

شبیه‌سازی منحنی رخنه عناصر خشی و غیر جذبی با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی خاک

علی دیندارلو* و علیرضا سپاسخواه**

*نگارنده مسئول، نشانی: بوشهر، دشتستان، برازجان، جاده امامزاده ابراهیم، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه خلیج فارس، تلفن:

۰۹۱۷۹۲۸۴۴۷۳، پیام‌نگار: dindarlo@pgu.ac.ir

** به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استاد گروه آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۰/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۸/۸

چکیده

فرایند انتقال املاح از توزیع سرعت آب در محیط متخلخل خاک تأثیر می‌پذیرد و توزیع اندازه منافذ خاک از منحنی مشخصه آب خاک به کمک ضریب n یا نمای معادله منحنی مشخصه قابل پیش‌بینی است که می‌تواند در استنتاج توزیع سرعت آب در منافذ استفاده شود. در این مطالعه منحنی رخنه عناصر خشی و غیر جذبی با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی خاک برای چهار خاک با بافت‌های مختلف شبیه‌سازی شد. برای ارزیابی شبیه‌سازی منحنی رخنه، نتایج آن با منحنی رخنه اندازه‌گیری شده، مقایسه شد. منحنی رخنه به دو پارامتر هیدرولیکی خاک بستگی دارد، یکی پارامتر توزیع اندازه منافذ خاک (n) است که این پارامتر از منحنی مشخصه آب خاک به دست می‌آید و دیگری پارامتر مربوط به پیوستگی خلل و فرج (m , Pore connectivity) است. در این شبیه‌سازی مقادیر m برای خاک‌های مختلف بین ۲- و ۵- تعیین گردید. همچنین درصد سیلت در نمونه خاک‌ها، نقش مهمی در تعیین پارامتر پیوستگی خلل و فرج (m) داشته است. براین اساس معادله‌ای نیز بین میزان سیلت خاک و مقدار m برای خاک‌های مختلف ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی

انتقال املاح، پارامترهای هیدرولیکی، درصد سیلت، منحنی رخنه، منحنی مشخصه آب خاک

مقدمه

است، و توصیف این فرایندها و هرگونه بحث کمی درباره آنها مستلزم مدل‌سازی انتقال املاح در خاک است. تنوع مدل‌های توسعه یافته برای بیان انتقال املاح در خاک زیاد هستند. (van Geunchten & Wagenet, 1989; Jury, 1996; Roth, 1990; Toride & Leij, 1996)

جوری (Jury, 1982) از مدل TFM^2 برای برآورد انتقال املاح استفاده کرد. این مدل که بر اساس فرضیه احتمالات بنا شده است، در آزمایش‌های مزرعه‌ای برآورد خوبی از جابه‌جایی املاح داشت. آگوس و کسل (Agus & Cassel, 1992) اثر خاک‌ورزی را بر حرکت املاح در مزرعه بررسی کردند. آنان به این منظور از سه تیمار خاک‌ورزی استفاده کردند و نتیجه گرفتند که عملیات خاک‌ورزی باعث افزایش سرعت انتقال املاح می‌شود.

آلودگی محیط زیست مسئله‌ای جهانی است که در نتیجه عوامل متعددی مانند فرسایش خاک و کاربرد بی‌رویه کود، سموم، رسوبات و دیگر مواد آلی و معدنی پدید می‌آید. انتقال املاح درون خاک می‌تواند کیفیت آب زیرزمینی و آب سطحی را تحت تأثیر قرار دهد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی درباره حرکت املاح در خاک، در آزمایشگاه و در مزرعه انجام گرفته است (Janes et al., 1988; Roth et al., 1991; Thorburn et al., 1990) نقطه مشترک در پژوهش‌های مزرعه‌ای، وجود تغییرات مکانی^۱ بسیار زیاد در حرکت املاح است. پژوهش‌های انتقال املاح در بسیاری از فرایندهای مهم خاک‌شناسی و آبیاری، مانند آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی، آبشویی و حرکت عناصر غذایی در خاک مهم

برای مقادیر غیر از ظرفیت مزرعه برای چندین بافت خاک شبیه‌سازی نمودند.

مواد و روش‌ها

سیستم منفذی خاک ترکیبی از سری‌های مختلفی از لوله‌های موئینه‌ای با قطرهای مختلف بوده و توزیع اندازه لوله‌ها هم از منحنی مشخصه رطوبتی خاک پیروی می‌کند. منحنی مشخصه رطوبتی خاک نشان دهنده رابطه بین حجم آب خاک و مکش است که به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود (Brooks & Corey, 1964):

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h} \right)^n \quad (1)$$

که در آن،

S اشباع مؤثر، θ رطوبت حجمی خاک (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، θ_s رطوبت حجمی خاک اشباع (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)، h_d مکش ورود هوا (سانتی‌متر)، h مکش موئینگی (سانتی‌متر)، n پارامتر مربوط به توزیع اندازه منافذ خاک و θ_r رطوبت حجمی باقیمانده (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) است (Brooks & Corey, 1964 ; Mualem, 1978).

رابطه ۱ برای تشریح و توضیح ارتباط بین توزیع اندازه لوله کاپیلاری (موئینگی) و رطوبت حجمی خاک یا اشباع مؤثر به کار برده می‌شود. رابطه هگن - پویزوله هدایت هیدرولیکی یک لوله موئین را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$K_h = \frac{Te^2}{2\mu g} h^{-2} \quad (2)$$

که در آن،

K_h (سانتی‌متر در دقیقه) هدایت موئینگی لوله موئین است که به اشباع مؤثر (S) بستگی دارد؛ e (کیلوگرم بر مجذور دقیقه) کشش سطحی آب خاک؛ g (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع. مجذور دقیقه) وزن واحد حجم آب؛ T چگونگی اتصال

