

شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک با مدل HYDRUS-2D از منبع تغذیه خطی با شوری‌های متفاوت آب آبیاری و مقایسه با مشاهدات میدانی

فیروزه جوادزاده شاخالی^۱، محمدرضا خالدیان^{۱*}، مریم نواییان^۱ و پریسا شاهین‌رخسار^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۹/۱۵)

چکیده

رطوبت خاک از پارامترهای اصلی ورودی در بسیاری از مدل‌های پایش و پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی است. توانایی مدل‌های ریاضی، بهره‌برداری درست از آب‌های شور و انتخاب گزینه‌های مدیریتی را امکان‌پذیر نموده است. هدف این مطالعه، بررسی کارایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک تحت شرایط میدانی برای خاکی با بافت سنگین ناهمگن بود. سه حجم آبیاری ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر و سه سطح شوری آب ۱/۲۷۹، ۲/۵ و ۵ (dSm⁻¹) در سه تکرار در یک سامانه آبیاری قطره‌ای نواری اعمال شد. به‌منظور پایش رطوبت، نیم‌رخ خاک تا عمق ۴۰ سانتی‌متری حفر و دیواره عمود بر نوار آبیاری قطره‌ای شبکه‌بندی شد. رطوبت حجمی توسط رطوبت‌سنج (TDR) مدل MiniTrase kit ۶۰۵۰X۳K\B اندازه‌گیری و مقادیر رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی، توسط آماره‌های nRMSE و CRM مقایسه شدند. نتایج نشان داد که میانگین توزیع رطوبت توسط آبیاری با شوری‌های مختلف در محدوده ظرفیت زراعی است. مقادیر nRMSE برای تکرارهای مختلف از ۰/۹۱ تا ۲/۰۷ درصد متغیر بود. براساس مقادیر nRMSE، شبیه‌سازی رطوبت در رده‌ی عالی طبقه‌بندی شد. شاخص CRM نیز در محدوده ۰/۰۰۸۰- تا ۰/۰۱۷۰ به‌دست آمد که مقدار بسیار کمی است. نتایج این دو آماره نشان‌دهنده توانمندی بالای مدل در شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک با استفاده از برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی خاک، بیرکن، حل معکوس، HYDRUS-2D

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی، رشت

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khaledian@guilan.ac.ir

مقدمه

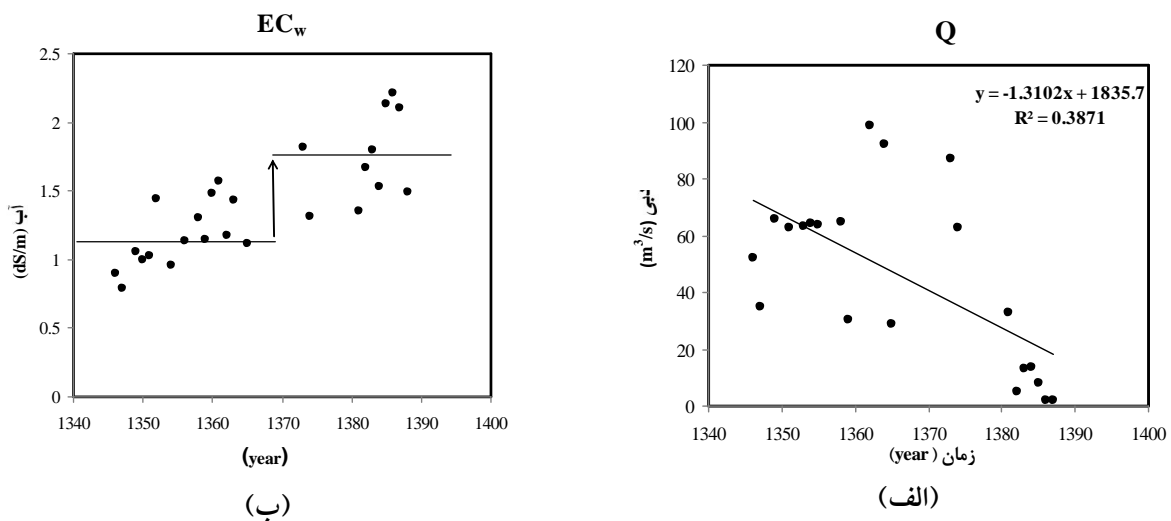
امروزه، با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیازها، پیشرفت فناوری و توسعه کشاورزی، نیاز به آب افزایش یافته است. این درحالی است که منابع آب در حال کاهش بوده و تأمین آب مورد نیاز مشکل می‌باشد. در نواحی با مشکل کمبود منابع آب، امکان دسترسی به منابع آب با کیفیت مناسب وجود ندارد. لذا، در چنین مناطقی آب‌های شور به‌عنوان یک منبع مناسب تلقی می‌شوند. از سوی دیگر، در آینده‌ای نه‌چندان دور، ممکن است مشکل شور شدن منابع فیزیکی تولید در بخش کشاورزی (به‌عنوان کلان‌ترین مصرف کننده آب) ابعاد اقتصادی و اجتماعی را در جوامع کشاورزی و روستایی با تنگناهای ویژه‌ای روبرو کند (۲). استفاده از سامانه‌های آبیاری با راندمان زیاد، نظیر آبیاری قطره‌ای، به سبب کاهش تلفاتی نظیر تبخیر سطحی و نفوذ عمقی به‌عنوان راهکاری برای مقابله با این مشکل توصیه شده است (۱۴). طراحی آبیاری قطره‌ای باید به گونه‌ای انجام گیرد که آب و مواد غذایی در محیط ریشه در سراسر مزرعه به‌طور یکنواخت توزیع گردد.

یکی از عوامل محیطی محدودکننده تولید محصولات کشاورزی، شوری است. اگر آب آبیاری دارای املاح زیادی باشد، غلظت محلول آب خاک افزایش خواهد یافت و جذب آب توسط گیاه دشوار می‌گردد (۱۱). با توجه به این‌که آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین مدیریت‌های مختلف آبیاری با آب شور مفید است، اما به سبب محدودیت‌های اجرایی این آزمایش‌ها، استفاده از مدل‌ها در پیش‌بینی حرکت آب در خاک توصیه شده است که می‌تواند موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه گردد. پیشرفت‌های زیادی در درک و توصیف ریاضی جریان آب و انتقال مواد محلول در منطقه غیراشباع مشاهده شده است. بسیاری از محققین الگوی پخش آب در خاک را اندازه‌گیری کرده و یا به‌صورت عددی شبیه‌سازی نموده‌اند (۸ و ۱۸). مدل HYDRUS-2D (۱۶) بسته نرم‌افزاری است که قادر است به‌صورت عددی، حرکت آب، انتقال املاح و گرما را در شرایط دو بعدی شبیه‌سازی کند. یکی از پارامترهای ورودی این

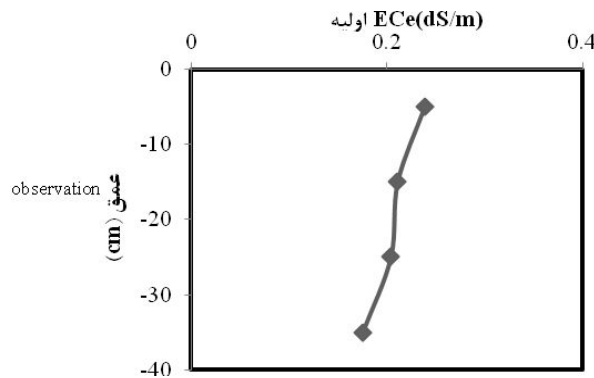
مدل، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) است. از آنجایی که نمونه خاک انتقال یافته به آزمایشگاه ممکن است نماینده دقیقی از شرایط مزرعه نباشد، روش‌های صحرایی اندازه‌گیری این پارامتر از مزایای بیشتری نسبت به روش‌های آزمایشگاهی برخوردارند. یکی از روش‌های اندازه‌گیری صحرایی هدایت هیدرولیکی اشباع، روش بیرکن است که توسط محققینی نظیر خالدیان و همکاران (۴) مورد استفاده قرار گرفته است.

بر اساس آمار ایستگاه هیدرومتری منجیل در پایین‌دست سد سفیدرود و با توجه به خشکسالی‌های اخیر در حوضه بالادست سفیدرود، شوری آب در سال‌های اخیر افزایش یافته است (۱). همان‌طور که در شکل ۱ (الف) ملاحظه می‌شود، دبی سیر نزولی را طی می‌کند و با این روند در سال ۱۴۰۰ به حدود (s^{-1}) $1/42 m^3$ خواهد رسید و در کنار کاهش آورد رودخانه شوری آب در حال افزایش است. هم‌چنین شکل ۲ نمودار توزیع شوری عصاره اشباع خاک نسبت به عمق خاک را نشان می‌دهد. از آنجا که احتمال افت عملکرد محصولات آبیاری شده از جمله باغ‌های زیتون رودبار وجود دارد؛ لذا یافتن مدیریت آبیاری مناسب با کاربرد آب شور و لب‌شور ضروری است. یکی از ابزارهای مناسب برای مطالعه مدیریت‌های مختلف آبیاری استفاده از مدل‌هاست.

زمانی پیش‌بینی مدل‌ها مفید و کاربردی خواهد بود که دقت برآورد آنها ارزیابی شده باشد. به سبب پیچیدگی‌های ذاتی ناشی از ناهمگنی خاک در مقیاس مزرعه‌ای، عمده پژوهش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و حالت ماندگار بوده است. لذا در این پژوهش مزرعه‌ای، مقادیر رطوبت حجمی خاک توسط آبیاری با شوری‌های متفاوت با مدل HYDRUS-2D از طریق حل معکوس شبیه‌سازی شد و با مقادیر واقعی رطوبت حجمی حاصل از آبیاری با منبع خطی در خاک دارای بافت سنگین ناهمگن و شرایط غیرماندگار مقایسه گردید و عملکرد مدل ارزیابی شد. در صورت تأیید امکان‌پذیری کاربرد مدل، بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های متوالی رطوبت در عمق‌ها و زمان‌های مختلف، می‌توان از میزان رطوبت یا حتی روند آبشویی اطلاع



شکل ۱. نمودار حاصل از آمار ایستگاه هیدرومتری منجیل: الف) دبی، ب) شوری



شکل ۲. نمودار مربوط به توزیع شوری عصاره اشباع خاک (ECe) نسبت به عمق

مکعب به دست آمد.

برای به دست آوردن (K_s)، از نفوذسنج بیرکن استفاده شد. یک نمونه خاک به منظور تعیین منحنی دانه بندی خاک و رطوبت اولیه برداشت شد. جرم مخصوص ظاهری خاک به روش نمونه دست نخورده تعیین گردید. برای جلوگیری از نفوذ جانبی، تک استوانه بیرکن تا عمق حدود یک سانتی متر در سطح خاک کوبیده شد (۷). زمانی که نخستین حجم آب اضافه شده به طور کامل در خاک نفوذ کرد، دومین حجم مشخص آب به استوانه اضافه و زمان لازم یادداشت شد. این کار ادامه یافت تا زمان نفوذ سه حجم متوالی یکسان شود. به دلیل عدم دسترسی به نرم افزار BEST (۹)،

حاصل نمود و نتایج این پژوهش می تواند منجر به امکان سنجی طراحی و مدیریت سامانه های آبیاری به ویژه آبیاری نواری با استفاده از مدل مربوطه در خاک های لایه دار و دارای بافت سنگین شود.

مواد و روش ها

تحقیق حاضر در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گیلان انجام شد. بافت خاک برای دو عمق صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری بیانگر بافت رس سیلتی و جرم مخصوص ظاهری برای دو عمق به ترتیب ۱/۵۸ و ۱/۵۵ گرم بر سانتی متر

که در آن، Y مقدار رطوبت حجمی واقعی و X مقدار رطوبت حجمی قرائت شده توسط دستگاه رطوبت سنج است.

حل دقیق و تحلیلی معادلات جریان آب در محیط غیراشباع، در اکثر موارد امکان پذیر نمی باشد. مدل HYDRUS-2D (۱۶) بسته نرم افزاری است که قادر به برآورد ویژگی های هیدرولیکی خاک و یا پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس می باشد. در این مدل، معادله حرکت آب بر مبنای حل معادله ی دو بعدی ریچاردز صورت می گیرد (رابطه ۲):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K(h) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h)) \quad [2]$$

که رطوبت حجمی خاک ($L^3 L^{-3}$)، t زمان (T)، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (L)، x محور افقی، z محور عمودی (رو به بالا مثبت) (L) و $K(h)$ هدایت هیدرولیکی (LT^{-1}) می باشد. برای بیان ویژگی های هیدرولیکی خاک در نرم افزار HYDRUS-2D، از مدل ون گنوختن - معلم و برای هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک از مدل کاپیلاری معلم استفاده شد. حوزه شبیه سازی شامل مقطع خیس شده تحت یک نوار آبیاری با بعد افقی ۴۵ سانتی متر و بعد عمودی ۴۰ سانتی متر در نظر گرفته شد و یک سمت از محدوده جریان با فرض متقارن بودن شبیه سازی شد. برای مدل سازی، مقادیر رطوبت اولیه با دستگاه TDR قرائت شد و پس از واسنجی توسط رابطه (۱) به مدل تعریف شد. با توجه به این که شعاع تیپ ۷ میلی متر بود، مقدار شار جریان (q) از رابطه (۳) محاسبه شد (۱۸) که در آن، Q شدت جریان تیپ و A مساحت سطحی تیپ می باشد.

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{5 \times 10^{-3} m^3 h^{-1}}{2\pi(0.007m)(1m)} = 0.1137 mh^{-1} \quad [3]$$

برای شبیه سازی رطوبت، پارامترهای هیدرولیکی خاک برای هر دو لایه خاک توسط روش حل معکوس برآورد شدند. به این صورت که فرض اولیه براساس Rosetta به مدل تعریف شد؛ حتی شبیه سازی مستقیم نیز با این فرض توسط نرم افزار انجام گردید؛ اما با توجه به این که خروجی های حاصل از این فرض، با مقادیر رطوبت حجمی حاصل از آزمایش میدانی

براساس الگوریتم مورد استفاده آن، سه برنامه در محیط فرترن نوشته شد که به منظور استخراج K_s از آنها استفاده گردید. کارایی این برنامه ها کاملاً مشابه نرم افزار BEST می باشد (۱۰).

برای دستیابی به هدف پژوهش، عملیات خاک ورزی و آماده سازی زمین صورت گرفت. از آبیاری قطره ای نواری به عنوان منبع خطی استفاده شد. دبی خروجی پنج لیتر بر ساعت بر متر برای هر تیپ واسنجی شد و با اعمال زمان های آبیاری ۲، ۳ و ۴ ساعت، حجم های آبیاری ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر به دست آمد. برای هر حجم نیز شوری های ۱/۲۷۹، ۲/۵ و ۵ (dSm^{-1}) در سه تکرار اعمال شد. شوری آب در محل آزمایش ۱/۲۷۹ (dSm^{-1}) بود که به عنوان تیمار آب معمولی معرفی می گردد. مقدار نمک تزریق شده برای رسیدن به شوری مورد نظر از رابطه $TDS = 640 \times EC$ که در آن TDS جرم نمک مورد نیاز در واحد حجم (mgL^{-1}) و EC هدایت الکتریکی (dSm^{-1}) می باشد، به دست آمد (۱۵). پس از اتمام هر آبیاری، به منظور جلوگیری از تبخیر آب، سطح خاک با صفحات پلاستیکی پوشانده شد. به منظور پایش توزیع رطوبت، ۴۸ ساعت پس از هر آبیاری، زیر هر تیپ، شبکه بندی با ابعاد 10×10 سانتی متر ایجاد شد و توسط TDR رطوبت خاک قرائت گردید. مدل دستگاه $6050 \times X3K1B$ MiniTrase kit، این دستگاه شامل دستگاه مرکزی، هدایت گر طول موج (که به دستگاه مرکزی متصل می شد)، میله موج بر (متصل به هدایت گر طول موج) و دستگاه قرائت کننده (PALM) که مقادیر درصد رطوبت حجمی خاک را به طور مستقیم نشان می داد.

