

تعیین پارامترهای جریان، انتقال مواد محلول و حرارت با انجام آزمایش‌های نفوذ در خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای

محمد نخعی^{۱*}

۲- استاد زمین‌شناسی، گروه علوم زمین، دانشگاه خوارزمی
* نویسنده مسئول: nakhaeimohammad@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۳

چکیده

مدل‌سازی فرایند جریان آب، انتقال حرارت و انتقال آلودگی در خاک، نیاز به پارامترهای هیدرودینامیکی، هدایت حرارتی و ضریب پراکندگی در خاک دارد. هدف از این مطالعه ارزیابی پارامترهای مشخصه این خواص از یک آزمایش گذار جریان و انتقال ماده محلول و حرارت است. در طی دو آزمایش نفوذ، یکی به مدت ۲۴ ساعت در ستون خاک ماسه و دیگری به مدت ۳۶ ساعت در ستون خاک سیلت ثبت داده صورت گرفت. برای پایش دمای خاک در اعماق ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتر در هر ستون سنسورهای حرارتی نصب گردید و دمای آب نفوذ داده شده در ۴۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم و نفوذ پایدار از یک منبع توسط پمپ پریستالتیک تحت نظارت قرار گرفت. محلول یک مولار KCl در حالت پایدار، روی ستون‌های مجزا از خاک‌های ماسه و سیلت تزریق و در طی آزمایش نمونه‌برداری آب و اندازه‌گیری درجه حرارت در اعماق ۴ و ۸ و ۱۲ سانتیمتری ثبت گردید. پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای شکل در معادله ون گنوختن α و n)، پارامتر انتقال (ضریب پراکندگی طولی) و پارامترهای هدایت حرارتی خاک (ضرایب b_1 ، b_2 و b_3 در تابع هدایت حرارتی خاک چانگ و هورتون) با استفاده از مدل‌سازی معکوس با مدل HYDRUS-1D تخمین زده شد. منحنی‌های رخنه برداشت شده و منحنی‌های حرارت اندازه‌گیری شده دستیابی به این پارامترها را با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D موفقیت‌آمیز نشان می‌دهد. اعتبار سنجی نتایج با مقایسه داده‌های غلظت KCl و حرارت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل با محاسبه ریشه میانگین مربع خطا RMSE و ضریب R^2 انجام گردید. نتایج نشان دهنده کارایی بالای مدل‌سازی معکوس در تخمین پارامترهای جریان، انتقال مواد محلول و انتقال حرارت در خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای است. حل معکوس در زمانی که از داده‌های درجه حرارت خاک همزمان با غلظت کلر در تابع هدف استفاده می‌شود، دارای جواب یگانه است. از نتایج ارزش شمند این تحقیق به‌کارگیری ارزان‌ترین ردیاب یعنی دما همزمان با داده‌های غلظت در به دست آوردن جواب‌های یکتا از تخمین توابع هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌ای و سیلتی به روش حل معکوس است.

واژه‌های کلیدی: نفوذ، انتقال حرارت، انتقال مواد محلول، حل معکوس، HYDRUS-1D.

مقدمه

نظیر نفوذ، ذخیره رطوبت خاک، تبخیر، آب مصرفی گیاهان، تغذیه آب‌های زیرزمینی، رواناب و هوازدگی ایفا می‌کند. حرکت همزمان آب و حرارت در زون غیراشباع در مناطق خشک و نیمه‌خشک در ارزیابی توازن انرژی و آب محیط‌های زیرسطحی

امروزه اهمیت زون غیراشباع به عنوان بخش جدایی‌ناپذیر چرخه هیدرولوژی شناخته شده است. از جنبه‌های مختلف هیدرولوژی، زون غیراشباع نقش بسیار مهمی را در فرآیندهایی

در زمینه مهندسی و کشاورزی موضوع مورد مطالعه برخی از محققان بوده است (سایتو و همکاران، ۲۰۰۷). اگرچه امروزه تأثیر متقابل حرکت آب و حرارت بر یکدیگر به‌ویژه در شرایط خشک شناخته شده است (نثار و هورتون، ۱۹۹۲؛ ساکائی و همکاران، ۲۰۰۹)، اما تحقیقات اندکی در عمل و به‌صورت کاربردی این اثر متقابل را مورد بررسی قرار داده‌اند. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش نفوذ کاربرد گسترده‌ای برای به دست آوردن خواص هیدرولیک خاک دارد. نفوذ فرایند ورود آب به خاک است. میزان نفوذ آب در خاک، میزان نفوذ آن است. میزان نفوذ و تغییرات آن با زمان بستگی به مقدار اولیه آب، و نیز بر روی بافت، ساختار و یکنواختی (یا لایه‌بندی لایه‌ای) مشخصات خاک دارد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۲). عواملی که بر میزان نفوذ تأثیر می‌گذارند، به کلاس خاک، سطح، مدیریت و خواص طبیعی تقسیم شده‌اند (هورتون، ۱۹۳۳). خصوصیات خاک شامل اندازه ذرات، ویژگی‌های مورفولوژیکی، خواص شیمیایی و میزان محتوی رطوبت خاک می‌باشند. عوامل سطحی آن هستند که بر حرکت آب از طریق رابط هوا و خاک مانند پوسته خاک تأثیر می‌گذارد. در هنگام بررسی نفوذ آب، این عوامل باید مورد توجه قرار گیرند. به‌طور کلی جریان آب در محیط غیر اشباع با استفاده از معادله ریچارد توصیف شده است. حل این معادله به اطلاعاتی از قبیل توابع هیدرولیکی خاک شامل منحنی نگهداشت خاک $(\theta(h))$ و تابع هدایت هیدرولیکی $(K(h))$ نیاز دارد. جهت تعیین این توابع غیر خطی، روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی مختلفی وجود دارد (دیرکسن، ۱۹۹۱؛ کلوته ۱۹۸۶). بدین منظور روش‌هایی که دارای مزیت‌هایی از قبیل کمترین زمان مورد نیاز، کمترین برهم زدن بافت خاک و کمترین هزینه را دارند، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. بیشتر روش‌های حل مستقیم، محدود به تعیین شرایط اولیه و مرزی بوده و اندازه‌گیری را زمان‌بر و پرهزینه می‌نمایند. روش‌های مستقیم جهت تعیین منحنی نگهداشت رطوبت خاک شامل تعادل خاک در بار فشار مشخص یا اندازه‌گیری‌های همزمان محتوی رطوبتی خاک و بار فشار در طول نفوذ یا زهکشی در خاک می‌باشند (دین و تاپ، ۲۰۰۲). زمانی که از روش مدل‌سازی معکوس استفاده می‌شود، پارامترهای مجهول با کمینه کردن اختلاف بین متغیرهای مشاهده‌ای و خروجی‌های مدل برای جریان پایدار یا ناپایدار بهینه می‌شوند (کول و پارکر،

