



## تحلیل حساسیت نفوذ آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار -HYDRUS 2D/3D

پریسا مشایخی<sup>۱</sup>، شجاع قربانی دشتکی<sup>۲</sup>، محمدرضا مصدقی<sup>۳</sup> و حسین شیرانی<sup>۴</sup>  
دانشجوی دکتری گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد،<sup>۱</sup> -دانشیار گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد،<sup>۲</sup> -دانشیار گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان،<sup>۳</sup> -دانشیار گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر رفسنجان

### چکیده

تحلیل حساسیت یکی از جنبه‌های مهم در مدل‌سازی پدیده‌ها می‌باشد. در این پژوهش میزان حساسیت نفوذ تجمعی اشباع آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی معادله ون‌گنوختن-معلم با کمک نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D در سه نوع خاک رسی، لومی و شنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در خاک شنی، پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و در خاک رسی پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی ( $n$ ) و پس از آن  $K_s$  بیش‌ترین تأثیر را بر مدل‌سازی داده‌های نفوذ تجمعی داشتند و سایر پارامترها از حساسیت کمی برخوردار بودند. در خاک لومی نیز پارامترهای  $K_s$ ،  $n$  و  $s$  بیش‌ترین ضریب حساسیت را داشتند. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مدل‌سازی معکوس داده‌های نفوذ تجمعی اشباع برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک، از پارامترهای  $n$  و  $K_s$  استفاده شده و سایر پارامترهای ون‌گنوختن-معلم ( $r$  و  $l$ ) با فرضیاتی به صورت ثابت در نظر گرفته شوند یا به روش‌های دیگر تخمین زده شوند.

واژه‌های کلیدی: نفوذ اشباع، تحلیل حساسیت، پارامترهای هیدرولیکی خاک، مدل‌سازی معکوس

### مقدمه

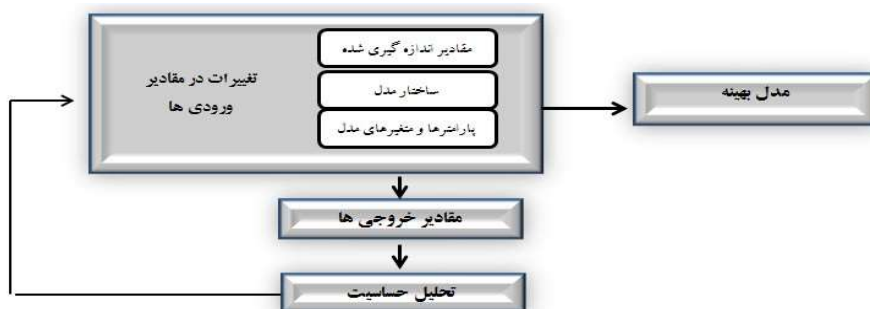
ویژگی‌های هیدرولیکی خاک جزو مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در پژوهش‌های کشاورزی و اکولوژیکی، طرح‌ها و مدل‌های آبیاری و زه‌کشی و مسایل مربوط به حرکت غیراشباع آب در خاک می‌باشند. این ویژگی‌ها از طریق روش‌های مستقیم و غیرمستقیم متفاوتی قابل اندازه‌گیری هستند. انجام روش‌های مستقیم، هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و نیازمند کار زیاد می‌باشد. افزون بر این، به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است (شل و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین طی ۴۰ سال گذشته، روش‌های غیرمستقیم مختلفی برای برآورد این ویژگی‌ها ارائه شده است که روش حل معکوس یکی از این روش‌ها است. نتایج پژوهش‌ها، کارایی زیاد این روش‌ها را در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در آزمایش‌های مختلف جریان‌های ورودی و خروجی از ستون خاک در شرایط آزمایشگاهی و آزمایش‌های میدانی نشان می‌دهند (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۲). در این روش، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از طریق حل عددی مکرر معادلات جریان گذرا، به صورت غیرمستقیم برآورد می‌شوند (هافمنز و همکاران، ۲۰۰۲).

