

## تخمین معکوس پارامترها و توابع هیدرولیکی خاک غیراشباع با استفاده از داده‌های آزمون دیسک

### نفوذسنج

محمد نخعی<sup>۱</sup>، وهاب امیری<sup>۲\*</sup> و میثم ودیعی<sup>۳</sup>

(۱) دانشیار هیدروژئولوژی؛ دانشکده علوم زمین؛ دانشگاه خوارزمی؛ تهران؛ ایران  
(۲) دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی؛ دانشکده علوم زمین؛ دانشگاه خوارزمی؛ تهران؛ ایران  
\*نویسنده مسئول مکاتبات: [vahab.amiri@gmail.com](mailto:vahab.amiri@gmail.com)  
(۳) دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی؛ دانشکده علوم؛ گروه زمین شناسی؛ دانشگاه تبریز؛ تبریز؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۱۳

### چکیده

تحلیل جریان در منطقه غیراشباع خاک بسیار پیچیده بوده و به دو تابع غیرخطی  $K(h)$  و  $\theta(h)$  که توابع غیرخطی رفتار هیدرولیکی خاک هستند بستگی دارد. تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش‌های گوناگونی انجام می‌شود که استفاده از آزمون نفوذ یکی از این موارد می‌باشد. در این مطالعه از داده‌های جمع‌آوری شده از آزمون نفوذ بوسیله دیسک نفوذ (بار فشار و نفوذ تجمعی از سطح نمونه خاک) برای تخمین و بهینه‌یابی پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از برنامه HYDRUS-2D به روش حل معکوس استفاده شد. در این مطالعه از مدل van Genuchten-Mualem برای ارزیابی هیدرودینامیکی محیط استفاده شد. علاوه بر این، فرض شد که هیچ‌گونه پسماند رطوبتی در محیط وجود ندارد و محیط متخلخل کاملاً همگن و ایزوتروپ است. در این مطالعه نمونه‌ای از خاک سیلتی لوم به طول ۲۰/۷ سانتیمتر و قطر ۲۰/۷ سانتیمتر انتخاب شد. از داده‌های ثبت شده در بازه زمانی ۱۵۰ ساعته به عنوان مشاهده‌های آزمایشگاهی در مدل حل معکوس استفاده گردید و توابع هیدرولیکی خاک تخمین زده شد. مدل در دو بخش مجزا و با استفاده از داده‌های بار فشار و سپس داده‌های نفوذ تجمعی اجرا شد و نتایج با هم مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بار فشار در عمق ۴ سانتیمتری که در این مطالعه مورد توجه بود نمی‌تواند منجر به ارائه تخمین درستی از پارامترهای هیدرولیکی خاک شود. نتایج استفاده از نفوذ تجمعی نشان می‌دهد که این اطلاعات به صورت موفقیت آمیزی می‌توانند در حل و تخمین معکوس پارامترهای مورد نظر مفید باشند.

**کلید واژه‌ها:** تخمین پارامتر؛ توابع هیدرولیکی؛ حل معکوس؛ دیسک نفوذسنج

### مقدمه

اطلاع از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های غیراشباع مانند هدایت هیدرولیکی غیراشباع برای شبیه‌سازی جریان آب و مواد محلول در محیط متخلخل ضروری می‌باشد. مبنای کلیه روش‌های حل عددی برای شبیه‌سازی جریان و انتقال مواد محلول در محیط متخلخل معادله دیفرانسیلی ریچاردز می‌باشد (Raouf and Pilpayeh, 2011).

مدیریت بهینه منابع آب و خاک نیازمند مدل‌سازی ریاضی می‌باشد که قادر به شبیه‌سازی جریان و انتقال آلودگی باشد. این مدل‌ها به وضعیت فیزیکی و هندسه محیط، شرایط مرزی و خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله توابع هدایت هیدرولیکی و نگهداشت خاک وابسته می‌باشند (Jadoon et al., 2009).

پیش گرفت که از این خطا و مشکل ذکر شده دوری کرد (Erdal *et al.*, 2012).

اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی برای جریان غیراشباع به صورت مستقیم عموماً وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. در روش مستقیم اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری میزان نفوذ از سطح یک نمونه خاک در آزمایشگاه پس از پایدار شدن جریان انجام می‌گیرد. استفاده از روش‌های غیرمستقیم تخمین خواص هیدرولیکی محیط متخلخل جایگزینی مناسب برای روش‌های وقت‌گیر و پرهزینه مستقیم می‌باشد (Bnoui *et al.*, 2010).

یکی از روش‌های غیرمستقیم که مورد توجه محققین علم فیزیک خاک و جریان در محیط متخلخل قرار گرفته، روش حل معکوس تخمین پارامترهای مورد بحث می‌باشد. در این روش داده‌های حاصل از یک آزمایش غیرماندگار که "مشاهدات" نام دارند با روش حداقل مربعات بر اساس الگوریتم مارکورت بر داده‌های استخراج شده از مدل تشریح کننده پدیده مورد آزمایش بر هم منطبق شده و پارامترهای محیط متخلخل تخمین زده می‌شود (Prasad *et al.*, 2010).

