



## برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های نفوذسنج استوانه‌های - مضاعف به روش حل معکوس

پریسا مشایخی<sup>۱</sup>، شجاع قربانی دشتکی<sup>۲</sup>، محمدرضا مصدقی<sup>۳</sup> و حسین شیرانی<sup>۴</sup>  
۱- دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، ۲- دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، ۳- دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، ۴- دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه ولی عصر رفسنجان

### چکیده

در پژوهش حاضر برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی غرقابی به دست آمده از استوانه‌های مضاعف، شرایط آزمایش نفوذ آب به خاک در محیط نرم افزار HYDRUS-2D/3D شبیه‌سازی و داده‌های نفوذ تجمعی به روش حل مستقیم استخراج شدند. سپس از این داده‌ها برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس استفاده شد. دو سناریو برای حل معکوس معادله جریان آب در خاک و برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک در نظر گرفته شد: (۱) استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی به تنهایی و (۲) استفاده از مقادیر گنجایش مزرعه (FC) و رطوبت پژمردگی (PWP) به همراه داده‌های نفوذ. سپس از چندین شاخص آماری مختلف برای تشخیص بهترین سناریو استفاده شد. نتایج نشان داد که با روش حل معکوس می‌توان پارامترهای هیدرولیکی خاک را با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی حاصل از استوانه‌های مضاعف برآورد کرد، اما استفاده از داده‌های FC و PWP باعث کاهش چشم‌گیر خطا در برآورد بهینه این پارامترها می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هیدرولیکی خاک، مدل‌سازی معکوس، نفوذ، HYDRUS

### مقدمه

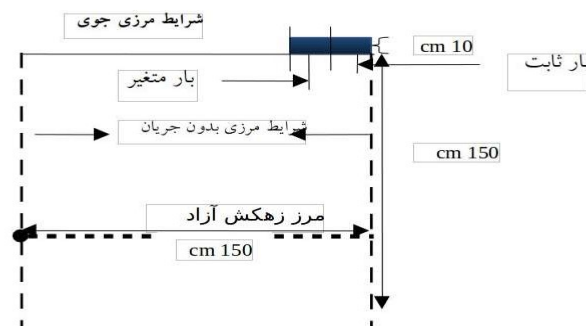
ویژگی‌های هیدرولیکی (منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی) از مهم‌ترین مشخصه‌های خاک می‌باشند. از جمله موارد استفاده از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک می‌توان به کاربرد در طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، مسائل هیدرولوژی، مسائل فیزیک خاک و موارد متعدد دیگر اشاره نمود. این ویژگی‌ها به کمک روش‌های مستقیم و غیرمستقیم متفاوتی قابل اندازه‌گیری یا تخمین هستند. انجام روش‌های مستقیم، هزینه‌بر و زمان‌بر بوده و نیازمند کار زیاد می‌باشد. افزون بر این، به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های زیادی برای توصیف دقیق آنها در شرایط مزرعه نیاز است (Schelle et al, ۲۰۱۲). بنابراین طی ۴۰ سال گذشته، روش‌های غیرمستقیم مختلفی برای برآورد این ویژگی‌ها ارائه شده است که یکی از آنها روش حل معکوس است. نتایج پژوهش‌ها، کارایی زیاد این روش را در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در آزمایش‌های مختلف جریان‌های ورودی و خروجی از ستون خاک، و در شرایط آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهند (Simunek et al, ۲۰۰۲). در این روش، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک از طریق حل عددی مکرر معادلات جریان گذرا، به صورت غیرمستقیم برآورد می‌شوند (Hopmans et al, ۲۰۰۲). مدل‌سازی معکوس، فرآیندی است که در آن به طور متوالی پارامترها به طریقی تعدیل و تنظیم می‌شوند که مدل با دقت مناسب و قابل قبولی قادر به تخمین پاسخ سیستم مورد بررسی در دوره زمانی مشخص باشد. مدل‌سازی معکوس معمولاً شامل تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از حل عددی مکرر معادله‌ی ریچاردز می‌باشد. معادله ریچاردز یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی برای توصیف پویایی آب در خاک در مدل‌سازی جریان اشباع و غیراشباع در محیط‌های متخلخل است که با توجه به ماهیت غیرخطی معادله، معمولاً نمی‌توان آن را به صورت تحلیلی حل نمود و باید با استفاده از روش‌های عددی حل شود (Tiago et al, ۲۰۰۶). نرم‌افزار هیدروس (HYDRUS) یک برنامه پیشرفته تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک بوده و قادر به برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و یا پارامترهای انتقال املاح به روش حل معکوس می‌باشد، که توسط Simunek et al (۱۹۹۹) در آزمایشگاه شوری خاک ایالات متحده بسط داده شده است. نرم‌افزار HYDRUS از جمله نرم‌افزارهای پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، املاح و گرما در خاک در حالت‌های یک، دو و سه بعدی می‌باشد. این برنامه به کاربر اجازه می‌دهد تا طیف گسترده‌ای از رژیم‌های آبیاری و شرایط مرزی مختلف را شبیه‌سازی کرده و پارامترهای مختلف هیدرولیکی و انتقال املاح را با دقت خوبی برآورد نماید (Roberts et al, ۲۰۰۹). این برنامه قادر به شبیه‌سازی جریان آب در شرایط اشباع و غیراشباع بوده و توانایی تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به روش معکوس را دارد. در این نرم‌افزار، معادله‌های حرکت آب در خاک (ریچاردز)، انتقال-انتشار املاح و انتقال گرما به کمک تکنیک‌های تفاضل و اجزای محدود خطی نوع کرنک-نیکلسون و گالرین حل شده و از روش لوبرگ-مارکواردت برای بهینه‌سازی پارامترها استفاده می‌کند (Simunek et al, ۱۹۹۹). این نرم‌افزار در بسیاری از پژوهش‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی برای بهینه‌سازی و برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن نسبتاً رضایت‌بخش بوده است (Simunek et al, ۲۰۰۷; Lai and Ren, ۲۰۱۰; Simunek et al, ۲۰۰۲).

پژوهش‌های متفاوتی که در مورد شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به کمک روش‌های حل معکوس انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از چندین مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده مانند پتانسیل ماتریک، میزان رطوبت خاک، نفوذ تجمعی و به جای یک مجموعه به تنهایی برای هم‌گرا شدن مدل‌سازی و کمینه‌شدن تابع هدف در روش‌های عددی معکوس، و نیز دستیابی به پارامترهای بهینه با ضرایب اطمینان زیاد، لازم است.

تاکنون پژوهش‌های متعددی برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از طریق داده‌های به دست آمده از نفوذسنج دیسکی (مکشی) (Tension/Disk infiltrometer) (Raof and Pilpayeh, ۲۰۱۱ و Simunek et al, ۱۹۹۸) و نفوذسنج مخروطی (Cone permeameter) (Kodesova, ۲۰۰۳؛ Vanclooster et al, ۲۰۰۷) به روش حل معکوس ارائه شده است. اما در رابطه با استفاده از داده‌های نفوذسنج‌های استوانه-مضاعف در تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک پژوهش‌های چندانی انجام نگرفته است. نفوذسنج‌های استوانه-مضاعف (Double ring infiltrometers) در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر، به عنوان یک ابزار استاندارد برای آزمایش‌های نفوذ آب به خاک و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع، استفاده شده است (Lai and Ren, ۲۰۱۰ و Iwanek, ۲۰۰۸). هم‌چنین در بسیاری از پژوهش‌های تفصیلی خاک‌شناسی صورت گرفته در بسیاری از مناطق کشور از نفوذسنج‌های استوانه-مضاعف برای اندازه‌گیری نفوذ آب و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک استفاده شده است. بنابراین در این پژوهش سعی بر آن است تا با استفاده از این اطلاعات و با به کارگیری روش حل معکوس، میزان کارایی استفاده از داده‌های به دست آمده از نفوذسنج‌های استوانه-مضاعف در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و تخمین بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد بررسی قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ابتدا شرایط انجام آزمایش نفوذ آب به خاک از طریق نفوذسنج استوانه‌های مضاعف در محیط مدل HYDRUS-2D/3D برای یک نمونه خاک فرضی با بافت لومی، پیاده‌سازی شد. شکل ۱ نشان‌دهنده شرایط مرزی تعریف شده در طراحی آزمایش نفوذ به کمک استوانه‌های مضاعف می‌باشد.



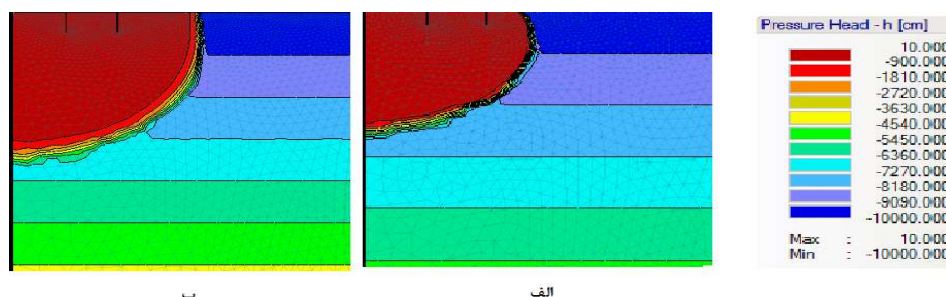
شکل ۱- ابعاد و شرایط مرزی تعریف شده برای شبیه‌سازی در مدل HYDRUS 2D/3D

در این شبیه‌سازی، مدل ون‌گنوختن-معلم با فرض  $m=1-1/n$  به عنوان مدل هیدرولیکی خاک برای حل مساله انتخاب شد. پارامترهای هیدرولیکی این خاک فرضی بر اساس توابع انتقالی کلاسی موجود در خود برنامه HYDRUS به صورت زیر تعریف شد: رطوبت باقی‌مانده  $(r) = 0.089 / (cm^3 - cm^3)^0$ ، رطوبت اشباع خاک  $(s) = 0.430 / (cm^3 - cm^3)^0$ ، پارامتر  $n = 1.0$ ، هدایت هیدرولیکی اشباع  $(Ks) = 0.001 / (cm \text{ min}^{-1})$  و  $\alpha = 0.5$ . ارتفاع سطح آب در داخل استوانه‌ها برابر ۱۰ سانتی‌متر و زمان نهایی نفوذ برابر ۳۰۰ دقیقه در نظر گرفته شد. برای دیواره استوانه‌ها شرایط بدون جریان و برای مرز پایینی (عمق خاک) زهکشی آزاد تعریف شد. هم‌چنین شرایط اولیه برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، بر اساس پتانسیل ماتریک تعریف شد. بدین ترتیب که با فرض خشک بودن خاک در سطح، پتانسیل ماتریک در سطح خاک برابر با ۱۰۰۰۰- سانتی‌متر در نظر گرفته شد که به صورت خطی با عمق تا مقدار ۴۰۰۰- در عمق ۱۵۰ کاهش یافت. در ادامه داده‌های نفوذ تجمعی با این شرایط مرزی و ابتدایی تعریف شده، به کمک حل عددی معکوس استفاده شدند. سپس از این داده‌ها برای برآورد مقادیر بهینه پارامترهای مدل ون‌گنوختن-معلم  $(r, s, Ks, n)$  به روش حل عددی معکوس استفاده شد. برای حل معکوس در مدل HYDRUS-2D/3D شرایط مرزی و ابتدایی و زمان نهایی نفوذ دقیقاً مانند قبل بود. برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک دو سناریو در نظر گرفته شد: ۱- استفاده از داده‌های نفوذ و ۲- استفاده از مقادیر گنجایش مزرعه (FC) و رطوبت پژمردگی (PWP) به همراه داده‌های نفوذ به عنوان ورودی مدل. در پایان از شاخص‌های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ )، خطای استاندارد (SE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، مجموع مربعات خطا (SSE)، شاخص آکائیکه (AIC) و شاخص آکائیکه تصحیح شده (AICc) برای تشخیص بهترین سناریو جهت تخمین بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده شد.



### نتایج و بحث

شکل ۱ نیمرخ پتانسیل ماتریک در حین نفوذ غرقابی (آزمایش استوانه‌های مضاعف) در زمان ۳۰۰ دقیقه (پایان آزمایش نفوذ) که توسط نرم‌افزار HYDRUS شبیه‌سازی شده است را در دو حالت: الف) با استفاده از داده‌های ورودی نفوذ تجمعی به همراه اطلاعات مربوط به FC و PWP و ب) داده‌های ورودی نفوذ تجمعی به تنهایی، نشان می‌دهد.



شکل ۱ - شبیه‌سازی نیمرخ پتانسیل ماتریک در حین نفوذ غرقابی آب به خاک در زمان ۳۰۰ دقیقه (پایان آزمایش نفوذ) در دو حالت: الف) با استفاده از داده‌های ورودی نفوذ تجمعی به همراه FC و PWP و ب) داده‌های ورودی نفوذ تجمعی به تنهایی توسط مدل HYDRUS

مقادیر بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی خاک ( $r, s, K_s, n$ ) برای دو سناریوی تعریف‌شده، در جدول ۱ ارائه شده است. دیده می‌شود که تفاوت قابل توجهی بین مقادیر بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی خاک در دو سناریو وجود دارد.

جدول ۱ - مقادیر اولیه و بهینه‌شده پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس در مدل HYDRUS

$K_s$	$n$	$s$	$r$	
۰۰۱/۰	۲۳/۱	۱/۰	۴۳/۰	مقادیر اولیه پارامترها
۰۱۶/۰ (۰۱۷/۰-۰۱۵/۰)	۷۲/۱ (۸۰/۱-) (۶۳/۱)	۰۲۸/۰ (۰۳۱/۰-۰۲۵/۰)	۴۱/۰ (۴۳/۰-) (۳۹/۰)	بهینه‌شده با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی
۰۱۷/۰ (۰۱۷۴/۰-) (۰۱۷۱/۰)	۴۸/۱ (۴۹/۱-) (۴۷/۱)	۰۲۵/۰ (۰۲۶/۰-۰۲۴/۰)	۳۹/۰ (۴۰/۰-) (۳۹/۰)	بهینه‌شده با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی + FC + PWP

\* فواصل اطمینان ۹۵%

در پایان برای تعیین بهترین سناریوی حل معکوس جهت برآورد بهینه پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن-معلم از شاخص‌های آماری مانند ضریب تبیین ( $R^2$ )، خطای استاندارد (SE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، مجموع مربعات خطا (SSE)، شاخص آکائیکه (AIC) و شاخص آکائیکه تصحیح‌شده (AICc) مربوط به داده‌های نفوذ تجمعی ورودی مورد استفاده و داده‌های نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده، استفاده شد. نتایج حاصل از این شاخص‌های آماری در جدول ۲ آمده است. بر اساس نتایج به دست آمده، شاخص آماری  $R^2$  شاخص مناسبی برای تشخیص بهترین سناریوی شبیه‌سازی حرکت آب در خاک جهت برآورد بهینه پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس نبوده است. اما استفاده از اطلاعات مربوط به نقاط FC و PWP به عنوان ورودی سبب کاهش میزان سایر شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش شد (جدول ۲).

جدول ۲ - شاخص‌های آماری مختلف برای تعیین بهترین سناریو در بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک

AICc	AIC	SSE	MSE	RMSE	$R^2$	
۸۵/۱۰۸	۲۳/۱۰۴	۰۶/۴۳۴۳	۹۲/۳۶۱	۹۸/۱۵	۹۹/۰	حل معکوس با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی
۲۴/۸۵	۶۳/۸۰	۲۲/۱۰۸۳	۲۷/۹۷	۹۸/۷	۹۹/۰	حل معکوس با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی + FC + PWP



سیمونک و ون گنوختن (۱۹۹۶) با هدف تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های نفوذسنج مکشی به این نتیجه رسیدند که استفاده از اطلاعات بیش‌تر مانند پتانسیل ماتریک و یا میزان رطوبت خاک در کنار داده‌های نفوذ جمععی برای برآورد بهینه پارامترها لازم است. تاثیر استفاده از اطلاعات بیش‌تر در کنار داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ در بهبود نتایج بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش‌های حل معکوس توسط پژوهش‌گران دیگری از جمله ریتز و همکاران (۲۰۰۴) نیز ارائه شده است.

بنابراین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های FC و PWP به همراه داده‌های نفوذ جمععی در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک به روش معکوس باعث می‌شود که پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن با دقت و ضریب اطمینان بیش‌تری برآورد شود.

#### منابع

- Hopmans, J.W., J. Simunek, N. Romano, and W. Durner. ۲۰۰۲. Simultaneous determination of water transmission and retention properties. Inverse Methods. IN: Methods of Soil Analysis. Part ۴. Physical Methods. (J.H. Dane and G.C. Topp, Eds.). Soil Science Society of America Book Series No. ۵. Pages ۹۶۳-۱۰۰۸
- Iwanek M. ۲۰۰۸. A method for measuring saturated hydraulic conductivity in anisotropic soils. Soil Science Society American Journal ۷۲: ۱۵۲۷-۱۵۳۱.
- Kodesova R. ۲۰۰۳. Determination of Hydraulic Properties of Unsaturated Soil via Inverse Modeling. Lecture given at the College on Soil Physics Trieste, ۳-۲۱ March ۲۰۰۳.
- Lai J., Luo Y. and Ren L. ۲۰۱۰. Buffer index effects on hydraulic conductivity measurements using numerical simulations of double-ring infiltration. Soil Science Society of America Journal, ۷۴: ۱۵۲۶-۱۵۳۶.
- Roberts T., Lazarovitch N., Warrick A. W. and Thompson T. L. ۲۰۰۹. Modeling salt accumulation with subsurface drip irrigation using HYDRUS-۲D. Soil Science Society of America Journal, ۷۳: ۲۳۳-۲۴۰.
- Raouf M. and Pilpayeh A. ۲۰۱۱. Estimating unsaturated soil hydraulic properties in sloping lands by numerical inversion. Journal of Food, Agriculture & Environment, ۹(۳&۴): ۱۰۶۷-۱۰۷۰.
- Ritter A., Hupet F., Carpena R. M., Lambot S. and Van Clooster M. ۲۰۰۳. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. Agricultural Water Management, ۵۹: ۷۷-۹۶.
- Schelle H., Iden S.C., Schli ter S., Vogel H. J. and Durner W. ۲۰۱۲. Identification of effective flow processes and properties from virtual soils using inverse modeling. Geophysical Research Abstracts ۱۴.
- im nek J. and van Genuchten M. Th. ۱۹۹۶. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. Water Resources Research, ۳۲(۹): ۲۶۸۳-۲۶۹۶.
- im nek J., Wang D., Shouse P. J. and van Genuchten M. Th. ۱۹۹۸. Analysis of a field tension disc infiltrometer experiment by parameter estimation. International Agrophysics, ۱۲: ۱۶۷-۱۸۰.
- im nek J., ejna M. and van Genuchten M. Th. ۱۹۹۹. HYDRUS-۲D software for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version ۲.۰. Int. Ground Water Model. Ctr., Colorado School of Mines, Golden.
- imunek J., Jacques D., Hopmans J. W., Inoue M., Flury M. and van Genuchten M. Th. ۲۰۰۲. Solute transport during variably-saturated flow-inverse methods. In: J.H. Dane and G. C. Topp (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part ۱, Physical Methods, Chapter ۶.۶, Third edition, Soil Science Society of America: Home, Madison, WI.
- im nek J., ejna M. and van Genuchten M. Th. ۲۰۰۷. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. User manual. Version ۱.۰. PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Tiago B., Ramos M. C., Goncalves J. C. M., Van Genuchten M. T. and Pires F. P. ۲۰۰۶. Estimation of soil hydraulic properties from numerical inversion of tension disk infiltrometer data. Vadose Zone J., ۵(۲): ۶۸۴-۶۹۶.
- Vanclooster M., Javaux M. and Lambot S. ۲۰۰۷. Recent advances in characterizing flow and transport in unsaturated soil at the core and field. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, ۳: ۱۹-۳۵



### Abstract

In this study, HYDRUS-2D/3D was used to simulate ponding water infiltration by double-ring infiltrometer for estimation of soil hydraulic parameters of van Genuchten function. The infiltration data were generated by direct method in HYDRUS-2D/3D and then were used for parameters optimization through inverse solution method. Two scenarios were considered for simulation of water movement in the soil via inverse modeling: ۱) Only using infiltration data, and ۲) Using infiltration data plus field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP) as input. Some statistical criteria were used to determine the best scenario. Results showed that soil hydraulic parameters can be estimated from double-ring infiltration data by inverse modeling, but including additional data (i.e. FC and PWP) significantly reduced the errors in estimating the soil hydraulic parameters.