نتایج زیادی در مورد توزیع منافذ خاک و ارتباط بین منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع گزارش شده است. این تحقیقات پایه‌ای قوی برای توجه به اثر توزیع سرعت منفذ موضعی در انتقال املاح بوده است. (Burdine, 1953; van Genuchten, 1980; Brooks & Corey, 1964; Mualem, 1976, 1978; Timlin *et al.*, 1993; Schuh & Cline, 1990; Ross & Smettem, 1999; 1993)

بعضی از تحقیقات در جهت تحلیل انتقال املاح با توجه به پارامترهای هیدرولیکی پایه‌ریزی شده‌اند. هورتن و همکاران (Horton *et al.*, 1987) و جوری و رز (Jury & Roth, 1990) با استفاده از هدایت هیدرولیکی خاک منحنی رخنه یا زمان عبور را برای خاک‌های فشرده تخمین زدند. این نتایج نتوانستند روش خوبی برای تخمین منحنی رخنه ارائه دهند. ونگ و همکاران (Wang *et al.*, 2002) با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی خاک منحنی رخنه را شبیه‌سازی کردند. ایشان در این مطالعه ضریب مربوط به نحوه پیوستگی خلل و فرج^۱ را در حد ظرفیت مزرعه در نظر گرفتند یعنی منحنی رخنه املاح خاک را تنها با منحنی مشخصه خاک ربط داده و ضریب مربوط به نحوه پیوستگی خلل و فرج‌ها را در حد ظرفیت مزرعه و ثابت ($m = -2$) در نظر گرفتند که ممکن است این ضریب برای همه خاک‌ها به علت ساختار متفاوت منافذ و ساختمان خاک یکسان نباشد. محمدی و همکاران (Mohammadi *et al.*, 2009) مدلی بین خصوصیات رطوبتی خاک^۲ (SMC) و منحنی رخنه را ارائه دادند. به کمک این مدل، با استفاده از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک می‌توان انتقال املاح با سرعت بسیار پایین را تعیین نمود. هملن و کچانوسکی (Hamlen & Kachanoski, 2004) شرایط مرزی خاک را بر روی نفوذ اولیه املاح در خاک، بررسی کردند. آنها منحنی رخنه عناصر خنثی و غیرجذب‌ی را به کمک منحنی مشخصه خاک و ضریب مربوط به پیوستگی خلل و فرج

$$K_h = K_m S^{2+m} = \frac{(2 + (m+1)n)K_s S^n}{n(\theta_s - \theta_r)} \quad (8)$$

در رابطه ۸ با طرفین وسطین کردن، رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$\frac{K_h}{K_s} = \frac{(2 + (m+1)n)S^{2+m}}{n(\theta_s - \theta_r)} \quad (9)$$

تا اینجا معادله‌ای برای هدایت هیدرولیکی ارائه شد که می‌تواند به کمک پارامترهای هیدرولیکی خاک به دست آید.

برای منحنی حرکت املاح در خاک (منحنی رخنه) در گرادیان واحد و شرایط اشباع، $\frac{K_s}{\theta_s - \theta_r}$ در سمت چپ رابطه ۹ برابر متوسط سرعت آب در منافذ خاک است که با V_0 نشان داده می‌شود و K_h سرعت جریان آب در لوله موئین یا سرعت انتقال املاح است. بنابراین سرعت آب و املاح در لوله عبارت است از:

$$V = \frac{(2 + (m+1)n)V_0 S^{2+m}}{n} \quad (10)$$

که در آن،

$$V = K_h \text{ و } V_0 = K_s / (\theta_s - \theta_r) \text{ است.}$$

اگر تابع همرفت فقط برای ستون خاک یک بعدی در نظر گرفته شود، رابطه غلظت توده املاح برای هر نقطه، x ، به صورت رابطه ۱۱ بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} C_{(x,t)} V_0 &= C_0 \int_s^1 K_h dS \quad (11) \\ &= C_0 \int_s^1 \frac{(2 + (m+1)n)V_0 S^{2+m}}{n} dS \\ &= C_0 V_0 - C_0 V_0 S^{\frac{2+(m+1)n}{n}} \end{aligned}$$

لوله‌ها به هم و μ (کیلوگرم بر سانتی‌متر. دقیقه) لزوجت آب است. T می‌تواند تابعی از اشباع مؤثر خاک باشد که به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود (Burdine, 1953; Brooks & Corey, 1964)

$$T = aS^m \quad (3)$$

که در آن،

a ضریب ثابت و m پارامتر وابسته به پیوستگی خلل و فرج به هم در لوله‌های موئین است. از ترکیب رابطه‌های ۱، ۲، ۳، و رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$K_h = \frac{ae^2}{2g\mu h_d^2} S^{2+m} \quad (4)$$

که اگر $E = ae^2/2\mu g$ در نظر گرفته شود رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$K_h = \frac{E}{h_d^2} S^{2+m} \quad (5)$$

زمانی که $S=1$ باشد از رابطه ۵ می‌توان حداکثر هدایت لوله موئین را به دست آورد که با رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$K_m = \frac{E}{h_d^2} \quad (6)$$

که در آن،

K_m هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای یک لوله موئین است (سانتی‌متر در دقیقه). هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، K_s ، مجموع هدایت هیدرولیکی همه لوله‌های موئین است که در منحنی مشخصه رطوبتی دخالت دارند که برابر است با:

$$K_s = \int_{\theta_r}^{\theta_s} K_h d\theta = \frac{n(\theta_s - \theta_r)K_m}{2 + (m+1)n} \quad (7)$$

بنابراین، هدایت هیدرولیکی لوله موئین می‌تواند به صورت رابطه ۸ بیان شود:

که در آن،
 $C_{(x,t)}$ غلظت املاح در هر نقطه و در هر زمان، C_0 غلظت املاح ورودی است.
 از رابطه ۱۱ می توان رابطه ۱۲ را به دست آورد:

$$\frac{C_{(t)}}{C_0} = 1 - \left[\frac{n}{(2 + (m + 1)n)B} \right]^{\frac{2+(m+1)n}{2+mn}} \quad (17)$$

$$\frac{C_{(t)}}{C_0} = 1 - \left(\frac{D_1}{B} \right)^{D_2} \quad (18)$$

$$D_1 = \frac{n}{(2 + (m + 1)n)B} \quad (18 a)$$

$$D_2 = \frac{(2 + (m + 1)n)}{(2 + mn)} \quad (18 b)$$

که در آن،
 رابطه های ۱۷ و ۱۸ برای حالتی است که املاح در خاک از نوع املاح خنثی و غیر جذبی باشند، اما اگر املاح موجود در خاک از نوع املاح جذبی باشند که جذب سطحی ذرات خاک می شوند باید تحلیل متفاوتی ارائه شود. در این حالت ضریب جذب سطحی به صورت رابطه ۱۹ بیان می شود:

$$S = kC \quad (19)$$

که در آن،
 k ضریب توزیع (متر مکعب بر کیلوگرم) است. لذا مدل برای انتقال املاح از نوع جذبی به صورت رابطه ۲۰ بیان می شود:

$$\frac{C_{(t)}}{C_0} = 1 - \left[\frac{n(1 + \rho k / \theta)}{(2 + (m + 1)n)B} \right]^{\frac{2+(m+1)n}{2+mn}} \quad (20)$$

که در آن،
 L طول ستون خاک و $C_{(t)}/C_0$ غلظت نسبی املاح عبوری است.
 در مدل ارائه شده در رابطه ۱۸، دو پارامتر ویژه وجود

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = 1 - S^{\frac{n}{2+mn}} \quad (12)$$

را می توان از رابطه ۱۰ و به صورت رابطه ۱۳ به دست آورد:

$$S = \left[\frac{Vn}{(2 + (m + 1)n)V_0} \right]^{\frac{n}{2+mn}} \quad (13)$$

با ترکیب رابطه های ۱۲ و ۱۳ رابطه ۱۴ حاصل می شود:

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = 1 - \left[\frac{nV}{(2 + (m + 1)n)V_0} \right]^{\frac{2+(m+1)n}{2+mn}} \quad (14)$$

چون $x = Vt$ و $V = x/t$ است، رابطه ۱۴ به صورت رابطه ۱۵ در می آید:

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = 1 - \left[\frac{nx}{(2 + m + 1)n)tV_0} \right]^{\frac{2+(m+1)n}{2+mn}} \quad (15)$$

برای آزمایش انتقال املاح، x را می توان برابر طول ستون خاک مورد آزمایش در نظر گرفت؛ بنابراین رابطه ۱۵ به رابطه ۱۶ تبدیل می شود:

$$\frac{C_{(t)}}{C_0} = 1 - \left[\frac{nL}{(2 + (m + 1)n)tV_0} \right]^{\frac{2+(m+1)n}{2+mn}} \quad (16)$$

که در آن،
 L طول ستون خاک و $C_{(t)}/C_0$ غلظت نسبی املاح عبوری است.

برای ارزیابی مدل پیشنهادی، از خاک سری گربایگان با بافت لوم‌شنی، خاک سری آسپاس با بافت لومی، خاک سری چیتگر با بافت سیلتی-لوم و خاک سری دانشکده با بافت لومرسی استفاده شد. سری‌های خاک از مناطق مختلف استان فارس به صورت نمونه‌های دست نخورده آماده شدند. جدول ۱ خواص فیزیکی مربوط به این ۴ سری خاک را نشان می‌دهد. منحنی مشخصه رطوبتی آب خاک برای سری‌های خاک گربایگان، دانشکده و چیتگر توسط حاتمی‌زاده و سپاسخواه (Hatamizadeh & Sepaskhah, 2007) ارائه شد و برای خاک سری آسپاس در این پژوهش تهیه شد که در شکل ۱ نشان داده شده است.

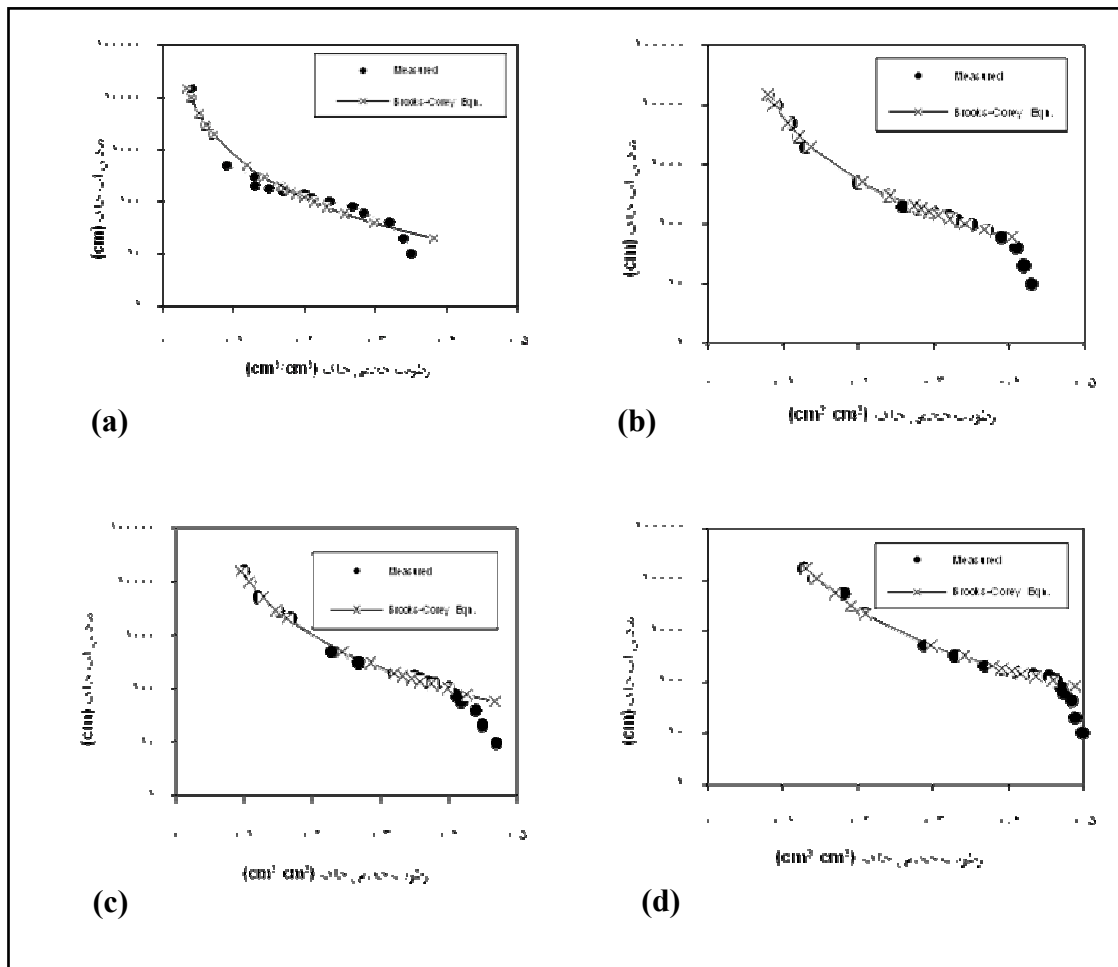
با استفاده از نرم افزار Excel گزینه Solver، معادله بروکس و کوری (رابطه ۱) بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه آب خاک برآزش داده شد و ضرایب معادله بروکس و کوری (h_d ، θ_r و n) تعیین گردید. پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده در جدول ۲ ارائه شده است.