روش معکوس در مقایسه با سایر روش‌ها، ارزان و سریع است. در این روش، پارامترهای هیدرولیکی خاک بر پایه‌ی جریان اندازه‌گیری شده آب در خاک و یا دیگر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک برآورد می‌شوند. 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 می‌باشد و در این شرایط جهت رسیدن به یک پاسخ قابل قبول به دانسته‌های بیش‌تر و اندازه‌گیری‌های بیش‌تر مانند تغییرات پتانسیل ماتریک و یا میزان رطوبت خاک نیاز است که باعث دشواری و طولانی شدن مراحل آزمایش شده و احتمال خطا را افزایش می‌دهد (زو و همکاران، ۲۰۰۱). بنابراین، در تخمین پارامترها به روش‌های مدل‌سازی معکوس توصیه می‌شود ابتدا حساس‌ترین پارامترها با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت (Sensitivity analysis, SA) انتخاب و برآورد شوند. اهمیت این کار در آن است که گاهی تغییر مقدار یک پارامتر با درجه حساسیت کم در دامنه وسیعی از محدوده تغییرات آن، تأثیر ناچیزی بر مقدار تابع هدف دارد و این سبب می‌شود که پارامترهای دیگر بردار مجهولات به درستی برآورد نشوند و یا بی‌دلیل موجب زمان‌بر شدن محاسبات می‌شود (عباسی، ۱۳۸۶).

در سال‌های اخیر تجزیه و تحلیل حساسیت به طور گسترده‌ای به عنوان یک بخش ضروری از فرایند مدل‌سازی پذیرفته شده است. به ویژه زمانی که مدل‌ها پیچیده بوده و یا از مدل‌های ترکیبی برای توصیف شرایط استفاده شود (داوسون و همکاران، ۲۰۰۵). تحلیل حساسیت به بررسی این مساله می‌پردازد که چگونه تغییرات در خروجی یک مدل (عددی و یا سایر مدل‌ها) می‌تواند چه از لحاظ کیفی و چه از نظر کمی به منابع مختلفی از تغییرات تقسیم شود (سالنتی و همکاران، ۲۰۰۴). این روش تأثیرپذیری مدل و شرایط واقعی را از داده‌های ورودی مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین ترتیب که اگر تغییرات یکی از پارامترهای ورودی تأثیر اندکی بر

## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - فیزیک خاک و رابطه آب، خاک و گیاه

داده‌های خروجی مدل داشته باشد، می‌توان چنین استنباط کرد که آن پارامتر تأثیر ناچیزی بر نتایج مدل دارد و در نتیجه می‌توان از خطای اندازه‌گیری یا تخمین آن پارامتر چشم‌پوشی کرد. بر عکس، در صورت تأثیرپذیری زیاد مقادیر خروجی مدل باید آن پارامتر را با دقت بیش‌تری اندازه‌گیری کرد (عباسی، ۱۳۸۶). تحلیل حساسیت می‌تواند دانسته‌های مفیدی در مورد بهترین زمان و یا مکان نمونه‌برداری و در کل طراحی آزمایش به کاربر بدهد (روچا و همکاران، ۲۰۰۶ شکل ۱ مراحل انجام تجزیه و تحلیل حساسیت در مدل را نشان می‌دهد.

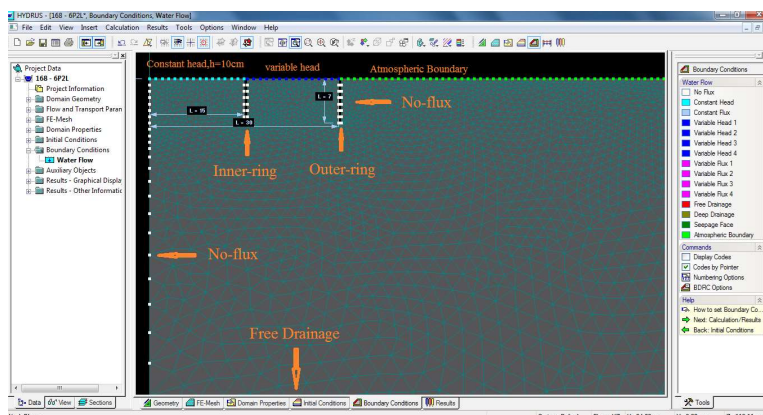


شکل ۱- فرآیند کلی تجزیه و تحلیل حساسیت (Fuladipannah, ۲۰۱۲)

