲۸ تیر ۱۳۸۹ تا ۲۰ آذر ۱۳۹۰ (به‌مدت ۴۸۱ روز) در نظر گرفته شد. برای مزرعهٔ مطالعاتی، ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر (معادل با عمق وقوع لایه محدود کننده از سطح خاک در مزرعه مطالعاتی) و متشکل از دو لایه با ویژگی‌های ارائه شده در جدول ۱ در نظر گرفته شد.

ارزیابی صحت اطلاعات هواشناسی جمع‌آوری شده از ایستگاه هواشناسی مزرعهٔ نمونهٔ محدوده مطالعاتی 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 صورت گرفت (جدول ۲). برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانهٔ (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- مانتیث ASCE (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴) برای منطقه مطالعاتی استفاده شد. برای در نظر گرفتن اثر آبیاری تدریجی مزرعه مطالعاتی بر شبیه‌سازی‌های زراعی- هیدرولوژیکی سیستم زراعی مطالعاتی، مدل SWAP از طریق تعریف واحدهای شبیه‌سازی همگن موسوم هیدروتوپ به‌شیوه توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت. بدین‌ترتیب، مدل SWAP به‌ازای هریک از واحدهای هیدروتوپ به‌طور جداگانه اجرا شده و واسنجی مدل توسعه یافته از طریق 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 کل سطح مزرعه) صورت گرفت.

شرط مرزی پایین‌دست نیم‌رخ خاک به‌صورت 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 از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر مقاطع زمانی از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد شد. میزان شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیم‌رخ خاک، هریک به‌عنوان یک پارامتر مجهول یکتا در سراسر دورهٔ شبیه‌سازی از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. برای مدل‌سازی انتقال املاح در مزارع مطالعاتی، دو فرآیند انتقال توده‌ای و جذب سطحی املاح (ایزوترم جذب خطی) در نظر گرفته شد. 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 زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی در نظر گرفته شد. بدین‌ترتیب، تبیین سیستم زهکشی مربوط به هر ۱۰ هیدروتوپ در نظر گرفته شده برای مزرعه مطالعاتی در قالب یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی منفرد و نماینده خلاصه شد. روندیابی جریان زه‌آب خروجی از هر هیدروتوپ از طریق معادلهٔ ساده زیر انجام گرفت (دیانی و همکاران، ۲۰۱۰):

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

که در آن $L_{outlet,i}$ و $T_{d,i}$ به‌ترتیب، طول مسیر (متر) و زمان تأخیر (روز) رسیدن زه‌آب خروجی از هیدروتوپ *i*ام به نقطه خروجی، T_c متوسط زمان انتقال زه‌آب به خروجی سیستم زهکشی و $L_{outlet,max}$ بیانگر فاصلهٔ دوردست‌ترین هیدروتوپ از نقطه خروجی است.

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	۱۴/۰۰	۵۲/۰۰	۳۴/۰۰	۱/۶۶	۱/۸۵	۳۹/۶۰	۷/۶۸	۲/۹۸
۳۰ <	لوم رسی- سیلتی	۱۰/۶۷	۵۲/۳۳	۳۷/۰۰	۱/۶۶	۰/۷۳	۴۰/۱۶	۷/۸۶	۲/۴۲

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 محدوده اطمینان ۹۵ درصد است.

برای شبیه‌سازی متغیرهای بیوفیزیکی از مدل گیاهی WOFOST (سوپیت و همکاران، ۱۹۹۴) استفاده شد. پارامترهای حساس این مدل بر اساس پژوهش‌های مشابه گذشته (بسمبایندر و همکاران، ۲۰۰۳) شناسایی (جدول ۳) و مقادیر آن‌ها از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. به‌دلیل دیررس بودن رقم نیشکر کشت شده (رقم CP48-103) در مزرعهٔ مورد مطالعه و طول دوره زمانی قابل توجه شبیه‌سازی رشد و توسعهٔ گیاه، مقادیر پارامترهای S_{LA} و A_{max} (جدول ۳) در نه مقطع از دورهٔ رشد گیاه از طریق مدل‌سازی معکوس و برای سایر مقاطع بازه زمانی رشد گیاه از طریق درون‌یابی خطی بین مقادیر واسنجی شده برآورد شد.

برای واسنجی مدل توسعه یافته، یک طرح مدل‌سازی معکوس تک‌هدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی UPSO (پاراسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴)، از طریق برنامه‌نویسی فرترن و C++ چندپردازشی توسعه یافت. ویژگی برجستهٔ الگوریتم بهینه‌سازی UPSO، تلفیق ویژگی‌های بارز انتفاع و اکتشاف در گونه‌های lbest و gbest الگوریتم بهینه‌سازی PSO، بدون نیاز به افزایش تعداد دفعات محاسبه تابع هدف است (پاراسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴). در واسنجی مدل توسعه یافته برای مزرعهٔ مطالعاتی، در مجموع، ۴۵ پارامتر مجهول (جدول ۳) از طریق مدل‌سازی معکوس برآورد شد. فرآیند واسنجی مدل توسعه یافته، به‌ازای ۱۵۰ ذره و ۴۵۰ تکرار اجرای الگوریتم UPSO صورت گرفت (در مجموع، ۶۷۵ هزار مرتبه اجرای مدل SWAP).

کمیت‌های معیار مورد استفاده در طرح 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 و ساکارز گیاه نیشکر در مراحل مختلف رشد گیاه بود؛ به‌گونه‌ای که از همهٔ داده‌های مذکور به‌طور هم‌زمان در واسنجی مدل استفاده شد. از مجموع وزنی آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده با استفاده از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده کمیت معیار (NRMSE، معادله (۵)) با ضرایب وزنی یکسان به‌عنوان تابع برازش در مدل‌سازی معکوس استفاده شد. تقسیم‌بندی داده‌های یاد شده به مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌یابی به‌گونه‌ای انجام شد که حتی الامکان، هریک از دو مجموعه داده فوق در بر گیرندهٔ ۵۰ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده (به‌جز داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به شاخص سطح برگ و عملکرد

محصول که به‌طور کامل در واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت) باشند.