تخمین پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل به روش حل معکوس بدین صورت است که با انتخاب یک تابع هدف که متشکل از خروجی‌های مدل حاکم بر جریان و مشاهدات اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و کمینه کردن آن به ازای پارامترهای مجهول در مدل یک سری مقادیر اولیه حدسی جایگزین گردیده و محاسبات با تغییر این پارامترها در جهت کمینه کردن تابع هدف ادامه می‌یابد تا جاییکه برآزش خروجی‌های مدل و مشاهدات قابل قبول باشد (Ritter *et al.*, 2004). بنابراین در مسائل معکوس، هدف پیدا کردن یک بردار بهینه  $p^*$  می‌باشد به گونه‌ای که تابع هدف  $g(p)$  را به نحوی کاهش دهد که در بهترین حالت،  $(v(p^*))$  محاسباتی  $= (v)$  مشاهداتی باشد (Dobre and Drobot, 2010).

جریان یک‌بعدی آب در محیط غیراشباع و اشباع خاک تحت شرایط هم‌دما را می‌توان با شکل اصلاح شده معادله ریچاردز بصورت زیر ارائه نمود (Kumar, 2002; Taheri and Ataie, 2009):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \varphi \right) \right] \quad (1)$$

که در معادله بالا،  $\theta$  میزان رطوبت خاک،  $t$  زمان،  $x$  طول،  $k$  هدایت هیدرولیکی و  $h$  میزان بار فشار می‌باشند. زاویه  $\varphi$  زاویه جهت جریان با جهت قائم می‌باشد.

تحلیل جریان در منطقه غیراشباع خاک بسیار پیچیده بوده و به دو تابع غیرخطی  $K(h)$  و  $\theta(h)$  که توابع غیرخطی رفتار هیدرولیکی خاک هستند بستگی دارد (Dobre and Drobot, 2010). در این مطالعه از مدل وان گنوختن برای بررسی توابع غیرخطی  $K(h)$  و  $\theta(h)$  استفاده شده است. توابع غیرخطی یاد شده به صورت زیر می‌باشند (Simunek and Nimmo, 2005):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < h_s \\ \theta_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e' \left[ 1 - (1 - S_e'^{1/m})^m \right]^2 \quad (3)$$

که در روابط بالا  $k_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع و  $h_s$  میزان مکش حد آستانه ورود هوا می‌باشند. در این مدل تحلیلی، توابع غیرخطی  $K(h)$  و  $\theta(h)$  را بوسیله پنج پارامتر هیدرولیکی  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ،  $K_s$ ،  $\alpha$  و  $n$  تعریف می‌کنند که  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده،  $\theta_s$  رطوبت اشباع،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $\alpha$  و  $n$  پارامترهای شکل می‌باشند.

تخمین پارامترهای موثر جریان در مدل محیط‌های غیراشباع مبتنی بر مشاهدات صورت گرفته در مقیاس کوچک‌تر از مقیاس واقعی مدل می‌باشد که این موجب ایجاد مشکلاتی در تخمین پارامترهای خاک‌های ناهمگن می‌شود. بنابراین باید سعی کرد مسیری را برای مطالعه در

فشار ثابت برابر ۱۴- سانتیمتر در مرز بالایی نمونه خاک بوسیله دیسک نفوذسنج تثبیت گردید.

شرایط مرزی در مرز پایین نمونه خاک نیز بصورت سطح نشتی در نظر گرفته شد به گونه‌ای که امکان تخلیه آزاد آب از انتهای ستون خاک فراهم شده و از طریق یک قیف به یک ظرف در زیر این سامانه منتقل شود. پس از اعمال شرایط تعریف شده بالا، شرایط اولیه خاک بدینگونه است که بار فشار برابر ۳۲/۵- سانتیمتر در عمق ۴ سانتیمتری از خاک، بار فشار ۲۵/۱- سانتیمتر در عمق ۱۰/۷ سانتیمتری از سطح خاک و بار فشار ۱۹/۸- سانتیمتر در عمق ۱۶/۷ سانتیمتری از سطح خاک به ثبت رسید.

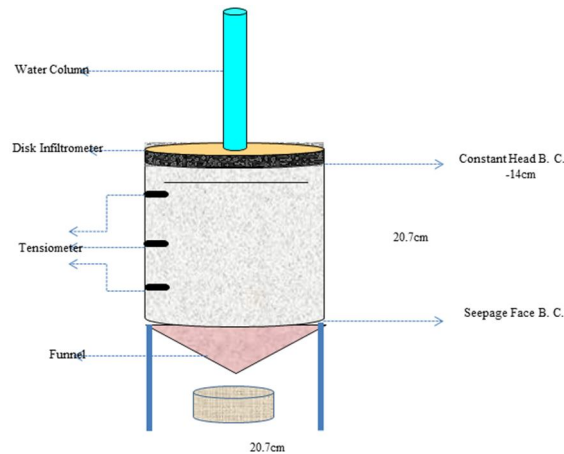
در شکل ۱ شمایی از سامانه طراحی شده و تجهیزات مورد نیاز برای این آزمایش نمایش داده شده است. پس از شروع نفوذ آب به درون نمونه از مرز بالایی آن، میزان نفوذ تجمعی به درون خاک و همچنین میزان بار فشار در سه عمق از نمونه خاک (۴، ۱۰/۷ و ۱۶/۷ سانتیمتری) بوسیله مکش‌سنج‌هایی که به دستگاه خودکار برداشت داده‌ها متصل بود ثبت گردید.

در این مطالعه، برداشت داده‌ها و تغییرات میزان بار فشار به همراه نفوذ تجمعی به مدت ۱۵۰ ساعت ادامه پیدا کرده و اطلاعات جمع‌آوری شده در این بازه زمانی جهت حل معکوس توابع هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۲ میزان نفوذ تجمعی از سطح خاک و بار فشار اندازه‌گیری شده در عمق ۴ سانتیمتری که بعنوان داده ورودی به مدل معکوس استفاده شد نمایش داده شده است.

