

شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت یک منبع خطی در خاک سنگین با استفاده از مدل HYDRUS-2D

هدیه پوریزدان‌خواه، محمدرضا خالدیان^{۱*}، محمدحسن بیگلویی و پریسا شاهین‌رخسار

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

h_pyzdankhah@yahoo.com

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

khaledian@guilan.ac.ir

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

mkh572000@yahoo.com

پژوهشگر مؤسسه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی رشت و دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

pshahinroksar@yahoo.com

چکیده

با توجه به اینکه نصب سامانه آبیاری بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر است، بهتر است قبل از اجرای سامانه آبیاری، مقدار رطوبت ایجاد شده توسط سامانه در پای گیاه بررسی شود. در این تحقیق عملکرد مدل HYDRUS-2D در برآورد رطوبت الگوی خیس شده تحت آبیاری قطره‌ای نواری در مزرعه‌ای با بافت خاک سنگین و ناهمگن در منطقه‌ی رشت بررسی شد. سه دبی ۲/۵، ۵ و ۶ lit/hr/m و چهار زمان آبیاری یک، دو، سه و چهار ساعت در نظر گرفته شد که این ۱۲ تیمار در سه تکرار اجرا شدند. اختلاف نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج اندازه‌گیری شده براساس شاخص‌های RMSE و ضریب کارایی مدل (EF) هم برای کل نیم‌رخ خاک و هم برای رطوبت-های زیر تیپ برآورد شد که کارایی مدل، با دارا بودن میانگین RMSE و EF برابر با $0.123 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و 0.77 برای کل نیم‌رخ خاک و $0.236 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ و 0.76 برای زیر تیپ در این نوع بافت خاک تأیید شد. در کل، با وجود بافت سنگین و ناهمگن خاک در منطقه، مدل توانست مقادیر رطوبت را در الگوی خیس‌شده به خوبی شبیه‌سازی نماید.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای نواری، بافت سنگین، تیپ، رشت.

۱- آدرس نویسنده مسئول: رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده کشاورزی، کد پستی: ۴۱۹۹۶۱۳۹۸۶

* دریافت: آذر ۱۳۹۲ و پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۳

مقدمه

کوچک‌تر از حد متعارف باشد، گیاه نمی‌تواند آب کافی جذب کند و همین امر منجر به کاهش عملکرد خواهد شد (علیزاده، ۱۳۷۶). طراحی سیستم باید دقیق و مطابق با خصوصیات خاک و گیاه باشد. امروزه مدل‌هایی وجود دارند که می‌توانند الگوی توزیع آب در خاک را شبیه‌سازی کنند.

چنانچه صحت عملکرد مدلی تأیید شود، می‌توان قبل از اجرای سامانه، شرایط توزیع رطوبت و ابعاد پیاز رطوبتی ایجاد شده در خاک مورد نظر را با مدل مذکور شبیه‌سازی کرد و ابعاد رطوبتی مدل شده را با ابعاد منطقه توسعه ریشه مقایسه و سپس نسبت به اجرای سامانه اقدام کرد. در صورتی که سامانه اجرا شده باشد، می‌توان با کمک گرفتن از مدل، راهکارهای مدیریتی مناسبی را پیشنهاد داد (بووین و همکاران، ۲۰۰۶). از این‌رو، انتخاب مدل مناسب و معرفی آن در یک منطقه، مستلزم پژوهش و بررسی تحت شرایط خاک است.

در سال‌های اخیر مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی زیادی برای ارزیابی و طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای معرفی شده که می‌توان به مدل‌های تجربی سپاس‌خواه و چیت‌ساز (۲۰۰۴) برای آبیاری قطره‌ای سطحی و کندلوس و همکاران (۲۰۰۸) برای آبیاری قطره-ای زیرسطحی، مدل تحلیلی WetUp (کوک و همکاران، ۲۰۰۳) و مدل عددی HYDRUS-2D (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹) اشاره نمود. طی پژوهشی، مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی در برآورد ابعاد الگوی خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با یکدیگر مقایسه شد که در آن، مدل HYDRUS-2D به دلیل شبیه‌سازی خوب و قابلیت استفاده آن در دو آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به‌عنوان بهترین مدل معرفی شد (کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰a). مدل HYDRUS-2D یک مدل جامع برای شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما داخل خاک است که برای شرایط مختلف خاک و آب ورودی به داخل خاک

در دهه‌های اخیر، به‌منظور تولید محصول بیشتر، اجرای سامانه آبیاری قطره‌ای با کارایی مصرف آب بالا در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان که منابع آب محدودی دارند، متداول شده است. کشور ایران با بارندگی سالانه در حدود ۲۳۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر و کمی کمتر از یک سوم متوسط بارندگی کره زمین (۸۵۰ میلی-متر در سال) که از پراکندگی زمانی و مکانی مطلوبی نیز برخوردار نیست، از نظر جغرافیایی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

از این‌رو، استفاده بهینه از منابع آب ضروری است. اصلاح سامانه‌های آبیاری با جایگزینی سامانه‌های نوین به‌جای سامانه‌های سنتی با راندمان کم، می‌تواند یکی از اقدامات مؤثر در استفاده بهینه از منابع آب باشد (علیزاده، ۱۳۷۲). آبیاری قطره‌ای با دارا بودن بالاترین راندمان، یکی از مناسب‌ترین سامانه‌های نوین آبیاری است، اما مشکلاتی مانند گرفتگی قطره‌چکان‌ها و عدم امکان نصب مجدد قطره‌چکان‌ها در مکان قبلی، در فصل آبیاری جدید، راندمان محصول را کاهش می‌دهد. طی پژوهش انجام شده در آریزونا، عملکرد بهتر تیپ نسبت به قطره‌چکان‌ها، به دلیل کارگزاری نواری و ایجاد پیاز رطوبتی یکپارچه آن، تأیید شده است (ربرتز و همکاران، ۲۰۰۸).

در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، شناخت الگوی خیس شدن پروفیل خاک با استفاده از یک منبع نقطه‌ای، که اصطلاحاً به آن پیاز (یا جبهه‌ی) رطوبتی گویند، سهم بسزایی دارد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۷۷). ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت حاصل از این حجم رطوبتی، دو فاکتور مهم در تعیین فواصل بین قطره‌چکان‌ها و نوارها، به‌منظور دستیابی به یک توزیع بهینه آب و کود در منطقه توسعه ریشه است (کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰a). در روش آبیاری قطره‌ای ابعاد پیاز رطوبتی تأثیر بسزایی در کمیت و کیفیت عملکرد گیاهان زراعی دارد، به‌طوری که اگر پیاز رطوبتی تشکیل شده

همچنین پیچیدگی‌های ذاتی ناشی از ناهمگنی خاک در مقیاس مزرعه‌ای دانست (عباسی و تاجیک، ۱۳۸۶).

با وجود اینکه مطالعات زیادی در تعیین عملکرد مدل HYDRUS-2D در خاک‌هایی با بافت‌های سبک و متوسط انجام شده، هیچ پژوهشی روی بافت خاک سنگین در سطح مزرعه انجام نشده است. کوک و همکاران (کوک و همکاران، ۲۰۰۶) در پژوهشی با وارد نمودن اطلاعات دو بافت خاک شنی و رسی به مدل تحلیلی WetUp و مدل عددی HYDRUS-2D و مقایسه این دو مدل بدون در نظر گرفتن اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای گزارش نمودند که مدل عددی HYDRUS-2D در خاک رسی سخت‌تر از خاک شنی جواب می‌دهد و علت آن را ناپایداری حل مسائل عددی مطرح کردند.

در نتیجه، این پژوهش با هدف بررسی عملکرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت در الگوی خیس شده حاصل از آبیاری قطره‌ای نواری با دبی و زمان‌های مختلف آبیاری، در منطقه‌ای با بافت خاک سنگین و ناهمگن انجام شد. نتایج این پژوهش می‌تواند منجر به امکان‌سنجی استفاده از مدل مورد بررسی جهت طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در خاک‌هایی با بافت سنگین شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در تیر و مرداد ماه سال ۱۳۹۱ در مزرعه پژوهشی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی رشت با عرض ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه شمالی و طول ۴۹ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۲۸ متر که دارای اقلیم مدیترانه‌ای و آب و هوای معتدل خزری است، انجام شد. میانگین تقریبی پنجاه ساله دمای فصلی استان در بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱۸/۸، ۲۴/۱، ۱۳/۱ و ۷/۶ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی در سطح استان حدود ۱۳۵۹ میلی‌متر در سال است (بی‌نام، ۲۰۱۲). به دلیل کاهش بارندگی و متعاقباً کاهش منابع آب استان در سال‌های اخیر و افزایش تقاضای آب در بخش

توانایی شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک را دارد؛ هم-چنین این مدل قادر است خصوصیات هیدرولیکی خاک را به روش معکوس تعیین کند (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹).

اسکاگز و همکاران (اسکاگز و همکاران، ۲۰۰۴) برای ارائه راهکار مناسب برای بهینه‌سازی پارامترهای عملی آبیاری، مانند تناوب، شدت و مدت زمان آبیاری و محل قرارگیری نوارهای آبیاری قطره‌ای، پژوهشی در سطح مزرعه با بافت خاک شنی لومی انجام دادند و مقدار رطوبت را در نیم‌رخ خاک با استفاده از روش نمونه‌گیری وزنی پس از گذشت ۲۴ ساعت از آبیاری، به دست آوردند. سپس، شرایط را با نرم‌افزار HYDRUS-2D شبیه‌سازی و نتایج حاصل از مدل را با نتایج اندازه‌گیری صحرائی مقایسه کردند که نتایج عملکرد بالای مدل را در شبیه‌سازی نشان داد. در نتیجه، آن‌ها مدل را به عنوان یک ابزار طراحی با دقت بسیار بالا تأیید کردند.

در یک پژوهش آزمایشگاهی قطره‌چکانی با دبی ۱/۱ لیتر بر ساعت در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک لومی رسی قرار داده شد و سه نوبت آبیاری با دور ۱۶ روز در نظر گرفته شد که هر بار به مدت ۱۴ ساعت آبیاری صورت گرفت. مختصات قطره‌چکان (۰،۰) در نظر گرفته شد و با استفاده از حسگرهایی که در مختصات‌های (۰، ۰)، (۰، ۲۵) و (۰، -۲۰) قرار داشت، رطوبت خاک از روز بعد از آبیاری به مدت شش روز اندازه‌گیری شد و با مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی انجام شد که نتایج، عملکرد مدل را تأیید نمودند (کندلوس و همکاران، ۱۳۸۵).

اگرچه پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه توصیف و مدل‌سازی حرکت آب و املاح تحت شرایط کنترل شده در دهه‌های اخیر به دست آمده، ولی اکثر این پژوهش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی بوده و تعداد تحلیل‌های دقیق در مقیاس مزرعه‌ای اندک است. علت این امر را می‌توان عمدتاً در هزینه‌ها و نیروی کارگری مورد نیاز،

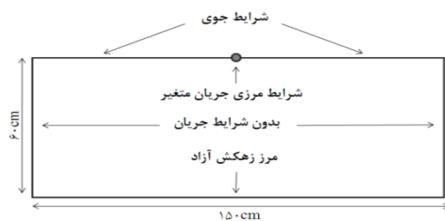
رطوبت، دستگاه واسنجی شد. رطوبت در ۵۵ نقطه از نیم-رخ خاک قرائت شد.

از آنجا که فواصل بین قطره‌چکان‌ها روی تیپ خیلی کم است (۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر)، به‌جز دقایق اولیه آبیاری که حرکت آب سه بعدی است، تیپ می‌تواند به عنوان یک منبع خطی مورد بررسی قرار گیرد، از این رو، می‌توان از یک بعد صرف‌نظر کرد و جریان را در دو بعد (Z و X) بررسی نمود (اسکاگز و همکاران، ۲۰۰۹)، شبیه‌سازی جریان آب در خاک در مدل با استفاده از حل عددی معادله دو بعدی ریچاردز (معادله ۱) انجام می‌شود که با فرض خاک همروند و یکنواخت به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(h, x, z) \quad (1)$$

که در آن:

θ رطوبت حجمی خاک، t زمان، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک، X محور افقی و Z محور عمودی (رو به بالا؛ مثبت)، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی و $S(h, x, z)$ جذب آب توسط ریشه‌ی گیاه است که در این پژوهش به دلیل عدم وجود گیاه عملاً صفر است. نیم‌رخ عمودی خاک به صورت متقارن و دو بعدی در نظر گرفته شد. بعد افقی پروفیل شبیه‌سازی شده در مدل ۱۵۰ سانتی‌متر، برابر با فواصل بین نوارهای آبیاری و بعد عمودی آن نیز ۶۰ سانتی‌متر برابر با عمق زهکش واقع در قسمت شمالی منطقه، فرض شد. جریان آب لاترال در طول مرز صفر فرض شد و مرز زیرین به عنوان مرز زهکش آزاد برای مدل تعریف شد (شکل ۲).

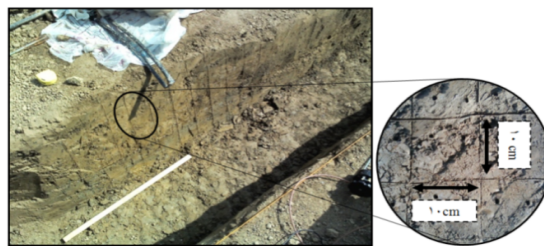


شکل ۲- نیم‌رخ شبیه‌سازی و شرایط اعمال شده در مدل HYDRUS-2D

کشاورزی به‌خصوص در فصل تابستان، استفاده از آبیاری قطره‌ای در باغ‌های مرکبات این استان رواج یافته است.

برای اجرای پژوهش، قبل از نصب سامانه آبیاری، لایه‌ی سطحی خاک تا عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک شخم زده شد. یک سامانه آبیاری متشکل از یک مانیفولد و سه لترال نصب گردید که از هر لترال ۱۲ تیپ منشعب می‌شد. از آب شهری برای پر کردن مخزن سامانه آبیاری استفاده شد. دبی‌های ۲/۵، پنج و شش لیتر بر ساعت بر متر برای هر لترال در نظر گرفته شد و برای هر دبی، زمان‌های یک، دو، سه و چهار ساعت آبیاری در نظر گرفته شد که در این حالت حجم‌های متفاوتی از جبهه رطوبتی ایجاد می‌شود.

این ۱۲ تیمار در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. پس از اتمام آبیاری برای جلوگیری از تبخیر آب، سطح خاک با پلاستیک پوشانده شد. ۴۸ ساعت پس از آبیاری، در زیر هر تیپ به عرض ۱۵۰ سانتی‌متر و تا عمق ۶۰ سانتی‌متری حفاری صورت گرفت و مقادیر رطوبت در شبکه‌های ۱۰×۱۰ سانتی‌متر از نیم‌رخ خاک با دستگاه رطوبت‌سنج MiniTrase Kit اندازه‌گیری شد (شکل ۱). این دستگاه رطوبت حجمی خاک را به روش انعکاس‌سنجی زمانی (TDR) اندازه‌گیری می‌کند، دارای حسگرهایی برای اندازه‌گیری رطوبت در اعماق مختلف خاک از ۱۵ تا ۷۰ سانتی‌متر است و به صورت قابل حمل برای بررسی خاک در مزرعه است. بین صفر تا ۱۰۰ درصد درجه اشباع را نشان می‌دهد و در محدوده دمایی بین صفر تا ۴۵ درجه عمل می‌کند. با توجه به این‌که دستگاه TDR، مقدار رطوبت را برای خاک‌های با بافت سنگین کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند (معروف‌پور و همکاران، ۲۰۰۹)، به‌منظور دستیابی به مقدار واقعی



شکل ۱- ایجاد شبکه‌های ۱۰×۱۰ سانتی‌متر در زیر هر تیپ

بافت خاک براساس روش هیدرومتری، سیلتی رسی تعیین شد. طی حفاری‌های میدانی سه لایه مختلف در نیم‌رخ خاک مشاهده شد که درصد ماسه، لای و رس هر لایه و مقدار جرم مخصوص ظاهری آنها در جدول (۱) و ویژگی‌های هیدرولیکی آنها در جدول (۲) ارائه شده است.

در هنگام آبیاری، منبع خطی در هر نقطه، جریان ثابتی برابر با q دارد که مقدار آن با تقسیم شدت جریان عبوری از تیپ بر مساحت سطحی تیپ به دست می‌آید که شعاع تیپ در حین آبیاری 0.7 سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و مقادیر جریان برای دبی‌های $2/5$ ، پنج و شش لیتر بر ساعت بر متر به ترتیب برابر با 0.114 ، 0.1368 و 0.160 متر بر ساعت تعیین شد.

جدول ۱- بافت و جرم مخصوص لایه‌های مختلف خاک محل مورد آزمایش

درصد ماسه	درصد لای	درصد رس	نوع بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm^3)
۳	۴۸	۴۹	سیلتی رسی	۱/۵۸
۳	۴۴	۵۳	سیلتی رسی	۱/۵۹
۷	۴۲	۵۱	سیلتی رسی	۱/۶۰

اول و شرایط مرزی و اولیه برای آن تعریف شد (ریچاردز و سیمونک، ۲۰۱۰)، فرض اولیه‌ی پارامترها نیز بر اساس مدل Rosetta موجود در نرم‌افزار HYDRUS-2D به دست آمد. به عبارتی براساس داده‌های رطوبتی در تکرار دوم تیمار دبی لیتر پنج لیتر بر ساعت بر متر و مدت زمان آبیاری دو ساعت واسنجی و برای ۳۵ تکرار دیگر اعتبارسنجی انجام شد. برای تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از معادله‌ی ون‌گونختن - معلم برای $\theta(h)$ معادله (۲) و $K(\theta)$ معادله (۳) استفاده شد (معلم، ۱۹۷۶).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$\frac{K(h)}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^2 \right] \quad (3)$$

که در آن:

α پارامتر مقیاس در مدل ون‌گونختن $[L^{-1}]$ ؛ l پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک است که 0.5 در نظر گرفته شد (عباسی، ۱۳۸۶)؛ m و n پارامترهای شکل منحنی مشخصه‌ی خاک؛ θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و رطوبت حجمی باقی‌مانده خاک هستند $[L^3 L^{-3}]$ و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است $[LT^{-1}]$.

هدایت هیدرولیکی لایه اول با روش نفوذ Beerkan (هاورکمپ و همکاران، ۱۹۹۴) و الگوریتم BEST (لاساباتر و همکاران، ۲۰۰۶) تعیین شد. در روش نفوذسنج بیرکن از یک استوانه ساده استفاده شد که در آن یک نمونه خاک به منظور تعیین منحنی دانه‌بندی خاک و رطوبت اولیه برداشت شد و رطوبت اولیه خاک به روش وزنی تعیین شد. همچنین وزن مخصوص ظاهری خاک به روش نمونه دست نخورده تعیین شد.

سپس، استوانه در سطح خاک قرار داده شد و برای حدود ۸-۱۲ سری حجم معین آب، نفوذ تجمعی یادداشت شد. به منظور استخراج هدایت هیدرولیکی سری داده‌های جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل، توزیع اندازه‌ی ذرات، شعاع استوانه، زمان و ارتفاع تجمعی نفوذ به فرمت txt به برنامه‌های توسعه داده شده براساس الگوریتم BEST معرفی شد. سایر پارامترهای ارائه شده در جدول (۲) با استفاده از روش حل معکوس موجود در نرم‌افزار HYDRUS-2D برآورد شد، داده‌های رطوبت در ۱۰ نقطه از نیم‌رخ برای تکرار دوم تیمار دبی پنج لیتر بر ساعت بر متر و مدت زمان آبیاری دو ساعت در ۴۸ ساعت پس از آبیاری همچنین رطوبت اشباع لایه اول خاک به مدل داده شد، مقدار هدایت هیدرولیکی لایه‌ی

جدول ۲- ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله ون گنوختن-معلم

I (-)	K_s (cm day ⁻¹)	n (-)	α (cm ⁻¹)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	
۰/۵	۳/۵۲۸*	۱/۲۹	۰/۰۲۹	۰/۵۲۲	۰/۰۰۵	لایه اول (۰-۲۰cm)
۰/۵	۳/۰۰	۱/۳۸	۰/۰۱۴	۰/۴۸۳	۰/۰۸۹	لایه دوم (۲۰-۴۰cm)
۰/۵	۰/۰۱۸۸۶	۱/۵۵	۰/۰۰۲	۰/۴۷۲	۰/۱۳۰	لایه سوم (۴۰-۶۰cm)

* مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای لایه اول از روش بیرکن به‌دست آمد و سایر مقادیر از روش حل معکوس در نرم‌افزار HYDRUS-2D برآورد شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum |S_i - O_i|}{n} \quad (6)$$

که در آن:

S_i مقدار رطوبت شبیه‌سازی شده در عمق i ؛ O_i مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در عمق i ؛ \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n تعداد اعماق مورد نظر است. برای انجام مقایسات آماری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

جدول ۳- رطوبت اولیه خاک

عمق خاک (cm)	رطوبت اولیه (cm ³ .cm ⁻³)
۰-۲۰	۰/۳۹۴۲
۲۰-۳۰	۰/۳۹۵۹
۳۰-۴۰	۰/۳۹۳۰
۴۰-۵۰	۰/۴۰۷۶
۵۰-۶۰	۰/۴۲۲۲

نتایج و بحث

متر و مدت زمان آبیاری چهار ساعت است که در آن EF برابر با ۷۷ درصد و RMSE برابر با ۰/۰۱۰۸۰ سانتی-مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب به‌دست آمد. میانگین EF برای دبی‌های ۲/۵، پنج و شش لیتر بر ساعت بر متر به ترتیب برابر با ۷۴، ۷۳ و ۶۵ درصد و میانگین RMSE آن‌ها به ترتیب ۰/۰۱۳۲۳، ۰/۰۲۳۳۸ و ۰/۰۱۱۳۳ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب به‌دست آمد. میانگین EF برای زمان‌های آبیاری یک، دو، سه و چهار ساعت به ترتیب برابر با ۷۰، ۷۰، ۷۱ و ۷۱ درصد و میانگین RMSE آن‌ها به ترتیب ۰/۰۱۲۴۳، ۰/۰۱۱۲۲ و ۰/۰۱۲۸۱ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب به‌دست آمد.

قبل از آبیاری، در محلی نزدیک به محل نصب سامانه آبیاری، گودالی به عمق ۶۰ سانتی‌متر حفر شد و مقدار رطوبت اولیه در اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰، ۴۰-۵۰ و ۵۰-۶۰ با دستگاه رطوبت‌سنج قرائت گردید، نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است. برای ارزیابی کارایی مدل، مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده در زیر هر نوار آبیاری مقایسه و نتایج با آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا، RMSE معادله (۴) و ضریب کارایی مدل، EF، بر اساس معادله (۵) (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰) و میانگین خطای مطلق، MAE سنجیده شدند.

نتایج مربوط به مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در کل نیم‌رخ خاک براساس آماره‌های ضریب کارایی مدل (EF) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه و نتایج به‌دست آمده در جدول (۴) نشان داده شده است. بهترین تکرارها مربوط به تکرارهای سوم در دبی پنج لیتر بر ساعت بر متر در زمان‌های آبیاری سه و چهار ساعت بود که ضریب کارایی آن‌ها به ترتیب برابر با ۸۶ و ۸۴ درصد و RMSE آن‌ها به ترتیب ۰/۰۰۹۰ و ۰/۰۰۸۶ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب بود و بهترین تیمار مربوط به دبی پنج لیتر بر ساعت بر

جدول ۴- شاخص‌های RMSE و EF برای تکرار و تیمارهای آزمایش برای کل نپه‌رخ خاک

دبی (lit/hr/m)	زمان آبیاری (hr)	تکرار	RMSE هر تکرار (cm ³ /cm ³)	RMSE هر تیمار ^۱ (cm ³ /cm ³)	EF هر تیمار (%)	EF هر تکرار (%)
۲/۵	۱	۱	۰/۰۱۵۱	۰/۰۱۳۸	۷۳	۷۲
۲/۵	۱	۲	۰/۰۱۱۹	۰/۰۱۳۸	۷۳	۷۳
۲/۵	۱	۳	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۳۸	۷۳	۷۵
۲/۵	۲	۱	۰/۰۱۱۲	۰/۰۱۲۷	۷۸	۸۰
۲/۵	۲	۲	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۲۷	۷۸	۸۱
۲/۵	۲	۳	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۲۷	۷۸	۷۲
۲/۵	۳	۱	۰/۰۰۹۶	۰/۰۱۱۶	۷۷	۸۵
۲/۵	۳	۲	۰/۰۱۴۴	۰/۰۱۱۶	۷۷	۶۵
۲/۵	۳	۳	۰/۰۱۰۸	۰/۰۱۱۶	۷۷	۸۰
۲/۵	۴	۱	۰/۰۱۹۲	۰/۰۱۴۸	۷۰	۶۰
۲/۵	۴	۲	۰/۰۱۳۱	۰/۰۱۴۸	۷۰	۷۶
۲/۵	۴	۳	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۴۸	۷۰	۷۳
۵	۱	۱	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۲۹	۷۲	۶۵
۵	۱	۲	۰/۰۱۱۰	۰/۰۱۲۹	۷۲	۷۰
۵	۱	۳	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۲۹	۷۲	۷۷
۵	۲	۱	۰/۰۱۶۴	۰/۰۱۴۶	۶۶	۶۳
۵	۲	۲	۰/۰۱۳۵	۰/۰۱۴۶	۶۶	۶۷
۵	۲	۳	۰/۰۱۳۹	۰/۰۱۴۶	۶۶	۶۹
۵	۳	۱	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۱۲	۷۶	۷۵
۵	۳	۲	۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۱۲	۷۶	۶۶
۵	۳	۳	۰/۰۰۹۰	۰/۰۱۱۲	۷۶	۸۶
۵	۴	۱	۰/۰۱۲۹	۰/۰۱۰۸	۷۷	۷۵
۵	۴	۲	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۰۸	۷۷	۷۲
۵	۴	۳	۰/۰۰۸۶	۰/۰۱۰۸	۷۷	۸۴
۶	۱	۱	۰/۰۱۰۶	۰/۰۱۰۶	۶۶	۶۶
۶	۱	۲	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱۰۶	۶۶	۶۴
۶	۱	۳	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۰۶	۶۶	۶۷
۶	۲	۱	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۱۱	۶۷	۶۶
۶	۲	۲	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۱۱	۶۷	۷۲
۶	۲	۳	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۱۱	۶۷	۶۴
۶	۳	۱	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۰۹	۶۲	۵۷
۶	۳	۲	۰/۰۱۰۴	۰/۰۱۰۹	۶۲	۶۸
۶	۳	۳	۰/۰۱۱۸	۰/۰۱۰۹	۶۲	۶۱
۶	۴	۱	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۲۸	۶۶	۷۱
۶	۴	۲	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۲۸	۶۶	۶۷
۶	۴	۳	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۲۸	۶۶	۶۱

^۱ با میانگین‌گیری از سه تکرار برآورد شدند

تیپ برای دبی‌های ۲/۵، پنج و شش لیتر بر ساعت بر متر و مدت زمان‌های یک، دو، سه و چهار ساعت در شکل (۳) ارائه شده است. به دلیل تکراری بودن روند تغییرات رطوبت نسبت به عمق در تکرارهای مختلف، نمودار برای یک تکرار از هر تیمار آورده شده است. برای هر سه تکرار شاخص‌های مذکور برآورد شدند که نتایج حاصل از آن در جدول (۵) قابل مشاهده است. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهند که مدل HYDRUS-2D برآورد نسبتاً خوبی داشته است.

در کل محدوده‌ی تغییرات EF در تکرارهای مختلف بین ۵۸-۸۹ درصد و محدوده‌ی RMSE آن‌ها

این نتایج نشان می‌دهد که مدل نسبت به تغییرات زمان آبیاری حساس نیست و در تمام زمان‌های آبیاری کارایی یکسانی داشت اما درکل در دبی‌های ۲/۵ و پنج نسبت به شش لیتر بر ساعت بر متر، به طرز معنی-داری کارایی مدل بالاتر بود ($P < 0.05$).

به‌طورکلی میانگین EF و RMSE برای ۳۶ تکرار، برابر با ۷۱ درصد و ۰/۰۱۲۳ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب به‌دست آمد. برای بررسی روند تغییرات رطوبت نسبت به عمق، زیر تیپ به عنوان نمونه‌ای از کل نپه‌رخ در نظر گرفته شد. نمودارهای مقایسه رطوبت‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نسبت به عمق در زیر هر

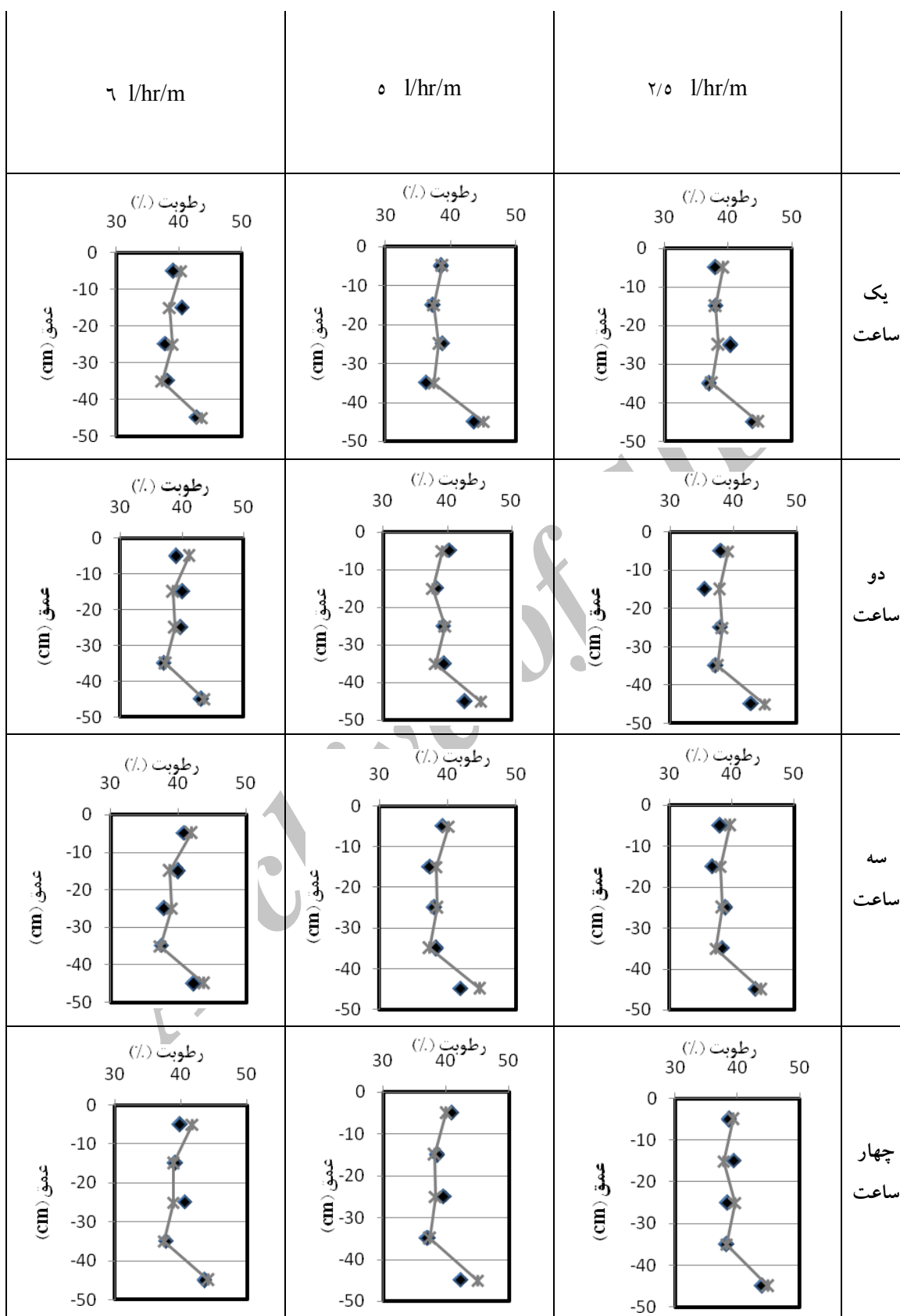
در جدول (۶) ارائه شده است که به طور کلی، با میانگین‌گیری از تمام تکرارها مقدار MAE برابر با ۰/۹۷ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب به‌دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی مقدار رطوبت خاک است.

علت بالا بودن رطوبت در عمق ۵۰-۴۰ سانتی-متری وجود لایه‌ای با نفوذپذیری بسیار کم است که همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع آن برابر با ۰/۱۸۸۶ سانتی‌متر بر روز است. رطوبت اولیه نیز در این لایه زیاد بوده ولی نتایج حاصل نشان می‌دهد که مدل توانسته است مقدار رطوبت لایه‌ی سوم را، با وجود تغییرات شدید پارامترهای هیدرولیکی آن نسبت به لایه‌های اول و دوم، به خوبی شبیه‌سازی نماید.

بین ۰/۱۷۱-۰/۳۳۶ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب متفاوت است و میانگین EF و RMSE به‌ترتیب برابر با ۷۶ درصد و ۰/۲۳۶ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب برآورد شد. شبیه‌سازی مناسب مربوط به دبی پنج لیتر بر ساعت بر متر و مدت زمان آبیاری دو ساعت است که EF این تیمار برابر با ۸۵ درصد و RMSE آن ۰/۱۹۰ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب است. زمان‌های مختلف آبیاری بر ضریب کارایی مدل تاثیر معنی‌داری نداشته‌اند ولی دبی‌های ۲/۵ و پنج با دبی شش لیتر بر ساعت بر متر تاثیر معنی‌داری بر ضریب کارایی مدل داشته‌اند ($P < 0.05$) لذا بهترین شبیه‌سازی براساس آزمون آماری و نیز مقدار RMSE تعیین شد.

نتایج مربوط به میزان انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به اندازه‌گیری شده براساس آماره‌ی MAE،

Archive of SID



شکل ۳- مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری شده (♦) و شبیه‌سازی شده (*) برای یکی از سه تکرار منتخب از هر تیمار

جدول ۵- شاخص‌های RMSE و EF برای تکرار و تیمارهای آزمایش برای زیر تیپ

EF (%) هر تیمار ^۱	EF (%) هر تکرار	هر تیمار ^۱ RMSE (cm ³ /cm ³)	هر تکرار RMSE (cm ³ /cm ³)	تکرار	زمان آبیاری (hr)	دبی (lit/hr/m)
	۸۱		-۰.۲۳۹	۱	۱	۲/۵
۷۷	۷۳	-۰.۲۶۸	-۰.۲۴۸	۲	۱	۲/۵
	۷۶		-۰.۳۱۷	۳	۱	۲/۵
۸۰	۷۳	-۰.۲۶۵	-۰.۲۹۳	۱	۲	۲/۵
	۸۰		۰.۲۸۲	۲	۲	۲/۵
	۸۷		-۰.۲۱۹	۳	۲	۲/۵
۷۰	۷۹	-۰.۲۸۷	-۰.۲۴۷	۱	۳	۲/۵
	۶۷		-۰.۲۷۷	۲	۳	۲/۵
	۶۴		-۰.۳۳۶	۳	۳	۲/۵
۷۷	۷۶	-۰.۲۱۷	-۰.۲۳۸	۱	۴	۲/۵
	۸۸		-۰.۱۷۱	۲	۴	۲/۵
	۶۷		-۰.۲۴۰	۳	۴	۲/۵
۸۴	۸۷	-۰.۲۰۳	-۰.۲۰۱	۱	۱	۵
	۷۷		-۰.۲۱۳	۲	۱	۵
	۸۸		-۰.۱۹۴	۳	۱	۵
۸۵	۸۵	-۰.۱۹۰	-۰.۱۹۹	۱	۲	۵
	۸۷		-۰.۱۸۱	۲	۲	۵
	۸۵		-۰.۱۹۱	۳	۲	۵
۸۱	۸۳	-۰.۲۱۶	-۰.۲۱۴	۱	۳	۵
	۷۳		-۰.۲۵۶	۲	۳	۵
	۸۹		-۰.۱۷۸	۳	۳	۵
۷۹	۸۵	-۰.۲۲۵	-۰.۲۰۶	۱	۴	۵
	۷۶		-۰.۲۳۳	۲	۴	۵
	۷۶		-۰.۲۳۵	۳	۴	۵
۷۱	۸۱	-۰.۲۴۷	-۰.۲۲۰	۱	۱	۶
	۵۸		-۰.۲۷۵	۲	۱	۶
	۷۳		-۰.۲۴۵	۳	۱	۶
۶۶	۶۵	-۰.۲۴۱	-۰.۲۵۹	۱	۲	۶
	۶۱		-۰.۲۶۹	۲	۲	۶
	۷۰		-۰.۱۹۶	۳	۲	۶
۷۱	۷۰	-۰.۲۲۰	-۰.۲۰۹	۱	۳	۶
	۷۵		-۰.۱۹۹	۲	۳	۶
	۶۹		-۰.۲۵۱	۳	۳	۶
۷۳	۷۲	-۰.۲۴۸	-۰.۲۶۹	۱	۴	۶
	۶۰		-۰.۲۷۶	۲	۴	۶
	۸۶		-۰.۲۰۰	۳	۴	۶

^۱ با میانگین‌گیری از سه تکرار برآورد شدند

جدول ۶- شاخص‌های MAE برای تیمارهای آزمایش برای کل نیم‌رخ خاک

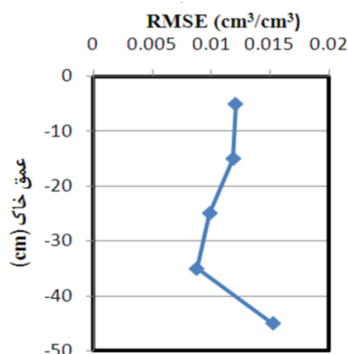
MAE هر تیمار ^۱ (cm ³ /cm ³)	زمان آبیاری (hr)	دبی (lit/hr/m)
۱/۰۱	۱	۲/۵
۱/۰۵	۲	۲/۵
۰/۹۵	۳	۲/۵
۱/۱۴	۴	۲/۵
۰/۹۱	۱	۵
۱/۰۶	۲	۵
۰/۸۸	۳	۵
۰/۸۵	۴	۵
۰/۹۰	۱	۶
۰/۹۲	۲	۶
۰/۹۱	۳	۶
۱/۰۴	۴	۶

^۱ با میانگین‌گیری از سه تکرار برآورد شدند

منظور بررسی توزیع آب در اطراف یک قطره‌چکان و در عمق‌های مختلف در یک خاک لومی رسی استفاده نمودند و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی و صحرائی با شاخص RMSE با یکدیگر مقایسه کردند. مقادیر RMSE برای موقعیت‌های مختلف بین ۰/۱۱ تا ۰/۴۵ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب برای مقادیر رطوبت و بین ۰/۹۸ تا ۴/۳۶ سانتی‌متر برای ابعاد جبهه رطوبتی متفاوت بود. بر این اساس نتیجه گرفته شد که مطابقت مقادیر به‌دست آمده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری بسیار خوب است.

مقایسه مقادیر برای اعماق مختلف خاک نیز نشان داده است شکل (۴) که بیشترین مقدار RMSE برای لایه ۵۰-۴۰ سانتی‌متری به‌دست آمده است که در واقع می‌توان آن را ناشی از هدایت هیدرولیکی کم آن دانست. در لایه اول به دلیل وجود سنگ‌های ریزه‌های پراکنده در خاک، ناهمگنی بیشتر از لایه‌ی میانی است و از آنجا که خاک لایه‌ی دوم همگن‌تر است، مقادیر آن نسبت به لایه‌ی اول بهتر برآورد شده‌اند.

نتایج پژوهش‌های مختلف عملکرد مدل را برای بافت خاک سبک و متوسط تأیید کرده‌اند. کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰b)، از مدل عددی HYDRUS-2D به-



شکل ۴- مقایسه‌ی میزان خطای ایجاد شده بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در اعماق مختلف

سیال و اسکاگز (۲۰۰۹) الگوی خیس‌شدگی حاصل از آبیاری زیرسطحی با لوله‌های رسی متخلخل در خاک‌هایی با بافت سبک و متوسط را اندازه‌گیری و با

استفاده از مدل HYDRUS شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که مدل مقادیر رطوبت را با ضریب کارایی ۹۸ درصد و میانگین RMSE برابر ۰/۱۲ به خوبی

مقادیر رطوبتی را برای بافت خاک سیلتی رسی و ناهمگن به خوبی شبیه‌سازی کند. خطای دستگاه رطوبت‌سنج، ناهمگنی زمین، ایجاد حالت ناپایدار در حل عددی در مقادیر رطوبت‌های بالاتر از ظرفیت زراعی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل ایجاد اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در این پژوهش بود.

با توجه به رواج سامانه آبیاری قطره‌ای در استان گیلان که دارای بافت خاک سنگین است، پیشنهاد می‌شود قبل از طراحی سامانه، عملکرد سامانه آبیاری با این مدل سنجیده شود و سپس نسبت به اجرای سامانه اقدام شود. برای مدیریت بهینه سامانه آبیاری، بهتر است مدیریت‌های مختلف از جمله دوره‌های آبیاری و یا مدت زمان‌های آبیاری مختلف با استفاده از این مدل ارزیابی شوند و بهترین مدیریت سامانه با هدف کاهش تلفات آب و افزایش بهره‌وری آن انتخاب شود.

شبیه‌سازی کرده است. در این پژوهش نیز میانگین مقدار RMSE به‌دست آمده برای کل نیم‌رخ خاک و زیر تیپ به ترتیب ۰/۰۱۲۳ و ۰/۰۲۳۶ سانتی‌مترمکعب بر سانتی‌مترمکعب است که در محدوده ارائه شده توسط سیال و اسکاگز (۲۰۰۹) و کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰b) می‌باشد که نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک در بافت سنگین در شرایط مزرعه‌ای است.

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی مقادیر رطوبت در الگوی رطوبتی ایجاد شده آبیاری قطره‌ای نواری در شرایط مزرعه‌ای دارای بافت خاک سنگین بود. با مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از آماره‌های EF و RMSE هم در زیر تیپ و هم در کل نیم‌رخ خاک، مشاهده شد که این مدل قادر است

فهرست منابع

- عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. ۲۵۰ صفحه.
- عباسی، ف. و ف. تاجیک. ۱۳۸۶. برآورد هم‌زمان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به روش حل معکوس در مقیاس مزرعه. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال یازدهم، شماره اول (الف)، صفحه: ۱۱۱-۱۲۲.
- علیزاده، ا. ۱۳۷۲. اصول طراحی سیستم‌های آبیاری. انتشارات آستان قدس رضوی. ۴۵۰ صفحه.
- علیزاده، ا. ۱۳۷۶. اصول و عملیات آبیاری قطره‌ای. انتشارات آستان قدس رضوی. ۴۴۱ صفحه.
- کندلوس م، ع. م. لیاقت و ف. عباسی. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی پیاز رطوبتی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با استفاده از مدل HYDRUS-2D. دومین کارگاه فنی خرد آبیاری. ۲ خرداد. کرج.
- مصطفی زاده، ب. س. ف. موسوی و م. ح. شریف بیان الحق. ۱۳۷۷. پیشروی جبهه رطوبتی از منبع نقطه ای در سطوح شیبدار. نشریه کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۲، شماره ۴، صفحه: ۱۳-۲۲.
- Anonymous. 2012. Chaharmahal and Bakhtiari Meteorological Administration. (in site:www.chaharmahalmet.ir, 1/12/2012)
- Boivin, A., J. Simunek, M. Schiavon and M. Th. van Genuchten. 2006. Comparison of pesticide transport processes in three tile-drained field soils using HYDRUS-2D. Vadose Zone Journal 5: 838-849.
- Cook, F. J., P. J. Thorburn, P. Fitch and K. L. Bristow. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. Irrigation Science. 22: 129-134.

10. Cook, F. J., P. Fitch, P. J. Thorburn, P. B. Charlesworth and L. Keith. 2006. Modelling Trickle Irrigation: Comparison of Analytical and Numerical Models For Estimation of Wetting Front Position with Time. *Environmental Modeling & Software*. 21: 1353-1359.
11. Haverkamp, R., P. J. Ross, K. R. J. Smetten and J. V. Parlange. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resour. Resear.* 30: 2931-2935.
12. Kandelous M. M., A. Liaghat and F. Abbasi. 2008. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. *Journal of Agriculture Science*, 39(2): 371–378.
13. Kandelous, M. M. and J. Simunek. 2010a. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 28: 435-444.
14. Kandelous, M. M. and J. Simunek. 2010b. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*. 97: 1070–1076.
15. Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. SoriaUgalde, R. Cuenca, I. Braud and R. Haverkamp. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments-BEST. *Soil Science Society America Journal*. 70: 521–532.
16. Maroufpoor, E., S. Emamgholizadeh, H. Torabi and M. Behzadinasab. 2009. Impact of soil texture on the calibration of TDR for water content measurement. *Applied Science Journal*. 9(16): 2933-2940.
17. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 12: 513–522.
18. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 282–290.
19. Radcliffe, D.E. and J. Simunek. 2010. *Soil physics with HYDRUS modeling and applications*. CRC press. Taylor and Francis Group. pp 373.
20. Roberts, T. L., S. A. White, A. W. Warrick and T. L. Thompson. 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 95: 669–677.
21. Sepaskhah, A. R. and H. Chitsaz. 2004. Validating the Green-Ampt analysis of wetted radius and depth in trickleirrigation. *Biosystems Engineering* 89(2): 231.236.
22. Simunek, J., M. Sejna and M. Th. van Genuchten. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. IGWMC-TPS 53, Version 2.0, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
23. Siyal, A. A. and T. H. Skaggs. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management* 96: 669–677.
24. Skaggs, T.H., T. J. Trout, J. Simunek and P. J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130(4): 304–310.