ارزیابی و مقایسهٔ عملکرد مدل توسعه یافته از طریق آماره‌های میانگین خطا (ME)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)، NRMSE و ضریب کارآیی مدل (EF) انجام شد (پرچمی عراقی و همکاران، ۲۰۱۳):

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i)}{m} \quad (۲)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{m}|P_i - O_i|}{m} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i)^2}{m}} \quad (۴)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i)^2}{m}} \Big/ \bar{O} \quad (۵)$$

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{m}(O_i - \bar{O})^2}\right) \quad (۶)$$

که در آن‌ها O مقدار اندازه‌گیری شده، P مقدار شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و m تعداد مقایسه‌ها ست. آمارهٔ ME بیان‌کنندهٔ آن است که مدل مورد بررسی مقدار O را بیش‌برآورد (مقادیر مثبت) یا کم‌برآورد (مقادیر منفی) می‌کند. برای برآوردی مطمئن از O، باید مقدار قدرمطلق آن تا حد امکان کوچک باشد. مقدار آماره‌های MAE و RMSE همواره مثبت است و با نزدیک شدن مقدار آن‌ها به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی بهبود می‌یابد. آمارهٔ EF مقادیر P را نسبت به $\bar{O}$ مقایسه می‌کند. در صورتی‌که مقادیر O و P کاملا مشابه باشند، مقدار این آماره برابر با یک خواهد بود. همچنین، مقدار این آماره ممکن است منفی باشد که در این حالت، این آماره بر این نکته دلالت دارد که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، تخمین بهتری را نسبت به مقادیر برآورد شده توسط مدل ارائه می‌دهد (پرچمی عراقی و همکاران، ۲۰۱۳). مقادیر ضریب کارآیی مدل در دامنهٔ ۰/۷۵ تا ۱/۰۰، ۰/۶۵ تا ۰/۷۵، ۰/۵۰ تا ۰/۶۵ و کوچک‌تر یا مساوی با ۰/۵ به‌ترتیب، به‌عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل‌قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده معیار در نظر گرفته می‌شود (موریاسی و همکاران، ۲۰۰۷). همچنین، مقادیر آمارهٔ NRMSE در دامنهٔ ۰/۰۰ تا ۰/۱۰، ۰/۱۰ تا ۰/۲۰، ۰/۲۰ تا ۰/۳۰ و بزرگ‌تر از ۰/۳۰ به‌ترتیب، به‌عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل‌قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی کمیت‌های معیار اندازه‌گیری شده در نظر گرفته می‌شود (لوگ و گرین، ۱۹۹۱). همین‌طور، سهم هریک از منابع عدم انطباق مقادیر O و P با استفاده از روش جزءبندی آماره میانگین مربعات خطا (MSE) به‌شرح زیر تعیین شد (گاچ و همکاران، ۲۰۰۳):

$$RSB = 100\frac{(\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i))^2}{MSE} \quad (۷)$$

$$RNU = 100\frac{(1-b^2)\sum_{i=1}^{m}(O_i - \bar{O})^2}{m\,MSE} \quad (۸)$$

$$RLC = 100\frac{(1-r^2)\sum_{i=1}^{m}(P_i - \bar{P})^2}{m\,MSE} \quad (۹)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{m}(P_i - O_i)^2}{m} \quad (۱۰)$$

که در آن‌ها $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، b شیب خط رگرسیون برازشی بر مقادیر O و P، RSB درصدی از MSE است که ناشی از انتقال خط رگرسیون به بالا یا پایین خط گراف ۱:۱ می‌باشد و بیانگر ضعف مدل در بیش‌برآوردگری یا کم‌برآوردگری داده‌های اندازه‌گیری شده است، RNU درصدی از MSE که ناشی از دوران خط رگرسیون نسبت به خط گراف ۱:۱ است و بیان‌کنندهٔ ضعف مدل در بازسازی نوسانات مقادیر اندازه‌گیری شده است. RLC درصدی از MSE که ناشی از کمبود همبستگی خطی بین مقادیر O و P می‌باشد. بدیهی است که RSB+RNU+RLC=۱۰۰.

نتایج و بحث

مقادیر بهینهٔ پارامترهای مجهول لحاظ شده در طرح مدل‌سازی معکوس در جدول ۳ نوشته شده است. مطابق با جدول ۳، مقادیر واسنجی شده ترم جریان از کف ستون خاک طی دورهٔ اعمال زهکشی زیرزمینی آزاد (دورهٔ ابتدایی شبیه‌سازی که پارامترهای $(qBot)_1$ تا $(qBot)_3$ را در برمی‌گیرد) بیشتر از دوره زمانی فعال شدن زهکشی کنترل شده (که در برگیرنده پارامترهای $(qBot)_4$ و $(qBot)_5$ می‌باشد) بوده است. این امر می‌تواند نشان‌دهنده اثر زهکشی کنترل شده در کاهش جریان خروجی از زهکش‌های زیرزمینی و کاهش مشکلات زیست‌محیطی زهکشی زیرزمینی باشد که توسط پژوهشگران متعددی مورد اشاره قرار گرفته است (کریستن و آیارز، ۲۰۰۱؛ موریاسی و همکاران، ۲۰۱۳).

