



## تخمین منحنی مشخصه با پس ماند رطوبتی به روش معکوس و مدل‌های اسکات و معلم در دو

### خاک مختلف

فریبرز عباسی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۴/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۰

### چکیده

حرکت آب در خاک‌های غیراشباع معمولاً توسط پدیده پس ماند رطوبتی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. اما اغلب در توصیف انتقال آب و املاح، از این پدیده صرف‌نظر می‌شود. هدف از این تحقیق، تخمین پس ماند رطوبتی در مقیاس لایسیمیتری در دو خاک لوم سیلتی و لوم‌شنی و مقایسه مدل تجربی اسکات و مدل مفهومی معلم بود. سه لایسیمتر خاک دست نخورده (با قطر حدود ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۵ سانتی‌متر) از هر کدام از خاک‌های مورد مطالعه تهیه و حرکت آب در خاک برای شرایط مرزی مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. هر یک از لایسیمترها به وسایل اندازه‌گیری مختلف برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، مکش ماتریک و شدت جریان خروجی مجهز شدند. در هریک از لایسیمترها، ۴ آزمایش پیوسته جریان غیراشباع آب در خاک انجام شد. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با و بدون لحاظ پس ماند رطوبتی به روش معکوس توسط مدل WAVE و الگوریتم جستجوی مختصات چندگانه عمومی (GMCS-NMS) تعیین شدند. پس ماند رطوبتی با استفاده از مدل تجربی اسکات و مدل مفهومی معلم نیز مدل‌سازی شد. نتایج اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی‌های عددی حاکی از وقوع پس ماند رطوبتی در هر دو خاک بود. تاثیر پس ماند رطوبتی در خاک‌های مورد مطالعه بر مولفه‌های مختلف حرکت آب در خاک (مکش ماتریک، رطوبت خاک و شدت جریان) متفاوت بود. منحنی مشخصه رطوبتی، مکش ماتریک و رطوبت خاک به شدت در دو خاک مورد مطالعه تحت تاثیر پس ماند رطوبتی قرار گرفتند. ولی شدت جریان خروجی در هر دو خاک نسبت به پس ماند رطوبتی حساسیت کمتری داشت. در مجموع، مدل تجربی اسکات بهتر از مدل مفهومی معلم در مطالعه پس ماند رطوبتی در دو خاک مورد آزمایش موفق بود.

واژه‌های کلیدی: پس ماند رطوبتی، مدل‌سازی معکوس، مدل اسکات، مدل معلم، مدل WAVE

### مقدمه

اغلب موارد از تاثیر این پدیده چشم‌پوشی می‌شود. نتایج حاصل از پژوهش‌های آزمایشگاهی و صحرایی در برخی مواقع به‌طور قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر متفاوت هستند (۴).

مدل‌های مفهومی، بیشترین دقت را برای پیش‌بینی منحنی‌های ثانویه (اسکن‌کننده) دارند. اگرچه این مدل‌ها به سادگی با مدل‌های عددی جریان آب در خاک تلفیق نمی‌شوند (۲۸). اسکات و همکاران (۴۹) مدل تجربی ساده‌ای را ارائه و آن را برای تحلیل پدیده پس ماند در خاک‌های مختلف، مناسب تشخیص دادند. سایر مدل‌های تجربی پس ماند با استفاده از اصل اساسی تشابه، منحنی مشخصه رطوبتی را از تابع توزیع اندازه ذرات برآورد می‌کند (۱۵). برخی پژوهشگران مدل‌های مختلف پس ماند را مقایسه نمودند. وینه و همکاران (۶۰) در بین مدل‌های دو شاخه، مدل مفهومی معلم (۳۶) و مدل پارالانژ (۴۲) به عنوان بهترین گزینه برای پیش‌بینی پس ماند پیشنهاد نمودند. نتیجه‌گیری مشابهی توسط سی و کاجانسکی (۵۱) درباره مدل‌های تک شاخه‌ای صورت گرفت. اما در مقایسه‌ای که توسط جینز (۲۴) و

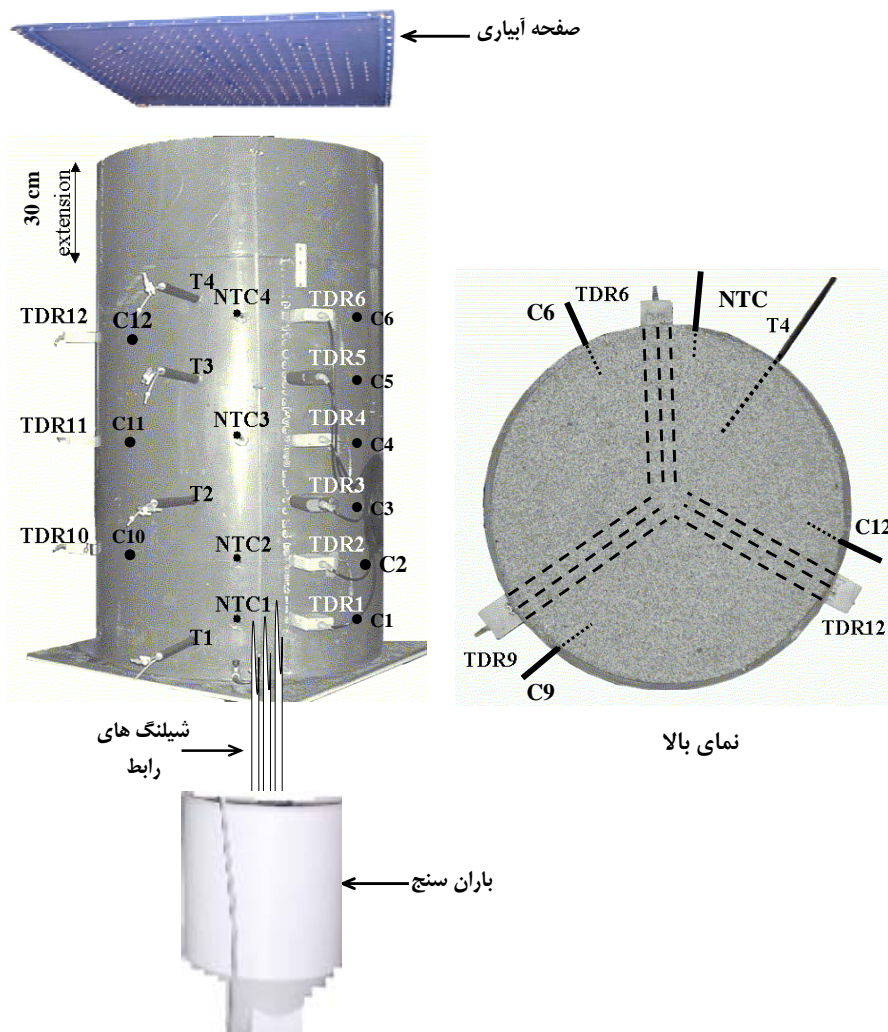
پس ماند رطوبتی خاک می‌تواند جریان آب و انتقال املاح را در خاک‌های غیراشباع به شدت تحت تاثیر قرار دهد (۳، ۱۴، ۲۴، ۲۶، ۳۳ و ۵۹). پدیده پس ماند رطوبتی در بسیاری از تحقیقات آزمایشگاهی (۵۲ و ۶۰) و صحرایی (۴۱ و ۶۳) مشاهده و تاثیر آن توسط مدل‌های تجربی و مفهومی مورد تحلیل قرار گرفته است (۲۱، ۲۶، ۴۶، ۵۲ و ۶۰). تاثیرات شناخته شده‌ی پدیده پس ماند رطوبتی اغلب متناقض و خیلی واضح و روشن نیست. در خصوص ضرورت لحاظ پس ماند رطوبتی در روش‌های عددی، اتفاق نظر جمعی وجود ندارد. در ۴۰ سال گذشته، مدل‌های زیادی با مبنای تئوری و تجربی برای توصیف پس ماند در منحنی مشخصه رطوبتی ارائه شده است (۱۲، ۱۳، ۱۶، ۱۷، ۱۹، ۳۴، ۳۷، ۴۲ و ۴۹). اما به جز تعداد معدودی از مطالعات (۵۱) در

۱- دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک لایسیمترهای مورد مطالعه

لایسیمتر	عمق (cm)	بافت خاک	درصد ذرات خاک			افق	مواد آلی (%)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	pH
			رس	سیلت	شن				
لوم‌سیلتی	۰-۱۰	لوم‌سیلتی	۱۴	۷۵/۵	۱۰/۵	AP1	۰/۶۸	۱/۴۶	۶/۱
	۱۰-۳۰	لوم‌سیلتی	۱۵	۷۳	۱۲	AP2	۰/۳۱	۱/۵۱	۶/۱
	۳۰-۵۰	لوم‌سیلتی	۱۸	۷۳	۹	Bt1	۰/۳۱	۱/۵۱	۶/۱
	۵۰-۱۰۰	لوم‌سیلتی	۱۸/۵	۷۲	۹/۵	Bt2	۰/۲۸	۱/۵۱	۶/۱
لوم‌شنی	۰-۴۰	لوم‌شنی	۴	۱۷	۸۰	AP	۲/۰۷	۱/۵۰	۵/۳
	۴۰-۶۰	لوم‌شنی	۵	۱۹	۷۶	AC	۰/۴۵	۱/۵۰	۵/۱
	۶۰-۱۰۰	لوم‌شنی	۴	۲۲/۵	۷۳/۵	C	۰/۲۴	۱/۵۰	۵/۰



