



دانشگاه گنبدکاووس

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره سوم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.13950.2871

شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS1D و داده‌های صحرائی

* معصومه فراستی^۱ و حسین شاکری^۲

^۱ استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه گنبدکاووس، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی، دانشگاه گنبدکاووس

تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۲

چکیده

سابقه و هدف: در پژوهش حاضر از نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن-معلم و شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک در چهار ایستگاه اطراف دانشگاه گنبدکاووس، دریاچه مصنوعی، کلاله و نگین‌شهر با بافت خاک لوم به روش معکوس، استفاده شد.

مواد و روش‌ها: برای این منظور سه گروه با تعداد متفاوت پارامترهای هیدرولیکی انتخاب شده برای فرایند بهینه‌سازی تعریف شد. در گروه اول تنها از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به‌عنوان ورودی نرم‌افزار استفاده شد. در گروه دوم مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در پتانسیل ماتریک ۰/۳ اتمسفر (FC) و در گروه سوم از میزان رطوبت در مکش ۱۵ اتمسفر (PWP) به‌عنوان داده‌های تکمیلی برای حل معکوس در کنار داده‌های نفوذ تجمعی، استفاده شد. پس از بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک، با استفاده از نرم‌افزار هایدروس تغییرات نفوذ با زمان شبیه‌سازی شد.

یافته‌ها: در ایستگاه کلاله مقدار بهینه پارامتر رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقی‌مانده (θ_r) و عکس مکش ورود هوا به خاک (α) به ترتیب برابر ۰/۳۴، ۰/۰۳۳ و ۰/۰۱۴ به دست آمد. در ایستگاه نگین‌شهر مقدار بهینه پارامتر مکش ورود هوا به خاک (α)، شکل منحنی رطوبتی (n) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) به ترتیب ۰/۰۰۶، ۱/۴۲ و ۰/۰۱۴ سانتی‌متر بر دقیقه به دست آمد. در ایستگاه دریاچه مصنوعی مقدار بهینه پارامتر عکس مکش ورود هوا به خاک (α)، شکل منحنی رطوبتی (n) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) به ترتیب ۰/۰۱۵، ۱/۳۹ و ۰/۰۱۶ سانتی‌متر بر دقیقه به دست آمد. در ایستگاه دانشگاه مقدار بهینه پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) و عکس مکش ورود هوا به خاک (α) به ترتیب برابر ۰/۰۱۳ سانتی‌متر بر دقیقه و ۰/۰۰۸ به دست آمد. پس از بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک، با استفاده از نرم‌افزار هایدروس تغییرات نفوذ با زمان شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که نرم‌افزار هایدروس نفوذ تجمعی را به خوبی شبیه‌سازی کرده است و با گذشت زمان میزان نفوذ را کمی بیش‌تر از داده‌های مزرعه‌ای پیش‌بینی نموده است. در ایستگاه کلاله بین داده‌های نفوذ مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس با ضریب R^2 بالا (۰/۹۸) و RMSE کم (۹/۱۱ سانتی‌متر) همبستگی بیش‌تری وجود داشت و داده‌های پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار تقریباً با داده‌های مزرعه‌ای برابر بود. در ایستگاه نگین‌شهر تفاوت داده‌های مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس بیش‌تر بود.

* مسئول مکاتبه: farasati2760@gmail.com

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست آمده، نرم‌افزار هایدروس داده‌های نفوذ را کمی بیش‌تر از میزان واقعی پیش‌بینی کرده است. در همه ایستگاه‌ها مقدار R^2 بالا بوده که نشان‌دهنده همبستگی متوسطی بین داده‌های مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: داده‌های صحرائی، داده‌های مزرعه‌ای، شبیه‌سازی، نرم‌افزار HYDRUS، نفوذ

مقدمه

استفاده از حل عددی مکرر معادله ریچاردز است (۹). معادله ریچاردز یک معادله دیفرانسیل مشتق جزئی درجه دو غیرخطی برای توصیف پویایی آب در خاک در مدل‌سازی جریان اشباع و غیراشباع آب است که با توجه به ماهیت غیرخطی معادله، معمولاً نمی‌توان آن را به‌صورت تحلیلی حل کرد و باید با استفاده از روش‌های عددی حل نمود (۲۵). گاهی بروز برخی عوامل، می‌تواند موجب واگرایی روش حل و عدم دستیابی به پارامترهای بهینه معتبر شود. یکی از این عوامل تخمین چندین پارامتر به‌صورت همزمان است که باعث دشواری و طولانی شدن مراحل آزمایش شده، همچنین انتخاب مقادیر پارامترها به‌ازای مقادیری خارج از محدوده نرمال که مانع همگراشدن مدل می‌شوند که احتمال خطا را افزایش می‌دهد. بنابراین، توصیه می‌شود در تخمین پارامترها به روش‌های مدل‌سازی معکوس، حساس‌ترین پارامترها با استفاده از آزمون حساسیت انتخاب و برآورد شوند (۱۵). از دیگر عوامل مؤثر بر روش‌های معکوس می‌توان به نوع داده مورد استفاده، شرایط مرزی و اولیه لحاظ شده و میزان پیچیدگی مسأله تعریف شده اشاره نمود. سیمونک و ون‌گنوختن (۱۹۹۶) گزارش نمودند که داده‌های نفوذ تجمعی به‌دست آمده از آزمایش‌های نفوذ در شرایط مکشی (غیراشباع) و غرقابی (اشباع) به تنهایی برای رسیدن به پاسخ منحصربه‌فرد و مطمئن در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق حل معکوس کافی نیست (۱۹). در این شرایط استفاده از اطلاعات تکمیلی و داده‌های اندازه‌گیری شده مانند

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نقش مهمی در چرخه آبی طبیعت داشته و به‌عنوان اطلاعات پایه‌ای در طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، مسائل هیدرولوژی و ارزیابی کیفیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ویژگی‌ها به کمک روش‌های مستقیم و غیرمستقیم متفاوتی قابل اندازه‌گیری یا برآورد هستند. اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها دشوار، هزینه‌بر و زمان‌بر است. افزون بر این، به‌دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آن‌ها در شرایط مزرعه نیاز است (۳). بنابراین، طی دهه‌های اخیر روش‌های غیرمستقیم مختلفی برای برآورد این ویژگی‌ها ارائه شده که یکی از آن‌ها روش حل معکوس است. در روش حل معکوس، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از طریق حل عددی مکرر معادلات جریان گذرا، به‌صورت غیرمستقیم برآورد می‌شوند (۹). نتایج پژوهش‌ها، کارایی زیاد این روش را در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در آزمایش‌های مختلف جریان‌های ورودی و خروجی از ستون خاک و در شرایط آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهند (۲۴) و (۲۸). مدل‌سازی معکوس، فرآیندی است که در آن به‌طور متوالی پارامترهای هیدرولیکی خاک به طریقی تعدیل و تنظیم می‌شوند، که مدل با دقت مناسب و قابل‌قبولی قادر به تخمین پاسخ سیستم مورد بررسی در دوره زمانی مشخص باشد. مدل‌سازی معکوس معمولاً شامل تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با

پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد بررسی قرار گیرد. همچنین پس از تعیین پارامترهای هیدرولیکی بهینه، نفوذ آب در خاک شبیه‌سازی می‌گردد. بنابراین هدف از این پژوهش ارزیابی دقت مدل هایدروس در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده با استوانه مضاعف باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش آزمایش نفوذ آب در خاک با استفاده از نفوذسنج‌های استوانه مضاعف در ۴ ایستگاه کلاله، نگین‌شهر، اطراف دانشگاه گنبدکاووس و دریاچه مصنوعی واقع در استان گلستان با بافت خاک لوم در سه تکرار انجام شد. شعاع استوانه‌های داخلی و خارجی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر، عمق جای‌گذاری استوانه‌ها در خاک ۱۳ سانتی‌متر (ارتفاع سیلندر معادل ۵/۵ سانتی‌متر و سطح جانبی آن ۹۴/۲ سانتی‌متر می‌باشد) در نظر گرفته شد. در ابتدا بین دو استوانه به دلیل جلوگیری از نفوذ جانبی آب ریخته شد تا محیط اطراف استوانه داخلی اشباع شود. سپس در استوانه داخلی ارتفاع مشخصی آب ریخته شد و تغییرات نفوذ آب در خاک با زمان اندازه‌گیری شد. با توجه به استاندارد تعریف‌شده توسط USDA-NRCS^۲ (۲۰۰۵) آزمایش‌های نفوذ تا زمانی ادامه یافت که طی سه قرائت متوالی شدت نفوذ تقریباً ثابت شده باشد یعنی نفوذ آب به خاک تقریباً به حالت پایه (ماندگار) رسیده باشد (زمان نهایی نفوذ برای ایستگاه‌های دانشگاه، نگین‌شهر، دریاچه و کلاله به ترتیب ۲۶۰، ۲۲۵، ۲۶۰ و ۲۷۰ دقیقه بود) (۶ و ۱۱). سپس با حفر خاک‌رخ در هر منطقه، از لایه ۲۰-۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری شد و ویژگی‌هایی خاک مانند بافت خاک به روش هیدرومتری، رطوبت اولیه خاک به روش وزنی، چگالی ظاهری به روش نمونه‌برداری با

میزان آب و یا پتانسیل ماتریک (۱۹) و یا دما (۱۲) در یک نقطه مشخص از ستون، در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به هم‌گرایی روش حل معکوس و دستیابی به مقادیر مطمئن‌تر برای پارامترهای بهینه شده کمک می‌کند. نرم‌افزار هایدروس^۱ یک برنامه پیشرفته تحت ویندوز است که در بسیاری از پژوهش‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی و برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و یا پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن نسبتاً رضایت‌بخش بوده است (۱، ۲، ۵، ۷، ۱۰، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۲۱). تاکنون پژوهش‌های متعددی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق داده‌های به‌دست آمده از نفوذسنج دیسکی (۲۶) و مخروطی نفوذسنج (۲۸) به روش حل معکوس ارائه شده است. اما در رابطه با استفاده از داده‌های نفوذسنج‌های استوانه مضاعف در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک پژوهش‌های چندانی انجام نگرفته است. از سوی دیگر، از نفوذسنج‌های استوانه مضاعف در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده به‌عنوان یک روش برای اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک و تعیین پارامترهای نفوذ استفاده شده است (۲، ۱۴ و ۱۶). همچنین در مطالعات تفصیلی خاکشناسی صورت گرفته در کشور، روش نفوذسنج‌های استوانه مضاعف به‌عنوان روش استاندارد اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۸ و ۱۵). این امر منجر به آن شده است که داده‌های اندازه‌گیری‌شده نفوذ آب به خاک به این روش به آسانی و فراوانی در اختیار پژوهشگران قرار گیرد (۲۷). بنابراین، در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از این داده‌ها و با به‌کارگیری روش حل معکوس، میزان کارایی استفاده از داده‌های به‌دست آمده از نفوذسنج‌های استوانه مضاعف در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و تخمین بهینه

2- US Department of Agriculture Natural Resources and Conservation Service

1- HYDRUS

سیلندر، رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (FC) و فیزیکی خاک ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از صفحات فشاری در سه تکرار اندازه‌گیری شد (۲۲). ویژگی‌های

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک ایستگاه‌های مورد مطالعه.

Table 1. Physical properties of the soil of the studied stations.

PWP ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	FC ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	چگالی ظاهری apparent density (gcm^{-3})	رطوبت اولیه خاک	سیلت (%)	شن (%)	رس (%)	بافت خاک soil texture	عمق (cm)	ایستگاه station
0.08	0.21	1.6	0.18	34	44.4	21.6	لوم Loam	0-20	کاله kalaleh
0.08	0.20	1.63	0.09	32.9	47.4	19.6	لوم Loam	0-20	نگین شهر Neginshahr
0.08	0.22	1.57	0.13	32.8	43.6	23.6	لوم Loam	0-20	دریاچه مصنوعی Artificial lake
0.08	0.22	1.63	0.16	39.6	41.8	18.6	لوم loam	0-20	دانشگاه University

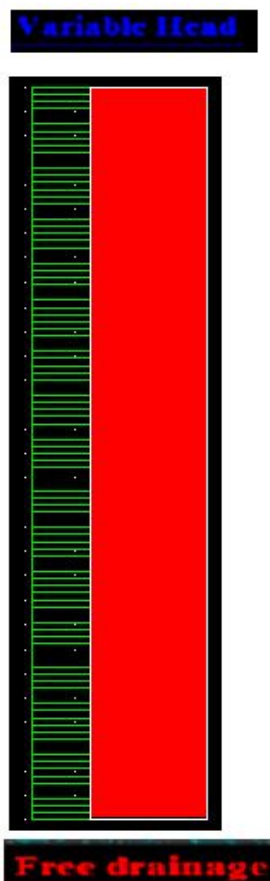
با فرض $m = 1 - \frac{1}{n}$ استفاده شد. زمان نهایی شبیه‌سازی نفوذ برای هر خاک برابر زمان نهایی نفوذ اندازه‌گیری شده در مزرعه در نظر گرفته شد.

آزمون حساسیت: تحلیل حساسیت یکی از جنبه‌های مهم در مدل‌سازی به روش‌های عددی و تحلیلی می‌باشد (۲۳). در این مرحله ابتدا مدل با شرایط اولیه و مرزی تعریف شده در بالا برای خاک هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه و به روش مستقیم اجرا شده و داده‌های نفوذ شبیه‌سازی شده در هر مورد استخراج شدند. برای این منظور پارامترهای مدل ون‌گونختن- معلم شامل θ_r رطوبت باقی‌مانده، θ_s رطوبت اشباع خاک، α پارامتر مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا، n پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و l پارامتر پیوستگی منافذ خاک، با استفاده از ویژگی زود یافت خاک (درصد رس، سیلت، شن، چگالی

پیاپی سازی شرایط آزمایش نفوذ آب در خاک در محیط نرم افزار هایدروس یک بعدی: در این پژوهش از نرم افزار هایدروس یک بعدی برای شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک استفاده شد. بدین منظور، محدوده خاک مرطوب در زیر استوانه‌های مضاعف به صورت یک ناحیه متقارن حول محوری به مرکزیت استوانه داخلی در نظر گرفته شد. شعاع استوانه‌های داخلی و خارجی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر، عمق جای‌گذاری استوانه‌ها در خاک ۱۳ سانتی‌متر و عمق خاک ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شرایط اولیه برای استوانه داخلی بار آبی ثابت ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شرایط مرزی برای محدوده سطح خاک در سطح استوانه داخلی متغیر و برای مرز پایینی (عمق خاک) زهکشی آزاد تعریف شد (شکل ۱) (۲ و ۱۶). در این مطالعه برای کمی نمودن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در نرم‌افزار هایدروس از مدل ون‌گونختن- معلم

به عنوان تخمین‌های اولیه برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲).

ظاهری، رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (FC) و پژمردگی دائم (PWP) و به کمک برنامه Rosetta که در نرم‌افزار هایدروس موجود است، برآورد شد و



شکل ۱- ابعاد و شرایط مرزی تعریف شده برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار HYDRUS1D.

Figure 1. Dimensions and boundary conditions defined for simulation in HYDRUS1D software.

جدول ۲- مقادیر اولیه پارامترهای مدل ون گنوکتن-موالیم برای خاک‌های مورد مطالعه.

Table 2. Initial values of the parameters of the van genukhten-moalem model for the studied soils.

θ_r	θ_s	α	n	K_s (cm/min)	l	بافت خاک soil texture	ایستگاه station
0.037	0.337	0.27	1.12	0.095	0.5	لوم loam	کلاله Kalaleh
0.018	0.317	0.24	1.32	0.08	0.5	لوم loam	نگین شهر Neginshahr
0.027	0.344	0.12	1.11	0.010	0.5	لوم loam	دریاچه مصنوعی Artificial lake
0.036	0.329	0.22	1.23	0.015	0.5	لوم loam	دانشگاه University

سیس، مدل با این ترکیب پارامتری ارائه شده در جدول ۲، اجرا شده و داده‌های نفوذ استخراج شدند. در نهایت میزان حساسیت هر کدام از پارامترها از رابطه ۱ محاسبه شد (۲۵):

$$s(t, b) = \frac{[Y(b+\Delta b) - Y(b)]}{Y(b)} \quad (1)$$

که در آن، $s(t, b)$ ضریب حساسیت یا تغییر نسبی در متغیر Y (نفوذ تجمعی آب در خاک) به‌ازای یک درصد تغییر در پارامتر b ، زمان t و $\Delta b = 0.01b$ است.

بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک: روش کلی در فرآیند بهینه‌سازی پارامترها، انتخاب یک تابع هدف به‌عنوان یک معیار برای اندازه‌گیری میزان تطبیق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل است که مستقیم یا غیرمستقیم به پارامترهای قابل‌تنظیم در آن مدل مربوط می‌شود. به‌گونه‌ای که دقیق‌ترین مقدار برای پارامترهای مدل مورد استفاده، با به حداقل رساندن این تابع هدف به‌دست می‌آید (۲۵). در این تابع هدف (میانگین مربعات خطای وزن‌دار ترکیبی) در یک قالب نسبتاً عمومی نوشته شده است به‌گونه‌ای که امکان استفاده از تعداد زیادی از انواع داده‌های اندازه‌گیری شده و اطلاعات در دسترس وجود دارد و به‌صورت زیر است:

و $q_j(x, t_i, b)$ نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های مدل برای بردار پارامترهای بهینه‌شده b (برای مثال پارامترهای هیدرولیکی خاک، انتقال گرما و یا املاح و ...) و W_{ij} و وزن‌های به‌ترتیب مربوط به گروه اندازه‌گیری j ام (سه گروه داده‌های نفوذ تجمعی، داده‌های نفوذ تجمعی و FC ، داده‌های نفوذ تجمعی و PWP) است که در این پژوهش وزن همه گروه‌های اندازه‌گیری شده یکسان در نظر گرفته شده است. $q_j^*(x, t_i)$ بیانگر مقادیر هر یک از سه گروه اندازه‌گیری شده می‌باشد. $q_{ij}(x, t_i, b)$ نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های مدل هایدروس برای پارامترهای هیدرولیکی بهینه‌شده می‌باشد. بنابراین k برابر تعداد گزینه‌ها در هر گروه (در این پژوهش سه گزینه در نظر گرفته شده) می‌باشد. $\sum_{j=1}^k V_j [b_j^*(X) - b_j(x)]^2$ مقادیر اولیه در نظر گرفته شده برای هر یک از پارامترهای هیدرولیکی خاک ($\alpha, K_s, n, \theta_s, \theta_r$) و تخمین نهایی این پارامترها با استفاده از نرم‌افزار هایدروس است.

جمله دوم سمت راست معادله فوق نشان‌دهنده تفاوت بین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک که به‌طور مستقل اندازه‌گیری شده‌اند و مقادیری که توسط مدل پیش‌بینی شده است (برای مثال نقاطی از منحنی مشخصه رطوبتی و یا هدایت هیدرولیکی) برای اقلی‌های مختلف خاک است. جمله آخر معادله یک تابع هدف برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر اولیه در نظر گرفته شده برای پارامترهای هیدرولیکی $b_j^*(X)$ و تخمین نهایی این پارامترها $b_j(x)$ است (۲۶). تابع هدف برای تعیین خطا در این پژوهش به‌صورت زیر نوشته شده است:

$$(b, q, p) = \sum_{j=1}^m V_j \sum_{i=1}^m W_{i,j} [q_j^*(X, t_i) - q_{j(x, t_i, b)}]^2 + \sum_{j=1}^m V_j \sum_{i=1}^m W_{i,j} [p_j^*(X, \theta_i) - p_{j(x, \theta_i, b)}]^2 + \sum_{j=1}^m V_j [b_j^*(X) - b_j(x)]^2 \quad (2)$$

که در آن، m تعداد گروه اندازه‌گیری شده و k تعداد اندازه‌گیری‌های در هر گروه است. $q_j^*(X, t_i)$ بیانگر مقدار اندازه‌گیری شده گروه j ام در زمان t_i در نقطه x

به‌صورت زیر نوشته شده است:

$$(b, q, p) = \sum_{j=1}^m V_j \sum_{i=1}^m W_{i,j} [q_j^*(X, t_i) - q_{j(x, t_i, b)}]^2 + \sum_{j=1}^m V_j [b_j^*(X) - b_j(x)]^2 \quad (3)$$

$$(b, q, p) = \sum_{j=1}^m V_j \sum_{i=1}^m W_{i,j} [q_j^*(X, t_i) - q_{j(x, t_i, b)}]^2 + \sum_{j=1}^m V_j [b_j^*(X) - b_j(x)]^2 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m V_j [b_j^*(X) - b_j(x)]^2 \quad (3)$$

استفاده شد و در گروه سوم از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و PWP، در خاک‌های مورد مطالعه، برای بهینه‌سازی استفاده شد. در هر گروه سه گزینه با تعداد متفاوت پارامترهای مدل ون‌گونختن - معلم به ترتیب شامل پنج پارامتر $(\alpha, K_s, n, \theta_s, \theta_r)$ ، چهار پارامتر $(\alpha, K_s, n, \theta_s)$ و سه پارامتر (α, K_s, n) برای بهینه‌سازی به روش حل معکوس تعریف شد.

در این پژوهش با توجه به رابطه ۲، m برابر سه می‌باشد. سه گروه بهینه‌سازی (جدول ۳) در خاک مورد مطالعه در نظر گرفته شد. در گروه اول تنها از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده (I) در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، به‌عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک و بهینه‌سازی پارامترها استفاده شد. در گروه دوم از نقطه به‌عنوان FC به‌عنوان داده اضافی در کنار داده‌های نفوذ تجمعی

جدول ۳- گزینه‌های بهینه‌سازی تعریف شده در این پژوهش.

Table 3. The optimization options defined in this research.

θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n (-)	K_s (cm min^{-1})	مجموعه‌های اندازه‌گیری شده	گروه group	گزینه option
+	+	+	+	+	I		1
-	+	+	+	+	I	1	2
-	-	+	+	+	I		3
+	+	+	+	+	I+FC		4
-	+	+	+	+	I+FC	2	5
-	-	+	+	+	I+FC		6
+	+	+	+	+	I+PWP		7
-	+	+	+	+	I+PWP	3	8
-	-	+	+	+	I+PWP		9

+ : پارامترهای انتخاب شده برای بهینه‌سازی، - : پارامترهایی که وارد فرایند بهینه‌سازی نشدند.

است. رابطه‌های مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های مورد استفاده در زیر مشخص شده‌اند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I}_i)^2} - 1 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{N}} \quad (5)$$

که در آن‌ها، N تعداد مشاهدات، I_i میزان نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده، \hat{I}_i میزان نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده، I_i^- میانگین نفوذهای تجمعی اندازه‌گیری شده در خاک می‌باشد.

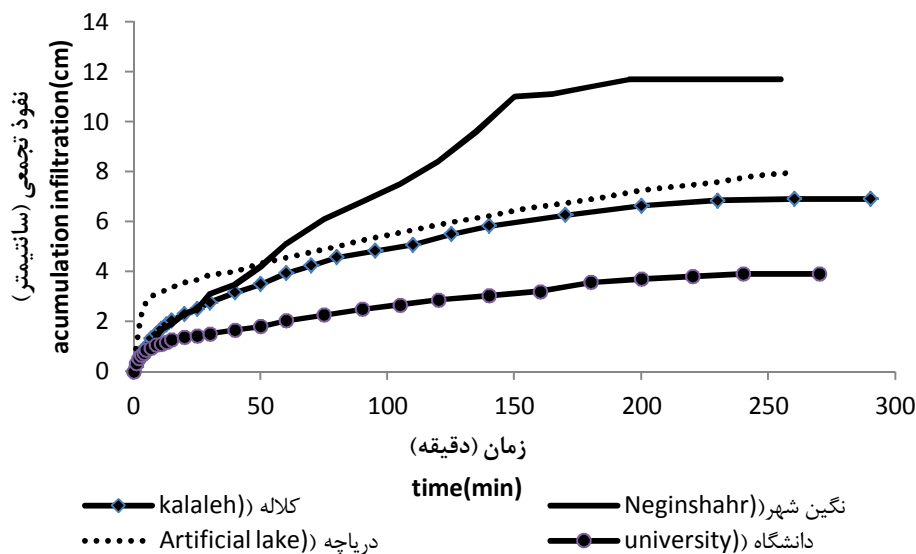
در جدول ۳، در گزینه‌های ۲ و ۳ پارامتر θ_r به دلیل دارا بودن ضریب حساسیت بسیار پایین برابر با مقدار تخمینی برنامه ROSETTA در نظر گرفته شده است و در گزینه ۳، پارامتر θ_s نیز وارد فرایند بهینه‌سازی نشدند.

ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام شده: برای ارزیابی شبیه‌سازی عددی انجام گرفته با استفاده از نرم‌افزار، از شاخص‌های آماری متفاوتی مانند ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، استفاده شد. گزینه‌ای که دارای مقادیر RMSE کوچک‌تر و R^2 بزرگ‌تری باشد، از خطای شبیه‌سازی کم‌تری برخوردار

نتایج و بحث

است. با توجه به این‌که بافت خاک در هر چهار ایستگاه یکسان بود به دلیل کم‌تر بودن میزان رطوبت اولیه خاک ایستگاه نگین‌شهر (۰/۰۹) نسبت به سایر ایستگاه‌ها، سرعت نفوذ آب در خاک این ایستگاه بیش‌تر بود.

شکل ۲ منحنی‌های نفوذ آب به خاک در همه ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، در ایستگاه نگین‌شهر سرعت نفوذ آب به خاک با زمان بسیار زیادتر از سرعت نفوذ آب به خاک در ایستگاه‌های دریاچه، کلاله و دانشگاه بوده



شکل ۲- منحنی‌های نفوذ آب به خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

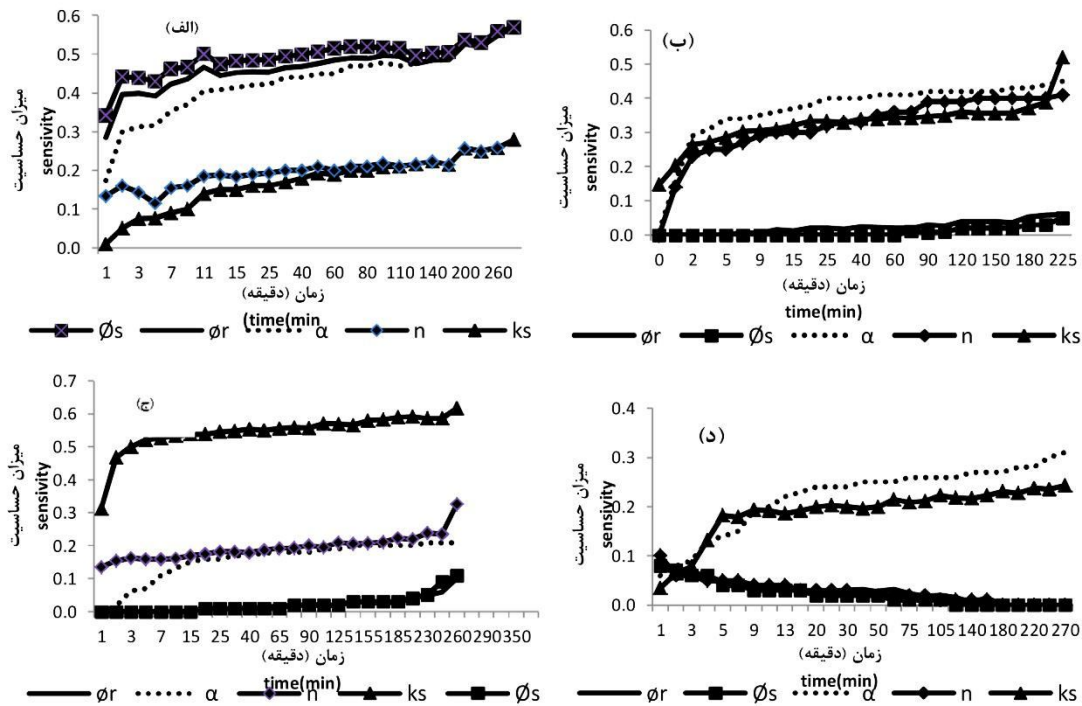
Figure 2. Water penetration curves in soil at studied stations.

پارامتر رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقی‌مانده (θ_r) و شکل منحنی مشخصه رطوبتی (n) می‌باشد. در پژوهش‌های انجام گرفته توسط عباسی و همکاران (۲۰۰۳) و اینس و دروگرز (۲۰۰۲)، دو پارامتر θ_r و I به‌عنوان پارامترهای غیرحساس، کم‌ترین تأثیر را بر شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به روش معکوس داشته و بهتر است که در فرآیند مدل‌سازی به روش حل معکوس از بهینه‌سازی این دو پارامتر صرف‌نظر نمود (۱ و ۱۰). با توجه به نتایج به‌دست آمده به غیر از ایستگاه کلاله، در بقیه ایستگاه‌ها پارامتر رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع به‌عنوان پارامترهای غیرحساس، کم‌ترین تأثیر را بر شبیه‌سازی حرکت آب

شکل ۳ ضرایب حساسیت نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گونختن- معلم در خاک ($I, \alpha, \theta_s, \theta_r, n, k_s$) در چهار ایستگاه مورد مطالعه را، در طول مدت زمان تعیین شده برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک (۲۶۰، ۲۲۵، ۲۶۰ و ۲۷۰ دقیقه) نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آزمون حساسیت، کم‌ترین ضریب حساسیت در ایستگاه کلاله مربوط به پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) و پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی (n)، در ایستگاه نگین‌شهر و دریاچه مصنوعی مربوط به پارامتر رطوبت باقی‌مانده (θ_r) و رطوبت اشباع (θ_s)، در ایستگاه دانشگاه کم‌ترین ضریب حساسیت مربوط به

(θ_r) و عکس مکش ورود هوا به خاک (α) در حدود ۰/۵۵، در ایستگاه نگین شهر و دریاچه مصنوعی نسبت به پارامتر عکس مکش ورود هوا به خاک (α) در حدود ۰/۶، شکل منحنی رطوبتی (n) و هدایت هیدرولیکی اشباع (k_s) و در ایستگاه دانشگاه نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) در حدود ۰/۶ و عکس مکش ورود هوا به خاک (α) داشته است. مشایخی و همکاران (۲۰۱۶) به برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس با استفاده از داده‌های نفوذ استوانه‌های دوگانه پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش نیز پارامترهای هدایت هیدرولیکی خاک، شکل منحنی رطوبتی و عکس مکش ورود هوا به خاک در فرآیند بهینه‌سازی مورد نظر قرار گرفتند (۱۳).

در خاک به روش معکوس داشته و در فرآیند مدل‌سازی به روش حل معکوس از بهینه‌سازی این دو پارامتر صرف نظر شد. از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، رطوبت خاک در حالت اشباع (θ_s) دارای مفهوم فیزیکی بوده و به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری است، بنابراین می‌توان این پارامتر را در مقدار اندازه‌گیری شده ثابت در نظر گرفت. در نهایت با کاهش تعداد پارامترهایی که برای بهینه‌سازی در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند، احتمال دستیابی به پاسخ‌های بهینه با درصد اطمینان بیشتر و در زمان کوتاه‌تر توسط نرم‌افزار HYDRUS افزایش می‌یابد (۹). بیش‌ترین حساسیت نفوذ تجمعی آب به خاک در تمام مدت زمان نفوذ، در ایستگاه کلاله به ترتیب نسبت به پارامتر رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقی مانده



شکل ۳- میزان حساسیت نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامترهای مدل و نگوختن - معلم در خاک (الف) کلاله (ب) نگین شهر (ج) دریاچه (د) دانشگاه.

Figure 3. Level of sensitivity of cumulative penetration of water to soil relative to the parameters of the teacher's model in the soil (a) Kalaleh (b) Neginshahr(c) Artificial lake (d) University.

گزارش نمودند که با کاهش تعداد پارامترهای مورد نظر برای بهینه‌سازی به روش حل معکوس، احتمال دستیابی به پاسخ‌های با درجه اطمینان بالا، افزایش می‌یابد (۹). در نهایت از میان تمامی گزینه‌های تعریف‌شده در همه ایستگاه‌ها، کم‌ترین مقادیر RMSE و بیش‌ترین مقادیر R^2 مربوط به گزینه‌ای بود که در آن مقادیر FC در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به‌عنوان ورودی مدل برای حل معکوس استفاده شد (جدول ۴). جدول ۵ مقادیر بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی را در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. در ایستگاه کلاله مقدار بهینه پارامتر رطوبت اشباع (θ_s)، رطوبت باقی‌مانده (θ_r) و عکس مکش ورود هوا به خاک (α) به ترتیب برابر ۰/۳۴، ۰/۳۳ و ۰/۱۴ به دست آمد. در ایستگاه نگین‌شهر مقدار بهینه پارامتر مکش ورود هوا به خاک (α)، شکل منحنی رطوبتی (n) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) به ترتیب ۰/۰۰۶، ۰/۴۲ و ۰/۱۴ سانتی‌متر بر دقیقه به دست آمد. در ایستگاه دریاچه مصنوعی مقدار بهینه پارامتر عکس مکش ورود هوا به خاک (α)، شکل منحنی رطوبتی (n) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) به ترتیب ۰/۰۱۵، ۱/۳۹ و ۰/۱۶ سانتی‌متر بر دقیقه به دست آمد. در ایستگاه دانشگاه مقدار بهینه پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (k_s) و عکس مکش ورود هوا به خاک (α) به ترتیب برابر ۰/۱۳ سانتی‌متر بر دقیقه و ۰/۰۰۸ به دست آمد.

با استفاده از روش حل معکوس در نرم‌افزار هایدروس و وارد نمودن پارامترهای زودیافت خاک (جرم مخصوص ظاهری، درصد شن، درصد سیلت و درصد رس)، درصد رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم مقدار پارامترهای هیدرولیکی خاک بهینه می‌گردید. جدول ۴ نتایج مقایسات آماری نفوذ آب تجمعی اندازه‌گیری‌شده در خاک و شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار هایدروس را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در جدول ۴، نرم‌افزار HYDRUS در گزینه‌هایی که پنج پارامتر θ_r ، θ_s ، K_s ، α ، n به صورت هم‌زمان برای بهینه‌سازی انتخاب شده بودند، در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه، همگرا نشده و روش حل معکوس به پاسخی جهت برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، نرسیده است. روسو و همکاران (۱۹۹۱) نشان دادند که تخمین هم‌زمان تعداد زیاد پارامترهای معادله ون‌گنوختن - معلم احتمال ناپایداری در روش حل معکوس را افزایش می‌دهد و مدل به پاسخ منحصر به فردی نمی‌رسد (۲۰). در بیش‌تر گزینه‌ها و در هر چهار ایستگاه، با کاهش تعداد پارامترهای انتخاب‌شده برای بهینه‌سازی از ۵ به ۳ پارامتر، میزان خطای شبیه‌سازی کاهش یافته است و می‌توان گفت عدم قطعیت در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با کاهش تعداد پارامترهای مورد استفاده در فرآیند بهینه‌سازی، کاهش یافته است که این نتیجه با یافته‌های سیمونک و همکاران (۱۹۹۸) همخوانی دارد (۲۲). هاپ‌منز و همکاران (۲۰۰۲)

جدول ۴- نتایج مقایسات آماری نفوذ آب تجمعی اندازه‌گیری شده در خاک و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار هایدروس.

Table 4. Result of analysis for measured and simulated accumulated infiltration in soil.

RMSE(cm ³)	R ²	گزینه option
#	#	5P(n,α,k _s ,θ _s ,θ _r)
495.4	0.986	5P+FC
422.2	0.988	5P+PWP
583.8	0.987	4P(n,α,k _s ,θ _s)
94	0.988	4P+FC
148.1	0.988	4P+PWP
227.6	0.996	3P(n,α,k _s)
83	0.998	3P+FC
120.4	0.996	3P+PWP

P: پارامترهای هیدرولیکی خاک که برای فرآیند بهینه‌سازی انتخاب و وارد مدل شدند. # عدم همگرایی در مدل‌سازی.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بهینه‌شده در چهار ایستگاه مورد مطالعه.

Table 5. Hydraulic parameters of optimized soil at the four stations studied.

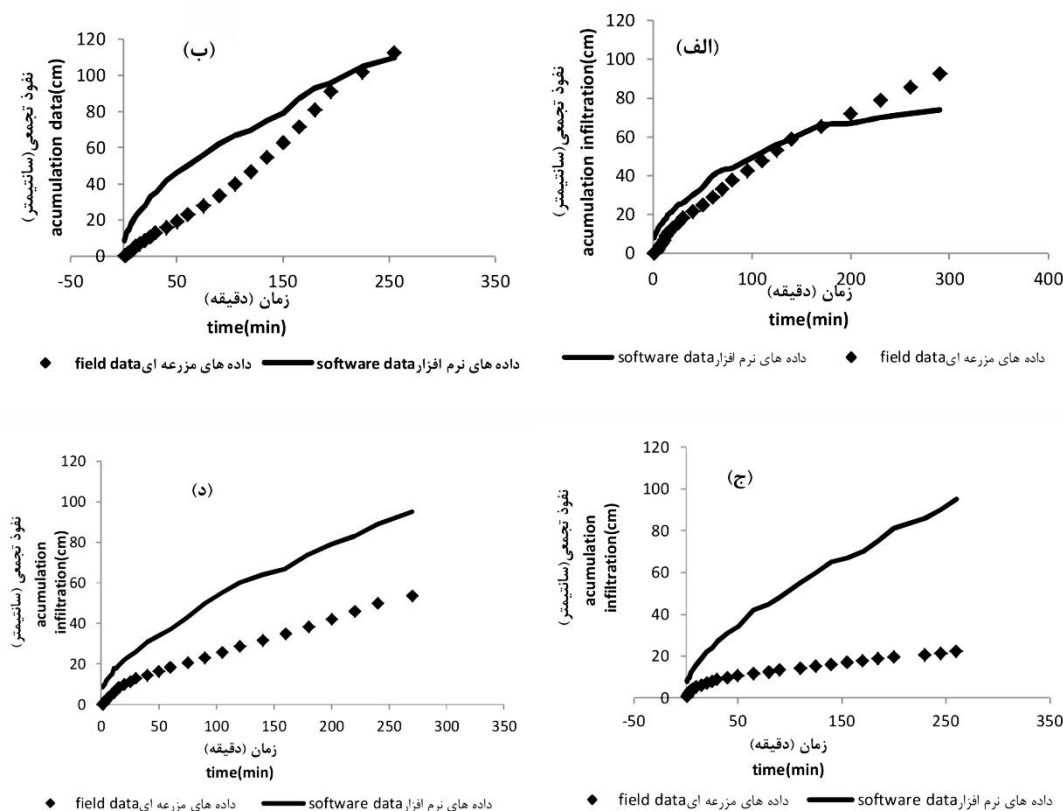
l	θ _r (cm ³ cm ⁻³)	θ _s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n	Ks (cm min ⁻¹)	عمق depth (cm)	بافت خاک soil texture	ایستگاه station
0.5	0.033	0.342	0.014	1.28	0.018	0-20	لوم loam	کلاله Kalaleh
0.5	0.028	0.317	0.006	1.42	0.014	0-20	لوم loam	نگین شهر Neginshahr
0.5	0.037	0.334	0.015	1.39	0.016	0-20	لوم loam	دریاچه مصنوعی Artificial lake
0.5	0.037	0.329	0.008	1.39	0.013	0-20	لوم loam	دانشگاه University

مضاعف و نرم‌افزار با هم متفاوت بوده و نرم‌افزار هایدروس میزان نفوذ را بیش‌تر از مقدار واقعی تخمین زده است. با گذشت زمان این تفاوت کم‌تر شده تا این‌که در زمان ۱۸۰ دقیقه با هم برابر شده و با افزایش زمان نفوذ از ۲۸۰ دقیقه به بعد بین داده‌های نرم‌افزار و استوانه مضاعف تفاوت ناچیزی مشاهده شد. با توجه به شکل ۴ (ب)، در ایستگاه نگین‌شهر در زمان‌های اولیه نفوذ میزان نفوذ به‌دست آمده از

شبیه‌سازی با نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی: پس از وارد نمودن میزان بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک، با استفاده از نرم‌افزار هایدروس تغییرات نفوذ تجمعی آب در خاک با زمان شبیه‌سازی شد. شکل ۳ مقایسه داده‌های نفوذ تجمعی به‌دست آمده از مزرعه (استوانه‌های مضاعف) و نرم‌افزار هایدروس را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ (الف)، در ایستگاه کلاله در زمان‌های اولیه نفوذ میزان نفوذ به‌دست آمده از استوانه‌های

استوانه‌های مضاعف و نرم‌افزار با هم تفاوت کمی داشته و با گذشت زمان این تفاوت بیش‌تر شده و داده‌ها به موازات هم بودند. نرم‌افزار هایدروس نفوذ تجمعی را بیش‌تر از داده‌های مزرعه‌ای تخمین زده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از شکل ۴، نرم‌افزار هایدروس نفوذ آب در خاک را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. در زمان‌های کوتاه داده‌های HYDRUS1D نفوذ شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار HYDRUS1D با داده‌های واقعی تفاوتی نداشته ولی در زمان‌های طولانی نفوذ را بیش‌تر از داده‌های مزرعه‌ای پیش‌بینی نموده است. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش با نتایج بورگریوز و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت داشته است (۴).

استوانه‌های مضاعف و نرم‌افزار با هم دارای تفاوت زیادی بوده و نرم‌افزار هایدروس میزان نفوذ را بیش‌تر از مقدار واقعی تخمین زده است. با گذشت زمان این تفاوت کم‌تر شده تا این‌که از زمان ۲۰۰ دقیقه به بعد داده‌های نرم‌افزار و استوانه مضاعف با هم برابر شدند. با توجه به شکل ۴ (ج)، در ایستگاه دریاچه در زمان‌های اولیه نفوذ، میزان نفوذ به‌دست آمده از استوانه‌های مضاعف و نرم‌افزار با هم تفاوت کمی داشته و با گذشت زمان این تفاوت بیش‌تر شده و داده‌ها واگرا شدند. نرم‌افزار هایدروس نفوذ تجمعی را خیلی بیش‌تر از داده‌های مزرعه‌ای تخمین زده است. با توجه به شکل ۴ (د)، در ایستگاه دانشگاه در زمان‌های اولیه نفوذ میزان نفوذ به‌دست آمده از



شکل ۴- مقایسه داده‌های نفوذ تجمعی به‌دست آمده از مزرعه (استوانه‌های مضاعف) و نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی (الف) کلاله (ب) نگین‌شهر (ج) دریاچه (د) دانشگاه.

Figure 4. Comparison of cumulative penetration data obtained from the field (double cylinders) and HYDRUS software (a) Kalaleh (b) Neginshahr(c) Artificial lake (d) University.

در ایستگاه نگین شهر تفاوت داده‌های مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس بیشتر بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول ۶، نرم‌افزار هایدروس داده‌های نفوذ را کمی بیشتر از میزان واقعی پیش‌بینی کرده است. در همه ایستگاه‌ها مقدار R^2 بالا بوده که نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین داده‌های مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس می‌باشد.

جدول ۶ میزان ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین داده‌های مزرعه و نرم‌افزار هایدروس را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶، در ایستگاه کلاله بین داده‌های نفوذ مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس با ضریب R^2 بالا (۰/۹۸) و RMSE کم (۹/۱۱ سانتی‌متر) همبستگی بیشتری وجود داشت و داده‌های نفوذ پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار تقریباً با داده‌های مزرعه‌ای برابر بود.

جدول ۶- معیارهای ارزیابی داده‌های مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس.

Table 6. Field Datasheet Evaluation Data and HYDRUS software.

RMSE (cm)	R^2	ایستگاه Station
9.11	0.98	کلاله kalaleh
18.93	0.947	نگین شهر Neginshahr
38.91	0.97	دریاچه مصنوعی Artificial lake
23.24	0.99	دانشگاه University

مدل‌سازی ضروری است. در این پژوهش، در همه ایستگاه‌ها غیر از ایستگاه کلاله، پارامترهای a ، n ، K_s از حساسیت زیاد نسبت به سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک برخوردار بودند. در ایستگاه کلاله θ_s ، θ_r و α دارای حساسیت بیش‌تری بودند. پس از به‌دست آمدن پارامترهای هیدرولیکی بهینه، با استفاده از نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی نفوذ آب در خاک شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که نرم‌افزار هایدروس نفوذ تجمعی را به خوبی شبیه‌سازی کرده است و با گذشت زمان میزان نفوذ را کمی بیشتر از داده‌های مزرعه‌ای پیش‌بینی نموده است. در همه ایستگاه‌ها مقدار R^2 بالا بوده که نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین داده‌های مزرعه‌ای و نرم‌افزار هایدروس می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از نرم‌افزار هایدروس یک‌بعدی برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های مضاعف، استفاده شد. نتایج نشان داد که روش حل عددی معکوس می‌تواند به‌عنوان یک روش نسبتاً ساده و سریع در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های مضاعف مدنظر قرار گیرد. همچنین مشخص شد که با کاهش تعداد پارامترهای هیدرولیکی انتخاب شده برای بهینه‌سازی به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل، خطای شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. بنابراین انجام آزمون حساسیت برای تشخیص پارامترهای حساس‌تر برای استفاده در فرآیند

منابع

1. Abbasi, F., Simunek, J., Feyen, J., van Genuchten, M.Th., and Shouse, P.J. 2003. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: homogeneous soil. *Trans. ASAE*, 46: 4. 1085-1095.
2. Alletto, L., Pot, V., Giuliano, S., Costes, M., Perdrioux, F., and Justes, E. 2015. Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243: 18-28.
3. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Dexter, A.R., Mahboubi, A.A., and Neyshabouri, M.R. 2014. Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, 8: 20. 226-227.
4. Bourgeois, O., Bouvier, C., Brunet, P., and Ayrat, A. 2016. *Journal of Hydrology*. Inverse modeling of soil water content to estimate the hydraulic properties of a shallow soil and the associated weathered bedrock. 541: 116-126.
5. El-Nesr, N.M., Alazba, A.A., and Simunek, J. 2014. HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation Science*, 32: 111-125.
6. Fuladipannah, M. 2012. Sensitivity analysis of one dimensional hydrodynamic fully coupled model. *Middle-East J. Sci. Res.* 12: 11. 1471-1476.
7. Ghaiumi Mohammadi, H., and Nurbakhsh, F. 2007. Detailed soil survey of Chahar-Takhteh Agricultural research station (Chaharmahal and Bakhtiari province). Technical report, No 6399. 27p. (In Persian)
8. Ghorbani Dashtaki, Sh., Homae, M., Mahdian, M.H., and Kouchakzadeh, M. 2009. Site-dependence performance of infiltration models, *Water Resour. Manage.* 23: 2777-2790.
9. Hopmans, J.W., Simunek, J., Romano, N., and Durner, W. 2002. Simultaneous determination of water transmission and retention properties. Inverse methods. In: *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods.* (J.H. Dane and G.C. Topp, Eds.). SSSA Book Series No. 5. Pp: 963-1008.
10. Ines, A.V.M., and Droogers, P. 2002. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. *Hydrol. Earth System Science*, 6: 49-66.
11. Klute, A. 1986. *Methods of Soil Analysis. Part 1- Physical and Mineralogical Methods.* 2nd ed., Agronomy No. 9. ASA/SSSA Inc., Madison, Wisconsin, USA. 176p.
12. Lou, Y., and Ren, L. 2011. Numerical evaluation of depth effects of double-ring infiltrometers on soil saturated hydraulic conductivity measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76: 867-875. (In Persian)
13. Mashaiekh, P., Ghorbani, Sh., Mosadeghe, M., Shirani, H., Panahee, M., and Noori, M. 2016. Soil hydraulic parameters estimation by using double ring data. *J. Water Soil Res.* 74: 7. 818-820. (In Persian)
14. Mirzaee, S., Zolfaghari, A.A., Gorji, M., Miles Dyck, M., and Ghorbani Dashtaki, S. 2013. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes *Arch. Agron. Soil Science.*
15. Nakhaei, M., and Simunek, J. 2014. Parameter estimation of soil hydraulic and thermal property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code. *J. Hydrol. Hydromech.* 62: 1. 7-15.
16. Pollalis, E.D., and Valiantzas, J.D. 2015. Isolation of a 1D infiltration time interval under ring infiltrometers for determining sorptivity and saturated hydraulic conductivity: numerical, theoretical, and experimental approach. *J. Irrig. Drain. Engin.* 141: 2.
17. Ramos, T.B., Simunek, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., and Pereira, L.S. 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agric. Water Manage.* 111: 87-104.
18. Raouf, M., and Pilpayeh, A.R. 2013. Estimating soil wetting profile under saturated infiltration process by numerical inversion solution in land slopes. *Middle East J. Sci. Res.* 13: 6. 732-736.

19. Rashid, N.S.A., Asker, M., Tanaka, T., Simunek, J., and van Genuchten, M.Th. 2015. Inverse estimation of soil hydraulic properties under oil palm trees. *Geoderma*, 241: 306-312.
20. Russo, D., Bresler, E., Shani, U., and Parker, J.C. 1991. Analysis of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology. *Water Resource Research*, 27: 1361-1373.
21. Simunek, J., and van Genuchten, M.Th. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resource Research*, 32: 9. 2683-2696.
22. Simunek, J., Wendroth, O., and van Genuchten, M.Th. 1998. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 894-905.
23. Simunek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M.Th. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0, IGWMC-TPS-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
24. Simunek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M.Th. 2012. HYDRUS: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55: 4. 1261-1274.
25. Tiago, B., Ramos, M.C., Goncalves, J.C.M., Van Genuchten, M.Th., and Pires, F.P. 2006. Estimation of Soil Hydraulic Properties from Numerical Inversion of Tension Disk Infiltration Data. *Vadose Zone J.* 5: 2. 684-696.
26. Toomanian, N. 2009. Detailed soil survey of Khor and Biabanak (Naiin). Technical report. No, 654: 100. (In Persian)
27. US Department of Agriculture Natural Resources and Conservation Service. 2005. National Engineering Handbook, Part 623, Surface Irrigation. National Technical Information Service, Washington, DC, Chapter 4.
28. Vanclooster, M., Javaux, M., and Lambot, S. 2007. Recent advances in characterizing flow and transport in unsaturated soil at the core and field. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 3: 19-35.



Simulation of water infiltration in the soil using HYDRUS1D software and field data

*M. Farasati¹ and H. Shakeri²

¹Assistant Prof., Faculty of Agriculture, Gonbad Kavoods University,

²M.Sc. Student, Faculty of Agriculture, Gonbad Kavoods University

Received: 09.13.2017; Accepted: 06.12.2018

Abstract

Background and Objectives: In the present study, HYDRUS1D software was used to estimate the hydraulic parameters of the Van Genuchten- Moalem model and simulation of water infiltration in soil of four stations of Gonbad University, Artificial Lake, Kalaleh and Negin Shahr with loam soil texture by reverse method.

Materials and Methods: For this purpose, three groups with a different selected number of hydraulic parameters were defined for the optimization process. In the first group, only the cumulative penetration data measured as software input was used. In the second group, the soil moisture content measured at 0.3 atmospheres (FC) and in the third group, the amount of moisture in the 15 atmospheric suction (PWP) was used as supplementary data for the inverse solution along with the data cumulative infiltration. After optimization of hydraulic parameters of soil, the water infiltration changes along with time were simulated using HYDRUS1D software.

Results: In Kalaleh station, optimized parameters θ_s , θ_r and α value were obtained 0.34, 0.027 and 0.014, respectively. In Neginshar, optimized parameters α , n and k_s parameters were obtained 0.0075, 1.52 and 0.012 cm/min, respectively. In Artificial Lake optimized parameters α , n and k_s parameters were 0.011, 1.39 and 0.016 cm/min, respectively. In Gonbad University station optimized parameters value were k_s and α value 0.011cm/min and 0.005, respectively. After optimizing the hydraulic parameters of the soil, using HYDRUS software, water infiltration along with time was simulated. The result showed that Hydrus software predicted the data to be slightly higher than the actual amount. The results showed that at all stations, the R^2 value is high, indicating a high correlation between field data and Hydrus software. In the Kalaleh station, there was a greater correlation between field infiltration data and Hydrus software with high R^2 coefficient (0.997) and the predicted data by the software was approximately identical with field data. At Negin shahr station, the difference between field data and Hydrus software simulated data was higher.

Conclusion: According to the results Hydrus software simulated cumulative infiltration well and with over time, the infiltration rate was slightly higher than field data. At all stations, the R^2 value is high, indicating a high correlation between field data and Hydrus software.

Keywords: Field data, Field data, HYDRUS software, Infiltration, Simulation

* Corresponding Author; Email: farasati2760@gmail.com