۱۹۸۷؛ کول و همکاران، ۱۹۸۷). با استفاده از مدل‌های تحلیلی یا عددی، داده‌های جریان ناپایدار می‌تواند به شکل معکوس مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد (شیمونک و ون گنوختن، ۱۹۹۶؛ شیمونک و همکاران، ۱۹۹۸). مطالعات و تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که بررسی فرآیندهای مختلف به‌طور همزمان باهم می‌تواند درجه ناهمگرایی حل معکوس را در بهینه یابی پارامترها کاهش دهد. به‌طوری که با آنالیز همزمان داده‌های مربوط به متغیرهای جریان آب و انتقال آلاینده، می‌توان عدم قطعیت در بهینه یابی پارامترها را به‌طور چشمگیری کاهش داد (اینوئه و همکاران، ۲۰۰۰؛ شیمونک و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین در تحقیقات دیگری که به طور همزمان به بررسی داده‌های مربوط به متغیرهای جریان آب و انتقال حرارت پرداخته‌اند، نتایج مشابهی حاصل شده است (هاپمن و همکاران، ۲۰۰۲؛ مورتسن و همکاران، ۲۰۰۶). جهت تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک، تحلیل داده‌های تجربی نفوذ آب به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرخ نفوذ و تغییرات آن نسبت به زمان بستگی به محتوی رطوبتی اولیه خاک، بافت، ساختار و یکنواختی مقطع خاک دارد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۲). در کارهای آزمایشگاهی به منظور تخمین منحنی هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $(K(h))$ ، از آزمایش نفوذ استفاده می‌شود. در گذشته تلاش‌های زیادی برای تخمین خواص هیدرولیکی خاک با آزمایش‌های تجربی نفوذ از حوضچه تغذیه یا از طریق مکش صورت گرفته است (بوهنه و همکاران، ۱۹۹۲؛ روسو و همکاران، ۱۹۹۱). برخی از این مطالعات به این نتیجه رسیده‌اند که منحنی تجمعی نفوذ حاصل از آزمایش‌های تجربی نفوذ از حوضچه تغذیه یا از طریق مکش، اطلاعات کافی برای تهیه یک مدل مناسب بهینه‌یابی پارامترها فراهم نمی‌کنند و اطلاعات تکمیلی بیشتری جهت ایجاد حل منحصر به فرد برای تعداد زیاد پارامترها مورد نیاز است (شیمونک و ون گنوختن، ۱۹۹۶). این اطلاعات تکمیلی شامل محتوی رطوبتی و یا بار فشار، غلظت محلول یا دمای اندازه‌گیری شده در یک عمق مشخص در زیر سطح خاک می‌باشد. در گذشته مطالعات اندکی بر روی ارزیابی همزمان پارامترهای انتقال حرارت و مواد و پارامترهای هیدرولیکی خاک شده است. بنابراین تأثیر متقابل انتقال حرارت بر جریان آب و مواد محلول اغلب نادیده گرفته شده است. نخعی و شیمونک (۲۰۱۴)، با استفاده از کد

محتوی رطوبت باقیمانده (S_r) و محتوی رطوبت اشباع (S_s) می‌تواند یگانگی جواب را بهبود دهد و خطای تخمین پارامترهای تجربی شکل در معادله ون گنوختن (α و n) را برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(h)$ و تابع نگهداشت آب $\theta(h)$ کاهش دهد. هدف اول از اجرای این تحقیق ساخت یک مدل فیزیکی یک بعدی ستون خاک جهت برداشت همزمان داده‌های آزمایشگاهی نفوذ، دمای خاک و غلظت کلرور پتاسیم KCl در سه عمق در دو نمونه خاک ماسه‌ای و سیلتی می‌باشد. هدف دوم تخمین پارامترهای خاک به‌طور همزمان با تجزیه و تحلیل داده‌های جریان آب و انتقال حرارت و مواد محلول با استفاده از روش حل معکوس توسط مدل HYDRUS-1D می‌باشد. انواع مختلفی از ردیاب از قبیل ردیاب‌های ایزوتوپی و ردیاب‌های شیمیایی برای آزمایش‌ها رخنه استفاده شده است. محلول کلرور پتاسیم به عنوان یک ردیاب شیمیایی مناسب برای انجام آزمایش رخنه با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی برای کلرید پتاسیم (KCl) به عنوان آسان‌ترین راه پیشنهاد شده است (مالانت و همکاران، ۱۹۹۴؛ گونکالوس و همکاران، ۲۰۰۱). با این حال توصیف جریان آب و انتقال مواد محلول در خاک یک فرآیند پیچیده است که نیاز به اتصال مدل‌های مکانیکی با داده‌های مناسب از تغییرات غلظت ماده محلول و حرارت دارد. ابعاد ستون‌های خاکی که در تحقیقات پیشین ذکر شده‌اند از قطر چند سانتیمتر تا ۱۰۰ سانتیمتر و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر تا بیش از ۳ متر متغیر است (واندربورت و ورسکن، ۲۰۰۷).

مواد و روش کار

وسایل مورد نیاز جهت تهیه مدل فیزیکی (آزمایشگاهی) مورد نظر شامل دو لوله از جنس پلاستیک فشرده، به طول‌های ۱۶ و قطر داخلی ۷/۵ سانتی‌متر، تعداد ۳ سنسور اندازه‌گیری دما، پمپ آزمایشگاهی پریستالیتیک جهت شبیه‌سازی نفوذ پایدار، توری فلزی با اندازه منافذ ۰/۰۰۲ میلی‌متر جهت پوشاندن انتهای لوله‌ها برای جلوگیری از خروج دانه‌های خاک، برد آردوینو مگا Arduino MEGA R3-2560 جهت ثبت داده‌های اندازه‌گیری شده از سنسورهای دما (شکل ۱) و کامپیوتر برای ثبت داده به صورت اتوماتیک می‌باشند.

HYDRUS-2D و حلقه‌های نفوذ، پارامترهای هیدرولیکی و توابع هدایت گرمایی را در مطالعات صحرایی اندازه‌گیری کرده و بهینه یابی نمودند. آن‌ها نشان دادند که درجه حرارت جمع‌آوری شده در چهار سنسور در چهار عمق مختلف با نفوذ تجمعی می‌تواند اطلاعات مورد نیاز برای تخمین همزمان خصوصیات حرارتی و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را فراهم کند. شیمونک و همکاران (۲۰۰۲) پارامترهای انتقال ماده محلول را با استفاده از مدل معکوس و روش‌های بهینه‌یابی در HYDRUS-2D ارزیابی کردند. آن‌ها روش حل معکوس را برای تخمین ضرایب پراکندگی و انتشار خاک تأیید نمودند. اینووی و همکاران (۲۰۰۰)، پارامترهای هیدرولیکی و انتقال مواد محلول در خاک را از آزمایش‌ها نفوذ ناپایدار به روش حل معکوس بدست آوردند. شیمونک و همکاران (۱۹۹۸)، با استفاده از روش مدل‌سازی معکوس پارامترهای هیدرولیکی خاک را از داده‌های نفوذسنج دیسکی محاسبه کردند. آن‌ها نشان دادند حل معکوس با آزمایش دیسک نفوذسنج دارای جواب یگانه است. مدل‌سازی همزمان جریان آب و انتقال حرارت در خاک در کد HYDRUS-1D به کار رفته است (شیمونک و همکاران، ۲۰۰۶). برنامه HYDRUS-1D یک مدل یک بعدی است که معادله ریچاردز (۱۹۳۱) را برای جریان در محیط اشباع و غیر اشباع، معادله جابجایی-پراکندگی را برای انتقال مواد محلول و معادله هدایت حرارت را به شکل عددی حل می‌نماید. همان‌طور که اشاره شد، مطالعات قبلی نشان دادند که تنها داده‌های نفوذ تجمعی نمی‌تواند برای ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده شوند، استفاده همزمان از داده‌های جریان آب و انتقال حرارت و مواد محلول در تابع هدف حل معکوس می‌تواند به‌طور چشمگیری عدم قطعیت پارامترهای بهینه شده با روش حل معکوس را کاهش دهد. خصوصیات هیدرولیکی که در این مطالعه با استفاده از حل معکوس تعیین شده‌اند هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(h)$ و تابع نگهداشت آب $\theta(h)$ با استفاده از معادلات ون گنوختن (۱۹۸۰) می‌باشد. در روش حل معکوس فرض می‌شود که $K(h)$ و $\theta(h)$ را همانند پارامترهای انتقال به صورت همزمان و با استفاده از داده‌های جریان ناپایدار و به‌کارگیری آن‌ها در حل معکوس معادلات حاکم بر جریان و انتقال مواد تعیین کرد. استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده بافت خاک، محتوی مواد آلی، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s), هدایت هیدرولیکی غیراشباع ($K(h)$) و تابع نگهداشت آب ($\theta(h)$) با استفاده از روش حل معکوس در مدل HYDRUS-2D انجام شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی در این مطالعه نشان داد که روش حل معکوس در مدل HYDRUS-2D قادر است پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی خاک را با دقت قابل‌توجهی تخمین بزند. این نتیجه با نتایج حاصل از روش‌های تجربی دیگر سازگار است.