شکل ۱- نمایی از یکی از لایسیمترهای آزمایشی مجهز به وسایل اندازه‌گیری مختلف

یکنواخت جریان آب ورودی به لایسیمترها از یک مخزن باران‌ساز استفاده گردید (شکل ۱). این وسیله شامل یک مخزن مکعبی به ابعاد

پروب‌ها از نوع سه شاخه استیل، فواصل شاخه ۲/۵ سانتی‌متر با طول ۴۲/۵ سانتی‌متر و قطر ۰/۵ سانتی‌متر بودند. برای توزیع

نگرفت. بلکه بخشی از داده‌ها که شامل سیکل‌های آبیاری و زهکشی (تر و خشک) بود و مدل بیشترین حساسیت را به پارامترهای مجهول داشت، در بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین، برای کاهش زمان محاسبات، بیشتر داده‌های مربوط به آزمایش‌های با شدت جریان زیاد مورد استفاده قرار نگرفت. در مجموع همه داده‌های مربوط به شدت جریان‌های کم و حدود ۲۵ درصد داده‌های مربوط به شدت جریان‌های زیاد مورد استفاده قرار گرفت.

### پس‌ماند رطوبتی در ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

منحنی مشخصه رطوبتی خاک  $\theta(h)$  با استفاده از معادله وان-گنوختن (۵۵) و هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $K(h)$  با استفاده از مدل کاپیلاری معلم (۳۵) به صورت زیر توصیف شدند:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (1)$$

$$K(h) = K_{s,s} e^{0.5} [1 - (1 - s^{e/m})^m]^2 \quad (2)$$

که در آن،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  به ترتیب رطوبت باقی‌مانده خاک ( $L^3 L^{-3}$ ) و رطوبت اشباع ( $L^3 L^{-3}$ ) می‌باشد.  $S_e$  رطوبت موثر (بدون واحد)،  $n$  (بدون واحد)،  $m = 1 - 1/n$  (بدون واحد) و  $\alpha$  ( $L^{-1}$ ) پارامترهای تجربی هستند.

نخست، پنج پارامتر هیدرولیکی خاک در منحنی‌های مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی ( $\theta_r, \theta_s, n, \alpha, K_s$ ) بدون در نظر گرفتن پس‌ماند رطوبتی با استفاده از همه داده‌های مرحله آبیاری و زهکشی تخمین زده شدند. سپس، پس‌ماند در منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از مدل تجربی اسکات و همکاران (۴۹) در نظر گرفته شد. از این پس، از این مدل به نام مدل اسکات یاد می‌شود. شبیه‌سازی پس‌ماند توسط این مدل به دو شاخه اصلی پس‌ماند (منحنی‌های خشک‌شدگی و ترشدگی اصلی) نیاز دارد. این دو منحنی با استفاده از بردارهای  $\theta_s^d, \theta_r^d, \theta_s^w, \theta_r^w, \alpha^d, \alpha^w, n^d, n^w$  نمایش داده می‌شوند. بالا نویس‌های  $d$  و  $w$  به ترتیب نشان‌دهنده منحنی‌های خشک‌شدگی و ترشدگی می‌باشند. در این تحقیق فرض شده است که پس‌ماند در تابع هدایت هیدرولیکی خاک ناچیز است (۱۳، ۲۸). در استفاده از مدل اسکات، فرض شد که حلقه پس‌ماند اصلی در رطوبت باقیمانده  $\theta_r = \theta_r^d = \theta_r^w$  و رطوبت اشباع  $\theta_s = \theta_s^d = \theta_s^w$  بسته است. لذا، در این حالت ۶ پارامتر مجهول دو منحنی تر و خشک‌شدگی ( $\theta_s^d, \theta_s^w, n^d, n^w, \alpha^d, \alpha^w, K_s$ )، باید با مدل‌سازی معکوس بهینه‌سازی شود. به منظور کاهش تعداد پارامترهای تخمینی و به دلیل حساسیت کم  $\theta_r$  (۳۰)، این پارامتر در بهینه‌سازی لحاظ نشد و مقدار آن همانند حالت بدون پس‌ماند در نظر گرفته شد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، بهینه‌سازی این پارامترها بسیار زمان‌بر بود. لذا، داده‌های مرحله آبیاری (تر شدن) و مرحله زهکشی (خشک شدن) از یکدیگر تفکیک

طول، عرض و ارتفاع به ترتیب  $80 \times 80 \times 1$  سانتی متر بود. در قسمت تحتانی مخزن ۲۸۰ سوزن پزشکی به قطر  $0.5$  میلی‌متر در شبکه‌ای ۵ سانتی تعبیه شدند. قسمت فوقانی مخزن نیز با استفاده از شیلنگ رابط به یک پمپ کوچک متصل گردید. بدین ترتیب هنگام انجام آزمایش‌ها با تنظیم پمپ برای یک شدت جریان ورودی ثابت، آب به‌طور یکنواخت توسط سوزن‌ها از قسمت تحتانی مخزن روی سطح لایسیمترها پخش گردید.

پس از آشنویی همه لایسیمترها با محلول  $1 \text{ dS/m}$  کلراید پتاسیم و پس از رسیدن به شرایط رطوبتی و آشنویی پایدار، چهار آزمایش آشنویی در شرایط غیراشباع و پایدار با دو شدت جریان مختلف (زیاد و کم)، ابتدا دو آزمایش با کلراید پتاسیم و سپس دو آزمایش دیگر با استفاده از سولفات پتاسیم در لایسیمترها اجراء گردید. کلراید پتاسیم و سولفات پتاسیم در آب آبیاری حل و در آزمایش‌های با شدت جریان زیاد به مدت یک روز و در آزمایش‌های با شدت جریان کم به مدت سه روز به لایسیمترها تزریق شدند. در لایسیمترهای مورد مطالعه، ابتدا آزمایش‌های با شدت جریان کم و سپس آزمایش‌های با شدت جریان زیاد اجراء گردید. مقادیر شدت جریان‌های کم بین  $1/65$  تا  $9/9$  و مقادیر شدت جریان‌های زیاد از  $14/0$  تا  $28/61$  سانتی‌متر در روز متغیر بود. پس از هر آزمایش، آشنویی با محلول  $1 \text{ dS/m}$  کلراید پتاسیم تا رسیدن به شرایط رطوبتی و آشنویی همگام ادامه یافت. در زمان اجرای آزمایش‌ها، رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR به‌طور خودکار هر ۲۰ دقیقه یک‌بار و مکش ماتریک خاک با تانسیمومتر در اعماق ۱۰، ۲۵، ۵۵ و ۸۵ سانتی‌متر به‌طور روزانه در مواقع تغییر شدت جریان‌ها و به‌طور هفتگی در صورت ثابت بودن شدت جریان قرائت شد. شدت جریان خروجی نیز به‌طور خودکار با باران‌سنج اندازه‌گیری شد. منحنی‌های مشخصه رطوبتی در شرایط آبیاری و زهکشی (تر و خشک‌شدگی) در عمق‌های مختلف لایسیمترها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله TDR و تانسیمومتر تعیین شدند. واسنجی پروب‌های TDR توسط عباسی و همکاران (۲) انجام شده است. آنها خطای نسبی بیلان آب را برای پروب‌های مورد استفاده کمتر از ۵ درصد گزارش نمودند.

اجرای چهار آزمایش پیوسته در لایسیمترهای مورد مطالعه حدود ۱۰ ماه طول کشید. بهینه‌سازی پارامترهای موردنیاز با استفاده از الگوریتم  $GMCS \text{ NMS}^1$  به‌ویژه برای آزمایش‌های با شدت جریان زیاد، وقت‌گیر بود. برای تسریع در محاسبات بهینه‌سازی، همانند ورات و همکاران (۶۲) تمامی داده‌ها در فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار

1- Global multilevel coordinate search algorithm combined with the local Nelder-Mead simplex algorithm

### مدل سازی معکوس

در مدل سازی معکوس پارامترهای مدل به گونه‌ای بهینه می‌شوند که یک تابع هدف اختلاف بین خروجی‌های مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده را حداقل نماید. تابع هدف (OF) مورد استفاده در الگوریتم بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف شده است:

$$OF(q, b) = \sum_{j=1}^m v_j \sum_{i=1}^k w_{ij} [q_j^*(z, t_i) - q_j(z, t_i, b)]^2 \quad (4)$$

که در آن،  $k$  تعداد مشاهدات برای زامین سری از داده‌های اندازه‌گیری شده (رطوبت خاک، مکش ماتریک، شدت جریان، و...)،  $q_j^*(z, t_i)$  داده‌های اندازه‌گیری شده در زمان  $t_i$  و عمق  $z$ ، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل که با بردار پارامترهای بهینه‌سازی  $b = (\theta_s, \theta_r, \dots)$ ،  $\theta_s, n, \alpha, K_s, \dots$  به دست آمده‌اند، و  $w_{ij}$  و  $v_j$  فاکتورهای وزنی هستند.