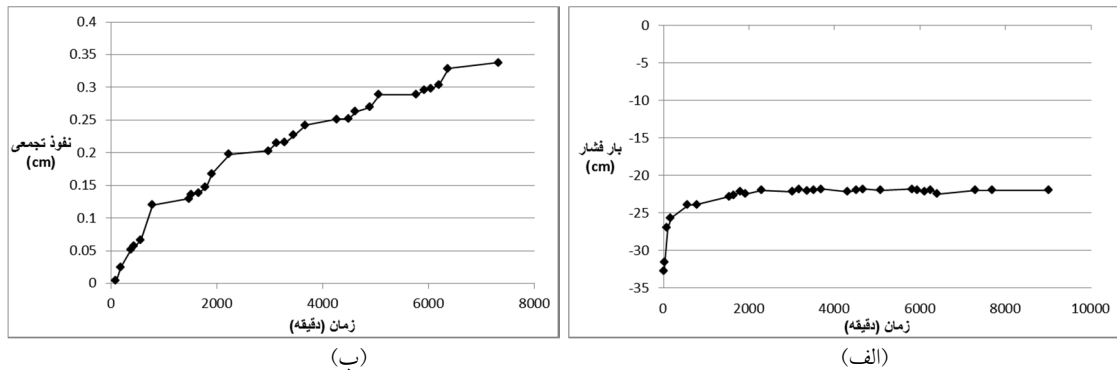
تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش‌های گوناگونی انجام می‌شود که از این بین می‌توان به مطالعات Samani و Fathi (2009)، Lassabatere و همکاران (2010)، Prasad و همکاران (2010)، Jadoon و همکاران (2009)، Mohammadzadeh-Habili و Heidarpour (2011)، Bnoui و همکاران (2010)، Erdal و همکاران (2012)، اشاره کرد. استفاده از آزمون نفوذ یکی از روش‌های تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد که به شکل‌های مختلف و در مطالعات گوناگون پیگیری شده است (Leong و همکاران (2011)، Simunek و همکاران (1999)، Simunek و Genuchtan (1996)، Ramos و همکاران (2006)، Kodesova و همکاران (2010)). در این مطالعه از داده‌های جمع‌آوری شده از آزمون نفوذ بوسیله دیسک نفوذ (بار فشار و نفوذ تجمعی از سطح نمونه خاک) برای تخمین و بهینه‌یابی پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از برنامه HYDRUS-2D به روش حل معکوس استفاده شد. این برنامه از الگوریتم بهینه‌یابی مارکورت-لونبرگ برای کمینه کردن تابع هدف استفاده می‌کند (Mallants et al., 2007).

#### مواد و روش‌ها

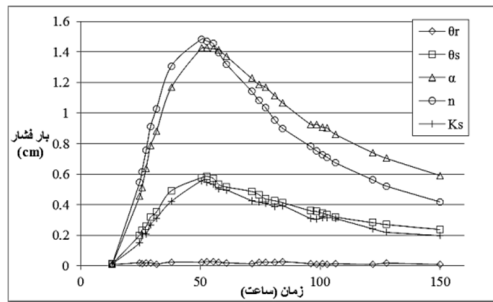
در این مطالعه مقداری خاک با دانه‌بندی مشخص (که رده خاک سیلتی لوم قرار داشت) تهیه شده و در یک ستون به طول ۲۰/۷ سانتیمتر و قطر ۲۰/۷ سانتیمتر ریخته شد. به منظور تعریف شرایط هیدرولیکی مشخص و مورد نظر در این ستون خاک، شرایط مرزی هیدرولیکی بار



شکل ۱. شمایی از سامانه طراحی شده برای انجام آزمایش



شکل ۲. الف) بار فشار اندازه‌گیری شده در عمق ۴ سانتی‌متری، ب) میزان نفوذ تجمعی از سطح خاک



شکل ۳. آنالیز حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک به داده‌های بار فشار در عمق ۴ سانتی‌متری

در این مطالعه پس از بررسی حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک به داده‌های بار فشار در عمق ۴ سانتی‌متری، پارامترهای محتوی رطوبتی باقیمانده در خاک ( $\theta_r$ ), (Residual soil water content), محتوی رطوبتی اشباع در خاک ( $\theta_s$ ), (Saturated soil water content), مقادیر تجربی در تابع خاک ( $\alpha$  و  $n$ ) و هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ), (Saturated hydraulic conductivity) که توصیف‌کننده خواص توابع هیدرولیکی آب و خاک

در این مطالعه به منظور تعیین امکان شناسایی بودن هر یک از پارامترهای هیدرولیکی خاک آنالیز حساسیت انجام گردید. در شکل ۳ نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای هیدرولیکی به داده‌های بار فشار نمایش داده شده است. همانطوریکه مشخص است، پارامترهای هیدرولیکی  $\theta_s$  و  $K_s$  دارای میزان حساسیت یکسان بوده و بطور خطی به یکدیگر وابسته‌اند. بنابراین، برای یگانگی جواب می‌توان یکی از این دو پارامترها را از فرآیند بهینه‌یابی حذف نمود. پارامتر  $\theta_r$  حداقل حساسیت را در بین پارامترها دارا می‌باشد. بنابراین توصیه می‌گردد که این پارامتر نیز بطور مستقیم اندازه‌گیری شده و از روند بهینه‌یابی حذف گردد. مزیت آزمایش صفحه نفوذسنج این است که پارامترهای شکل  $\alpha$  و  $n$  که غیر قابل اندازه‌گیری هستند، بیش‌ترین حساسیت را به بار فشار دارند و می‌توان آن‌ها را با اطمینان زیاد تخمین زد.