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 شده است. بر اساس جدول ۴، مقایسه مقادیر آماره‌های ME و MAE حاکی از آن است که کم/بیش‌برآوردگری صورت گرفته در بازسازی هیچ‌یک از داده‌های معیار اندازه‌گیری شده به‌طور پایدار رخ نداده است. بر اساس آماره‌های RSB، RNU و RLC می‌توان گفت که بخش اعظم عدم انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، ناشی از کمبود همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و نارسایی مدل در بازسازی نوسانات زمانی مقادیر اندازه‌گیری شده بوده است. این نکته از شکل ۱، شکل ۲ و شکل ۴- الف که در آن‌ها مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کمیت‌های معیار مقایسه شده، نیز قابل استنباط است. بخشی از عدم انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را می‌توان به ناهمگنی مکانی در مزرعهٔ مورد مطالعه و نیز خطای آزمایشی نسبت داد که این موارد در عمل و شرایط مزرعه اجتناب ناپذیر است (سینگ، ۲۰۰۵). بخشی دیگر از این عدم انطباق را می‌توان به فرضیات ساده‌سازی اتخاذ شده در ساختار تشریحی مدل توسعه یافته برای مزرعهٔ مطالعاتی، به‌ویژه 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. عدم توانایی مدل در بازسازی نوسانات مقادیر اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ و عملکرد نی (آماره RNU در جدول ۴) را می‌توان ناشی از انتشار خطای بازسازی اجزای بیلان آب و املاح در شبیه‌سازی‌های رشد گیاه، نمود یافتن اثر عدم قطعیت 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 و نیز مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با میانگین وزنی مقادیر نظیر شبیه‌سازی شده مربوط به هر واحد هیدروتوپ دانست. مقادیر آماره‌های ارزیابی NRMSE و EF (جدول ۴) به‌ترتیب، حاکی از عملکرد قابل قبول تا بسیار خوب مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده نیم‌رخ رطوبتی خاک و نوسانات سطح ایستابی است. بر اساس مقادیر آمارهٔ NRMSE، عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی مزرعه در مراحل واسنجی و صحت‌یابی به‌ترتیب، غیرقابل قبول و قابل قبول ارزیابی می‌شود و متقابلا، مقادیر آماره EF حاکی از عملکرد بسیار خوب و خوب مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده این کمیت است. این ناسازگاری در مورد استفاده از آماره‌های فوق برای ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی انتقال املاح نیز مصداق دارد. بر اساس آمارهٔ EF، عملکرد مدل در شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک (به‌جز مرحلهٔ واسنجی) و شوری زه‌آب غیرقابل قبول ارزیابی شده و متقابلا، آمارهٔ NRMSE حاکی از عملکرد خوب تا بسیار خوب مدل در شبیه‌سازی انتقال املاح است. دلیل این تناقض ناشی از منطق بدون بعد ساختن عدم انطباق کل در دو آمارهٔ NRMSE و EF است. در تبیین ریاضی آماره‌های ارزیابی EF و NRMSE (به‌ترتیب، معادلات (۵) و (۶))، عدم انطباق کل مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به‌ترتیب، با استفاده از واریانس و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده بدون بعد می‌شود؛ بنابراین آمارهٔ EF به‌وضوح بیان‌کنندهٔ این حقیقت که چه کسری از واریانس مقادیر اندازه‌گیری شده از طریق مدل شبیه‌سازی توجیه شده است. می‌توان گفت در صورت بروز تناقض در ارزیابی عملکرد مدل بر اساس دو آمارهٔ فوق، ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌های اندازه‌گیری شده با تغییرپذیری بالا بر اساس آمارهٔ EF (در مقایسه با آمارهٔ NRMSE) مناسب‌تر خواهد بود و بالعکس. مقادیر آمارهٔ ضریب تغییرات (CV) کوچک‌تر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد و بزرگ‌تر از ۷۵ درصد به‌ترتیب، به‌عنوان تغییرپذیری ناچیز، بینابینی و تغییرپذیری بالای کمیت مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود (یوان‌ای‌پی، ۲۰۱۵). بر این اساس و با توجه به تغییرپذیری ناچیز مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (جدول ۴)، منطقا، در مقایسه با آمارهٔ EF، استفاده از آماره NRMSE برای قضاوت در مورد عملکرد مدل مناسب‌تر است.

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

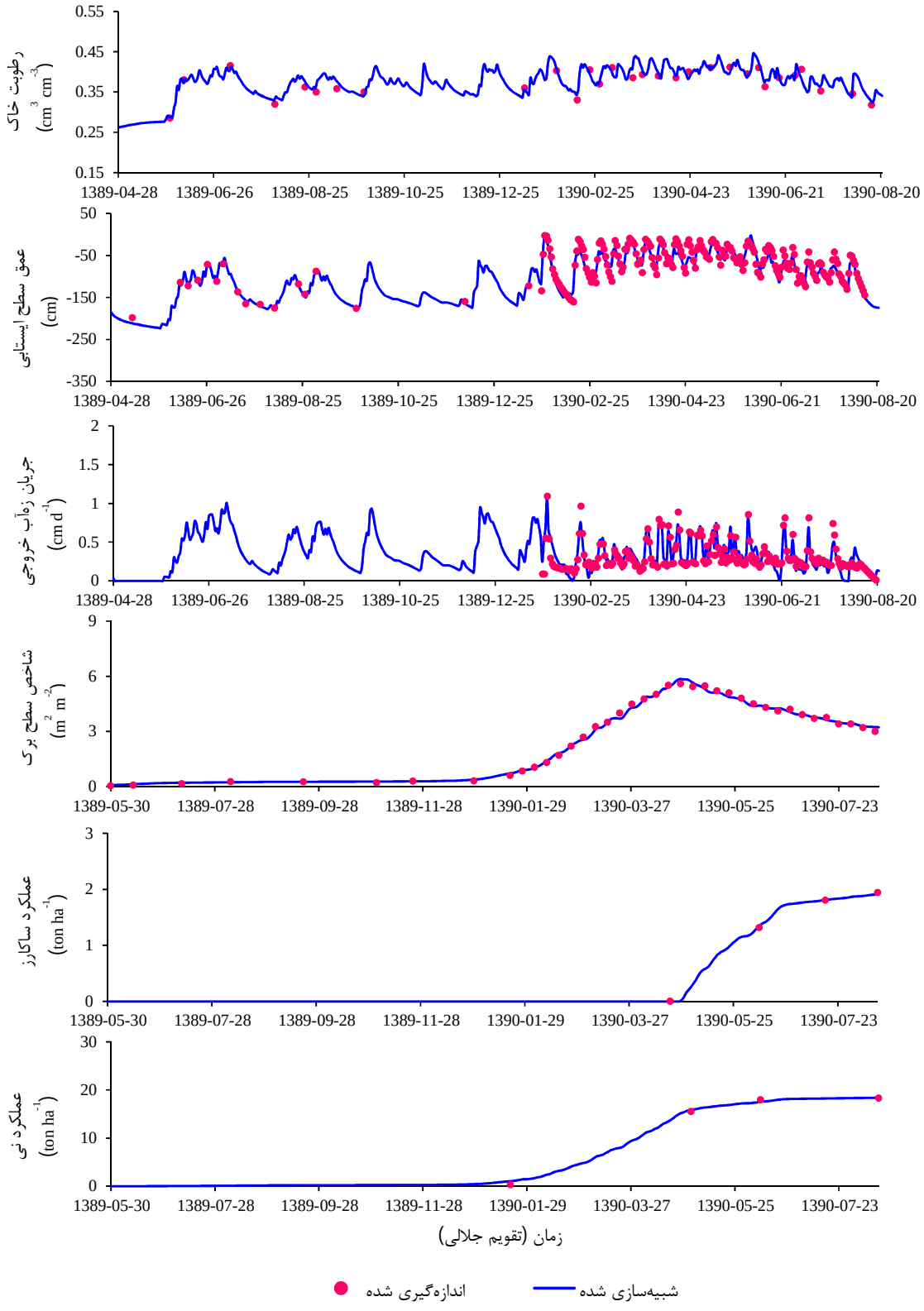
شرح	پارامتر	مقدار بهینه	شرح	پارامتر	مقدار بهینه
پارامترهای هیدرولیکی خاک برای دو لایه در نظر گرفته شده برای ستون خاک	$(q_{sat})_1$	۰/۴۷۴۲	پارامترهای گیاهی	*TSUMEA*	۵۵۸۴/۰۲۳۵
	$(q_{sat})_2$	۰/۴۱۷۹		*TSUMAM*	۱۳۰۳/۳۸۰۲
	$(a)_1$	۰/۰۲۶۳		*RGRLAI*	۰/۰۲۸۸
	$(a)_2$	۰/۰۱۳۴		$(S_{LA})_1$	۰/۰۰۰۵
	$(n)_1$	۱/۲۸۶۷		$(S_{LA})_2$	۰/۰۰۰۸
	$(n)_2$	۱/۲۹۲۲		$(S_{LA})_3$	۰/۰۰۰۸
	$(K_{sat})_1$	۲۰/۳۶۲۵		$(S_{LA})_4$	۰/۰۰۱۰
	$(K_{sat})_2$	۱۵/۷۷۱۳		$(S_{LA})_5$	۰/۰۰۱۳
جریان از کف در پنج مقطع زمانی	$(q_{Bot})_1$	۰/۰۰۸۰		$(S_{LA})_6$	۰/۰۰۱۴
	$(q_{Bot})_2$	۰/۰۰۸۰		$(S_{LA})_7$	۰/۰۰۱۳
	$(q_{Bot})_3$	۰/۰۰۷۵		$(S_{LA})_8$	۰/۰۰۰۷
	$(q_{Bot})_4$	۰/۰۰۵۹		$(S_{LA})_9$	۰/۰۰۱۴
	$(q_{Bot})_5$	۰/۰۰۳۵		*EFF*	۰/۵۰۱۳
پارامترهای انتقال املاح برای دو لایه در نظر گرفته شده برای ستون خاک	$(D_{dis})_1$	۲۵/۲۵۲۸		$(A_{max})_1$	۳۶/۲۷۹۲
	$(D_{dis})_2$	۲۰/۱۳۸۱		$(A_{max})_2$	۱۸/۵۹۶۸
	$(K_f)_1$	۲۴/۴۲۶۹		$(A_{max})_3$	۷/۶۸۹۵
	$(K_f)_2$	۲۳/۸۷۳۷		$(A_{max})_4$	۶۴/۶۷۸۹
شوری آب زیرزمینی	C_{gwl}	۲/۶۰۴۸		$(A_{max})_5$	۷۳/۴۵۴۵
شوری جریان از کف	C_{Bot}	۴/۱۸۸۲		$(A_{max})_6$	۴۳/۸۹۸۸
پارامترهای سیستم زهکشی	g_{drain}	۱۳۱/۷۴۱۲		$(A_{max})_7$	۳۵/۱۴۵۳
	g_{drain2}	۴۷۳۶/۶۸۳۶		$(A_{max})_8$	۴۳/۷۰۴۱
	$g_{drain,Ctrl}$	۷۵/۶۵۸۸		$(A_{max})_9$	۵/۸۹۳۱
	T_{delay}	۱/۳۶۷۰			

(*)در جدول فوق، q_{sat}، a، n و K_{sat} پارامترهای هیدرولیکی خاک، D_{dis} و K_f به‌ترتیب، ضریب انتشارپذیری (سانتی‌متر)، ضریب ایزوترم جذب خطی (سانتی‌مترمکعب بر گرم)، q_{Bot} جریان از کف (سانتی‌متر بر روز)، C_{Bot} شوری جریان از کف (میلی‌گرم بر سانتی‌مترمکعب)، g_{drain1}، $g_{drain,Ctrl}$، g_{drain2} و T_{delay} به‌ترتیب، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی زیرزمینی در وضعیت آزاد و کنترل شده (روز)، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی روباز و زمان تأخیر رسیدن زه‌آب به خروجی (روز)، C_{gw} شوری آب زیرزمینی (میلی‌گرم بر سانتی‌مترمکعب)، *TSUMEA*، *TSUMAM*، *RGRLAI*، S_{LA}، A_{max} و *EFF* به‌ترتیب، بیان‌کننده مجموع دما از مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی (درجه سانتی‌گراد روز)، مجموع دما از مرحله گل‌دهی تا بلوغ (درجه سانتی‌گراد روز)، حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ (مترمربع بر مترمربع بر روز)، سطح ویژه برگ (هکتار بر کیلوگرم)، حداکثر شدت جذب دی‌اکسید کربن (کیلوگرم بر هکتار بر ساعت) و بازدهی مصرف نور در یک برگ منفرد (کیلوگرم بر هکتار بر ساعت بر ژول مترمربع ثانیه) است.