اینو و همکاران (۱۹۹۸) با انجام تجزیه و تحلیل حساسیت بر روی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با استفاده از حل عددی مستقیم، نشان دادند که پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی در معادله ون‌گنوختن ( $n$ ) حساس‌ترین پارامتر در برآورد پتانسیل ماتریک خاک است. در این مطالعه پارامترهای  $K_s$  و  $r$  کم‌ترین حساسیت را نشان دادند. عباسی و همکاران (۲۰۰۳) حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک را تعیین نمودند. آنها گزارش کردند میزان آب خاک بیش‌ترین حساسیت را به پارامتر  $n$  معادله ون‌گنوختن داشت و پس از آن به ترتیب پارامترهای  $s$  و  $K_s$  قرار داشتند. روچا و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند پتانسیل ماتریک اندازه‌گیری شده در خاک بیش‌ترین حساسیت را به پارامتر  $n$  و پس از آن به  $s$  داشت و کم‌ترین حساسیت مربوط به پارامتر  $\alpha$  بود. در این پژوهش برای جریان خروجی تجمعی اندازه‌گیری شده در انتهای خاک‌رخ، میزان حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک به ترتیب زیاد به کم،  $r$ ،  $s$ ،  $K_s$ ،  $n$  و  $\alpha$  مشاهده شد. هم‌چنین میزان آب خاک نسبت به پتانسیل ماتریک و با جریان تجمعی خروجی حساسیت کم‌تری به پارامترهای هیدرولیکی مختلف نشان داد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های مضاعف، از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D استفاده شد و میزان حساسیت نفوذ تجمعی اشباع آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی معادله ون‌گنوختن-معلم با کمک نرم‌افزار در سه نوع خاک رسی، لومی و شنی مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای شبیه‌سازی نفوذ غرقابی آب به خاک در روش استوانه‌های مضاعف، 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 ۷ سانتی‌متر و عمق خاک ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. شرط مرز ورودی برای استوانه‌های داخلی و خارجی، بارابی 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 اتمسفری، تعریف شد. هم‌چنین دیواره استوانه‌ها شرایط بدون جریان و برای مرز پایینی (عمق خاک) زهکشی آزاد تعریف شد (شکل ۲). برای شبیه‌سازی عددی حرکت آب در خاک از مدل هیدرولیکی ون‌گنوختن-معلم با فرض  $m=1-1/n$  استفاده شد. زمان نهایی نفوذ برای همه موارد برابر ۳۰۰ دقیقه در نظر گرفته شد. هم‌چنین شرایط اولیه برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، بر اساس پتانسیل ماتریک تعریف شد. بدین ترتیب که با فرض خشک‌بودن خاک در سطح، پتانسیل ماتریک در سطح خاک برابر با  $-10000$  سانتی‌متر در نظر گرفته شد که به صورت خطی با عمق تا مقدار  $-4000$  در عمق ۱۵۰ کاهش یافت.



شکل ۲- ابعاد و شرایط مرزی تعریف شده برای شبیه سازی در مدل HYDRUS-2D/3D

مقادیر مربوط به پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن-معلم برای سه کلاس بافتی متفاوت رسی، لومی و شنی با استفاده از توابع کلاسی که در نرم افزار HYDRUS-2D/3D موجود است، استخراج شد و برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). پس از اجرای برنامه با شرایط اولیه و مرزی تعریف شده برای هر یک از کلاس های بافتی فوق، داده های نفوذ در هر مورد استخراج شدند.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن-معلم برای سه کلاس بافتی مورد استفاده در شبیه سازی

