

## یک روش تحلیلی جدید برای برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در ستون خاک

علی اصغر ذوالفقاری<sup>۱\*</sup> - مهدی شرفا<sup>۲</sup> - محمدحسین محمدی<sup>۳</sup> - عبدالمجید لیاقت<sup>۴</sup> - عبدالحسین هورفر<sup>۵</sup> - منوچهر گرجی<sup>۶</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۶

### چکیده

آگاهی از خصوصیات هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی در شبیه سازی جریان و پدیده‌های انتقال در کشاورزی و هیدرولوژی ضروری می‌باشد. روش‌های مستقیم زیادی برای اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی خاک وجود دارند. اما متأسفانه بیشتر روش‌های موجود وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشند. بنابراین توسعه و بسط روش ساده و مدل‌های متکی بر اصول فیزیکی به منظور برآورد منحنی رطوبتی خاک ضروری می‌باشد. در این مطالعه یک روش تحلیلی، برای برآورد پارامترهای مدل منحنی رطوبتی بروکز و کوری با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در خاک توسعه داده شد و سپس روش مربوطه با روش ونگ و همکاران (۲۰۰۲) مقایسه شد. شازده خاک (هفت کلاس بافتی خاک) با خصوصیات هیدرولیکی متفاوت برای بررسی دقت و اعتبارسنجی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی پارامترهای  $n$  و مکش ورود هوا به خاک ( $h_d$ ) را کمتر از  $n$  و  $h_d$  حاصل از برازش معادله بروکز و کوری بر داده‌های اندازه‌گیری برآورد می‌کند. گرچه مقایسه منحنی رطوبتی برآورد شده و اندازه‌گیری شده نشان داد که روش مذکور با دقت بسیار خوبی قادر به برآورد منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. ضریب تبیین بالا ( $R^2 = 0.93$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا پایین ( $RMSE = 0.03$ ) نشان داد که روش به خوبی قادر به برآورد منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. متوسط  $RMSE$  روش ونگ و همکاران (۲۰۰۲) در برآورد منحنی رطوبتی ۱۶ خاک مورد مطالعه برابر  $0.049$  بدست آمد بنابراین نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده با دقت بیشتری نسبت به روش ونگ و همکاران قادر به پیش بینی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. آنالیز حساسیت روش ارائه شده نشان داد که دقت برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک به شدت به دقت برآورد ضریب جذبی آب در خاک وابسته می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** برآورد منحنی رطوبتی خاک، نفوذ افقی آب در ستون خاک، روش تحلیلی

می‌باشد.

### مقدمه

روش‌های مستقیم زیادی برای اندازه‌گیری منحنی رطوبتی خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۳، ۸ و ۱۰). هر چند این روش‌ها دارای اصول و مفاهیم واضح و روشنی هستند، اما استفاده از آنها بسیار وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. بعلاوه بعلت تغییر پذیری مکانی و زمانی بالای این خصوصیات، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است. بنابراین تلاش‌های زیادی برای توسعه روش‌های غیر مستقیم برآورد منحنی رطوبتی خاک انجام شده است. به عنوان مثال در برخی روش‌ها مانند محمدی و ونکلستر (۱۵) و آریا و همکاران (۲) داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک برای برآورد منحنی رطوبتی خاک استفاده می‌شود. همچنین در سال‌های اخیر توابع انتقالی<sup>۷</sup> زیادی برای برآورد منحنی رطوبتی خاک از پارامترهای زود

آگاهی از خصوصیات هیدرولیکی خاک برای پیش بینی حرکت آب و املاح در خاک بسیار ضروری است (۲۴). دقت در برآورد جریان آب و املاح در خاک به دقت در برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک بستگی دارد. یکی از ضروری‌ترین خصوصیات هیدرولیکی مورد نیاز در شبیه سازی جریان آب و املاح در خاک، منحنی رطوبتی خاک

۱، ۲ و ۶- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیاران گروه مهندسی علوم خاک،

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(\*- نویسنده مسئول: Email: azolfaghari@ut.ac.ir)

۳- استادیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۴ و ۵- استاد و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

دقت نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی با نتایج روش ونگ و همکاران (۲۴) مورد مقایسه و سنجش قرار خواهند گرفت.

### تئوری

معادله‌ی جریان غیر اشباع یک بعدی آب در ستون خاک افقی، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$\theta$  رطوبت حجمی خاک ( $L^3/L^3$ )،  $h$  مکش ماتریک خاک ( $L$ )،  $K(h)$  هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک ( $L/T$ )،  $x$  فاصله افقی ( $L$ ) و  $t$  زمان ( $T$ ) می‌باشد.

معادله ۱ یک معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی است. برای تبدیل این معادله، به معادله دیفرانسیل معمولی از تبدیل بولتزمن،  $\lambda = xt^{-0.5}$ ، استفاده می‌شود (۶ و ۱۱). با استفاده از این تبدیل معادله ۱ به فرم یک معادله دیفرانسیل معمولی تغییر خواهد یافت.

$$\frac{d}{d\lambda} = \left[ K(h) \frac{dh}{d\lambda} \right] + \frac{\lambda}{2} \frac{d\theta}{d\lambda} = 0 \quad (2)$$

شرایط مرزی معادله ۲ با استفاده از رابطه زیر توصیف می‌شود.

$$h(0) = 0 \quad (3)$$

$$h(\lambda_f) = h_i$$

$\lambda_f$  برابر است با ضریب بولتزمنی که فاکتور مسافت در آن برابر با طول جبهه رطوبتی ( $x_f$ )،  $\lambda_f = x_f t^{-0.5}$ ، و  $h_i$  مکش ماتریک اولیه خاک می‌باشد.

بروکز و کوری (۴) رابطه زیر را برای توصیف منحنی رطوبتی خاک ارائه کردند.

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

$$Se = 1 \quad h < h_d \quad (4)$$

که  $h_d$  مکش ورود هوا به خاک ( $L$ )،  $n$  پارامتر تجربی و شاخص توزیع اندازه منافذ خاک،  $\theta_s$  رطوبت اشباع ( $L^3/L^3$ ) و  $\theta_r$  رطوبت باقی مانده ( $L^3/L^3$ ) می‌باشد.

فیلیپ (۱۸) با استفاده از روش عددی معادله ۱ را حل نمود و رابطه زیر را برای بیان نفوذ افقی آب در خاک ارائه کرد.

$$I = S t^{0.5} \quad (5)$$

که در این معادله  $I$  نفوذ تجمعی آب در خاک ( $L$ ) و  $S$  ضریب جذبی آب در خاک  $(LT^{-0.5})$  می‌باشد. فیلیپ (۱۸) ضریب جذبی آب در خاک را به صورت زیر تعریف نمود:

یافت خاک توسعه داده شده‌اند. از معایب توابع انتقالی در تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، تعیین مقدار عددی هر یک از پارامترها معادلات رگرسیونی است که از طریق برازش معادلات مذکور بر داده‌ها به دست می‌آید. از آنجا که مقادیر این پارامترها برای هر سری داده‌ها تغییر می‌کنند بنابراین برای هر سری از داده‌های جدید نیازمند برازش و تعیین مقادیر جدید برای پارامترها است. ضمن آن که تحقق شرایط اعتبار رگرسیون‌گیری (مانند نرمال بودن، توزیع خطاها حول میانگین و ...) از محدودیت‌های کاربرد این توابع می‌باشد. علاوه بر این تخمین پارامترها در سری‌های کوچک داده‌های تجربی با تعداد محدود نمونه خاک توام با خطا می‌باشد (۱۶ و ۱۷).