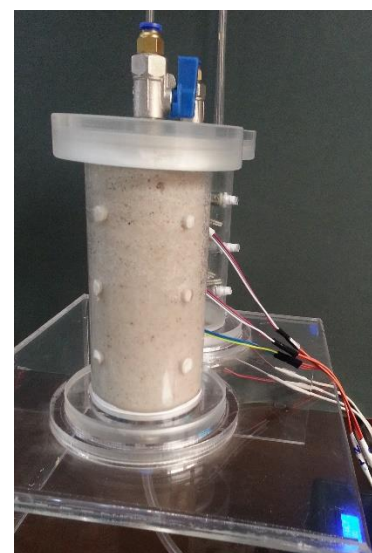
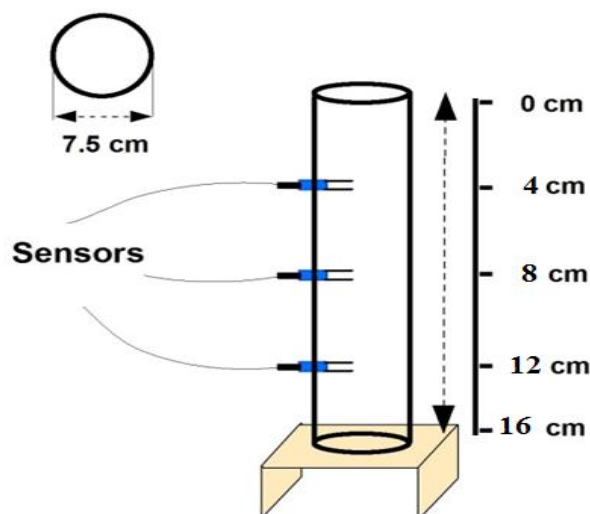


شکل ۱ برد آردوینو مگا Arduino MEGA R3-2560

نمونه‌برداری

تخلخل و محتوی مواد آلی در آزمایشگاه آب‌شناسی و رسوب‌شناسی دانشگاه خوارزمی اندازه‌گیری شد. اولین گام در این تحقیق ساخت یک مدل فیزیکی (آزمایشگاهی)، با ابعاد نسبتاً کوچک بوده است. مدل فیزیکی مورد نظر شامل دو ستون از جنس پلاستیک فشرده که هر کدام به طول ۱۶ سانتی‌متر و قطر داخلی ۷/۵ سانتی‌متر می‌باشد. دو ستون بر روی یک پایه سوار شده و ۳ سنسور دما و رطوبت در عمق‌های مختلف ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ سانتی‌متری از سطح هر ستون در بدنه جایگزین می‌شوند (شکل ۲). ستون‌ها پس از نصب سنسورهای دما به آرامی از بالا پر شدند.

برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع، K_s و همچنین دانسیته کلی خاک، ρ ، محتوای آب اولیه S_i ، منحنی توزیع اندازه دانه (بافت خاک) و درجه اشباع، دو نمونه از خاک ماسه‌ای و سیلتی برداشت گردید و در آزمایشگاه رسوب‌شناسی دانشگاه خوارزمی مورد بررسی قرار گرفت. بافت خاک‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل غربالگری به عنوان ماسه و سیلت مطابق جدول ۱ تعیین شد. برای هر دو نمونه خاک ماسه‌ای و سیلتی به طور مجزا ابتدا مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، دانسیته کل خاک (ρ)، محتوی رطوبتی اولیه S_i و منحنی توزیع دانه‌بندی، بافت خاک،



شکل ۲ نمای شماتیک و آزمایشگاهی ستون ماسه و سنسورهای مربوطه

به محض اینکه تمام محلول‌های موجود در خاک نفوذ نمودند، دوباره آب مقطر بدون محلول ردیاب کلرور پتاسیم به سطح خاک اضافه شد. نمونه‌های پساب زهکشی شده تقریباً به حجم ۲۰ سانتیمتر مکعبی جمع‌آوری شد. غلظت Cl^- در نمونه‌های پساب به روش پتانسیومتری اندازه‌گیری شد. برای هر ۲ خاک، منحنی‌های رخنه کلرور پتاسیم از ستون خاک به عنوان تابعی از زمان به دست آمد.

شرایط جریان پایدار با حفظ یک لایه بار آبی صفر از آب مقطر بدون محلول ردیاب در بالای خاک ایجاد شد. پس از آن، تأمین آب قطع شد. بلافاصله بعد از اینکه آب مقطر نفوذ کرد و ستون اشباع گردید، یک پالس ۵۰ میلی‌لیتر از محلول ردیاب یک مولار KCl اعمال شد. زمان اولیه برای رسم منحنی رخنه T $0 =$ در لحظه‌ای که محلول برای اولین بار به طور یکنواخت بر سطح خاک پخش می‌شد تعیین شد.

جدول شماره ۱ خصوصیات دانه‌بندی خاک‌های ماسه و سیلت

بافت خاک (USDA)	ماسه (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	شماره خاک
ماسه	۸۶	۴/۵	۸/۵	۱
سیلت	۴۲	۴۵/۵	۱۲/۵	۲

جدول شماره ۲ خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک‌های ماسه و سیلت

خصوصیت	مقدار عددی	
	ماسه	سیلت
محتوی رطوبت باقی‌مانده (Sr) درصد	۰/۰۱۷	۰/۰۱
محتوی رطوبت باقی‌اشباع (Ss) درصد	۰/۲۵	۰/۴۰
هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) سانتیمتر بر ساعت	۵/۴۲	۲/۶۲
درصد مواد آلی	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵
دانسیته کلی (Sb) گرم بر سانتیمتر مکعب	۱/۵۰	۱/۲۰

مدل‌سازی عددی:

که در آن $K_r(h)$ هدایت هیدرولیکی نسبی و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع $[L T^{-1}]$ هستند (شیمونک و همکاران، ۲۰۱۳). به منظور مدل‌سازی جریان آب، انتقال حرارت و انتقال مواد محلول از بسته نرم‌افزاری *HYDRUS-1D* یک بعدی استفاده شد. این نرم‌افزار توابع هیدرولیکی خاک ارائه شده توسط ون گنوختن (۱۹۸۰) را استفاده می‌کند (معادله ۳)، که این توابع از مدل توزیع آماری دانه‌بندی ذرات معلم (۱۹۷۶) (معادله ۴)، برای ارائه یک معادله پیش‌بینی تابع هدایت هیدرولیکی زون غیر اشباع (پارامترهای نگهداشت آب-خاک) استفاده می‌کند (شیمونک و همکاران، ۲۰۱۳).

$$S_e(h) = \theta - \theta_r / \theta_s - \theta_r = \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{[1 + |ah|^n]^m} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2$$

معادله یک بعدی حرکت آب در یک محیط متخلخل همگن و یکسان اشباع و غیر اشباع از فرم اصلاح شده از معادله ریچاردز (۱۹۳۱) با استفاده از فرضیه‌ها مبنی بر اینکه فاز هوا و گرادیان حرارتی نقش غیرقابل توجهی در روند جریان مایع دارد به صورت معادله شماره ۱ نوشته می‌شود:

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

که در آن h بار فشار آب $[L]$ ، θ محتوی حجمی رطوبت $[L^3 L^{-3}]$ ، t زمان $[T]$ ، x مختصات فضایی $[L]$ مثبت به سمت بالا، S اصطلاح منبع $[L^3 L^{-3} T^{-1}]$ ، α زاویه بین جهت جریان و محور عمودی است (به عنوان مثال، α برابر با صفر درجه برای جریان عمودی، ۹۰ درجه برای جریان افقی و بین صفر و ۹۰ برای جریان شیب‌دار)، و K تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $[L T^{-1}]$ است.

$$K(h, x) = K_s(x) K_r(h, x) \quad (2)$$

$$K_T(\theta) = \frac{\mu_{ref} \cdot \rho_T}{\mu_T \cdot \rho_{ref}} K_{ref}(\theta) = \alpha_K^* K_{ref}(\theta) \quad (10)$$

که در آن K_{ref} و K_T هدایت هیدرولیکی در درجه حرارت مبنا T_{ref} و درجه حرارت خاک T هستند و μ_{ref} و μ_T ویسکوزیته دینامیک، ρ_{ref} و ρ_T دانسیته خاک-آب در درجه حرارت مبنا T_{ref} و درجه حرارت خاک T هستند. α_K^* فاکتور سنجش حرارت برای هدایت هیدرولیکی است. با نادیده گرفتن اثر انتشار بخار آب، انتقال گرما در یک بعد به صورت معادله ۱۱ تعریف می‌شود (سوفوکلوس، ۱۹۷۹).

(۱۱) $C_p(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - C_w q \frac{\partial T}{\partial x}$
در اینجا $\lambda(\theta)$ ضریب هدایت گرمایی ظاهری خاک است (با واحد $MLT^{-3}K^{-1}$)، $C_p(\theta)$ و C_w به ترتیب ظرفیت های حجمی گرمای محیط متخلخل و فاز مایع هستند (با واحد $ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$).^۱ ظرفیت حجمی گرمایی به عنوان حاصلضرب دانسیته کل و ظرفیت گرمایی جرمی تعریف می‌شود. عبارت نخست در سمت راست معادله (۱۱)، اشاره به جریان گرما در نتیجه رسانش است و عبارت دوم در سمت راست معادله، اشاره به انتقال گرما با جریان آب با دبی ویژه یا فلاکس ثابت و پایدار q دارد. در اینجا گرمای نهان با حرکت بخار بررسی نمی‌گردد. بر طبق مطالعات دو وریس (۱۹۶۳) ظرفیت حجمی گرمایی را می‌توان به صورت معادله ۱۲ تعریف گردد.

$$C(\theta) = C_n \theta_n + C_o \theta_o + C_w \theta_w + C_g \theta_g \quad (12)$$

که در آن θ کسر حجمی (با واحد L^3L^{-3})، زیر نویس n ، o ، g و w به ترتیب فاز جامد، مواد ارگانیکی، فاز گاز و فاز مایع هستند.

هدایت گرمایی ظاهری $(\lambda(\theta))$ ، ترکیب هدایت گرمایی $(\lambda_0(\theta))$ محیط متخلخل (آب و جامد) در نبود پراکندگی زیاد که تابع خطی از سرعت می‌باشد (دو مارسلی) به صورت معادله ۱۳ است:

$$\lambda(\theta) = \lambda_0(\theta) + \beta_t C_w |q| \quad (13)$$

در اینجا β_t پراکندگی حرارتی (با واحد L) است. ظرفیت حجمی گرمایی فاز مایع در تعریف هدایت حرارتی چانگ و هورتون گنجانده شده است تا در واحد طول دارای بعد پراکندگی حرارتی باشد. هدایت حرارتی به صورت معادله ۱۴ تعریف شده است (چانگ و هورتون، ۱۹۸۷).

$$\lambda_0(\theta) = b_1 + b_2 \theta + b_3 \theta^{0.5} \quad (14)$$

در اینجا b_1 ، b_2 و b_3 پارامترهای تجربی هستند ($MLT^{-3}K^{-1}$).

که در این روابط θ محتوی حجمی رطوبت، θ_r و θ_s به ترتیب محتوی رطوبت باقی مانده و اشباع هستند، S_e درجه اشباعیت مؤثر، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع ($L^{-1}T^{-1}$)، a (L^{-1})، m و n فاکتورهای تجربی شکل در مدل ون گنوختن هستند و l پارامتر ارتباط منافذ خاک است که ۰/۵ فرض می‌شود (معلم، ۱۹۷۶). معادله دیفرانسیل یک بعدی کلاسیک انتقال مواد محلول در حالت پایدار در یک خاک همگن، توسط معادله ۵ ارائه شده است:

$$\frac{\partial \theta RC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \theta D^w \frac{\partial C}{\partial x} \right\} - \frac{\partial qC}{\partial x} \quad (5)$$

که در آن x و t نشان دهنده عمق (L) و زمان (T)، C غلظت محلول (ML^{-3})، D^w ضریب پراکندگی هیدرودینامیکی در فاز مایع، D^w ، توسط بیر (۱۹۷۲) ارائه شده است (L^2T^{-1}) (معادله ۶).

$$\theta D^w = D_L |q| + \theta D_w \tau_w \quad (6)$$

که در آن D_w ضریب نفوذ مولکولی در آب آزاد است (L^2T^{-1})، τ_w عامل پیچ و خم وارگی در فاز مایع $[-]$ ، $|q|$ مقدار مطلق چگالی شار دارسی $[LT^{-1}]$ است و D_L پراکندگی طولی $[L]$ است. پارامتر R یک فاکتور تأخیر برای توصیف اثر جذب تعادل خطی در انتقال مواد محلول است. عامل دوم توسط تعریف شده است (معادله ۷).

$$R = (1 + \frac{\rho}{\theta} K_d) \quad (7)$$

که در آن ρ چگالی کلی خاک (ML^{-3}) و K_d ضریب توزیع محلول در فازهای مایع و جامد ($M^{-1}L^3$) است (شیمونک و همکاران، ۲۰۱۳).

بر اساس تئوری موئینگی، تأثیر دما بر بار فشار آب و خاک می‌تواند از تأثیر دما بر کشش سطحی پیش‌بینی شود، دو محقق رابطه ۸ را استخراج کرده‌اند (فیلیپ و دو ویرس، ۱۹۵۷).

$$\frac{dh}{dT} = \frac{h}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} \quad (8)$$

که در آن T درجه حرارت برحسب کلوین و σ کشش سطحی در سطح مشترک هوا و آب (MT^{-2}) است. از رابطه (۸) می‌توان نتیجه گرفت که:

$$h_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{ref}} h_{ref} = \alpha_h^* h_{ref} \quad (9)$$

که در آن h_T و h_{ref} بار فشار و σ_T و σ_{ref} کشش سطحی در دمای T و T_{ref} هستند و α_h^* فاکتور سنجش درجه حرارت برای بار فشار است. هدایت هیدرولیکی وابسته به دما به صورت معادله ۱۰ تعریف می‌گردد (کنستانتز، ۱۹۸۲):

حل معکوس

به منظور بهینه یابی پارامترهای هیدرولیکی خاک، پارامترهای انتقال حرارت و انتقال مواد محلول، از الگوریتم بهینه سازی لونبرگ-مارکورت (مارکورت، ۱۹۶۳) با کد عددی HYDRUS-1D استفاده شد. در این بخش از مدل حل معکوس استفاده گردید که برای اجرای آن اطلاعات حل مستقیم بعلاوه مقادیر

اولیه پارامترهای مورد نظر برای بهینه یابی، موقعیت نقاط مشاهده ای و داده های اندازه گیری شده مورد نیاز است. پارامترهای مورد ارزیابی در این تحقیق شامل دو پارامتر شکل معادله ون گنوختن α ، n و سه پارامتر b_1 ، b_2 و b_3 تابع هدایت گرمایی و ضریب پراکندگی طولی می باشند. جدول ۳ پارامترهای ورودی به مدل HYDRUS-1D را نشان می دهد.

جدول ۳ پارامترهای ورودی مدل HYDRUS-1D

پارامتر		مقدار
اطلاعات دامنه حل:		
طول ستون		۱۶ سانتیمتر
تعداد لایه		۱
تعداد نقاط مشاهده ای		۳ عدد در اعماق ۴، ۸ و ۱۲ سانتیمتری ستون
اطلاعات زمان:		
طول آزمایش	ماده	سیلت
	۲۴ ساعت	۳۶ ساعت
خواص هیدرودینامیکی:		
محتوی رطوبت نگهداشت S_r	ماده	سیلت
	۰/۰۱۵	۰/۰۱
محتوی رطوبت اشباع S_s	ماده	سیلت
	۰/۴۰	۰/۲۵
هدایت هیدرولیکی اشباع K_s	۱۱ سانتیمتر بر ساعت	۵/۲۵ سانتیمتر بر ساعت
شرایط مرزی:		
جریان	مرز بالا	مرز پایین
	نویمن ^{۳۴}	زهکشی آزاد
انتقال مواد محلول	دریکله ^{۳۵}	دریکله
	دریکله	دریکله

رفتار حل معکوس را می توان با ترسیم تابع هدف ϕ ، در برابر یک جفت پارامتر بهینه با رسم سطح پاسخ، مورد ارزیابی قرار داد. هر سطح پاسخ با حل معادلات جریان و انتقال، با شرایط مناسب اولیه و مرزی، برای بسیاری از ترکیبات ممکن از یک جفت انتخاب شده از مقادیر پارامتر در یک محدوده از پیش تعیین شده به دست می آید، در حالی که پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته می شود. از آنجایی که تنها دو پارامتر در یک تجزیه و تحلیل سطحی یک پاسخ ظاهر می شود، رفتار ϕ در فضای مختلف پارامتر تنها نشان دهنده یکی از راه حل در آن ها است و نه در فضای پارامتر کامل. به عنوان مثال، حداقل ممکن است در محل وجود داشته باشد، اما در هر یک از مقادیر عرضی وجود

ندارد (شیمونک و ن گنوختن، ۱۹۹۶). دو پارامتر شکل مدل ون گنوختن α ، n ، ۳ پارامتر تابع هدایت حرارتی b_1 ، b_2 و b_3 و ضریب پراکندگی طولی به عنوان پارامترهای مجهول در حل معکوس مورد بررسی قرار گرفت. مقدار محتوی رطوبت اشباع شده، θ_s و هدایت هیدرولیکی اشباع، K_s ، با استفاده از اندازه گیری های مستقل تعیین شد و به عنوان پارامترهای معلوم و مقدار ثابت I در رابطه معلم (۱۹۹۶) برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی مقادیر اندازه گیری پراکندگی توسط روش آزمایشگاهی پیشنهادی، از دو پارامتر آماری خطای متوسط ریشه ($RMSE$) و R^2 استفاده شد. پارامتر آماری خطای متوسط ریشه از رابطه ۱۵ محاسبه می شود.

³⁴ Neumann

³⁵ Dirichlet

$$T = \frac{b_j}{s(b_j)} \quad (17)$$

که در آن مقادیر T و $S(b_j)$ مقادیر مطلق و نسبی انحرافات در اطراف میانگین هستند. همچنین مرزهای بالا و پایین سطح اطمینان ۹۵٪ در اطراف هر پارامتر بهینه شده b_j مشخص شده است. مطلوب است که ارزش واقعی پارامتر هدف همیشه در یک فاصله باریک در اطراف میانگین پارامتر بهینه شده باشد. فاصله اطمینان پایین و بالا با احتمال $1-\alpha$ از رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود.

$$\bar{X} - Z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad \bar{X} + Z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (18)$$

که در آن $Z \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$ نمره Z از توزیع احتمال استاندارد نرمال است. محدوده‌های اطمینان بالا نشان می‌دهد که نتایج به ارزش یک پارامتر خاص حساس نیستند. جدول ۴ پارامترهای جریان و انتقال بهینه شده (ون گنوختن و پراکندگی طولی) و جدول ۵ پارامترهای آماری برای داده‌های غلظت اندازه‌گیری شده و خروجی توسط مدل *HYDRUS-1D* را نمایش می‌دهند.

جدول ۴ پارامترهای جریان و انتقال بهینه شده (ون گنوختن و پراکندگی طولی) توسط مدل *HYDRUS-1D*

سیلت			ماسه			نوع خاک
۹۵ در صد اطمینان		بهینه	۹۵ در صد اطمینان		بهینه	
حد پایین	حد بالا		حد پایین	حد بالا		
۶/۳۵	۷/۶۵	۷/۰۰	۷/۹۵	۹/۱۲	۸/۵۴	ضریب پراکندگی طولی
۰/۰۰۲۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۹۷	۰/۰۱۱	۰/۰۱	□
۰/۹۶	۲/۴۷	۱/۷۲	۲/۴	۲/۷۲	۲/۵۸	n

جدول ۵ پارامترهای آماری برازش داده‌های غلظت کلر اندازه‌گیری شده و خروجی مدل *HYDRUS-1D*

BIC	AIC	MAE	ME	RMSE	R ²	خاک
-۵۹۷/۲	-۶۰۴/۰	۰/۰۱۰۷۷	۰/۰۰۵۸	۰/۰۱۴۵۶	۰/۹۸	ماسه
-۸۹۶/۷	-۹۰۴/۸	۰/۰۱۲۱۹	۰/۰۰۲۱۸	۰/۰۱۴۸۳	۰/۹۷	سیلت
R ² : R-SQUARE, RMSE: Root Mean Square Weighted Error, ME: Mean Weighted Error, MAE: Mean Weighted Absolute Error, AIC: Akaike Information Criterion, BIC: Bayesian Information Criterion.						

اندازه‌گیری شده و خروجی مدل *HYDRUS-1D* را نشان می‌دهند.

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (L_i - P_i)^2}{j}} \quad (15)$$

که در آن L_j مقدار اندازه‌گیری شده توسط روش آزمایشگاهی، P_j مقدار شبیه‌سازی مستقیم است و j تعداد مشاهدات است. معیار R^2 نشانگر ضریب رگرسیون بین مقدار مشاهده شده $\bar{y}$ با مقدار محاسبه شده یا خروجی مدل y و w وزن هر داده است که از معادله ۱۶ محاسبه می‌شود. مقادیر $RMSE$ و R^2 در جدول ۴ آورده شده‌اند.

$$R^2 = \frac{[\sum w \bar{y} y - \frac{\sum \bar{y} \sum y}{\sum w}]^2}{[\sum w \bar{y}^2 - \frac{(\sum \bar{y})^2}{\sum w}][\sum w y^2 - \frac{(\sum y)^2}{\sum w}]} \quad (16)$$

اطلاعات آماری در مورد پارامترهای بهینه شده مانند میانگین، خطای استاندارد T و محدوده اطمینان پایین و بالا در جدول ۴ ارائه شده است. خطای استاندارد $S(b_j)$ ، از اطلاعات تابع هدف، تعداد مشاهدات، تعداد پارامترهای مجهول بهینه شده و ماتریس معکوس تخمین زده شده است (دانیل و وود ۱۹۷۱). مقدار T از میانگین و خطای استاندارد با استفاده از معادله ۱۷ به دست می‌آید.

جدول ۶ پارامترهای جریان و انتقال حرارت بهینه شده (ون گنوختن و پارامترهای تجربی هدایت حرارتی چانگ و هورتون) و جدول ۷ پارامترهای آماری برازش داده‌های حرارت

جدول ۶ پارامترهای جریان و انتقال حرارت بهینه شده (ون گنوختن و پارامترهای تجربی هدایت حرارتی چانگ و هورتون)

سیلت			ماسه			نوع خاک
۹۵ در صد اطمینان		بهینه	۹۵ در صد اطمینان		بهینه	
حد پایین	حد بالا		حد پایین	حد بالا		
۰/۰۰۲۱	۰/۴۳	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۴۸	۰/۱۱	۰/۰۰۵	□
۰/۹۶	۲/۴۷	۱/۵۲	۱/۱	۲/۱۲	۱/۴۶	n
$7/694 \times 10^{-9}$	$7/696 \times 10^{-14}$	$1/133 \times 10^{-10}$	$1/402 \times 10^{-13}$	$1/140 \times 10^{-14}$	$1/106 \times 10^{-9}$	b1
$1/454 \times 10^{-9}$	$1/454 \times 10^{-14}$	$1/833 \times 10^{-10}$	$1/684 \times 10^{-13}$	$1/460 \times 10^{-15}$	$1/122 \times 10^{-14}$	b2
$2/207 \times 10^{-11}$	$2/314 \times 10^{-14}$	$5/383 \times 10^{-13}$	$1/864 \times 10^{-11}$	$1/881 \times 10^{-15}$	$8/227 \times 10^{-12}$	b3