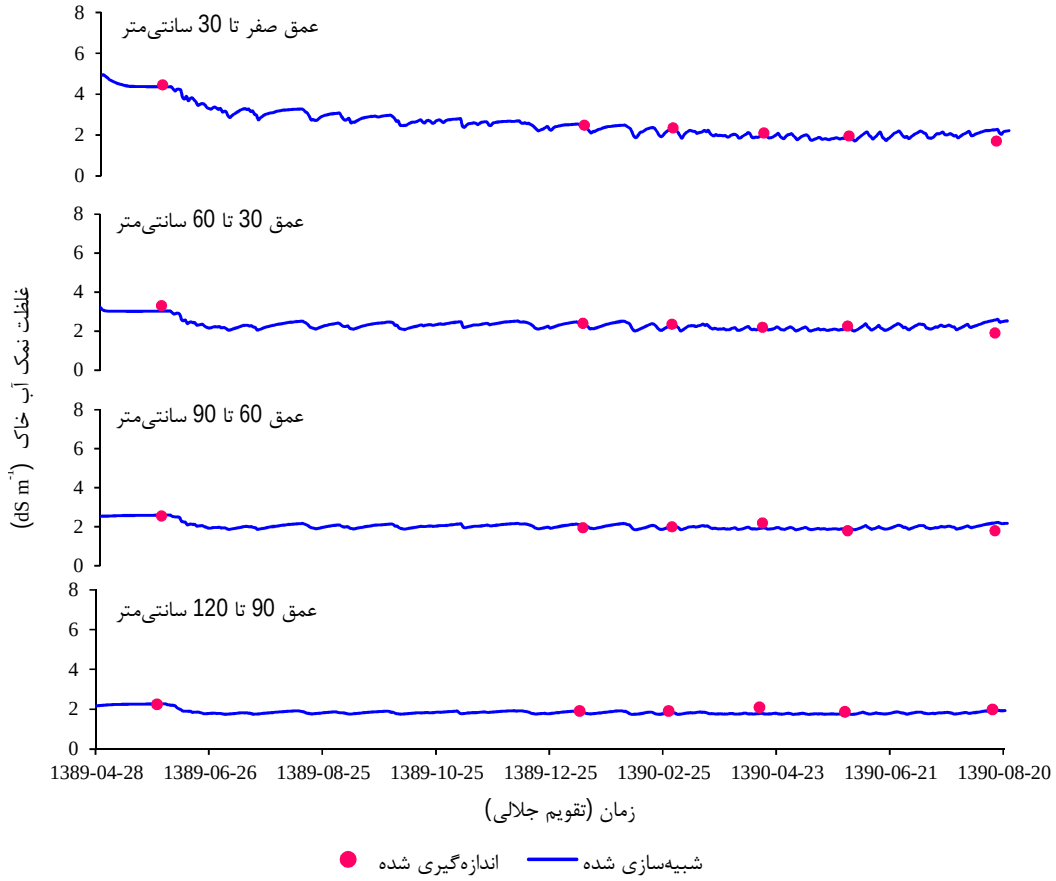
جدول ۴- مقادیر آماره‌های ارزیابی مورد استفاده در بررسی عملکرد مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه‌سازی(*)

کمیت معیار اندازه‌گیری شده	مجموعه داده	آماره ارزیابی عملکرد مدل									
		m	CV	ME	MAE	RMSE	NRMSE	EF	RSB	RNU	RLC
رطوبت خاک ($cm^3\ cm^{-3}$)	واسنجی	۱۷	۹/۲۳۴	۰/۰۰۵	۰/۰۱۱	۰/۰۱۲	۰/۰۳۳	۰/۸۷۵	۱۵/۰۵۹	۵/۱۰۰	۷۹/۸۴۱
	صحت‌یابی	۱۳	۷/۳۷۴	-۰/۰۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۳۳	۰/۸۰۴	۱/۶۰۴	۱۸/۸۰۱	۷۹/۵۹۵
عمق سطح ایستابی (cm)	واسنجی	۹۸	-۶۳/۷۷۲	-۱/۸۱۴	۹/۶۴۶	۱۲/۶۹۲	۰/۱۶۵	۰/۹۳۳	۲/۰۴۳	۲۲/۲۳۵	۷۵/۷۲۲
	صحت‌یابی	۱۲۲	-۴۸/۸۳۰	-۴/۳۹۶	۱۲/۲۹۶	۱۵/۶۳۸	۰/۲۳۹	۰/۷۶۰	۷/۹۰۱	۱۵/۳۰۱	۷۶/۷۹۸
جریان زه‌آب خروجی ($cm\ d^{-1}$)	واسنجی	۸۱	۶۶/۵۳۲	۰/۰۳۹	۰/۰۷۸	۰/۱۰۱	۰/۳۳۲	۰/۷۵۱	۱۴/۷۵۸	۴/۶۲۶	۸۰/۶۱۵
	صحت‌یابی	۱۲۹	۵۵/۸۴۵	۰/۰۰۹	۰/۰۷۳	۰/۰۸۹	۰/۲۸۵	۰/۷۳۹	۱/۰۳۰	۳/۸۳۹	۹۵/۱۳۱
نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک ($dS\ m^{-1}$)	واسنجی	۱۲	۱۷/۳۵۵	-۰/۰۴۹	۰/۱۶۲	۰/۲۱۸	۰/۱۰۱	۰/۶۶۴	۴/۹۷۲	۲۹/۴۹۳	۶۵/۵۳۶
	صحت‌یابی	۱۲	۴/۹۵۶	۰/۰۹۲	۰/۱۲۷	۰/۱۷۳	۰/۰۹۲	-۲/۴۸۷	۲۸/۰۰۹	۱۶/۴۱۴	۵۵/۵۷۷
شوری زه‌آب ($dS\ m^{-1}$)	واسنجی	۸۱	۱۳/۷۱۰	-۰/۱۳۶	۰/۳۸۴	۰/۵۲۴	۰/۱۴۲	-۰/۰۷۳	۶/۷۷۵	۹۳/۲۲۵	۰/۰۰۰
	صحت‌یابی	۱۲۹	۱۱/۲۶۱	۰/۱۳۱	۰/۳۵۶	۰/۴۰۷	۰/۱۱۹	-۰/۱۱۶	۱۰/۳۵۵	۸۹/۶۴۵	۰/۰۰۰
شاخص سطح برگ ($m^2\ m^{-2}$)	واسنجی	۳۹	۶۳/۷۷۴	۰/۰۰۲	۰/۰۹۹	۰/۱۲۵	۰/۰۴۲	۰/۹۹۶	۰/۰۲۵	۷/۱۸۱	۹۲/۷۹۴
عملکرد نی ($ton\ ha^{-1}$)	واسنجی	۴	۵۷/۰۰۸	۰/۱۹۶	۰/۳۹۴	۰/۴۵۷	۰/۰۳۵	۰/۹۹۶	۱۸/۳۴۶	۵۴/۵۴۴	۲۷/۱۱۰
عملکرد ساکارز ($ton\ ha^{-1}$)	واسنجی	۴	۶۰/۶۲۴	۰/۰۰۴	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۱۸	۰/۹۹۹	۲/۹۹۲	۳/۲۷۲	۹۳/۷۳۶

(*) در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه‌گیری شده و m تعداد مقایسه‌های صورت گرفته بین کمیت‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده است.