بافت خاک	$l$	$K_s$	$n$	$(cm^{-1})$	$s$	$r$
شنی	۵/۰	۴۹۵/۰	۶۸/۲	۱۴۵/۰	۴۳۰/۰	۰۴۵/۰
لومی	۵/۰	۰۱۷/۰	۵۶/۱	۰۳۶/۰	۴۳۰/۰	۰۷۸/۰
رسی	۵/۰	۰۰۱/۰	۰۹/۱	۰۰۸/۰	۳۸۰/۰	۰۶۸/۰

سپس برای انجام تحلیل حساسیت نفوذ آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای معادله ون گنوختن شامل  $r$  و  $n$ ،  $K_s$ ،  $l$ ،  $s$ )، برای هر بافت خاک پارامتر مورد نظر ۱ درصد تغییر داده شد در حالی که سایر پارامترها مقدار اولیه خود را داشتند و مدل با این ترکیب پارامتری اجرا شده و داده های نفوذ استخراج شدند. در نهایت میزان حساسیت هر کدام از پارامترها از رابطه (۱) تعیین شد (سیمونک و همکاران، ۱۹۹۹):

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

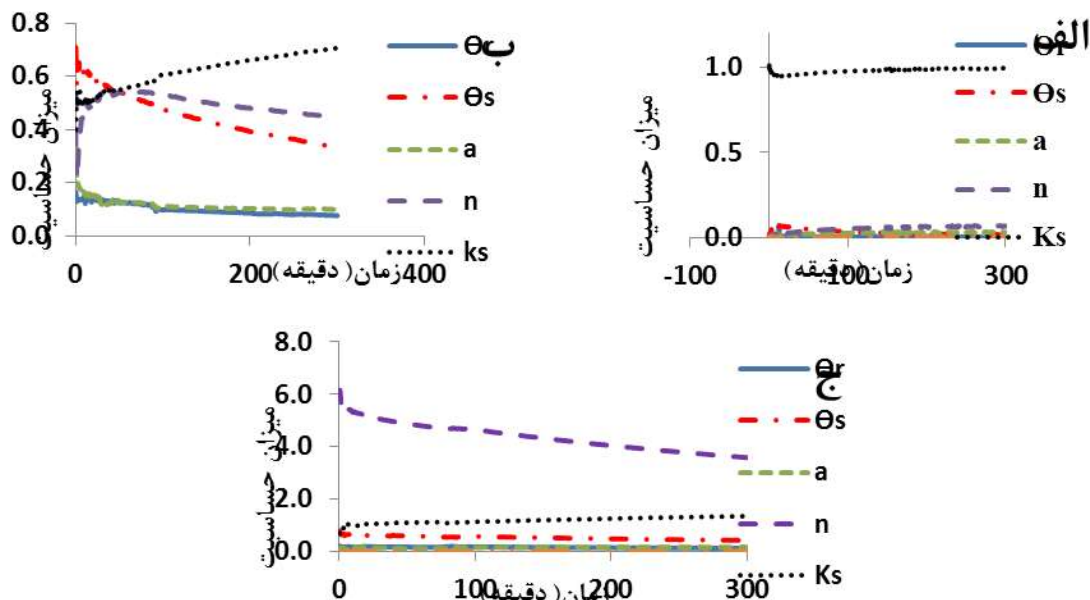
که در آن  $s(t, b)$  ضریب حساسیت یا تغییر نسبی در متغیر  $Y$  (نفوذ تجمعی آب در خاک) به ازای یک درصد تغییر در پارامتر  $b$ ، زمان، و  $b = 0.01b$  است.

### نتایج و بحث

در خاک شنی حساس ترین پارامتر در شبیه سازی نفوذ آب به خاک، پارامتر  $K_s$  بود و سایر پارامترها از حساسیت بسیار کمتری برخوردار بودند (شکل ۳-الف). در تجزیه و تحلیل حساسیت انجام شده برای خاک لومی، نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامترهای  $n$  و  $K_s$ ،  $s$  حساس بود. در این خاک مانند خاک های شنی و رسی، پارامتر  $n$  کمترین میزان حساسیت را داشت (شکل ۳-ب).