به نظر می‌رسد که توسعه مدل‌های متکی بر اصول فیزیکی در برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های نفوذ آب در خاک می‌تواند جایگزین مناسبی در این زمینه باشد. شاهو و هورتون (۲۱) یک روش انتگرالی را برای برآورد پارامترهای معادله منحنی رطوبتی و گنوختن (۲۳) توسعه دادند. آن‌ها با استفاده از حل تحلیلی معادلات نفوذ افقی آب در خاک، پارامترهای معادله منحنی رطوبتی را تعیین کردند. ونگ و همکاران (۲۴) ابتدا فرض نمودند که منحنی رطوبتی خاک از مدل بروکز و کوری (۴) پیروی می‌نماید. سپس آن‌ها با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در خاک یک روش تحلیلی را برای برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی بروکز و کوری ارائه کردند. این محققین روش خود را تنها در سه خاک فرضی مورد آزمون قرار دادند و بیان داشتند که روش ارائه شده دارای کارایی بالایی در برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. ما و همکاران (۱۲) با استفاده از مفهوم جریان کسری<sup>۱</sup> که قبلاً توسط فیلیپ (۱۹) و مسیورت (۱۴) پیشنهاد شده بود، پارامترهای منحنی رطوبتی معادله بروکز و کوری را به صورت تحلیلی و با استفاده از داده‌های نفوذ آب در خاک تعیین نمودند. ما و همکاران (۱۳) اعتبار مدل پیشین خود (۱۲) را در خاک‌هایی درشت بافت و نیز با درصدهای مختلف (۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ و ۰) ذرات بزرگتر از ۲ میلی‌متر مورد آزمون قرار دادند. آنها همبستگی بالایی را بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده پارامترهای منحنی رطوبتی خاک بدست آوردند. هان و همکاران (۹) پارامترهای منحنی رطوبتی مدل و گنوختن (۲۳) را با استفاده از روش شاو و هورتون (۲۱) در دو نوع خاک دست نخورده با رطوبت‌های اولیه ۱۵ و ۲۰ درصد برآورد نمودند. این محققین نشان دادند که پارامترهای منحنی‌های رطوبتی برآورد شده با استفاده از مدل شاو و هورتون (۲۱) دارای دقت بالایی می‌باشد.

هدف از تحقیق حاضر ارائه روش تحلیلی جدیدی است که بر اساس آن بتوان پارامترهای معادله منحنی رطوبتی بروکز و کوری (۴) را با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در خاک برآورد نمود. همچنین

$$n = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_r}{A_1 + \theta_i - \theta_r} - 1} \quad (12)$$

که در رابطه آنها  $A_1$  برابر با شیب خط رگرسیون بین نفوذ تجمعی و طول جبهه رطوبتی است.

با انتگرال گیری از قسمت اول معادله ۲ رابطه زیر حاصل می شود:

$$\int_0^{\lambda_f} \frac{d}{d\lambda} \left[ K(h) \frac{dh}{d\lambda} \right] d\lambda = \left[ K(h) \frac{dh}{d\lambda} \right]_0^{\lambda_f} \quad (13)$$

مقدار  $\frac{dh}{d\lambda}$  در  $\lambda = \lambda_f$  برابر صفر است (شکل ۱). برای حل معادله ۱۳ بایستی معادله مکش خاک ( $h$ ) در  $\lambda = 0$  مشخص باشد. با تلفیق معادلات ۴ و ۸ مکش خاک ( $h(x)$ ) به عنوان تابعی از  $x$  بدست می آید (معادله ۱۴).

$$\frac{h_d}{h(x)} = \left( 1 - \frac{ax}{x_f} \right)^n \quad (14)$$

با تغییر معادله ۱۴ می توان  $h(x)$  را به عنوان تابعی از  $\lambda$  و به صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{h_d}{h(x)} = \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda_f} \right)^n \quad (15)$$

با مشتق گیری از معادله ۱۵ و قرار دادن  $\lambda = 0$  در معادله خواهیم داشت:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial \lambda} \right|_{\lambda=0} = \frac{nh_d}{\lambda_f} \quad (16)$$

با توجه به اینکه جایی که  $\lambda = 0$  است، خاک تقریباً در حالت اشباع می باشد بنابراین می توان معادله ۱۳ را به صورت زیر بیان نمود.

$$\left[ K(h) \frac{dh}{d\lambda} \right]_{\lambda=0}^{\lambda=\lambda_f} = K_s \frac{nh_d}{\lambda_f} \quad (17)$$

که  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $LT^{-1}$ ) است.

با استفاده از قوانین مشتق گیری خواهیم داشت:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=0} = \left( \frac{\partial h}{\partial \lambda} \right)_{\lambda=0} \left( \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{nh_d}{\lambda_f} t^{-0.5} \quad (18)$$

از طرف دیگر در ابتدای ستون خاک ( $x=0$ ) شدت جریان آب در خاک به صورت زیر توصیف می شود:

$$i = q = \left[ K_s \frac{\partial h}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (19)$$

از تلفیق معادلات ۱۷ و ۱۸ و معادله ۱۹، شدت نفوذ آب در خاک تعیین می شود.

$$i = q = K_s \frac{nh_d}{\lambda_f} t^{-0.5} \quad (20)$$

$$S = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \lambda d\theta \quad (6)$$

$\theta_i$  رطوبت اولیه خاک ( $L^3L^{-3}$ ) است.

با تلفیق روابط ۶ و ۳، ضریب جذبی آب در خاک به صورت زیر نیز قابل توصیف می باشد:

$$S = \int_0^{\lambda_f} \theta d\lambda \quad (7)$$

برای حل معادله ۷ لازم است که با استفاده از یک رابطه ریاضی مناسب، رطوبت خاک ( $\theta$ ) به عنوان تابعی از  $\lambda$  (پروفیل رطوبتی خاک) بیان گردد. ونگ و همکاران (۲۴) معادله زیر را برای توصیف پروفیل رطوبتی خاک در نفوذ افقی آب در خاک ارائه کردند. آنها این معادله را با فرض اینکه مکش خاک در ابتدای ستون خاک برابر با صفر است، بدست آوردند.

$$\theta = \left( 1 - a \frac{x}{x_f} \right)^{n^2} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (8)$$

آنها بیان کردند که اگر رطوبت اولیه خاک کم باشد مقدار  $a$  نزدیک به ۱ خواهد شد.

مشابه با مطالعه محققین مذکور، در این پژوهش فرض می شود که رطوبت اولیه خاک کم بوده و نیز پروفیل رطوبتی خاک می تواند به عنوان تابعی از  $\lambda$  و به شکل زیر توصیف شود:

$$\theta = \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda_f} \right)^{n^2} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (9)$$

رابطه ۹ تا حدودی مشابه با رابطه ۸ می باشد با این تفاوت که بجای پارامتر فاصله،  $\lambda$  (که خود یک تابعی از فاصله است) در معادله قرار می گیرد. به عبارت دیگر در معادله ۸:  $\theta$  بعنوان تابعی از  $x$  و در معادله ۹:  $\theta$  بعنوان تابعی از  $\lambda$  پیشنهاد شده است.

با قرار دادن معادله ۹ در معادله ۷ و انتگرال گیری از آن، ضریب جذبی آب در خاک بدست می آید.

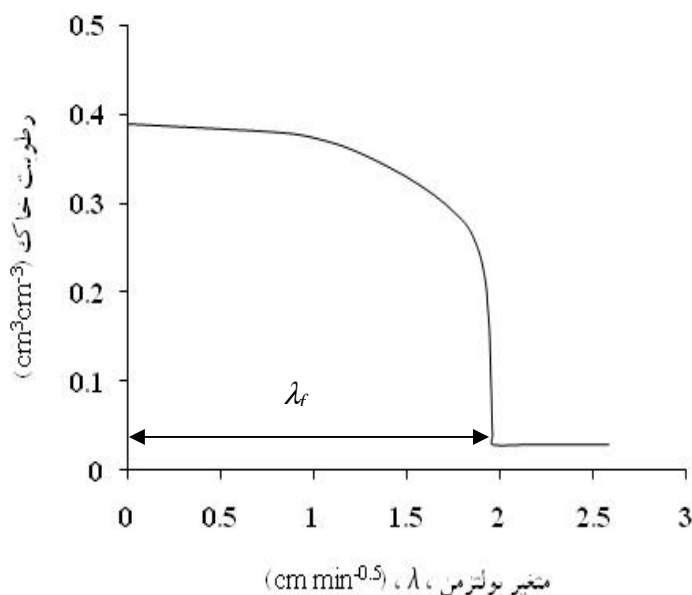
$$S = \frac{\lambda_f (\theta_s - \theta_r)}{n^2 + 1} + \lambda_f \theta_r \quad (10)$$

با تغییر معادله ۱۰، پارامتر  $n$  منحنی رطوبتی خاک با توجه به خصوصیات نفوذ افقی آب در خاک قابل برآورد می باشد.

$$n = \sqrt{\frac{\lambda_f (\theta_s - \theta_r)}{S - \theta_r \lambda_f} - 1} \quad (11)$$

با توجه به معادله ۱۱، در صورت مشخص بودن رطوبت اشباع و باقی مانده خاک، پارامتر  $n$  منحنی رطوبتی بروکز و کوری با استفاده از داده های نفوذ افقی آب در خاک قابل برآورد است.