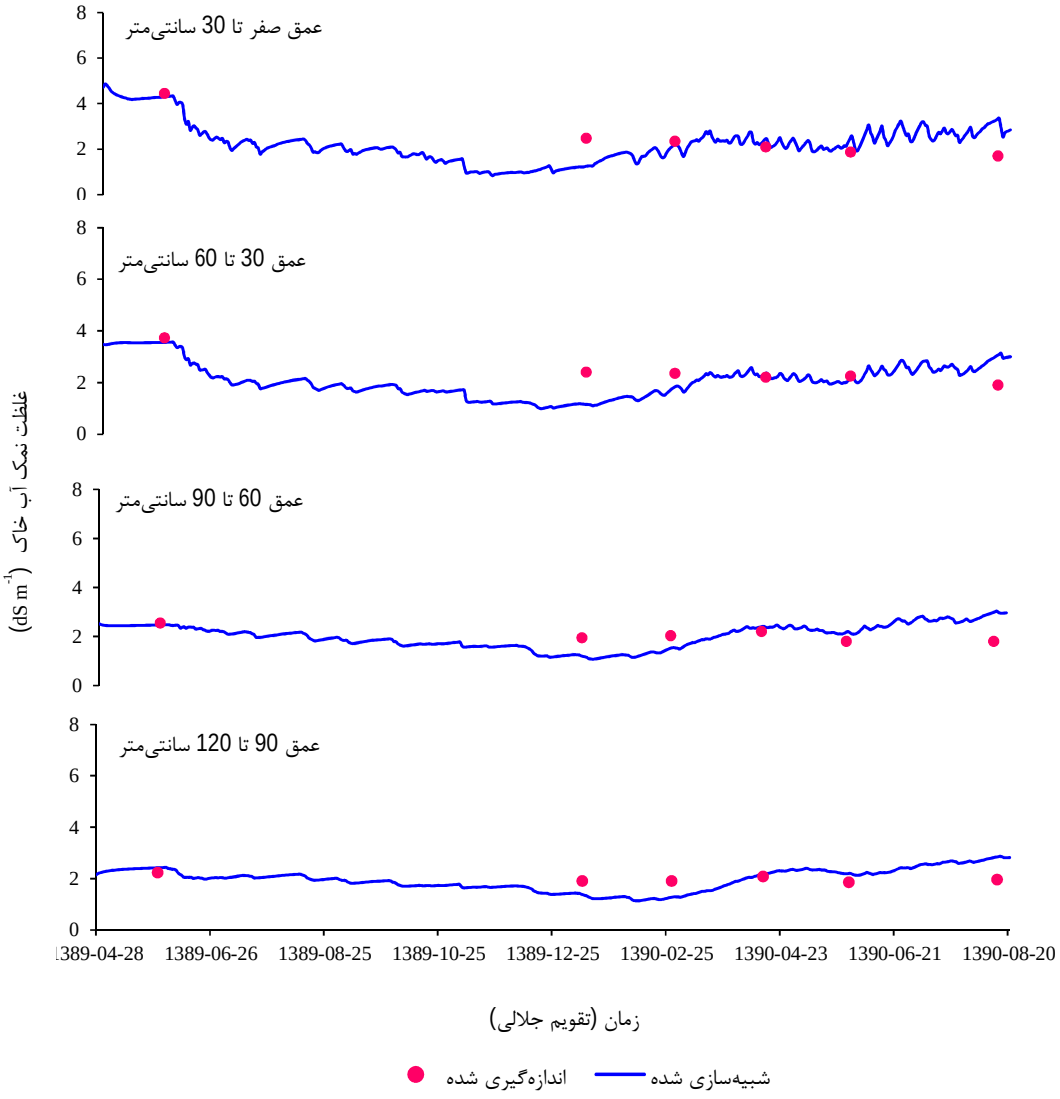
شکل ۱- مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کمیت‌های معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته در شبیه‌سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دورهٔ شبیه‌سازی



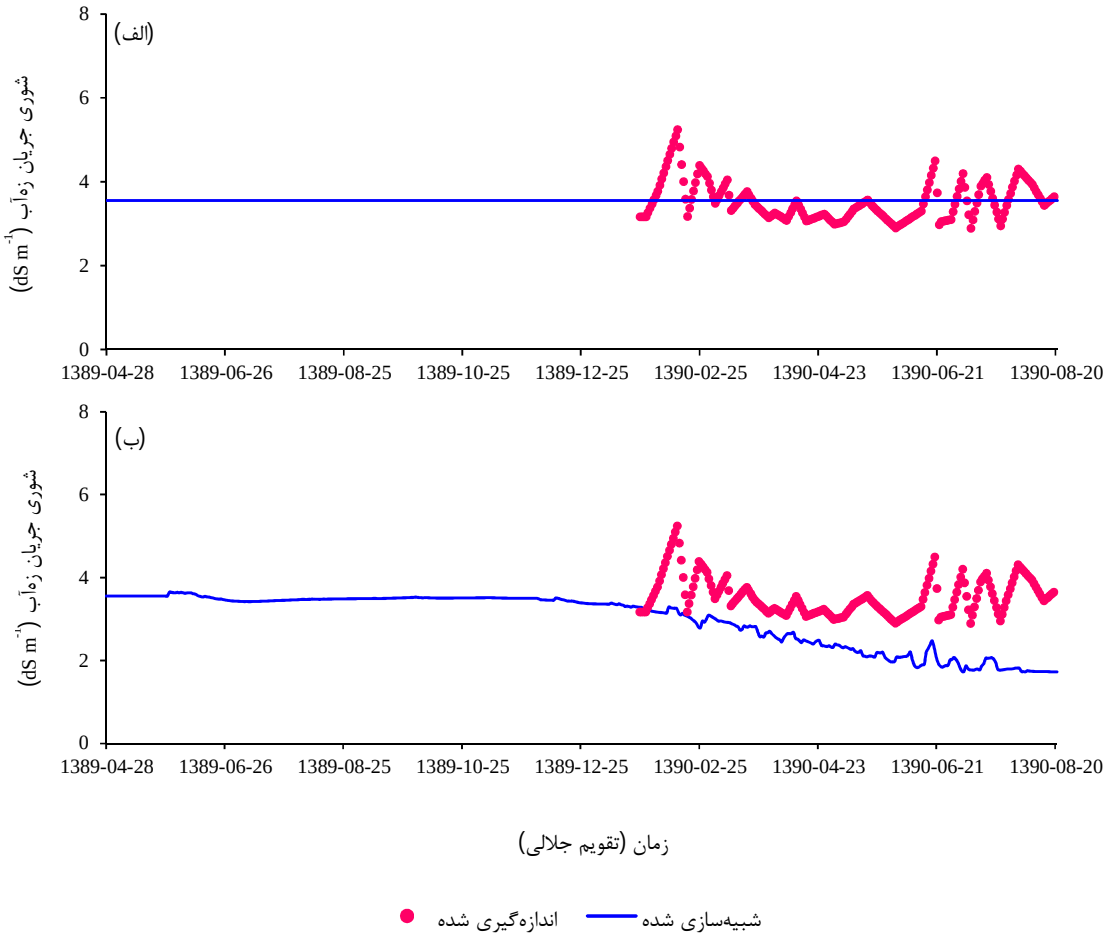
شکل ۲- مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعهٔ مطالعاتی در وضعیت اعمال فرآیند جذب سطحی املاح

به‌طور مشابه، در مقایسه با آمارهٔ NRMSE، آمارهٔ EF معیار مناسب‌تری برای قضاوت در مورد عملکرد مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی است. در این پژوهش، فرآیند جذب سطحی نیز در مدل‌سازی انتقال املاح خاک در مزرعه مطالعاتی لحاظ شد. دلیل این امر، این بود که نتایج بررسی‌ها نشان داد بدون در نظر گرفتن این فرآیند، مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی قادر به بازسازی قابل قبول مقادیر هر دو کمیت اندازه‌گیری شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی به‌صورت توأم نبود. به‌طور کلی، بیلان نمک، در خاک تابع عواملی چون عمق کاربرد و شوری آب آبیاری/ بارندگی، صعود مویینگی، بازدهی آبشویی املاح و نیز عواملی که در خاک منجر به تولید املاح و شوری خاک می‌شوند، است. 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، به‌دلیل ماهیت یک‌بعدی مدل SWAP و دشواری مدل‌سازی فرآیندهای فوق، صرف‌نظر شده است. به‌همین دلیل و برای در نظر گرفتن ضمنی نقش دو عامل فوق بر بیلان نمک خاک در مزرعهٔ 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 شد. بدین‌ترتیب، 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. در این رابطه، شبیه‌سازی‌های مدل توسعه یافته برای نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری در وضعیت عدم اعمال فرآیند جذب سطحی املاح به‌ترتیب، در شکل ۳ و شکل ۴- ب نشان داده شده است. بر اساس این شکل‌ها می‌توان گفت 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. همچنین در نظر گرفتن این فرآیند به‌عنوان یک فاکتور اطمینان، منجر به اتخاذ رویکردی محتاطانه‌تر در تحلیل سناریوهای مدیریت آبیاری در مزرعهٔ مطالعاتی و از توسعهٔ سناریوهای مدیریتی مبتنی بر پیش‌بینی‌های خوش‌بینانه در خصوص کاهش قابل توجه شوری خاک و زه‌آب خروجی در اثر مدیریت آبیاری اعمال شده اجتناب خواهد شد. مقادیر شبیه‌سازی شده اجزای بیلان آب طی دورهٔ شبیه‌سازی در جدول ۵ و مقادیر شبیه‌سازی شده اجزای بیلان نمک و عملکرد محصول نیشکر (نی و ساکارز) در جدول ۶ آورده شده است. مطابق با جدول ۵، میزان کل تبخیر-تعرق واقعی طی دورهٔ شبیه‌سازی در مزرعه مطالعاتی ۱۴۸/۰۶ سانتی‌متر برآورد گردیده است که این مقدار در دامنه مقادیر گزارش شده (سینگلز و ون‌درلار، ۲۰۱۲) برای تبخیر-تعرق واقعی گیاه نیشکر (۸۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر) قرار دارد.



شکل ۳- مقایسهٔ مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعهٔ مطالعاتی در وضعیت عدم اعمال فرآیند جذب سطحی املاح



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

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

شرح	مقدار	شرح	مقدار
تبخیر پتانسیل (سانتی‌متر)	۱۶۹/۵۰	کسر تبخیر- تعرق طی ساعات روز (درصد)	۹۰/۲۱
تعرق پتانسیل (سانتی‌متر)	۱۳۹/۱۱	بارش ناخالص (سانتی‌متر)	۲۳/۵۵
تبخیر واقعی (سانتی‌متر)	۶۱/۰۰	بارش خالص (سانتی‌متر)	۲۳/۲۳
تعرق واقعی (سانتی‌متر)	۸۷/۰۶	آبیاری (سانتی‌متر)	۳۶۹/۹۹
تعرق نسبی × ۱۰۰ (-)	۶۱/۴۴	زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (سانتی‌متر)	۱۸۳/۹۹
RedWet (درصد)	۹۳/۷۶	زه‌آب خروجی از سیستم زهکش سطحی (سانتی‌متر)	۵۷/۷۲
RedDry (درصد)	۰/۲۵	کل زه‌آب خروجی از سیستم زهکشی (سانتی‌متر)	۲۴۱/۷۱
RedSlt (درصد)	۵/۹۹	جریان از کف (سانتی‌متر)	۳/۲۸
تبخیر- تعرق پتانسیل (سانتی‌متر)	۳۰۸/۶۲	ΔW(**) (سانتی‌متر)	۶/۷۳
تبخیر- تعرق واقعی (سانتی‌متر)	۱۴۸/۰۶		

(*) دراین جدول، RedWet، RedDry و RedSlt به‌ترتیب، بیان‌کننده سهم (درصد) تنش اکسیژن، خشکی و شوری در کاهش تعرق پتانسیل به تعرق واقعی و ΔW تغییر در ذخیرهٔ آب نیم‌رخ خاک (سانتی‌متر) هستند.

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

جدول ۶- مقادیر شبیه‌سازی شده اجزای بیلان املاح (میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع) و عملکرد محصول (تن بر هکتار) در مزارع مطالعاتی طی دورهٔ شبیه‌سازی(*)

اجزای بیلان املاح (میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع)		عملکرد محصول (تن بر هکتار)	
شرح	مقدار	شرح	مقدار
بار نمک آب آبیاری	۳۳۷/۲۰ (۱/۴۲)	پتانسیل عملکرد نی شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۳۹/۸۸
بار نمک زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی	۴۱۸/۱۶ (۳/۵۵)	عملکرد واقعی نی شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۱۸/۳۹
بار نمک زه‌آب خروجی از سیستم زهکش سطحی	۱۳۱/۱۹ (۳/۵۵)	عملکرد نی اندازه‌گیری شده (تن بر هکتار)	۱۸/۳۰
کل بار نمک زه‌آب خروجی از سیستم زهکشی	۵۴۹/۳۶ (۳/۵۵)	پتانسیل عملکرد ساکارز شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۴/۳۶
بار نمک جریان از کف	۱۳/۷۳ (۶/۵۴)	عملکرد واقعی ساکارز شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)	۱/۹۱
تغییر ذخیره املاح در نیم‌رخ خاک(**)	-۱۹۸/۴۳	عملکرد ساکارز اندازه‌گیری شده (تن بر هکتار)	۱/۹۴

(*) در این جدول، اعداد داخل پرانتز بیان‌کننده میزان معادل مؤلفهٔ املاح (میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع) بر حسب غلظت (دسی‌زیمنس بر متر) است.
(**) محاسبه شده برای ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ویرایش تصحیح شده‌ای از مدل SWAP برای مدل‌سازی توزیعی یک سیستم زراعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده (عمق کنترل ۷۰ سانتی‌متری) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره)، به‌کار گرفته شد. نتایج این ارزیابی حاکی از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسب مدل توسعه یافته برای مزرعهٔ مطالعاتی در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی بود. عملکرد مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده نیم‌رخ رطوبت خاک بهتر از عملکرد آن در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک بود. نتایج این بررسی، حاکی از غلبگی سهم تنش اکسیژن وارده به گیاه نسبت به تنش‌های خشکی و شوری بود. این امر بیان‌کننده اعمال آبیاری بی‌رویه در مزرعه مطالعاتی بود. بر اساس اجزای بیلان نمک شبیه‌سازی شده طی دورهٔ مطالعاتی، حدود ۳۳/۷۲ تن بر هکتار نمک از طریق آبیاری به مزرعه مطالعاتی وارد و حدود ۵۴/۹۴ تن بر هکتار نمک از طریق سیستم‌های زهکشی از مزرعه خارج و به بدنه‌های آبی پذیرنده تخلیه شده است. ویرایش واسنجی و صحت‌یابی شده مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بررسی گزینه‌های مختلف مدیریت یکپارچه آب و زه‌آب مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

۱. ابراهیمی پاک ن.ع لیاقت ع. اگدرنژاد ا. احمدی م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های DRAINMOD، ENDRAIN و SWAP در تخمین نوسانات سطح ایستابی (مطالعه موردی: کشت و صنعت امیرکبیر، خوزستان). مجله پژوهش آب ایران. ۱۳(۴): ۹۳-۱۰۲.

۲. 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.

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

۴. 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.

۵. 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: شعیبیه خوزستان). پایان‌نامه دکتری. دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۱۷۸ ص.

۶. محمدی س. میرلطیفی س. م. و اکبری م. ۱۳۹۳. برنامه‌ریزی آبیاری نیشکر با استفاده از تلفیق داده‌های سنجش از دور و مدل SWAP در کشت و صنعت میرزاکوچک‌خان خوزستان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸(۱): ۳۹-۵۰.

۷. نوذری ح. پورصدری آ. آزادی س. لیاقت ع. ۱۳۹۷. ارزیابی نرم‌افزار DRAINMOD-S در شبیه‌سازی شوری زهاب زهکش‌های زیرزمینی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲(۳). ۴۵۹-۴۷۲.

8. Ayars J. E. and Hanson B. R. 2014. Integrated Irrigation and Drainage Water Management. In: Chang A.C., and Silva D.B. (Eds.), Salinity and Drainage in San Joaquin Valley, California. Springer, Netherlands. pp. 249-276.
9. 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. Alterra, Wageningen, The Netherlands. pp. 59-82.
10. Christen E. W. and Ayars J. E. 2001. Subsurface drainage system design and management in irrigated agriculture: best management practices for reducing drainage volume and salt load. Technical Report 38-01. CSIRO Land and Water, Griffith, NSW. 2680 p.
11. Dayyani S. Prasher S. O. Madani A. and Madramootoo C. A. 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.
12. Gauch H. G. Hwang J. T. and Fick G. W. 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. Agronomy Journal. 95(6): 1442-1446.
13. Kroes J. G. van Dam J. C. Groenendijk P. Hendriks R. F. A. and Jacobs C. M. J. 2008. SWAP version 3.2: Theory description and user manual. Alterra-report 1649, Alterra, Wageningen, The Netherlands. 284 p.
14. 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.
15. 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.
16. Moriasi D. N. Gowda P. H. Arnold J. G. Mulla D. J. Ale S. and Steiner J. L. 2013. Modeling the impact of nitrogen fertilizer application and tile drain configuration on nitrate leaching using SWAT. Agricultural Water Management. 130: 36-43.
17. Noory H. van der Zee S. E. A. T. M. Liaghat A. M. Parsinejad M. and van Dam J. C. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Saadat S. Bowling L. Frankenberger J. and Kladivko E. 2018. Nitrate and phosphorus transport through subsurface drains under free and controlled drainage. Water research. 142: 196-207.
21. Singels A. and van der Laan M. 2012. Sugarcane. In: Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., and Raes D. (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.
22. Singh R. 2005. Water productivity analysis from field to regional scale. Wageningen University, The Netherlands. 146 p.
23. Skaggs R. W. 1980. DRAINMOD Reference Report. Methods for Design and Evaluation of Drainage-Water Management Systems for Soils with High Water Tables.

USDA-SCS, South National Technical Center, Fort Worth, Texas, USA. 329 p.
24. 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. 1: 1-18.
25. 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.
26. Tanji K. K. and Kielen N. C. 2002. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. FAO irrigation and drainage paper 61, food and agriculture organization of the United Nations, Rome, Italy. 145 p.
27. 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).