دارد، یکی حجم منافذ نسبی عبوری اولیه (D_1) و دیگری شاخص شکل برای منحنی رخنه خاک (D_2) که به ترتیب در رابطه‌های ۱۸a و ۱۸b مشخص شده‌اند. بنابراین رابطه ۱۸ منحنی رخنه املاح را بیان می‌کند که به پارامترهای D_1 و D_2 بستگی داشته و D_1 و D_2 هم خود به پارامترهای n و m بستگی دارند. پارامتر n بیان کننده توزیع اندازه منفذی خاک و m هم وابسته به پیوستگی خلل و فرج در منافذ خاک است. برای یک خاک خاص، n را باید از طریق منحنی مشخصه رطوبتی آب تخمین زد که همان نمای رابطه ۱ است. پارامتر m هم که بین ۲- و ۵- متغیر است (Mualem, 1978). به‌ازای مقادیر $0 < \theta < n/(2-n)$ هم باید $C_{(t)}/C_0$ را برابر صفر قرار داد چون مقداری منفی حاصل می‌شود لذا مقادیر منفی برای نسبت $C_{(t)}/C_0$ که باید بین صفر و یک باشد قابل قبول نیست.

بنابراین رابطه ۱۸ برای املاح غیر جذبی که جذب سطحی ذرات خاک نمی‌شوند و رابطه ۲۰ برای املاح جذبی که جذب سطحی ذرات خاک می‌شوند جهت تخمین منحنی رخنه املاح در خاک مناسب بوده و به راحتی قابل استفاده است.

جدول ۱- برخی خواص فیزیکی ۴ سری خاک مورد مطالعه

مشخصات خاک	گربایگان (لوم شنی)	آسپاس (لومی)	چیتگر (سیلتی لوم)	دانشکده (لوم رسی)
θ_r (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	۰	۰/۰۲۳۲	۰/۰۲۵۵	۰/۰۳۸
θ_s (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۴۸	۰/۵۱
h_d (سانتی‌متر)	۲۱/۸	۴۶/۱۳	۵۵/۱۸	۶۷/۷۵
n	۰/۳۶۴	۰/۳۴۶	۰/۳۲۹	۰/۲۹۹
v (سانتی‌متر مکعب بر دقیقه)	۰/۲۷۵	۰/۱۷۴	۰/۱۳۶	۰/۰۰۴۳



شکل ۱- منحنی مشخصه رطوبتی برای ۴ سری خاک؛ a- سری گریایگان، b- سری آسپاس، c- سری چیتگر، و d- سری دانشکده

جدول ۲- پارامترهای منحنی مشخصه برازش شده به معادله بروکس و کوری برای ۴ سری خاک مورد مطالعه (Brooks & Corey, 1964)

سری خاک	بافت	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	چگالی واقعی (گرم بر سانتی-متر مکعب)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی-متر مکعب)	رطوبت حجمی اولیه (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب)	رطوبت حجمی اشباع (سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب)
گریایگان	لوم شنی	۷۱	۱۹	۱۰	۲/۶	۱/۶۸	۰/۱۵	۰/۳۶
آسپاس	لومی	۴۶	۴۵	۹	۲/۴	۱/۳۵	۰/۰۳	۰/۴۴
چیتگر	سیلتی لوم	۲۰	۵۳	۲۷	۲/۹	۱/۴۷	۰/۰۴	۰/۴۹
دانشکده	لوم رسی	۳۵	۳۵	۳۰	۲/۴	۱/۲	۰/۰۴	۰/۵۱

میزان شوری محلول خروجی از استوانه‌های خاک توسط EC متر اندازه‌گیری شد. EC متر مورد استفاده از نوع دیجیتالی بود که قبل از اندازه‌گیری واسنجی شد.

نتایج و بحث

با استفاده از رابطه ۱۸ ارائه شده در اصول نظری پژوهش منحنی رخنه برای یون کلر (خنثی و غیر جذبی) خاک‌های مختلف شبیه‌سازی شد و نتایج در شکل ۲ ارائه گردید. با فرض اینکه مقدار یون کلر در محلول مناسب با مقدار شوری آن است بنابراین نسبت شوری محلول خروجی به محلول ورودی برای نسبت یون کلر محلول خروجی به محلول ورودی در نظر گرفته شد.

در این شبیه‌سازی مقدار ضریب m برابر ۲- به کار برده شد (Wang et al., 2002).

پارامتر m پیوستگی خلل و فرج‌ها را بیان می‌کند. بنابر پیشنهاد معلم (Mualem, 1978)، پارامتر m بین ۲- و ۵- متغیر است ($-5 \leq m \leq -2$) که در آن ۲- مربوط به حالت FC (ظرفیت زراعی مزرعه) است. شبیه‌سازی منحنی رخنه با $m = -2$ برای خاک‌های سری گربایگان، آسپاس و دانشکده با منحنی اندازه‌گیری شده همخوانی خوبی داشته اما برای خاک سری چیتگر منحنی شبیه‌سازی مقدار زیادی با منحنی اندازه‌گیری شده تفاوت دارد.

برای بررسی آماری صحت روش شبیه‌سازی، مقدار تجمعی غلظت نسبی برای ۴ سری خاک به صورت رابطه ۲۱ ارائه گردید:

$$W_p = \int_0^{B_i} \frac{c}{c_0} dB \approx \sum \frac{(C_i + C_{i-1})(B_i - B_{i-1})}{c_0} \quad (21)$$

که در آن،

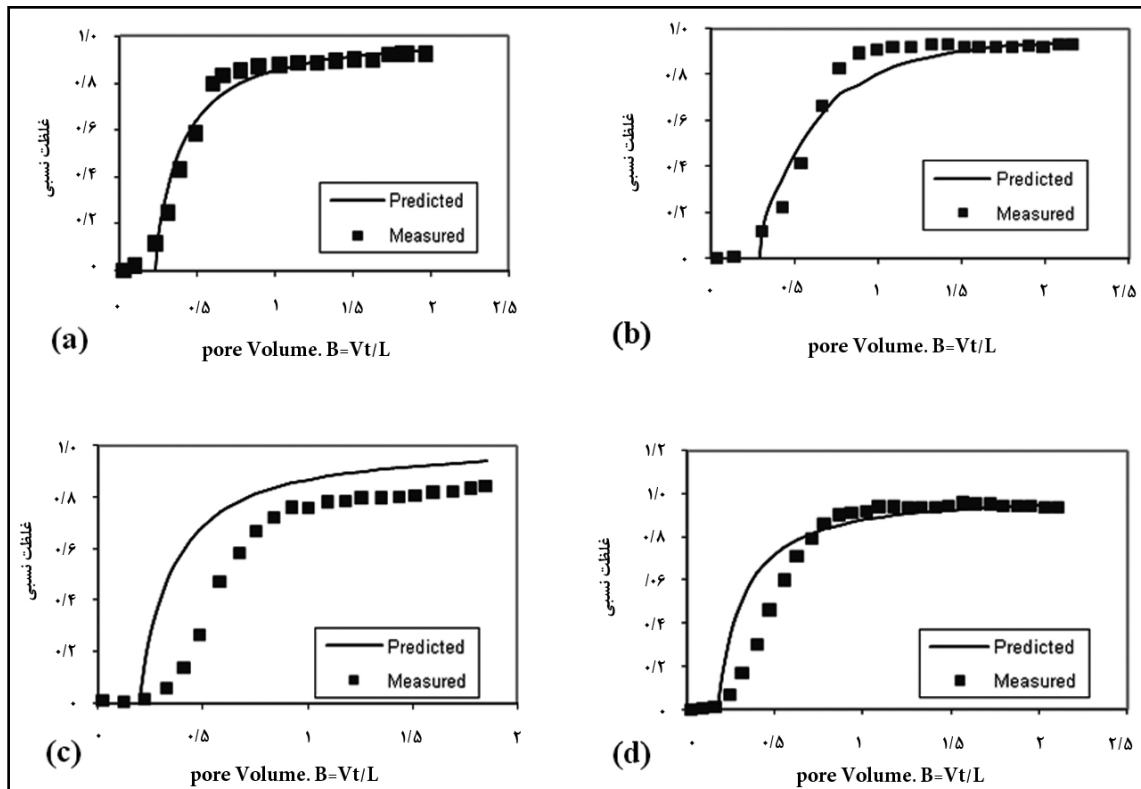
W_p مقدار تجمعی غلظت نسبی املاح خروجی؛ B_i حجم منافذ نهایی و B_i ؛ B_{i-1} حجم منافذ برای i امین و $i-1$ امین بازه و C_i و C_{i-1} غلظت املاح در محلول خروجی در $i-1$ امین بازه است.

نمونه‌های دست نخورده توسط لوله‌هایی از جنس P.V.C. با قطر داخلی ۱۰/۱۶ سانتی‌متر (۴ اینچ) و ارتفاع ۳۷، ۳۵، ۳۷/۵، و ۲۵ سانتی‌متر به ترتیب برای خاک‌های سری گربایگان، آسپاس، چیتگر، و دانشکده برداشته شدند. همچنین مدت زمان انجام آزمایش‌ها ۲۶۴، ۴۳۴، ۵۱۰، و ۱۲۲۱۰ دقیقه برای نمونه خاک‌های مورد مطالعه (به ترتیب مذکور) بود.

چون هر کدام از آزمایش‌ها در یک زمان خاصی انجام شد، لذا شوری‌هایی که برای هر آزمایش تهیه شد، EC یکسانی نداشتند (مابقی شرایط آزمایش یکسان بود). لذا آب ورودی به ستون‌های خاک با شوری‌های ۵/۷، ۵/۹، ۵/۶۸، ۶/۰۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب برای خاک‌های سری گربایگان، آسپاس، چیتگر، و دانشکده به کار رفت که با املاح کلرور سدیم (NaCl) و کلرور کلسیم (CaCl₂) تهیه شد. به طوری که نیمی از شوری آب توسط هر کدام از این املاح ایجاد گردید.

پس از اشباع کامل ستون‌های دست نخورده خاک (کیفیت آب مورد استفاده به صورت $EC = 0/45$ دسی‌زیمنس بر متر، $pH = 7/95$ و غلظت املاح ۲، ۰/۸۹، ۳/۸ و ۶/۱۶ میل اکی‌والانت بر لیتر به ترتیب برای Cl^- ، Na^+

و Ca^{+2} و HCO_3^- اندازه‌گیری شد.) جهت انجام آزمایش، آب شور ورودی روی استوانه‌ها ریخته شد. برای این کار یک ارتفاع ثابت آب شور ورودی روی استوانه نگهداشته شد. زمان قرار دادن آب شور روی استوانه‌ها یادداشت گردید و پس از خروج هر ۵۰ الی ۸۰ سانتی‌متر مکعب محلول خاک از استوانه‌ها یک نمونه محلول حدود ۳۰ سانتی‌متر مکعب جهت بررسی حرکت املاح در خاک و اندازه‌گیری میزان شوری محلول خروجی از استوانه برداشته شد. پس از عبور محلول خاک از استوانه خاک دست نخورده حدود دو برابر حجم منافذ خاک، اندازه‌گیری به اتمام رسید.



شکل ۲- منحنی رخنه برای ۴ سری خاک: (a) سری گریایگان، (b) سری اسپاس، (c) سری چیتگر و (d) سری دانشکده برای حالت $m = -2$ (Pore connectivity)

خطی در سطح احتمال ۵ درصد، مقادیر خطای نسبی $(1-\alpha)$ (Wang et al., 2002) برای ۴ سری خاک مذکور محاسبه شد (جدول ۳).

همان‌طور که قبلاً هم ذکر شد پارامتر m بین ۵- و ۲- متغیر است. همچنین با توجه به اینکه مدل پیشنهادی، تخمین خوبی در سطح احتمال ۵ درصد برای خاک سری چیتگر در حالت m ثابت و برابر ۲- نداشته، لذا باید تخمین منحنی رخنه برای مقادیر دیگری از m انجام شود. منحنی رخنه اندازه‌گیری و تخمین زده شده با استفاده از رابطه ۱۸ برای مقادیر دیگری از m (بین ۲/۵- تا ۵-) به‌دست آمد. همچنین رابطه بین منحنی تجمعی رخنه تخمین زده شده و با m متغیر و اندازه‌گیری شده برای ۴ سری خاک در جدول ۳ ارائه شده است. با اعمال m متغیر در رابطه ۱۸ دیده شد که این مدل برای خاک سری چیتگر تنها در $m = -۵$ قادر به تخمین منحنی رخنه در سطح اطمینان ۵ درصد است (جدول ۴) و برای m های برابر ۲-، ۲/۵-، ۳-، ۳/۵-، ۴-، و ۴/۵- اختلاف

تابع خطی که برای این مقایسه در نظر گرفته شده است، به صورت رابطه ۲۲ بیان می‌شود

$$W_p = \alpha W_m \quad (22)$$

که در آن،

W_p مقدار تجمعی غلظت نسبی شبیه‌سازی شده و W_m مقدار تجمعی غلظت نسبی اندازه‌گیری شده است. رابطه بین مقادیر W_p و W_m در شکل ۳ ارائه شده است. مقادیر تجمعی غلظت نسبی تخمین زده شده (W_p) در مقابل مقادیر تجمعی غلظت نسبی اندازه‌گیری شده (W_m) رسم شد و خط راستی از بین آنها عبور داده شد. معادله این رابطه با روش رگرسیون خطی به‌دست آمد. مقادیر شیب (α) و عرض از مبدأ معادله‌های خطی به‌دست آمده در جدول ۳ ارائه شده است. شیب این خط برابر α خواهد بود. رابطه بین مقدار W_p و W_m در شکل ۳ ارائه شده است. برای بررسی درصد معنی‌داری معادله‌های

درصد، مقدار m برابر ۲- شد و با افزایش میزان سیلت در خاک‌های سری آسپاس و دانشکده (به ترتیب ۴۵ درصد و ۳۵ درصد) مقدار m به ۳- رسید و برای خاک سری چیتگر با میزان سیلت ۵۳ درصد، مقدار m به ۵- رسید. با اعمال رگرسیون غیر خطی بین m و درصد سیلت موجود در هر سری خاک، معادله‌ای به صورت رابطه ۲۳ ارائه شد:

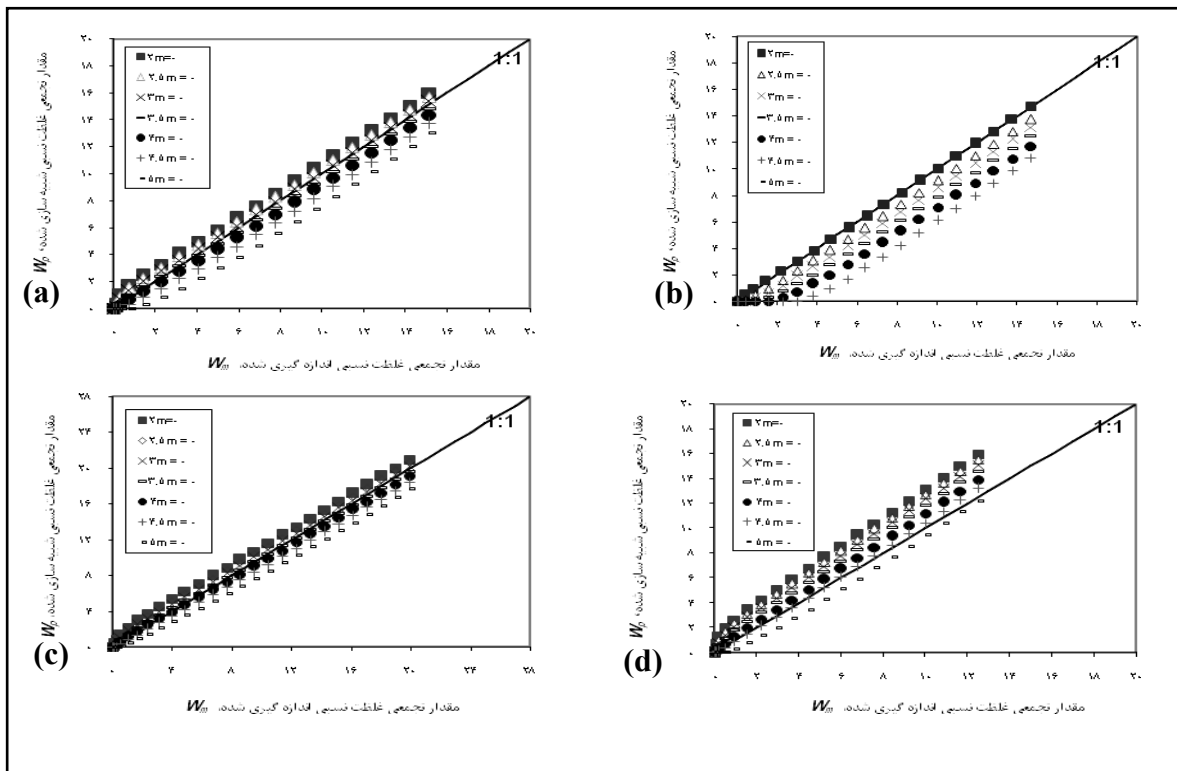
$$m = -0.0026(\text{درصدسیلت})^2 + 0.1112(\text{درصدسیلت}) - 3.2465 \quad (23)$$

$$R^2 = 0.8787, SE = 0.63, p \leq 0.05$$

این معادله برای مقادیر سیلت بیشتر از ۰/۱۹ درصد صادق بوده و برای مقادیر کمتر از آن مقدار $m = 2-$ می‌تواند به کار برده شود.

معنی‌داری بین شیب معادله و یک در سطح احتمال ۵ درصد خواهد داشت. خاک سری گربایگان برای $m = 5-$ اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد خواهد داشت بنابراین $m = 2-$ برای آن مناسب خواهد بود. برای خاک‌های سری آسپاس و دانشکده مقادیر m های برابر ۲-، ۲/۵-، ۳- قادر به تخمین منحنی رخنه در سطح اطمینان ۵ درصد است، اما مقادیر m های برابر ۳/۰-، ۴-، و ۴/۵- اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد خواهند داشت (جدول ۴).

بنابراین نتایج نشان داد که مقدار مناسب m برای خاک سری گربایگان فقط ۲-، برای خاک سری آسپاس و دانشکده بین ۲- تا ۳- است. برای خاک‌های با سیلت بیش از ۴۵ درصد مقدار m از ۲- متفاوت خواهد بود و به ۵- خواهد رسید. به‌طوری‌که برای خاک سری گربایگان با میزان سیلت ۱۹



شکل ۳- رابطه بین منحنی تجمعی رخنه تخمین زده و اندازه‌گیری شده با m متغیر برای ξ سری خاک (a) سری گربایگان، (b) سری آسپاس، (c) سری چیتگر، و (d) سری دانشکده

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، روابط و مدل‌هایی برای شبیه‌سازی منحنی انتقال املاح در خاک (رخنه) ارائه شده است. در این مطالعه مدل ساده‌ای ارائه شده است که با استفاده از پارامترهای منحنی مشخصه خاک قادر است منحنی را شبیه‌سازی کند. از نتایج آزمایشگاهی (منحنی مشخصه رطوبتی و رخنه برای چهار سری خاک با بافت‌های مختلف) برای

ارزیابی مدل استفاده شد.

نتایج نشان داد که منحنی رخنه شبیه‌سازی شده برای بافت خاکی که درصد سیلت آن پایین (کمتر از ۱۹ درصد) باشد با مقدار m برابر ۲- نتیجه خوبی می‌دهد و برای خاک‌های با درصد سیلت بالا (بیش از ۱۹ درصد) مقدار m باید از معادله پیشنهادی این تحقیق تخمینی زده شود.

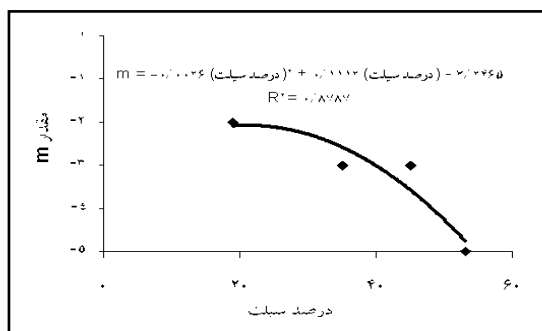
جدول ۳- نتایج تحلیل آماری مربوط به شیب (α) و میزان خطا ($1-\alpha$) برای ضریب متغیر m (Pore connectivity) های متغیر

ضریب m	سری خاک گریبانگان		سری خاک آسپاس		سری خاک چیتگر		سری خاک دانشکده	
	α	$1-\alpha$	α	$1-\alpha$	α	$1-\alpha$	α	$1-\alpha$
-۲	۰/۹۹۷۱	۰/۰۰۲۹	۱/۰۲۲۲	-۰/۰۲۲۲	۱/۲۲۹۸	-۰/۲۲۹۸	۱/۰۲۱۶	-۰/۰۲۱۶
-۲/۵	۰/۹۷۲۷	۰/۰۲۷۳	۱/۰۰۷۶	-۰/۰۰۷	۱/۲۰۶۳	-۰/۲۰۶۳	۱/۰۰۸	-۰/۰۰۸
-۳	۰/۹۴۳۷	۰/۰۵۶۳	۰/۹۸۹۴	۰/۰۱۰۶	۱/۸۰۷	-۰/۸۰۷	۰/۹۹۱۶	۰/۰۰۸۴
-۳/۵	۰/۹۰۸۴	۰/۰۹۱۶	۰/۹۶۶۴	۰/۰۳۳۶	۱/۱۴۸۴	-۰/۱۴۸۴	۰/۹۷۱۴	۰/۰۲۸۶
-۴	۰/۸۶۳۸	۰/۱۳۶۲	۰/۹۴۱۱	۰/۰۵۸۹	۱/۱۰۴۸	-۰/۱۰۴۸	۰/۹۴۸۷	۰/۰۵۱۳
-۴/۵	۰/۸۰۸۵	۰/۱۹۱۵	۰/۹۰۶	۰/۰۹۴	۱/۰۵۲۲	-۰/۰۵۲۲	۰/۹۱۹۲	۰/۰۸۰۸
-۵	۰/۷۳۶۷	۰/۲۶۳۳	۰/۸۶۴۸	۰/۱۳۵۲	۰/۹۷۹۸	۰/۰۲۰۲	۰/۸۸۳۸	۰/۱۱۶۲

جدول ۴- نتایج تحلیل آماری مربوط به ضریب m (Pore connectivity) های متغیر

ضریب m	سری خاک گریبانگان		سری خاک آسپاس		سری خاک چیتگر		سری خاک دانشکده	
	شیب	عرض از مبداء	شیب	عرض از مبداء	شیب	عرض از مبداء	شیب	عرض از مبداء
-۲	N.S*	N.S	N.S	N.S	S	N.S	N.S	N.S
-۲/۵	S	N.S	N.S	N.S	S	N.S	N.S	N.S
-۳	S	N.S	N.S	N.S	S	N.S	N.S	N.S
-۳/۵	S	N.S	S	N.S	S	N.S	S	N.S
-۴	S	N.S	S	N.S	S	N.S	S	N.S
-۴/۵	S	N.S	S	N.S	S	N.S	S	N.S
-۵	S	N.S	S	N.S	N.S	N.S	S	N.S

(*) N.S = درصد معنی‌دار نیست، S = معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد



شکل ۴- رابطه بین مقادیر درصد سیلت و m

مراجع

- Agus, F. and Cassel, D. K. 1992. Field-scale bromide transport as affected by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 254-260.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper, No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Co., 24p.
- Burdine, N. T. 1953. Relative permeability calculation from pore-size distribution data. *Trans. Am. Inst. Miner. Metal. Pet. Eng.* 198: 71-87.
- Hatamizadeh, M. and Sepaskhah, A. R. 2007. Determination of wetting suction function and soil unsaturation hydraulic conductivity function in five soils according to one dimensional infiltration water in soil. M. Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Iran. pp 67. (In Farsi)
- Horton, R., Thompson, M. L. and McBride, J. F. 1987. Method of estimating the travel time of noninteracting solute through compacted soil material. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 48-53.
- Jaynes, D. B., Rice, R. C. and Bowman, R. S. 1988. Independent calibration of a mechanistic-stochastic model for field-scale solute transport under flooded irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1541-1546.
- Jury, W. A. 1982. Simulation of solute transport using a transfer function model. *Water Resour. Res.* 18: 363-368.
- Jury, W. A., and Roth, K. 1990. Transfer functions and solute transport through soil: theory and application. Birkhaeuser Publ., Basel, Switzerland.
- Hamlen, C. J. and Kachanoski, R. G. 2004. Influence of initial and boundary conditions on solute transport through undisturbed soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 404-416.
- Mohammadi, M. H., Neishabouri, M. R. and H. Rafahi. 2009. Predicting the solute breakthrough curve from soil hydraulic properties. *Soil Sci.* 174(3): 165-173.
- Mualem, Y. I. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 3: 513-522.
- Mualem, Y. I. 1978. Hydraulic conductivity on unsaturated porous media: Generalized macroscopic approach. *Water Resour. Res.* 2: 325-334.
- Ross, P. J. and Smettem, K. R. 1993. Describing soil hydraulic properties with sum of simple function. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 26-29.
- Roth, K., Jury, W. A., Fluhler, H. and Attinger, W. 1991. Transport of chloride through a saturated field soil. *Water Resour. Res.* 27: 2533-2541.
- Schuh, W. M., and Cline, R. L. 1990. Effect of soil properties on unsaturated hydraulic conductivity pore-interaction factors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1509-1519.
- Thorburn, P. J., and Rose, C. W. 1990. Interpretation of solute profile dynamic in irrigated soil. 3. A simple model of bypass flow in soil. *Irrig. Sci.* 11: 219-225.
- Timlin, D. J., Ahuja, L. R., Pachepsky, Ya. A., Williams, R. D. Gimenez, D. and Rawls, W. J. 1999. Use of Brooks-Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1086-1092.
- Toride, N., and Leij, F. J. 1996. Convective-dispersive stream tube model for field scale solute transport: I. Moment analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 342-352.
- Van Genuchten, M. Th., and Wagenet, R. J. 1989. Two-site/ two-region models for pesticide transport and degradation: Theoretical development and analytical solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1303-1310.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-897.
- Wang, Q., Robrt, H. and Jaehoon, L. 2002. A simple model relating soil water characteristic curve and soil solute breakthrough curve. *Soil Sci.* 167(7):436-443.

Simulation of Neutral and Non-Sorptive Breakthrough Curves Using Soil Hydraulic Parameters

A. Dindarlou* and A. R. Sepaskhah

* Corresponding Author: M.Sc. Graduate student of irrigation and drainage, College of Agriculture, Shiraz University.

Address: Boushehr, Agricultural and Natural Resource College, University of Persian Gulf. +989179284473

E-mail: Dindarlo@Pgu.Ac.Ir

Received: 5 January 2010, Accepted: 30 October 2010

Solute transport processes are affected by soil pore water velocity distribution. Pore size distribution, which can be used to infer pore water velocity distribution, can be estimated from a soil water retention curve (n). In this study, a solute breakthrough curve was simulated using soil hydraulic parameters in four different soils. To evaluate the proposed model, predictions were compared to that of the measured soil water characteristics and solute breakthrough data. A breakthrough curve contains two soil hydraulic parameters, one relating to pore size distribution (n), obtained from the soil water retention curve, and pore connectivity (m). In this study, m was in the range of -2 to -5. The silt content of the soil can play an important role in determining pore connectivity, so an equation is proposed for the relationship between soil silt content and pore connectivity.

Keywords: Soil water retention curve, Solute breakthrough curve, Solute transport