

ارزیابی برخی روش‌های غیر مستقیم تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی

خاک برای شبیه‌سازی رطوبت در یک خاک لوم‌شنی

فریبرز عباسی*

* نگارنده مسئول، دانشیار مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، نشانی: کرج، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵.

تلفن: ۰۲۶۱) ۲۷۱۶۱۰۱، پیام‌نگار: abbasi_fariborz@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۶/۱۰/۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۹/۹

چکیده

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از مشخصه‌های مهم فیزیکی خاک هستند که برآورد آنها در اکثر مطالعات آب و خاک از جمله آبیاری و زهکشی اهمیت ویژه دارد. در این پژوهش، روش نیمه تجربی آریا و همکاران به عنوان یک روش ساده، سریع، و به نسبت کم هزینه برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با دو روش مدل‌سازی معکوس و توابع انتقالی در یک خاک لوم‌شنی مقایسه شد و برای شبیه‌سازی رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری به کار گرفته شد. در روش آریا و همکاران، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل کلیه پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی معلوم- و ن گنوختن از روی منحنی دانه‌بندی خاک برآورد شدند. در روش تابع انتقالی از نرم‌افزار ROSETTA استفاده شد. در روش مدل‌سازی معکوس از رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در خاک، یک مدل ریاضی مناسب که بیان‌کننده روابط حاکم بر پدیده باشد، و یک الگوریتم بهینه‌سازی برای کمینه کردن یک تابع هدف استفاده شد. در این تحقیق، از مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری و همچنین تخمین ویژگی‌های حساس هیدرولیکی خاک (شامل پارامترهای n ، θ_s ، K_s در منحنی مشخصه آب خاک و ن گنوختن و مدل هدایت هیدرولیکی- رطوبت معلوم- و ن گنوختن) به روش مدل‌سازی معکوس استفاده گردید. برای مقایسه روش‌های مختلف برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری شبیه‌سازی و با مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای طی دو آبیاری متوالی به روش آزمون t ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی معکوس و روش آریا و همکاران با کمترین RMSE بیشترین تطابق را با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند. روش تابع انتقالی در اغلب موارد مقادیر رطوبت را بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند.

واژه‌های کلیدی

توابع انتقالی، روش آریا و همکاران، مدل‌سازی معکوس، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

مقدمه

برای پیش‌بینی آنها ارائه نشده است. با این همه، روابط تجربی و نیمه‌تجربی زیادی برای این منظور موجود است که هر یک محاسن و معایب خاص خود را دارد. وجه مشترک همه این روابط، تعیین تعدادی پارامتر تجربی است که بعضاً چندان ساده هم نیست. تعیین منحنی‌های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم امکان‌پذیر است. روش

منحنی‌های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های فیزیکی خاک هستند که تعیین آنها در اکثر مطالعات و طراحی‌های آبیاری و زهکشی اهمیت فراوانی دارد. این منحنی‌ها، به دلیل متأثر بودن از نیروهای بین ذرات خاک، و شکل خلل و فرج خاک، پیچیده هستند و رابطه ریاضی رضایت بخشی

غیرمستقیم نظیر توابع انتقالی و مدل سازی معکوس که به سرعت نیز در حال توسعه هستند، به ویژه در شرایط مزرعه‌ای ارزیابی نشده است. زندپارسا و سپاسخواه (Zand-Paesa & Sepaskhah, 2004) یک روش عددی برای برآورد منحنی هدایت آبی غیراشباع $K(\theta)$ بر اساس سطح مشترک مایع-بخار^۳ در منافذ خاک پیشنهاد و آزمون کردند. این محققان برای تخمین هدایت آبی اشباع (K_s) رابطه‌ای خطی بین $K(\theta)$ و رطوبت خاک (θ) در دامنه‌ای محدود از رطوبت خاک ارائه دادند و ضریب اعوجاج را با کمینه کردن خطا به روش نیوتن-رافسون بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده K_s تخمین زدند.

یکی دیگر از روش‌های برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، مدل سازی معکوس است. این روش غیرمستقیم، در کارهای مهندسی کاربرد زیادی دارد. این روش، اطلاعاتی نیز در مورد عدم اطمینان^۴ و همبستگی بین پارامترها ارائه می‌کند. روش مدل سازی معکوس بر پایه بهینه‌سازی یک تابع هدف استوار است که اختلاف بین مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده را کمینه می‌کند. یکی از معایب روش حل معکوس آن است که اغلب با محدودیت تعداد پارامترهای تخمینی روبه‌روست (Kool *et al.*, 1987). مدل سازی معکوس در سال‌های اخیر نتایج موفقیت‌آمیزی در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (Kodesova *et al.*, 1999) و انتقال املاح (Jacques, 2000; Abbasi *et al.*, 2003a,b; Simunek *et al.*, 1999; Jacques, 2000; Abbasi *et al.*, 2003a,b; Zakerinia *et al.*, 2007) داشته است.

لمبوت و همکاران (Lambot *et al.*, 2004) با استفاده از رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در شرایط پایدار رطوبتی، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با مدل WAVE و یک الگوی بهینه‌سازی عمومی^۵ برآورد کردند. هوپت و همکاران (Hupet *et al.*, 2003) پارامترهای جذب آب در ریشه را از طریق مدل سازی معکوس با استفاده از رطوبت خاک تخمین زدند. زو و همکاران (Zuo *et al.*, 2002, 2004) با استفاده از

مستقیم معمولاً در آزمایشگاه روی نمونه‌های کوچک (حدود ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب) انجام می‌شود. این روش وقت‌گیر و پرهزینه است و به خاطر شرایط مرزی و حجم کوچک نمونه‌های خاک، معمولاً قابل تعمیم به شرایط مزرعه نیست. لذا، محققان به روش‌های غیرمستقیم روی آورده‌اند که نسبتاً ساده و ارزان‌ترند. در روش‌های غیرمستقیم نظیر توابع انتقالی، با استفاده از خصوصیات زود یافت خاک نظیر درصد ذرات خاک (مقادیر شن، سیلت، و رس)، چگالی ظاهری، درصد مواد آلی، و تخلخل، پارامترهای مدل منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع تعیین می‌شوند (Schaap & Leij, 1998; Schaap *et al.*, 2001; Abbasi *et al.*, 2004) نشان دادند که نتایج مدل ROSETTA برای تخمین رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری قابل مقایسه با روش معکوس است.

