

## مدل سازی زراعی - هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروزانه یک سیستم زراعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده

فرزین پرچی عراقی<sup>۱\*</sup>، فاطمه سمیع پور<sup>۲</sup> و عدنان صادقی لاری<sup>۳</sup>

### چکیده

شیوه زهکشی کنترل شده، راهکاری مؤثر برای بهبود مدیریت آب کشاورزی در اراضی فاریاب مناطق خشک و نیمه خشک و تخفیف آثار زیست محیطی زهکشی زیرزمینی است. در پژوهش حاضر، با افزودن قابلیت شبیه سازی زهکشی زیرزمینی کنترل شده به مدل زراعی - هیدرولوژیکی SWAP و تلفیق این مدل با گونه بهبود یافته ای از الگوریتم بهینه سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه (UPSO)، یک طرح مدل سازی زراعی - هیدرولوژیکی توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروزانه و امکان شبیه سازی مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده توسعه یافت. طرح مدل سازی توسعه یافته، در یکی از مزارع کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) با مدیریت زهکشی کنترل شده (کنترل سطح ایستابی در عمق ۷۰ سانتی متر) و کشت اول نیشکر طی دوره شبیه سازی ۱۳۸۹/۴/۲۸ تا ۱۳۹۰/۹/۲۰ (به مدت ۴۸۱ روز) مورد استفاده قرار گرفت. نتایج واسنجی و صحت یابی مدل توسعه یافته، حاکی از قابلیت تعمیم پذیری مناسب مدل در شبیه سازی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه آب خروجی (با آماره ضریب بازدهی مدل، EF، به ترتیب، برابر با ۰/۸۷۵، ۰/۹۳۳ و ۰/۷۵۱ طی مرحله واسنجی و آماره EF به ترتیب، برابر با ۰/۸۰۴، ۰/۷۶۰ و ۰/۷۳۹ طی مرحله صحت یابی)، شبیه سازی نیم رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی با آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده، NRMSE، به ترتیب برابر با ۰/۱۰۱ و ۰/۱۴۲ در مرحله واسنجی و آماره NRMSE به ترتیب، برابر با ۰/۰۹۲ و ۰/۱۱۹ طی مرحله صحت یابی) و شبیه سازی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز (با آماره EF به ترتیب، برابر با ۰/۹۹۶، ۰/۹۹۶ و ۰/۹۹۹ در مرحله واسنجی) بود. بر اساس اجزای بیلان نمک شبیه سازی شده طی دوره 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 سیستم های زهکشی سطحی و زیرزمینی به بدنه های آبی پذیرنده تخلیه شد.

**واژه های کلیدی:** برنامه نویسی موازی، بهینه سازی رفتار جمعی اجزا، ریچاردز - بنیان، شوری.

**ارجاع:** پرچی عراقی ف.، سمیع پور ف. و صادقی لاری ع. ۱۳۹۹. مدل سازی زراعی - هیدرولوژیکی توزیعی و زیرروزانه یک سیستم زراعی 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@areco.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱

## 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 به منابع آب سطحی پذیرنده پایین‌دستی می‌شوند (دبانی 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 (نانجی 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 (آیاز و هنسون، ۲۰۱۴؛ سعادت و همکاران، ۲۰۱۸). مدل‌های زراعی-هیدرولوژیکی تعیینی می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تدوین استراتژی‌های بهینه مدیریت یکپارچه آب و زه‌آب کشاورزی و عملی کردن شیوه مدیریت کاهش منبع، به‌عنوان یکی از موثرترین شیوه‌های مدیریت زه‌آب و تبعات زیست‌محیطی 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 زمینه 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 خیره‌تر در مدل SWAP است. با توجه به این مزایا می‌توان گفت مدل SWAP گزینه مناسب‌تری برای تحلیل سناریوهای مدیریت یکپارچه آب و زه‌آب کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است؛ با این وجود، این مدل فاقد امکان شبیه‌سازی ساده 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 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-هیدرولوژیکی 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 زیرروانه 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 مقایسه 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 سیستم‌های زهکش زیرزمینی با مدیریت تلفیقی زهکشی زیرزمینی آزاد و کنترل شده در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، خوزستان بوده است. بدین منظور، از طریق تلفیق نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP و نمونه یکپارچه‌سازی شده

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

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در یکی از مزارع (مزرعه B1117) تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه) و با استفاده از بانک اطلاعات مزرعه‌ای گردآوری شده توسط صادقی لاری (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 دوره 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 پرجمی عراقی و همکاران (۱۳۹۴؛ ۱۳۹۵) اصلاح شد. از طریق تلفیق مدل SWAP با چارچوب ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه توسعه یافته توسط پرجمی 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 دوره شبیه‌سازی، ماژول زهکشی مدل SWAP تصحیح شد. 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 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 مزرعه نمونه محدود مطالعه و برآورد داده‌های هواشناسی گم شده از طریق الگوریتم توسعه یافته توسط پرجمی عراقی و همکاران (۱۳۹۵) در ترکیب با داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز صورت گرفت (جدول ۲). برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع

زیرروزانه (با مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه‌ای) از چارچوب ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه توسعه یافته توسط پرجمی عراقی و همکاران (۱۳۹۵) و ویرایش تصحیح شده مدل پنمن-مانتیت ASCE (پرجمی 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. بدین ترتیب، مدل SWAP به‌ازای هر یک 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، هر یک به‌عنوان یک پارامتر مجهول یکتا در سراسر دوره 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. 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 زهکشی سطحی منفرد و نماینده خلاصه شد. روندیابی جریان زه‌آب خروجی از هر هیدروتوپ از طریق معادله ساده زیر انجام گرفت (دیانی و همکاران، ۲۰۱۰):

(۱)  $T_{d,i} = T_c L_{outlet,i} / L_{outlet,max}$   
 که در آن  $L_{outlet,i}$  و  $T_{d,i}$  به ترتیب، طول مسیر (متر) و زمان تأخیر (روز) رسیدن زه‌آب خروجی از هیدروتوپ نام به نقطه خروجی،  $T_c$  متوسط زمان انتقال زه‌آب به خروجی سیستم زهکشی و  $L_{outlet,max}$  بیانگر فاصله دور دست‌ترین 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<sup>(۱)</sup>

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 ( $^{\circ}C$ )	۰/۴	۳۳/۰	۱۷/۷	۴۷/۷۴	۰/۷۵
دمای حداکثر ( $^{\circ}C$ )	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

<sup>(۱)</sup> CI95 بیانگر محدوده اطمینان ۹۵ درصد است.

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 همه 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 گیرنده ۵۰ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده (به‌جز داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به شاخص سطح برگ و عملکرد

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 مزرعه مورد مطالعه و طول دوره زمانی قابل توجه شبیه‌سازی رشد و توسعه گیاه، مقادیر پارامترهای  $S_{LA}$  و  $A_{max}$  (جدول ۳) در نه مقطع از دوره 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 برجسته الگوریتم بهینه‌سازی UPSO، تلفیق ویژگی‌های بارز ارتفاع و اکتشاف در گونه‌های  $I_{best}$  و  $g_{best}$  الگوریتم بهینه‌سازی PSO، بدون نیاز به افزایش تعداد دفعات محاسبه تابع هدف است (پاراسوپولوس و وراهاتیس، ۲۰۰۴). در واسنجی مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، در

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 بیان‌کننده 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  $RSB+RNU+RLC=100$ .

### نتایج و بحث

مقادیر بهینه 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 دوره اعمال زهکشی زیرزمینی آزاد (دوره ابتدایی شبیه‌سازی که پارامترهای  $(qBot)_1$  تا  $(qBot)_3$  را در برمی‌گیرد) بیشتر از دوره زمانی فعال شدن زهکشی کنترل شده (که در برگزیده 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

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

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

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

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

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

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

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

که در آن‌ها  $O$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $P$  مقدار شبیه‌سازی شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $m$  تعداد مقایسه‌ها است. آماره  $ME$  بیان‌کننده 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. آماره  $EF$  مقادیر  $P$  را نسبت به  $\bar{O}$  مقایسه می‌کند. در صورتی که مقادیر  $O$  و  $P$  کاملاً 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 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 به ترتیب، 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 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، به‌عنوان عملکرد بسیار خوب، خوب، قابل‌قبول و غیرقابل قبول مدل در بازسازی

نیم‌رخ رطوبتی خاک و نوسانات سطح ایستابی است. بر اساس مقادیر آماره 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 متقابلاً، 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 آماره EF، عملکرد مدل در شبیه‌سازی نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک (به‌جز مرحله واسنجی) و شوری زه‌آب غیرقابل قبول ارزیابی شده و متقابلاً، آماره 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 آماره 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 آماره EF به‌وضوح بیان‌کننده 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 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. مقادیر آماره 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 شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (جدول ۴)، منطقی است که مقایسه با آماره EF، استفاده از آماره NRMSE برای قضاوت در مورد عملکرد مدل مناسب‌تر است.

صحت‌یابی در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس جدول ۴، مقایسه مقادیر آماره‌های ME و MAE حاکی از آن است که کم‌ابیش برآورد‌گری 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 مزرعه مورد مطالعه و نیز خطای آزمایشی نسبت داد که این موارد در عمل و شرایط مزرعه اجتناب‌ناپذیر 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، 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

جدول ۳- مقادیر بهترین برآورد پارامترهای مجهول مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی<sup>(\*)</sup>

مقدار بهینه	پارامتر	شرح	مقدار بهینه	پارامتر	شرح
۵۵۸۴/۰۲۳۵	<i>TSUMEA</i>		۰/۴۷۴۲	$(q_{sat})_1$	
۱۳۰۳/۳۸۰۲	<i>TSUMAM</i>		۰/۴۱۷۹	$(q_{sat})_2$	
۰/۰۲۸۸	<i>RGLAI</i>		۰/۰۲۶۳	$(a)_1$	پارامترهای هیدرولیکی خاک
۰/۰۰۰۵	$(S_{LA})_1$		۰/۰۱۳۴	$(a)_2$	برای دو لایه در نظر گرفته
۰/۰۰۰۸	$(S_{LA})_2$		۱/۲۸۶۷	$(n)_1$	شده برای ستون خاک
۰/۰۰۰۸	$(S_{LA})_3$		۱/۲۹۲۲	$(n)_2$	
۰/۰۰۱۰	$(S_{LA})_4$		۲۰/۳۶۲۵	$(K_{sat})_1$	
۰/۰۰۱۳	$(S_{LA})_5$		۱۵/۷۷۱۳	$(K_{sat})_2$	
۰/۰۰۱۴	$(S_{LA})_6$		۰/۰۰۸۰	$(q_{Bot})_1$	
۰/۰۰۱۳	$(S_{LA})_7$		۰/۰۰۸۰	$(q_{Bot})_2$	جریان از کف
۰/۰۰۰۷	$(S_{LA})_8$		۰/۰۰۷۵	$(q_{Bot})_3$	
۰/۰۰۱۴	$(S_{LA})_9$	پارامترهای گیاهی	۰/۰۰۵۹	$(q_{Bot})_4$	در پنج مقطع زمانی
۰/۵۰۱۳	<i>EFF</i>		۰/۰۰۳۵	$(q_{Bot})_5$	
۳۶/۲۷۹۲	$(A_{max})_1$		۲۵/۲۵۲۸	$(D_{dis})_1$	پارامترهای انتقال املاح
۱۸/۵۹۶۸	$(A_{max})_2$		۲۰/۱۳۸۱	$(D_{dis})_2$	برای دو لایه در نظر گرفته
۷/۶۸۹۵	$(A_{max})_3$		۲۴/۴۲۶۹	$(K_f)_1$	
۶۴/۶۷۸۹	$(A_{max})_4$		۲۳/۸۷۳۷	$(K_f)_2$	شده برای ستون خاک
۷۳/۴۵۴۵	$(A_{max})_5$		۲/۶۰۴۸	$C_{gwt}$	شوری آب زیرزمینی
۴۳/۸۹۸۸	$(A_{max})_6$		۴/۱۸۸۲	$C_{Bot}$	شوری جریان از کف
۳۵/۱۴۵۳	$(A_{max})_7$		۱۳۱/۷۴۱۲	$g_{rain}$	
۴۳/۷۰۴۱	$(A_{max})_8$		۴۷۳۶/۶۸۳۶	$g_{rain2}$	پارامترهای
۵/۸۹۳۱	$(A_{max})_9$		۷۵/۶۵۸۸	$g_{drain,Ctrl}$	سیستم زهکشی
			۱/۳۶۷۰	$T_{delay}$	

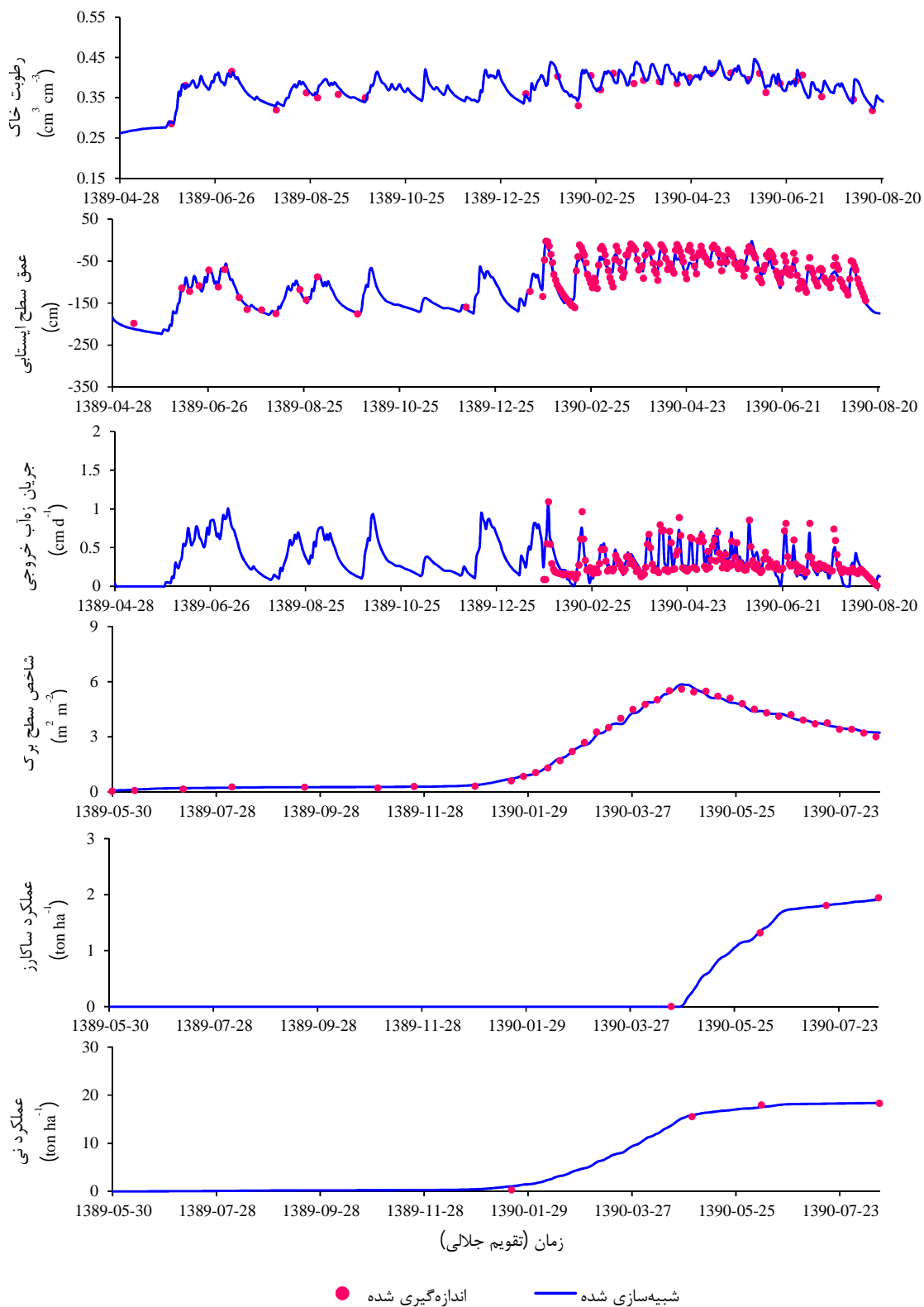
<sup>(\*)</sup> در جدول فوق،  $q_{sat}$ ،  $n$ ،  $a$  و  $K_{sat}$  پارامترهای هیدرولیکی خاک،  $D_{dis}$  و  $K_f$  به ترتیب، ضریب انتشارپذیری (سانتی متر)، ضریب ایزوترم جذب خطی (سانتی مترمکعب بر گرم)،  $q_{Bot}$  جریان از کف (سانتی متر بر روز)،  $C_{Bot}$  شوری جریان از کف (میلی گرم بر سانتی مترمکعب)،  $g_{rain1}$ ،  $g_{rain2}$  و  $g_{drain,Ctrl}$  به ترتیب، مقاومت زهکشی سیستم (میلی گرم بر سانتی مترمکعب)،  $EFF$  و  $A_{max}$ ،  $S_{LA}$ ،  $RGLAI$ ،  $TSUMAM$ ،  $TSUMEA$ ،  $C_{gwt}$  شوری آب زیرزمینی (درجه سانتی گراد)،  $T_{delay}$  و  $g_{rain}$  به ترتیب، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی روباز و زمان تأخیر رسیدن زه آب به خروجی (روز)،  $C_{gwt}$  شوری آب زیرزمینی (میلی گرم بر سانتی مترمکعب)،  $EFF$  به ترتیب، بیان کننده مجموع دما از مرحله جوانه زنی تا گل دهی (درجه سانتی گراد) (مجموع دما از مرحله گل دهی تا بلوغ (درجه سانتی گراد روز)، حداکثر افزایش نسبی شاخص سطح برگ (مترمربع بر مترمربع بر روز)، سطح ویژه برگ (هکتار بر کیلوگرم)، حداکثر شدت جذب دی اکسید 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 آماره های ارزیابی مورد استفاده در بررسی عملکرد مدل SWAP در شبیه سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای

بیوفیزیکی طی دوره شبیه سازی<sup>(\*)</sup>

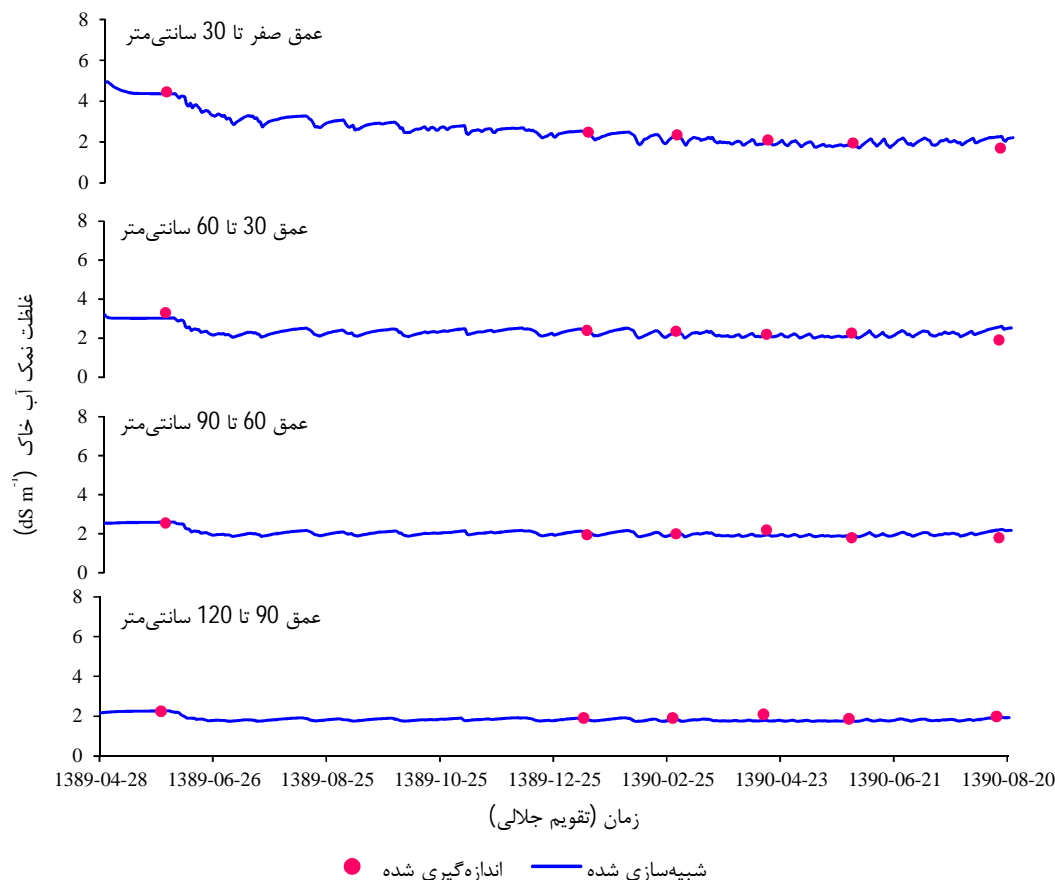
آماره ارزیابی عملکرد مدل										مجموعه داده	کمیت معیار اندازه گیری شده
RLC	RNU	RSB	EF	NRMSE	RMSE	MAE	ME	CV	m		
۷۹/۸۴۱	۵/۱۰۰	۱۵/۰۵۹	-۰/۸۷۵	-۰/۰۳۳	-۰/۰۱۲	-۰/۰۱۱	-۰/۰۰۵	۹/۲۳۴	۱۷	واسنجی	رطوبت خاک
۷۹/۵۹۵	۱۸/۸۰۱	۱/۶۰۴	-۰/۸۰۴	-۰/۰۳۳	-۰/۰۱۲	-۰/۰۱۲	-۰/۰۰۲	۷/۳۷۴	۱۳	واسنجی	$(cm^3 cm^{-3})$
۷۵/۷۲۲	۲۲/۲۳۵	۲/۰۴۲	-۰/۹۲۳	-۰/۱۶۵	۱۲/۶۹۲	۹/۶۴۶	-۰/۸۱۴	-۶۳/۷۷۲	۹۸	واسنجی	عمق سطح
۷۶/۷۹۸	۱۵/۳۰۱	۷/۹۰۱	-۰/۷۶۰	-۰/۲۳۹	۱۵/۶۳۸	۱۲/۲۹۶	-۰/۳۹۶	-۴۸/۸۳۰	۱۲۲	واسنجی	ایستایی (cm)
۸۰/۶۱۵	۴/۶۲۶	۱۴/۷۵۸	-۰/۷۵۱	-۰/۳۳۲	-۰/۰۱۰	-۰/۰۷۸	-۰/۰۳۹	۶۶/۵۳۲	۸۱	واسنجی	جریان زه آب
۹۵/۱۳۱	۳/۸۳۹	۱/۰۳۰	-۰/۷۳۹	-۰/۲۸۵	-۰/۰۸۹	-۰/۰۷۳	-۰/۰۰۹	۵۵/۸۴۵	۱۲۹	واسنجی	خروجی $(cm d^{-1})$
۶۵/۵۳۶	۲۹/۴۹۳	۴/۹۷۲	-۰/۶۶۴	-۰/۱۰۱	-۰/۲۱۸	-۰/۱۶۲	-۰/۰۴۹	۱۷/۳۵۵	۱۲	واسنجی	نیم رخ غلظت املاح
۵۵/۵۷۷	۱۶/۴۱۴	۲/۰۰۹	-۲/۴۸۷	-۰/۰۹۲	-۰/۱۷۳	-۰/۱۲۷	-۰/۰۹۲	۴/۹۵۶	۱۲	واسنجی	آب خاک $(dS m^{-1})$
۰/۰۰۰	۹۳/۲۲۵	۶/۷۷۵	-۰/۰۷۳	-۰/۱۴۲	-۰/۵۲۴	-۰/۳۸۴	-۰/۱۳۶	۱۳/۷۱۰	۸۱	واسنجی	شوری زه آب
۰/۰۰۰	۸۹/۶۴۵	۱۰/۳۵۵	-۰/۱۱۶	-۰/۱۱۹	-۰/۴۰۷	-۰/۳۵۶	-۰/۱۳۱	۱۱/۴۶۱	۱۲۹	واسنجی	$(dS m^{-1})$
۹۲/۷۹۴	۷/۱۸۱	-۰/۰۲۵	-۰/۹۹۶	-۰/۰۴۲	-۰/۱۲۵	-۰/۰۹۹	-۰/۰۰۲	۶۳/۷۷۴	۳۹	واسنجی	شاخص سطح برگ $(m^2 m^{-2})$
۲۷/۱۱۰	۵۴/۵۴۴	۱۸/۳۴۶	-۰/۹۹۶	-۰/۰۳۵	-۰/۴۵۷	-۰/۳۹۴	-۰/۱۹۶	۵۷/۰۰۸	۴	واسنجی	عملکرد نی $(ton ha^{-1})$
۹۳/۷۳۶	۳/۲۷۲	۲/۹۹۲	-۰/۹۹۹	-۰/۰۱۸	-۰/۰۲۳	-۰/۰۱۸	-۰/۰۰۴	۶۰/۶۲۴	۴	واسنجی	عملکرد ساکارز $(ton ha^{-1})$

<sup>(\*)</sup> در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه گیری شده و m تعداد مقایسه های صورت گرفته بین کمیت های اندازه گیری و شبیه سازی شده است.



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





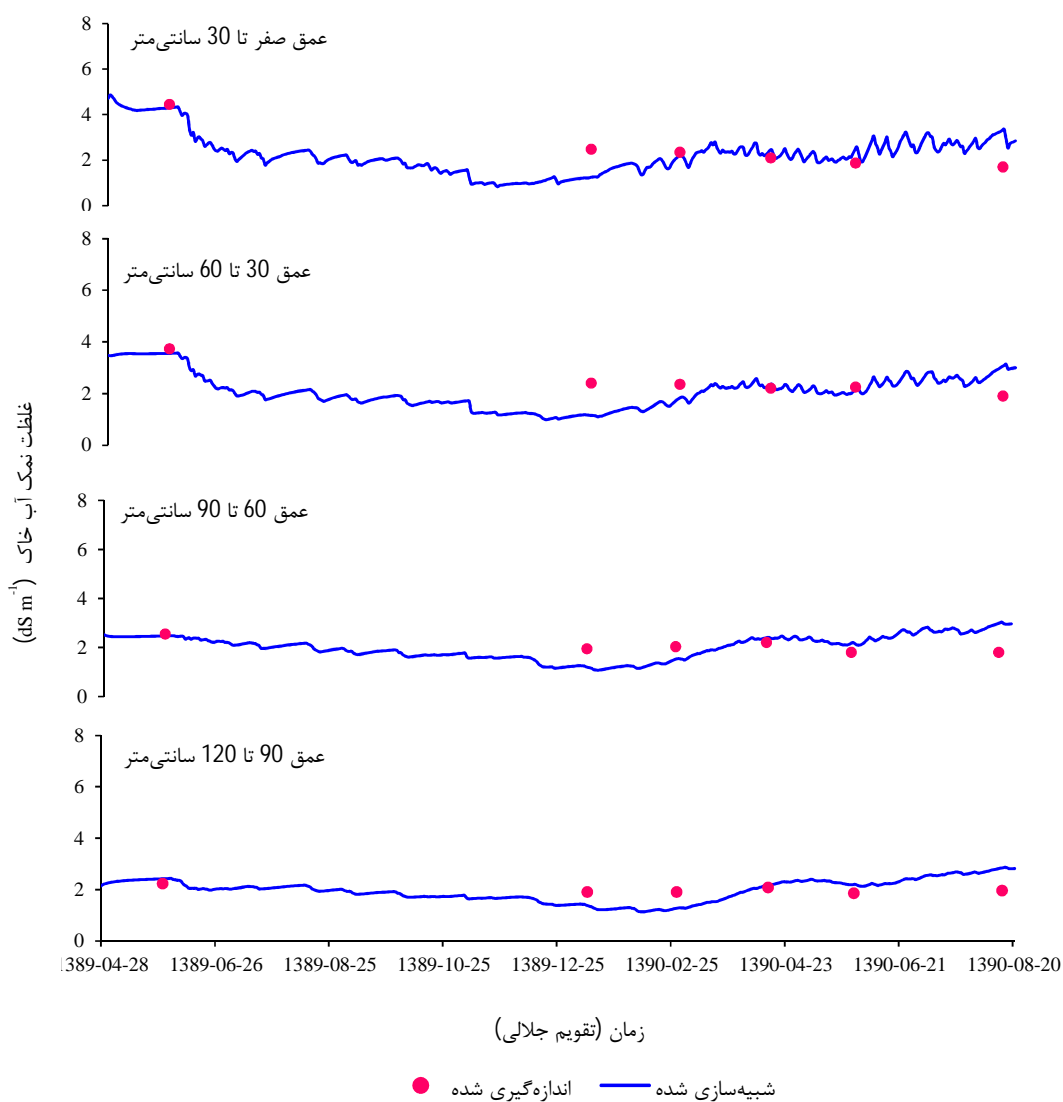
شکل ۲- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبه‌سازی شده نیم‌رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی در وضعیت اعمال فرآیند جذب سطحی املاح

از لحاظ کردن اثر دو عامل دیگر، به دلیل ماهیت یک‌بعدی مدل SWAP و دشواری مدل‌سازی فرآیندهای فوق، صرف‌نظر شده است. به همین دلیل و برای در نظر گرفتن ضمنی نقش دو عامل فوق بر بیان نمک خاک در مزرعه مطالعاتی و حصول شبه‌سازی‌های هرچه واقع‌بینانه‌تر از تغییرات شوری نیم‌رخ خاک و زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی، فرآیند جذب سطحی املاح نیز در شبه‌سازی‌های انتقال املاح لحاظ شد. 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. در این رابطه، شبه‌سازی‌های 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

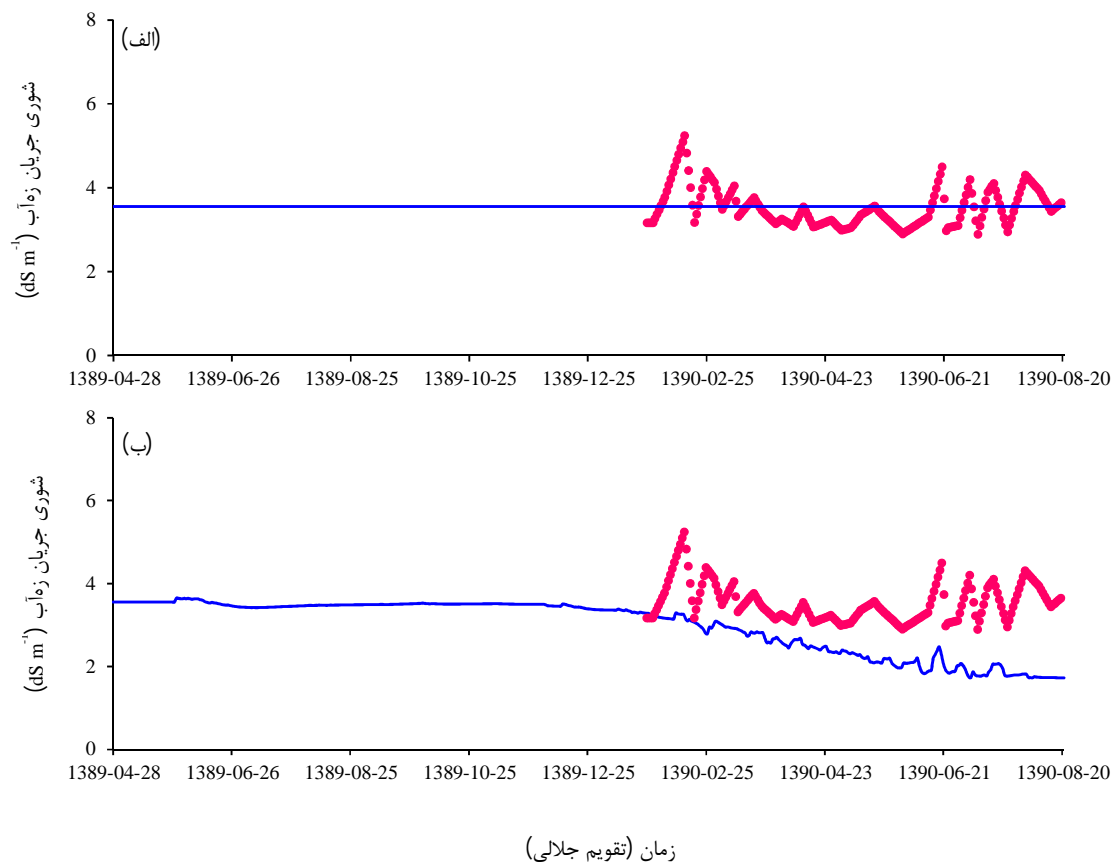
به‌طور مشابه، در مقایسه با آماره NRMSE، آماره EF معیار مناسب‌تری برای قضاوت در مورد عملکرد مدل در بازسازی مقادیر اندازه‌گیری شده جریان زه‌آب خروجی از زهکش زیرزمینی است. در این پژوهش، فرآیند جذب سطحی نیز در مدل‌سازی انتقال املاح خاک در مزرعه مطالعاتی لحاظ شد. دلیل این امر، این بود که نتایج بررسی‌ها نشان 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، بیان نمک، در خاک تابع عواملی چون عمق کاربرد و شوری آب آبیاری/ بارندگی، صعود موینگی، باردهی 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

شبیه سازی شده اجزای بیلان آب طی دوره شبیه سازی در جدول ۵ و مقادیر شبیه سازی 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 دوره شبیه سازی در مزرعه مطالعاتی ۱۴۸/۰۶ سانتی متر برآورد گردیده است که این مقدار در دامنه مقادیر گزارش شده (سینگلز و ون درلار، ۲۰۱۲) برای تبخیر-تعرق واقعی گیاه نیشکر (۸۰ تا ۲۰۰ سانتی متر) قرار دارد.

جذب سطحی املاح در شبیه سازی انتقال املاح در خاک، نقش مهمی در دستیابی به شبیه سازی های واقع بینانه تر نیمرخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی داشته است. همچنین در نظر گرفتن این فرآیند به عنوان یک فاکتور اطمینان، منجر به اتخاذ رویکردی محتاطانه تر در تحلیل سناریوهای مدیریت آبیاری در مزرعه مطالعاتی و از توسعه سناریوهای مدیریتی مبتنی بر پیش بینی های خوش بینانه در خصوص کاهش قابل توجه شوری خاک و زه آب خروجی در اثر مدیریت آبیاری اعمال شده اجتناب خواهد شد. مقادیر



شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده نیمرخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی در وضعیت عدم اعمال فرآیند جذب سطحی املاح



● اندازه‌گیری شده — شبیه‌سازی شده

شکل ۴- مقایسه 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 شده اجزای بیلان آب (سانتی‌متر) در مزرعه مطالعاتی طی دوره شبیه‌سازی<sup>(\*)</sup>

مقدار	شرح	مقدار	شرح
۹۰/۲۱	کسر تبخیر- تعرق طی ساعات روز (درصد)	۱۶۹/۵۰	تبخیر پتانسیل (سانتی‌متر)
۲۳/۵۵	بارش ناخالص (سانتی‌متر)	۱۳۹/۱۱	تعرق پتانسیل (سانتی‌متر)
۲۳/۲۳	بارش خالص (سانتی‌متر)	۶۱/۰۰	تبخیر واقعی (سانتی‌متر)
۳۶۹/۹۹	آبیاری (سانتی‌متر)	۸۷/۰۶	تعرق واقعی (سانتی‌متر)
۱۸۳/۹۹	زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (سانتی‌متر)	۶۱/۴۴	تعرق نسبی $\times 100$ (-)
۵۷/۷۲	زه‌آب خروجی از سیستم زهکش سطحی (سانتی‌متر)	۹۳/۷۶	RedWet (درصد)
۲۴۱/۷۱	کل زه‌آب خروجی از سیستم زهکشی (سانتی‌متر)	۰/۲۵	RedDry (درصد)
۳/۲۸	جریان از کف (سانتی‌متر)	۵/۹۹	RedSlt (درصد)
۶/۷۳	$\Delta W$ (سانتی‌متر) <sup>(**)</sup>	۳۰۸/۶۲	تبخیر- تعرق پتانسیل (سانتی‌متر)
		۱۴۸/۰۶	تبخیر- تعرق واقعی (سانتی‌متر)

<sup>(\*)</sup> در این جدول، RedWet، RedDry و RedSlt به ترتیب، بیان‌کننده سهم (درصد) تنش اکسیژن، خشکی و شوری در کاهش تعرق پتانسیل به تعرق واقعی و  $\Delta W$  تغییر در ذخیره آب نیم‌رخ خاک (سانتی‌متر) هستند.  
<sup>(\*\*)</sup> محاسبه شده برای ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی‌متر

جدول ۶- مقادیر شبیه سازی شده اجزای بیلان املاح (میلی گرم بر سانتی متر مربع) و عملکرد محصول (تن بر هکتار) در مزارع مطالعاتی طی دوره شبیه سازی<sup>(\*)</sup>

اجزای بیلان املاح (میلی گرم بر سانتی متر مربع)		عملکرد محصول (تن بر هکتار)	
شرح	مقدار	شرح	مقدار
بار نمک آب آبیاری	۳۳۷/۲۰ (۱/۴۲)	پتانسیل عملکرد نی شبیه سازی شده (تن بر هکتار)	۳۹/۸۸
بار نمک زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی	۴۱۸/۱۶ (۳/۵۵)	عملکرد واقعی نی شبیه سازی شده (تن بر هکتار)	۱۸/۳۹
بار نمک زه آب خروجی از سیستم زهکش سطحی	۱۳۱/۱۹ (۳/۵۵)	عملکرد نی اندازه گیری شده (تن بر هکتار)	۱۸/۳۰
کل بار نمک زه آب خروجی از سیستم زهکشی	۵۴۹/۳۶ (۳/۵۵)	پتانسیل عملکرد ساکارز شبیه سازی شده (تن بر هکتار)	۴/۳۶
بار نمک جریان از کف	۱۳/۷۳ (۶/۵۴)	عملکرد واقعی ساکارز شبیه سازی شده (تن بر هکتار)	۱/۹۱
تغییر ذخیره املاح در نیم رخ خاک <sup>(**)</sup>	-۱۹۸/۴۳	عملکرد ساکارز اندازه گیری شده (تن بر هکتار)	۱/۹۴

<sup>(\*)</sup> در این جدول، اعداد داخل پرانتز بیان کننده میزان معادل مؤلفه املاح (میلی گرم بر سانتی متر مربع) بر حسب غلظت (دسی زیمنس بر متر) است.  
<sup>(\*\*)</sup> محاسبه شده برای ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی متر

## نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، ویرایش تصحیح شده‌ای از مدل SWAP برای مدل سازی توزیعی یک سیستم زراعی کشت نیشکر با مدیریت ترکیبی زهکشی زیرزمینی آزاد/کنترل شده (عمق کنترل ۷۰ سانتی متری) در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره)، به کار گرفته شد. نتایج این ارزیابی حاکی از قابلیت تعمیم پذیری مناسب مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در شبیه سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی بود. عملکرد مدل در بازسازی مقادیر اندازه گیری شده نیم رخ رطوبت خاک بهتر از عملکرد آن در بازسازی مقادیر اندازه گیری شده نیم رخ غلظت املاح آب خاک بود. نتایج این بررسی، حاکی از غلبگی سهم تنش اکسیژن وارده به گیاه نسبت به تنش های خشکی و شوری بود. این امر بیان کننده اعمال آبیاری بی رویه در مزرعه مطالعاتی بود. بر اساس اجزای بیلان نمک شبیه سازی شده طی دوره 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 سیستم های زهکشی از مزرعه خارج و به بدنه های آبی پذیرنده تخلیه شده است. ویرایش واسنجی و صحت یابی شده مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی می تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای بررسی گزینه های مختلف مدیریت یکپارچه آب و زه آب مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

۱. ابراهیمی پاک ن. ع. لیاقت ع. اگدرنژاد ا. احمدی م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل های 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. پرچی عراقی ف. میرلطیفی س. م. قربانی دشتکی ش. وظیفه دوست م. و صادقی لاری ع. ۱۳۹۵. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس سازی به منظور برآورد تبخیر- تعرق مرجع زیرروزانه: ۱- مقایسه عملکرد برخی مدل های ریزمقیاس سازی داده های هواشناسی روزانه. نشریه آب و خاک. ۳۰(۲): ۳۳۴-۳۵۴.
۳. پرچی 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 مقیاس های زمانی زیرروزانه مختلف: یک مطالعه عددی. نشریه آب و خاک. ۲۹(۵): ۱۱۷۳-۱۱۸۹.
۴. سمیع پور ف. محمدی ک. مهدیان م. ح. و ناصری ع. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل های زهکشی SWAP و DRAINMOD به منظور تعیین عمق و فاصله بهینه زهکش ها بر اساس بیشترین عملکرد

- 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 Kladvikvo 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. محصول و کمترین مقدار خروجی زه آب. 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.

- 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 today's 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>).