نتایج آزمون حساسیت در مورد خاک رسی نشان دهنده حساسیت زیاد نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامتر  $n$  می باشد. در این خاک میزان حساسیت نفوذ تجمعی آب به خاک در ازای ۱ درصد تغییر در مقدار اولیه پارامتر  $n$  در ابتدای نفوذ برابر با ۶ بوده که با پیشرفت فرایند نفوذ آب به خاک کاهش یافته و به حدود ۷/۳ در انتهای زمان شبیه سازی (۳۰۰ دقیقه) رسید. پس از  $n$ ، از نظر حساسیت به ترتیب  $K_s$  و  $s$  قرار داشتند و کمترین حساسیت برای پارامتر  $l$  مشاهده شد (شکل ۳-ج).

## چهاردهمین کنگره علوم خاک ایران - فیزیک خاک و رابطه آب، خاک و گیاه



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

در خاک‌های رسی توزیع اندازه منافذ موجود در خاک از دامنه بسیارگسترده‌ای برخوردار است. از آنجایی که پارامتر  $n$  شاخصی از توزیع اندازه‌ای منافذ است، به نظر می‌رسد همین امر عامل حساسیت بالای این پارامتر در این نوع خاک‌ها است. همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) در خاک‌های شنی بسیار بالاتر از خاک‌های رسی بوده و این امر در جریان‌های ثقلی آب در حالت اشباع در خاک‌های شنی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. به همین دلیل پارامتر  $K_s$  در میزان نفوذ تجمعی غرقابی در این خاک‌ها بسیار موثر است. این نتایج با یافته‌های ماسترز و همکاران (۲۰۰۰) که از مدل‌سازی معکوس برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به کمک داده‌های حاصل از جریان خروجی از زهکش‌ها در اکوسیستم‌های جنگلی استفاده نمود، شباهت دارد. همچنین عباسی و همکاران (۲۰۰۳) و روچا و همکاران (۲۰۰۶) نتایج مشابهی در رابطه با میزان تأثیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بر آب موجود در خاک و نیز میزان انتقال املاح در خاک ارائه نمودند. پژوهش‌های ماویمبلا و ون رنسرگ (۲۰۱۳) در خاک‌های لایه‌ای نیز نشان‌دهنده اهمیت زیاد پارامترهای  $K_s$  و  $s$  در میزان آب زهکش شده در این خاک‌ها می‌باشد که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، پارامترهای  $n$ ،  $K_s$  و  $s$  نسبت به سایر پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم، از اهمیت بیش‌تری در شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در مدل HYDRUS برخوردار بودند. بنابراین پیشنهاد می‌شود با توجه به حساسیت روش‌های حل معکوس به تعداد پارامترهای ورودی، برای برآورد بهینه پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به کمک استوانه‌های مضاعف، پارامترهای فوق برای بهینه‌سازی استفاده شده و سایر پارامترهای ون گنوختن-معلم (1 و 2) که تأثیر بسیار کمی بر داده‌های نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده دارند، با فرضیاتی به صورت ثابت در نظر گرفته شوند یا به روش‌های دیگر تخمین زده شوند. از آنجایی که از بین پارامترهای حساس شناسایی شده، رطوبت خاک در حالت اشباع ( $s$ ) دارای مفهوم فیزیکی مشخصی بوده و به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری است (ریتر و همکاران، ۲۰۰۳)، لذا تعداد پارامترهایی که برای بهینه‌سازی در مدل مورد استفاده قرار خواهند گرفت به دو پارامتر  $K_s$  و  $n$  قابل کاهش می‌باشد. این روش احتمال دستیابی به پاسخ‌های بهینه با درصد اطمینان بیش‌تر و در زمان کوتاه‌تر توسط مدل HYDRUS را افزایش می‌دهد.

