

تعیین ضرایب حساسیت پارامترهای هیدرولیکی در فرآیند نفوذ آب به خاک با استفاده از نرم-افزار HYDRUS-2D/3D

پریسا مشایخی^۱، شجاع قربانی دشتکی^۲، محمدرضا مصدقی^۳

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ۲- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ۳- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

آنالیز حساسیت یکی از جنبه های مهم در مدل سازی است. در پژوهش حاضر از نرم افزار HYDRUS-2D/3D برای تعیین ضرایب حساسیت پارامترهای هیدرولیکی معادله ونگن-اخن-معلم در فرآیند نفوذ تجمعی آب به خاک در سه نوع بافت متفاوت رسی، لومی و شنی استفاده شد. نتایج نشان داد در خاک با بافت شنی، پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) بالاترین ضریب حساسیت را داشت. در خاک رسی پارامتر شکل منحنی رطوبتی (n) و پس از آن K_s بیشترین تاثیر را بر روی داده های نفوذ تجمعی داشتند و سایر پارامترها از حساسیت پایینی برخوردار بودند. در خاک لومی نیز پارامترهای n و K_s بیشترین ضرایب حساسیت را داشتند. نتایج نشان داد که با توجه به حساس بودن فرآیند مدل سازی معکوس به تعداد پارامترها، برای بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از داده های نفوذ تجمعی، از پارامترهای n ، K_s و θ_s استفاده و سایر پارامترها به صورت ثابت در نظر گرفته شوند.

واژه های کلیدی: آنالیز حساسیت، پارامترهای هیدرولیکی خاک، مدل سازی معکوس

مقدمه

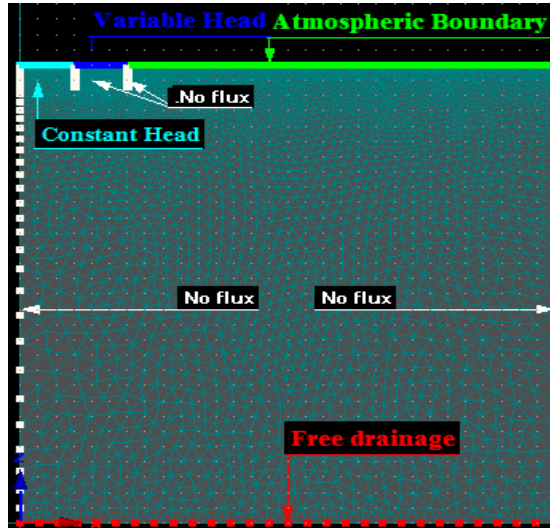
ویژگی های هیدرولیکی خاک (شامل منحنی های نگه داشت آب $\theta(h)$ و هدایت هیدرولیکی $K(\theta)$) با تاثیر بر نفوذ آب به خاک، نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب در زمین های کشاورزی و حوضه های آبخیز دارند. این ویژگی ها از طریق روش های مستقیم و غیرمستقیم متفاوتی قابل اندازه گیری هستند. انجام روش های مستقیم، هزینه بر و زمان بر بوده و نیازمند کار زیاد است (Minasny & McBratney., 2002). افزون بر این، به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی ها، تعداد نمونه های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است (Schelle et al., 2012). بنابراین در طی ۴۰ سال گذشته، روش های غیرمستقیم مختلفی برای برآورد این ویژگی ها ارائه شده است که روش حل معکوس یکی از این روش ها است. روش معکوس در مقایسه با سایر روش ها، ارزان و سریع است. در این روش، ویژگی های خاک بر پایه ی متغیرهای زود یافت در شرایط واقعی برآورد می شوند. گاهی بروز برخی عوامل، می تواند 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 می شود. یکی از این عوامل تخمین چندین پارامتر به صورت همزمان می باشد. بنابراین در تخمین پارامترها، به روش های مدل سازی معکوس توصیه می شود ابتدا حساس ترین 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، تاثیر ناچیزی بر مقدار تابع هدف دارد و این سبب می شود که پارامترهای دیگر بردار مجهولات به درستی برآورد نشوند و یا بی دلیل موجب زمان بردن محاسبات می شود (عباسی، ۱۳۸۶).

در سال‌های اخیر تجزیه و تحلیل حساسیت به طور گسترده‌ای به عنوان یک بخش ضروری از عمل مدل‌سازی پذیرفته شده است. آنالیز 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 (Saltelli et al, 2004). بدین ترتیب که اگر تغییرات یکی از پارامترهای ورودی تأثیر اندکی بر 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 آن پارامتر چشم‌پوشی کرد. بر عکس، در صورت تأثیر پذیری زیاد مقادیر خروجی مدل باید آن پارامتر را با دقت بیشتری اندازه‌گیری کرد (عباسی، ۱۳۸۶).

Inoue et al (1998) 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 رطوبتی در معادله ونگن‌اختن (n) حساسترین پارامتر در برآورد پتانسیل ماتریک خاک است. در این مطالعه پارامترهای K_s و θ_r کمترین حساسیت را نشان دادند. در مطالعه‌ای که توسط Abbasi et al (2003) برای تعیین حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک انجام گرفت، میزان آب خاک بیشترین حساسیت را به پارامتر n معادله ونگن‌اختن داشت و پس از آن به ترتیب پارامترهای θ_s و K_s قرار داشتند. در تحقیق انجام شده توسط Rocha et al (2006) پتانسیل ماتریک اندازه‌گیری شده در خاک بیشترین حساسیت را به پارامتر n و بعد از آن به θ_s داشت و کمترین حساسیت مربوط به پارامتر l بود. در این مطالعه جریان خروجی تجمعی اندازه‌گیری شده در انتهای پروفیل خاک میزان حساسیت به ترتیب زیاد به کم در پارامترهای n ، K_s ، θ_s ، θ_r ، α و l مشاهده شد. همچنین میزان آب خاک نسبت به پتانسیل ماتریک و یا جریان تجمعی خروجی حساسیت کمتری به پارامترهای هیدرولیکی مختلف نشان داد. تا کنون در پژوهش‌های مختلفی از داده‌های نفوذ سنج استوانه-دوگانه در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده شده است (Nakhaei and Šimunek, 2014). اما در ارتباط با میزان حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک نسبت به داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در این روش، تحقیق مدونی موجود نمی‌باشد. در این مقاله برای تعیین ضرایب حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک در آزمایش نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های مضاعف، از نرم افزار HYDRUS 2D/3D (Šimunek et al., 1999) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های مضاعف، در محیط نرم‌افزار HYDRUS2D/3D، محدوده خاک مرطوب در زیراستوانه‌های 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 استوانه در خاک ۷ سانتی‌متر و عمق خاک ۱۵۰ سانتی‌متر تعیین شد. ارتفاع آب موجود در سطح خاک در هر دو استوانه معادل ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که برای استوانه داخلی ثابت و برای استوانه بیرونی با گذشت زمان متغیر بود. شرایط مرزی برای محدوده سطح خاک در خارج از استوانه‌ها به صورت اتمسفری، برای دو طرف محدوده تعریف شده و نیز دیواره استوانه‌ها شرایط بدون جریان و برای عمق خاک زهکش آزاد تعریف شد (شکل ۱). برای شبیه‌سازی عددی حرکت آب در خاک از مدل هیدرولیکی معلم- ونگن‌اختن با فرض $m=1-1/n$ استفاده شد. همچنین زمان نهایی نفوذ برای همه موارد معادل ۳۰۰ دقیقه در نظر گرفته شد.



شکل ۱- ابعاد و شرایط مرزی تعریف شده برای شبیه سازی در مدل HYDRUS2D/3D

پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم شامل θ_r رطوبت باقی مانده ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θ_s رطوبت اشباع خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، α پارامتری مرتبط با عکس مکش ماتریک در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (cm^{-1})، n پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی (-)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (cm s^{-1}) و l پارامتر پیوستگی منافذ خاک (-)، برای سه کلاس بافتی متفاوت رسی، لومی و شنی به کمک برنامه Rosetta که در نرم افزار HYDRUS-2D/3D موجود است، استخراج شد و به عنوان تخمین‌های اولیه برای شبیه سازی نفوذ آب به خاک مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱). پس از اجرای برنامه با این شرایط اولیه و مرزی تعریف شده برای هر یک از کلاس‌های بافتی فوق، داده‌های نفوذ در هر مورد استخراج شدند.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی برای سه کلاس بافتی مورد استفاده در شبیه سازی

بافت خاک	θ_r	θ_s	α	n	K_s	l
شنی	۰/۰۴۵	۰/۴۳	۰/۱۴۵	۲/۶۸	۰/۴۹۵	۰/۵
لومی	۰/۰۷۸	۰/۴۳	۰/۰۳۶	۱/۵۶	۰/۰۱۷۳	۰/۵
رسی	۰/۰۶۸	۰/۳۸	۰/۰۰۸	۱/۰۹	۰/۰۰۱	۰/۵

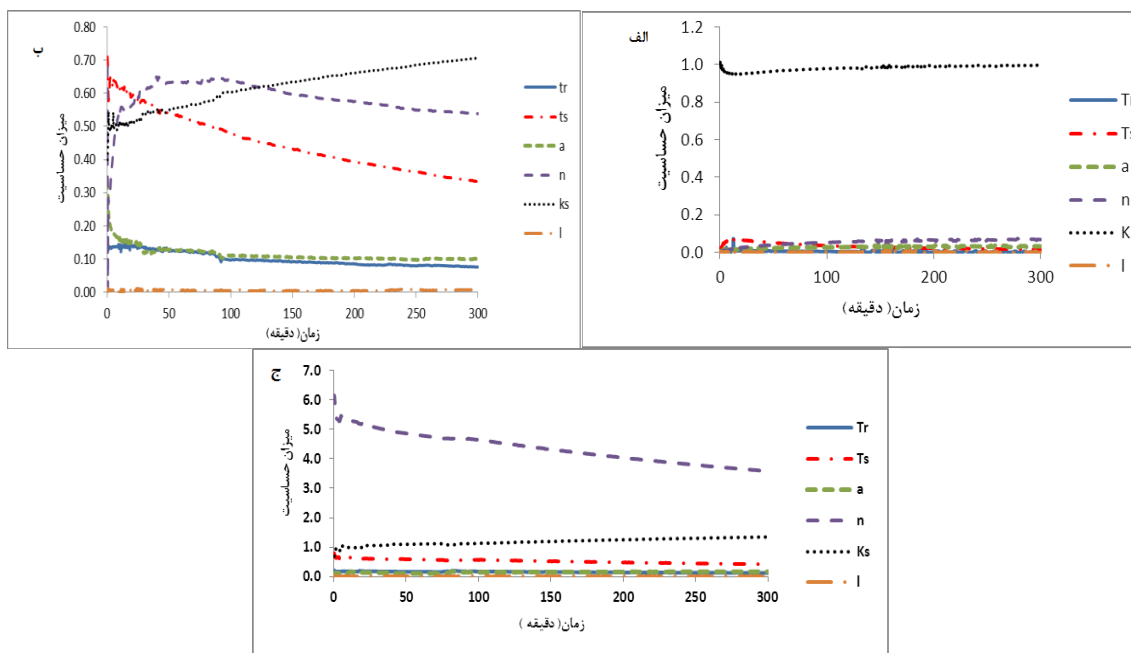
سپس برای انجام تحلیل حساسیت نفوذ آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای معادله ونگن-اخن-معلم شامل n ، α ، K_s ، l ، θ_s و θ_r)، برای هر بافت پارامتر مورد نظر ۱ درصد تغییر داده شد در حالی که سایر پارامترها مقدار اولیه خود را داشتند و مدل با این ترکیب پارامتری اجرا و داده‌های نفوذ استخراج شدند. در نهایت میزان حساسیت هر کدام از پارامترها از فرمول (۱) تعیین شد (Simunek et al., 1999).