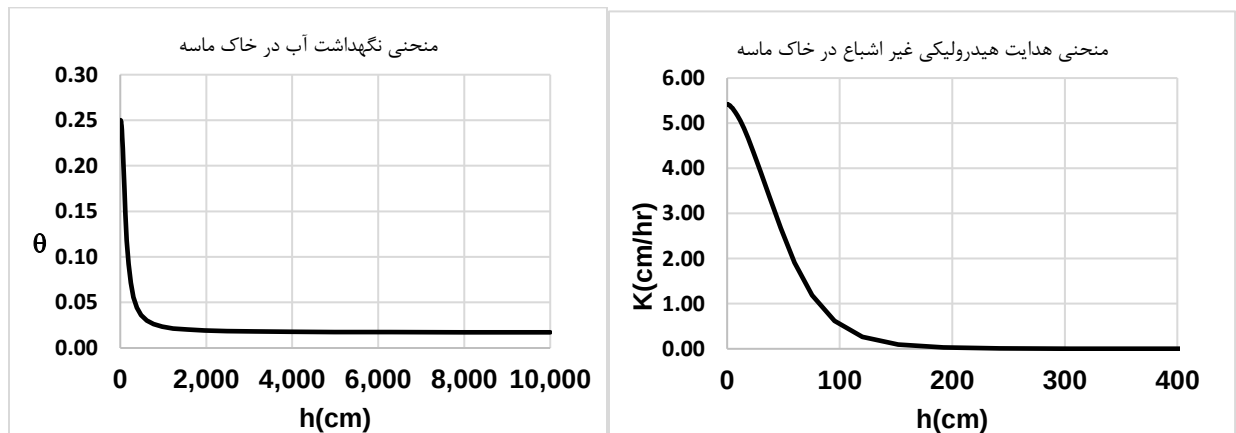
جدول ۷ پارامترهای آماری برازش داده‌های حرارت اندازه‌گیری شده و خروجی مدل HYDRUS-1D

BIC	AIC	MAE	ME	RMSE	R ²	خاک
-۳۷۷/۷	-۳۹۳/۳	۰/۰۵۲۳	۰/۰۵۰۷	۰/۰۶۱۱	۰/۹۲	ماسه
-۸۲۲/۸	-۸۳۸/۹	۰/۰۱۵۸	۰/۰۰۲۹	۰/۰۱۹۵	۰/۹۶	سیلت

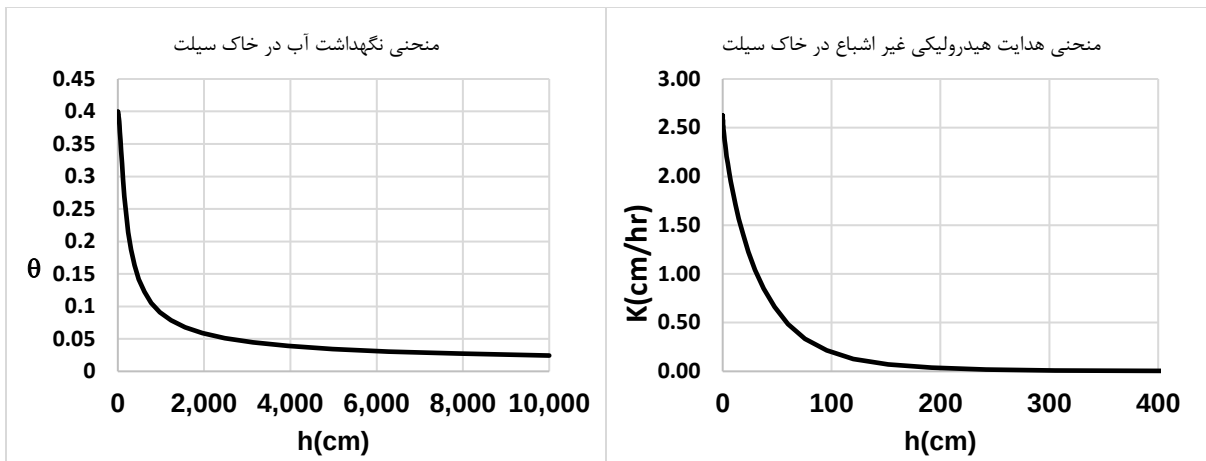
نتایج و بحث

سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در خاک سیلتی بود. شکل‌های ۳ و ۴ توابع هیدرولیکی خاک شامل تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع (الف) و تابع نگهداشت آب در خاک (ب) را در خاک‌های ماسه و سیلت با استفاده از حل معکوس توسط مدل HYDRUS-1D نمایش می‌دهد.

داده‌های نفوذ برای ارزیابی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از مشخصات خاک ماسه و سیلت استفاده شده است. نرخ نفوذ پایدار از ۵/۶ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در خاک ماسه‌ای و ۳



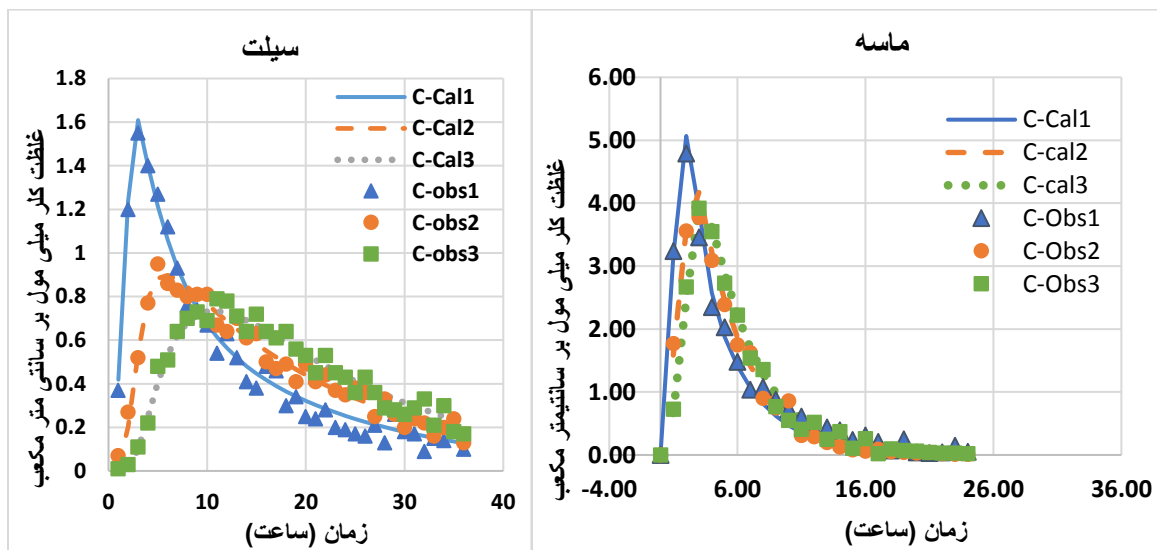
شکل ۳ توابع هیدرولیکی بهینه شده هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $K(h)$ (سمت چپ) و منحنی نگهداشت آب در خاک ماسه (سمت راست).



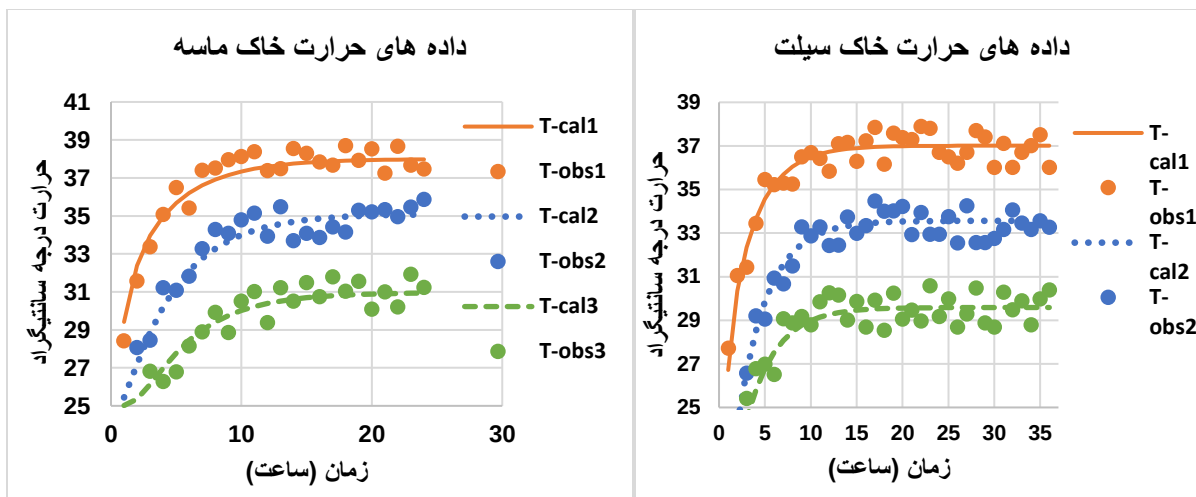
شکل ۴ توابع هیدرولیکی بهینه شده هدایت هیدرولیکی غیر اشباع $K(h)$ (سمت چپ) و منحنی نگهداشت خاک سیلت (سمت راست).