### منابع

- عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران. چاپ اول. ۲۵۰ ص.  
Abbasi F., Jacques D., Simunek J., Feyen J. and van Genuchten M.Th. ۲۰۰۳. Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. Trans. ASAE, ۴۶(۴): ۱۰۹۷-۱۱۱۱.



- Dawson R. J., Hall J. W., Sayers P. B., Bates P. D. and Rosu C. ۲۰۰۵ Sampling-based flood risk analysis for fluvial dike systems. "Stochastic Environmental Research and Risk Analysis, ۱۹(۶): ۳۸۸-۴۰۲.
- Fuladipannah M. ۲۰۱۲. Sensitivity analysis of one dimensional hydrodynamic fully coupled model. Middle-East Journal of Scientific Research, ۱۲(۱۱): ۱۴۷۱-۱۴۷۶.
- Hopmans J.W., Simunek J., Romano N. and Durner W. ۲۰۰۲. Simultaneous determination of water transmission and retention properties. Inverse Methods. IN: Methods of Soil Analysis. Part ۴. Physical Methods. (J.H. Dane and G.C. Topp, Eds.). Soil Science Society of America Book Series No. ۵. Pages ۹۶۳-۱۰۰۸
- Inoue M., Simunek J., Hopmans J. W., and Clausnitzer V. ۱۹۹۸. In situ estimation of soil hydraulic functions using a multistep soil-water extraction technique." Water Resour. Res., ۳۴(۵): ۱۰۳۵-۱۰۵۰.
- Mavimbela S. S. W. and van Rensburg L. D. ۲۰۱۳. Estimating hydraulic conductivity of internal drainage for layered soils in situ. Hydrol. Earth Syst. Sci., ۱۷: ۴۳۴۹-۴۳۶۶.
- Rocha, D., F. Abbasi and J. Feyen, ۲۰۰۶. Sensitivity analysis of soil hydraulic properties on subsurface water flow in furrows. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ۱۳۲(۴): ۴۱۸-۴۲۴.
- Schelle H., Iden S.C., Schlüter S., Vogel H. J. and Durner W. ۲۰۱۲. Identification of effective flow processes and properties from virtual soils using inverse modeling. Geophysical Research Abstracts ۱۴.
- Simunek J., Sejna M., and van Genuchten M. Th. ۱۹۹۹. The HYDRUS-۲D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version ۲.۰, IGWMC-TPS-۷۰, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo.
- Simunek J., Jacques D., Hopmans J. W., Inoue M., Flury M. and van Genuchten M. Th. ۲۰۰۲. Solute transport during variably-saturated flow-inverse methods. In: J.H. Dane and G. C. Topp (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part ۱, Physical Methods, Chapter ۶.۶, Third edition, SSSA, Madison, WI. Zou Z. Y., Young M. H., Li Z. and Wierenga P.J. ۲۰۰۱. Estimation of depth averaged unsaturated soil hydraulic properties from infiltration experiment. J. Hydrol, ۲۴۲: ۲۶-۴۲.
- Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F. and Ratto M. ۲۰۰۴. Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models, Wiley, New York.

### Abstract

Sensitivity analysis is an essential aspect of modeling. In this study, sensitivity analysis of cumulative ponding infiltration data has been done using HYDRUS-۲D/۳D and van Genuchten-Mualem hydraulic parameters in three soils of clay, loam and sand. The results showed that saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) had the highest effect on modeling of the infiltration data in the sandy soil. In the clay soil, cumulative infiltration was found to be most sensitive to shape parameter of soil water characteristic curve (i.e.  $n$ ), followed by the  $K_s$ . However, other hydraulic parameters had low sensitivity coefficients. In the loamy soil,  $K_s$ ,  $n$  and  $s$  had the highest sensitivity coefficients. Thus, it is recommended to employ  $K_s$ ,  $n$  and  $s$  for optimization of soil hydraulic parameters using cumulative saturated infiltration data via inverse modeling. Other van Genuchten-Mualem parameters ( $\alpha$ ,  $l$  and  $r$ ) might be fixed based on some assumptions or can be predicted using other methods.