مقدار  $w_{ij}$  برای تمامی داده‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. فاکتور  $v_j$  با توجه به تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده ( $k$ ) و انحراف معیار ( $\sigma$ ) داده‌های اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود (۲۹). مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، مکش ماتریک و شدت جریان خروجی برای بهینه کردن تابع هدف بکار برده شدند. کمینه کردن تابع هدف توسط الگوریتم جستجوی چندسطحی عمومی (GMCS) (۲۰) صورت گرفت.

لامبوت و همکاران (۳۰) الگوریتم GMCS-NMS را برای مطالعه جریان آب در ناحیه غیراشباع پیشنهاد و ارزیابی مثبتی از این الگوریتم در تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک ارائه نمودند. جزئیات بیشتر در مورد کاربرد الگوریتم GMCS-NMS در مدل سازی معکوس ویژگی‌های هیدرولیکی خاک توسط ریترو و همکاران (۴۵) و (۴۴) و لامبوت و همکاران (۲۹) ارائه شده است.

در این تحقیق برای ارزیابی پارامترهای تخمینی به روش معکوس از شاخص‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربع خطا ( $RMSE$ )، مجموع مربع خطا ( $SSQ$ ) و حدود اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. همین‌طور، برای مقایسه کمی مدل‌های اسکات و معلم در تخمین رطوبت و مکش ماتریک خاک و شدت جریان خروجی از ضریب تعیین و مجموع خطای مطلق ( $SAD$ ) استفاده شد (۴۳).

### نتایج و بحث

بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک برای ۶ لایسمتر مورد مطالعه بدون در نظر گرفتن پس ماند رطوبتی همراه با مقادیر  $RMSE$ ،  $R^2$  و حدود اطمینان ۹۵ درصد در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر  $RMSE$  و  $R^2$  رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری (رطوبت، مکش ماتریک و

گردید. ابتدا ۴ پارامتر ( $\theta_s^w, \alpha^w, n^w, \theta_r^w$ )، برای منحنی اصلی مرطوب‌شدگی با استفاده از فقط داده‌های آبیاری بهینه‌سازی شدند. در گام بعدی ۲ پارامتر دیگر ( $\alpha^d, n^d$ )، با استفاده از فقط داده‌های فاز زهکشی بهینه شدند.

علاوه بر آن، مدل مفهومی معلم (۳۶) نیز به خاطر سادگی برای لحاظ پس ماند رطوبتی در لایسمترهای مورد مطالعه به کار گرفته شد. در این مدل، منحنی خشک‌شدگی اصلی مطابق رابطه زیر از منحنی مرطوب‌شدگی اصلی استخراج می‌شود:

$$\theta^d(h) = (2\theta_s^w - \theta_r^w)(\frac{\theta^w(h) - \theta_r^w}{\theta_s^w - \theta_r^w}) + \theta_r^w \quad (3)$$

که در آن،  $\theta^w(h)$  و  $\theta^d(h)$  به ترتیب مقادیر رطوبت منحنی ترشدگی و خشک‌شدگی اصلی در مکش‌های مختلف ( $h$ ) است. برای استفاده از مدل معلم، نیاز به یکی از شاخه‌های اصلی خشک‌شدگی و یا ترشدگی منحنی مشخصه رطوبتی است. این فرض مدل را ساده ولی کاربرد آن را محدودتر می‌کند. از پارامترهای تخمینی در گام اول مرحله قبل به-عنوان پارامترهای منحنی ترشدگی استفاده شد. لذا، در این مطالعه، مدل‌های پس ماند اسکات و معلم فقط در منحنی خشک‌شدگی اصلی متفاوت بودند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، از این مدل به خاطر سادگی آن استفاده شد. به منظور مقایسه، پارامترهای هیدرولیکی خاک با نرم‌افزار Rosetta (۴۸) با استفاده از درصد‌های ذرات خاک (شن، رس و سیلت) و جرم مخصوص ظاهری خاک نیز برآورد شدند.

### مدل WAVE

در این تحقیق، مدل عددی WAVE<sup>۱</sup> (۵۷) در محیط MATLAB برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل، معادله ریچاردز به روش اختلافات محدود حل شده است. عملکرد مدل WAVE در مقایسه با سایر مدل‌های عددی و تحلیلی برای بررسی جریان آب در خاک در یک مقایسه جامع انجام شده است (۵۸).

رطوبت خاک که با دستگاه TDR در لایه‌های مختلف خاک اندازه‌گیری شده بود، قبل از شروع آزمایش‌ها به عنوان شرایط اولیه برای مدل معرفی شد. به عنوان شرایط مرزی بالادست، شدت جریان وابسته به زمان در طول آزمایش‌ها و در مرحله زهکشی، شدت جریان صفر تعریف شد. مکش ماتریک ۸۰ سانتی‌متر برای مرز پایین دست استفاده شد. برای سهولت و اجتناب از محدودیت‌های ذاتی حل معکوس (کاهش تعداد پارامترهای تخمینی)، نیم‌رخ خاک همگن فرض شد.

1- Water and Agrochemicals in the soil, crop and Vadose Environment

لاسیمترهای خاک لومسیلتی بودند. مقادیر تخمین زده شده  $n$  با استفاده از مدل اسکات تقریباً در تمام لاسیمترها بزرگتر از حالت بدون پس ماند بودند. در برخی لاسیمترها  $\alpha^d$  بزرگتر از مقادیر  $\alpha^w$  (برای مثال لاسیمترها P1، P2، L3) بودند. دلیل اصلی آن به ناهمگنی خاک لاسیمترها به ویژه لاسیمترها  $\theta_s$  و  $\theta_r$  مرتبط است. ارتباط دارد. رفتار پس ماندی در مقیاس های بزرگ در نتیجه ناهمگنی ویژگی های انتقال آب و املاح در مقیاس کوچک تر قبلاً گزارش شده است (۲۳). بخشی از دلایل پدیده فوق نیز به خاطر آن است که دو مرحله آبیاری و زهکشی (تر و خشک) به صورت مستقل بهینه سازی شدند. همانطور که قبلاً اشاره شد، نخست ۴ پارامتر ( $\theta_s^w$ ,  $K_s$ ,  $\alpha^w$ ,  $n^w$ ) برای منحنی مرطوب شدگی اصلی با استفاده از فقط داده های مرحله آبیاری (تر شدگی) بهینه شدند و در گام بعدی ۲ پارامتر ( $\alpha^d$ ,  $n^d$ ) با استفاده از فقط داده های مرحله زهکشی (خشک-شدگی) برآورد شدند.

مشابه با مدل اسکات، پارامترهای هیدرولیکی خاک برای شاخه اصلی خشک شدگی با استفاده از مدل معلم (جدول ۴) در لاسیمترها  $\theta_s^d$  و  $\theta_r^d$  مقادیر کوچک تر و در لاسیمترها  $\alpha^d$  و  $n^d$  مقادیر بزرگ تر بودند. مقادیر  $\theta_s^d$  بهینه شده برای مدل معلم (جدول ۴) بزرگ تر از مقادیر تخمینی برای منحنی مرطوب شدگی از مدل اسکات بود (جدول ۳). این نتایج با یافته های هاپمنز و دان (۱۸) که نتیجه گرفت  $\theta_s^d > \theta_s^w$ ، سازگار بود. برای تمامی آزمایش ها، مدل معلم در مقایسه با مدل اسکات و سناریوی بدون پس ماند، مقادیر بیشتری برای  $R^2$  ارائه نمود (جدول ۴). منحنی های اندازه گیری شده مشخصه رطوبتی (تر و خشک شدگی اصلی) در لاسیمترها  $\theta_s$  و  $\theta_r$  لوم شنی در شکل ۲ ارائه شده اند. بهترین برازش به داده های منحنی تر شدگی نیز در شکل ۲ نشان داده شده است.

شدت جریان خروجی) و بهینه سازی شده توسط مدل را نشان می دهد. حدود اطمینان نیز بیانگر درجه قطعیت پارامترهای تخمینی است. همان طور که انتظار می رفت، تغییرات نسبتاً زیادی در همه پارامترهای تخمین زده شده در دو نوع خاک مشاهده می شود. اما پارامترهای بهینه سازی شده برای خاک های مشابه، در محدوده مقادیر گزارش شده در منابع است (۷، ۴۷ و ۶۵). در لاسیمترها  $\theta_s$  و  $\theta_r$  و به ویژه  $K_s$  در لاسیمترها P2 از مقادیر بزرگ تری برخوردار بودند. پارامترهای بهینه سازی شده برای لاسیمترها P1 و P3 (به جز  $\theta_s$  در P1) بسیار مشابه آن پارامترهایی بود که توسط Rosetta (۴۸) بدست آمده بود. به طور مشابه، پارامترهای بهینه سازی شده برای خاک لومسیلتی اساساً از لاسیمترها  $\theta_s$  و  $\theta_r$  دیگر متفاوت بود (جدول ۲). اما تغییرات پارامترهای تخمینی نسبتاً کوچک تر از مقادیر مشابه در خاک لوم شنی بود. مورد اخیر احتمالاً به خاطر آن است که خاک لوم-سیلتی همگن تر از خاک لوم شنی بود. پارامترهای هیدرولیکی خاک در لاسیمترها  $\theta_s$  و  $\theta_r$  قدری بزرگتر از مقادیر پارامترهایی بود که با Rosetta تخمین زده شده بود. تغییرات زیاد ویژگی های هیدرولیکی خاک تا حدودی طبیعی و بخشی از آن ذاتی و به دلیل اندازه بزرگ لاسیمترها مورد مطالعه است. به هر حال، تغییرات ویژگی های هیدرولیکی خاک های مورد مطالعه به دلیل عملکرد نامناسب الگوریتم بهینه سازی نیست. زیرا، مقادیر شاخص های آماری ارائه شده به ویژه  $R^2$  و حدود اطمینان ۹۵ درصد (جدول ۲) دلالت بر کارایی مناسب الگوریتم بهینه سازی در تخمین پارامترهای مورد نظر در دو خاک مورد مطالعه دارد. مقادیر  $R^2$  در لاسیمترها مختلف بین ۰/۸۶۶ تا ۰/۹۸۹ تغییر نمود.

پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده بوسیله الگوریتم بهینه سازی برای شاخه های اصلی پس ماند مدل اسکات در جدول ۳ ارائه شده است. با مقایسه این نتایج با سناریوی بدون پس ماند (جدول ۲)، مقادیر  $\theta_s$ ،  $\alpha$  و  $K_s$  در لاسیمترها  $\theta_s$  و  $\theta_r$  کمتر از مقادیر مشابه در

جدول ۲- پارامترهای بهینه سازی شده هیدرولیکی خاک در حالت بدون پس ماند رطوبتی و ویژگی های هیدرولیکی خاک از مدل Rosetta (۴۸) برای خاک های مورد مطالعه

لاسیمتر	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$ (-)	$K_s$ ( $\text{cmmin}^{-1}$ )	RMSE (-)	$R^2$ (-)
P1	۰/۰۶۵۵±۰/۰۱۱	۰/۵۳۵۹±۰/۰۱۳	۰/۰۵۳۳±۰/۰۰۳۶	۱/۷۳۱±۰/۰۰۵۹	۰/۰۵۱۲±۰/۰۰۷۱	۰/۰۹۰	۰/۸۸۸
P2	۰/۱۲۸۵±۰/۰۰۵	۰/۴۳۷۳±۰/۰۰۹	۰/۰۸۰۱±۰/۰۰۱۶	۱/۶۱۴۵±۰/۰۲۱۰	۰/۲۴۰۹±۰/۰۰۸۱	۰/۰۷۶	۰/۹۱۰
P3	۰/۰۲۹۶±۰/۰۰۳۶	۰/۴۴۹۶±۰/۰۱۳۹	۰/۰۳۷۸±۰/۰۰۱۴	۱/۶۱۵۸±۰/۰۳۳۶	۰/۰۶۲۱±۰/۰۰۲۶	۰/۱۱۵	۰/۸۶۶
Rosetta	۰/۰۳۵۲	۰/۴۳۹۰	۰/۰۴۴۴	۱/۶۸۷۷	۰/۰۶۸۱	-	-
L1	۰/۱۱۲۶±۰/۰۰۳۴۲	۰/۴۰۴۲±۰/۰۰۷۵	۰/۰۱۲۷±۰/۰۰۲۲	۱/۳۱۴۳±۰/۰۷۸۳	۰/۰۳۰۱±۰/۰۱۴۵	۰/۰۰۴	۰/۹۸۹
L2	۰/۱۰۷۲±۰/۰۰۵۵	۰/۴۶۲۷±۰/۰۰۵۹	۰/۰۳۰۸±۰/۰۰۰۷	۱/۴۶۰۴±۰/۰۲۵۵	۰/۰۲۳۴±۰/۰۰۰۶	۰/۰۵۴	۰/۹۷۲
L3	۰/۰۷۶۶±۰/۰۰۶۰	۰/۴۸۲۷±۰/۰۲۱۱	۰/۰۲۲۸±۰/۰۰۰۸	۱/۵۳۸۴±۰/۰۷۱۲	۰/۰۳۶۷±۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۷	۰/۹۴۹
Rosetta	۰/۰۶۵۴	۰/۴۰۶۷	۰/۰۰۵۷	۱/۶۳۱۶	۰/۰۰۹۶۷	-	-

جدول ۳ - پارامترهای بهینه‌سازی شده هیدرولیکی خاک در بافت‌های مختلف برای شاخه‌های اصلی تر و خشک‌شدگی مدل اسکات

لایسیمتر	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$ (-)	$K_s$ ( $\text{cmmin}^{-1}$ )	RMSE (-)	$R^2$ (-)
P1: wetting	$0.4682 \pm 0.0229$	$0.0153 \pm 0.0008$	$2/599.0 \pm 0.1259$	$0.0074 \pm 0.0007$	0.97	0.933
Drying		$0.0309 \pm 0.0019$	$3/530.1 \pm 0.5346$		0.132	0.910
P2: wetting	$0.418 \pm 0.011$	$0.0719 \pm 0.0007$	$1/612 \pm 0.043$	$0.1754 \pm 0.0053$	0.133	0.833
drying		$0.0978 \pm 0.001$	$1/472.5 \pm 0.0076$		0.006	0.899
P3: wetting	$0.3927 \pm 0.0141$	$0.0346 \pm 0.0015$	$1/568.9 \pm 0.0360$	$0.0226 \pm 0.0005$	0.190	0.847
drying		$0.0190 \pm 0.0008$	$3/0.578 \pm 0.6040$		0.195	0.986
L1: wetting	$0.4777 \pm 0.016$	$0.1234 \pm 0.0004$	$1/495.7 \pm 0.0064$	$0.0877 \pm 0.0004$	0.039	0.992
drying		$0.0707 \pm 0.0018$	$1/331.7 \pm 0.0747$		0.128	0.987
L2: wetting	$0.5636 \pm 0.016$	$0.1010 \pm 0.0008$	$1/717 \pm 0.0049$	$0.098 \pm 0.0006$	0.031	0.995
drying		$0.0935 \pm 0.0130$	$1/300 \pm 0.0057$		0.008	0.990
L3: wetting	$0.5237 \pm 0.0065$	$0.0306 \pm 0.0005$	$1/835.1 \pm 0.0141$	$0.05 \pm 0.0032$	0.046	0.986
drying		$0.0438 \pm 0.0126$	$1/602.8 \pm 0.531$		0.019	0.910

مقادیر  $\theta_r$  برای لایسیمترها همانند مقادیر جدول ۲ و  $\theta_s^d = \theta_s^w = \theta_s$  در نظر گرفته شد.

جدول ۴ - پارامترهای بهینه‌سازی شده هیدرولیکی خاک در بافت‌های مختلف برای شاخه اصلی خشک‌شدگی در مدل معلم

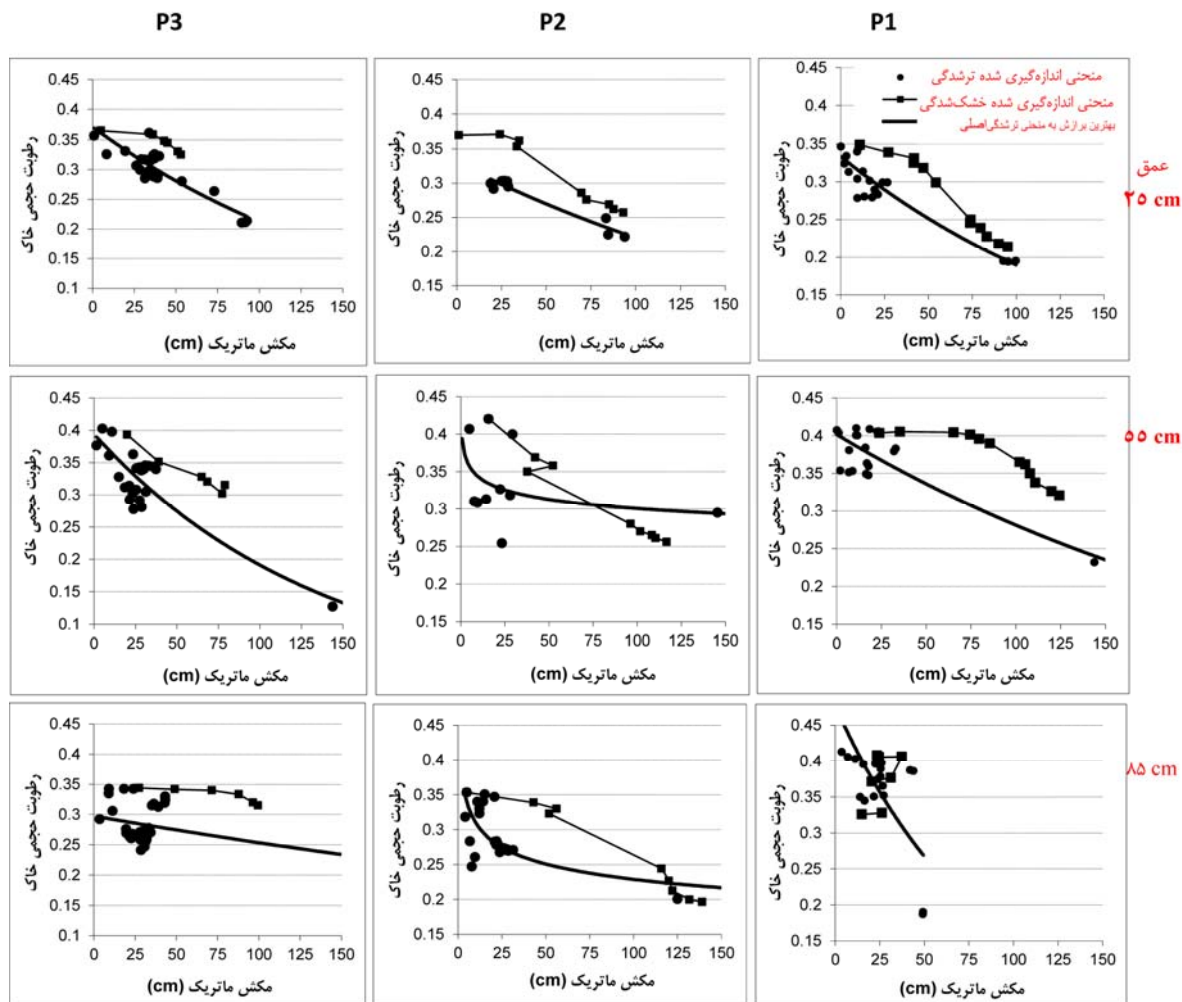
لایسیمتر	$\theta_s^d$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha^d$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n^d$ (-)	SSQ (-)	$R^2$ (-)
P1	$0.4728 \pm 0.010$	$0.0096 \pm 0.0001$	$2/686.8 \pm 0.015$	0.009	0.9997
P2	$0.4229 \pm 0.0006$	$0.0299 \pm 0.0003$	$1/583.4 \pm 0.018$	0.001	0.9999
P3	$0.4233 \pm 0.0006$	$0.0304 \pm 0.0004$	$1/576.1 \pm 0.027$	0.001	0.9999
L1	$0.4821 \pm 0.0008$	$0.04415 \pm 0.0045$	$1/464.5 \pm 0.013$	0.002	0.9998
L2	$0.5721 \pm 0.0010$	$0.0460 \pm 0.0004$	$1/693.7 \pm 0.024$	0.003	0.9999
L3	$0.5310 \pm 0.0009$	$0.0150 \pm 0.0001$	$1/820.0 \pm 0.038$	0.005	0.9998

مقادیر  $\theta_r$  برای لایسیمترها همانند مقادیر جدول ۲ در نظر گرفته شد.

پس ماند را نشان می‌دهد که در این تحقیق به دلیل زیاد شدن تعداد پارامترهای تخمینی و محدودیت روش‌های حل معکوس میسر نشد. منحنی‌های مشخصه رطوبتی تر و خشک‌شدگی اصلی با استفاده از مدل‌های اسکات و معلم با حالت بدون پس ماند برای دو نمونه از لایسیمترها (P1 و L1) در شکل ۳ مقایسه شده‌اند. این منحنی‌ها برای کل خاک‌رخ خاک‌های مورد مطالعه است. رفتار پس‌ماندی در هر دو خاک کاملاً مشهود است. هرچند، اختلاف بین شاخه‌های اصلی خشک‌شدگی و مرطوب‌شدگی در خاک لوم‌شنی قدری بیشتر از خاک لوم‌سیلتی بود. منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک برای شرایط بدون پس ماند بعضاً خارج از محدوده منحنی‌های خشک و مرطوب‌شدگی اصلی بودند. دلیل اصلی آن ثابت فرض نکردن  $\theta_r$  در سناریوهای

در منحنی‌های ترشدگی، رطوبت و مکش ماتریک معادل در ابتدای آزمایش‌ها هنگام اضافه کردن آب (آبیاری) به خاک خشک اندازه‌گیری شدند. منحنی‌های خشک‌شدگی نیز در انتهای آزمایش‌ها هنگام قطع جریان ورودی به لایسیمترها اندازه‌گیری گردیدند. مقایسه منحنی‌های خشک و ترشدگی، رفتار پس‌ماندی در همه لایه‌های خاک لوم‌شنی را به وضوح نشان می‌دهد. این رفتار در خاک لوم‌سیلتی به دلیل این که منحنی‌های ترشدگی به طور کامل اندازه‌گیری نشده بودند، به روشنی خاک لوم‌شنی نبود (نتایج نشان داده نشدند). به دلیل تغییرات مکانی، منحنی‌های مشخصه رطوبتی لایه‌های مختلف وقتی با هم در یک شکل ترسیم می‌شدند، رفتار پس‌ماندی به سادگی قابل مشاهده نبود. این مهم اهمیت بررسی همزمان ناهمگنی و پدیده

مختلف بود. تفاوت منحنی‌های مشخصه رطوبتی در رطوبت باقیمانده ( $\theta_r$ ) کمتر بود.



شکل ۲- مقایسه منحنی‌های اندازه‌گیری شده مشخصه رطوبتی (شاخه‌های اصلی تر و خشک‌شدگی) در عمق‌های مختلف خاک لوم‌شنی

اسکات بود (شکل ۵). تفاوت نتایج دو مدل در مرحله زهکشی بیشتر بود. مدل اسکات و سناریوی بدون پس‌ماند، نتایج مشابهی ارائه نمودند. ملاحظه می‌شود که نتایج دو مدل در دو خاک مورد مطالعه قدری متفاوت بود. رفتار مشابهی نیز قبلاً توسط براداک و همکاران (۵) با استفاده از مدل پس‌ماند پارلانژ (۴۲) گزارش شده است. بدین- ترتیب که نتایج مدل پارلانژ (۴۲) برای پیش‌بینی پس‌ماند در خاک‌های مختلف، متفاوت بود.

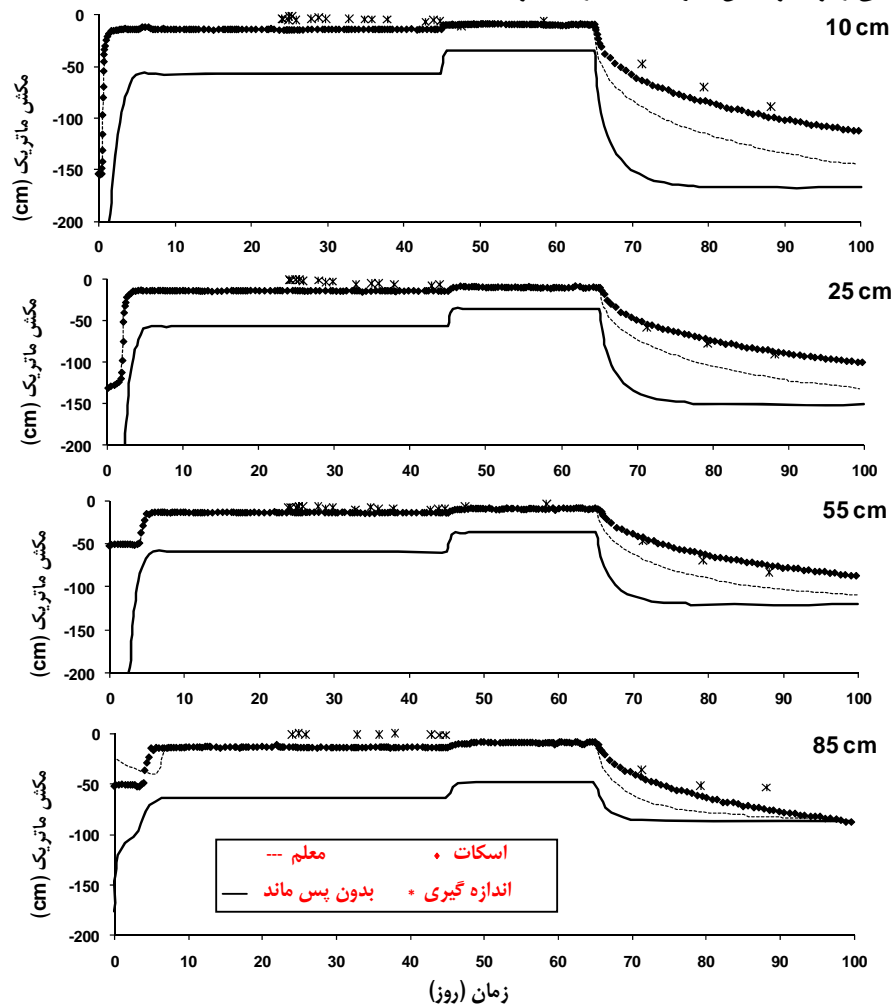
همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، در این مطالعه ناهمگنی خاک به دلیل محدودیت ذاتی روش‌های حل معکوس در تخمین همزمان تعداد اندکی پارامتر در نظر گرفته نشد. تخمین پارامترهای موردنظر به تفکیک لایه‌های مختلف نپرخ خاک می‌توانست در بهبود نتایج

مکش‌های ماتریک اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مدل‌های اسکات و معلم برای لایسیمتر L1 در شکل ۴ مقایسه شده‌اند. این منحنی‌ها شامل همه داده‌های مورد استفاده در مرحله آبیاری و زهکشی است. به طور کلی، هر دو مدل مورد استفاده بهتر از حالت بدون پس‌ماند مکش‌های ماتریک خاک را برآورد نمودند. نتایج دو مدل در مرحله آبیاری (تر شدن) مشابه بود، ولی در مرحله زهکشی (خشک شدن) مدل اسکات در همه لایه‌های خاک با دقت بیشتری مکش‌های ماتریک را برآورد نمود (شکل ۴). یک نمونه از مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با دو مدل مورد استفاده در شکل ۵ ارائه شده است. بر خلاف خاک لوم‌سیلتی، در خاک لوم‌شنی نتایج مدل معلم در برآورد رطوبت خاک قدری بهتر از نتایج مدل



است (۳۹).

مدل سازی موثر باشد. برخی پژوهش‌های قبلی نشان دادند که تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک در لایه‌های مختلف خاک‌های مطبق، تصویر بهتری از پیش‌بینی رطوبت و مکش ماتریک خاک ارایه نموده



شکل ۴- مقایسه مدل‌های معلم و اسکات با حالت بدون پس‌ماند در تخمین مکش ماتریک خاک در لایه‌های مختلف لایسیمتر L1

جریان خروجی در لایسیمترهای مورد مطالعه در جدول ۵ ارایه شده است. در این مقایسه از شاخص‌های ضریب تعیین و مجموع خطای مطلق (SAD) استفاده شده است. مقادیر  $R^2$  و SAD و متوسط آنها در خاک‌های مختلف در جدول ۵ آمده است. در خاک لوم‌سیلتی، مدل اسکات بهتر از مدل معلم مقادیر رطوبت خاک، مکش ماتریک و شدت جریان‌های خروجی را برآورد نمود. هر دو مدل به نسبت از دقت کمتری در خاک لوم‌شنی برخوردار بودند. در خاک لوم‌شنی، نتایج مدل معلم در برآورد رطوبت‌های خاک قدری بهتر از مدل اسکات بودند. ولی در برآورد مکش ماتریک و شدت جریان خروجی هر دو مدل از دقت یکسانی برخوردار بودند.

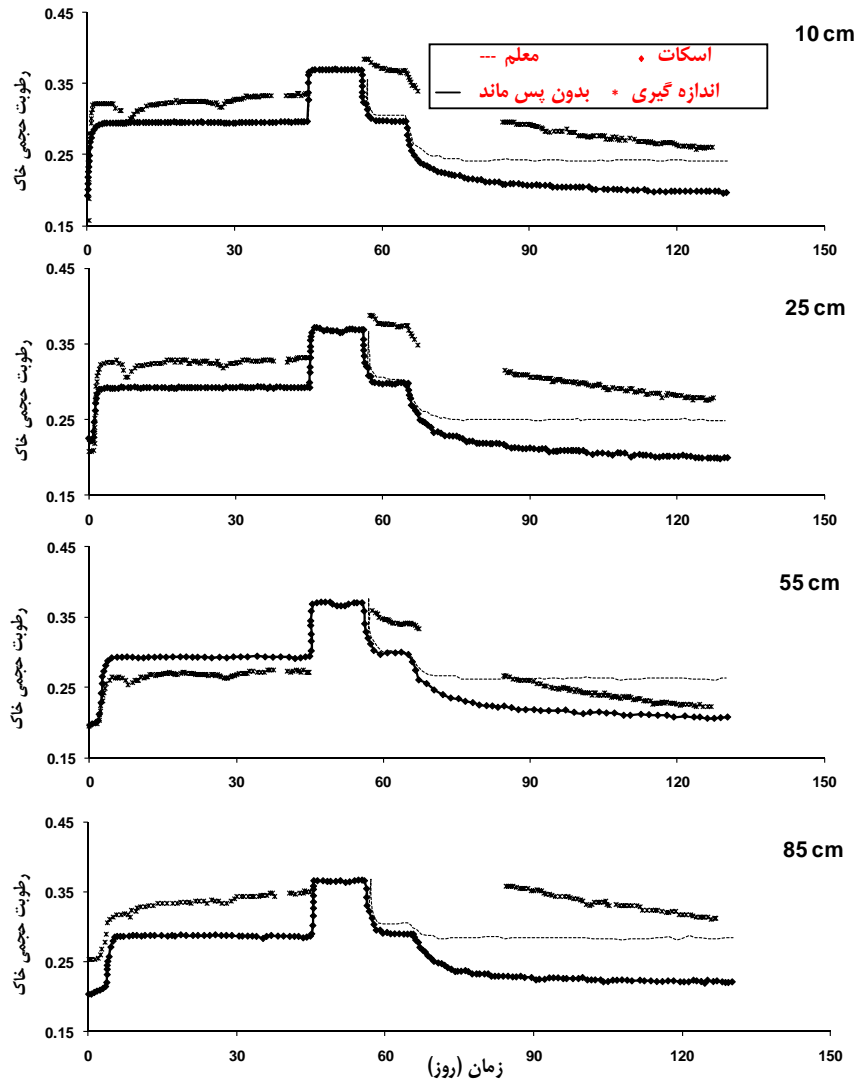
به نظر می‌رسد که شدت جریان خروجی از لایسیمترها در مقایسه با رطوبت و مکش ماتریک خاک نسبت به پس‌ماند رطوبتی حساسیت کمتری دارد. نمونه‌ای از شدت جریان‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با دو مدل اسکات و معلم در شکل ۶ مقایسه شده است. هر دو مدل با دقت نسبتاً خوبی شدت جریان و روند تغییرات آن را در خاک‌های مورد مطالعه برآورد نمودند. اختلاف نسبتاً زیادی بین نتایج دو مدل با حالت بدون پس‌ماند در مرحله تر شدگی (ابتدای آزمایش‌ها) وجود داشت که اهمیت لحاظ پس‌ماند در مطالعه جریان آب در خاک را نشان می‌دهد.

یک مقایسه تحلیلی جامع بین نتایج دو مدل مورد استفاده با داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک، مکش ماتریک و شدت

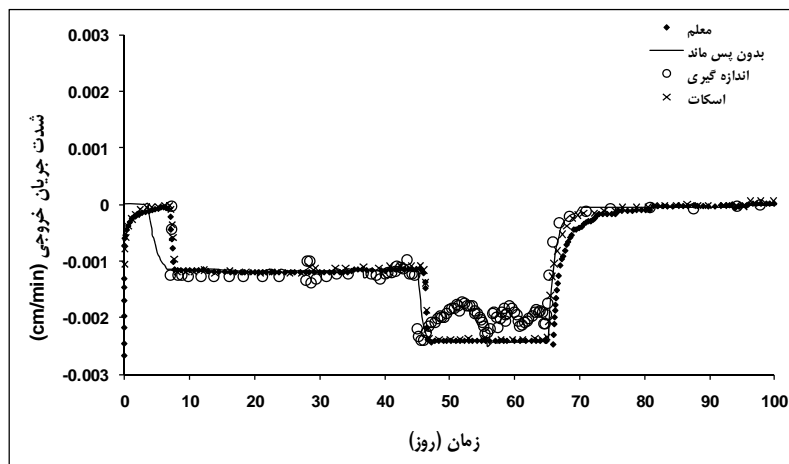
## جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، پدیده پس‌ماند رطوبتی در دو خاک لوم‌سیلتی و لوم‌شنی با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری و مدل‌سازی معکوس مورد بررسی و مدل‌های اسکات و معلم مورد مقایسه قرار گرفتند. ابتدا پارامترهای هیدرولیکی خاک در منحنی مشخصه رطوبتی بدون لحاظ پس‌ماند تخمین و با گزینه‌های دیگر که پس‌ماند رطوبتی در آنها لحاظ شده بود، مقایسه شدند. پس‌ماند رطوبتی با استفاده از مدل تجربی و نسبتاً ساده اسکات و همکاران (۴۹) و مدل مفهومی معلم (۳۶) مطالعه شد. به طور کلی، هر دو خاک مورد مطالعه رفتار پس‌ماندی از خود نشان دادند. تاثیر پس‌ماند بر روی اجزای مختلف جریان آب در خاک‌های مورد مطالعه (مثلاً سری‌های زمانی مکش ماتریک، رطوبت خاک و شدت جریان خروجی) متفاوت بود. نتایج دو مدل مورد استفاده در خاک‌های مورد مطالعه قدری متفاوت بود. ولی مدل

تجربی اسکات در مجموع در مقایسه با مدل مفهومی معلم موفقیت بیشتری در مطالعه پس‌ماند رطوبتی در دو خاک مورد مطالعه داشت. بیشترین مجموع خطای مطلق به مقدار ۶۹/۱۱ در لایسیمترهای خاک لوم‌سیلتی مربوط به تخمین مکش ماتریک توسط مدل معلم و کمترین آن به مقدار ۴/۳۷ مربوط به تخمین رطوبت خاک توسط مدل اسکات بود. بیشترین ضرایب تعیین (۰/۹۹۹ تا ۰/۹۶۲) توسط مدل‌ها در لایسیمترهای لوم‌شنی برای تخمین شدت جریان خروجی حاصل شد. مطالعه پدیده پس‌ماند رطوبتی به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ تابع ترکیبی از پارامترهای مختلف خاک (از جمله بافت خاک، درجه همگنی/ناهمگنی و ...) است و ارزیابی‌های بیشتری را در خاک‌های مختلف طلب می‌کند. بررسی هم‌زمان پدیده پس‌ماند و ناهمگنی خاک در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.



شکل ۵- مقایسه مدل‌های معلم و اسکات با حالت بدون پس ماند در تخمین رطوبت خاک در لایه‌های مختلف لایسیمتر P2



شکل ۶- مقایسه مدل‌های معلم و اسکات در تخمین شدت جریان خروجی در لایسیمتر L1

جدول ۵- مقایسه مدل‌های اسکات و معلم در تخمین رطوبت خاک، مکش ماتریک و شدت جریان خروجی خاک‌های مورد مطالعه

لایسیمتر	مدل اسکات						مدل معلم					
	شدت جریان		مکش ماتریک		رطوبت حجمی		شدت جریان		مکش ماتریک		رطوبت حجمی	
	SAD	R <sup>2</sup>	SAD	R <sup>2</sup>	SAD	R <sup>2</sup>	SAD	R <sup>2</sup>	SAD	R <sup>2</sup>	SAD	R <sup>2</sup>
L1	۳/۶۱	۰/۴۴۸	۶۹/۰۰	۰/۶۲۲	۱۰/۵۳	۰/۸۰۱	۵/۵۲	۰/۲۹۳	۷۳/۱۹	۰/۳۵۲	۱۸/۲۵	۰/۶۶۱
L2	۷/۵۷	۰/۵۰۳	۴۵/۲۱	۰/۹۱۶	۱۴/۲۳	۰/۶۳۷	۶/۲۹	۰/۶۲۲	۴۳/۱۰	۰/۹۲۵	۱۴/۲۳	۰/۶۳۷
L3	۱/۹۲	۰/۹۲۹	۸۵/۹۷	۰/۹۴۳	۲/۷۷	۰/۸۶۹	۲/۷۶	۰/۷۸۵	۹۱/۰۴	۰/۹۶۸	۷/۳۱	۰/۸۵۲
متوسط	۴/۳۷	۰/۶۲۷	۶۶/۷۲	۰/۸۲۷	۹/۱۸	۰/۷۶۹	۴/۸۶	۰/۵۶۶	۶۹/۱۱	۰/۷۴۸	۱۳/۲۶	۰/۷۱۷
P1	۱۰/۹۲	۰/۲۷۷	۴۲/۹۶	۰/۶۴۷	۱۹/۵۳	۰/۹۸۳	۱۰/۰۶	۰/۱۶۴	۵۱/۰۳	۰/۶۷۴	۱۸/۹۷	۰/۹۹۹
P2	۷/۱۶	۰/۶۳۴	۱۱۳/۷	۰/۸۶۶	۱۱/۱۹	۰/۹۷۱	۴/۶۵	۰/۶۳۴	۱۱۵/۴	۰/۹۴۳	۱۰/۴۴	۰/۹۶۲
P3	۶/۶۵	۰/۴۸۴	۷/۳۷	۰/۸۳۰	۶/۹۷	۰/۹۹۷	۶/۳۸	۰/۵۵۱	۷/۰۶	۰/۷۲۲	۹/۰۲	۰/۹۹۲
متوسط	۸/۲۴	۰/۴۱۴	۵۴/۶۶	۰/۷۸۱	۱۲/۵۶	۰/۹۸۴	۷/۰۰	۰/۴۴۹	۵۷/۸۴	۰/۷۸۰	۱۲/۸۱	۰/۹۸۴

## منابع

- عباسی، ف. ۱۳۸۷. واسنجی دستگاه TDR با استفاده از محفظه‌های مکش آب جهت اندازه‌گیری غلظت املاح در دو خاک لومی و لوم‌ماسه-ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران (مجله علوم کشاورزی ایران)، جلد ۳۹، شماره ۱، صفحات ۱۵۱-۱۶۲.
- Abbasi F., Javaux M., Vanclooster M., Feyen J., Wyseure G., and Nziguheba G. 2006. Experimental study of water flow and sulphate transport at monolith scale. *Agric. Water Manag.*, 79(1): 93-112.
- Abdelkabar M., Bruno B., Mamert M., and Michel A. 2004. Hysteresis effects on the water retention curve: A comparison between laboratory results and predictive models. 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference and 5<sup>th</sup> Joint CGS/IAH-CNC Conference, Quebec, Canada.
- Basile A., Ciollaro G., and Coppola A. 2003. Hysteresis in soil water characteristics as a key to interpreting comparisons of laboratory and field measured hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 39 (12): 1301-1312.
- Braddock R.D., Parlange J.Y., and Lee H. 2001. Application of a soil water hysteresis model to simple water retention curves. *Transport in Porous Media*, 44 (3): 407-420.
- Canone D., Ferraris S., Sander G., and Haverkamp R. 2008. Interpretation of water retention field measurements in relation to hysteresis phenomena. *Water Resour. Res.*, 44, W00D12, doi:10.1029/2008WR007068.
- Carsel R.F., and Parrish R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24: 755-769. van Genuchten, F. Leij, and L. Wu, pp. 661-681, Univ. Calif., Riverside.
- Elmaloglou S., and Diamantopoulos E. 2007. The effect of hysteresis on three-dimensions transient water flow during surface trickle irrigation. *Irrig. and Drain.*, 57(1): 57-70.
- FAO. 1991. World Soil Resources. *Soils Bulletin* 66. FAO, Rome.
- Feng M., and Fredlund D.G. 1999. Hysteretic influence associated with thermal conductivity sensor measurements. *In Proceedings from Theory to the Practice of Unsaturated Soil Mechanics in Association with the 52<sup>nd</sup> Canadian Geotechnical Conference and the Unsaturated Soil Group, Regina, Sask., 23-24 October 1999.* pp. 14:2:14-14:2:20.
- Ferraris S., Bevilacqua I., Calderon Vega F.M., Canone D., Previati M., and Haverkamp R. 2008. Methodology for calculating equivalent field scale soil hydraulic system parameters taking into account hysteresis. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-516.
- Gandola F., Debionne S., Varado N., Haverkamp R., Ross P.J., Sander G., and Parlange G.J.Y. 2004. Simple soil water hysteresis prediction model based on theory and geometric scaling. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, EGU04-A-07289.
- Gillham R.W., Klute A., and Heermann D.F. 1976. Hydraulic properties of a porous medium: measurements and empirical representation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40: 203-207.
- Gillham R.W., Klute A., and Heermann D.F. 1979. Measurements and numerical simulation of hysteretic flow in a heterogeneous porous medium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 1061-1067.
- Haverkamp R., and Parlange J.Y. 1986. Predicting the water-retention curve from particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter, *Soil Sci.*, 142: 325-339.
- Haverkamp R., Reggiani P., Ross P.J., and Parlange J.Y. 2002. Soil water hysteresis prediction model based on

- theory and geometric scaling. In "Heat and Mass Transfer in the Natural Environment: A Tribute to J.R. Philip", Eds. D. Smiles, P. Raats, and A. Warrick, Monograph of the American Geophysical Union 129, Chapter 6.2, pp. 213-246.
- 17- Hoa N.T., Gaudu R., and Thirriot C. 1977. Influences of the hysteresis effect on transient flow in saturated-unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 13: 992-996.
  - 18- Hopmans J.W., and Dane J.H. 1986. Temperature dependence of soil water retention curves. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50: 562-567.
  - 19- Huang H.C., Tan Y.C., Liu C.W., and Chen C.H. 2005. A novel hysteresis model in unsaturated soil. *Hydrological Processes*, 19(8): 1653-1665.
  - 20- Huyer W., and Neumaier A. 1999. Global optimization by multilevel coordinate search. *J. Glob. Optim.*, 14: 331-355.
  - 21- Javadi A.A., and Elkassas A.S.I. 2010. Numerical modeling of hydraulic hysteresis in unsaturated soils. *Transport in Porous Media*, 75: 521-540.
  - 22- Javaux M., and Vanclooster M. 2006a. Scale-dependency of the hydraulic properties of a variably saturated heterogeneous sandy subsoil. *J. Hydrol.*, 327(3-4):376-388.
  - 23- Javaux M., and Vanclooster M. 2006b. Three-dimensional structure characterisation and transient flow modelling of a variably saturated heterogeneous monolith. *J. Hydrol.*, 327(3-4): 516-524.
  - 24- Jaynes D.B. 1984. Comparison of the soil-water hysteresis models. *J. Hydrol.*, 75: 287-299.
  - 25- Jaynes D.B. 1992. Estimating hysteresis in the soil water retention function. In *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, University of California, Riverside, California, pp. 219-232.
  - 26- Kaluarachchi J.J., and Parker J.C. 1987. Effects of hysteresis with air entrapment on water flow in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.*, 23: 1967-1976.
  - 27- Kerkides P.G., Kargas G., and Argyrokastritis I. 2006. The effect of different methods using for hysteretic K(h) determination on the infiltration simulations. *Irrig. and Drain.*, 55(4): 403-418.
  - 28- Kool J.B., and Parker J.C. 1987. Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 23: 105-114.
  - 29- Lambot S., Hupet F., Javaux M., and Vanclooster M. 2004. Laboratory evaluation of a hydrodynamic inverse modeling method based on water content data. *Water Resour. Res.*, 40, 1224, doi: 10.1029/2003WR002641.
  - 30- Lambot S., Javaux M., Hupet F., and Vanclooster M. 2002. A global multilevel coordinate search procedure for estimating the unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 38(11), 1224, doi: 10.1029/2001WR001224.
  - 31- Lehmann P., Stauffer F., Hinz C., Dury O., and Fluhler H. 1998. Effect of hysteresis on water flow in a sand column with a fluctuating capillary fringe. *J. Contaminant Hydrology*, 33(1-2): 81- 100.
  - 32- Michalewicz Z. 1996. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3rd Ed., Springer-Verlag, New York.
  - 33- Mitchell R.J., and Mayer A.S. 1998. The significance of hysteresis in modeling solute transport in unsaturated porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1506-1512.
  - 34- Mualem Y. 1974. A conceptual model of hysteresis. *Water Resour. Res.*, 10: 514-520.
  - 35- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12(3): 513-522.
  - 36- Mualem Y. 1977. Extension of the similarity hypothesis used for modeling the soil water characteristics. *Water Resour. Res.*, 13(4): 773-780.
  - 37- Mualem Y. 1984. A modified dependent domain theory of hysteresis. *Soil Sci.*, 137: 283-291.
  - 38- Naasz R.J., Michel C., and Charpentier S. 2005. Measuring hysteretic hydraulic properties of peat and pine bark using a transient method. *Soil Sci. Am. J.*, 69:13-22.
  - 39- Olyphant G.A. 2003. Temporal and spatial (down profile) variability of unsaturated soil hydraulic properties determined from a combination of repeated field experiments and inverse modeling. *J. Hydrol.*, 281:23-35.
  - 40- Pan L., and Wu L. 1999. Inverse estimation of hydraulic parameters by using simulated annealing and downhill simplex method. In *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, Eds. M.Th. van Genuchten, F. Leij, and L. Wu, pp. 769-782, Univ. Calif., Riverside.
  - 41- Parkes M.E., Naysmith D.B., and McDowall M.A. 1989. Accounting for slow drainage and hysteresis in irrigation scheduling. *Irrig. Sci.*, 10(2): 127-140.
  - 42- Parlange J.Y. 1976. Capillary hysteresis and the relationship between drying and wetting curves. *Water Resour. Res.*, 12(2): 224-228.
  - 43- Pham H.Q., Fredlund D.G., and Barbour S.L. 2005. A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. *Can. Geotech. J.*, 42: 1548-1568.
  - 44- Ritter A., Hupet F., Munoz-Carpena R., Lambot S., and Vanclooster M. 2003. Using inverse methods for

- estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agric. Water Manage.*, 59: 77-96.
- 45- Ritter A., Munoz-Carpena R., Regalado C.M., Vanclouster M., and Lambot L. 2004. Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. *J. Hydrol.*, 295 (1): 124-139.
  - 46- Russo D., Jury W.A., and Butters G.L. 1989. Numerical analysis of solute transport during transient irrigation: 1. The effect of hysteresis and profile heterogeneity. *Water Resour. Res.*, 25: 2109-2118.
  - 47- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M.Th. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 847-855.
  - 48- Schaap M.G., Leij F.J., and Van Genuchten M.Th. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251: 163-176.
  - 49- Scott P.S., Farquhar G.J., and Kouwen N. 1983. Hysteretic effects on net infiltration, *Advances in infiltration*, Publ. 11-83, pp.163-170, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, Mich., USA.
  - 50- Si B.C., and Kachanoski R.C. 2000a. Unified solution for infiltration and drainage with hysteresis: Theory and field test. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 30-36.
  - 51- Si B.C., and Kachanoski R.C. 2000b. Estimating soil hydraulic properties during constant flux infiltration: inverse procedures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 439-449.
  - 52- Šimůnek J., Kodesova R., Gribb M., and Van Genuchten M.Th. 1999. Estimating hysteresis in the soil water retention function from cone permeameter experiments. *Water Resour. Res.*, 35:1329-1345.
  - 53- Smith R.E., 1993. Cannulation experiments on the role of soil hydraulic characteristics in agro-ecosystems. *Modeling Geo-Biosphere Processes*, 2: 1-14.
  - 54- Takeshita, Y., Kohno I., Van Genuchten, M.Th., Leij F., and Wu L. 1999. Parameter estimation of unsaturated soil hydraulic properties from transient outflow experiments using genetic algorithm. *Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurements of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. Univ. Calif., Riverside, pp. 761-768.
  - 55- van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
  - 56- Van Orshoven J., Maes J., Vereecken H., Feyen J., and Dudal R. 1988. Aardewerk: a structured database of Belgian soil profile data. *Pedologie*, 38: 191-206.
  - 57- Vanclouster M., Viaene P., Christiaens K., and Ducheyne S. 1996. WAVE: a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and the vadose zone environmental. *Reference and User's Manual (Release 2.1)*, Vol. 1. Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
  - 58- Vanderborght J., Kasteel R., Herbst M., Javaux M., Thiery D., Vanclouster M., Mouvet C., and Vereecken H. 2005. A set of analytical benchmarks to test numerical models of flow and transport in soils. *Vadose Zone Journal* 4: 206-221.
  - 59- Vereecken H., Diels J., and Viaene P. 1995. The effect of soil heterogeneity hysteresis on solute transport: a numerical experiment. *Ecol. Model.*, 77: 273-288.
  - 60- Viaene P., Vereecken H., Diels J., and Feyen J. 1994. A statistical analysis of six hysteresis models for the moisture retention characteristic. *Soil Sci.*, 157(6): 345-355.
  - 61- Vrugt J.A., Gupta H.V., Bouten W., and Sorooshian S. 2003. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resour. Res.*, 39(8), 1201, doi:10.1029/2002WR001642.
  - 62- Vrugt J.A., Bouten W., and Weerts A.H. 2001. Information content of data for identifying soil hydraulic parameters from outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 19-27.
  - 63- Watson K.K., Reginato R.J., and Jackson R.D. 1975. Soil water hysteresis in a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 39: 242-246.
  - 64- Werner A.D., and Lockington D.A. 2003. Influence of hysteresis on tidal capillary fringe dynamics in a well-sorted sand. *Advances in Water Resour.*, 26(11): 1199-1204.
  - 65- Wosten J.H.M., Lilly A., Nemes A., and Le Bas C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90: 169-185.
  - 66- Zachmann D.W., DuChateau P.C., and Klute A. 1981. The calibration of the Richards flow equation for a draining column by parameter identification. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 1012-1016.



## Estimating Soil Water Retention Curve Including Hysteresis Using Inverse Modeling and Scott's and Mualem's Models in two Different Soils

F. Abbasi<sup>1</sup>

Received: 11-07-2012

Accepted: 31-12-2012

### Abstract

Water movement in unsaturated soils is commonly affected by hysteresis which is often ignored in the mathematical description of water flow and solute transport. In this study, hysteresis in soil water retention curve was quantified at lysimeter scale in sandy loam and silty loam soils and results of the Scott's and Mualem's models were compared. Three undisturbed soil monoliths (80 cm diameter by 105 cm height) were collected for each soil and water movement was studied for various boundary conditions. Monoliths were equipped with different measuring devices to monitor soil water contents, pressure heads, and outlet water fluxes. Four unsaturated steady state water flow experiments were conducted on each monolith. Hydraulic properties were determined by inverse method using the WAVE model and a global multilevel coordinate search inversion algorithm. First soil hydraulic parameters in the soil water retention and hydraulic conductivity functions were estimated neglecting hysteresis and compared with the functions obtained using approaches considering hysteresis. Hysteresis was simulated using the simple empirical model proposed by Scott and using the universal conceptual model of Mualem. Results of measured and modeling data indicated that hysteresis was observed in both soils. The effect of hysteresis was different on various components of water flow (i.e., pressure head, water content, and water flux) in two studied soils. Water retention curves, pressure head, and water content were significantly influenced by hysteresis in both soils. The Scott's model considerably improved pressure head estimates in the silty loam soil and Mualem's model somewhat improved the soil water content estimates in the sandy loam soil. Outlet water fluxes in both soils were less sensitive to hysteresis. In general, the simple hysteretic model of Scott was more successful in studying hysteresis in both studied soils.

**Keywords:** Hysteresis, Inverse modeling, Scott's model, Mualem's model, WAVE model

---

1- Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute (AERI)  
Email: F.abbasi@aeri.ir