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

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

نتایج و بحث

شکل ۲ نتایج آزمون حساسیت نفوذ تجمعی غرقابی آب به خاک نسبت به پارامترهای مدل ون گنوختن- معلم را در سه نوع بافت خاک رسی، لومی و شنی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در سه نوع بافت خاک مورد مطالعه کمترین ضریب حساسیت مربوط به پارامترهای پیوستگی منافذ معادله ون گنوختن- معلم (l) و رطوبت باقیمانده (θ_r) بود، که با گزارش‌های (2003) Abbasi et al و (2002) Ines and Droogers همخوانی دارد. بر اساس پژوهش‌های انجام گرفته توسط این پژوهش-گران، 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 فرایند مدل‌سازی به روش حل معکوس از بهینه‌سازی این دو پارامتر صرف نظر کرد.



شکل ۲- میزان حساسیت نفوذ تجمعی نسبت به پارامترهای معادله ونگن وختن در خاک شنی (الف)، خاک لومی (ب) و خاک رسی (ج)

در خاک شنی حساس‌ترین پارامتر در شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک، پارامتر K_s بود و سایر پارامترها از حساسیت بسیار کمتری برخوردار بودند (شکل ۲-الف). همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) در خاک‌های شنی بسیار بیش‌تر از خاک‌های رسی بوده و این امر در جریان ثقلی آب در حالت اشباع در خاک‌های شنی از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل پارامتر K_s در میزان نفوذ تجمعی غرقابی در این خاک‌ها بسیار موثر است. (2012) Jadoon et al نیز به این نکته اشاره نمودند که جریان آب در خاک‌های درشت بافت نسبت به پارامتر K_s بسیار حساس است.

در آنالیز حساسیت انجام شده در خاک لومی نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامترهای K_s ، n و θ_s حساس بود. در این خاک مانند خاک‌های شنی و رسی، پارامتر l کمترین میزان حساسیت را داشت (شکل ۲-ب).

نتایج آزمون حساسیت در مورد خاک رسی نشان‌دهنده حساسیت بالای نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به پارامتر n معادله ونگن وختن است. 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 فرآیند نفوذ آب به خاک کاهش یافته و به حدود ۳/۷ در انتهای زمان تنظیم شده برای شبیه‌سازی رسید. خاک‌های رسی از توزیع اندازه گسترده‌ای برخوردارند. از آنجایی که پارامتر n شاخصی از توزیع اندازه منافذ است، به نظر می‌رسد همین امر عامل حساسیت زیاد این پارامتر در این نوع خاک‌ها است. پس از n به ترتیب K_s و θ_s قرار داشتند و کمترین حساسیت در پارامتر l مشاهده شد (شکل ۲-ج).

این نتایج با یافته های (Musters et al (2000) که از مدل سازی معکوس برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با کمک داده های حاصل از جریان خروجی از زهکش ها در اکوسیستم های جنگلی استفاده نمود، شباهت دارد. همچنین (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. مطالعات انجام شده توسط (Mavimbela & van Rensburg (2013) در خاک های لایه ای نیز نشان دهنده اهمیت بالای پارامترهای K_s و θ_s در میزان آب زهکش شده در این خاک ها -است که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، پارامترهای K_s ، n و θ_s نسبت به سایر پارامترهای معادله ونگن-اخن، از اهمیت بالاتری در شبیه سازی نفوذ آب به خاک در مدل HYDRUS برخوردار بودند. بنابراین توصیه می شود با توجه به حساسیت روش های حل معکوس به تعداد پارامترهای ورودی، برای برآورد بهینه پارامترهای معادله ونگن-اخن با استفاده از داده های نفوذ تجمعی اندازه گیری شده به کمک استوانه های مضاعف، پارامترهای فوق برای بهینه سازی استفاده شده و پارامترهای α ، θ_r و l که تاثیر بسیار کمی بر داده های نفوذ تجمعی شبیه سازی شده در خاک دارند، به صورت ثابت در نظر گرفته شوند. از آنجایی که از بین پارامترهای حساس شناسایی شده، رطوبت خاک در حالت اشباع (θ_s) دارای مفهوم فیزیکی مشخصی بوده و به صورت مستقیم قابل اندازه گیری است، لذا تعداد پارامترهایی که برای بهینه سازی در مدل مورد استفاده قرار خواهند گرفت به دو پارامتر K_s و n قابل کاهش می باشد. این روش احتمال دستیابی به پاسخ های بهینه با درصد اطمینان بیشتر و در زمان کوتاه تر توسط مدل را افزایش می دهد.