## نتایج و بحث

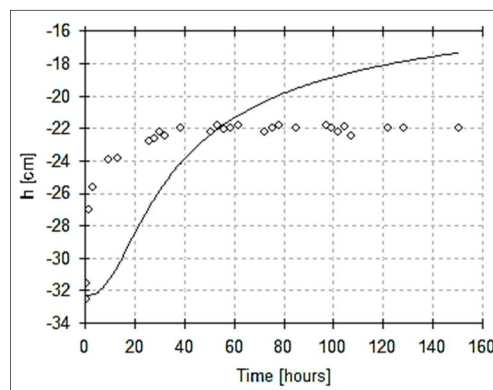
در مدل تهیه شده از سیستم مورد نظر در نرم‌افزار HYDRUS از داده‌ها بار فشار و نفوذ تجمعی به صورت مجزا استفاده گردید. در این مطالعه از مدل van Genuchten-Mualem برای ارزیابی هیدرودینامیکی محیط استفاده شد. علاوه بر این، فرض شد که هیچ‌گونه پسماند رطوبتی (Hysteresis) در محیط وجود ندارد و محیط متخلخل همگن و ایزوتروپ است. مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS تعیین و به مدل وارد شد. پس از تنظیمات صورت گرفته مدل اجرا شد و در هر بخش به تحلیل نتایج پرداخته شد. ابتدا از داده‌های بار فشار در عمق ۴ سانتیمتری برای حل معکوس مساله پیش روی استفاده شد که در شکل ۴ الف نتایج حاصل از برازش مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مدل نمایش داده شده است. در شکل ۵ نیز می‌توان تغییرات توابع هیدرولیکی خاک ( $K(h)$  و  $\theta(h)$ ) را مشاهده کرد. نتایج اجرای مدل با استفاده از داده‌های بار فشار نشان می‌دهد که تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از بار فشار ثبت شده در ۴ سانتی‌متری خاک نمی‌تواند منجر به تخمین دقیقی از پارامترهای آن شود. در جدول ۱ نتایج این بخش از مطالعه ارائه شده است.

می‌باشند، از طریق حل معکوس بدست آمدند. اگر چه ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع به آسانی قابل اندازه‌گیری است، لیکن در این تحقیق فرض شده که هیچ‌گونه اطلاعاتی از این پارامتر در دست نیست و میزان آن تخمین زده شده است تا بتوان نتایج تخمین را با نتایج اندازه‌گیری مقایسه نمود. بنابراین داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی از سطح خاک و بار فشار در عمق ۴ سانتیمتری در تابع هدف مورد استفاده قرار گرفته و مدل به بهینه کردن کلیه پارامترهای هیدرولیکی به عنوان پارامترهای مجهول اقدام کرد.

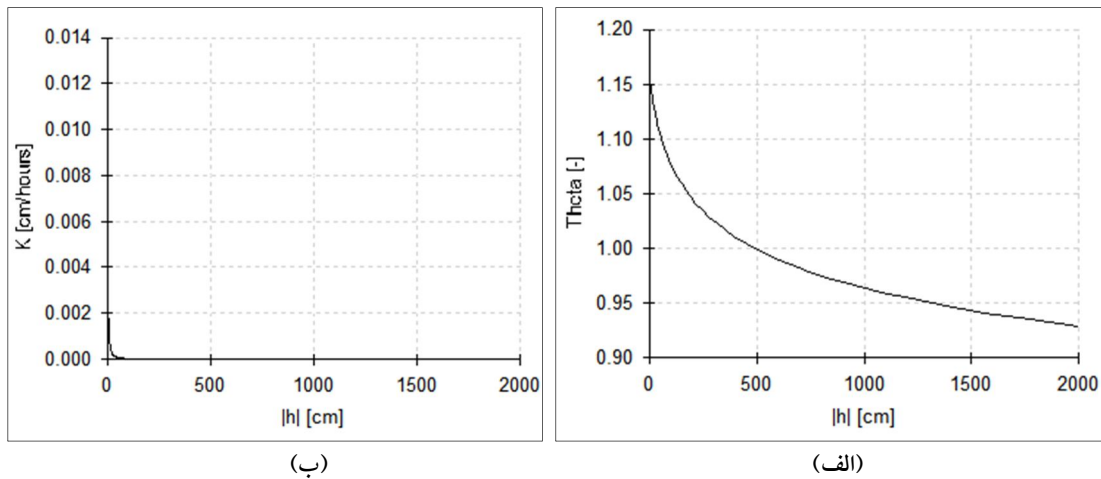
در این مطالعه از نرم‌افزار HYDRUS جهت تخمین معکوس پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد نظر استفاده شده است. این برنامه با کاهش جمع مربعات باقیمانده (sum of the squares of the residuals (SSQ)) به عنوان تابع هدف اقدام به بهینه کردن پارامترهای مورد نظر می‌کند:

$$SSQ = \sum_{i=1}^N (q_{p,i} - q_{o,i})^2 \quad (4)$$

که در آن،  $N$  تعداد نقاط کالیبراسیون (در این مطالعه از داده‌های بار فشار و نفوذ تجمعی استفاده شده است)،  $q_{p,i}$  برابر آمین مقدار پیش‌بینی شده و  $q_{o,i}$  برابر آمین مقدار مشاهداتی است. این برنامه از الگوریتم بهینه‌سازی مارکورت-لونبرگ برای کاهش تابع هدف (رابطه ۴) استفاده می‌کند.



شکل ۴. برازش مقادیر بار فشار مشاهداتی و محاسباتی مدل



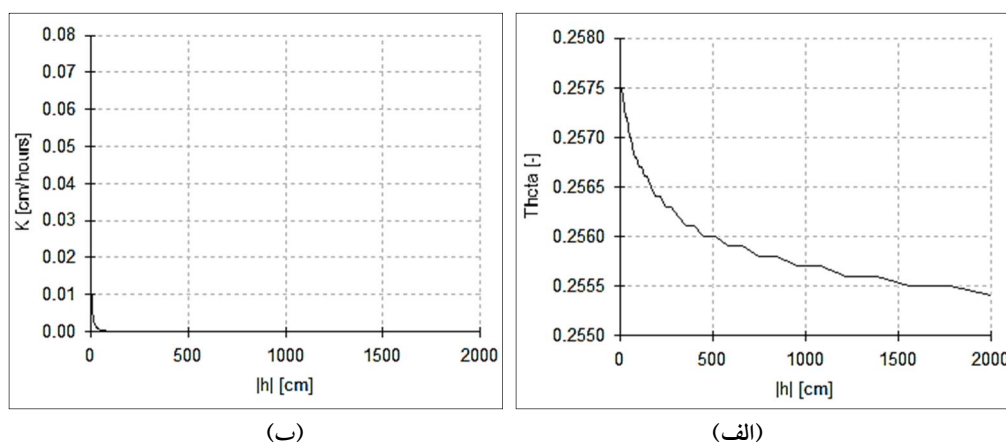
شکل ۵. توابع هیدرولیکی تعیین شده خاک مورد آزمون با استفاده از بار فشار. (الف)  $\theta(h)$ ، (ب)  $K(h)$

جدول ۱. نتایج تخمین پارامترهای خاک با استفاده از داده‌های بار فشار در عمق ۴ سانتیمتری

$R^2$	خطای بیان جرمی	تابع هدف	۹۵٪ حدود اطمینان		ضریب خطای استاندارد	مقدار اولیه	مقدار بهینه شده	پارامتر
			حد بالا	حد پایین				
			۰/۱۲۷۵	-۰/۱۲۳۴	۰/۰۶۱۳	۰/۰۰۰۵۳	۰/۰۶۷	$\theta_r$
			۱۵۱/۲۴	-۱۴۸/۹۳	۷۲/۵۴	۱/۱۵۷	۰/۴۵	$\theta_s$
۰/۵۵۸۰۶		۳۵۳/۱	۰/۵۷۲۷	-۰/۵۱۵۴	۰/۲۶۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲	$\alpha$
	۰/۱۹۶۵		۲/۸۶۲	-۰/۷۵۴۴	۰/۸۷۴	۱/۰۵	۱/۴۱	$n$
			۱۷/۰۲۵	-۱۶/۸۱	۸/۱۷۸	۰/۱۰۵	۰/۴۵	$K_s$

پیش‌بینی شده توسط مدل نشان می‌دهد که تخمین تمامی پارامترها با دقت ضعیف تا متوسطی صورت گرفته است. در مرحله بعدی از این مطالعه به استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی از سطح نمونه برای تخمین پارامترها و توابع هیدرولیکی خاک مورد آزمون مبادرت شد. در شکل ۶ نیز می‌توان نتایج مربوط به تخمین توابع هیدرولیکی خاک ( $\theta(h)$  و  $K(h)$ ) با استفاده از داده‌ها نفوذ تجمعی را مشاهده کرد. همانطوریکه از این تصاویر مشخص است تابع  $\theta(h)$  در فشار صفر و فشارهای بعدی دارای کاهش چشمگیر می‌باشد و این در حالیست که مقدار تابع  $K(h)$  افزایش چشمگیر (تقریباً ۱۰ برابر) نسبت به مورد قبلی (تعیین شده با استفاده از بار فشار) را نشان می‌دهد.

همان‌طوری که از نتایج به دست آمده از تخمین پارامتر صورت گرفته با استفاده از داده‌های بار فشار در جدول ۱ مشخص است، مقادیر تخمینی  $\alpha$  و  $n$  دارای بیش‌ترین نزدیکی به مقادیر اولیه و به نوعی واقعی خاک می‌باشد. این نتیجه پیش از این نیز با توجه به آنالیز حساسیت پارامترها نسبت به داده‌های بار فشار مورد تأکید قرار گرفت و انتظار می‌رفت با توجه به بیش‌ترین حساسیت این دو پارامتر، بیش‌ترین دقت را در تخمین این پارامترها مشاهده کرد. مقادیر ضریب استاندارد نیز به خوبی این نکته را نشان می‌دهد که تخمین‌های صورت گرفته برای این دو پارامتر دارای خطای محاسباتی بسیار کم بوده و می‌توان تنها تا حدودی به مقدار محاسباتی این دو پارامتر اعتماد کرد. مقدار  $R^2$  مقادیر بار فشار مشاهداتی به



شکل ۶. توابع هیدرولیکی تعیین شده خاک مورد آزمون با استفاده از نفوذ تجمعی. (الف)  $\theta(h)$ ، (ب)  $K(h)$

علاوه بر این باید به مقادیر تخمینی نیز اشاره کرد که به روشنی می‌توان بهبود این مقادیر را در مقایسه با مقادیر واقعی و اولیه مشاهده کرد. نرم‌افزار HYDRUS از حل پایدار معادله ریچاردز استفاده می‌کند و به همین دلیل به طور کلی خطای بیلان جرمی مقداری کوچک می‌باشد. مقادیر پایین خطای بیلان جرمی همراه با مقادیر پایین تابع هدف بوده و می‌تواند نشانی از طراحی مناسب مدل و بازه‌های زمانی در نظر گرفته شده برای اجرای مدل باشد.

در جدول ۲ نتایج مربوط به تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک سیلتی لوم مورد نظر ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در این جدول می‌توان عنوان کرد که تخمین پارامتر صورت گرفته با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی می‌تواند دقت بیشتری داشته باشد و مقادیری با خطای کمتر را در اختیار قرار دهد. در این بخش از مطالعه شاهد  $R^2$  تقریبی ۰/۹۳ و خطای بیلان جرمی ۰/۱۳٪ بودیم که این نشان از تخمین با دقت بالا می‌باشد.

جدول ۲. نتایج تخمین پارامترهای خاک با استفاده از نفوذ تجمعی از سطح نمونه

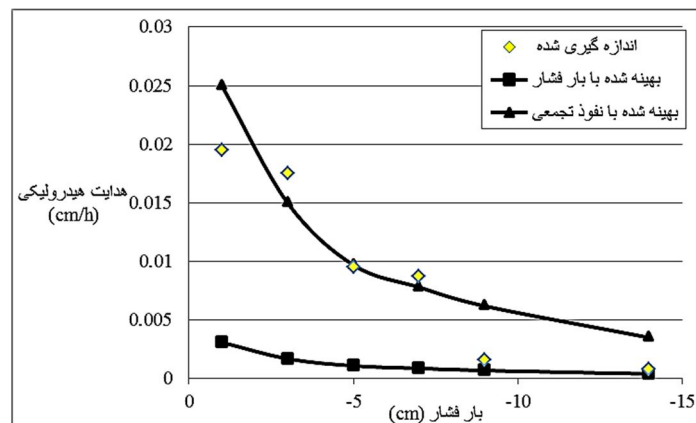
پارامتر	مقدار اولیه	مقدار بهینه شده	ضریب خطای استاندارد	۹۵٪ حدود اطمینان		خطای بیلان جرمی	تابع هدف	$R^2$
				حد بالا	حد پایین			
$\theta_r$	۰/۰۶۷	۰/۲۵۳۲	۰/۶۷۶۸۷	۱/۶۵۳۵	-۱/۱۴۷۱			
$\theta_s$	۰/۴۵	۰/۳۹۵۴	۳/۵۷۵	۱/۵۶۷۵	-۱/۱۳۵۳			
$\alpha$	۰/۰۲	۰/۰۲۴	۵/۵۳۶	۰/۸۶	-۰/۷۹	۰/۹۳۴۸۴	۰/۱۳۲۹	۱۱۰/۶
$n$	۱/۴۱	۱/۲۷۸	۱/۵۲	۲/۵۴	-۱/۱۸			
$K_s$	۰/۴۵	۰/۳۲۶	۱۶۰/۲۴	۱/۳۹	-۲/۱۴			

خاک اندازه‌گیری شد. این نقاط پس از برقراری جریان پایدار از دیسک نفوذسنج با بارهای فشار اعمال شده در سطح نمونه به اندازه‌های ۱۴-، ۹-، ۷-، ۵-، ۳- و ۱- سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در جدول ۳ مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی ضریب هدایت هیدرولیکی خاک مورد آزمون ارائه شده است.

در تعیین پارامترهای خاک می‌توان مهم‌ترین تابع تأثیرگذار بر رفتار هیدرولیکی خاک را تابع هدایت هیدرولیکی  $K(h)$  دانست. در این مطالعه به منظور مقایسه ضریب هدایت هیدرولیکی خاک مورد نظر با مقادیر تخمینی با استفاده از داده‌های بار فشار و نفوذ تجمعی، مقدار هدایت هیدرولیکی نمونه مورد آزمون به طور مجزا با روش مستقیم برای هشت نقطه از تابع هیدرولیکی

جدول ۳. مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده با روش مستقیم و تخمینی با استفاده از بار فشار و نفوذ تجمعی

بار فشار (cm)						
-۱	-۳	-۵	-۷	-۹	-۱۴	
۰/۰۱۹۵	۰/۰۱۷۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۰۸۳	هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده به روش مستقیم (cm/h)
۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۴۱	هدایت هیدرولیکی تخمینی با استفاده از بار فشار (cm/h)
۰/۰۲۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹۷	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۳۵	هدایت هیدرولیکی تخمینی با استفاده از نفوذ تجمعی (cm/h)

شکل ۷. تابع  $K(h)$  تخمینی بوسیله حل معکوس و مقایسه آن با مقدار اندازه‌گیری شده واقعی

می‌تواند منجر به ارائه تخمین‌های دقیقی از توابع هیدرولیکی شود. در مطالعه‌ای که Antonov و Mallants (۲۰۰۸) با استفاده از کد RETC انجام دادند مشخص شد که بهینه‌یابی پارامتر  $n$  در خاک‌های در نظر گرفته شده و در دو مقطع زمانی متفاوت منجر به ارائه نتایج نسبتاً مشابهی شده و این در حالیست که مقدار پارامتر  $\alpha$  مقادیر کاملاً متفاوتی ارائه داده و به کالیبراسیون بیشتری نیازمند می‌باشد. در مطالعه دیگری که توسط Leong و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد، نتایج نشان داد که استفاده از دیسک نفوذسنج و اطلاعات بدست آمده ناشی از مکش‌ها و محتوای رطوبتی ثبت شده در محیط HYDRUS می‌تواند نتایج قابل قبولی از پارامترهای هیدرولیکی را با بهره‌گیری از حل معکوس ارائه دهد.