یکی دیگر از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، استفاده از مدل‌های نیمه تجربی است. در این مدل‌ها، منحنی مشخصه آب خاک بر اساس مفاهیم فیزیکی نظیر منحنی دانه‌بندی یا شکل، اندازه، و میزان اعوجاج^۱ خلل و فرج خاک، تخمین زده می‌شود. یکی از این مدل‌ها، روش آریا و پاریس (Arya & Paris, 1981) است که بعداً آریا و همکاران (Arya *et al.*, 1999a) آن را اصلاح کردند. آریا و همکاران (Arya *et al.*, 1999b) روشی برای تخمین منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع پیشنهاد کردند. در این روش، منحنی‌های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک، رابطه صعود موینگی، و روابط دارسی و هیگن-پوازی^۲ برآورد می‌شوند. در برخی پژوهش‌های قبلی، روش آریا و همکاران (Arya *et al.*, 1999a,b) با روش مستقیم در شرایط آزمایشگاهی مقایسه و نتایج رضایت بخش گزارش شده است. با این همه، این روش با سایر روش‌های

1- Tortuosity
4- Uncertainty

2- Hagen-Poiseuille
5- Global

3- Liquid-Vapor Interfacial

ارزیابی برخی روش‌های غیرمستقیم تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک...

N بخش تقسیم می‌شود و در هر بخش ذرات خاک یکنواخت و کروی فرض می‌شوند. آریا و پاریس (Arya & Paris, 1981) مقدار N را ۲۰ توصیه کردند که ۱۱ بخش آن با استفاده از الک‌های شماره ۱۰، ۱۴، ۱۸، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۴۰، و ۱۷۰ (به ترتیب ۲۰۰۰، ۱۴۰۰، ۱۰۰۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۵۵، ۲۵۰، ۱۸۰، ۱۴۷، ۱۰۵، و ۹۰ میکرون) و بقیه نقاط با استفاده از آزمایش هیدرومتری تعیین می‌شود. در هر یک از آزمایش‌های الک و هیدرومتری برای تعیین منحنی دانه‌بندی از ۴۰ گرم خاک خشک شده در آن استفاده می‌شود (Arya et al., 1999a). مکش ماتریک هر یک از بخش‌های منحنی دانه‌بندی (h_i) از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$h_i = \frac{0.18}{R_i \sqrt{e n_i^{(1-\alpha_i)}}} \quad (1)$$

که در آن، R_i = شعاع متوسط ذرات خاک (سانتی‌متر) برای بخش i ام منحنی دانه‌بندی؛ e = نسبت پوکی؛ n_i = تعداد ذرات کروی در واحد جرم خاک (گرم^{-۱})، و α_i = عامل اندازه یا مقیاس^۱ است. عامل مقیاس به نوعی بیان‌کننده مفهوم فیزیکی میزان پیچ و خم و انحناي خلل و فرج خاک است. مقدار α در خاک‌های مختلف از ۱/۱ تا ۲/۵ متغیر است (Arya et al., 1999a).

تعداد ذرات کروی خاک برای هر بخش از منحنی دانه‌بندی از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$n_i = \frac{3w_i}{(4\pi\rho_s R_i^3)} \quad (2)$$

که در آن، w_i = کسر جرم ذرات بین دو بخش متوالی منحنی دانه‌بندی (گرم بر گرم)، و ρ_s = چگالی حقیقی خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

داده‌های پتانسیل اسمزی و نیز تراکم ریشه گندم، پارامترهای هیدرولیکی و جذب آب در ریشه را با موفقیت برآورد کردند. مجنون و همکاران (Majnooni et al., 2004) با استفاده از روش معکوس و اندازه‌گیری رطوبت و مکش ماتریک خاک در کرت‌های دایره‌ای شکل، به تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به پارامترهای شکل در معادله ون‌گنوختن بهتر برآورد می‌شود. لی (Lee, 2005) با مقایسه روش معکوس و توابع انتقالی نشان داد که توابع انتقالی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را با خطای کمتری برآورد می‌کنند. اسلام و همکاران (Islam et al., 2006) سه روش مستقیم، توابع انتقالی و معکوس را برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مزرعه‌ای در کالیفرنیا مقایسه و رطوبت خاک را با مدل MIKE-SHE طی سه سال شبیه‌سازی کردند. این محققان نشان دادند که برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مزرعه مورد مطالعه به روش مستقیم، در مقایسه با روش‌های غیرمستقیم، نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی دقت روش آریا و همکاران (Arya et al., 1999a,b) به عنوان روشی نسبتاً ساده، سریع، و کم هزینه، برای تخمین منحنی‌های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مقایسه با دو روش مدل‌سازی معکوس و تابع انتقالی ROSSETA در شرایط مزرعه‌ای است. یکی از کاربردهای عملی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برآورد رطوبت خاک است، از این رو دقت هر یک از این روش‌ها برای تخمین رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

روش آریا و همکاران

در روش آریا و همکاران (Arya et al., 1999a) منحنی دانه‌بندی (برای ذرات کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر) به

تابع انتقالی استفاده شد. این منحنی‌ها با روابطی به شکل زیر مشخص می‌شوند:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (5)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l [1 + (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1$$

که در آنها، θ_r و θ_s = به ترتیب رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع خاک (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)؛ α و n = پارامترهای تجربی؛ S_e و l = به ترتیب درجه نسبی اشباع و پارامتر شکل هستند.

مدل‌سازی معکوس

از آنجا که امکان برآورد همه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به روش معکوس میسر نبود، از داده‌های مزرعه‌ای فقط برای تخمین پارامترهای حساس منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع به روش مدل‌سازی معکوس استفاده شد. در این روش، علاوه بر داده‌های اندازه‌گیری شده (رطوبت خاک) به یک مدل ریاضی مناسب، که بیان‌کننده روابط حاکم باشد، و به یک الگوریتم بهینه‌سازی^۱ برای کمینه کردن تابع هدف نیاز است. از مدل HYDRUS-2D (Simunek et al., 1999) برای شبیه‌سازی رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری و همچنین تخمین سه پارامتر حساس (شامل n ، θ_s ، K_s در روابط ۵ و ۶) به روش مدل‌سازی معکوس استفاده شد. در این مدل، معادله حرکت آب در خاک (رابطه ریچاردز) با روش عددی اجزای محدود حل می‌شود و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم مارکواردت- لونبرگ (Marquardt, 1963) صورت می‌گیرد. از این روش معمولاً برای تخمین پارامترهای حساس استفاده می‌شود. نتایج تحلیل

رطوبت حجمی خاک در هر یک از بخش‌های منحنی دانه‌بندی (θ_i) نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_i = (\varphi S_w) \sum_{j=1}^{j=i} w_j \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

که در آن، φ = تخلخل خاک؛ و S_w = نسبت رطوبت اشباع به تخلخل است و معمولاً بین ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ تغییر می‌کند. در این تحقیق مقدار آن ۰/۹۵ در نظر گرفته شد.

آریا و همکاران (Arya et al., 1999b) روشی برای برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع با استفاده از منحنی دانه‌بندی و روابط هیگن-پوازی و دارسی ارائه دادند. برای تعیین این منحنی، به مقادیر هدایت هیدرولیکی در رطوبت یا مکش‌های مختلف نیاز است. رطوبت یا مکش خاک مانند روش قبل (از رابطه ۱ و یا ۳) و هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(\theta_i)$ از رابطه دارسی به شکل زیر تخمین زده می‌شود:

$$K(\theta_i) = \frac{c \varphi_e}{\pi} \sum_{j=1}^{j=i} R_j^{x-2} w_j (0.667 e n_j^{(1-a_j)})^{(x-2)/2} \quad (4)$$

$$i=1, 2, \dots, N$$

که در آن، c و x = پارامترهای تجربی هستند، $\varphi_e = S_w (1 - \frac{\rho_b}{\rho_s})$ تخلخل مؤثر؛ و ρ_b = چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است. مقدار c و x برای خاک لوم‌شنی به ترتیب ۰/۱۳۴۶ و ۳/۰۶ است (Arya et al., 1999b).

روابط هیدرولیکی

برای تخمین پارامترهای موجود در منحنی مشخصه آب خاک ون گنوختن (van Genuchten, 1980) و مدل هدایت هیدرولیکی معلم-ون گنوختن (van Genuchten, 1980) از روش‌های آریا و همکاران، مدل‌سازی معکوس، و

ارزیابی برخی روش‌های غیرمستقیم تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک...

هدایت هیدرولیکی غیراشباع معلوم-ون گنوختن (van Genuchten, 1980) به کمک: (۱) داده‌های زود یافت خاک نظیر درصد ذرات خاک (شن، سیلت، و رس)، چگالی ظاهری و مقادیر رطوبت خاک در مکش‌های ۳۳۰ سانتی‌متر و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (مقادیر رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی) و با کمک نرم‌افزار ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001) برآورد شدند.

آزمایش‌های مزرعه‌ای

۵۶ نمونه خاک دست‌خورده برای تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری و تخمین منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع به روش آریا و پاریس (Arya & Paris, 1981) به‌طور تصادفی از اعماق مختلف یک مزرعه آزمایشی با بافت لوم‌شنی واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی ماریکوپای آریزونا در سال ۲۰۰۱ میلادی تهیه شد. در مزرعه آزمایشی پنج افق خاک شامل Ap, Btkn1, Btkn2, Btkn3 و 2Bkn شناخته شده است (جدول ۱).

حساسیت در مورد پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد که نمای n در منحنی مشخصه آب خاک ون گنوختن (van Genuchten, 1980)، رطوبت اشباع (θ_s) و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی در خاک مورد مطالعه هستند (Abbasi *et al.*, 2003a). لذا، این سه پارامتر حساس با استفاده از مدل HYDRUS-2D به روش مدل‌سازی معکوس برآورد شدند. در این تحقیق، از رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در نیم‌رخ خاک برای تخمین این سه پارامتر حساس استفاده شد. مقادیر سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک در منحنی مشخصه آب خاک (θ_r, α) از روش مستقیم اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی جایگزین شد. مقدار l در منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع ۰/۵ فرض گردید (Mualem, 1976).

توابع انتقالی

پارامترهای هیدرولیکی خاک (شامل $n, \theta_s, \theta_r, \alpha, l$ در روابط ۵ و ۶) بر اساس مدل منحنی مشخصه آب خاک ون گنوختن (van Genuchten, 1980) و مدل

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	بافت	درصد ذرات خاک			عمق (سانتی‌متر)	افق خاک
		رس	سیلت	شن		
۱/۵۲(۰/۰۷)	لوم‌شنی	۱۶/۰(۱/۹۷)	۹/۳(۱/۸۲)	۷۴/۷(۱/۹۶)*	۰-۳۳	Ap
۱/۵۰(۰/۰۹)	لوم‌شنی	۱۵/۰(۳/۰۸)	۸/۳(۱/۷۳)	۷۶/۷(۳/۹۷)	۳۳-۵۸	Btkn1
۱/۴۲(۰/۱۲)	لوم‌شنی	۱۵/۷(۳/۸۵)	۱۱/۹(۲/۸۵)	۷۲/۴(۵/۵۳)	۵۸-۷۱	Btkn2
۱/۴۸(۰/۰۹)	لوم‌شنی	۱۶/۱(۳/۴۴)	۱۳/۶(۴/۳۸)	۷۰/۳(۷/۵۳)	۷۱-۱۲۵	Btkn3

* ارقام داخل پرانتز انحراف معیار است.

میسر نبود زیرا اندازه‌گیری مستقیم منحنی هدایت هیدرولیکی-رطوبت به‌سادگی امکان‌پذیر نبود و در خاک مورد مطالعه انجام نشده بود. روش دوم آن است که از منحنی‌های برآورد شده به روش‌های غیرمستقیم و یک

برای ارزیابی روش‌های مختلف برآورد منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع، دو راه حل وجود دارد. نخست آن که مقادیر تخمینی با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم مقایسه شوند. به کارگیری این روش

روش‌های مختلف برآورد منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در تخمین رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری با استفاده از نرم‌افزار SPSS و به روش آزمون t ، مقایسه آماری شدند. برای برآزش مدل مشخصه رطوبتی ون گنوختن (van Genuchten, 1980) و مدل هدایت هیدرولیکی غیراشباع معلم-ون گنوختن (van Genuchten, 1980) به منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی-رطوبت به‌دست آمده از روش آریا و همکاران و استخراج پارامترهای مورد نیاز از مدل RETC استفاده شد.

نتایج و بحث

روش آریا و همکاران

در روش آریا و همکاران (Arya *et al.*, 1999a) با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک و روابط نیمه‌تجربی ارائه شده در بخش‌های قبلی، منحنی‌های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع برآورد شد. پس از آن با استفاده از نرم‌افزار RETC معادلات منحنی مشخصه آب خاک ون گنوختن و هدایت هیدرولیکی معلم-ون گنوختن به‌طور هم‌زمان به داده‌ها برآزش داده و ضرایب این مدل‌ها در لایه‌های مختلف خاک مطابق جدول ۲ برآورد شدند. از آنجا که در این روش خود منحنی‌های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع برآورد می‌شوند، تخمین همه پارامترهای مدل‌ها ($K_s, \alpha, l, \theta_r, \theta_s, n$) امکان‌پذیر است. مشاهده می‌شود که مقادیر θ_r و n از مقادیر تخمینی به روش مستقیم که عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2003c) برای خاک مورد مطالعه گزارش داده‌اند (جدول ۳)، کمتر هستند. اما مقادیر θ_s ، جز در لایه دوم، بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم هستند. مقادیر تخمینی α در همه لایه‌ها ۲-۳ برابر بزرگ‌تر از مقادیر تخمینی به روش مستقیم است. مقادیر l در همه لایه‌ها منفی و بین ۴/۰۹- تا ۵/۷۵- متغیر است. مقادیر منفی

مدل ریاضی برای تخمین رطوبت خاک استفاده و سپس مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده رطوبت با هم مقایسه شود. در این تحقیق به دلیل اندازه‌گیری رطوبت خاک، از روش دوم استفاده شده است. از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری (Abbasi *et al.*, 2003c) استفاده شد. این آزمایش‌ها در همان مزرعه‌ای اجرا شدند که نمونه‌های خاک برداشت شده بود. بخشی از آزمایش‌ها که نتایج آنها در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در زیر به‌طور مختصر شرح داده شده‌است.

عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2003c) پنج آزمایش مزرعه‌ای (پنج پلات آزمایشی) در یک خاک بدون کشت در جویچه‌های مسدود به طول ۳ متر و عمق تقریبی ۲۰ سانتی‌متر انجام دادند. رطوبت خاک در عمق‌های مختلف طی دو آبیاری متوالی با دور ۱۰ روز و تا مدت ۳۰ روز اندازه‌گیری شد. آبیاری اول بعد از عملیات شخم و تهیه زمین صورت گرفت. مجموعه‌ای پنج تایی از لوله‌های نوترون‌متر در نقاط مختلف جویچه (یک لوله در کف جویچه، ۲ لوله روی بدنه، و دو لوله روی پشته‌ها) جهت اندازه‌گیری توزیع رطوبت خاک در زیر جویچه‌ها کار گذاشته شد. لوله‌ها در دو ردیف به فواصل ۵۰ سانتی‌متر نصب شدند تا از تأثیر متقابل قرائت‌ها جلوگیری شود. توضیحات بیشتر در این خصوص را عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2003c) ارائه داده‌اند. قرائت‌ها در عمق‌های مختلف قبل از هر آبیاری (شرایط اولیه)، بلافاصله بعد از هر آبیاری و هر یک ساعت تا ۶ ساعت پس از آبیاری، و پس از آن هر ۳ ساعت یک بار تا ۲۴ ساعت بعد از هر آبیاری صورت گرفت. سپس سه تا چهار قرائت در هر روز تا روز سوم و یک تا دو قرائت در هر روز تا آبیاری بعدی انجام شد. به دلیل خطای قرائت نوترون‌متر، رطوبت خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) با استفاده از یک دستگاه TDR واسنجی شده به‌دست آمد. قرائت TDR در زمان‌های مشابه نوترون‌متر انجام شد.

ارزیابی برخی روش‌های غیرمستقیم تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک...

برای l در سایر منابع هم گزارش شده است (Mualem, 1976; Schaap & Leij, 1998; Kosugi, 1999; Wosten *et al.*, 1999). مقادیر منفی l موجب شد سرعت همگرایی مدل کاهش و زمان شبیه‌سازی رطوبت خاک توسط مدل ریاضی مورد استفاده، به شکلی قابل توجه افزایش یابد.

جدول ۲- تخمین پارامترهای مدل‌های منحنی مشخصه آب خاک ون گنوختن و هدایت هیدرولیکی معلوم- ون گنوختن در لایه‌های مختلف خاک به روش آریا و همکاران

افق خاک	عمق (سانتی‌متر)	θ_r (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	θ_s (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	α (سانتی‌متر ⁻¹)	n (بدون بعد)	l (بدون بعد)	K_s (سانتی‌متر بر دقیقه)
Ap	۰-۳۳	۰/۰۶۱	۰/۴۲۵	۰/۰۹۰۳	۱/۳۵	-۴/۰۹	۰/۰۲۸۹۹
Btkn1	۳۳-۵۸	۰/۰۴۲	۰/۴۱۶	۰/۱۲۰	۱/۲۸	-۵/۴۰	۰/۰۲۷۵۱
Btkn2	۵۸-۷۱	۰/۰۱۷	۰/۴۴۹	۰/۱۰۰	۱/۲۶	-۴/۵۹	۰/۰۳۱۹۰
Btkn3	۷۱-۱۲۵	۰/۰۱	۰/۴۲۷	۰/۱۳۷	۱/۲۳	-۵/۷۵	۰/۰۲۵۶۹

جدول ۳- پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک ون گنوختن در لایه‌های مختلف به روش مستقیم (Abbasi *et al.*, 2003a)

افق خاک	عمق (سانتی‌متر)	θ_r (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	θ_s (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	α (سانتی‌متر ⁻¹)	n (بدون بعد)
Ap	۰-۳۳	۰/۱۰۴	۰/۳۷۴	۰/۰۳۵	۱/۶۱
Btkn1	۳۳-۵۸	۰/۱۱۱	۰/۴۴۴	۰/۰۶۳	۱/۵۴
Btkn2	۵۸-۷۱	۰/۱۰۷	۰/۴۲۰	۰/۰۴۰	۱/۵۶
Btkn3	۷۱-۱۲۵	۰/۱۰۳	۰/۴۱۲	۰/۰۴۷	۱/۵۵

روش مدل‌سازی معکوس

جایگزین شد (جدول ۳). مقدار l نیز ۰/۵ در نظر گرفته شد (Mualem, 1976). به دلیل حساسیت کم رطوبت خاک به مقادیر این پارامترها (Abbasi *et al.*, 2003a)، این مسئله تأثیر معنی‌داری بر نتایج نخواهد داشت. مقادیر تخمینی n ، جز در لایه‌های زیرین، تا اندازه‌ای مشابه مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم است. اما مقادیر θ_s به‌طور قابل توجهی کمتر از مقادیر روش مستقیم و تخلخل خاک (۴۳/۴ درصد) بود. نتیجه‌ی اخیر با یافته‌های کلوت (Klute, 1986) مطابقت دارد. نتایج

در روش مدل‌سازی معکوس، سه پارامتر حساس و تأثیرگذار یعنی n ، θ_s و K_s در لایه‌های مختلف خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D برآورد شدند. متوسط هندسی پارامترهای حساس برای پنج آزمایش مزرعه‌ای (۵ پلات آزمایشی) در جدول ۴ آمده‌است. برآورد تعداد بیشتری از پارامترها با روش معکوس امکان‌پذیر نبود. لذا، سایر پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک (θ_r, α) از روش مستقیم اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی

توصیه شده در بانک اطلاعاتی کارسل و پاریش (Karse & Parrish, 1998) برای خاک لوم‌شنی است که 0.0736 سانتی‌متر بر دقیقه را برای خاک لوم‌شنی توصیه کرده‌اند. وستن و همکاران (Wosten *et al.*, 1999) برای حدود 1500 نمونه خاک موجود در بانک اطلاعاتی HYPRES، مقدار K_s را برای خاک مشابه این تحقیق بین 0.00838 تا 0.04861 سانتی‌متر بر دقیقه گزارش کرده‌اند.

وی نشان می‌دهد که رطوبت خاک در مزرعه به دلیل محبوس شدن هوا، به ندرت به 0.85 رطوبت اشباع می‌رسد. مقادیر تخمینی K_s به روش مدل‌سازی معکوس نیز در لایه‌های مختلف خاک بین 0.03158 تا 0.07159 سانتی‌متر بر دقیقه متغیر بود. مقادیر تخمینی K_s در همه لایه‌ها بیشتر از مقادیر تخمینی به روش آریا و همکاران بود (جدول ۲). مقادیر تخمینی K_s برای لایه‌های دوم و سوم مشابه مقدار

جدول ۴- تخمین پارامترهای حساس مدل‌های مشخصه آب خاک ون گنوختن و هدایت هیدرولیکی معلوم- ون گنوختن در لایه‌های مختلف خاک به روش مدل‌سازی معکوس

عمق (سانتی‌متر)	θ_s (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	n (بدون بعد)	K_s (سانتی‌متر بر دقیقه)	افق خاک
۰-۳۳	۰/۳۱۹	۱/۶۲	۰/۰۳۱۵۸	Ap
۳۳-۵۸	۰/۳۳۵	۱/۶۱	۰/۰۷۱۵۹	Btkn1
۵۸-۷۱	۰/۳۲۵	۱/۷۳	۰/۰۵۷۹۳	Btkn2
۷۱-۱۲۵	۰/۳۴۶	۱/۷۶	۰/۰۴۷۴۳	Btkn3

وجود دارد. مقادیر تخمینی n نیز با مقادیر روش‌های مستقیم و معکوس همخوانی خوبی دارند. به‌طور کلی، مقادیر K_s تخمینی نسبت به مقادیر برآورد شده به روش مدل‌سازی معکوس و روش آریا و همکاران بیشتر اما با مقادیر توصیه شده کارسل و پاریش (Carsel & Parrish, 1988) و وستن و همکاران (Wosten *et al.*, 1999) برای خاک لوم‌شنی قابل مقایسه است. مقادیر تخمینی a کمتر از مقادیر تخمینی به روش آریا و همکاران اما با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم قابل مقایسه است.

روش تابع انتقالی

در روش توابع انتقالی نیز پارامترهای معادلات هیدرولیکی با استفاده از داده‌های زودیافت خاک نظیر درصد ذرات خاک (شن، سیلت، و رس)؛ چگالی ظاهری؛ و مقادیر رطوبت نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم، و نرم‌افزار ROSETTA برآورد شدند (جدول ۵). مقادیر تخمینی θ_r قدری کمتر از مقادیر برآورد شده به روش مستقیم، و جز در لایه اول، بیشتر از مقادیر تخمینی به روش آریا و همکاران هستند. جز در لایه اول و دوم، بین مقادیر تخمینی θ_s با مقادیر روش مستقیم مطابقت خوبی

جدول ۵- تخمین پارامترهای مدل‌های مشخصه آب خاک ون گنوختن و هدایت هیدرولیکی معلوم- ون گنوختن در لایه‌های مختلف خاک با استفاده از مدل ROSETTA

افق خاک	عمق (سانتی‌متر)	θ_r (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	θ_s (سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب)	α (سانتی‌متر ^{-۱})	n (بدون بعد)	K_s (سانتی‌متر بر دقیقه)
Ap	۰-۳۳	۰/۰۶۱	۰/۳۹۶	۰/۰۵۳	۱/۴۷	۰/۰۸۲۹
Btkn1	۳۳-۵۸	۰/۰۷۷	۰/۴۰۲	۰/۰۵۵	۱/۵۹	۰/۰۹۸۵
Btkn2	۵۸-۷۱	۰/۰۶۲	۰/۴۲۵	۰/۰۵۵	۱/۴۶	۰/۱۰۲۳
Btkn3	۷۱-۱۲۵	۰/۰۶۲	۰/۳۹۹	۰/۰۵۳	۱/۴۹	۰/۰۷۸۶

ارزیابی دقت روش‌های مختلف

آزمایش‌های قبلی عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2003c) قرائت شده بود. لذا، از این داده‌ها برای ارزیابی روش‌های مختلف تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده شد. رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری شبیه‌سازی و تغییرات زمانی آب خاک مطابق شکل ۱ برای دو عمق ۲۰ و ۶۰ سانتی‌متری زیر کف جویچه آزمایشی ترسیم و مقایسه شد. در همه آزمایش‌ها، شرط مرزی بالادست عمق آب در حین آبیاری و پس از آبیاری نیز شرایط اتمسفریک تعریف شد. شرط مرزی پایین جریان آزاد^۱ و در دو طرف جویچه نیز مرزهای بدون جریان^۲ تعریف شد. رطوبت‌های اندازه‌گیری شده قبل از آبیاری نیز به عنوان شرایط اولیه منظور شدند. جهت سهولت مقایسه‌ها، نتایج به صورت یک بعدی و فقط برای کف جویچه ارائه شده‌اند.

مقایسه آماری مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده رطوبت خاک در زیر جویچه‌ها نشان می‌دهد که بین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و تخمینی به روش‌های معکوس و آریا و همکاران تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد وجود ندارد (جدول ۶). اما مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده به روش ROSETTA تفاوتی معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد نشان می‌دهد (جدول ۶).

قبلاً گفته شد که یکی از اهداف این تحقیق ارزیابی دقت روش‌های مختلف برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در شبیه‌سازی رطوبت خاک بعد از آبیاری است. با اجرای مدل HYDRUS-2D با استفاده از ویژگی‌های هیدرولیکی تخمین زده شده بر اساس روش‌های مختلف، رطوبت خاک جویچه‌های آبیاری شبیه‌سازی و تغییرات زمانی آب خاک مقایسه شدند. از آنجا که داده‌های اندازه‌گیری شده در جویچه‌های کوتاه قبلاً در مدل‌سازی معکوس برای واسنجی مدل HYDRUS-2D مورد استفاده بودند، امکان استفاده از این داده‌ها در صحت‌سنجی مدل و ارزیابی روش معکوس وجود نداشت. برای صحت‌سنجی مدل مذکور و آزمون سه روش مورد مطالعه در این تحقیق برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، از داده‌هایی غیر از داده‌های مورد استفاده در مرحله واسنجی استفاده شد. به این ترتیب که از داده‌های عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2004) که در همان مزرعه در جویچه‌هایی به طول ۱۱۵ متر برداشت شده بودند، استفاده شد (شکل ۱). در یکی از آزمایش‌های عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2004)، جویچه‌های آزمایشی به لوله‌های نوترون‌متر مجهز شده بود. رطوبت خاک در اعماق و زمان‌های مختلف همانند

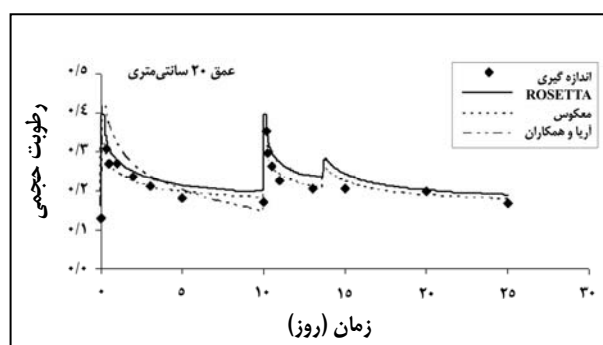
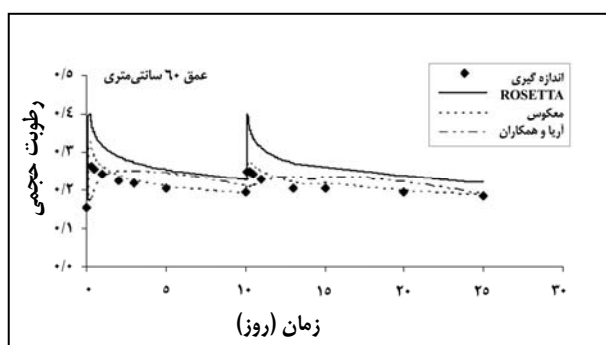
نظر برتری روش آریا و همکاران را ندارد. مدل ROSETTA، رطوبت را به ویژه در عمق ۶۰ سانتی متری بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده برآورد می کند (RMSE=۰/۰۵۹). افزایش ناگهانی رطوبت در روز سیزدهم به دلیل ۱۸ میلی متر بارندگی است که به مدت ۳ ساعت اتفاق افتاد. این بارندگی در افزایش رطوبت عمق ۶۰ سانتی متری چندان مؤثر نبوده است (شکل ۱).

روش های مدل سازی معکوس و آریا و همکاران (Arya et al., 1999a) با کمترین RMSE به مقدار ۰/۰۲۰ و ۰/۰۴۵ بیشترین تطابق را با مقادیر اندازه گیری شده دارد (شکل ۱). در مجموع، روش معکوس در مقایسه با روش آریا و همکاران برآورد بهتری از رطوبت خاک دارد ولی به دلیل اینکه در روش معکوس بعضی از پارامترهای اندازه گیری شده وارد مدل می شوند، روش معکوس از این

جدول ۶- مقایسه مقادیر رطوبت اندازه گیری و برآورد شده در جویچه های آزمایشی به روش آزمون t

سطح معنی داری	t	اختلاف میانگین	مقایسه روش ها
۰/۰۰۰	-۷/۸۰**	-۰/۰۴۸	اندازه گیری شده - ROSETTA
۰/۰۵۱	-۲/۰۳	-۰/۰۱۵	اندازه گیری شده - آریا و همکاران
۰/۲۱۹	-۱/۲۵	-۰/۰۰۴	اندازه گیری شده - مدل سازی معکوس

** اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد



شکل ۱- مقایسه مقادیر رطوبت اندازه گیری شده و رطوبت حاصل از روش های

مختلف برآورد ویژگی های هیدرولیکی خاک در جویچه های آزمایشی در دو عمق ۶۰ و ۲۰ سانتی متری

نیمه تجربی آریا و همکاران (Arya et al., 1999a) مقایسه شدند. در روش های غیرمستقیم، روابط هیدرولیکی خاک نظیر منحنی های مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع با استفاده از خصوصیات زودیاقت خاک نظیر درصد ذرات خاک، چگالی ظاهری، منحنی دانه بندی و سایر

نتیجه گیری

در این تحقیق برای برآورد پارامترهای مدل مشخصه آب خاک ون گنوختن و مدل هدایت هیدرولیکی معلم- ون گنوختن در یک خاک لوم شنی، سه روش غیرمستقیم تابع انتقالی، مدل سازی معکوس و روش

ارزیابی برخی روش‌های غیرمستقیم تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک...

همکاران (Arya *et al.*, 1999a)، آن است که به نسبت ساده، کم هزینه، و سریع است و برخلاف روش مدل‌سازی معکوس، با آن می‌توان همه پارامترهای منحنی مشخصه آب خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع را برآورد کرد. مزیت روش مدل‌سازی معکوس نیز در آن است که با بهره‌گیری از رطوبت خاک در شرایطی مشابه با شرایط مزرعه، که اغلب مواقع نیز امکان‌پذیر است، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برآورد می‌شود. ولی به دلیل اینکه در این روش امکان برآورد همه پارامترهای هیدرولیکی خاک وجود ندارد، لذا از این نظر برتری مدل آریا و همکاران را ندارد. ارزیابی و مقایسه روش آریا و همکاران (Arya *et al.*, 1999a) به عنوان روش برتر این تحقیق با سایر روش‌ها در خاک‌های مختلف توصیه می‌شود.

ویژگی‌های زودیافت خاک که در اکثر مطالعات خاکشناسی مرسوم و موجودند استخراج می‌شوند. از میان روش‌های مطالعه شده در این تحقیق، تابع انتقالی ROSETTA که ساده‌ترین روش مورد استفاده در این تحقیق بود، نتوانست برآورد خوبی از رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری ارائه دهد. این روش در اغلب موارد رطوبت خاک را بیش از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند. خطای آن احتمالاً به این دلیل است که بسته نرم‌افزاری ROSETTA عمدتاً با استفاده از اطلاعات خاک‌های مناطق خاصی توسعه یافته و به‌سادگی قابل تعمیم به سایر شرایط نیست. روش‌های مدل‌سازی معکوس و نیمه‌تجربی آریا و همکاران (Arya *et al.*, 1999a) برآورد بهتری از رطوبت خاک در زیر جویچه‌های آبیاری ارائه می‌دهند. از مزایای روش آریا و

مراجع

- Abbasi, F., Jacques, D., Simunek, J., Feyen, J., and van Genuchten, M. Th. 2003a. Inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Heterogeneous soil. *Trans. ASAE*. 46(4): 1097-1111.
- Abbasi, F., Simunek, J., Feyen, J., van Genuchten, M. Th. and Shouse, P. J. 2003b. Simultaneous inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: Homogeneous soil. *Trans. ASAE*. 46 (4): 1085-1095.
- Abbasi, F., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Feyen, J., Shouse, P., and van Genuchten, M. Th. 2003c. Effects of water depth on water flow and solute transport in furrow irrigation: Field data analysis. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129(4): 237-246.
- Abbasi, F., Feyen, J. and van Genuchten, M. Th. 2004. Two dimensional simulations of water flow and solute transport below furrows: Model calibration and validation. *J. Hydrol.* 290(1-2): 63-79.
- Arya, M. L. and Paris, J. F. 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 1023-1030.
- Arya, M. L., Leij, F. J., van Genuchten, M. Th. and Shouse, P. J. 1999a. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(3): 510-519.
- Arya, M. L., Leij, F. J., Shouse, P. J., and van Genuchten, M. Th. 1999b. Relationship between the hydraulic conductivity and particle-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(5):1063-1070.

- Carsel, R. F. and Parrish, R. S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24, 755-769.
- Hupet, F., Lambot, S., Feddes, R. A., van Dam, J. C. and Vanclooster, M. 2003. Estimation of root water uptake parameters by inverse modeling with soil water content data, *Water Resour. Res.* 39(11): 1312-1320.
- Islam, N., Wallender, W. W., Mitchell, J. P., Wicks, S. and Howitt, R. E. 2006. Performance evaluation of methods for the estimation of soil hydraulic parameters and their suitability in a hydrologic model. *Geoderma J.* 134(1-2): 135-151.
- Jacques, D. 2000. Analysis of water flow and solute transport at the field scale. Ph.D Dissertation. No. 454. K. U. Leuven. Fac. Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen. Leuven, Belgium.
- Klute, A. 1986. Water retention: Laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.) *Methods of soil analysis: Part I: Physical and Mineralogical Methods.* Agronomy. 9(1): 635-662.
- Kodesova, R., Ordway, S. E. Gribb, M. M. and Simunek, J. 1999. Estimating of soil hydraulic properties with cone permeameter: Field studies. *Soil Sci.* 163(6): 436-453.
- Kool, J. B., Parker, J. C. and Van Genuchten, M. Th. 1987. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. *J. Hydrol.* 91, 255-293.
- Kosugi, K. 1999. General model for unsaturated hydraulic conductivity for soils with lognormal pore-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 270-277.
- Lambot, S., Hupet, F., Javaux, M. and Vanclooster, M. 2004. Laboratory evaluation of hydrodynamic inverse modeling method based on water content data. *Water Resour. Res.* 40, 1-12.
- Lee, D. H. 2005. Comparing the inverse parameter estimation approach with pedo-transfer function method for estimating soil hydraulic conductivity. *Geosciences J.* 9(3): 269-276.
- Majnooni-Haris, A., Zand-Parsa, Sh., Sepaskhah, A. R. and Kamkar-Haghighi, A. A. 2004. Prediction of soil hydraulic characteristics with inverse method in field condition. The 9th Soil Science Congress of Iran. Sept. 15-16. (in Farsi)
- Marquardt, D. W. 1963. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *J. Ind. Appl. Math.* 11, 431-441.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12(3): 513-522.
- Schaap, M. G. and Leij, F. J. 1998. Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sci.* 163, 765-779.
- 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.

- 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. Int. Ground Water Modeling Center. Colorado School of Mines. Golden Co.
- van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(5): 892-898.
- 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 J.* 90, 169-185.
- Zakerinia, M., Abbasi, F. and Sohrabi, T. 2007. Evaluating temporal variations of soil hydraulic properties using inverse optimization technique. *J. Agric. Eng. Res.* 8(3): 17-30. (in Farsi).
- Zand-Parsa, Sh. and Sepaskhah, A. R. 2004. Soil hydraulic conductivity function based on specific liquid vapor interfacial area around the soil particles. *Geoderma J.* 119, 143-157.
- Zuo, Q. and Zhang, R. 2002. Estimating root water uptake using an inverse method. *Soil Sci.* 167(9): 561-571.
- Zuo, Q., Lie, M. and Zhang, R. 2004. Simulating soil water flow with root water uptake applying an inverse method. *Soil Sci.* 169(1): 13-24.



Assessment of Indirect Methods to Estimate Soil Hydraulic Properties for Simulating Soil Moisture in a Sandy Loam Soil

F. Abbasi*

* Corresponding Author: Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, P. O. Box: 31585-845, Karaj, Iran. E-mail: abbasi_fariborz@yahoo.com

Soil hydraulic properties are key soil physical characteristics that are required to conduct soil and water related studies such as irrigation and drainage. In this study, three indirect methods: inverse modeling, pedo-transfer function, and the semi-physical method of Arya et al., were compared in a sandy loam soil to estimate soil moisture retention and unsaturated hydraulic conductivity curves. Subsequently, they were applied to simulate soil moisture in irrigated furrows. In the indirect methods, soil hydraulic properties were estimated from easily measured soil data. Using the neural network-based pedo-transfer function of ROSETTA code, soil hydraulic parameters were obtained from soil textural fractions (percentage of sand, silt and clay), bulk density, and two water retention points as input. In the inverse method, the most sensitive soil hydraulic properties were estimated using the Levenberg-Marquardt optimization algorithm in combination with the HYDRUS-2D numerical code. In the semi-physical method, both soil retention and unsaturated hydraulic conductivity curves were predicted from a particle size distribution curve. The predicted soil hydraulic properties were applied to simulate soil moisture below the irrigated furrows during two subsequent irrigations. The results showed that the inverse modeling and Arya et al. methods predicted the soil water content well in the experimental furrows while the pedo-transfer function of ROSETTA overestimated soil water content.

Keywords: Arya *et al.*, Inverse modeling, Pedo-Transfer Functions, Soil Hydraulic Properties