معروف پور و همکاران (۱۰)، مشاهده نمودند که با افزایش میزان رس، دستگاه TDR، رطوبت خاک را کمتر از مقدار واقعی تخمین می زند. از آن جا که بافت خاک محل آزمایش دارای درصد رس قابل توجهی بود (برای لایه های اول و دوم به ترتیب ۴۹ و ۵۳ درصد)، مقادیر حاصل از اندازه گیری واسنجی گردید و رابطه (۱) با ضریب تبیین ۰/۹۸ به دست آمد.

$$y = 0.00189x^3 - 0.21153x^2 + 8.17513x - 66.54849 \quad [1]$$

جدول ۱. نتایج برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله ون‌گنوختن - معلم توسط حل معکوس

Ks (cm.day ⁻¹)	n-Mualem (-)	(cm ⁻¹)	s (cm ³ .cm ⁻³)	r (cm ³ .cm ⁻³)	ECw (dSm ⁻¹)	لایه خاک
۳/۵۲۸	۱/۳۲۸	۰/۰۱۳۶۸	۰/۵۲۱۵	۰/۰۱۳۶۲	۱/۲۷۹	۰-۲۰ cm
۲/۷۷۰	۱/۳۵۰	۰/۰۱۰۱۶	۰/۴۶۸۲	۰/۰۹۸۳۹	۱/۲۷۹	۲۰-۴۰ cm
۳/۲۰۶	۱/۴۱۳	۰/۰۱۱۹۲	۰/۵۲۱۵	۰/۰۱۳۶۲	۲/۵	۰-۲۰ cm
۲/۶۲۰	۱/۴۷۰	۰/۰۱۰۱۶	۰/۴۶۸۲	۰/۰۹۸۳۹	۲/۵	۲۰-۴۰ cm
۳/۰۰۷	۱/۷۳۴	۰/۰۱۳۷۶	۰/۵۲۱۵	۰/۰۱۵۲۲	۵/۰	۰-۲۰ cm
۲/۵۲۰	۱/۶۹۹	۰/۰۱۰۱۶	۰/۴۶۸۲	۰/۰۹۸۳۹	۵/۰	۲۰-۴۰ cm

رطوبت خاک تا عمق ۴۰ سانتی‌متری و از یک حجم مشخص، پارامترهای هیدرولیکی خاک تخمین زده شدند. مقادیر رطوبت با لحاظ ضریب وزن‌دهی ۱ و مقدار رطوبت حجمی اشباع که در آزمایشگاه به دست آمد با لحاظ ضریب وزن‌دهی ۱۰ به عنوان نقاط کنترل به مدل HYDRUS-2D وارد شد (۱۳). سپس با استفاده از داده‌های برآورد شده از طریق حل معکوس، برای هر شوری از مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده حجم‌های مختلف به‌عنوان اعتبارسنجی استفاده گردید. برای ارزیابی مدل از آماره‌های درصد خطا nRMSE و ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) استفاده شد. اگر nRMSE کمتر از ۱۰٪ باشد، نشان‌دهنده شبیه‌سازی عالی مدل، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد شبیه‌سازی خوب، ۲۰ تا ۳۰ درصد شبیه‌سازی متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهنده ضعیف بودن شبیه‌سازی می‌باشد (۶). شاخص CRM بیانگر تمایل شبیه‌سازی برای بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد، در مقایسه با مشاهدات، است.

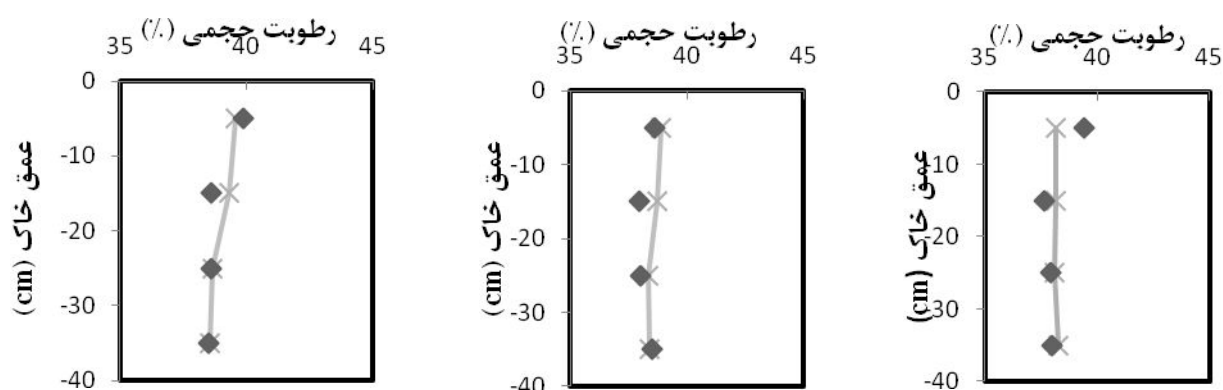
$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad [4]$$

$$CRM = \frac{[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i]}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [5]$$

نتایج و بحث

نتایج پارامترهای هیدرولیکی خاک و پارامترهای معادله ون‌گنوختن در جدول ۱ نشان داده شده است. s و r به ترتیب

تفاوت مشهودی داشت و با توجه به این که مدل Rosetta، براساس بافت خاک پارامترهای هیدرولیکی خاک را تخمین می‌زند؛ بنابراین قادر است شرایط آزمایشگاهی را به‌خوبی بیان کند، اما برای بیان شرایط خاک دست‌نخورده مزرعه، حل معکوس مناسب‌تر است (۸). تعداد پارامترهای تخمینی زیاد بود. در گام اول، همه مجهولات توسط مدل پیش‌بینی شدند. در گام دوم، از مقادیر خروجی گام اول به‌عنوان فرض اولیه مدل استفاده شد. تفاوت آن با گام اول، در تخمین داده‌ها به‌صورت لایه به لایه بود. علی‌رغم اینکه هدایت هیدرولیکی اشباع در مدل دارای حساسیت بالایی است و با توجه به این مسئله این پارامتر توسط روش صحرایی بیرکن محاسبه شد؛ اما با توجه به این که برای مقادیر n و r داده آزمایشگاهی یا صحرایی در دسترس نبود و ضمن اینکه احتمال تأثیر شوری آب آبیاری روی این پارامترها وجود داشت؛ بنابراین برای آب معمولی، تمام پارامترها، بجز رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی لایه اول، جزو موارد تخمینی بود. اما برای دو شوری دیگر، همه مقادیر، بجز رطوبت اشباع لایه اول و دوم، رطوبت باقی‌مانده و لایه دوم برآورد شدند. زیرا در گام نخست، برآورد پارامترها نزدیک به پارامترهای آب معمولی به‌دست آمد. همچنین، گاه تغییر مقدار یک پارامتر، تأثیر ناچیزی بر مقدار تابع هدف داشت و سبب می‌شد که سایر پارامترهای بردار مجهولات به‌درستی برآورد نشوند و یا طولانی شدن محاسبات را سبب شود. در این پژوهش، توسط داده‌های اندازه‌گیری شده



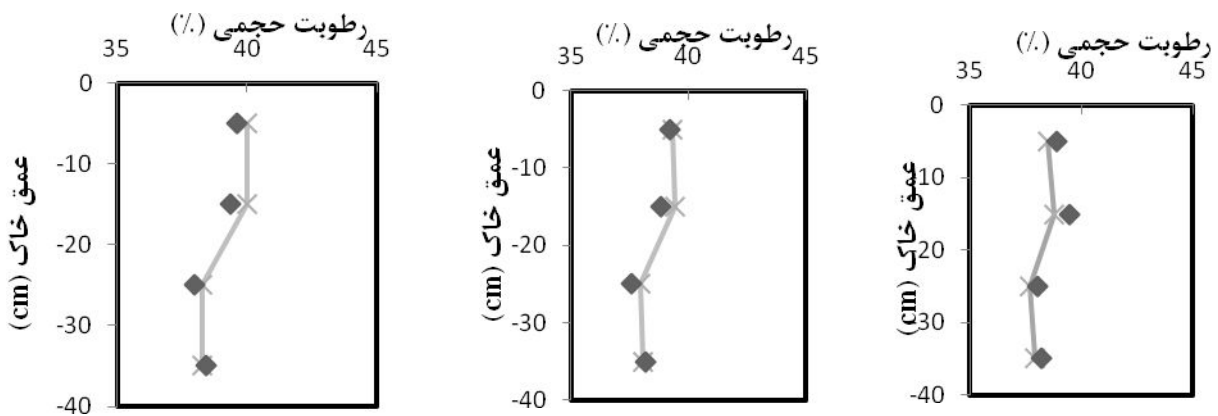
شکل ۳. مقایسهٔ رطوبت اندازه‌گیری شده (◆) و شبیه‌سازی شده (×) برای حجم‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر و شوری ۱/۲۷۹ دسی‌زیمنس بر متر

و فرج خاک است که در این پژوهش ۵٪ در نظر گرفته شد (۵). نمودارهای مقایسهٔ مقادیر رطوبت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای اعماق صفر تا ۴۰ سانتی‌متری در شکل‌های ۳ تا ۵ آورده شده است. نمودارها برای زیر تیپ می‌باشد. و به ترتیب از راست به چپ برای حجم‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر است.

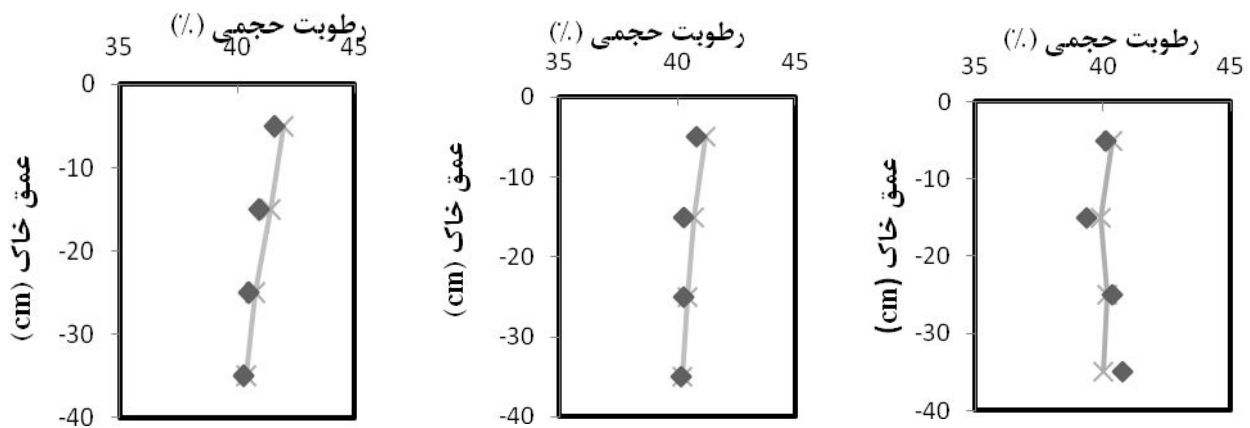
همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند، مدل در پاره‌ای موارد بیش‌برآورد و گاه کم‌برآورد داشته است. یکی از عوامل تغییر در برآورد مدل می‌تواند تغییرات مکانی و ناهمگنی موجود در ساختمان خاک محل آزمایش باشد. وجود عواملی نظیر سنگ، مواد آلی و ریشه درختان سبب این تغییرات و ایجاد جریان ترجیحی در خاک می‌شود. در واقع طی فرایند جریان ترجیحی، آب و املاح در مسیرهای معین از طریق مجاری فرعی قسمتی از محیط متخلخل حرکت می‌کنند (۱۷). عامل دیگر وجود اختلافات می‌تواند به این دلیل باشد که مقدار رطوبت اولیه در نقطه‌ای خاص، کمی بیشتر و یا کمتر از مقدار رطوبت ورودی به مدل بوده باشد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان‌دهندهٔ تأثیر ساختمان خاک در نحوهٔ توزیع رطوبت در خاک است. محدودهٔ میانگین توزیع رطوبت توسط آبیاری با شوری‌های مختلف بین ۳۰ تا ۴۰ درصد یعنی در محدوده رطوبت ظرفیت زراعی خاک‌های رس‌سیلتی می‌باشد. براین اساس، سامانهٔ آبیاری قطره‌ای نواری در شرایط محدودیت منابع آب با کیفیت مناسب، می‌تواند رطوبت مطلوب برای گیاه را فراهم نماید.

رطوبت حجمی اشباع و باقی‌مانده در خاک، عکس ارتفاع موئینه در مدل ون‌گنوختن، n پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک هستند.

نتایج برآورد حل معکوس بیانگر هدایت هیدرولیکی بیشتر لایه اول خاک نسبت به لایه دوم در هر سه تیمار است که با توجه به زیاد بودن درصد رس در لایهٔ دوم (۵۶ درصد در مقایسه با ۴۹ درصد لایه اول) و خاک‌ورزی لایه سطحی خاک منطقی به نظر می‌رسد. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع برای آب معمولی توسط روش صحرایی بیرکن که مقدار هدایت هیدرولیکی خاک را تنها برای لایه سطحی خاک می‌تواند برآورد کند (۱۲)، به‌دست آمد. نتایج آزمایش، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع را $3/528 \text{ (cm}^2\text{d}^{-1}\text{)}$ نشان داد و مقدار این پارامتر برای شوری‌های دیگر توسط رویکرد حل معکوس اندکی کمتر از روش بیرکن برآورد شد. پارامتر نشان‌دهنده روابط بین پتانسیل ثقلی و موئینگی است و کوچک بودن آن بیانگر برتری پتانسیل موئینگی بر پتانسیل ثقلی است. مقدار رطوبت باقی‌مانده (r) در شوری آب آبیاری ۵ دسی‌زیمنس بر متر افزایش داشته است که این تفاوت می‌تواند به سبب افزایش شوری خاک باشد که موجب از بین رفتن کلویدهای رسی و متورم شدن خاک می‌شود (۵ و ۱۱). لذا ذرات خاک ریزتر شده، سطح ویژه آنها افزایش می‌یابد و قادر خواهند بود آب بیشتری جذب نمایند. پارامتر تجربی ۱ مربوط به پیوستگی خلل



شکل ۴. مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده (♦) و شبیه‌سازی شده (×) برای حجم ۲۰ و ۱۵ و ۱۰ لیتر و شوری ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر



شکل ۵. مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده (♦) و شبیه‌سازی شده (×) برای حجم ۲۰ و ۱۵ و ۱۰ لیتر و شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر

اندازه‌گیری بسیار خوب است. در مطالعه حاضر، برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده رطوبت، از آماره nRMSE استفاده شده که براساس طبقه‌بندی بنیان و هوگنوم (۶)، شبیه‌سازی مدل در رده عالی قرار می‌گیرد. با وجود اینکه خاک مورد مطالعه در این تحقیق یک بافت لایه و سنگین‌تر نسبت به مطالعه کندلوس و سیمونک (۸) بود، و در خاک‌های لایه لایه، به‌طور معمول تغییرات رطوبت بین لایه‌ها پیوسته نیست و اغلب سبب ناپایداری در حل عددی می‌شود (۵)، با این وجود مدل توانست با کیفیت قابل قبولی شبیه‌سازی رطوبت را انجام دهد.

نتایج مقادیر خطای مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، با استفاده از آماره‌های nRMSE و CRM در جدول ۲ ارائه شده است. طبق این جدول، مقادیر nRMSE برای تکرارهای مختلف از ۰/۹۱ تا ۲/۰۷ درصد متغیر بود. مقدار CRM تیمارها نیز در محدوده ۰/۰۸۰ تا ۰/۰۱۷۰ است که در مجموع، مقادیر آماره‌ها عملکرد مناسب مدل را در این نوع بافت خاک تأیید می‌کنند. کندلوس و سیمونک (۸) از مدل عددی HYDRUS-2D برای بررسی توزیع آب در اطراف یک قطره‌چکان و در یک خاک لوم رسی استفاده کردند و مقدار RMSE را بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۴۵ (cm^۳ cm^{-۳}) به‌دست آوردند. براین اساس، نتیجه گرفتند که مطابقت مقادیر به‌دست آمده از شبیه‌سازی و

جدول ۲. نتایج مقایسه خطاهای مقادیر رطوبت شبیه‌سازی شده نسبت به اندازه‌گیری شده یک سمت از نیم‌رخ خاک

CRM	CRM	nRMSE	nRMSE	شوری	تکرار	حجم
در هر تکرار	در هر تکرار	در هر تکرار (%)	در هر تکرار (%)	(dSm ⁻¹)	(-)	(lit)
	-۰/۰۰۸۰		۱/۶۲	۱/۲۷۹	۱	۱۰
-۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۰	۱/۶۴	۱/۴۴	۱/۲۷۹	۲	۱۰
	۰/۰۰۴۰		۱/۸۵	۱/۲۷۹	۳	۱۰
	-۰/۰۰۶۰		۱/۱۶	۱/۲۷۹	۱	۱۵
-۰/۰۰۲	۰/۰۰۴۰	۱/۴۱	۱/۲۸	۱/۲۷۹	۲	۱۵
	-۰/۰۰۳۰		۱/۷۸	۱/۲۷۹	۳	۱۵
	۰/۰۰۵۰		۰/۹۳	۱/۲۷۹	۱	۲۰
۰/۰۰۵	۰/۰۰۴۰	۱/۳۵	۱/۲۵	۱/۲۷۹	۲	۲۰
	۰/۰۰۷۰		۱/۸۷	۱/۲۷۹	۳	۲۰
	۰/۰۰۷۰		۱/۶۴	۲/۵۰۰	۱	۱۰
۰/۰۰۴	۰/۰۰۲۰	۱/۶۴	۱/۸۶	۲/۵۰۰	۲	۱۰
	۰/۰۰۵۰		۱/۴۲	۲/۵۰۰	۳	۱۰
	۰/۰۱۰۰		۱/۷۱	۲/۵۰۰	۱	۱۵
۰/۰۰۵	۰/۰۰۶۰	۱/۷۶	۱/۹۳	۲/۵۰۰	۲	۱۵
	-۰/۰۰۲۰		۱/۶۴	۲/۵۰۰	۳	۱۵
	۰/۰۰۷۰		۱/۱۱	۲/۵۰۰	۱	۲۰
۰/۰۰۴	۰/۰۰۴۰	۱/۵۱	۱/۴۲	۲/۵۰۰	۲	۲۰
	۰/۰۰۰۲		۲/۰۱	۲/۵۰۰	۳	۲۰
	۰/۰۰۶۰		۱/۳۵	۵/۰۰۰	۱	۱۰
۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۶	۱/۳۸	۰/۹۱	۵/۰۰۰	۲	۱۰
	۰/۰۱۷۰		۱/۸۹	۵/۰۰۰	۳	۱۰
	۰/۰۰۵۰		۱/۲۹	۵/۰۰۰	۱	۱۵
۰/۰۰۶	۰/۰۰۷۰	۱/۶۸	۱/۶۹	۵/۰۰۰	۲	۱۵
	۰/۰۱۴۰		۲/۰۷	۵/۰۰۰	۳	۱۵
	۰/۰۰۰۷		۰/۹۲	۵/۰۰۰	۱	۲۰
۰/۰۰۲	-۰/۰۰۰۳	۱/۲۱	۱/۲۳	۵/۰۰۰	۲	۲۰
	۰/۰۰۵۰		۱/۴۷	۵/۰۰۰	۳	۲۰

نتیجه‌گیری

خاک شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده، ملاحظه می‌گردد که مدل HYDRUS-2D قادر است با برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس، با کیفیت

طبق شاخص‌های آماری ارائه شده برای تعیین خطای رطوبت

منابع آب با کیفیت مناسب، می‌تواند رطوبت مطلوب را برای گیاه فراهم نماید. با این وجود، برای اتخاذ یک راهکار درست، باید در خصوص توزیع املاح در خاک آگاهی کسب گردد. لذا پیشنهاد می‌شود کارایی مدل در شبیه‌سازی توزیع املاح و رطوبت (تا اعماق حداکثر نفوذ ریشه درختان زیتون) در این بافت خاک نیز مورد بررسی قرار گیرد و سپس براساس نتایج، توصیه‌های علمی و کاربردی انجام شود.

مطلوبی رطوبت خاک را شبیه‌سازی نماید. لذا می‌توان از این مدل به منظور بهبود عملکرد سامانه، مطالعه مدیریت‌های مختلف آبیاری و یافتن مدیریت بهینه استفاده نمود. با توجه به هزینه بالای نصب و راه‌اندازی سامانه‌های آبیاری، بهتر است قبل از اجرای سامانه، مقدار رطوبت ایجاد شده در خاک توسط مدل بررسی و برای سامانه‌های اجرا شده می‌توان با تعیین بهینه حجم و زمان آبیاری، تلفات آب را کاهش داد. براساس این پژوهش، سامانه آبیاری قطره‌ای نواری در شرایط محدودیت

منابع مورد استفاده

1. احمدپور ح. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی شوری آب‌های زیرزمینی استان گیلان و پیش‌بینی وضعیت آینده با استفاده از یک مدل مبتنی بر GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.
2. پذیرا، ا. ۱۳۹۱. *حفاظت از منابع فیزیکی تولید در کشاورزی (خاک و آب)*. چاپ اول فصل اول انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی، تهران.
3. پوریزدان‌خواه، ه. ۱۳۹۱. اندازه‌گیری الگوی خیس شدن نیم‌رخ خاک توسط یک منبع خطی و شبیه‌سازی آن با مدل HYDRUS-2D. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.
4. خالدیان، م. ع. موسوی، ح. اسدی و م. نوروزی. ۱۳۹۰. تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع با کاربرد تک استوانه بیرکن در مقیاس حوضه آبریز جهت کاربرد در مدل‌های هیدرولوژی. مجموعه مقالات دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران. دانشگاه تبریز. ۱۲ تا ۱۴ شهریور ۱۳۹۰.
5. عباسی، ف. ۱۳۸۶. *فیزیک خاک پیشرفته*. چاپ اول، فصل دوم، انتشارات دانشگاه تهران.
6. Bannayan, M. and G. Hoogenboom. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crop Res.* 111: 290-302.
7. Haverkamp, R., P. J. Ross, K. R. J. Smetten and J. Y. Parlange. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically-based infiltration equation. *Water Resour. Res.* 30: 2931-2935.
8. Kandelous, M. M. and J. Simunek. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agr. Water Manage.* 97: 1070-1076.
9. Lassabatere, L., R. Angulo-Jaramillo, J. M. Soria ugalde, R. Cuenca, I. Braud and R. Haverkamp. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 521-532.
10. Maroufpoor, E., S. Emamgholizadeh, H. Torabi and M. Behzadinasab. 2009. Impact of soil texture on the calibration of TDR for water content measurement. *Appl. Sci. J.* 9(16): 2933-2940.
11. Mmolava, Kh. and D. Or. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. *Plant Soil* 222: 163-190.
12. Mubarak, I. 2008. Effect of temporal variability in soil hydraulic properties on simulated water transfer under high-frequency drip irrigation. PhD Thesis, Montpellier II University, France.
13. Radcliffe, D. E. and J. Simunek. 2010. *Soil physics with HYDRUS modeling and applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 373 p.
14. Rajput, T. B. S. and P. Neelam. 2006. Water and nitrate movement in drip-irrigation onion under fertigation and irrigation treatments. *Agr. Water Manage.* 79: 293-311.
15. 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. *Agr. Water Manage.* 95: 669-677.
16. 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, Colorado, USA.

17. Simunek, J., N. Jarvis, M. Th. van Genuchten and A. Gardenas. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *J. Hydrol.* 272: 14-35.
18. Skaggs, T. H., T. J. Trout, J. Šim nek and P. J. Shouse. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Eng.* 130(4): 304-310.

Simulation of Soil Volumetric Water Content by HYDRUS-2D under Line Source with Different Salinities of Irrigation Water and Comparison with Field Observations

F. Javadzadeh Shakhali¹, M. Khaledian^{1*}, M. Navabian¹ and P. Shahinroksar²

(Received: Oct. 06-2014 ; Accepted: Dec. 21-2015)

Abstract

Soil moisture is one of the main input parameters in many models for monitoring and predicting crop yield. The ability of mathematical models has allowed correct application of brackish water and selection of management options. The purpose of this research was to evaluate the performance of HYDRUS-2D for simulating soil volumetric water content in a heterogeneous heavy soil under field conditions. Three volumes of irrigation water (10, 15 and 20 L) and three salinity levels of irrigation water (1.279, 2.5 and 5 dSm^{-1}) were exerted in a linear drip irrigation system with three replications. In order to check the amount of soil volumetric water content, soil profiles were drilled to 40 cm depth and vertical wall of drip irrigation line was networked. Soil volumetric water content was measured with a TDR MiniTrase kit 6050X3K1B model. The observed soil moisture values were compared with the simulated ones using statistical indices (i.e. nRMSE and CRM). The results indicated that mean soil volumetric water content distribution in irrigation water with different levels of salinities was in the range of field capacity. The range of nRMSE values varied from 0.91 to 2.07 percent in different replications. According to calculated nRMSE values, performance of the simulation model, was ranked as excellent for simulation of soil volumetric water content. Range of CRM values was shown to be from -0.0080 to 0.0170 that was really low. Results of these two statistics indicate high ability of the model in simulating soil volumetric water content using estimating hydraulic parameters by inverse solution.

Keywords: Soil hydraulic parameters, Beerkan, Inverse solution, HYDRUS-2D.

1. Dept. of Water Engineering, Faculty of Agric. Sci., Univ. of Guilan, Iran.

2. Research Center for Agric. and Natural Resour., Rasht, Iran.

*: Corresponding Author, Email: khaledian@guilan.ac.ir