در این مطالعه، نتایج اجرای مدل با استفاده از داده‌های بار فشار نشان می‌دهد که تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از بار فشار ثبت شده در ۴ سانتیمتری خاک نمی‌تواند منجر به تخمین قابل قبولی از پارامترهای آن شود. با توجه به آنالیز حساسیت

نتایج نشان می‌دهد که تخمین هدایت هیدرولیکی با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی از سطح نمونه خاک می‌تواند با دقت بسیار خوبی منجر به تعیین این ضریب شود. علاوه بر این باید خاطر نشان کرد که این تخمین‌ها در فشارهای مختلفی با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم مقایسه و مشخص گردید که به جز در بار فشار ۹- و تا حدودی ۱۴-، در سایر بارهای فشار مقدار بسیار نزدیکی را نشان می‌دهند. در همین رابطه، تخمین ضریب هدایت هیدرولیکی با استفاده از داده‌های بار فشار در عمق ۴ سانتیمتری خاک نمی‌تواند با مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده به روش مستقیم مشابهت زیادی داشته باشد. در شکل ۷ تخمین تابع  $K(h)$  بوسیله حل معکوس با استفاده از داده‌های بار فشار و نفوذ تجمعی و همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم نمایش داده شده است.

#### نتیجه‌گیری

بررسی نتایج مطالعاتی که در زمینه تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک‌های اشباع و غیراشباع انجام شده است نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های حل معکوس



از بار فشار) را نشان می‌دهد. البته باید متذکر شد که این افزایش مقدار در جهت نزدیک شدن به مقادیر واقعی صورت گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که تخمین هدایت هیدرولیکی با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی از سطح نمونه خاک می‌تواند با دقت بسیار خوبی منجر به تعیین این ضریب شود. علاوه بر این باید خاطر نشان کرد که این تخمین‌ها در فشارهای مختلفی با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش مستقیم مقایسه و مشخص گردید که به جز در بار فشار ۹- و تا حدودی ۱۴-، در سایر بارهای فشار مقدار بسیار نزدیکی را نشان می‌دهند. در همین رابطه، تخمین ضریب هدایت هیدرولیکی با استفاده از داده‌های بار فشار در عمق ۴ سانتیمتری خاک نمی‌تواند با مقادیر واقعی و اندازه‌گیری شده به روش مستقیم مشابهت زیادی داشته باشد.

پارامترها نسبت به داده‌های بار فشار، انتظار می‌رفت که مقادیر تخمینی  $\alpha$  و  $n$  که دارای بیش‌ترین حساسیت می‌باشند به میزان زیادی به مقادیر واقعی نزدیک باشد که نتایج بدست آمده نیز این موضوع را نشان می‌دهد. بیش‌ترین دقت تخمین مدل برای  $\alpha$  و  $n$  صورت گرفت. مقدار  $R^2$  مقادیر بار فشار مشاهداتی به پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که تخمین تمامی پارامترها با دقت ضعیف تا متوسطی صورت گرفته است.

نتایج اجرای مدل با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی نشان می‌دهد که میزان  $R^2$  مقادیر اولیه و محاسباتی بسیار بالا بوده و این نشان از دقت مناسب مدل در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد نظر می‌باشد. در این مورد و در مقایسه با اجرای مدل با استفاده از بار فشار، تابع  $\theta(h)$  در فشار صفر و فشارهای بعدی دارای کاهش چشمگیر می‌باشد و این در حالیست که مقدار تابع  $K(h)$  افزایش چشمگیر (تقریباً ۱۰ برابری) نسبت به مورد قبلی (تعیین شده با استفاده

#### فهرست منابع

- Antonov, D. and Mallants, D. 2008. Determination of soil hydraulic properties of potential low and intermediate level waste disposal sites in Bulgaria. External Report, CO-90-99-1220-05. 37pp.
- Bnoui, C., Sghaier, J., Sammouda, H., and Lehmann, F. 2010. Parameter Estimation of Soil Hydraulic Functions for Unsaturated Porous Media Using an Inverse Problem and Multistep Outflow Experiment. *Journal of Porous Media*, 8:691-706.
- Dobre, G. and Drobot, R. 2010. Estimating Soil Hydraulic Parameters Using a Metaheuristic Algorithm. *Scientific Bulletin. Series, Mathematical Modeling in Civil Engineering*, ISSN: 1841-5555.
- Erdal, D. Neuweiler, I. and Huisman, J.A. 2012. Estimating effective model parameters for heterogeneous unsaturated flow using error models for bias correction, *Water Resources Research.*, 48, W06530, doi:10.1029/2011WR011062.
- Jadoon, K.Z., Lambot, S., Verreken, H., and Slob, E. 2009. Parameter estimation for unsaturated soil hydraulic properties using full-waveform hydrogeophysical inversion of time-lapse GPR data. Society of Exploration Geophysicists. SEG Annual Meeting, 25-30 Oct, Houston, Texas, USA.
- Kodesova, R., Simunek, J., Nikodem, A., and Jirku, V. 2010. Estimation of the Dual-Permeability Model Parameters using Tension Disk Infiltrometer and Guelph Permeameter *Vadose Zone Journal*, 9:213-225.
- Kumar, C.P. 2002. Modelling of Unsaturated Flow, National Conference on Modern Trends in Water Resources Development and Environmental Management, Vellore Institute of Technology, 1-9.
- Lassabatere, L., Yilmaz, D., Angulo-Jaramillo, R., Miguel, S.U.J., Braud, I., and Simunek, J. 2010. Numerical evaluation of inverse modelling methods for 1D and 3D water infiltration experiments in homogeneous soils. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia.

- Leong, E.C., Nyunt, T.T., and Rahardjo, H. 2011. Inverse Analyses of Disk Infiltrometer Tests. *Unsaturated Soils: Theory and Practice*. Kasetsart University, Thailand, ISBN 978-616-7522-77-7.
- Mallants, D., Karastanev, D., Antonov, D., and Perko, J. 2007. Innovative in-situ determination of unsaturated hydraulic properties in deep loess sediments in north-west Bulgaria. *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental, Remediation and Radioactive Waste Management*. Bruges, ICEM2007-7202, 733-740.
- Mohammadzadeh-Habili, J., and Heidarpour, M. 2011. Estimating Soil Hydraulic Parameters by Using Green and Ampt Infiltration Equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10): 772-780.
- Prasad, K., Ojha C., Chandramouli, P., and Madramootoo, C. 2010. Estimation of Unsaturated Hydraulic Parameters from Infiltration and Internal Drainage Experiments. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(11):766-773.
- Ramos, T.B., Goncalves, M.C., Martins, J.C., van Genuchten, M.Th., and Pires, F.P. 2006. Estimation of Soil Hydraulic Properties from Numerical Inversion of Tension Disk Infiltrometer Data. *Vadose Zone Journal*, 5:684-696.
- Raouf, M., Pilpayeh, A. 2011. Estimating unsaturated soil hydraulic properties in sloping lands by numerical inversion. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 9 (3&4): 1067-1070.
- Ritter, A., Munoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Vanclouster, M., and Lambot, S. 2004. Analysis of alternative measurement strategies for the inverse optimization of the hydraulic properties of a volcanic soil. *Journal of Hydrology*, 295:124-139.
- Samani, J.M.V., and Fathi, P. 2009. Estimation of Unsaturated Soil Hydrodynamic Parameters Using Inverse Problem Technique. *Journal of Agriculture Sciences Technology*, 11:199-210.
- Simunek, J., and Nimmo, J. R. 2005. Estimating soil hydraulic parameters from transient flow experiments in a centrifuge using parameter optimization technique, *Water Resources Research*, 41, W04015, doi: 10.1029/2004WR003379.
- Simunek, J., and van Genuchten, M. Th. 1997. Estimating Unsaturated Soil Hydraulic Properties from Multiple Tension Disc Infiltrometer Data. *Soil Society of America*, 162:6.
- Simunek, J., and van Genuchten, M. Th. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*, 32.
- Simunek, J., Angulo-Jaramillo, R., Schaap, G. M., Vandervaere, J. P., and van Genuchten, M. Th. 1998. Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. *Geoderma*, 86: 61-81.
- Simunek, J., Wendroth, O., and van Genuchten, M.Th. 1999. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. *Water Resources Research*, 35(10):2965-2979.
- Taheri, S.H., and Ataie, B. 2009. Comparison of Finite Difference Schemes for Water Flow in Unsaturated Soils, *International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering*, 3:1.



## Inversely estimation of hydraulic parameters and functions of unsaturated soil using disk infiltrometer experiment data

Mohammad Nakhaei<sup>1</sup>, Vahab Amiri<sup>2\*</sup> and Meysam Vadiati<sup>3</sup>

1) Associated Professor of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran

2\*) Ph.D Student of Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran

Corresponding author email: [vahab.amiri@gmail.com](mailto:vahab.amiri@gmail.com)

3) Ph.D Student of Hydrogeology, Faculty of Sciences, Department of Geology, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 27-06-2014

Accepted: 03-05-2015

### Abstract

Analysis the flow in unsaturated soil is very complicated and is dependent on two nonlinear functions  $K(h)$  and  $\theta(h)$  which are the nonlinear functions of soil hydraulic behavior. There are various methods for estimation of soil hydraulic parameters which using the infiltration test is one of them. In this study, the collected data from disk infiltrometer experiment (pressure head and cumulative water infiltration) used for estimation and optimization of soil hydraulic parameters by applying HYDRUS-2D software. The estimations done by inverse solution and Van Genuchten-Mualem model used for hydrodynamic assessing of soil sample. In addition, it is assumed that there is no hysteresis in soil sample and porous media is completely homogenous and isotropic. The silt loom soil sample with 20.7 cm in length and diameter equal to 20.7 cm selected for this experiment. The recorded data in 150 hours used as experimental observations in inverse solution of problem and the soil hydraulic functions estimated. Model ran in two discrete part, using pressure head and cumulative infiltration respectively, and results were compared. Results show that using the pressure head in depth 4 cm cannot lead to precise estimation of soil hydraulic parameters. Using the cumulative infiltration show the successiveness of this part of experiment in inversely estimation of parameters.

**Keywords:** disk infiltrometer, hydraulic functions, invers solution, parameter estimation