بهینه شده ضریب پراکندگی طولی D برای خاک ماسه‌ای و سیلتی به ترتیب برابر $۸/۵۲$ و ۷ با استفاده از حل معکوس به دست آمده است.

شکل ۵ مقدار غلظت کلر اندازه‌گیری شده و خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل $HYDRUS-1D$ را بر حسب $(mmol/cm^3)$ برای نقاط مشاهداتی در ستون ماسه را نشان می‌دهد. مقادیر



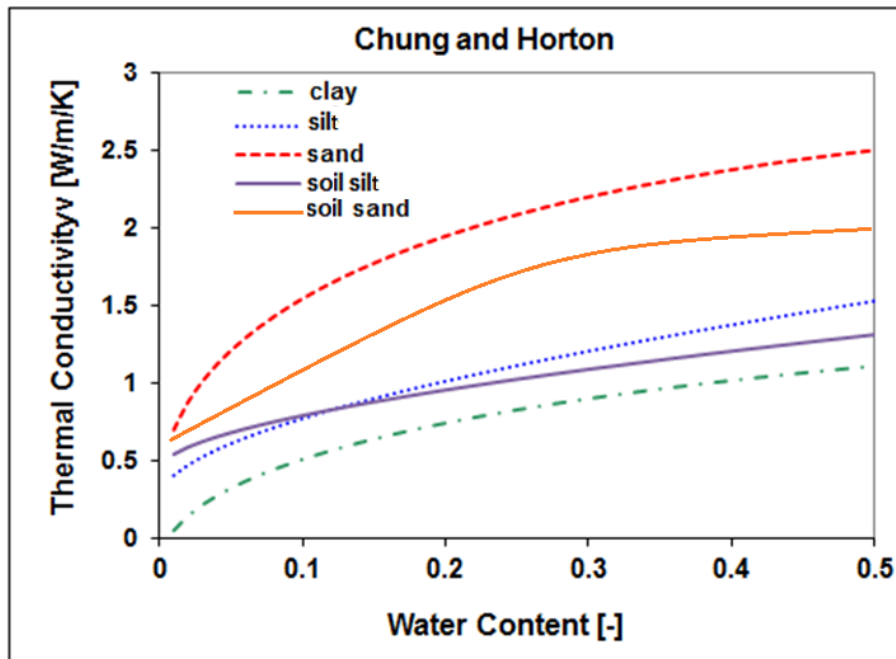
شکل ۵ غلظت کلر اندازه‌گیری شده در اعماق ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متری به ترتیب ۱، ۲، و ۳ (علائم C-obs) و خروجی شبیه‌سازی شده توسط مدل $HYDRUS-1D$ (منحنی‌ها C-cal) برای خاک ماسه (سمت چپ) و سیلت (سمت راست).



شکل ۶ درجه حرارت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در اعماق ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متر در خاک ماسه و سیلت.

از آنجایی که پارامترهای بهینه شده در اجرای بهینه‌سازی‌های مختلف با مقادیر اولیه متفاوت یکسان بوده است، حل معکوس به وضوح یگانه می‌باشد. هنگامی که تعداد پارامترهای ون گنوختن در توابع هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری K_s و S_s و S_r کاهش می‌یابد حل معکوس جواب‌های یگانه تولید می‌کند. شکل ۶ مقایسه دمای شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در خاک‌های ماسه و سیلت را در اعماق ۴، ۸ و ۱۲ سانتی‌متری نشان می‌دهد. هر دو متغیر درجه حرارت و غلظت کلرید اندازه‌گیری شده و بهینه‌سازی شده با مدل انطباق خیلی خوبی را نشان دادند. همچنین ضریب تبیین (R^2) بالا مناسب بودن روش را نشان می‌دهد. ضریب تبیین R^2 برای رگرسیون مقادیر پیش بینی شده حرارت نسبت به مشاهدات برای ماسه برابر با ۰/۹۶ و برای سیلت برابر ۰/۹۳ است. جدول ۶ لیست مقادیر R^2 برای اجرای بهینه‌سازی یگانه را برای هر دو خاک نشان می‌دهد که رابطه بین غلظت‌ها و حرارت‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده و متغیرهای انتقال حرارت را تعیین می‌کند. منحنی‌های اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌های رخنه و منحنی‌های

شبیه‌سازی شده با $HYDRUS-1D$ در شکل ۵ برای هر دو نوع خاک نشان داده شده است. نتایج به دست آمده مشابه مطالعات انجام شده قبلی در مقیاس آزمایشگاه برای تخمین پراکندگی طولی در خاک‌های غیر اشباع است (ویپرنگا و ون گنوختن، ۱۹۸۹) و (کوستا و پرونتی، ۲۰۰۶). در نهایت، پارامترهای جریان، انتقال مواد محلول و حرارت بهینه شده توسط حل معکوس با استفاده از برنامه $HYDRUS-1D$ در جدول ۶ ارائه شده است. شکل ۷ مقایسه‌ای از تابع هدایت حرارتی مقادیر ترسیم شده برای نمونه‌های خاک سیلت و ماسه مورد آزمایش و توابع تئوری $\lambda(\theta)$ چانگ و هورتون (۱۹۸۷) برای سه طبقه اصلی بافت خاک شامل رس، سیلت و ماسه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تابع هدایت حرارتی بهینه شده بسیار شبیه توابع پیش‌فرض و در محدوده استاندارد است. در نتیجه نشان دادن اعتبار راه حل معکوس زمانی که با استفاده از داده‌های درجه حرارت خاک همراه باشد حل معکوس یگانه است. همان‌طور که همه مقادیر همبستگی بسیار بالا هستند، مقدار آن‌ها برای آزمون صحت کار کفایت می‌کند.



شکل ۷ مقایسه تابع هدایت حرارتی بهینه شده $\lambda(\theta)$ با تقسیمات اصلی بافت خاک رس، سیلت و ماسه بر اساس تئوری چانگ و هورتون (۱۹۸۷).

همچنین نتایج نشان داد که اندازه‌گیری حرارت آب به تنهایی لزوماً منجر به برآورد یگانه و قابل اطمینان از پارامترهای هیدرولیکی در صورتیکه که تعداد پارامترهای ناشناخته بیش از دو پارامتر باشد، نمی‌شود. لذا اطلاعات بیشتر در مورد پارامترهای قابل اندازه‌گیری نظیر هدایت هیدرولیکی اشباع K_s و رطوبت اشباع θ_s نیاز است. نتیجه‌گیری اصلی این مطالعه این است که وقتی همزمان داده‌های حرارت و غلظت کلر به عنوان ورودی برای روش معکوس استفاده می‌شود، فرایند حل معکوس پایدار و دارای جواب یگانه است. ضریب تبیین R^2 برای رگرسیون مقادیر پیش بینی شده حرارت نسبت به مشاهدات برای ماسه برابر با ۰/۹۲ و برای سیلت برابر ۰/۹۳ است. ضریب تبیین R^2 برای رگرسیون مقادیر پیش‌بینی شده غلظت کلر نسبت به مشاهدات برای ماسه برابر با ۰/۹۸ و برای سیلت برابر ۰/۹۷ است. نتایج نشان می‌دهد که تابع هدایت حرارتی بهینه شده بسیار شبیه توابع پیش فرض و در محدوده استاندارد چانگ و هورتون است. در نتیجه حل معکوس در زمانی که از داده‌های درجه حرارت خاک توأم با غلظت کلر استفاده می‌شود، دارای جواب یگانه است.

به‌طور کلی، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که وقتی داده‌های درجه حرارت در عملکرد تابع هدف قرار نمی‌گیرند، همان‌طور که توسط روسو و همکاران (۱۹۹۱) بیان کردند، نمی‌توان با استفاده از داده‌های جریان به تنهایی با مدل ون گنوختن به دلیل همبستگی متقابل پارامترها حل یگانه به دست آورد، در صورتی که با افزایش داده‌های دما در فرآیند حل معکوس جواب یگانه تضمین می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از مدل فیزیکی ستون آزمایشگاهی یک بعدی و مدل ریاضی *HYDRUS-1D* برای شبیه‌سازی نفوذ آب ۴۰ درجه حاوی کلرور پتاسیم از درون ستون‌های خاک سیلتی و ماسه‌ای استفاده شده است. سپس توابع هیدرولیکی خاک، پراکندگی طولی و هدایت حرارتی خاک به روش حل معکوس با استفاده از داده‌های تجربی جمع‌آوری شده تخمین زده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دمای آب و غلظت کلر در سه عمق می‌تواند اطلاعات مورد نیاز برای برآورد همزمان ویژگی‌های هیدرولیکی، ضریب پراکندگی و خواص حرارتی خاک را فراهم کند.

- Geophysical Union, 14, 446-460.
<http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446>
- Hopmans, J. W., J. Šimůnek, and K. L. Bristow. 2002a. Indirect estimation of soil thermal properties and water flux from heat pulse measurements: Geometry and dispersion effects. *Water Resources Res.* 38(1): 7.1-7.14.
- Klute, A. (ed.), 1986, *Methods of Soil Analysis*, Part 1., 2nd ed., Agronomy Monograph, 9, 635-662, ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kool, J. B., and J. C. Parker, 1987, Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 23(1), 105-114.
- Kool, J. B., J. C. Parker, and M. Th. van Genuchten, 1987, Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - A review, *J. Hydrol.*, 91, 255-293.
- Mallants D., Vanclooster M., Meddahi M. et Feyen J., 1994. Estimating solute transport in undisturbed soil columns using time-domain reflectometry. *Journal of Contaminant Hydrology*, 17:91-109.
- Marquardt D., 1963, An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441. (11 pages)
- Mortensen, A. P., J. W. Hopmans, Y. Mori, and J. Šimůnek. 2006. Multi-functional heat pulse probe measurements of coupled vadose zone flow and transport. *Advances in Water Resources* 29(2): 250-267.
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522.
- Nassar, I. N., and R. Horton. 1992. Simultaneous Transfer of Heat, Water, and Solute in Porous Media: I. Theoretical Development. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1350-1356. doi:10.2136/sssaj1992.03615995005600050004x
- Philip, J. R., and D. A. de Vries, 1957, Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Trans. Am. Geophys. Union*, 38, 222-232.
- Reynolds, W. D., D. E. Elrick, and E. G. Youngs, 2002a, Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone), p.818-820. In: J. H. Dane and G. C. Topp (eds.) *Methods of Soil Analysis*, Part 4 Physical Methods, SSSA No. 5, Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI.
- Reynolds, W. D., D. E. Elrick, and E. G. Youngs, 2002b, Single-ring and double or concentric-ring infiltrometers. p.821-826. In: J. H. Dane and G. C. Topp (eds.) *Methods of Soil Analysis*, Part 4 Physical Methods, SSSA No. 5, Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI.
- تشکر و قدردانی
- این مطالعه در قالب طرح تحقیقاتی داخلی مصوب دانشگاه، با حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه خوارزمی انجام شد. بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه خوارزمی تشکر و قدردانی می‌شود.
- منابع
- Bear, J. (1972) *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing Company, New York, 764p.
- Bohne, K., C. Roth, F. J. Leij, and M. T. van Genuchten, Rapid method for estimating the unsaturated hydraulic conductivity from infiltration measurement, *Soil Sci.*, 155(4), 237-244, 1992.
- Chung S.-O., and R. Horton, 1987, Soil heat and water flow with a partial surface mulch, *Water Resour. Res.*, 23(12), 2175-2186.
- Constantz, J., 1982, Temperature dependence of unsaturated hydraulic conductivity of two soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46(3), 466-470.
- Costa J. L et Prunty L., 2006. Solute transport in fine sandy loam soil under different flow rates. *Agricultural Water Management*, 83:111-118.
- Dane, J. J., and G. C. Topp, (Eds.), 2002, *Methods of Soil Analysis*, Part 4. Physical Methods, Soil Sci. Soc. Am., Inc., Madison, WI.
- Daniel, C. and Wood, F. S. 1971. *Fitting Equations to Data* New York: Wiley
- Inoue, M., J. Šimůnek, S. Shiozawa, and J.W. Hopmans. 2000. Estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient infiltration experiments. *Adv. Water Resour.* 23:677-688.
- de Marsily, G., 1986, *Quantitative Hydrogeology*, Academic Press, London.
- de Vries, D. A., 1963, The thermal properties of soils, In: *Physics of Plant Environment*, edited by R. W. van Wijk, pp. 210-235, North Holland, Amsterdam.
- Dirksen, C., 1991, Unsaturated hydraulic conductivity, In: Smith, K. A. and C. E. Mullins (eds.) *Soil Analysis: Physical Methods*, 209-269, Marcel Dekker, Inc., New York.
- Goncalves M. C., Leij F.J. et Schaap M.G., 2001. Pedotransfer functions for solute transport parameters of Portuguese soils. *European Journal of Soil Sciences*, 12:563-574.
- Kass W., 1998. *Tracing Technique in Geohydrology*, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, Vt., 581 pp.
- Horton, R.E., 1933, *The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle*. Transactions of the American

- Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten, The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 343, 2013.
- Šimůnek, J., M. Th. van Genuchten, and M. Šejna, 2008, Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes, Vadose Zone Journal, 7(2), 587-600.
- Šimůnek, J., R. Angulo-Jaramillo, M. Schaap, J.-P. Vandervaere, and M. Th. van Genuchten, 1998, Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension disc infiltrometer data, Geoderma, 86(1-2), 61-81.
- Sophocleous, M., 1979, Analysis of water and heat flow in unsaturated-saturated porous media, Water Resour. Res., 15(5), 1195-1206.
- Tang G., Mayes M.A., Parker J.C. et Jardine P.M., 2010. CXTFIT/Excel-A modular adaptable code for parameter estimation, sensitivity analysis and uncertainty analysis for laboratory or field tracer experiments. Computers & Geosciences, 36:38-47.
- Vanderborght, J., and H. Vereecken. 2007. Review of Dispersivities for Transport Modeling in Soils. Vadose Zone J. 6:29-52. doi:10.2136/vzj2006.0096
- Van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.
- Wierenga P. J. et Van Genuchten M. Th., 1989. Solute transport through small and large unsaturated soil columns". Ground Water, 27(1): 35-42.
- Richards L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, 1: 518-533.
- Russo, D., U. Shani, and J. C. Parker, 1991, Analyses of infiltration, events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology, Water Resour. Res., 27, 1361-1373.
- Saito, H., J. Šimůnek, J. W. Hopmans, and A. Tuli. 2007. Numerical evaluation of the heat pulse probe for simultaneous estimation of water fluxes and soil hydraulic and thermal properties. Water Resour. Res. 43: W07408.
- Sakai, M., N. Toride, and J. Šimůnek. 2009. Water and vapor movement with condensation and evaporation in a sandy column subject to temperature gradient. SSSA J. 73(3): 707-717.
- Šimůnek J., Huang K., Sejna M. et van Genuchten M.T., 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the one dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably - saturated media. Internaional ground water modelling center Colorado School of Mines. Golden. Colorado, 162 pp.
- Šimůnek, J., and M. Th. van Genuchten, 1996, Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion, Water Resour. Res., 32(9), 2683-2696.
- Šimůnek, J., D. Jacques, J. W. Hopmans, M. Inoue, M. Flury, and M. Th. van Genuchten, 2002, Solute Transport During Variably-Saturated Flow - Inverse Methods, In: Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods, Chapter 6.6, Eds. J. H. Dane and G. C. Topp, Third edition, SSSA, Madison, WI, 1435-1449.
- Šimůnek, J., M. Šejna, and M. Th. van Genuchten, 2006, The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, User Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic.