

مقاله علمی-پژوهشی

کاربرد توزیعی مدل SWAP برای مدل‌سازی زراعی - هیدرولوژیکی زیرروانه یک سیستم زراعی با زهکشی زیرزمینی

فرزین پرچی عراقی^{۱*}، فاطمه سمیع پور^۲، عدنان صادقی لاری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۲/۲۹

چکیده

با وجود قابلیت بالای مدل‌های زراعی - هیدرولوژیکی مزرعه مقیاس در شبیه‌سازی اندرکنش رشد گیاه با انتقال آب و املاح در سیستم‌های زراعی، کاربرد آن‌ها در شرایط واقعی مزارع وسیع کشت نیشکر استان خوزستان به دلیل ناهمگنی مکانی برنامه‌ریزی آبیاری در سطح مزارع، تعدد پارامترهای مجهول مدل، دشواری مشخص‌سازی شرایط اولیه و مرزی و نیز نیاز مبرم به داده‌های واسنجی متعدد با چالش‌های عدیده‌ای مواجه است. هدف از این پژوهش، عملی ساختن کاربرد مدل‌سازی زراعی - هیدرولوژیکی در شرایط واقعی بهره‌برداری از مزارع وسیع مجهز به سیستم‌های (های) زهکش سطحی/زیرزمینی است. به این منظور، از طریق کاربرد نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP و گونه یکپارچه‌سازی شده الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزا (UPSO)، یک طرح مدل‌سازی زراعی - هیدرولوژیکی ریچاردزبنیان به شیوه توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروانه توسعه یافت. مدل توسعه یافته در یکی از مزارع کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) (شعبیه) با زهکشی زیرزمینی و کشت نیشکر (رقم CP48-103) طی بازه زمانی ۱۳۸۹/۴/۲۸ تا ۱۳۹۰/۹/۲۰ (به مدت ۴۸۱ روز) مورد کاربرد قرار گرفت. نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه آب خروجی (با آماره ضریب راندمان، EF، مدل به ترتیب، برابر با ۰/۸۲۷، ۰/۹۰۱، ۰/۸۲۷ و ۰/۸۷۷ طی مرحله واسنجی و آماره EF به ترتیب، برابر با ۰/۵۱۴، ۰/۷۹۸، ۰/۶۷۲ طی مرحله صحت‌سنجی)، شبیه‌سازی نیم‌رخ 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 ۰/۰۳۹، ۰/۰۹۶ در مرحله واسنجی و آماره NRMSE به ترتیب، برابر با ۰/۱۵۴ و ۰/۰۴۶ طی مرحله صحت‌سنجی) و شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز (با آماره EF به ترتیب، برابر با ۰/۹۹۵، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۷۲ در مرحله واسنجی) بود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای یکپارچه، مدل‌سازی معکوس، نیشکر، هیدرولوژی محیط غیراشباع

مقدمه

مدل‌های ریچاردزبنیان، به دلیل داده‌های ورودی متعدد مورد نیاز و چالش برانگیز بودن واسنجی آن‌ها همچنان دشوار است (Parchami-Araghi et al., 2013). این دشواری در مناطق خشک و نیمه‌خشک و در شرایط حضور سیستم‌های زهکشی زیرزمینی و/یا سطحی به دلیل افزوده شدن بر تعداد پارامترهای مجهول مدل و نیز افزایش عدم قطعیت داده‌های اندازه‌گیری شده اجزای بیلان آب (به دلیل تغییرات زمانی شدید آن‌ها)، نمود بیشتری می‌یابد. دشواری کاربرد این مدل‌ها در مزارع وسیع کشت نیشکر در واحدهای هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی واقع در استان خوزستان، از آنچه گفته شد نیز فراتر می‌رود. زیرا به دلیل مساحت قابل توجه هر یک از مزارع (بیش از ۲۰ هکتار) امکان آبیاری یکباره آن‌ها (که به روش شیاری صورت می‌گیرد) فراهم نیست و کامل شدن یک نوبت آبیاری در هر مزرعه ممکن است تا بیش از پنج روز به طول بیانجامد. چراکه انجام آبیاری

ترکیب داده‌های حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی زراعی - هیدرولوژیکی امکان حصول بینشی تفصیلی نسبت به رفتار هیدرولوژیکی و بیوفیزیکی سیستم‌های زراعی را فراهم می‌سازد (Singh, 2019). با این حال، کاربرد این مدل‌ها، به‌خصوص

۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران

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

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

(* - نویسنده مسئول: Email: f.parchamiaraghi@areeo.ac.ir)

جریان آب زیرزمینی منطقه‌ای (شرط مرزی نیومن^۵) محاسبه می‌کند. متعاقباً، مدل جریان آب زیرزمینی، میزان تراز سطح ایستابی را برای تعیین شرایط مرزی پایین دست مدل SWAP (شرط مرزی دیریکله^۶)، فراهم می‌آورد. در این روش اتصال (که بر اساس تبادل ترم جریان آب بین نواحی اشباع و غیراشباع می‌باشد)، مرز دو مدل باید در زیر پایین‌ترین حد ممکن تراز آب زیرزمینی (بر اساس داده‌های مشاهداتی) در نظر گرفته شود. نقص این طرح اتصال متوالی در آن است که جریان بین دو میدان مدل‌سازی به‌طور کامل، توسط مدلی که ابتدا به‌روزرسانی می‌شود، تعیین می‌گردد و در شبیه‌سازی‌های درازمدت، این امر می‌تواند منجر به ناپایداری عددی مدلی شود که بعد از اجرای مدل اول به‌روزرسانی و اجرا می‌گردد (van Walsum and Veldhuizen, 2011). از سوی دیگر، اصلاح ناپایداری این طرح شبیه‌سازی متوالی از طریق کاهش گام زمانی محاسبات، منجر به یک تعادل ضعیف بین دقت محاسبات و هزینه محاسباتی خواهد شد (Clark and Kavetski, 2009). همچنین، از آنجا که مرز بین دو میدان مدل‌سازی (اشباع و غیراشباع) در سراسر دوره شبیه‌سازی به‌عنوان یک مرز ثابت و غیرقابل تغییر در نظر گرفته شده است، همواره بخشی از ناحیه اشباع وجود دارد که در محاسبات مدل جریان منطقه‌ای آب زیرزمینی لحاظ نمی‌شود. بنابراین، می‌توان گفت در این شرایط، مدل جریان آب زیرزمینی، عملاً در زیر مدل جریان غیراشباع مدفون شده است. از سوی دیگر، واسنجی مدل ترکیبی حاصله بسیار دشوار خواهد بود. چراکه تعیین شرایط مرزی و پارامترهای مجهول مدل آب زیرزمینی منطقه‌ای بر دشواری تعیین پارامترهای مجهول مدل SWAP افزوده خواهد شد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که از میان سه گروه روش‌شناسی مورد بررسی، کاربرد مستقل و توزیعی مدل SWAP، رویکرد مناسب‌تری برای در نظر گرفتن ناهمگنی مکانی برنامه‌ریزی آبیاری در سطح مزارع وسیع نیشکر در استان خوزستان باشد.

با این حال، ماهیت روش‌شناسی تمامی تلاش‌های صورت گرفته تا کنون در زمینه مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی مزارع نیشکر واقع در واحدهای هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی، مبتنی بر ساده‌سازی شرایط واقعی مزارع و خلاصه کردن فرآیندهای زراعی-هیدرولوژیکی حاکم بر آن‌ها در قالب یک ستون خاک منفرد بوده است (سمیع‌پور و همکاران، ۱۳۸۹؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ محجوبی و صادقی لاری، ۱۳۹۴؛ نوزری و همکاران، ۱۳۹۷). تکمیل تدریجی یک نوبت آبیاری در این مزارع طی چندین روز، واسنجی و صحت‌سنجی مدل توسعه یافته بر اساس این فرض ساده‌سازی را متاثر خواهد ساخت. از سوی دیگر، در پژوهش‌های فوق، روش‌شناسی

در این مزارع به‌جز دسترسی به آب، موکول به ظرفیت سیستم آبیاری و نیز وضعیت مناسب تراز آب زیرزمینی کم‌عمق در مزارع و توان سیستم(های) زهکشی زیرزمینی در تخلیه آب مازاد خاک است.

مدل SWAP^۱ یک مدل زراعی-هیدرولوژیکی ریچاردزبنیان و مزرعه-مقیاس است که انتقال آب، املاح و حرارت در ناحیه اشباع/غیراشباع را در اندرکنش با توسعه پوشش گیاهی و هیدرولوژی زیرسطحی^۲ شبیه‌سازی می‌کند (Kroes et al., 2008). این مدل به‌طور گسترده‌ای به‌منظور بررسی سناریوهای مدیریت آب و شوری در مقیاس‌های مزرعه‌ای و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Su et al., 2005; Qureshi et al., Sarwar et al., 2000; 2011; Xue and Ren, 2017; Chen et al., 2019; Li and Ren, 2019a, b; Xu et al., 2019). به‌طور کلی، ماهیت روش‌شناسی اتخاذ شده در شبیه‌سازی سیستم‌های زراعی مجهز به زهکش سطحی/زیرزمینی از طریق مدل SWAP در سه گروه قابل تقسیم‌بندی است: (۱) کاربرد مدل SWAP در مقیاس مزرعه‌ای (Su et al., 2005; Qureshi et al., Sarwar et al., 2000; 2011; Singh et al., 2011)؛ (۲) مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی در مقیاس منطقه‌ای به‌روش مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی^۳ (Xue and Ren, 2017; Li and Ren, 2019a, b; 2006a)؛ و (۳) مدل‌سازی زراعی-هیدرولوژیکی توزیعی از طریق اتصال برون خطی^۴ مدل SWAP با یک مدل جریان منطقه‌ای آب زیرزمینی (Xu et al., 2012). در پژوهش‌های گروه نخست، روش‌شناسی اتخاذی بر اساس فرض تبیین فرآیندهای زراعی-هیدرولوژیکی در قالب یک ستون خاک منفرد و صرف‌نظر از ناهمگنی مکانی ویژگی‌های سیستم زراعی مطالعاتی است. در پژوهش‌های گروه دوم، محدوده مطالعاتی به تعدادی ناحیه شبیه‌سازی همگن تقسیم‌بندی شده و متعاقباً، مدل SWAP با استفاده از مجموعه داده ورودی مختص به هر یک از این نواحی اجرا می‌شود. بدین ترتیب، امکان در نظر گرفتن ناهمگنی مکانی داده‌های ورودی مدل در محدوده مطالعاتی فراهم می‌گردد. در پژوهش‌های گروه سوم، از یک مدل توزیعی شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی منطقه‌ای نظیر MODFLOW (Harbaugh et al., 2000) به‌منظور کمی‌سازی تغییرات مکانی تراز آب زیرزمینی کم‌عمق در محدوده مطالعاتی استفاده می‌گردد. در این رویکرد، جریان غیراشباع در هر سلول محاسباتی مدل توزیعی جریان آب زیرزمینی منطقه‌ای (یا گروهی از سلول‌های محاسباتی) از طریق مدل SWAP شبیه‌سازی می‌شود. به‌گونه‌ای که مدل SWAP جریان عمودی غیراشباع را برای تعیین ترم تغذیه آب زیرزمینی در مدل شبیه‌سازی

1- Soil-Water-Atmosphere-Plant

2- Subsurface Hydrology

3- Distributed Agro-Hydrological Modeling

4- Off-Line Coupling

5- Neuman Boundary Condition

6- Dirichlet Boundary Condition

که در عمل، فاقد وجود خارجی است. در این رابطه، به نظر می‌رسد که کاربرد توزیعی مدل SWAP با مقیاس زمانی زیرروزانه، رویکرد مناسبی برای در نظر گرفتن ناهمگنی مکانی برنامه‌ریزی آبیاری در سطح مزارع وسیع نیشکر در استان خوزستان باشد. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر، توسعه یک طرح مدل‌سازی زراعی - هیدرولوژیکی ریچاردزبنیان به‌شیوه توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروزانه، از طریق کاربرد نسخه تصحیح شده‌ای از مدل SWAP و با هدف تلاش برای عملی ساختن کاربرد مدل‌سازی زراعی - هیدرولوژیکی در شرایط واقعی بهره‌برداری از مزارع وسیع مجهز به سیستم(های) زهکش زیرزمینی/سطحی در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، خوزستان بوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی: پژوهش حاضر با استفاده از بانک اطلاعاتی جمع‌آوری شده در یکی از مزارع واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، با مساحت ناخالص ۱۵۸۰۰ هکتار، بین طول جغرافیایی $37^{\circ} 48'$ تا $50^{\circ} 48'$ شرقی و عرض جغرافیایی $31^{\circ} 37'$ تا $33^{\circ} 00'$ شمالی با متوسط ارتفاع ۴۲ متر از سطح دریا (شکل ۱) با مساحت تقریبی ۲۰ هکتار (۲۵۰ متر \times ۸۰۰ متر)، سیستم زهکشی زیرزمینی و تحت کشت گیاه نیشکر (کشت اول) صورت گرفت (صادقی لاری، ۱۳۹۱؛ محجوبی، ۱۳۹۱). مزرعه مطالعاتی مجهز به سیستم زهکشی زیرزمینی از نوع لوله‌های پی‌وی‌سی با پوشش شنی و متوسط عمق کارگذاری ۲/۱ متر (۱/۸ متر در ابتدا و ۲/۴ متر در انتها)، شیب طولی ۰/۰۰۷، قطر ۱۲۵ و ۱۶۰ میلی‌متر به ترتیب، در ابتدا و انتهای مزرعه و به‌فواصل تقریبی ۷۵ متر از یکدیگر می‌باشند. این زهکش‌ها به جمع‌کننده‌های روباز و نهایتاً، زهکش‌های اصلی روباز تخلیه می‌شوند (شکل ۱). پس از کشت نیشکر در مزرعه مطالعاتی، اعمال رویدادهای آبیاری با دور پنج تا ۳۱ روز آغاز گردید. نوسانات سطح ایستابی در مزرعه از طریق سه گروه چاهک مشاهده‌ای (در مجموع، ۱۵ چاهک مشاهده‌ای) حفر شده به‌فواصل ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ متری از جمع‌کننده روباز مورد پایش قرار گرفت (شکل ۲). طول دوره شبیه‌سازی برای مزرعه مورد مطالعه از ۲۸ تیر ۱۳۸۹ تا ۲۰ آذر ۱۳۹۰ (به مدت ۴۸۱ روز) در نظر گرفته شد. به‌منظور کمی‌سازی فرآیندهای حاکم بر سیستم زراعی مطالعاتی از مدل SWAP (Kroes et al., 2008) استفاده شد. در این مدل، معادله ریچاردز به‌ازای شرایط اولیه و مرزی معلوم و با استفاده از روابط ریاضی بین رطوبت خاک، هدایت هیدرولیکی و مکش ماتریک، به‌روش عددی حل می‌شود.

به‌منظور رفع کاستی‌های مدل SWAP در مسیر تحقق اهداف ترسیم شده برای پژوهش حاضر، کد منبع این مدل به‌لحاظ در نظر گرفتن طول مدت زمان رویدادهای آبیاری، شبیه‌سازی برگاب و

مورد استفاده برای برآورد مقادیر نماینده تاریخ و عمق آب کاربردی طی رویدادهای آبیاری تعریف شده برای مدل تشریح نگردیده است. چراکه در صورت تبیین فرآیندهای زراعی - هیدرولوژیکی مزرعه در قالب یک ستون خاک منفرد، لازم است که رویدادهای آبیاری محقق شده که در هریک از بخش‌های مزرعه با عمق آب کاربردی و زمان‌بندی متفاوتی اعمال شده‌اند، از طریق تعریف تعدادی رویداد آبیاری نماینده برای سراسر سطح مزرعه به مدل معرفی شوند. این امر می‌تواند موجب گردد که تعداد رویدادهای آبیاری نماینده مزرعه بیشتر یا کمتر از آنچه که در عمل برای هر بخش از مزرعه تحقق یافته است، برآورد گردد. از سوی دیگر، در این شرایط، مقادیر موثر عمق آبیاری می‌تواند کمتر از حداقل میزان عمق آبیاری که در عمل کاربرد آن در مزرعه امکان‌پذیر است، برآورد شود که در این صورت، اعتبار نتایج ارزیابی مدیریت آبیاری اعمال شده در مزرعه مورد مطالعه از طریق مقادیر اجزای بیلان آب شبیه‌سازی شده متاثر خواهد شد. در تمامی پژوهش‌های مورد اشاره، از نقش عواملی نظیر زهکش‌های جمع‌کننده در کنترل تراز آب زیرزمینی کم‌عمق و نیز اثر جریان آب زیرزمینی منطقه‌ای و نشت آب زیرزمینی شور از لایه محدود کننده به محدوده آب زیرزمینی کم‌عمق در بیلان محاسباتی آب و املاح صرف‌نظر گردیده است. در برخی از مطالعات صورت گرفته (سمیع‌پور و همکاران، ۱۳۸۹؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۳) از کمی‌سازی فرآیندهای انتقال املاح و در نتیجه، نقش تنش شوری و لزوم کنترل بیلان املاح ناحیه ریشه در تحلیل مدیریت آبیاری مزارع به‌کلی صرف‌نظر شده است. از سوی دیگر، با توجه به تغییرات زمانی سریع اجزای بیلان آب حین رویدادهای آبیاری در این مزارع، به‌نظر می‌رسد که شبیه‌سازی اجزای بیلان آب و املاح با گام‌های زمانی محاسباتی کوتاه‌تر از یک روز (زیرروزانه) و لحاظ کردن زمان اندازه‌گیری مقادیر معیار مورد استفاده در واسنجی و صحت‌سنجی مدل (به‌ویژه، نیم‌رخ رطوبت و شوری خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه‌آب خروجی) می‌تواند منجر به دستیابی به شبیه‌سازی‌های هرچه واقع‌بینانه‌تر از فرآیندهای انتقال آب و املاح در سیستم زراعی مطالعاتی گردد. این در حالی است که در تمامی مطالعات مشابه، 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.

طبعاً، با وجود کاستی‌های مورد اشاره، جستجوی سناریوهای بهینه مدیریت آب کشاورزی با استفاده از مدل واسنجی شده می‌تواند به بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم زراعی موهومی منتهی شود

شوری آب زیرزمینی و شوری جریان از کف نیمرخ خاک، هریک به عنوان یک پارامتر مجهول یکتا در سراسر دوره شبیه سازی از طریق مدل سازی معکوس برآورد شد. به منظور مدل سازی سیستم زهکشی، از رویکرد سیستم زهکشی چندگانه مبتنی بر مفهوم مقاومت زهکشی استفاده شد (Kroes et al., 2008). با توجه به این که مزرعه مطالعاتی علاوه بر مجهز بودن به سیستم زهکشی زیرزمینی، در مجاورت یک زهکش جمع کننده روباز نیز قرار داشت (شکل ۱)، برای مزرعه مطالعاتی دو سیستم زهکشی، شامل یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی در نظر گرفته شد. به این 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 گردید. زه آب خروجی از هر هیدروتوپ با استفاده از روش پیشنهادی دیانی و همکاران (Dayyani et al., 2010) و با مشخص بودن طول مسیر انتقال زه آب به سمت نقطه خروجی سیستم زهکش زیرزمینی روندیابی گردید. به منظور مدل سازی انتقال املاح در مزارع مطالعاتی، دو فرآیند انتقال توده ای و جذب سطحی املاح (مبتنی بر ایزوترم جذب خطی) در نظر گرفته شد (Kroes et al., 2008). به منظور شبیه سازی متغیرهای بیوفیزیکی از مدل گیاهی WOFOST (Supit et al., 1994) استفاده شد. پارامترهای حساس این مدل بر اساس پژوهش های مشابه گذشته (Bessembinder et al., 2003) شناسایی شده (جدول ۳) و مقادیر آنها از طریق مدل سازی معکوس برآورد گردید. به دلیل دیررس بودن رقم نیشکر کشت شده (رقم CP48-103) در مزرعه مورد مطالعه، طول دوره زمانی شبیه سازی رشد و توسعه گیاه نیشکر به طور قابل توجهی طولانی (حدود ۱۵ ماه) بود. از این رو، به منظور دستیابی به شبیه سازی های واقع بینانه شاخص سطح برگ و در نتیجه، اجزای بیلان آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی، مقادیر پارامترهای سطح ویژه برگ (δ_{LA})، هکتار بر کیلوگرم) و حداکثر شدت جذب دی اکسید کربن (A_{max})، کیلوگرم بر هکتار بر ساعت) در نه مقطع از دوره رشد گیاه (با فواصل مساوی و بر اساس مجموع دما) از طریق مدل سازی معکوس برآورد شد. برای سایر روزهای دوره شبیه سازی، مقادیر پارامترهای فوق از طریق درون یابی خطی بین مقادیر برآورد شده به روش مدل سازی معکوس محاسبه گردید.

در واسنجی مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی، در مجموع، ۴۴ پارامتر مجهول (جدول ۳) از طریق مدل سازی معکوس برآورد گردید. به منظور واسنجی مدل SWAP از طریق برنامه نویسی فرترن و ++C چندپردازی، یک طرح مدل سازی معکوس تک هدفه مبتنی بر گونه یکپارچه الگوریتم بهینه سازی رفتار جمعی اجزای^۳ (UPSO)

محصول تولیدی در شرایط استفاده از اطلاعات زیرروزانه هواشناسی و رویدادهای آبیاری مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفت. مازول شبیه سازی تبخیر- تعرق این مدل بر اساس نتایج حاصل از پژوهش پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۴ الف؛ ب) تصحیح گردید. به منظور طرح ریزی نیمرخ خاک مفروض در مدل SWAP برای مزرعه مطالعاتی، یک ستون خاک با عمق ۵۵۰ سانتی متر (معادل با عمق وقوع لایه محدود کننده در مزرعه مطالعاتی) و متشکل از دو لایه (جدول ۱) در نظر گرفته شد.

ارزیابی صحت اطلاعات هواشناسی جمع آوری شده از ایستگاه هواشناسی مزرعه نمونه و برآورد داده های هواشناسی گم شده از طریق الگوریتم توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۵) در ترکیب با داده های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز (واقع در مجاورت منطقه مطالعاتی) صورت گرفت (جدول ۲). به منظور محاسبه تبخیر- تعرق زیرروزانه (با مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه ای) از چارچوب ریزمقیاس سازی داده های هواشناسی روزانه توسعه یافته توسط پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۹۴ ب) و ویرایش تصحیح شده مدل پنمن-مانیت ASCE برای منطقه مطالعاتی (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۹۴ الف) استفاده شد. به منظور در نظر گرفتن اثر آبیاری تدریجی مزرعه بر شبیه سازی های زراعی- هیدرولوژیکی سیستم زراعی مطالعاتی، مدل SWAP از طریق تعریف واحدهای شبیه سازی همگن موسوم به هیدروتوپ^۱ به شیوه توزیعی مورد کاربرد قرار گرفت تا لحاظ کردن هرچه واقع بینانه تر زمان اعمال رویدادهای آبیاری طی ساعات شبانه روز و در نتیجه، دستیابی به شبیه سازی های هرچه معتبرتر اجزای بیلان آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی فراهم گردد. واحدهای هیدروتوپ مشتمل بر واحدهای شبیه سازی هستند که به لحاظ سایر ویژگی های زراعی- هیدرولوژیکی به جز برنامه ریزی آبیاری با یکدیگر مشابه می باشند. به این ترتیب، مدل SWAP به ازای هریک از واحدهای هیدروتوپ به طور جداگانه اجرا شد. سپس، سری زمانی مقادیر شبیه سازی شده متغیرهای حالت (مانند رطوبت خاک) و شدت (مانند جریان زه آب خروجی) برای سراسر سطح مزرعه از طریق محاسبه میانگین وزنی مقادیر نظیر شبیه سازی شده برای هر هیدروتوپ تعیین گردید. متعاقباً، واسنجی و صحت سنجی مدل توسعه یافته از طریق مقایسه مقادیر شبیه سازی و اندازه گیری شده متغیرهای حالت و شدت با مقیاس مکانی سراسر مزرعه صورت گرفت.

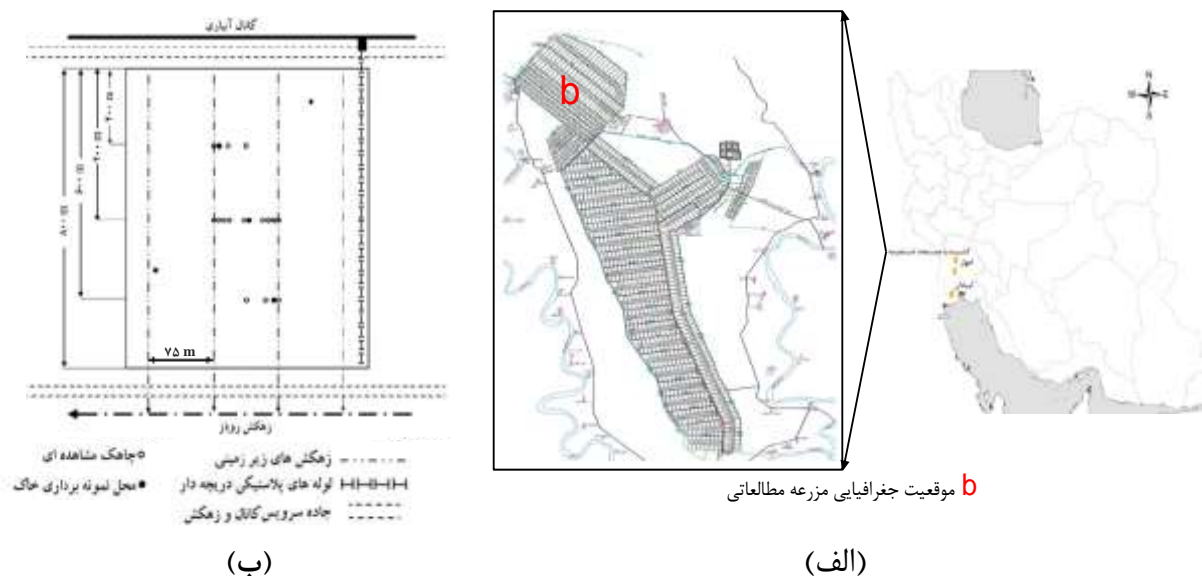
شرط مرزی پایین دست نیمرخ خاک، مقادیر از پیش تعیین شده جریان از کف نیمرخ خاک با میزان شوری معین (شرط مرزی نیومن^۲) در نظر گرفته شد (Kroes et al., 2008). بر این اساس، میزان جریان از کف در پنج مقطع زمانی از طول دوره شبیه سازی (با فواصل زمانی مساوی) از طریق مدل سازی معکوس و برای سایر گام های زمانی از طریق درون یابی خطی بین مقادیر فوق برآورد گردید. میزان

1- Hydrotope

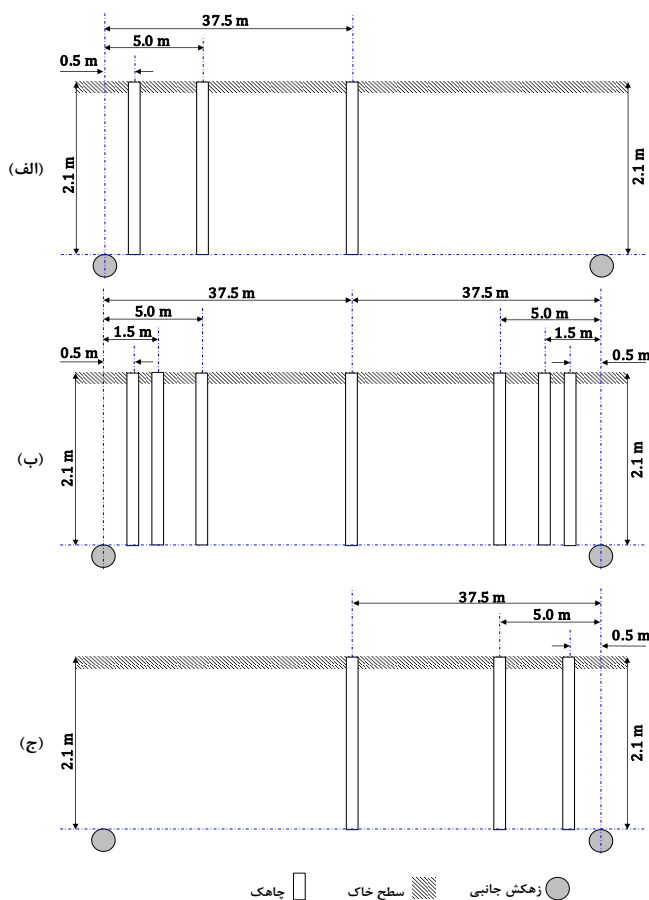
2- Neumann Boundary Condition

3 Unified Particle Swarm Optimization

(Parsopoulos and Vrahatas, 2004)، توسعه یافت.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مزرعه مطالعاتی در واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی و (ب) سیمای سیستم آبیاری و زهکشی در مزرعه مطالعاتی



شکل ۲- موقعیت چاهک‌های مشاهده‌ای نسبت به زهکش‌های جانبی در فواصل (الف) ۲۰۰ متری، (ب) ۴۰۰ متری و (ج) ۶۰۰ متری از جمع کننده

روپاز

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه^(*)

عمق بافت خاک (cm)	شن سیلت رس (%) (%) (%)	جرم ویژه ظاهری کربن آلی آهک (g cm ⁻³)	pH شوری عصاره اشباع (dS m ⁻¹)	(%) (%) (%)
۰-۳۰	۳۳/۰۰ ۵۷/۰۰ ۱۰/۰۰	۱/۶۶	۲/۴۴	۷/۹۰ ۳۶/۴۲ ۱/۵۵
> ۳۰	۳۸/۰۰ ۵۰/۶۷ ۱۱/۳۳	۱/۶۶	۲/۱۲	۷/۹۸ ۳۶/۱۶ ۰/۷۶

SiCL بیانگر کلاس بافت خاک لوم رسی سیلتی است.^(*)

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

متغیر هواشناسی	حداقل	حداکثر	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)	CI95 ^(*)
سرعت باد در ارتفاع دو متری (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
تخیر- 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.

واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت) باشند. با توجه به تغییرات زمانی شدید اجزای بیلان آب در مزرعه مطالعاتی، به‌ویژه طی رویدادهای آبیاری و به‌منظور افزایش کارآمدی طرح مدل‌سازی معکوس توسعه یافته در واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده شوری خاک، عمق سطح ایستابی، حجم و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی، بازه زمانی انجام اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مربوطه طی ساعات شبانه روز بر اساس ساعات آغاز و پایان (به‌وقت تهران) عملیات اندازه‌گیری یا نمونه‌گیری در مزرعه لحاظ گردید. به‌گونه‌ای که طی اجرای مدل SWAP به‌ازای هریک از هیدروتوپ‌های تعریف شده، میانگین وزنی (بر اساس گام زمانی محاسباتی اتخاذ شده در فرآیند حل عددی) مقادیر شبیه‌سازی شده هریک از کمیت‌های فوق طی بازه زمانی در نظر گرفته شده برای انجام اندازه‌گیری‌ها در مزرعه محاسبه گردیده و از آن به‌عنوان مقدار شبیه‌سازی شده کمیت فوق در هر هیدروتوپ طی بازه زمانی تعریف شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های شاخص سطح برگ و میزان عملکرد نی و ساکارز گیاه نیشکر با فرض مقیاس زمانی روزانه برای آن‌ها صورت گرفت. از مجموع وزنی آماره ریشه میانگین خطای نرمال شده^۲ (NRMSE) حاصل از مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده معیار و مقادیر نظیر شبیه‌سازی شده با ضرایب وزنی یکسان به‌عنوان تابع هدف مساله بهینه‌سازی تک‌هدفه استفاده شد.

الگوریتم UPSO نسخه بهبود یافته‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی اجزای^۱ (PSO) محسوب می‌شود که بدون افزایش در تعداد دفعات محاسبه تابع هدف، به‌طور هم‌زمان از ویژگی‌های بارز اکتشاف و ارتفاع که به‌ترتیب، در گونه‌های سراسری و موضعی الگوریتم PSO ارائه شده است، بهره می‌برد (Parsopoulos et al., 2010). جزئیات کامل الگوریتم UPSO توسط پارسوپولوس و واراهاطیس (Parsopoulos and Vrahatis, 2004) ارائه گردیده است. فرآیند واسنجی پارامترهای مجهول مدل توسعه یافته (

جدول ۳) به‌ازای ۱۵۰ ذره و ۴۵۰ تکرار (با احتساب ۱۰ هیدروتوپ مفروض، در مجموع، ۶۷۵ هزار اجرای مستقل مدل SWAP) صورت گرفت. کمیت‌های معیار مورد استفاده در طرح مدل‌سازی معکوس تک‌هدفه شامل اطلاعات اندازه‌گیری شده نیم‌رخ رطوبت و غلظت املاح آب 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 همه داده‌های مذکور به‌طور هم‌زمان در واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. تقسیم‌بندی داده‌های یاد شده به مجموعه داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌گونه‌ای صورت گرفت که حتی الامکان، هریک از دو مجموعه داده فوق در برگیرنده ۵۰ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده (به‌جز داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به شاخص سطح برگ و عملکرد محصول که به‌طور کامل در

2- Normalized Root Mean Square Error

1- Particle Swarm Optimization

نتایج و بحث

مقادیر بهینه برآوردهای اشتقاق یافته برای هر یک از پارامترهای مجهول لحاظ شده در طرح مدل سازی معکوس در جدول ۳ ارائه گردیده است. بر اساس

جدول ۳، در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای گیاهی A_{max} و S_{LA} به عنوان توابعی از دوره رشد گیاه سبب تغییرات قابل توجه مقادیر پارامترهای فوق طی دوره رشد و توسعه گیاه گردیده و در عین حال، الگوی تغییرات مقادیر پارامترهای فوق از ارتباطی سازگار با روند رشد و توسعه گیاه نیشکر برخوردار است.

مقادیر آماره های ارزیابی مورد استفاده در بررسی عملکرد مدل واسنجی شده برای مزرعه مطالعاتی در شبیه سازی انتقال آب و املاح و متغیرهای بیوفیزیکی در جدول ۴ ارائه گردیده است. مطابق با جدول ۴، مقایسه مقادیر آماره های ME و MAE حاکی از آن است که کم برآوردگری یا بیش برآوردگری صورت گرفته در مورد هیچ یک از کمیت های معیار اندازه گیری شده به طور پایدار رخ نداده است. این نکته از شکل ۳، شکل ۴-الف و شکل ۵-الف که در آن الگوی تغییرات زمانی مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده کمیت های فوق طی دوره شبیه سازی مورد مقایسه قرار گرفته است نیز قابل استنباط می باشد. بخشی از عدم انطباق موجود بین داده های اندازه گیری و شبیه سازی شده رطوبت خاک را می توان به ناهمگنی مکانی در مزرعه مورد مطالعه و نیز خطای آزمایشی نسبت داد که این موارد در عمل و شرایط مزرعه غیر قابل اجتناب است (Singh et al., 2006b). بخشی دیگر از این عدم انطباق ناشی از فرضیات ساده سازی اتخاذی در مدل سازی مزرعه مطالعاتی، به ویژه به لحاظ فرض توزیع یکنواخت جریان آب آبیاری در سراسر سطح هیدروتوپ ها، صرف نظر کردن از اندرکنش جریان آب زیرزمینی بین هیدروتوپ ها و نیز خلاصه کردن سیستم زهکشی مزرعه در قالب یک سیستم زهکشی زیرزمینی و یک سیستم زهکشی سطحی منفرد و نماینده است. مقادیر آماره EF حاکی از عملکرد قابل قبول تا بسیار خوب مدل در بازسازی داده های اندازه گیری شده نیم رخ رطوبت خاک، عمق سطح ایستابی و جریان زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی بوده است. همچنین، بر اساس آماره NRMSE عملکرد مدل توسعه یافته در بازسازی داده های اندازه گیری شده فوق، قابل قبول تا بسیار خوب ارزیابی می شود. مطابق با جدول ۴، مقدار آماره RMSE مربوط به بازسازی سری زمانی نیم رخ رطوبتی خاک اندازه گیری شده کمتر از عدم قطعیت اندازه گیری رطوبت خاک با استفاده از نوترون متر (در حدود ۰/۰۲ سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب (Haverkamp et al., 1984)) می باشد.

نتایج این ارزیابی حاکی از قابلیت تعمیم پذیری مناسب مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در شبیه سازی نیم رخ رطوبت خاک،

به منظور ارزیابی عملکرد طرح مدل سازی توسعه یافته در بازسازی داده های اندازه گیری شده معیار از آماره های میانگین خطا^۱ (ME)، میانگین قدرمطلق خطا^۲ (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE)، و ضریب کارایی مدل^۴ (EF) استفاده شد (Parchami-Araghi et al., 2013):

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

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{m}} \quad (3)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{m}} / \bar{O} \quad (4)$$

$$EF = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^m (O_i - \bar{O})^2} \right) \quad (5)$$

که در آن ها: O مقدار اندازه گیری شده، P مقدار شبیه سازی شده و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه گیری شده و m تعداد مقایسه ها می باشد. آماره ME بیانگر آن است که مدل مورد بررسی مقدار O را بیش برآورد (مقادیر مثبت) یا کم برآورد (مقادیر منفی) می نماید. برای برآوردی مطمئن از O، باید مقدار قدرمطلق آن تا حد امکان کوچک باشد. مقدار آماره های MAE و RMSE همواره مثبت بوده و با نزدیک شدن مقدار آن ها به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی بهبود می یابد. آماره EF مقادیر P را نسبت به \bar{O} مقایسه می کند. 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 اندازه گیری شده، تخمین بهتری را نسبت به مقادیر برآورد شده از طریق مدل ارائه می دهد (Parchami-Araghi et al., 2013). 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، به عنوان عملکرد بسیار خوب، قابل قبول و غیر قابل قبول مدل در بازسازی مقادیر اندازه گیری شده معیار در نظر گرفته می شود (Moriassi et al., 2007). 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 غیر قابل قبول مدل در بازسازی کمیت های معیار اندازه گیری شده در نظر گرفته می شود (Loague and Green, 1991).

- 1- Mean Error
- 2- Mean Absolute Error
- 3- Root Mean Square Error
- 4- Model Efficiency Coefficient

مقادیر آماره ضریب تغییرات (CV) کوچکتر از ۲۵ درصد، بین ۲۵ تا ۷۵ درصد و بزرگتر از ۷۵ درصد به ترتیب، به عنوان تغییرپذیری ناچیز، بینابینی و تغییرپذیری بالای کمیت مورد بررسی در نظر گرفته می شود (UNEP, 2015).

مطابق با آماره ضریب تغییرات مقادیر اندازه گیری شده نیمرخ غلظت املاح آب خاک و شوری جریان زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (جدول ۴) و شکل ۴ می توان گفت که در هر دو مجموعه داده واسنجی و صحت سنجی، مقادیر اندازه گیری شده فوق از تغییرپذیری اندکی برخوردار بوده اند. بنابراین، می توان گفت که در این شرایط، در مقایسه با آماره EF، استفاده از آماره NRMSE برای قضاوت در مورد عملکرد مدل توسعه یافته در شبیه سازی انتقال املاح معقول تر است.

نوسانات سطح ایستابی و جریان خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی است. بر اساس مقادیر آماره EF، عملکرد مدل توسعه یافته در شبیه سازی نیمرخ غلظت املاح آب خاک به ازای مجموعه داده های واسنجی و صحت سنجی به ترتیب، خوب و غیرقابل قبول ارزیابی می شود. بر اساس مقادیر این آماره، عملکرد مدل در شبیه سازی شوری جریان زه آب خروجی از سیستم زهکشی زیرزمینی در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی غیرقابل قبول ارزیابی می شود. متقابلاً، بر اساس مقادیر آماره NRMSE (جدول ۴)، عملکرد مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی در بازسازی مقادیر اندازه گیری شده نیمرخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه آب، به عنوان عملکرد خوب تا بسیار خوب ارزیابی می شود. بروز این تناقض در تفسیر عملکرد مدل با استفاده از آماره های EF و NRMSE با میزان تغییرپذیری در مجموعه داده های اندازه گیری شده معیار مرتبط است. به طور کلی،

جدول ۳- مقادیر بهترین برآورد پارامترهای واسنجی در نظر گرفته شده برای مدل توسعه یافته در مزرعه مطالعاتی (*)

شرح	پارامتر	مقدار واسنجی شده	شرح	پارامتر	مقدار واسنجی شده
	$(\theta_{sat})_1$	۰/۴۴۸۲		TSUMEA	۵۵۲۳/۴۹۹۲
	$(\theta_{sat})_2$	۰/۴۴۲۰		TSUMAM	۱۳۹۰/۹۵۹۱
پارامترهای هیدرولیکی خاک	$(\alpha)_1$	۰/۰۱۶۶		RGRLAI	۰/۰۲۷۸
	$(\alpha)_2$	۰/۰۰۵۲		$(S_{LA})_1$	۰/۰۰۰۵
برای دو لایه در نظر گرفته شده برای ستون خاک	$(n)_1$	۱/۲۳۵۷		$(S_{LA})_2$	۰/۰۰۰۸
	$(n)_2$	۲/۱۴۳۳		$(S_{LA})_3$	۰/۰۰۰۷
	$(K_{sat})_1$	۳۳/۲۹۳۲		$(S_{LA})_4$	۰/۰۰۱۰
	$(K_{sat})_2$	۱۱/۲۲۰۰		$(S_{LA})_5$	۰/۰۰۱۴
	$(q_{Bot})_1$	۰/۰۰۹۴		$(S_{LA})_6$	۰/۰۰۱۸
جریان از کف در پنج مقطع زمانی	$(q_{Bot})_2$	۰/۰۱۶۵	تغییر	$(S_{LA})_7$	۰/۰۰۱۷
	$(q_{Bot})_3$	۰/۰۰۱۴	شوری	$(S_{LA})_8$	۰/۰۰۰۴
	$(q_{Bot})_4$	۰/۰۱۰۰	زنی	$(S_{LA})_9$	۰/۰۰۱۷
	$(q_{Bot})_5$	۰/۰۱۷۵	معدنی	EFF	۰/۵۱۲۳
پارامترهای انتقال املاح	$(D_{dis})_1$	۴۰/۹۹۱۳		$(A_{max})_1$	۲۹/۹۷۸۹
برای دو لایه در نظر گرفته شده برای ستون خاک	$(D_{dis})_2$	۴/۷۰۳۴		$(A_{max})_2$	۱۸/۹۱۷۳
	$(K_f)_1$	۰/۰۰۵۷		$(A_{max})_3$	۵/۲۹۹۱
	$(K_f)_2$	۸۲/۰۹۵۶		$(A_{max})_4$	۶۱/۷۶۸۸
شوری آب زیرزمینی	C_{gw1}	۲/۳۹۶۷		$(A_{max})_5$	۷۷/۰۲۱۸
شوری جریان از کف	C_{Bot}	۳/۷۹۷۶		$(A_{max})_6$	۴۱/۵۶۴۹
پارامترهای سیستم زهکشی	γ_{drain}	۱۳۵/۹۲۸۵		$(A_{max})_7$	۳۹/۰۶۰۴
	γ_{drain2}	۴۰۴۱/۰۵۱۹		$(A_{max})_8$	۲۴/۲۸۵۷
	T_{delay}	۱/۶۶۱۰		$(A_{max})_9$	۱/۹۹۰۸

(*) 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_{drain1} و γ_{drain2} به ترتیب، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی زیرزمینی (روز)، مقاومت زهکشی سیستم زهکشی روباز و زمان تاخیر رسیدن زه آب به خروجی (روز)، C_{gw} شوری آب زیرزمینی (میلی گرم بر سانتی متر مکعب)، TSUMEA، TSUMAM، RGRLAI، S_{LA} و A_{max} EFF 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 دی‌اکسید کربن (کیلوگرم بر هکتار بر ساعت) و راندمان مصرف نور در یک برگ منفرد (کیلوگرم بر هکتار بر ساعت بر ژول بر متر مربع بر ثانیه) می‌باشد.

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

آماره ارزیابی					CV	n _{obs}	مجموعه داده	داده معیار اندازه‌گیری شده
EF	NRMSE	RMSE	MAE	ME				
۰/۹۰۱	۰/۰۲۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲	۸/۶۴۰	۷	واستجی	رطوبت خاک
۰/۵۱۴	۰/۰۴۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹	۵/۸۶۷	۱۳	صحت‌سنجی	(cm ³ cm ⁻³)
۰/۸۲۷	۰/۱۷۷	۲۲/۰۳۹	۱۶/۳۰۹	۴/۹۳۶	۴۲/۶۴۲	۹۴	واستجی	عمق سطح
۰/۷۹۸	۰/۲۱۵	۲۰/۶۳۲	۱۶/۲۷۸	۰/۲۱۴	۴۷/۷۴۰	۱۲۲	صحت‌سنجی	ایستایی (cm)
۰/۸۷۷	۰/۲۰۷	۰/۱۳۴	۰/۰۹۶	۰/۰۳۶	۵۹/۱۲۷	۸۱	واستجی	جریان زه‌آب
۰/۶۷۲	۰/۲۷۴	۰/۲۵۵	۰/۱۴۸	-۰/۰۷۳	۴۷/۸۳۶	۱۲۹	صحت‌سنجی	خروجی (cm d ⁻¹)
۰/۹۸۰	۰/۰۳۹	۰/۰۹۸	۰/۰۷۴	-۰/۰۳۹	۲۸/۰۴۲	۱۲	واستجی	نیمرخ غلظت املاح
-۲/۱۱۴	۰/۱۵۴	۰/۳۰۶	۰/۲۲۰	۰/۰۸۲	۸/۷۴۵	۱۲	صحت‌سنجی	آب خاک (dS m ⁻¹)
-۰/۶۲۳	۰/۰۹۶	۰/۳۸۸	۰/۳۳۰	-۰/۲۴۱	۷/۵۲۳	۸۱	واستجی	شوری زه‌آب
-۰/۰۰۷	۰/۰۴۶	۰/۱۷۵	۰/۱۳۳	-۰/۰۱۴	۴/۵۵۸	۱۲۸	صحت‌سنجی	(dS m ⁻¹)
۰/۹۹۵	۰/۰۴۸	۰/۱۳۹	۰/۱۱۰	-۰/۰۲۲	۶۸/۵۳۰	۳۹	واستجی	شاخص سطح برگ (m ² m ⁻²)
۰/۹۹۹	۰/۰۱۴	۰/۱۷۶	۰/۱۶۰	-۰/۰۲۴	۵۶/۷۲۸	۴	واستجی	عملکرد نی (ton ha ⁻¹)
۰/۹۷۲	۰/۰۹۶	۰/۱۱۸	۰/۰۸۶	-۰/۰۱۳	۵۷/۹۵۸	۴	واستجی	عملکرد ساکارز (ton ha ⁻¹)

(۹) در این جدول، CV ضریب تغییرات (درصد) کمیت اندازه‌گیری شده و n_{obs} تعداد مشاهدات می‌باشد.

اندازه‌گیری شده نیمرخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی نبود. به‌طور کلی، بیان املاح در خاک تابع عواملی چون عمق کاربرد و شوری آب آبیاری/بارندگی، صعود شعریه از آب زیرزمینی شور، 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 است. با این حال، از لحاظ کردن اثر دو عامل دیگر، به‌دلیل دشواری مدل‌سازی آن‌ها، صرف‌نظر گردیده است.

بر این اساس و به‌منظور در نظر گرفتن ضمنی نقش دو عامل فوق بر بیان املاح خاک در مزرعه مطالعاتی و نهایتاً، حصول شبیه‌سازی‌های هرچه واقع‌بینانه‌تر از تغییرات غلظت املاح آب خاک و شوری زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی، فرآیند جذب سطحی املاح نیز در شبیه‌سازی‌های انتقال املاح لحاظ گردید. به‌این ترتیب، اثر عوامل فوق 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 زه‌آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی در شرایط عدم اعمال فرآیند

چراکه اساساً، در تبیین ریاضی آماره‌های ارزیابی EF و NRMSE (روابط ۴ و ۵)، عدم انطباق کل مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده به‌ترتیب، با استفاده از واریانس و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده بدون بعد می‌شود. بنابراین، آماره EF بیانگر کسری از واریانس مقادیر اندازه‌گیری شده است که از طریق مدل شبیه‌سازی توجیه گردیده است. لذا، می‌توان گفت که در صورت بروز تناقض در ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌های معیار اندازه‌گیری شده بر اساس مقادیر آماره‌های NRMSE و EF، ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌های اندازه‌گیری شده با واریانس بالا بر اساس آماره EF مناسب‌تر خواهد بود و بالعکس. نوذری و همکاران (۱۳۹۷) با کاربرد مدل DRAINMOD-S در یکی از مزارع کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر، خوزستان، میزان آماره‌های RMSE و NRMSE در شبیه‌سازی شوری زه‌آب خروجی را به‌ترتیب، در حدود ۴/۷۶ دسی‌زیمنس بر متر و ۰/۳۴ گزارش کردند که میزان عدم انطباق گزارش شده به‌طور قابل توجهی بیشتر از مقادیر نظیر به‌دست آمده برای این آماره‌ها در پژوهش حاضر است (جدول ۴).

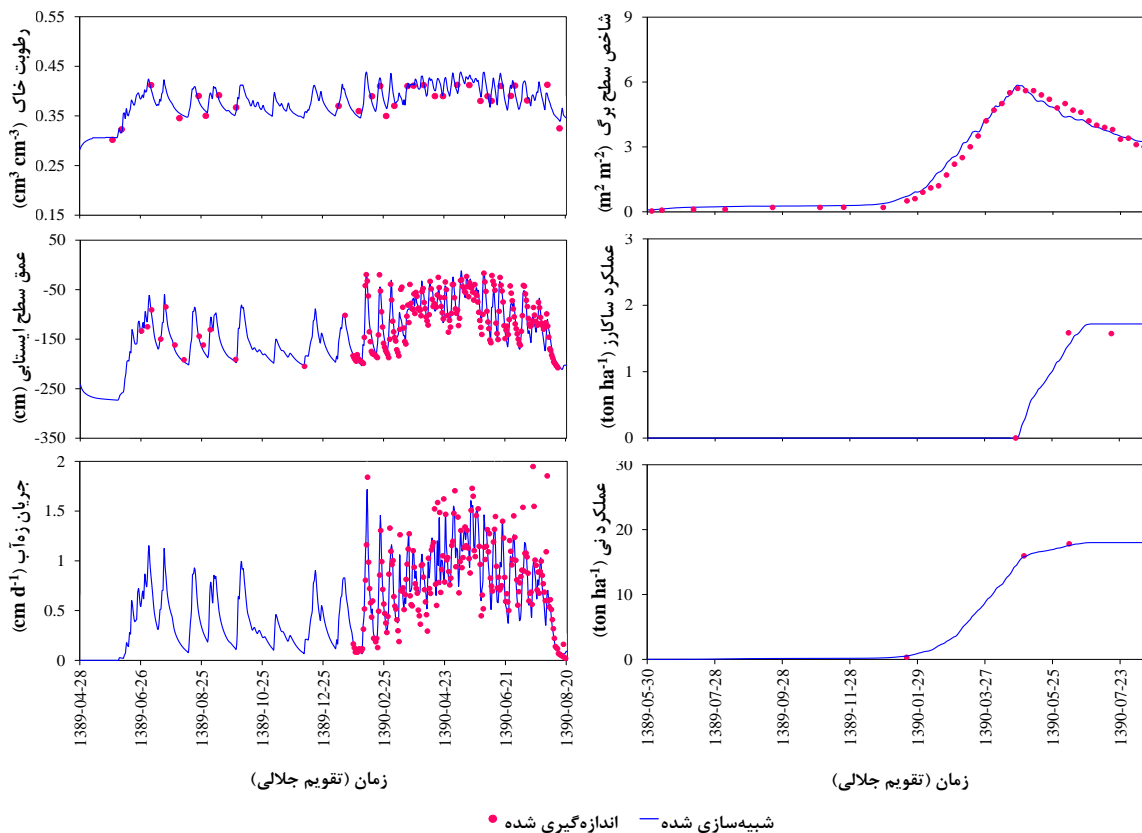
در این پژوهش، فرآیند جذب سطحی نیز در مدل‌سازی انتقال املاح خاک در مزرعه مطالعاتی لحاظ گردید. دلیل این امر آن بود که نتایج بررسی‌ها نشان داد بدون در نظر گرفتن این فرآیند، مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی قادر به بازسازی هم‌زمان مقادیر

واقع بینانه نیمرخ غلظت املاح آب خاک و شوری زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی داشته است.

از سوی دیگر، در نظر گرفتن این فرآیند به عنوان یک فاکتور اطمینان، منجر به اتخاذ رویکردی محتاطانه تر در تحلیل سناریوهای مدیریت آبیاری در مزرعه مطالعاتی خواهد شد 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 گردید. بر اساس جدول ۴، مقادیر آماره های EF و NRMSE حاکی از عملکرد بسیار خوب مدل توسعه یافته در بازسازی مقادیر اندازه گیری شده شاخص سطح برگ، عملکرد نی و عملکرد ساکارز گیاه نیشکر طی مرحله واسنجی است.

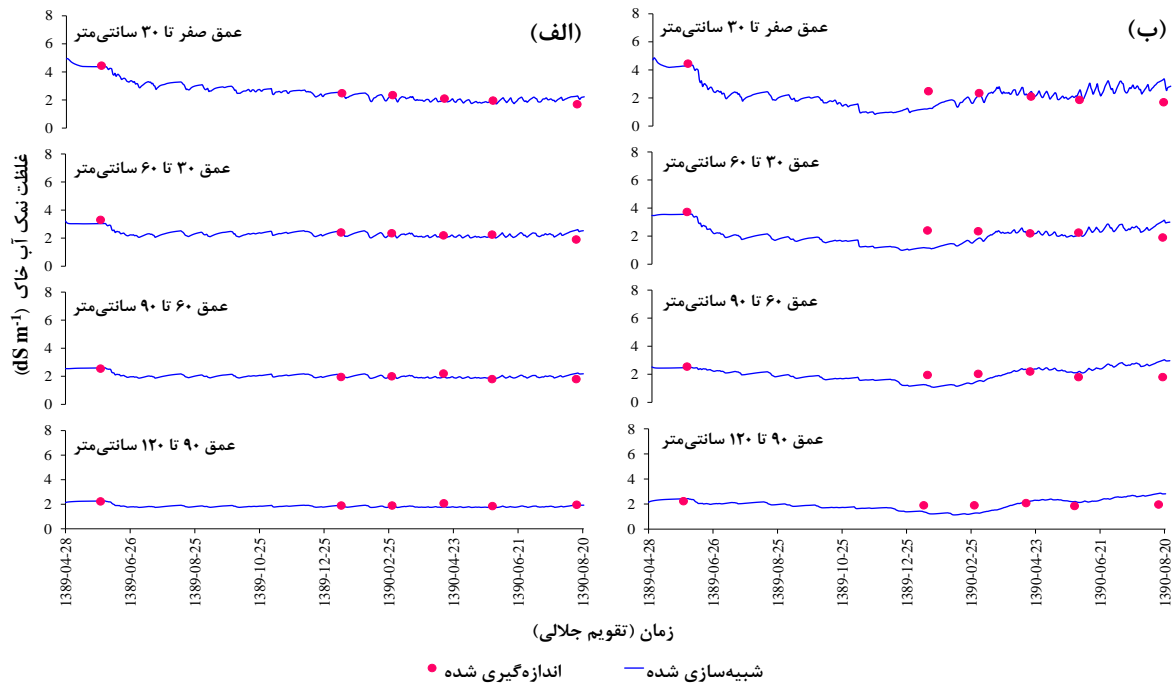
مقادیر شبیه سازی شده اجزای بیلان آب در مزرعه مطالعاتی طی دوره شبیه سازی در جدول ۵ و مقادیر شبیه سازی شده اجزای بیلان املاح و عملکرد محصول نیشکر (نی و ساکارز) در جدول ۶ ارائه گردیده است. برآوردهای اشتقاق یافته برای مولفه تبخیر- تعرق واقعی گیاه در مزرعه مطالعاتی (جدول ۵) در دامنه مقادیر گزارش شده (Singels and van der Laan, 2012) برای تبخیر- تعرق واقعی گیاه نیشکر (۸۰ تا ۲۰۰ سانتی متر) قرار دارد.

جذب سطحی املاح به ترتیب، در شکل ۴-ب و شکل ۵-ب نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، در مقایسه با شرایط در نظر گرفتن فرآیند جذب سطحی، تغییرپذیری مقادیر شبیه سازی شده نیمرخ غلظت املاح آب خاک به طور قابل توجهی افزایش یافته و از انطباق کمتری با مقادیر نظیر اندازه گیری شده برخوردار بوده اند. به عبارت دیگر، لحاظ کردن فرآیند جذب سطحی در مدل سازی انتقال املاح در آب خاک (فاز مایع خاک)، بخشی از املاح جذب سطحی شده از فاز جامد به فاز مایع خاک انتقال یابند. به گونه ای که این امر منجر به حفظ شوری آب خاک در یک دامنه معین و لذا، کاهش تغییرپذیری مقادیر شبیه سازی شده نیمرخ غلظت املاح آب خاک طی دوره شبیه سازی گردیده است. این امر در مورد مقادیر شبیه سازی شده شوری زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی نیز صادق است (شکل ۵). این نتایج حاکی از لزوم واسنجی و صحت سنجی مدل سازی انتقال املاح در هر دو ناحیه اشباع و غیراشباع در شرایط وجود آب زیرزمینی کم عمق شور است. بنابراین، با مقایسه شکل ۴-الف با شکل ۴-ب و شکل ۵-الف با شکل ۵-ب می توان گفت لحاظ کردن فرآیند جذب سطحی املاح در شبیه سازی انتقال املاح در خاک نقش مهمی در دستیابی به شبیه سازی های

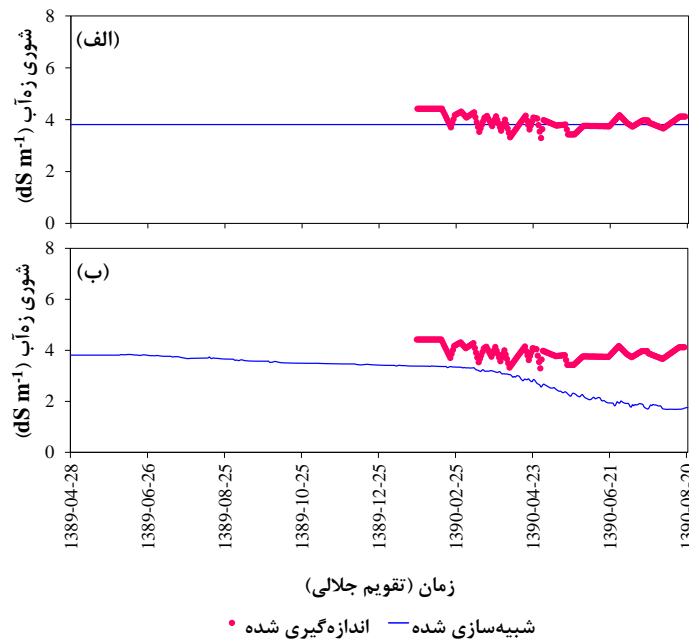


شکل ۳- مقایسه سری زمانی مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده کمیتهای معیار مورد استفاده در ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته در

شبیه سازی انتقال آب و متغیرهای بیوفیزیکی طی دوره شبیه سازی. مقادیر عملکرد محصول تولیدی بر حسب وزن خشک می باشد.



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده نیم رخ غلظت املاح آب خاک در مزرعه مطالعاتی: (الف) در شرایط اعمال فرآیند جذب سطحی املاح و (ب) در شرایط عدم اعمال فرآیند جذب سطحی املاح



شکل ۵- مقایسه مقادیر اندازه گیری و شبیه سازی شده شوری زه آب خروجی از سیستم زهکشی زیرزمینی: (الف) در شرایط اعمال فرآیند جذب سطحی املاح و (ب) در شرایط عدم اعمال فرآیند جذب سطحی املاح

بر اساس جدول ۵، عامل اصلی کاهش تعرق پتانسیل به تعرق واقعی، تنش اکسیژن وارد شده به گیاه در اثر غرقاب شدن ناحیه

به ترتیب، ۵۹/۵۶ و ۴/۳۰ درصد از کل آب ورودی به نیمرخ خاک مزرعه مطالعاتی (بارندگی، آبیاری و جریان از کف) را به خود اختصاص داده است (جدول ۵). بر اساس جدول ۶، مقادیر نهایی عملکرد محصول نیشکر بر حسب عملکرد نی و ساکارز از انطباق قابل قبولی با مقادیر نظیر اندازه گیری شده برخوردار هستند (با اختلاف به ترتیب، ۰/۳۳ و ۰/۵۸ درصدی). همچنین، مقادیر شبیه سازی شده پتانسیل عملکرد نی و ساکارز به برآوردهای گزارش شده توسط اینمن - باربر (Inman-Bamber, 1995) برای عملکرد پتانسیل گیاه نیشکر (۴۰ تن بر هکتار نی و ۴/۸ تن بر هکتار ساکارز بر حسب وزن خشک) نزدیک است (به ترتیب، با اختلاف ۲/۴۸ و ۱۸/۳۳ درصدی).

توسعه ریشه به دلیل آبیاری بی رویه و اثر آب زیرزمینی کم عمق بوده است. به گونه ای که این عامل سهمی ۹۳/۷۶ درصدی از میزان اختلاف تعرق پتانسیل و تعرق واقعی را به خود اختصاص داده و دو عامل تنش خشکی و شوری به ترتیب، از سهمی ۰/۲۵ و ۵/۹۹ درصدی برخوردار بوده اند. با این حال، از آنجا که سهم هریک از تنش های اکسیژن، خشکی و شوری شبیه سازی شده از طریق مدل SWAP برای نخستین بار در مقاله حاضر ارائه شده است، امکان مقایسه این مقادیر با تحقیقات مشابه وجود نداشت. همان طور که در جدول ۵ ملاحظه می شود، بخش عمده (۹۰/۲۷ درصد) تبخیر- تعرق واقعی، طی ساعات روز به وقوع پیوسته است. میزان کل زه آب خروجی از دو سیستم زهکش زیرزمینی و زهکش سطحی جمع کننده

جدول ۵- مقادیر شبیه سازی شده اجزای بیلان آب (سانتی متر) در مزرعه مطالعاتی طی دوره شبیه سازی (*)

مقدار	شرح	مقدار	شرح
۹۰/۲۷	کسر تبخیر- تعرق طی ساعات روز (درصد)	۱۷۸/۱۴	تبخیر پتانسیل (سانتی متر)
۲۳/۵۵	بارش ناخالص (سانتی متر)	۱۳۳/۳۰	تعرق پتانسیل (سانتی متر)
۲۳/۳۴	بارش خالص (سانتی متر)	۶۱/۲۳	تبخیر واقعی (سانتی متر)
۳۹۸/۲۰	آبیاری (سانتی متر)	۸۴/۹۸	تعرق واقعی (سانتی متر)
۲۵۳/۹۹	زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی (سانتی متر)	۶۲/۳۷	تعرق نسبی $100 \times$ (درصد)
۱۸/۳۳	زه آب خروجی از سیستم زهکش سطحی (سانتی متر)	۹۴/۱۳	RedWet (درصد)
۲۷۲/۳۳	کل زه آب خروجی از سیستم زهکشی (سانتی متر)	۰/۰۰	RedDry (درصد)
۴/۹۹	جریان از کف (سانتی متر)	۵/۸۷	RedSlt (درصد)
۸/۰۰	ΔW (سانتی متر، محاسبه شده برای ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی متر)	۳۱۱/۴۴	تبخیر- تعرق پتانسیل (سانتی متر)
		۱۴۶/۲۱	تبخیر- تعرق واقعی (سانتی متر)

(*) در این جدول، RedWet، RedDry و 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 (سانتی متر) می باشند.

جدول ۶- مقادیر شبیه سازی شده اجزای بیلان املاح و عملکرد محصول (وزن خشک) در مزارع مطالعاتی طی دوره شبیه سازی (*)

عملکرد محصول (تن بر هکتار)		اجزای بیلان املاح (میلی گرم بر سانتی متر مربع)	
مقدار	شرح	مقدار	شرح
۳۹/۰۱	پتانسیل عملکرد نی شبیه سازی شده	۳۶۹/۶۴ (۱/۴۵)	بار نمک آب آبیاری
۱۸/۰۰	عملکرد واقعی نی شبیه سازی شده	۶۱۹/۶۲ (۳/۸۱)	بار نمک زه آب خروجی از سیستم زهکش زیرزمینی
۱۷/۹۴	عملکرد نی اندازه گیری شده	۴۴/۷۲ (۳/۸۱)	بار نمک زه آب خروجی از سیستم زهکش سطحی
۳/۹۲	پتانسیل عملکرد ساکارز شبیه سازی شده	۶۶۴/۳۴ (۳/۸۱)	کل بار نمک زه آب خروجی از سیستم زهکشی
۱/۷۲	عملکرد واقعی ساکارز شبیه سازی شده	۱۸/۹۶ (۵/۹۳)	بار نمک جریان از کف
۱/۷۳	عملکرد ساکارز اندازه گیری شده	-۲۷۵/۷۵	تغییر ذخیره املاح در نیمرخ خاک (**)

(*) در این جدول، اعداد داخل پرانتز بیانگر میزان معادل غلظت املاح (میلی گرم بر سانتی متر مربع) بر حسب غلظت (دسی زیمنس بر متر) می باشد.

(**) محاسبه شده برای ستون خاکی با عمق ۵۵۰ سانتی متر

واحد کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (شعبیه)، خوزستان، یک طرح مدل سازی زراعی- هیدرولوژیکی ریچاردزبنیان به شیوه توزیعی با قابلیت واسنجی زیرروانه از طریق کاربرد نسخه تصحیح شده ای از مدل SWAP توسعه یافت. نتایج واسنجی و صحت سنجی، حاکی از

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به منظور عملی ساختن کاربرد مدل سازی زراعی- هیدرولوژیکی در شرایط واقعی بهره برداری از مزارع نیشکر در

مقایسه عملکرد برخی مدل‌های ریزمقیاس‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه. نشریه آب و خاک. ۳۰(۲): ۳۵۴-۳۳۴.

سمیع‌پور، ف.، محمدی، ک.، مهدیان، م.ح. و ناصری، ع. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل‌های زهکشی SWAP و DRAINMOD به منظور تعیین عمق و فاصله بهینه زهکش‌ها بر اساس بیشترین عملکرد محصول و کمترین مقدار خروجی زه‌آب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۴): ۳۸۶-۳۷۵.

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.

محبوبی، ا. ۱۳۹۱. بررسی اثرات زهکشی کنترل شده بر روی شوری خاک، مدیریت آبیاری و عملکرد نیشکر در کشت و صنعت امام خمینی. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران، اهواز. ۲۰۶ ص.

محبوبی، آ. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴. برآورد شوری خاک در محدوده ریشه نیشکر با مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی در کشت و صنعت امام خمینی با استفاده از مدل SaltMod. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۶(۱): ۱۸-۱.

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

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

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.

Chen, S., Mao, X., Barry, D.A. and Yang, J. 2019. Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil. Agricultural Water Management. 221: 160-174.

Clark, M.P. and Kavetski, D. 2009. Ancient numerical demons of conceptual hydrological modeling: 1. Fidelity and efficiency of time stepping schemes. Water Resources Research. 46(10): W10510, doi:10.1029/2009WR008894.

عملکرد مطلوب الگوریتم UPSO در یافتن مقادیر بهینه پارامترهای مجهول و عملکرد قابل قبول مدل توسعه یافته در کمی‌سازی فرآیندهای انتقال آب و املاح و فرآیندهای بیوفیزیکی حاکم بر سیستم زراعی مطالعاتی بود. اگرچه میزان آب کاربردی در مزرعه مطالعاتی (۳۹۸/۲۰ سانتی‌متر) در دامنه گزارش شده در نقاط مختلف جهان برای کشت اول نیشکر قرار دارد، اما این مقدار فراتر از برآوردهای حداکثری گزارش شده (۳۵۰ سانتی‌متر) در اراضی کشت نیشکر در استان خوزستان (۱۳/۸ درصد بیشتر) است. از سوی دیگر، میزان حداکثری ۳۵۰ سانتی‌متر آب کاربردی گزارش شده نیز حاصل از بررسی‌های صورت گرفته در واحد امیرکبیر می‌باشد که در آن میزان شوری آب آبیاری کاربردی و آب زیرزمینی کم‌عمق بالاتر از منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر است. متعاقباً، اعمال آبیاری بی‌رویه در اراضی مزرعه مطالعاتی منجر به تخلیه مقادیر قابل توجهی از زه‌آب شور به بدنه‌های آبی پذیرنده خواهد شد. تاجایی که بر اساس اجزای بیلان املاح شبیه‌سازی شده طی دوره مطالعاتی، حدود ۳۹/۸۲ تن نمک بر هکتار از طریق آبیاری به مزرعه مطالعاتی وارد و حدود ۶۶/۴۳ تن نمک بر هکتار از طریق سیستم‌های زهکشی از مزرعه خارج و به بدنه‌های آبی پذیرنده تخلیه شده است. ویرایش و انسجی و صحت‌سنجی شده مدل توسعه یافته برای مزرعه مطالعاتی می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد به‌منظور بررسی گزینه‌های مختلف مدیریت یکپارچه آب و زه‌آب به‌شیوه استراتژی تقلیل منبع (که از طریق تصحیح مدیریت آبیاری مزرعه قابل تحقق است) مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

پرجمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴ الف. مقایسه تبخیر-تعرق مرجع پنمن-مانیت ASCE و پنمن-مانیت فائو-۵۶ در مقیاس‌های زمانی زیرروزانه مختلف: یک مطالعه عددی. نشریه آب و خاک. ۲۹(۵): ۱۱۸۹-۱۱۳۳.

پرجمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش.، وظیفه‌دوست، م. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴ ب. توسعه یک چارچوب ریزمقیاس‌سازی به منظور برآورد تبخیر-تعرق مرجع زیرروزانه: ۲- برآورد تبخیر-تعرق زیرروزانه با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه ریزمقیاس شده. نشریه آب و خاک. ۲۹(۶): ۱۷۳۴-۱۷۲۱.

پرجمی 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-

- International Science Publishers, Zeist, The Netherlands, pp. 868-873.
- Parsopoulos, K.E., Vrahatis, M.N. and Global, I. 2010. Particle swarm optimization and intelligence: advances and applications. Information Science Reference Hershey, New York.
- Qureshi, A.S., Eshmuratov, D. and Bezborodov, G. 2011. Determining optimal groundwater table depth for maximizing cotton production in the Sardarya province of Uzbekistan. *Irrigation and Drainage*. 60(2): 241-252.
- Sarwar, A., Bastiaanssen, W.G.M., Boers, T.M. and van Dam, J.C. 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.
- 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.
- Singh, A. 2019. Environmental problems of salinization and poor drainage in irrigated areas: Management through the mathematical models. *Journal of cleaner production*. 206: 572-579.
- Singh, R., Jhorar, R.K., van Dam, J.C. and Feddes, R.A. 2006a. Distributed ecohydrological modelling to evaluate irrigation system performance in Sirsa district, India II: Impact of viable water management scenarios. *Journal of Hydrology*. 329(3-4): 714-723.
- Singh, R., van Dam, J.C. and Feddes, R.A. 2006b. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agricultural Water Management*. 82(3): 253-278.
- Su, N., Bethune, M., Mann, L. and Heuperman, A. 2005. Simulating water and salt movement in tile-drained fields irrigated with saline water under a Serial Biological Concentration management scenario. *Agricultural Water Management*. 78(3): 165-180.
- 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.
- 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>).
- van Walsum, P.E.V. and Veldhuizen, A.A. 2011. Integration of models using shared state variables: Implementation in the regional hydrologic modelling system SIMGRO. *Journal of Hydrology*. 409(1): 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.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C. and McDonald, M.G. 2000. MODFLOW-2000, the US Geological Survey Modular Groundwater Mode—User Guide to Modularization Concepts and the Ground-water Flow Process, Open-File Report 00-92, Reston, Virginia.
- Haverkamp, R., Vauclin, M. and Vachaud, G. 1984. Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. local standpoint. *Soil Science*. 137(2): 78-90.
- Inman-Bamber, N. 1995. Climate and water as constraints to production in the South African sugar industry, Proceedings of Conference South African Sugar Technology Association, Vol: 69, pp. 55-59.
- 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 pp.
- Li, P. and Ren, L. 2019a. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: I. Parameter sensitivity analysis, calibration and model validation. *Journal of hydrology*. 574: 497-516.
- Li, P. and Ren, L. 2019b. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: II. Scenario simulation and analysis. *Journal of hydrology*. 574: 715-732.
- Loague, K. and Green, R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of contaminant hydrology*. 7(1): 51-73.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASAE*. 50(3): 885-900.
- Parchami-Araghi, F., Mirlatifi, S.M., Ghorbani Dashtaki, S. and Mahdian, M.H. 2013. Point estimation of soil water infiltration process using Artificial Neural Networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*. 481: 35-47.
- Parsopoulos, K.E. and Vrahatis, M.N. 2004. UPSO: A unified particle swarm optimization scheme. In: Simos, T. and Maroulis, G. (Eds.), *Lecture Series on Computer and Computational Sciences*. VSP

- processes and irrigation water saving in the middle Heihe River basin. *Agricultural water management*. 211: 152-164.
- Xue, J. and Ren, L. 2017. Assessing water productivity in the Hetao Irrigation District in Inner Mongolia by an agro-hydrological model. *Irrigation Science*. 35(4): 357-382.
- 363-370.
- Xu, X., Huang, G., Zhan, H., Qu, Z. and Huang, Q. 2012. Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. *Journal of Hydrology*. 412: 170-181.
- Xu, X., Jiang, Y., Liu, M., Huang, Q. and Huang, G. 2019. Modeling and assessing agro-hydrological

Distributed Application of SWAP Model for Intra-Daily Simulation of an Agricultural System with Subsurface Drainage

F. Parchami-Araghi^{1*}, F. Samipour², A. Sadeghi-Lari³

Received: Feb.20, 2020

Accepted: May.18, 2020

Abstract

Despite the high capability of field-scale agro-hydrological models to simulate plant growth interactions with water and solute transport in agricultural systems, their application to real conditions of large sugarcane fields in Khuzestan province faces many challenges, including spatial heterogeneity of irrigation scheduling across the field, the difficulty of determining initial and boundary conditions as well as several unknown model parameters, and data-intensiveness of calibration procedure. This work aimed to implement the agro-hydrological modeling under real operational conditions of large fields with surface/subsurface drainage. 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 the Unified Particle Swarm Optimization (UPSO) algorithm with capability of sub-daily calibration and simulation of controlled drainage. The developed model was applied to a sugarcane field with subsurface drainage with planted sugarcane (CP48-103 cultivar) in Imam Khomeini Sugarcane Agro-industrial company farms, during 2010-07-19 to 2011-12-11 (481 days). The results revealed the reasonable performance of the developed modeling scheme in retrieving the measured soil moisture, groundwater level, subsurface drainage outflow (with an EF of 0.901, 0.827, and 0.877 for calibration dataset; and 0.514, 0.798, and 0.672 for validation dataset, respectively), soil water solute concentration, subsurface drainage outflow salinity (with a NRMSE of 0.039 and 0.096 for calibration dataset; and 0.154 and 0.046 for validation dataset, respectively), Leaf Area Index, cane yield, and sucrose yield (with an EF of 0.995, 0.999, and 0.972, respectively).

Keywords: Inverse Modeling, Sugarcane, Unified Particle Swarm Optimization, Unsaturated Hydrology

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

2- Former M.Sc. Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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

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