شکل کلی معادله ۱۱ مشابه رابطه ارائه شده توسط ونگ و همکاران (۲۴) جهت برآورد  $n$  می باشد:



شکل ۱- یک پروفیل رطوبتی یک خاک فرضی در نفوذ افقی آب در خاک (۱۱)

### مواد و روش‌ها

شانزده نمونه خاک دست خورده با خصوصیات هیدرولیکی متفاوت برای ارزیابی دقت روش ارائه شده مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۱ خصوصیات اولیه خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. نمونه‌های دست خورده خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلیمتری عبور داده شدند. و کلیه آزمایش‌های نفوذ و اندازه‌گیری منحنی رطوبتی خاک بر روی نمونه‌های عبور یافته از الک ۲ میلیمتری انجام گرفت. برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و منحنی رطوبتی خاک از نمونه‌های دست خورده استفاده شد. نمونه‌ها در داخل استوانه‌هایی به قطر ۵ سانتیمتر و ارتفاع ۵ سانتیمتر به گونه‌ای تهیه شد که جرم مخصوص ظاهری نمونه‌ها با جرم مخصوص ظاهری نمونه‌های اندازه‌گیری نفوذ افقی آب در ستون‌های بزرگ خاک یکسان باشد. در این مطالعه توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتر و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از بار آبی ثابت در سه تکرار تعیین شد (۷). مقادیر رطوبت جرمی خاک‌های دست خورده در پتانسیل‌های ماتریک ۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰-، ۱۰۰، ۵۰، ۳۳- و ۲۰- کیلو پاسکال با استفاده از صفحات فشاری و در پتانسیل ماتریک ۱۰- و صفر کیلو پاسکال با استفاده جعبه شن<sup>۱</sup> در سه تکرار تعیین شد و سپس از حاصل ضرب رطوبت جرمی خاک در جرم مخصوص ظاهری، رطوبت حجمی خاک بدست آمد. رطوبت در پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰- کیلو پاسکال به عنوان رطوبت باقی مانده (θ<sub>r</sub>) در نظر گرفته شد (۲۱ و ۲۲).

رابطه شدت نفوذ افقی آب در خاک که بوسیله فیلیپ (۱۸) ارائه شده به صورت زیر می‌باشد:

$$i = \frac{S}{2t^{0.5}} \quad (21)$$

با تلفیق روابط ۲۰ و ۲۱ پارامتر h<sub>d</sub> منحنی رطوبتی خاک با استفاده از داده‌های نفوذ آب در خاک قابل برآورد خواهد شد:

$$h_d = \frac{S\lambda_f}{2K_s n} \quad (22)$$

معادله فوق نشان می‌دهد که در صورت مشخص بودن هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، مکش ورود هوا به خاک با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در خاک قابل برآورد می‌باشد. معادله ۲۲ با معادله‌ای که بوسیله ونگ و همکاران (۲۴) به صورت زیر ارائه شده است، شباهت زیادی دارد:

$$h_d = \frac{A_2}{K_s n} \quad (23)$$

که A<sub>2</sub> برابر شیب خط رگرسیون بین شدت نفوذ و عکس طول جبهه رطوبتی خاک می‌باشد. مقایسه معادلات ۲۲ و ۲۳ نشان می‌دهد که A<sub>2</sub> برابر 0.5Sλ<sub>f</sub> می‌باشد.

روش پیشنهادی نشان می‌دهد که در صورت مشخص بودن رطوبت اشباع و باقی مانده و وجود داده‌های نفوذ افقی آب در خاک که اندازه‌گیری آن راحت و کم هزینه می‌باشد، برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک با استفاده از معادلات ۱۱ و ۲۲ به راحتی امکان پذیر می‌باشد.

جدول ۱- برخی از خصوصیات اولیه خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	شماره خاک	سیلت (+۰/۰۵ -۰/۰۰۲ mm)	رس <۰/۰۰۲ mm	کلاس بافت خاک	$K_s$ $cm\ min^{-1}$	$\rho_b$ $g\ cm^{-3}$	$\theta_i$ $cm^3\ cm^{-3}$	$\theta_s$ $cm^3\ cm^{-3}$	$\theta_{1500}$ $cm^3\ cm^{-3}$
۱	۸۳	۷	۱۰	شن لومی	۰/۲۹۴	۱/۵۴	۰/۰۲	۰/۳۸	۰/۰۷۰
۲	۶۶	۱۸	۱۶	لوم شنی	۰/۰۲۸	۱/۴۶	۰/۰۲	۰/۴۵	۰/۱۲۷
۳	۵۴	۲۶	۲۰	لوم شنی	۰/۰۳۷	۱/۳۵	۰/۰۳	۰/۴۷	۰/۱۶۴
۴	۳۳	۴۷	۲۰	لوم	۰/۰۳۲	۱/۲۵	۰/۰۳	۰/۴۸	۰/۱۷۴
۵	۴۸	۳۷	۱۵	لوم	۰/۰۲۷	۱/۳۴	۰/۰۲	۰/۴۴	۰/۱۳۶
۶	۴۳	۳۸	۱۹	لوم	۰/۰۱۶	۱/۳۹	۰/۰۳	۰/۴۴	۰/۱۶۰
۷	۴۷	۲۹	۲۴	لوم	۰/۰۴۲	۱/۳	۰/۰۲	۰/۴۵	۰/۱۶۲
۸	۴۶	۳۴	۲۰	لوم	۰/۰۳۴	۱/۳۲	۰/۰۲	۰/۴۶	۰/۱۷۳
۹	۳۲	۵۰	۱۸	لوم	۰/۰۱۴	۱/۲۲	۰/۰۲	۰/۵۰	۰/۱۴۱
۱۰	۴۲	۳۵	۲۳	لوم	۰/۰۲۲	۱/۳۱	۰/۰۲	۰/۴۲	۰/۱۶۵
۱۱	۳۴	۵۴	۱۲	لوم سیلتی	۰/۰۴۵	۱/۴۹	۰/۰۲	۰/۴۳	۰/۱۱۸
۱۲	۲۱	۵۷	۲۲	لوم سیلتی	۰/۰۵۲	۱/۳	۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۱۶۷
۱۳	۳۸	۵۱	۱۱	لوم سیلتی	۰/۰۴۵	۱/۴۶	۰/۰۲	۰/۴۲	۰/۱۱۳
۱۴	۴۸	۲۶	۲۶	لوم رسی شنی	۰/۱۹۱	۱/۲۷	۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۱۷۶
۱۵	۳۳	۳۵	۳۲	لوم رسی	۰/۰۴۲	۱/۳۰	۰/۰۳	۰/۴۷	۰/۲۱۳
۱۶	۱۴	۴۵	۴۱	رسی سیلتی	۰/۰۱۱	۱/۱۷	۰/۰۳	۰/۵۲	۰/۲۴۱

$K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $\rho_b$  جرم مخصوص ظاهری خاک و  $\theta_s$ ،  $\theta_i$  و  $\theta_{1500}$  به ترتیب رطوبت اولیه، رطوبت اشباع و رطوبت در پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰- کیلو پاسکال می‌باشند.

#### اندازه‌گیری نفوذ افقی آب در ستون خاک

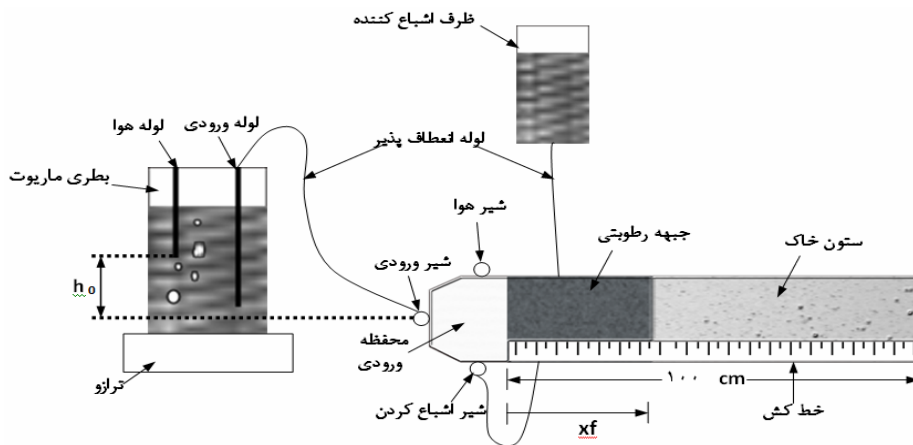
برای بررسی نفوذ افقی آب در خاک از یک دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه که متصل به بطری ماریوت<sup>۱</sup> بود استفاده گردید. دستگاه شامل یک لوله (ستون) شفاف استوانه‌ای از جنس پلاکسی گلس با قطر داخلی ۷ و طول ۱۰۰ سانتیمتر می‌باشد که به فواصل یک میلیمتری درجه‌بندی شده است. قسمت انتهایی لوله استوانه‌ای باز می‌باشد. بنابراین هوای خاک اجازه خروج از انتهای لوله را داشته و مانع از محبوس شدن هوا در خلل و فرج خاک می‌شود (شکل ۲). لوله شفاف به یک محفظه ورودی متصل می‌گردد. این محفظه با یک توری فلزی کوچک و کاغذ صافی به نحوی مسدود شده تا به آب اجازه ورود را داده اما مانع از خروج خاک گردد. محفظه ورودی دارای سه شیر کنترل است. شیر بالایی، شیر هوا نامیده می‌شود در طول زمانی که محفظه ورودی از آب پر می‌شود، این شیر هوا را تخلیه می‌کند. شیر زیرین، شیر اشباع کردن است با استفاده از این شیر قبل از شروع آزمایش محفظه ورودی سریعاً پر می‌شود. دستگاه همچنین دارای یک شیر ورودی است که با استفاده از شلنگ‌های نرم به بطری ماریوت متصل می‌گردد. با استفاده از تغییر وضعیت لوله هوا در بطری ماریوت می‌توان مکش‌های مختلف را برای ورود آب به داخل خاک

1- Marriotte bottle

اعمال کرد (شکل ۱-۱). هرچند در مطالعه حاضر، با تنظیم لوله هوا مکش در ابتدای ستون خاک برابر صفر در نظر گرفته شد. پس از پر کردن لوله از خاک، دستگاه موتناژ شده و سپس بطری ماریوت و ظرف اشباع کننده از آب پر می‌شوند. در مرحله بعد شیرهای هوا و اشباع، باز شده و محفظه ورودی سریعاً از آب پر می‌شود. در یک زمان بسیار کوتاهی این دو شیر بسته شده و شیر ورودی باز می‌شود در این هنگام زمان یادداشت شده و آزمایش آغاز می‌شود.

در این مطالعه بطری ماریوت بر روی یک ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم قرار گرفت و وزن آب نفوذ کرده در زمان‌های مختلف یادداشت شد. برای از بین بردن اثر شرایط مرزی، آزمایش نفوذ تا زمانی که جبهه رطوبتی حداکثر تا ۹۰ درصد طول لوله پیش روی داشت، ادامه یافت. در این زمان شیر ورودی بسته و زمان متوقف گردید و ظرف اشباع کننده در ارتفاع پایین‌تر از لوله قرار گرفت و آب داخل محفظه ورودی تخلیه شد.

در این مطالعه طول جبهه رطوبتی بر اساس تفاوت رنگ خاک خشک و مرطوب در زمان‌های مختلف با استفاده از خط‌کش تعیین شد (۱۲، ۱۳، ۲۰، ۲۱ و ۲۴). با توجه به طولانی بودن نفوذ افقی آب در خاک، برای جلوگیری از تغییرات خصوصیات خاک در طول آزمایش از محلول کلرور کلسیم ۰/۰۵ مولار به عنوان محلول نفوذ کننده استفاده شد.



شکل ۲- نمای کلی از دستگاه اندازه‌گیری نفوذ افقی آب در خاک

گرفتند.

مقادیر آماره ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE<sup>۱</sup>)، جهت مقایسه و ارزیابی قابلیت روش‌های مختلف در پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک به صورت زیر استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - O_i)^2}{N}} \quad (25)$$

$N$  و  $P_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر رطوبت پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای، و  $N$  تعداد نمونه‌های مورد آزمون است.

## نتایج و بحث

معادلات ۱۱ و ۲۲ نشان می‌دهند که در فرآیند نفوذ افقی آب در خاک، پارامترهای مدل منحنی رطوبتی بروکز و کوری (۴) با استفاده از پنج پارامتر،  $S$ ،  $K_s$ ،  $\lambda_f$ ،  $\theta_s$  و  $\theta_r$  بر آورد می‌شوند. پارامتر  $\theta_s$  به سادگی با استفاده از جعبه شن و یا اندازه‌گیری رطوبت در ابتدای ستون خاک قابل برآورد می‌باشد. رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) با استفاده از رطوبت در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال برآورد می‌گردد (۲۱ و ۲۲). پارامتر  $S$  نیز به سادگی با استفاده از داده‌های نفوذ قابل برآورد می‌باشد (رابطه ۵). پارامتر  $\lambda_f$  نیز بر اساس اندازه‌گیری طول جبهه رطوبتی در زمان‌های مختلف به آسانی تعیین می‌گردد. پارامتر  $K_s$  نیز با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع تعیین می‌شود. بنابراین با اندازه‌گیری این پارامترها منحنی رطوبتی خاک به راحتی و با استفاده از روابط پیشنهادی (معادلات ۱۱ و ۲۲) قابل برآورد خواهد بود.

معادله ۱۱ نشان می‌دهد که در روش ارائه شده، پارامتر  $n$  معادله

نفوذ تجمعی در زمان‌های مختلف با استفاده از معادله زیر و بر اساس جرم آب نفوذ یافته در خاک تعیین شد.

$$I = \frac{M(t)}{A\rho_w} \quad (24)$$

$M(t)$  (g) جرم آب تجمعی نفوذ کرده در هر زمان مشخص،  $A$  سطح مقطع ستون خاک ( $\text{cm}^2$ ) و  $\rho_w$  ( $\text{gcm}^{-3}$ ) چگالی آب می‌باشد.

## تعیین پارامترهای مورد نیاز در برآورد منحنی رطوبتی خاک

ضریب جذبی آب در خاک ( $S$ ) با استفاده از برآزش معادله ۵ بر داده‌های نفوذ تجمعی بدست آمد. پارامتر  $\lambda_f$  نیز با توجه به تعریف آن و با استفاده از شیب خط رگرسیون بین طول جبهه رطوبتی و ریشه دوم زمان تعیین شد. پس از تعیین  $S$  و  $\lambda_f$  پارامتر  $n$  منحنی رطوبتی بروکز و کوری با استفاده از معادله ۱۱ برآورد شد. سپس مکش ورود هوا به خاک با استفاده از معادله ۲۲ و بر اساس پارامتر  $n$  برآورد شده و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بدست آمد.

برای برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک با استفاده از روش ونگ و همکاران (۲۴) ابتدا شیب خط رگرسیون بین نفوذ تجمعی و طول جبهه رطوبتی ( $A_1$ ) و شیب خط رگرسیون بین شدت نفوذ و عکس طول جبهه رطوبتی ( $A_2$ ) بدست آمد. سپس پارامترهای منحنی رطوبتی با استفاده از روش ونگ و همکاران و با توجه به معادلات ۱۲ و ۲۳ برآورد گردید. در تحقیق حاضر پارامترهای مدل بروکز و کوری یک بار با استفاده از روش پیشنهادی (معادلات ۱۱ و ۲۲)، و نیز روش ونگ و همکاران (معادلات ۱۲ و ۲۳) برآورد شدند. سپس مقادیر برآورد شده از دو روش مذکور با مقادیر این پارامترها که از طریق برآزش غیر خطی معادله ۴ بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی در نرم افزار RETC (۲۳) به دست آمدند، مورد مقایسه قرار

1 - Root-Mean Square Error

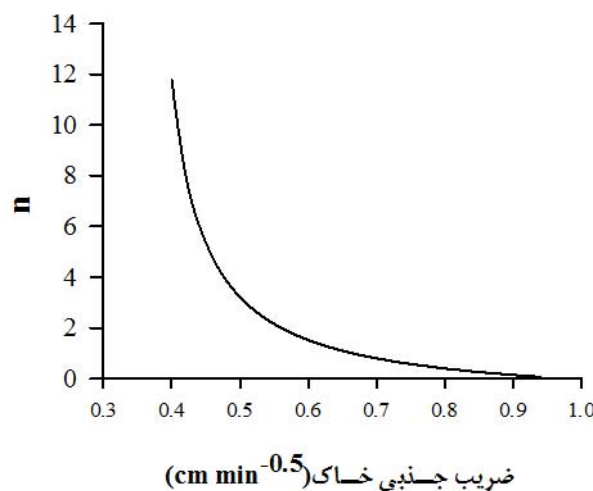
مکش ورود هوا به خاک کاهش یابد.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای مورد نیاز جهت برآورد مدل منحنی رطوبتی بروکز و کوری و ضریب تبیین در برآورد آنها را در هر خاک نشان می‌دهد. پارامترهای  $A_1$  و  $A_2$ ، پارامترهای مورد نیاز برای برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده از روش ونگ و همکاران (۲۴)، و پارامترهای  $S$  و  $\lambda_f$  نیز پارامترهای مورد نیاز در برآورد مدل منحنی رطوبتی خاک با استفاده از روش ارائه شده در این پژوهش می‌باشند. ضرایب تبیین در برآورد پارامترهای  $A_1$ ،  $S$  و  $\lambda_f$  از ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ متغیر می‌باشند، بالا بودن ضریب تبیین در برآورد این پارامترها نشان می‌دهد که پارامترهای مذکور با دقت بالایی برآورد شده‌اند. در حالی که ضرایب تبیین در برآورد پارامتر  $A_2$  دارای تغییر پذیری زیادی بوده و از مقادیر ۰/۷۲ تا ۰/۹۹ متغیر است. بنابراین به نظر می‌رسد که خطا در برآورد این پارامتر ممکن است که سبب کاهش دقت مدل ونگ و همکاران (۲۴) در برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک نسبت به روش پیشنهاد شده (معادلات ۱۱ و ۲۲) شود.

شکل ۴ مقایسه‌ای از منحنی رطوبتی تجربی ۸ خاک با بافت‌های مختلف با منحنی رطوبتی برآورد شده از روش پیشنهادی (معادلات ۱۱ و ۲۲) و روش ونگ و همکاران (۲۴) را نشان می‌دهد. بطور کلی منحنی رطوبتی برآورد شده با استفاده معادلات ۱۱ و ۲۲ به خوبی با داده‌های مشاهده شده همخوانی دارد. منحنی رطوبتی برآورد شده با استفاده از روش پیشنهادی در خاک شن لومی در مکش‌های بیش از ۱۰ کیلوپاسکال مقدار رطوبت را بیش از مقدار اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. همچنین در خاک لوم رسی در مکش‌های بین ۳۳ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال رطوبت برآورد شده کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده می‌باشد.

بروکز و کوری به پارامترهای  $S$  و  $\lambda_f$  وابسته می‌باشند. پارامتر  $\lambda_f$  در یک خاک مشخص مقدار ثابتی است (۵، ۲۱ و ۲۴). بنابراین  $\lambda_f$  شاخصی از خصوصیات هیدرولیکی خاک بوده و در خاک‌های مختلف مقدار آن متفاوت است. در نتیجه عامل تعیین کننده در تغییرات  $n$  در یک خاک مشخص فقط به ضریب جذبی خاک بستگی دارد. شکل ۳ حساسیت پارامتر  $n$  معادله را نسبت به ضریب جذبی یک خاک فرضی ( $\theta_s=0/48$ ،  $\theta_f=0/17$ ) نشان می‌دهد. شکل ۳ نشان می‌دهد که پارامتر  $n$  معادله به ضریب جذبی خاک حساسیت زیادی دارد به طوری که بیش برآورد در تخمین  $S$  سبب خطای زیادی (کم برآورد) در تخمین  $n$  خواهد شد. وجود خطا در برآورد  $n$  نیز سبب بروز خطا در تخمین مکش ورود هوا به خاک خواهد شد (معادله ۲۲). بنابراین دقت در برآورد پارامترهای  $n$  و  $h_d$  کاملاً بستگی به دقت در برآورد ضریب جذبی خاک خواهد داشت زیرا معمولاً برآورد پارامترهای دیگر از قبیل  $\theta_s$ ،  $\theta_f$  و  $K_s$  با خطاهای کمتری همراه می‌باشد. از طرف دیگر برآورد ضریب جذبی خاک از طریق برازش معادله ۵ بر داده‌های نفوذ آب در خاک بدست می‌آید که دارای دقت زیادی است (جدول ۲). بنابراین به نظر می‌رسد که روش پیشنهاد شده در این مطالعه دارای دقت خوبی در برآورد پارامترهای منحنی رطوبتی خاک می‌باشد.

معادله ۲۲ نشان می‌دهد که مکش ورود هوا به خاک ( $h_d$ ) در یک خاک مشخص مستقیماً با پارامترهای ضریب جذبی خاک ( $S$ ) و  $\lambda_f$  و به طور معکوس با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارتباط دارد. در خاک‌های درشت بافت مقادیر  $S$  و  $\lambda_f$  بزرگتر می‌باشند (جدول ۲). اگرچه با سبکتر شدن بافت خاک عموماً هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌ها (و یا سبکتر شدن بافت خاک)



شکل ۳- بررسی حساسیت پارامتر  $n$  به ضریب جذبی خاک در یک خاک فرضی ( $\theta_s=0/48$ ،  $\theta_f=0/17$ )

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده و ضریب تبیین مربوطه جهت برآورد منحنی رطوبتی خاک با استفاده روش پیشنهاد شده و روش ونگ و همکاران (۲۴)

روش پیشنهادی در پژوهش حاضر				روش ونگ و همکاران ۲۰۰۲				شماره خاک
$R^2$	$\lambda_f$ $cm\ min^{-0.5}$	$R^2$	ضریب جذبی (S) $cm\ min^{-0.5}$	$R^2$	$A_2$ $cm^2\ min^{-1}$	$R^2$	$A_1$	
۰/۹۹	۵/۸۱	۰/۹۹	۱/۷۹	۰/۹۹	۵/۳۰	۰/۹۹	۰/۳۲۶	۱
۰/۹۸	۲/۴۳	۰/۹۸	۰/۸۲۱	۰/۹۵	۱/۸۱۰	۰/۹۹	۰/۳۳۹	۲
۰/۹۹	۱/۸۷	۰/۹۹	۰/۷۷۳	۰/۹۳	۰/۴۱۳	۰/۹۹	۰/۳۷۵	۳
۰/۹۹	۲/۰۴	۰/۹۹	۰/۸۶۶	۰/۹۵	۰/۵۱۴	۰/۹۹	۰/۴۲۴	۴
۰/۹۹	۱/۷۲	۰/۹۹	۰/۶۹۰	۰/۸۵	۰/۲۶۴	۰/۹۹	۰/۴۰۳	۵
۰/۹۸	۲/۶۰	۰/۹۸	۰/۶۸۶	۰/۷۲	۰/۱۴۴	۰/۹۹	۰/۳۹۱	۶
۰/۹۹	۲/۲۷	۰/۹۹	۰/۹۰۶	۰/۹۱	۰/۸۴۸	۰/۹۹	۰/۳۹۹	۷
۰/۹۹	۲/۲۴	۰/۹۹	۰/۹۰۵	۰/۹۸	۰/۸۰۷	۰/۹۹	۰/۴۰۳	۸
۰/۹۹	۱/۵۴	۰/۹۹	۰/۶۶۳	۰/۸۸	۰/۲۵۳	۰/۹۹	۰/۴۳۰	۹
۰/۹۹	۱/۶۳	۰/۹۹	۰/۶۲۳	۰/۸۸	۰/۳۵۹	۰/۹۹	۰/۳۸۲	۱۰
۰/۹۹	۲/۶۰	۰/۹۹	۰/۹۴۲	۰/۹۵	۰/۷۹۶	۰/۹۹	۰/۳۶۱	۱۱
۰/۹۹	۲/۰۶	۰/۹۹	۰/۸۴۳	۰/۹۶	۰/۵۲۴	۰/۹۹	۰/۴۰۹	۱۲
۰/۹۹	۲/۷۳	۰/۹۹	۰/۹۹۰	۰/۸۹	۰/۸۵۰	۰/۹۹	۰/۳۶۲	۱۳
۰/۹۸	۲/۲۱	۰/۹۸	۰/۸۸۴	۰/۸۹	۰/۵۷۷	۰/۹۹	۰/۴۰۰	۱۴
۰/۹۸	۱/۹۵	۰/۹۸	۰/۷۶۲	۰/۸۵	۰/۱۸۷	۰/۹۹	۰/۳۹۰	۱۵
۰/۹۹	۱/۸۴	۰/۹۹	۰/۷۵۸	۰/۸۲	۰/۵۹۰	۰/۹۹	۰/۴۱۲	۱۶

$A_1$  نشان دهنده شیب خط رگرسیون بین نفوذ تجمعی و طول جبهه رطوبتی،  $A_2$  نشان دهنده شیب خط رگرسیون بین شدت نفوذ و عکس طول جبهه رطوبتی، ضریب جذبی (S) نشان دهنده شیب خط رگرسیون بین نفوذ تجمعی و ریشه دوم زمان،  $\lambda_f$  نشان دهنده شیب خط رگرسیون بین طول جبهه رطوبتی و ریشه دوم زمان و  $R^2$  ضریب تبیین می‌باشد.

ممکن است که خطای بالای روش ونگ و همکاران (۲۰۰۲) ناشی از خطا در برآورد پارامتر  $A_2$  باشد. همچنین ونگ و همکاران به منظور حل معادلات نفوذ افقی آب در خاک فرضیاتی را پذیرفته‌اند که ممکن است همه این فرض‌ها در شرایط متفاوت کاملاً صادق نباشند و منشا بروز برخی خطاها شوند.

شاهو و هورتون (۲۱) روش انتگرالی خود را بر روی ۶ خاک مورد آزمون قرار دادند. آنها متوسط RMSE برابر ۰/۰۳۴ را برای خاک‌های مورد آزمون بدست آوردند. بنابراین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دارای دقتی مشابه با روش شاهو و هورتون می‌باشد.

نمودار (۵ - الف) رابطه بین مقادیر رطوبت‌های برآورد شده با استفاده از روش پیشنهادی و اندازه‌گیری شده را در کلیه خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین جهت ارزیابی بهتر، معادله خط رگرسیون بین رطوبت برآورد شده و اندازه‌گیری شده همراه با خط ۱:۱ نشان داده شده است. شیب خط رگرسیون بین رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده برابر با ۰/۹۶۷ می‌باشد. نزدیک بودن شیب خط مذکور به خط ۱:۱ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به خوبی قادر به پیش‌بینی رطوبت در مکش‌های مختلف بوده است و نیز

اما در باقی موارد تطابق مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده دیده می‌شود. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که مدل ارائه شده نسبت به مدل ونگ و همکاران (۲۴) نتایج بهتری را در پیش‌بینی منحنی رطوبتی کلیه خاک‌ها دارد. به طوری که حتی در مورد خاک رسی سیلتی که مدل ونگ و همکاران (۲۴) قادر به برآورد منحنی رطوبتی خاک نمی‌باشد، روش پیشنهادی نتایج قابل قبولی را ارائه می‌نماید.

RMSE حاصل از روش پیشنهادی، مدل ونگ و همکاران (۲۴) و برازش مدل بروکز و کوری بر داده‌های اندازه‌گیری شده، در جدول ۳ نشان داده شده است. در این مطالعه متوسط RMSE حاصل از برازش مدل بروکز و کوری بر داده‌های اندازه‌گیری شده برابر ۰/۰۱۲ می‌باشد که بیانگر توجیه مناسب معادله بروکز و کوری از داده‌های منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده می‌باشد. در روش پیشنهادی، بیشترین مقدار RMSE در خاک لوم سیلتی (۰/۰۴۵) و کمترین آن در خاک لوم (۰/۰۲۰) با میانگین ۰/۰۳۰ بدست آمد. متوسط RMSE روش ونگ و همکاران (۲۴) برابر ۰/۰۴۹ بدست آمد (جدول ۳) که در مقایسه با RMSE حاصل از روش پیشنهادی (۰/۰۳۰) مبین دقت بالاتر این روش نسبت به روش ونگ و همکاران (۲۴) می‌باشد.



مقایسه روش مذکور با روش ونگ و همکاران (۲۴) مورد آزمون قرار گرفت.

نتایج نشان داد که روش مذکور پارامترهای  $n$  و  $h_d$  منحنی رطوبتی خاک را کمتر از  $n$  و  $h_d$  حاصل از برازش معادله بروکز و کوری بر داده‌های اندازه‌گیری برآورد می‌کند. گرچه مقایسه منحنی رطوبتی برآورد شده و اندازه‌گیری شده نشان داد که روش پیشنهادی با دقت مناسبی قادر به برآورد منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. بررسی RMSE و ضریب تبیین نشان داد که دقت روش ارائه شده بالاتر از روش ونگ و همکاران (۲۴) می‌باشد. علت بالاتر بودن دقت روش ارائه شده در برآورد منحنی رطوبتی خاک، به دقت بالاتر در برآورد پارامترهای مورد نیاز برای پیش‌بینی منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. مقایسه نتایج روش ارائه شده با منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده نشان داد که این روش مقدار رطوبت را حدود ۳ درصد بیشتر از مقدار اندازه‌گیری نشان می‌دهد. در این مطالعه اعتبار و دقت روش پیشنهاد شده در برآورد منحنی رطوبتی در ۱۶ خاک مورد آزمون قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری منحنی رطوبتی این ۱۶ خاک با استفاده از صفحات فشاری چندین ماه زمان لازم می‌باشد.

ضریب تبیین بالا ( $R^2 = 0.92$ ) بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده نیز موید دقت بالای این روش می‌باشد. البته نتایج نشان می‌دهد که به طور متوسط روش ارائه شده رطوبت خاک را حدود ۳ درصد بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید. نمودار (۵-ب) رابطه بین رطوبت برآورد شده با استفاده از روش ونگ و همکاران (۲۴) و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. ضریب تبیین پایین در این مقایسه نشان می‌دهد که مدل ونگ و همکاران نسبت به روش پیشنهاد شده دارای دقت کمتری است.

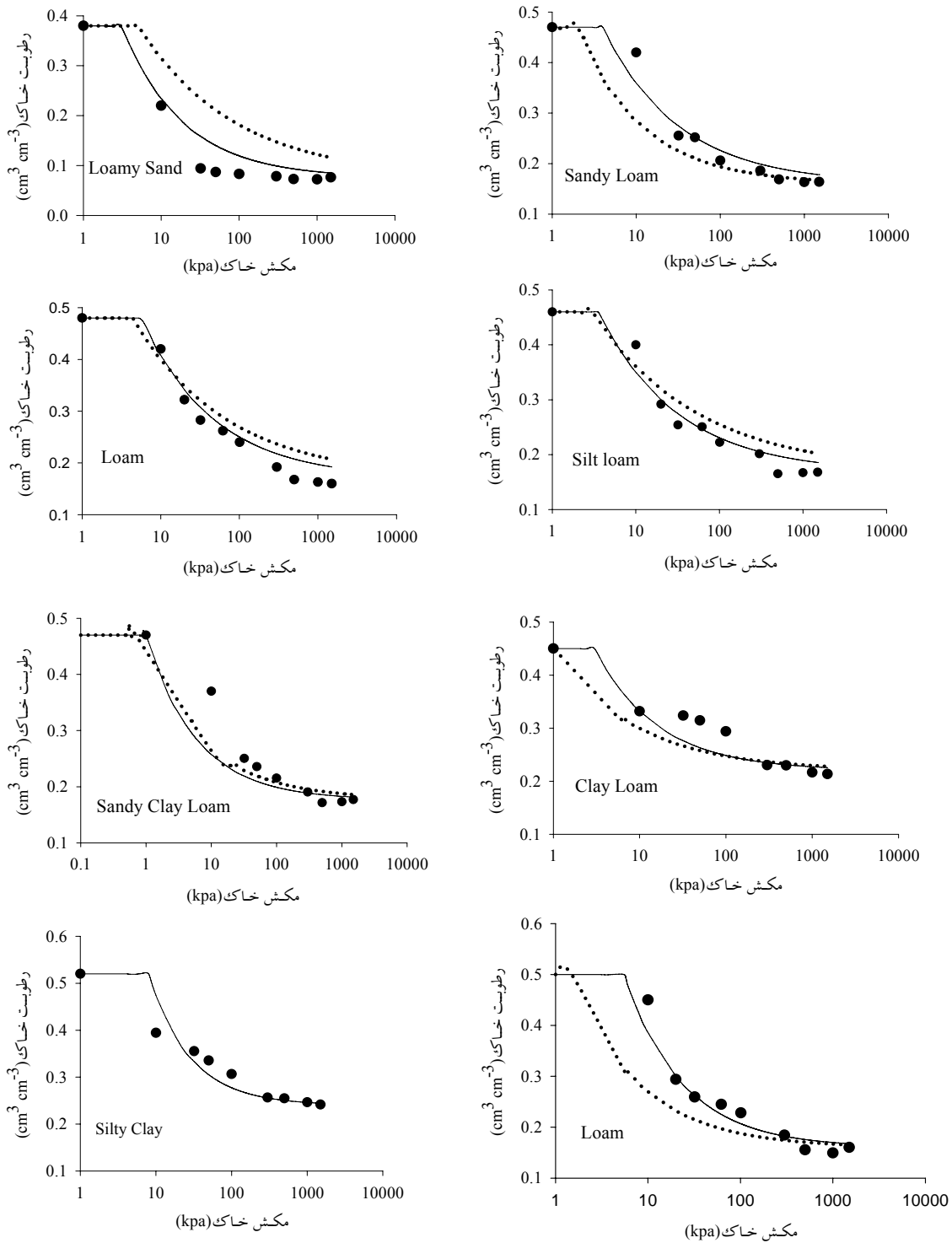
## نتیجه گیری

در این مطالعه روش تحلیلی جدیدی برای برآورد پارامترهای مدل منحنی رطوبتی بروکز و کوری (۴) با استفاده از داده‌های نفوذ افقی آب در خاک ارائه شد. در روش پیشنهادی پارامتر  $n$  منحنی رطوبتی خاک با استفاده از پارامترهای  $S$  و  $\lambda_f$  که به سادگی و با استفاده از داده‌های نفوذ افقی قابل برآورد می‌باشند، تعیین می‌شود. پارامتر مکش ورود هوا به خاک ( $h_d$ ) نیز با استفاده از  $S$ ،  $\lambda_f$  و  $K_s$  قابل برآورد می‌باشد. شانزده خاک برای بررسی دقت و کارایی روش پیشنهادی و

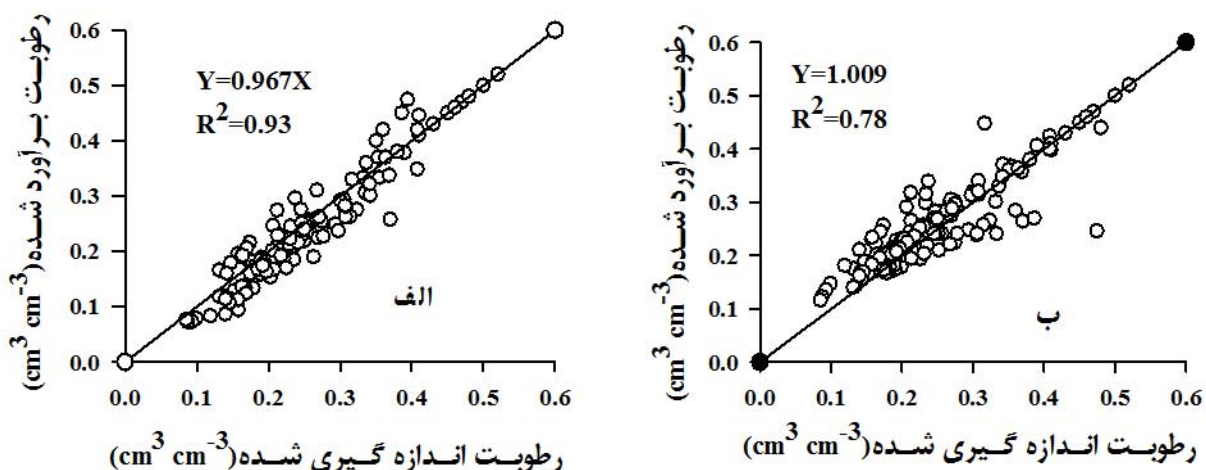
جدول ۳- پارامترهای منحنی رطوبتی مدل بروکز و کوری (۴) و خطای برآورد منحنی رطوبتی با استفاده از روش ارائه شده و روش ونگ و همکاران (۲۴)\*

شماره خاک	روش پیشنهادی در این پژوهش			روش ونگ و همکاران (۲۰۰۲)			برازش بر داده‌ها اندازه‌گیری شده		
	RMSE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$h_d$ (cm)	$n$	RMSE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$h_{d-v}$ (cm)	$n_v$	RMSE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$h_{d-f}$ (cm)	$n_f$
۱	۰/۰۳۲	۳۱	۰/۵۵۷	۰/۰۸۰	۵۱	۰/۳۵۴	۰/۰۱۶	۲۸	۰/۸۲۴
۲	۰/۰۲۷	۴۸	۰/۷۲۵	۰/۰۶۰	۹۹	۰/۶۲۰	۰/۰۲۹	۵۲	۰/۶۸۷
۳	۰/۰۲۵	۴۰	۰/۴۷۹	۰/۰۴۸	۲۰	۰/۵۶۵	۰/۰۰۷	۷۸	۰/۷۴۸
۴	۰/۰۲۲	۵۷	۰/۴۷۱	۰/۰۳۶	۴۴	۰/۳۶۴	۰/۰۱۲	۷۲	۰/۶۷۴
۵	۰/۰۳۳	۵۰	۰/۴۳۳	۰/۰۴۹	۳۲	۰/۳۰۷	۰/۰۱۰	۵۲	۰/۶۳۹
۶	۰/۰۲۵	۵۵	۰/۶۸۲	۰/۰۶۴	۱۵	۰/۵۹۵	۰/۰۱۸	۸۳	۰/۸۱۱
۷	۰/۰۳۹	۵۹	۰/۴۱۱	۰/۰۷۴	۷۲	۰/۲۷۹	۰/۰۰۶	۸۳	۰/۸۹۰
۸	۰/۰۲۹	۷۰	۰/۴۲۶	۰/۰۵۴	۷۵	۰/۳۱۵	۰/۰۱۰	۳۸	۰/۴۲۱
۹	۰/۰۲۸	۷۲	۰/۴۸۸	۰/۰۲۹	۴۴	۰/۳۹۷	۰/۰۱۲	۶۶	۰/۵۹۴
۱۰	۰/۰۲۰	۴۸	۰/۴۶۶	۰/۰۴۰	۴۶	۰/۳۴۴	۰/۰۰۷	۷۱	۰/۷۲۴
۱۱	۰/۰۲۹	۵۱	۰/۵۲۳	۰/۰۳۷	۴۱	۰/۴۲۹	۰/۰۱۳	۶۰	۰/۸۱۲
۱۲	۰/۰۲۲	۳۶	۰/۴۶۰	۰/۰۳۴	۳۰	۰/۳۴۴	۰/۰۱۲	۷۱	۰/۶۹۹
۱۳	۰/۰۴۵	۶۸	۰/۴۳۹	۰/۰۶۶	۵۹	۰/۳۲۲	۰/۰۱۰	۷۷	۰/۸۷۹
۱۴	۰/۰۴۰	۱۰	۰/۵۵۹	۰/۰۳۷	۷	۰/۴۵۳	۰/۰۰۷	۶۲	۰/۷۸۷
۱۵	۰/۰۲۸	۳۰	۰/۵۹۵	۰/۰۳۳	۱۰	۰/۴۶۱	۰/۰۲۱	۲۷	۰/۴۲۲
۱۶	۰/۰۳۰	۲۲	۰/۷۹۷	۰/۰۷۴	۶	۲/۶۳	۰/۰۱۳	۳۴	۰/۴۷
متوسط	۰/۰۳۰	۴۷	۰/۵۳۲	۰/۰۴۹	۴۰	۰/۵۴۸	۰/۰۱۲	۵۹	۰/۶۹۲

\*  $n_v$  و  $h_{d-v}$  به ترتیب پارامتر  $n$  و مکش ورود هوا به خاک با استفاده از روش ونگ و همکاران (۲۴) (معادلات ۱۲ و ۲۳) می‌باشند.  $n_f$  و  $h_{d-f}$  نیز به ترتیب پارامتر  $n$  و مکش ورود هوا به خاک حاصل از برازش معادله بروکز و کوری (۱۹۶۴) بر داده‌های تجربی می‌باشند.  $n$  و  $h_d$  نیز پارامترهای معادله بروکز و کوری با استفاده از روش پیشنهادی (معادلات ۱۱ و ۲۲) می‌باشند.



شکل ۴- مقایسه منحنی رطوبتی تجربی با منحنی رطوبتی برآورد شده با استفاده از روش پیشنهادی در این مطالعه و روش ونگ و همکاران (۲۴) در هفت کلاس بافت خاک (خط ممتد نشان دهنده روش پیشنهادی، خط نقطه چین نشان دهنده روش ونگ و همکاران (۲۴) و نقاط دایره ای نشان دهنده داده های اندازه گیری می باشد).



شکل ۵- رابطه بین مقادیر برآورد شده و مشاهده شده رطوبت با استفاده از روش ارائه شده (الف) و روش ونگ و همکاران (ب) (خط ممتد خط ۱:۱ را نشان می‌دهد).

دست خورده مورد آزمون قرار گرفت اما با توجه پایه فیزیکی روش ارائه شده می‌توان انتظار داشت که روش مذکور در ستون خاک دست نخورده نیز قابل استفاده باشد. اگرچه یکی از مشکلات موجود در این راه تهیه نمونه‌های دست نخورده و انتقال آن به آزمایشگاه است. بنابراین ساخت ابزاری مناسب برای تهیه نمونه‌های دست نخورده و بررسی کارایی روش پیشنهادی در این بین می‌تواند بسیار موثر واقع شود.

در حالی که در روش جدید می‌توان با استفاده از یک ابزار ساده و ارزان (دستگاه اندازه‌گیری نفوذ افقی) منحنی رطوبتی این خاک‌ها را در طی چندین روز تعیین نمود. دقت برآورد روش پیشنهادی نشان می‌دهد که فرض غیر خطی بودن پروفیل رطوبتی خاک که بوسیله ونگ و همکاران (۲۴) ارائه شده است، معتبر بوده و استفاده از آن قابل قبول می‌باشد. به نظر می‌رسد مدل‌های متکی بر اصول فیزیکی از جمله روش پیشنهادی می‌تواند جایگزین مناسبی در برآورد منحنی رطوبتی خاک باشد. در این مطالعه روش مذکور بر روی نمونه‌های

## منابع

- 1- Arya L.M., and Paris J.F. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45(6):1023-1030.
- 2- Arya L.M., Leij F.J., Shouse P.J., and Van Genuchten M.Th. 1999 Relationship between the hydraulic conductivity function and particle-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1063-1070.
- 3- Bohne K., Roth C., Leij F.J., and Van Genuchten. 1993. Rapid method for estimating the unsaturated hydraulic conductivity from infiltration measurements. *Soil Sci.* 155:237-244.
- 4- Brooks R.H., and Corey A.T. 1964. Hydraulic properties of porous media. hydrology paper No.3. Civil Engineering.
- 5- Clothier B.E., and Scotter D.R. 1982. Constant -flux infiltration from a hemispherical cavity. *Soil Sci. soc. Am. J.* 46:641-644.
- 6- Crank J. 1975. *The mathematics of diffusion*. 2nd ed., pp 414. Oxford Univ. Press, New York.
- 7- Dane J.H., and Topp G.C. (Eds), 2002. *Methods of Soil Analysis. Physical Methods*. SSSA Press, Madison, WI, USA.
- 8- Green R.E., Ahuja L.R., and Chong S.K. 1986. Hydraulic conductivity, diffusivity, and sorptivity of unsaturated soil: Field methods. In A.Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part 1*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Medison, WI. pp.771-798.
- 9- Han W., Shao M., and Horton R. 2010. Estimating van Genuchten method parameters of undisturbed soil using an integral method. *Pedospher.* 20(1):55-62.
- 10- Klute A., and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In A.Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part 1*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Medison, WI. pp.687-734.
- 11- Kirkham D., and Powers W.L. 1972. *Advanced soil physics*. John Wiley & sons, Inc. USA.
- 12- Ma D.H., Wang Q.J., and Shao M. 2009. Analytical method for estimating soil hydraulic parameters from

- horizontal absorption. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 73(3):727-736.
- 13- Ma D.H., Shao M, Zhang J., and Wang Q.J. 2010. Validation of an analytical method for determining soil hydraulic properties of stony soils using experimental data. *Geoderma*. 159:262-269.
  - 14- McWhorter D.B. 1971. Infiltration affected by flow of air. *Hydrol. Pap.* 49. Colorado State Univ., Fort Collins
  - 15- Mohammadi M.H., and Vanclooster M. 2011. Predicting the soil moisture characteristic curve from particle size distribution with a simple conceptual model. *VZJ.* 10(2): 594-602.
  - 16- Nemes A., Rawls W.J., and Pachepsky Y. 2006. Use of the nonparametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 327-336.
  - 17- Nemes A., Roberts R.T., Rawls W.J., Pachepsky Ya.A, and Van Genuchten M.Th. 2008. Software to estimate -33 and -1500 kPa soil water retention using the non-parametric k-Nearest Neighbor technique. *Environmental Modelling and Software* 23: 254-255.
  - 18- Philip J.R. 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosic.* 5:215-296.
  - 19- Philip J.R. 1973. On solving the unsaturated flow equation: I. The flux concentration relation. *Soil Sci.* 117:1-13.
  - 20- Schulte K.E., Heng S.L. Culligan P.J., and Germaine J.T. 2009. Testing of intrinsic sorptivity for liquid infiltration into initially dry, Miller-similar silica sands. *VZJ.* 8: 462-469.
  - 21- Shao M., and Horton R. 1998. Integral method for estimating soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*62: 585-592.
  - 22- 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.
  - 23- Van Genuchten M.Th., Leij F.J., and Yates S.R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA, US Salinity Laboratory, Riverside,
  - 24- Wang Q.J., Horton R., and Shao M.A. 2002. Horizontal infiltration method for determining Brooks-Corey model parameters. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 66: 1733-1739.

## A new Analytical Method for Estimating Soil Moisture Characteristic Curve using Horizontal Infiltration Data in Soil Column

A.A. Zolfaghari<sup>1\*</sup> - M. Shorafa<sup>2</sup> - M.H. Mohammadi<sup>3</sup> - A. Liaghat<sup>4</sup> - A. Hoorfar<sup>5</sup> - M. Gorji<sup>6</sup>

Received:06-08-2012

Accepted:16-12-2012

### Abstract

Quantitative knowledge of soil hydraulic properties such as the soil moisture characteristics curve (SMC) is crucial for flow and transport modeling supporting hydrologic and agricultural engineering. However, many laboratory and field methods are currently available for direct measurement of the soil hydraulic properties but, most or all of direct methods are too time consuming and costly. Thus developing of physically-based methods for predicting SMC is essential. In this study, an analytical method was developed to estimate Brooks-Cory model parameters using horizontal infiltration data. The new method was compared with Wang et al (2002) method. Sixteen soils with wide range of hydraulic properties were used to test the new method. The results showed that the new method estimates  $n$  and  $h_d$  parameters smaller than those experimental values. Although, results showed that the new method properly predicts the measured SMC data. High coefficient of determination ( $R^2=0.93$ ) and low root mean square error ( $RMSE=0.03$ ) confirmed the accurate predictability of new method. Mean RMSE of Wang et al (2002) method was 0.049. Therefore, results indicated that the new method is more accurate than Wang et al (2002) method for predicting soil moisture characteristics curve. The sensitivity analysis indicated that, for a given soil, the accurately estimation of SMC depends mainly on sorptivity parameter.

**Keywords:** Soil moisture characteristic curve, Horizontal infiltration in Soil Column, Analytical method

1,2,6- PhD Student, Associate Professors, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Respectively

(\*- Corresponding Author Email:azolfaghari@ut.ac.ir )

3- Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

4,5- Professor and Associate Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran