

برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس با استفاده از داده‌های نفوذ استوانه‌های دوگانه

پریسا مشایخی^۱، شجاع قربانی دشتکی*^۲، محمدرضا مصدقی^۳، حسین شیرانی^۴، مهدی پناهی^۵ و محمدرضا نوری^۶

۱. دانشجوی دکتری، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. دانشیار، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۳. استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴. استاد، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رفسنجان

۵. استادیار گروه آبیاری و فیزیک موسسه تحقیقات خاک و آب کرج

۶. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۱۸ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۳/۱۸)

چکیده

در پژوهش حاضر از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن-معلم در سه بافت متفاوت خاک به روش معکوس، با استفاده از داده‌های نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، استفاده شد. برای این منظور نه گزینه با تعداد متفاوت پارامترهای هیدرولیکی انتخاب شده برای فرایند بهینه‌سازی (۵، ۴ و ۳ پارامتر)، در سه گروه مجزا تعریف شد. در گروه اول تنها از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی نرم‌افزار استفاده شد. در گروه دوم مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در پتانسیل ماتریک ۳۳۰- سانتی‌متر (FC) و در گروه سوم از میزان رطوبت در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳۰- (FC) و ۱۵۰۰۰- سانتی‌متر (PWP) به عنوان داده‌های تکمیلی برای حل معکوس در کنار داده‌های نفوذ تجمعی، استفاده شد. نتایج نشان داد با کاهش تعداد پارامترهای برآوردی در هر گروه، خطای برآورد کاهش و دقت تخمین سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از رطوبت FC در کنار داده‌های نفوذ تجمعی باعث کاهش خطای برآورد شد. بنابراین انتخاب سه پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، شکل منحنی رطوبتی (n) و پارامتر مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا (α) به عنوان پارامترهای تخمینی و استفاده همزمان از FC و داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با کمترین میزان خطای شبیه‌سازی همراه بود. در این گزینه مقادیر R^2 ، AIC، NRMSE، RMSE (cm³) برای خاک لومی و ۰/۹۹۸۸ و ۰/۰۰۵۹، ۷۹/۰، ۲۴۲، ۰/۰۰۵۹ و ۰/۰۰۸۱، ۵۲۸/۲، ۱۲۵۹، ۰/۰۰۸۱ و ۰/۹۹۹۹ برای خاک لوم شنی، ۲۴۲، ۷۹/۰، ۰/۰۰۵۹ و ۰/۹۹۸۸ برای خاک لومی و ۲۹۸، ۱۵۳/۶، ۰/۰۱۷۴ و ۰/۹۹۸۳ برای خاک رس سیلتی بود. افزودن رطوبت PWP میزان خطا را در هر سه نوع بافت خاک افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: حل عددی، مدل ون‌گنوختن، معلم، نفوذ غرقابی، نرم‌افزار HYDRUS

مقدمه

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نقش مهمی در چرخه آبی طبیعت داشته و به عنوان 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، به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است (Asgarzadeh et al., 2014). 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، به صورت غیرمستقیم برآورد می‌شوند (Hopmans et al., 2002). 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 (Vancloster et al., 2007; Simunek et al., 1998; Russo et al., 1991). مدل‌سازی معکوس، فرآیندی است که در آن به طور متوالی پارامترهای هیدرولیکی خاک به طریقی تعدیل و تنظیم می‌شوند، که مدل با دقت مناسب و قابل قبولی قادر به تخمین پاسخ سیستم مورد بررسی در دوره زمانی

* نویسنده مسئول: Shoja2002@yahoo.com

مشخص باشد. مدل‌سازی معکوس معمولاً شامل تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از حل عددی مکرر معادله ریچاردز است (Hopmans *et al.*, 2002). 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 به صورت تحلیلی حل نمود و باید با استفاده از روش‌های عددی حل شود (Tiago *et al.*, 2006).

گاهی بروز برخی عوامل، می‌تواند موجب واگرایی روش حل و عدم دستیابی به پارامترهای بهینه معتبر شود. در این شرایط تابع هدف دارای حل یکتا یا پایدار نبوده و مدل به اصطلاح ill-posed می‌شود. یکی از این عوامل تخمین چندین پارامتر به صورت هم‌زمان است که باعث دشواری و طولانی شدن مراحل آزمایش شده و احتمال خطا را افزایش می‌دهد. بنابراین، توصیه می‌شود در تخمین پارامترها به روش‌های مدل‌سازی معکوس، حساس‌ترین پارامترها با استفاده از آزمون حساسیت (Sensitivity analysis, SA) انتخاب و برآورد شوند (Abbasi, 2006). از دیگر عوامل موثر بر روش‌های معکوس می‌توان به نوع داده‌ی مورد استفاده، شرایط مرزی و اولیه لحاظ شده و میزان پیچیدگی مساله تعریف شده اشاره نمود. Russo *et al.* (1991) و Šimůnek and van Genuchten (1996) گزارش نمودند که داده‌های نفوذ تجمعی به دست آمده از آزمایش‌های نفوذ در شرایط مکشی (غیراشباع) و غرقابی (اشباع) به تنهایی برای رسیدن به پاسخ منحصر به فرد و مطمئن در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق حل معکوس کافی نیست. در این شرایط استفاده از اطلاعات تکمیلی و داده‌های اندازه‌گیری شده مانند میزان آب و یا پتانسیل ماتریک (Šimůnek and van Genuchten, 1996) و یا دما (Nakhaei and Šimůnek, 2014) در یک نقطه مشخص از ستون و یا خاک‌رخ در زمان‌های مشخص، در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به هم‌گرایی روش حل معکوس و دستیابی به مقادیر مطمئن‌تر برای پارامترهای بهینه‌شده کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی

برای انجام این پژوهش، آزمایش نفوذ آب به خاک با استفاده از نفوذسنج‌های استوانه-دوگانه در ۳ منطقه رودشت، دشتی و سروش‌بادران در استان اصفهان با سه نوع بافت خاک متفاوت (به ترتیب دارای بافت ریز، متوسط و درشت) و در سه تکرار انجام شد. قطر استوانه داخلی ۳۰ و قطر استوانه خارجی حدود ۶۰ سانتی‌متر بود که به صورت متحدالمرکز تا عمق حدود ده سانتی‌متر در خاک کوبیده شدند. ارتفاع ثابت آب در داخل استوانه‌ها در طول مدت آزمایش برابر ۱۰ سانتی‌متر بود. با توجه به استاندارد تعریف شده توسط USDA-NRCS (US Department of Agriculture Natural Resources and Conservation Service, 2005) آزمایش‌های نفوذ تا زمانی ادامه یافتند که طی چندین قرائت متوالی (حداقل سه قرائت) شدت نفوذ تقریباً ثابت شده باشد یعنی نفوذ آب به خاک تقریباً

مشخص باشد. مدل‌سازی معکوس معمولاً شامل تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از حل عددی مکرر معادله ریچاردز است (Hopmans *et al.*, 2002). 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 به صورت تحلیلی حل نمود و باید با استفاده از روش‌های عددی حل شود (Tiago *et al.*, 2006).

گاهی بروز برخی عوامل، می‌تواند موجب واگرایی روش حل و عدم دستیابی به پارامترهای بهینه معتبر شود. در این شرایط تابع هدف دارای حل یکتا یا پایدار نبوده و مدل به اصطلاح ill-posed می‌شود. یکی از این عوامل تخمین چندین پارامتر به صورت هم‌زمان است که باعث دشواری و طولانی شدن مراحل آزمایش شده و احتمال خطا را افزایش می‌دهد. بنابراین، توصیه می‌شود در تخمین پارامترها به روش‌های مدل‌سازی معکوس، حساس‌ترین پارامترها با استفاده از آزمون حساسیت (Sensitivity analysis, SA) انتخاب و برآورد شوند (Abbasi, 2006). از دیگر عوامل موثر بر روش‌های معکوس می‌توان به نوع داده‌ی مورد استفاده، شرایط مرزی و اولیه لحاظ شده و میزان پیچیدگی مساله تعریف شده اشاره نمود. Russo *et al.* (1991) و Šimůnek and van Genuchten (1996) گزارش نمودند که داده‌های نفوذ تجمعی به دست آمده از آزمایش‌های نفوذ در شرایط مکشی (غیراشباع) و غرقابی (اشباع) به تنهایی برای رسیدن به پاسخ منحصر به فرد و مطمئن در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک از طریق حل معکوس کافی نیست. در این شرایط استفاده از اطلاعات تکمیلی و داده‌های اندازه‌گیری شده مانند میزان آب و یا پتانسیل ماتریک (Šimůnek and van Genuchten, 1996) و یا دما (Nakhaei and Šimůnek, 2014) در یک نقطه مشخص از ستون و یا خاک‌رخ در زمان‌های مشخص، در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به هم‌گرایی روش حل معکوس و دستیابی به مقادیر مطمئن‌تر برای پارامترهای بهینه‌شده کمک می‌کند.

هایدروس (HYDRUS) 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 (Alletto *et al.*, 2015; El-Nesr *et al.*, 2014; Kandelous and Šimůnek, 2010; Pollalis and Valiantzas, 2015; Ramos *et al.*, 2012; Rashid *et al.*, 2015; Lou and Ren, 2011).

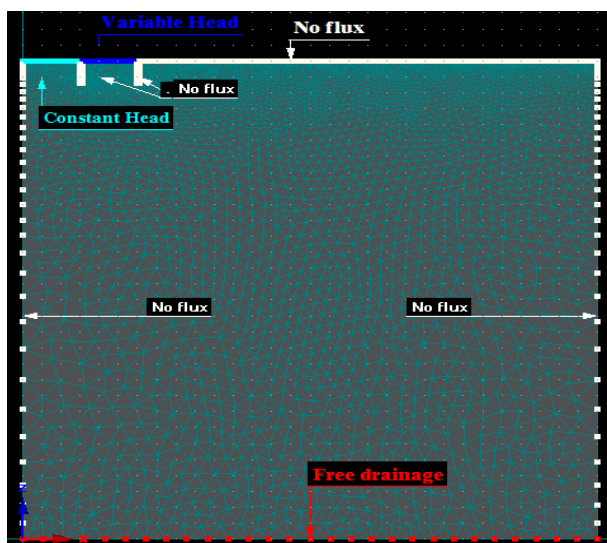
تاکنون پژوهش‌های متعددی برای برآورد پارامترهای

روش وزنی در سه تکرار اندازه‌گیری شد (Klute, 1986). همچنین برای هر نمونه خاک دو نقطه از منحنی مشخصه رطوبتی در پتانسیل‌های ماتریک ۳۳۰- و ۱۵۰۰۰- سانتی‌متر به کمک دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد که به ترتیب معادل نقاط ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم گیاه (PWP) می‌باشند. ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	عمق (cm)	کلاس بافتی خاک	رس (/)	سیلت (/)	شن (/)	رطوبت اشباع (cm ³ cm ⁻³)	چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	FC (cm ³ cm ⁻³)	PWP (cm ³ cm ⁻³)
۱	۰-۱۰	رس سیلتی	۴۲	۴۸	۱۰	۰/۵۱۱	۱/۲۱	۰/۳۹۰	۰/۱۹۱
	۱۰-۳۰	رس سیلتی	۴۰	۴۶	۱۴	۰/۵۰۳	۱/۳۱	۰/۳۸۷	۰/۱۸۴
	۳۰-۶۰	رس سیلتی	۴۰	۴۶	۱۴	۰/۵۰۱	۱/۴۰	۰/۳۸۵	۰/۱۷۹
۲	۰-۱۰	لوم	۲۶	۴۴	۳۰	۰/۴۴۳	۱/۴۵	۰/۳۳۳	۰/۱۸۱
	۱۰-۳۰	لوم	۲۶	۴۱	۳۳	۰/۴۱۴	۱/۵۶	۰/۳۵۴	۰/۱۷۶
	۳۰-۶۰	لوم	۲۷	۴۲	۳۱	۰/۴۰۳	۱/۶۱	۰/۳۳۱	۰/۱۸۰
۳	۰-۱۰	لوم شنی	۷	۴۹	۴۴	۰/۳۹۵	۱/۵۹	۰/۲۲۰	۰/۱۱۲
	۱۰-۳۰	لوم شنی	۷	۴۷	۴۶	۰/۳۸۶	۱/۶۶	۰/۲۵۲	۰/۱۲۱
	۳۰-۶۰	لوم شنی	۸	۴۷	۴۵	۰/۳۷۶	۱/۷۶	۰/۲۰۱	۰/۰۸۹

نفوذ اندازه‌گیری شده در مزرعه در نظر گرفته شد. همچنین شرایط اولیه برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، بر اساس پتانسیل ماتریک تعریف شد؛ بدین ترتیب که به دلیل خشک بودن خاک (با توجه به رطوبت اولیه اندازه‌گیری شده در خاک)، پتانسیل ماتریک از ۱۰۰۰۰- سانتی‌متر تا ۴۰۰۰- سانتی‌متر بر اساس عمق خاک متغیر بود که بر این اساس پتانسیل ماتریک اولیه خاک، در محیط نرم‌افزار وارد شد.



شکل ۱- ابعاد و شرایط مرزی تعریف شده برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار HYDRUS2D/3D

به حالت پایه (ماندگار) رسیده باشد (Mirzaee et al., 2013 ; Omidvar et al., 2014). سپس با حفر خاک‌رخ در هر منطقه، از قسمت میانی لایه‌های ۱۰-، ۳۰- و ۶۰- سانتی‌متری خاک نمونه برداری شد و ویژگی‌هایی مانند بافت به روش هیدرومتری و چگالی ظاهری در هر لایه به روش نمونه برداری با سیلندر نمونه برداری (ارتفاع سیلندر معادل چهار سانتی‌متر و سطح مقطع معادل ۳۸/۵ سانتی‌متر مربع) و درصد اشباع به

پیاده‌سازی شرایط آزمایش نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های دوگانه در محیط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D

در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای شبیه‌سازی نفوذ غرقابی آب به خاک در روش استوانه‌های دوگانه، استفاده شد. بدین منظور، محدوده خاک مرطوب در زیر استوانه‌های دوگانه 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 ۱۰ سانتی‌متر و عمق خاک ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شرط مرز ورودی برای استوانه‌های داخلی و خارجی، بار آبی ثابت (ارتفاع آب روی سطح خاک برابر ۱۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد که برای استوانه داخلی ثابت و برای استوانه بیرونی با گذشت زمان متغیر و با تغییر جزئی (نزدیک به صفر) بود. شرایط مرزی برای محدوده سطح خاک در خارج از استوانه‌ها به صورت بدون جریان، تعریف شد. همچنین دیواره استوانه‌ها شرایط بدون جریان و برای مرز پایینی (عمق خاک) زهکشی آزاد تعریف شد (شکل ۱) (Pollalis and Valiantzas, 2015; Luo and Ren, 2011). در این مطالعه برای کمی‌نمودن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در نرم‌افزار HYDRUS، از مدل ون‌گونوختن-معلم با فرض $m=1-1/n$ استفاده شد. زمان نهایی نفوذ برای هر خاک برابر زمان نهایی

آزمون حساسیت

min^{-1}) و l پارامتر پیوستگی منافذ خاک (-)، با استفاده از چهار ویژگی زود یافت درصد رس، سیلت، شن و چگالی ظاهری اندازه-گیری شده در خاک و به کمک برنامه Rosetta که در نرم افزار HYDRUS-2D/3D موجود است، برآورد شد و به عنوان تخمین‌های اولیه برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲). در این شبیه‌سازی زمان نهایی نفوذ برابر با ۳۰۰ دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین از آنجا که در هر یک از منطقه‌های مورد مطالعه، بافت خاک در هر سه عمق نمونه‌برداری، یکسان بود، مقادیر تخمین اولیه پارامترهای هیدرولیکی برای هر سه لایه خاک در هر منطقه تقریباً یکسان بود (جدول ۲).

جدول ۲- مقادیر اولیه پارامترهای مدل ون‌گنوختن-معلم برای سه کلاس بافتی خاک مورد استفاده

بافت خاک	l	K_s (cm min^{-1})	n	α (cm^{-1})	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
Sandy Loam	۰/۵	۰/۱۲۶	۱/۶۶	۰/۰۰۴۸	۰/۳۸۷	۰/۰۴۰
Loam	۰/۵	۰/۰۵۷	۱/۴۸	۰/۰۰۰۹	۰/۴۲۵	۰/۰۱۰
Silty Clay	۰/۵	۰/۰۱۶	۱/۴۰	۰/۰۱۲۵	۰/۵۲۵	۰/۰۹۹

(Marquardt, 1963) برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال گرما و املاح به روش حل معکوس با استفاده از داده-های جریان گذرا و یا پایدار استفاده می‌شود. تابع هدف در این الگوریتم (میانگین مربعات خطای وزن دار ترکیبی) در یک قالب نسبتاً عمومی نوشته شده است به گونه‌ای که امکان استفاده از تعداد زیادی از انواع داده‌های اندازه‌گیری شده و اطلاعات در دسترس وجود دارد و به صورت زیر است:

$$\Phi(b, q, p) = \sum_{j=1}^m V_j \sum_{i=1}^m W_{i,j} [q_j^*(X, t_i) - q_j(X, t_i, b)]^2 + \sum_{j=1}^m V_j \sum_{i=1}^m W_{i,j} [p_j^*(X, \theta_i) - p_j(X, \theta_i, b)]^2 + \sum_{j=1}^k V_j [b_j^*(X) - b_j(X)]^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن m تعداد گروه اندازه‌گیری شده و k تعداد اندازه-گیری‌های در هر گروه است. $q_j^*(X, t_i)$ بیان‌گر مقدار اندازه-گیری شده گروه j ام در زمان t_i در نقطه X و $q_j(X, t_i, b)$ نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های مدل برای بردار پارامترهای بهینه-شده b (برای مثال پارامترهای هیدرولیکی خاک، انتقال گرما و / یا املاح و ...)، V_j و W_{ij} وزن‌های به ترتیب مربوط به گروه اندازه‌گیری j ام یا نقاط اندازه‌گیری شده است. جمله دوم سمت راست معادله فوق نشان‌دهنده تفاوت بین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک که به طور مستقل اندازه‌گیری شده‌اند و مقادیری که توسط مدل پیش‌بینی شده است (برای مثال نقاطی از منحنی مشخصه رطوبتی و یا هدایت هیدرولیکی) برای افق‌های مختلف خاک است. جمله آخر معادله یک تابع هدف

تحلیل حساسیت یکی از جنبه‌های مهم در مدل‌سازی به روش‌های عددی و تحلیلی می‌باشد (Fuladipannah, 2012). در این مرحله ابتدا مدل با شرایط اولیه و مرزی تعریف شده در بالا برای هر یک از خاک‌های مورد مطالعه به صورت جداگانه و به روش مستقیم (Direct modeling) اجرا شده و داده‌های نفوذ شبیه‌سازی شده در هر مورد استخراج شدند. برای این منظور پارامترهای مدل ون‌گنوختن-معلم شامل θ_r رطوبت باقی‌مانده ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θ_s رطوبت اشباع خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، α پارامتر مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا (cm^{-1})، n پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی (-)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (cm

سپس، برای انجام تحلیل حساسیت نفوذ آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای مدل ون-گنوختن-معلم شامل $l, K_s, \alpha, n, \theta_s$ و θ_r)، برای هر بافت خاک پارامتر مورد نظر یک درصد تغییر داده شد در حالی که سایر پارامترها مقدار اولیه خود را داشتند و مدل با این ترکیب پارامتری اجرا شده و داده‌های نفوذ استخراج شدند. در نهایت میزان حساسیت هر کدام از پارامترها از رابطه (۱) محاسبه شد (Šimůnek et al., 1999):

$$s(t, b) = \frac{|Y(b + \Delta b) - Y(b)|}{Y(b)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

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

بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک

رویکرد کلی در فرآیند بهینه‌سازی پارامترها، انتخاب یک تابع هدف به عنوان یک معیار برای اندازه‌گیری میزان تطبیق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مدل است که مستقیم یا غیرمستقیم به پارامترهای قابل تنظیم در آن مدل مربوط می‌شود. به گونه‌ای که دقیق‌ترین مقدار برای پارامترهای مدل مورد استفاده، با به حداقل رساندن این تابع هدف به دست می‌آید (Šimůnek et al., 2012). در نرم افزار HYDRUS از الگوریتم بهینه‌سازی لونیبرگ-مارکواردت

سازي پارامترها استفاده شد. در گروه دوم از نقطه FC به عنوان داده اضافي در کنار داده‌های نفوذ تجمعي استفاده شد و در گروه سوم از داده‌های نفوذ تجمعي، FC و PWP اندازه‌گيري شده در لایه‌های مختلف خاک‌های مورد مطالعه، برای بهينه‌سازي استفاده شد. در هر گروه نیز سه گزینه با تعداد متفاوت پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم به ترتيب شامل پنج پارامتر $(\theta_r, \theta_s, K_s, \alpha, n)$ ، چهار پارامتر $(\theta_s, K_s, \alpha, n)$ و سه پارامتر (K_s, α, n) برای بهينه‌سازي به روش حل معکوس تعريف شد.

برای نشان دادن اختلاف بين مقادير اوليه در نظر گرفته شده برای پارامترهای هیدرولیکی $b_j^*(X)$ و تخمین نهایی این پارامترها $b_i(x)$ است (Šimunek et al., 2012). در این پژوهش، ۹ گزینه بهينه‌سازي در سه گروه مجزا در نظر گرفته شد (جدول ۳) که در سه نوع خاک مورد مطالعه اجرا شد. در گروه اول تنها از داده‌های نفوذ تجمعي اندازه‌گيري شده (I) در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، به عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازي نفوذ آب به خاک و بهينه-

جدول ۳- گزینه‌های بهينه‌سازي تعريف شده در این پژوهش

پارامترهای هیدرولیکی انتخاب شده برای بهينه‌سازي					مجموعه‌های اندازه‌گيري شده	گروه	ردیف
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})			
+	+	+	+	+	I	۱	۱
-	+	+	+	+	I	۱	۲
-	-	+	+	+	I		۳
+	+	+	+	+	I+FC		۴
-	+	+	+	+	I+FC	۲	۵
-	-	+	+	+	I+FC		۶
+	+	+	+	+	I+FC+PWP		۷
-	+	+	+	+	I+FC+PWP	۳	۸
-	-	+	+	+	I+FC+PWP		۹

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

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\text{AIC} = 2K + N \ln \left(\frac{\text{SSE}}{N} \right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این روابط N تعداد مشاهدات، I_i میزان نفوذ تجمعي اندازه‌گيري شده، \hat{I}_i میزان نفوذ تجمعي شبیه‌سازي شده، میانگین نفوذهای تجمعي اندازه‌گيري شده، K تعداد پارامترهایی که به عنوان ورودی مدل، برای بهينه‌سازي انتخاب می‌شوند، X_{\max} بیشترین نفوذ تجمعي اندازه‌گيري شده و X_{\min} کمترین نفوذ تجمعي اندازه‌گيري شده در هر نوع خاک می‌باشد.

نتایج و بحث

با توجه به ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه (جدول ۱)، سه نوع خاک مورد مطالعه در این پژوهش، در سه گروه بافتی متفاوت شامل رس سیلتي Silty Clay (بافت ریز)، لوم Loam (بافت متوسط) و لوم شنی Sandy Loam (بافت درشت) قرار گرفتند.

شکل ۲ منحنی‌های نفوذ آب به خاک در سه منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است،

در این جدول در گزینه‌هایی که در آن‌ها پارامترهای θ_r و θ_s وارد فرایند بهينه‌سازي نشدند، پارامتر θ_r به دلیل دارا بودن ضریب حساسیت بسیار پایین، برابر با مقدار تخمینی برنامه ROSETTA در نظر گرفته شد.

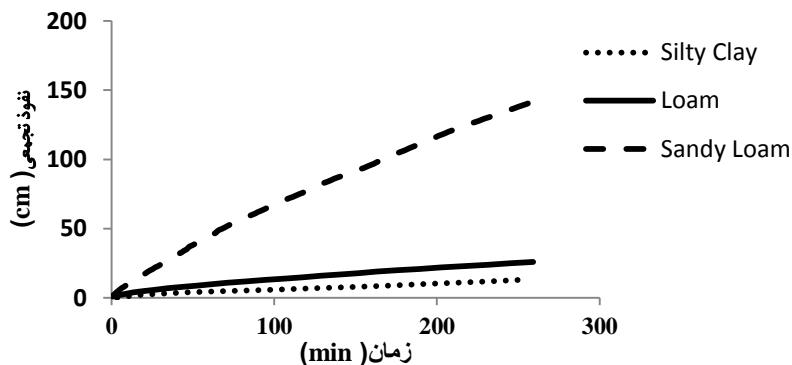
ارزیابی شبیه‌سازي‌های انجام شده

برای ارزیابی شبیه‌سازي عددی انجام گرفته با استفاده از مدل از شاخص‌های آماری متفاوتی مانند ضریب تبیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص آکائیکه (AIC) استفاده شد. گزینه‌ایی که دارای مقادير RMSE، NRMSE و نیز AIC کوچک‌تر و R^2 بزرگتری باشد، از خطای شبیه‌سازي کمتری برخوردار است. فرمول‌های مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های مورد استفاده در روابط ۳ تا ۶ مشخص شده است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I}_i)^2} - 1 \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

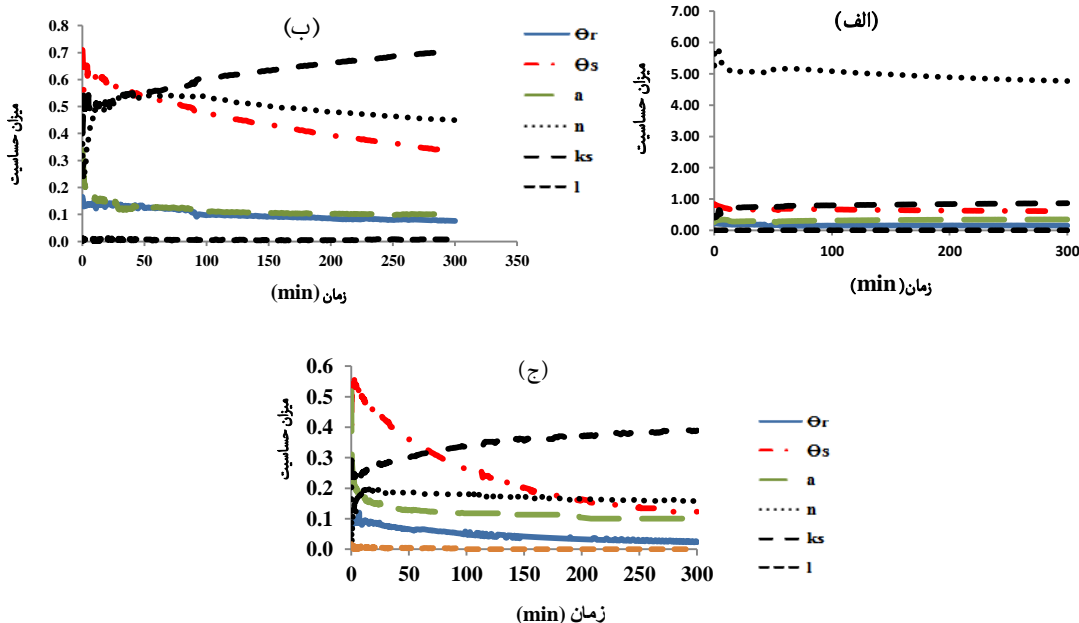
سرعت نفوذ آب به خاک با زمان، در خاک درشت بافت (Sandy Loam) بسیار زیادتر از سرعت نفوذ آب به خاک‌های با بافت متوسط (Loam) و ریز (Silty Clay) بوده است.



شکل ۲- منحنی نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در سه بافت مورد مطالعه

پارامتر صرفنظر نمود. همچنین نفوذ تجمعی آب به خاک ریزبافت رس سیلتی (Silty Clay)، در تمام مدت زمان نفوذ، بیشترین حساسیت را نسبت به پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی (n) داشته (ضریب حساسیت در حدود ۵) و پس از آن به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و رطوبت اشباع (θ_s) قرار گرفتند (شکل ۳- الف). از آنجایی که پارامتر n شاخصی از توزیع اندازه‌های منافذ است، به نظر می‌رسد همین امر عامل حساسیت زیاد این پارامتر در این نوع خاک‌ها است. Šimunek *et al.* (1998) در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس از طریق آزمایش تبخیر از ستون خاک، به نتیجه مشابهی دست پیدا کردند.

شکل ۳ ضرایب حساسیت نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی مختلف در سه بافت مورد مطالعه را، در طول مدت زمان تعیین شده برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک (۳۰۰ دقیقه)، نشان می‌دهد. بر اساس نتایج آزمون حساسیت، در همه خاک‌ها کمترین ضریب حساسیت مربوط به پارامترهای پیوستگی منافذ معادله ون گنوختن- معلم (l) و رطوبت باقیمانده (θ_r) بود که با گزارش‌های *Abbasi et al.* (2003) و *Ines and Droogers* (2002) همخوانی دارد. بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته توسط این محققین، دو پارامتر θ_r و l به عنوان پارامترهای غیرحساس، کمترین تاثیر 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



شکل ۳- میزان حساسیت نفوذ تجمعی غرقابی آب به خاک نسبت به پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم در خاک (الف) رس سیلتی، (ب) لوم و لوم شنی (ج)

که این نتیجه با یافته‌های (Šimůnek et al., 1998) همخوانی دارد. (Hopmans et al., 2002) نیز گزارش نمودند که با کاهش تعداد پارامترهای مورد نظر برای بهینه‌سازی به روش حل معکوس، احتمال دستیابی به پاسخ‌های منحصر به فرد (Unique) با درجه اطمینان بالا، افزایش می‌یابد.

در هر سه نوع بافت خاک، استفاده از داده‌های مربوط به رطوبت اندازه‌گیری‌شده در پتانسیل ماتریک 330 سانتی‌متر (FC) باعث کاهش خطای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک شد و مقادیر SSE ، $RMSE$ و AIC در این شرایط نسبت به زمانی که تنها از داده‌های نفوذ تجمعی به عنوان ورودی مدل استفاده شده بود، کاهش یافت. محققان زیادی در پژوهش‌های خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی به عنوان داده ورودی در حل معکوس مسایل حرکت آب در خاک، به تنهایی اطلاعات کافی برای دستیابی به پاسخ مطمئن و منحصر به فرد را فراهم نمی‌کند (Hopmans et al., 2002; Nakhaei and Šimůnek, 2014; Ritter et al., 2004; Russo et al., 1991). با این وجود استفاده هم‌زمان از داده‌های FC و PWP به عنوان اطلاعات تکمیلی در کنار داده‌های نفوذ تجمعی باعث افزایش خطای شبیه‌سازی (افزایش مقادیر SSE ، $RMSE$ و AIC) گردید. منحنی مشخصه رطوبتی خاک به شکل طبیعی از سه بخش تشکیل شده است که شامل ناحیه اشباع مویینه، ناحیه غیراشباع و ناحیه رطوبت باقی‌مانده می‌شود (Sillers et al., 2001). نقطه FC در ناحیه غیراشباع منحنی مشخصه رطوبتی واقع شده که دارای پتانسیل ماتریک نسبتاً زیادی است و تحت تاثیر بافت، ساختمان، توزیع و پیوستگی منافذ خاک قرار دارد. در حالی که نقطه PWP در نزدیکی قسمت رطوبت باقی‌مانده و با پتانسیل ماتریک بسیار منفی بوده و غالباً تحت تاثیر بافت خاک قرار دارد. به نظر می‌رسد ویژگی‌های هیدرولیکی (نگهداشت آب) خاک در حالت FC به شرایط نفوذ در آزمایش استوانه‌های دوگانه، نسبت به PWP، بسیار نزدیک‌تر است. بنابراین استفاده از داده‌های FC در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به عنوان اطلاعات تکمیلی از طریق کاهش خطای شبیه‌سازی، باعث بهبود فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک شده است. همچنین مقادیر بالاتر R^2 مربوط به نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده در خاک‌های با بافت درشت‌تر (جدول ۵) نشان می‌دهد که مدل‌سازی حرکت آب در خاک‌های درشت‌بافت با خطای کم تری همراه بوده است.

در نهایت از میان تمامی گزینه‌های تعریف‌شده در هر سه نوع بافت خاک، کمترین مقادیر SSE ، $RMSE$ و AIC و بیش‌ترین مقدار R^2 مربوط به گزینه‌ای بود که در آن شبیه‌سازی با

در تجزیه و تحلیل حساسیت انجام‌شده برای خاک لومی (Loam)، نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامترهای n ، K_s و θ_s حساس بود (شکل ۳-ب). در خاک شن لومی (Sandy Loam) حساس‌ترین پارامتر در شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک، پارامتر K_s بود که میزان حساسیت این پارامتر با زمان اندکی افزایش داشت و سایر پارامترها از حساسیت بسیار کم‌تری برخوردار بودند. همچنین رطوبت اشباع (θ_s) در زمان‌های اولیه آزمایش از حساسیت بالایی برخوردار بود (ضریب حساسیت معادل $0/57$) که با گذشت زمان از حساسیت آن کاسته شد (شکل ۳-ج). (Abbasi et al., 2003) و (Rocha et al., 2006) نتایج مشابهی در رابطه با میزان تاثیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بر آب موجود در خاک و نیز میزان انتقال املاح در خاک ارائه نمودند.

از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک، رطوبت خاک در حالت اشباع (θ_s) دارای مفهوم فیزیکی بوده و به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری است (Ritter et al., 2003)، بنابراین می‌توان این پارامتر را در مقدار اندازه‌گیری‌شده 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 (Hopmans et al., 2002).

نتایج مقایسه‌های آماری بین داده‌های نفوذ تجمعی شبیه‌سازی‌شده به روش حل معکوس و داده‌های اندازه‌گیری‌شده نفوذ تجمعی از طریق استوانه‌های دوگانه، در گزینه‌های تعریف‌شده در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در این جدول، نرم‌افزار HYDRUS در گزینه‌هایی که پنج پارامتر n ، a ، K_s و θ_s به صورت هم‌زمان برای بهینه‌سازی انتخاب شده بودند، در هیچ‌کدام از بافت‌های مورد مطالعه، هم‌گرا نشده و روش حل معکوس به پاسخی جهت برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، نرسیده است. (Russo et al., 1991) نیز به این نتیجه رسیدند 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.

در بیش‌تر گزینه‌ها و در هر سه بافت خاک، 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 می‌یابد

ضریب تبیین (R^2) بین داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، دارای بهترین عملکرد در فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک بوده است. جدول ۶ مقادیر بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی را در خاک‌های مورد مطالعه در گزینه (3P+FC) نشان می‌دهد.

انتخاب سه پارامتر n ، α و K_s برای بهینه‌سازی انجام گرفت و مقادیر FC در کنار داده‌های نفوذ تجمعی به عنوان ورودی مدل برای حل معکوس استفاده شد (3P+FC) (جدول ۳). بنابراین این گزینه با کمترین میزان خطا در شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه و بیش‌ترین

جدول ۴- نتایج مقایسات آماری نفوذ آب تجمعی اندازه‌گیری شده در خاک و شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D

عدم هم‌گرایی در مدل‌سازی

Silty Clay				Loam				Sandy Loam				گزینه
SSE (cm ³) ²	RMSE (cm ³)	R ²	AIC	SSE (cm ³) ²	RMSE (cm ³)	R ²	AIC	SSE (cm ³) ²	RMSE (cm ³)	R ²	AIC	
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	5P (n, α, K _s , θ _s , θ _t)
۱۱۳۰۳۱۷۸	۹۳۲/۴	۰/۹۷۲۸	۱۲۵۱	۴۴۰۴۱۲۳	۴۸۱/۴	۰/۹۹۵۶	۹۷۸	۲۷۱۷۰۰۳۰۹	۱۶۴۸/۳	۰/۹۸۸۸	۱۴۹۰	5P+FC
۱۳۰۳۲۵۲۰	۱۰۰/۱/۲	۰/۹۶۷۸	۱۲۶۴	۳۱۶۶۴۷۳	۴۰۸/۲	۰/۹۹۷۹	۹۵۳	۲۷۱۸۹۸۳۸۵	۱۶۴۸/۹	۰/۹۸۸۷	۱۴۹۱	5P+PWP
۱۵۹۴۷۱۸۶	۱۱۰۷/۵	۰/۹۵۷۶	۱۲۸۱	۲۲۱۱۶۱۲	۳۴۱/۱	۰/۹۹۸۳	۹۲۶	۲۷۰۶۶۰۳۳۶	۱۶۴۵/۱	۰/۹۸۸۸	۱۴۹۱	5P+FC+PWP
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	4P (n, α, K _s , θ _s)
۸۲۵۴۶۳۳	۷۹۶/۸	۰/۹۸۷۹	۷۲۶	۶۱۹۱۱۳۴	۵۷۰/۸	۰/۹۹۶۶	۶۲۲	#	#	#	#	4P+FC
۳۳۲۵۵۶	۱۵۹/۹	۰/۹۹۵۷	۵۵۹	۱۲۴۷۹۳	۸۱/۰	۰/۹۹۸۳	۴۳۷	۳۸۴۸۷۸۵۸	۶۲۰/۳	۰/۹۹۹۲	۱۲۹۴	4P+PWP
۱۸۱۱۸۱۸	۳۷۳/۳	۰/۹۹۵۳	۶۴۷	۳۴۱۹۴۱	۱۳۴/۱	۰/۹۹۸۱	۴۵۸	۹۲۲۹۶۸۵۵	۹۶۰/۷	۰/۹۹۸۴	۱۳۸۱	4P+FC+PWP
۶۶۳۷۶۹۳	۷۱۴/۵	۰/۹۸۶۱	۷۱۵	۴۰۵۲۲۰	۱۴۶/۰	۰/۹۹۸۱	۴۹۳	۸۱۵۴۷۰۸۲	۹۰۳/۰	۰/۹۹۸۷	۱۳۶۹	4P+FC+PWP
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	3P (n, α, K _s)
۷۷۶۰۴۴۵	۷۷۲/۶	۰/۹۸۶۹	۳۹۰	۸۶۶۹۴۵	۲۱۳/۶	۰/۹۹۸۸	۲۹۶	۴۳۸۰۷۵۹۶	۶۶۱/۸	۰/۹۹۹۱	۱۳۰۵	3P+FC
۳۰۶۸۱۷	۱۵۳/۶	۰/۹۹۸۳	۲۹۸	۱۱۸۶۲۷	۷۹/۰	۰/۹۹۸۸	۲۴۲	۲۷۹۰۰۸۷۱	۵۲۸/۲	۰/۹۹۹۵	۱۲۵۹	3P+PWP
۴۵۴۱۸۸	۱۸۶/۹	۰/۹۹۶۰	۳۰۹	۲۱۵۴۵۸	۱۰۶/۴	۰/۹۹۸۷	۲۵۸	۴۱۲۷۶۹۷۹	۶۴۲/۴	۰/۹۹۹۱	۱۲۹۹	3P+FC+PWP
۶۸۰۱۰۳۳	۷۲۳/۲	۰/۹۸۸۳	۳۸۶	۷۱۷۳۰۸	۱۹۴/۳	۰/۹۹۹۱	۲۹۱	۳۸۰۱۰۹۳۱	۶۱۶/۵	۰/۹۹۹۳	۱۲۹۰	3P+FC+PWP

P: پارامترهای هیدرولیکی خاک که برای فرآیند بهینه‌سازی انتخاب و وارد مدل شدند.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بهینه‌شده در گزینه (3P+FC) در سه نوع خاک مورد مطالعه

l*	θ _t (cm ³ cm ⁻³)*	θ _s (cm ³ cm ⁻³)*	α (cm ⁻¹)	n (-)	K _s (cm min ⁻¹)	عمق (cm)	بافت
۰/۵	۰/۰۹۹	۰/۵۲۵	۰/۰۱۲۵	۱/۳۶	۰/۰۰۰۳۰	۰-۱۰	SiC
			*(۰/۵۷۷-۰/۶۰۵)	(-۱/۵۰-۴/۲۲)	(-۰/۰۰۱۴-۰/۰۱۵)		
۰/۵	۰/۰۹۷	۰/۵۱۱	۰/۰۱۲۲	۱/۳۷	۰/۰۰۰۳	۱۰-۳۰	SiC
			(-۰/۱۸۵-۰/۱۹۸)	(-۰/۹۷-۳/۷۲)	(-۰/۰۷۶-۰/۰۷۷)		
۰/۵	۰/۰۹۶	۰/۴۹۸	۰/۰۱۱۷	۱/۴۰	۰/۰۰۰۲	۳۰-۶۰	SiC
			(-۲/۹۵۹-۲/۹۸۲)	(-۷/۳-۱۰/۱۱)	(-۰/۰۵۶-۰/۰۵۶)		
۰/۵	۰/۰۱۰	۰/۴۲۵	۰/۰۰۷	۱/۴۱	۰/۰۰۰۸	۰-۱۰	L
			(-۰/۰۶۳-۰/۰۷۹)	(۰/۵۶-۲/۲۵)	(-۰/۰۰۱۰-۰/۰۰۲۶)		
۰/۵	۰/۰۱۰	۰/۴۰۶	۰/۰۰۸۵	۱/۳۹	۰/۰۰۱۳	۱۰-۳۰	L
			(-۰/۰۵۳-۰/۰۷۰)	(-۱/۴۰-۴/۲۰)	(-۰/۰۱۲۷-۰/۰۱۵۲)		
۰/۵	۰/۰۱۰	۰/۴۰۴	۰/۰۰۷۰	۱/۴۰	۰/۰۰۰۱	۳۰-۶۰	L
			(-۰/۰۴۶-۰/۰۶۰)	(-۷/۲۹-۱۰/۱۰)	(-۰/۰۰۰۹-۰/۰۰۱۰)		
۰/۵	۰/۰۵۰	۰/۴۵۷	۰/۰۰۶	۱/۶۸	۰/۰۰۶۷	۰-۱۰	SL
			(-۰/۰۶۵-۰/۰۷۹)	(۰/۲۸-۳/۰۸)	(-۰/۰۱۰۷-۰/۰۲۴۲)		
۰/۵	۰/۰۴۸	۰/۳۷۸	۰/۰۰۶	۱/۶۶	۰/۰۱۳۶	۱۰-۳۰	SL
			(-۰/۰۴۳-۰/۰۵۵)	(-۶/۲۶-۹/۵۸)	(-۰/۰۶۶۷-۰/۰۹۳۸)		
۰/۵	۰/۰۴۹	۰/۳۸۷	۰/۰۱۵	۱/۵۵	۰/۰۰۰۲	۳۰-۶۰	SL
			(-۰/۴۹۲-۰/۵۲۲)	(-۱۴/۵۱-۱۷/۵۳)	(-۰/۰۳۴۱-۰/۰۳۴۵)		

*: پارامترهایی که در فرآیند شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار نگرفته و در مقادیر مشخص شده، ثابت فرض شدند. **: فواصل اطمینان ۹۵٪

پارامترهای هیدرولیکی خاک برخوردار بودند. از آنجا که θ_s دارای مفهوم فیزیکی بوده و به صورت مستقل و با روش‌های ساده آزمایشگاهی قابل اندازه‌گیری است، می‌توان با ثابت نگهداشتن این پارامتر در مقدار اندازه‌گیری شده آن، تعداد پارامترهای ورودی مدل را کاهش داده و از این طریق دقت تخمین سایر پارامترهای هیدرولیکی را افزایش داد. همچنین استفاده از اطلاعات تکمیلی مانند میزان رطوبت خاک در پتانسیل ماتریک برابر 330 سانتی‌متر (FC) در کنار داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه، باعث کاهش خطا در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک شد. در حالی که استفاده هم‌زمان از اطلاعات FC و PWP به عنوان داده‌های اضافی، خطای شبیه‌سازی را افزایش داد.

REFERENCES

- Abbasi, F., and Tajik, F. (2007). Inverse simultaneous estimation of hydraulic and solute transport parameters in soil at field scale. *J. Sci. Technol. Agric. Nat. Resour.*, 11(1A), 111–122. (In Farsi)
- Abbasi, F., Šimůnek, 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.
- Alletto, L., Pot, V., Giuliano, S., Costes, M., Perdrioux, F., Justes, E. (2015) Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243(244), 18–28.
- 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*, (226–227), 8–20.
- El-Nesr, N. M., Alazba, A. A., and Šimůnek, J., (2014). HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrig. Sci.*, 32, 111–125.
- Fuladipannah, M. (2012). Sensitivity analysis of one dimensional hydrodynamic fully coupled model. *Middle-East J. Scientific Res.*, 12 (11), 1471–1476.
- Ghaiumi Mohammadi, H and Nurbakhsh, F. (2007). Detailed soil survey of Chahar-Takhteh Agricultural research station (Chaharmahal and Bakhtiari Province). Technical report, No, 6399. 27 p. (In Farsi)
- Ghorbani Dashtaki, Sh., Homaei, M., Mahdian, M. H., and Kouchakzadeh, M. (2009). Site-dependence performance of infiltration models, *Water Resour. Manage.*, 23, 2777–2790.
- Hopmans, J. W., Šimůnek, 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.
- Ines, A. V. M., and Droogers, P. (2002). Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6, 49–66.
- Kandelous, M. M., and Šimůnek, J. (2010). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agric. Water Manage.*, 97, 1070–1076.
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1-Physical and Mineralogical Methods.* 2nd ed., Agronomy No. 9. ASA/SSSA Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- 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.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *J. Appl. Ind. Math.*, 11, 431–441.
- 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 Sci.*, <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2013.823477> _In Taylor & Francis
- Nakhaei, M., and Šimůnek, 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.
- 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,

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS 2D/3D برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک از طریق نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، استفاده شد. نتایج نشان داد که روش حل عددی معکوس می‌تواند به عنوان یک روش نسبتاً ساده و سریع در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه مد نظر قرار گیرد. همچنین مشخص شد که با کاهش تعداد پارامترهای هیدرولیکی انتخاب شده برای بهینه‌سازی به عنوان پارامترهای ورودی مدل، خطای شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. بنابراین انجام آزمون حساسیت برای تشخیص پارامترهای حساس‌تر برای استفاده در فرآیند مدل‌سازی ضروری است. در این پژوهش، پارامترهای K_s ، n و a و θ_s از حساسیت زیاد نسبت به سایر

- theoretical, and experimental approach. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 141(2), 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000796.
- Raof, 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.
- Ramos, T. B., Šimůnek, J., Gonçalves, 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.
- Rashid, N.S.A., Askari, M., Tanaka, T., Šimůnek, J., and van Genuchten, M.Th. (2015). Inverse estimation of soil hydraulic properties under oil palm trees. *Geoderma*, (241–242), 306–312.
- Ritter, A., Hupet, F., Carpena, R. M., Lambot, S., and Van Clooster, M. (2003). Using Inverse Methods for Estimating Soil Hydraulic Properties from Field Data as an Alternative to Direct Methods. *Agric. Water Manage.*, (59), 77–96.
- Ritter, A.R., Carpena, M., Regalado, C.M., Vanclooster, M., and Lambot, S.(2004). Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. *J. Hydrol.*, (295), 124–139.
- 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 Resour. Res.*, (27), 1361–1373.
- Rocha, D., Abbasi, F. and Feyen, J. (2006). Sensitivity analysis of soil hydraulic properties on subsurface water flow in furrows. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 132(4), 418–424.
- Sillers, W.S., Fredlund, D.G., and Zakerzadeh, N. (2001). Mathematical attributes of some soil–water characteristic curve models. *Geotech. Geol. Eng.*, (19), 243–283.
- Šimůnek, J. and van Genuchten, M. Th. (1996). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resour. Res.*, 32(9), 2683–2696.
- Šimůnek, 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.
- Šimůnek, J., Šejna, 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.
- Šimůnek, J., Šejna, M. and van Genuchten, M. Th. (2012). HYDRUS: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1261–1274.
- 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 Infiltrometer Data. *Vadose Zone J.*, 5(2), 684–696.
- Toomanian, N. (2009). Detailed soil survey of Khor and Biabanak(Naiin). Technical report.No, 654. 100p. (In Farsi)
- 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.
- 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.
- Zhou, Q., Kang, S., Zhang, L., and Li, F. (2007). Comparison of APRI and HYDRUS-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation. *Plant Soil*, 291(1), 211–223.