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. 2003. "Inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil." Trans. ASAE, 46(4): 1097-1111.
- Dawson R. J., Hall J. W., Sayers P. B., Bates P. D. and Rosu C. 2005. "Sampling based flood risk analysis for fluvial dike systems". Stochastic Environmental Research and Risk Analysis, 19(6): 388-402.
- Dawson R. J., Hall J. W., Sayers P. B., Bates P. D. and Rosu C. 2005. "Sampling-based flood risk analysis for fluvial dike systems". Stochastic Environmental Research and Risk Analysis, 19(6): 388-402
- Fuladipannah M. 2012. Sensitivity Analysis of One Dimensional Hydrodynamic Fully Coupled Model. Middle-East Journal of Scientific Research, 12 (11): 1471-1476.
- Hopmans J. W., Šimunek J., Romano N. and Durner W. 2002. Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. Published by: Soil Science Society of America, 963-1008.
- Ines. A. V. M., and Droogers. P. 2002. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. Hydrology and Earth System Sciences 6(1):49- 65.
- Inoue M., Simunek J., Hopmans J. W., and Clausnitzer V. 1998. In situ estimation of soil hydraulic functions using a multistep soil-water extraction technique." Water Resour. Res., 34(5):1035-1050.
- Jadoon Kh. Z., Weihermuller L., Scharnagl B., Kowalsky M. B., Bechtold M., Hubbard S.S., Vereecken H., and Lambot S. 2012. Estimation of Soil Hydraulic Parameters in the Field by Integrated Hydrogeophysical Inversion of Time-Lapse Ground-Penetrating Radar Data. Vadose Zone Journal, 11(4)
- Mavimbela S. S. W. and van Rensburg L. D. 2013. Estimating hydraulic conductivity of internal drainage for layered soils in situ. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17: 4349-4366.
- Minasny B., and McBratney A. B. 2002. The Neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. Soil Science Society of America journal 66:352-361.
- Musters P. D. A., Bouten, W., Versteraten, J. M. 2000. Potentials and limitation of modeling the vertical distributions of root water uptake of an Austrian pine forest on a sandy soil. Hydrol. Proc. 14: 103-115.
- Nakhaei M. and Šimunek J. 2014. Parameter estimation of soil hydraulic property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 62(1): 7-15.
- Rocha D., Abbasi F. and Feyen J. 2006. Sensitivity Analysis of Soil Hydraulic Properties on Subsurface Water Flow in Furrows, 132:418-424.



- Schelle H., Iden S.C., Schlüter S., Vogel H. J. and Durner W. 2012. Identification of effective flow processes and properties from virtual soils using inverse modeling. Geophysical Research Abstracts 14.
- 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.
- Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F. and Ratto M. 2004. Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models, Wiley, New York.

Sensitivity coefficients of soil hydraulic parameters in infiltration process using HYDRUS-2D/3D software

P. Mashayekhi¹, Sh. Ghorbani Dashtaki², M. R. Mosaddeghi³

1- Assist. Prof., Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. Agricultural Research, Education and Extension organization (AREEO), Isfahan, Iran.

2- Prof., Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran

3- Prof., Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract

Sensitivity analysis is an essential aspect of modeling. In this study, HYDRUS-2D/3D software was used to determine the sensitivity coefficients of van Genuchten-Mualem parameters in cumulative infiltration in 3 different soil textures (clay, loamy and sandy). Results show that saturated hydraulic conductivity (K_s) had the highest sensitivity coefficient in sandy soil. Cumulative infiltration was found to be most sensitive to the shape parameter in van Genuchten's soil hydraulic model (n), followed by the saturated hydraulic conductivity (K_s) in clay texture. In loamy soil K_s , n and θ_s had the highest sensitivity coefficients. So due to the sensitivity of inverse modeling process to the number of parameters, using of K_s , n and saturated soil water content (θ_s) parameters is recommended for soil hydraulic parameter optimization by cumulative infiltration data and the other parameters would be constant in their right values.

Key words: sensitivity analysis, soil hydraulic parameters, inverse modeling