

Estimation of Unsaturated Soil Hydraulic Properties Using Analytical and Inverse Methods Based on Disc Infiltrometer Measurements

SINA BESHARAT^{1*}, GISOO HASHEMPOUR², KAMRAN ZEINALZADEH³

1. Assistant Professor of Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia Lake Research Center, Urmia University, Urmia, Iran
2. Ms.c. Student of Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia Lake Research Center, Urmia University, Urmia, Iran

(Received: Nov. 20, 2017- Revised: May. 25, 2018- Accepted: Sep. 8, 2018)

ABSTRACT

Estimation and modeling of non-saturated hydraulic properties of the soil is an effective approach to accelerate and facilitate studies on the movement of water and salts in the soil. In this paper, an inverse solution estimation method was used to analyze the results obtained by disk infiltrometer tools. Also, Wooding analytical method and Hydrus-1D software were used to simulate infiltration values and hydraulic properties. In this regard, four lysimeters were used and infiltration experiments were carried out at suctions of 15, 6, 3 and 1 cm. Also, pressure data were recorded by four tensiometers installed in the lysimeters. Finally, the results of the inverse solution method were compared with the Wooding method. The results showed that the inverse solution method was generally in good agreement with the Wooding analysis method. The inverse solution method estimated the unsaturated hydraulic conductivity values close to Wooding method at low suctions, but the estimated values were greater 12% than the Wooding method with increasing suctions.

Keywords: Disc infiltrometer, Hydraulic conductivity, Hydrus, Richards equation, Wooding method..

*Corresponding author: s.beshrat@urmia.ac.ir

تخمین خصوصیات هیدرولیکی غیراشباع خاک با استفاده از روش‌های حل تحلیلی و معکوس مبتنی بر اندازه‌گیری‌های دستگاه نفوذسنج دیسک

سینا بشارت^{۱*}، گیسو هاشم پور^۲، کامران زینال زاده^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 ۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
 ۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
- (تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۳/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۶/۱۷)

چکیده

برآورد و مدل‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی غیراشباع خاک، راهکاری موثر در تسریع و سهولت پژوهش‌های مربوط به حرکت آب و املاح در خاک است. در این مطالعه، از روش برآورد حل معکوس برای آنالیز نتایج حاصل از کاربرد دستگاه نفوذسنج مکشی دیسک استفاده گردید. همچنین از روش تحلیلی وودینگ و نرم افزار Hydrus-1D در شبیه‌سازی مقادیر نفوذ و ویژگی‌های هیدرولیکی بهره گرفته شد. در این راستا با استفاده از چهار لایسمتر، آزمایش‌های نفوذ در مکش‌های ۱۵، ۶، ۳ و ۱ سانتیمتر انجام شد. داده‌های بارفشاری توسط چهار تانسومتر نصب شده در لایسمترها قرائت شد. در نهایت نتایج بدست آمده از روش حل معکوس با روش وودینگ مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش حل معکوس به طور کلی تطابق خوبی با روش تحلیلی وودینگ داشت. روش حل معکوس مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع را در مکش‌های پایین نزدیک به وودینگ برآورد نمود اما با بیشتر شدن مکش مقادیر برآوردی حل معکوس ۱۲ درصد بیشتر از روش وودینگ بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل ماتریک، روش وودینگ، معادله ریچاردز، هدایت هیدرولیکی غیراشباع، HYDRUS

مقدمه

روش‌های آزمایشگاهی هستند. به عنوان مثال باید گفت که داده‌های نگهداشت آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیراشباع از پارامترهای بسیاری تاثیر می‌پذیرند (Gupta et al., 2006). در حال حاضر روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی زیادی برای تعیین این توابع غیرخطی وجود دارد. از طرفی اکثر روش‌ها برای محاسبه روش‌های تحلیلی به فهم شرایط مختلف استاتیکی و دینامیکی نیاز دارند که باعث افزایش اندازه‌گیری‌های میدانی می‌گردد (Simunek et al., 1999).

مدل‌سازی معکوس معمولاً شامل تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از حل عددی مکرر معادله ریچاردز است که یک معادله دیفرانسیل مشتق جزئی درجه دو غیرخطی برای توصیف پویایی آب در خاک در مدل‌سازی جریان اشباع و غیراشباع آب است که با توجه به ماهیت غیر خطی معادله، معمولاً نمی‌توان آن را به صورت تحلیلی حل نمود و باید با استفاده از روش‌های عددی حل شود (Mashayekhi et al., 2017).

روش مدل‌سازی معکوس یک روش ریاضی برای تعیین پارامترهای مشخص بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی است (Simunek et al., 1999). در سال‌های اخیر کاربرد دیسک

هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک، از مهمترین ویژگی‌های هیدرولیکی تاثیرگذار بر رفتار آب در خاک است (Mohanty et al., 1994). این پارامتر در طرح‌های آب و خاک، طراحی شبکه-های آبیاری و زهکشی، مطالعه جریان در سفره‌های آب زیرزمینی، جریان آب در سدهای خاکی و همچنین در آبشویی به منظور نمک‌زدایی و دفع مواد آلوده کننده از خاک کاربرد دارد. اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع بسیار مشکل‌تر از اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع است چون مقدار هدایت هیدرولیکی (K) به میزان رطوبت خاک بستگی دارد و نیز برای توصیف مناسب و کامل تابع هدایت هیدرولیکی، باید شیب هیدرولیکی در محدود مورد نظر تعیین شود (Mohanty et al., 1994). اکثر اندازه‌گیری‌های گزارش شده برای خاک‌های غیر اشباع، در آزمایشگاه انجام شده است (Iwata et al., 1995)؛ زیرا اندازه‌گیری‌های صحرایی بدلیل تغییرپذیری خاک در مزرعه و تعداد متغیرهایی که باید اندازه‌گیری شوند بسیار مشکل‌تر از

* نویسنده مسئول: s.besharat@urmia.ac.ir

(2000) منحنی‌های نگهداشت و توابع هیدرولیکی بدست آمده از روش حل معکوس را با روش‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. همانند اکثر تحقیقات قبلی همخوانی بالایی بین داده‌های مدل و اندازه‌گیری شده مشاهده گردید. در پژوهشی Ventrella *et al.* (2005) چهار آزمایش نفوذ را در ردیف‌های کشت سورگوم در ایتالیا انجام دادند. در این بررسی، در هر محل چهار مکش متوالی افزایشی بدون جابجایی دیسک اعمال کردند. آنها سه نمونه خاک را از نزدیکی محل قرارگیری دیسک، قبل و بعد از آزمایش برای تعیین رطوبت اولیه و نهایی برداشت نمودند و در نهایت تجزیه تحلیل وودینگ و روش حل معکوس را بر روی داده‌ها انجام دادند؛ بر اساس نتایج بدست آمده، مقادیر هدایت هیدرولیکی بدست آمده از روش وودینگ و حل معکوس بسیار به هم نزدیک بودند. در پژوهش دیگری منحنی مشخصه با پسماند رطوبتی به روش حل معکوس و مدل‌های اسکات و معلم در دو خاک مختلف تخمین زده شد. در این تحقیق اثر هیستریسیس در دو نوع خاک مقایسه گردید و با استفاده از واسنجی ضرایب مدل اسکات و معلم نتایج و خروجی مدل‌ها بهبود یافت (Abbasi, 2013). همچنین Nakhaei and Simunek (2014) توابع هدایت هیدرولیکی و مشخصات دمایی خاک را با روش حل معکوس برآورد نمودند. Latorre *et al.* (2015) در روش جدیدی بر پایه روابط Haverkamp *et al.* (1994) و با استفاده از دستگاه نفوذسنج دیسک، هدایت هیدرولیکی و ضریب جذب را با تقریب خوبی بدست آوردند.

با توجه به اهمیت تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک تحقیقات فراوانی در این زمینه انجام گرفته است. در این راستا استفاده از روش‌های جدید مانند دستگاه نفوذسنج دیسک در تحقیقات مد نظر می‌باشد. با وجود مقالات متعدد در این زمینه مشاهده شد که استفاده از روش حل معکوس بر اساس اندازه-گیری‌های پتانسیل خاک انجام نگرفته است. این تحقیق با هدف مقایسه ویژگی‌های هیدرولیکی برآورد شده خاک با استفاده از روش حل معکوس در برابر نتایج حاصل از روش تحلیلی وودینگ انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌های نفوذ، چهار لایسیمتر با ارتفاع ۵۰ سانتیمتر و قطر ۱۵ سانتیمتر در نظر گرفته شد. این لایسیمترها در محل مناسب در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه قرار گرفتند. خاک مورد استفاده از مزرعه به آزمایشگاه منتقل شد. سپس با استفاده از الک چهار

مکشی، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است (Latorre *et al.*, 2013؛ Dohnal *et al.*, 2010؛ Meshgi and Chui, 2012). استفاده از نفوذسنج دیسک یک تکنیک منحصر بفرد است، که قادر به مشخص کردن ظرفیت نفوذ بوسیله اندازه‌گیری سرعت-های نفوذ در مکش‌های مختلف است. در این روش، علاوه بر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، می‌توان پخشیدگی خاک، طول منافذ ماکروسکوپی و پارامتر l که نشان‌دهنده اندازه منافذ است را بدست آورد. همچنین از جمله مزایای استفاده از دیسک مکشی قیمت نسبتاً پایین این ابزار، حداقل بهم خوردگی در خاک و قابلیت تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها نسبت به سایر روش-های سابق است (Simunek and Van Genuchten, 1996).

آنالیزهای مرسوم داده‌های نفوذ دیسک مکشی بر پایه حل تحلیلی وودینگ^۱ است. آنالیز وودینگ به سرعت‌های نفوذ حالت پایدار در مکش‌های متفاوت نیاز دارد (Wooding, 1968). بسته به بافت خاک رسیدن به حالت پایدار در یک آزمایش میدانی می‌تواند ساعت‌ها و یا حتی روزها طول بکشد. پژوهش‌های پیشین نشان داده است، اگر نفوذ به حالت پایدار نرسیده باشد روش وودینگ هدایت هیدرولیکی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید (Simunek *et al.*, 1999). با این وجود در اکثر پژوهش‌ها فرض می‌شود که در عرض یک ساعت سرعت نفوذ به سرعت‌های حالت پایدار رسیده و در تجزیه تحلیل وودینگ استفاده می‌شود. خطاهای ممکن معمولاً نسبت به اثرات ناهمگنی خاک قابل اغماض است. Simunek and van Genuchten (1996) استفاده از روش مدل‌سازی معکوس را به عنوان جایگزین روش وودینگ، برای تعیین غیرمستقیم ویژگی-های هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های دیسک مکشی مطرح کردند. در این روش، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک غیراشباع از داده‌های نفوذ تجمعی بوسیله حل عددی معکوس معادله ریچاردز برآورد می‌شوند. روش حل معکوس براساس مینیمم‌سازی یک تابع هدف است. برآوردهای اولیه از پارامترهای هیدرولیکی مکرراً در روند مینیمم‌سازی بهبود می‌یابند، تا زمانیکه دقت موردنظر بدست آید (Prasad *et al.*, 2010). در پژوهش دیگری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از مدل‌سازی معکوس برآورد شدند و با روش‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند. در این تحقیق نتایج مدل‌سازی معکوس با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مطابقت بالایی نشان داد (Ramos *et al.*, 2006). همچنین Farkas *et al.*

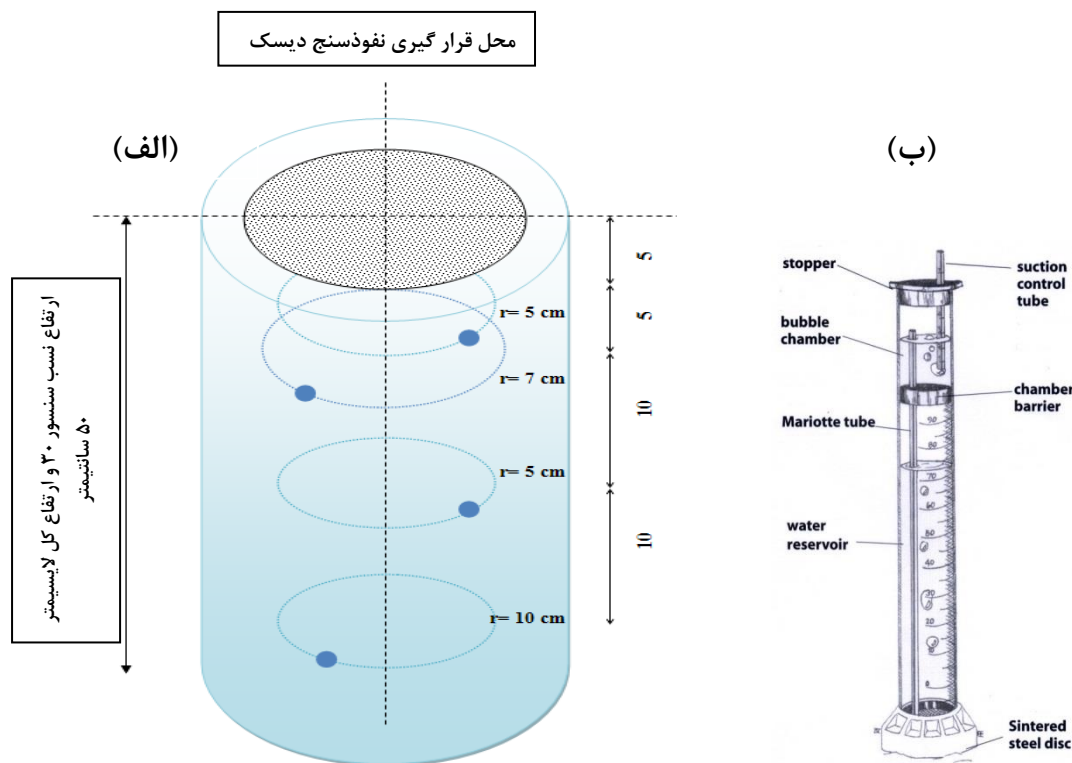
1. Wooding

یافت که سه یا چهار فاصله زمانی متوالی و مساوی، میزان افت سطح آب در واحد زمان برابر شود و یا به عبارت دیگر افت سطح آب، به مدت ۱۰ دقیقه در فواصل زمانی ثابت یکسان باشد. هر آزمایش بین ۶۰ تا ۱۱۰ دقیقه به طول انجامید. در طول انجام آزمایش نفوذ، داده‌های مکش از تانسیومترها هر ۱۰ دقیقه یکبار قرائت و ثبت شدند. پس از پایان آزمایش نفوذ در هر لایسیمتر، دو ساعت بعد نیز داده‌های مکش قرائت شد. آزمایش‌ها چهار مرتبه تکرار گردید.

پس از انجام آزمایش‌های نفوذ، نمونه‌برداری از لایسیمترها تا عمق ۳۰ سانتی‌متری انجام شد. سه نمونه دست-خورده برای تعیین بافت خاک از عمق‌های ۱۵-۰، ۳۰-۱۵ و ۴۵-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. استفاده از نمونه‌های عمق‌های مختلف به علت بالا بردن دقت و کنترل ایجاد شده در طول آزمایش‌ها بود. نمونه‌های تهیه شده به آزمایشگاه انتقال داده شد و برای خشک کردن به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوا قرار گرفت. سپس با استفاده از روش هیدرومتری و الک استاندارد، مقادیر شن، رس و سیلت هر یک از نمونه‌ها بدست آمد (Abbasi, 2013). با توجه به داده‌های اندازه‌گیری‌شده، نوع خاک مورد آزمایش، خاک رسی با نفوذپذیری پایین بدست آمد.

میلی‌متری خاک را الک کرده و به دقت بسیار و لایه به لایه درون لایسیمترها ریخته شد. دو ماه به نمونه‌ها زمان داده شد تا خاک درون آنها حالت طبیعی از لحاظ تراکم و چگالی به خود بگیرند. در این تحقیق از جدیدترین تانسیومترهای دیجیتالی مدل (Watermark) استفاده شد. این مدل تانسیومتر دارای چندین سنسور نقطه‌ای است. سنسورها به طور افقی در عمق-های مختلف و در فواصل مختلف نسبت به مرکز نفوذسنج نصب شدند. چهار تانسیومتر در نقاط مختصات (r, z) : (۵، ۵)، (۷، ۱۵)، (۵، ۲۰) و (۵، ۳۰) قرار داده شد. r نشان دهنده فاصله از محور تقارن و z ارتفاع از سطح خاک است.

در این پژوهش برای اندازه‌گیری شدت نفوذ از دستگاه دیسک نفوذ مکشی (Mini disc infiltrometer) استفاده شد. قطر دیسک مورد استفاده ۹۰ میلی‌متر بود. در هر لایسیمتر، یک آزمایش نفوذ با چهار مکش متوالی افزایشی ۱۵، ۶، ۳ و ۱ سانتی‌متر بدون جابجایی دیسک انجام شد (شکل ۱). افت سطح آب در لوله مکش دستگاه نفوذسنج دیسک در هر ۳۰ ثانیه ثبت گردید. سرعت نفوذ در ابتدای آزمایش بالا است و با گذشت زمان کاهش می‌یابد تا به مقدار ثابت می‌رسد. زمانیکه سرعت نفوذ به مدت ۱۵ دقیقه ثابت ماند، حالت جریان در این وضعیت پایدار در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری هر مکش تا زمانی ادامه



شکل ۱. شکل لایسیمتر با ارتفاع ۵۰ و قطر ۱۵ سانتی‌متر و محل قرارگیری تانسیومترهای دیجیتالی (الف) و شکل نفوذسنج دیسک استفاده شده در سطح لایسیمتر (ب)

روش وودینگ:

به علت جریان سه بعدی آب از دیسک، یک فرمول خاص نیاز است تا نفوذ جانبی آب را مورد توجه قرار دهد. آنالیز داده‌های بدست آمده از نفوذسنج مکشی معمولاً بر اساس معادله جبری wooding (1968) برای نفوذ به خاک از یک منبع دایره‌ای در شرایط سه بعدی، مرز نامحدود و جریان پایدار و یکنواخت صورت می‌گیرد.

$$Q_{\psi} = \pi r^2 K(\psi) + 4r\phi_{\psi} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، Q_{ψ} سرعت نفوذ حجمی جریان پایدار برای یک مکش معین مثلاً ψ ، شعاع صفحه متخلخل گرد (دیسک)، $K(\psi)$ هدایت هیدرولیکی در ψ ، پتانسیل جریان ماتریکس که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi_{\psi} = \int_{\psi_i}^{\psi} K(\psi) d\psi \quad (\text{رابطه ۶})$$

ψ_i : مکش اولیه در خاک است. همچنین Logsdon and Janes (1993) راه حل جبری معادله (۵) را به شکل رابطه‌ی فشار-هدایت هیدرولیکی گاردنر به کار بردند.

$$K(\Psi) = K_{fs} \exp(\alpha \Psi) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در رابطه ۷، اگر $\Psi \geq 0$ باشد خواهیم داشت $K(\Psi) = K_{fs}$ ، α : برای هر خاک معین مقدار ثابت فرض می‌شود.

جهت واسنجی و تایید مدل از معادله‌های آماری مختلفی استفاده شد. این معادله‌ها در مراحل حل معکوس و تعیین دقیق ضرایب معادله‌ها به کار گرفته شد. روابط مربوط به پارامترهای ME (حداکثر خطا)، RMSE (ریشه مجذور میانگین خطا)، CD (ضریب تعیین)، EF (کارایی مدل)، CRM (ضریب تجمعی باقیمانده) در زیر ارائه شده است:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i| \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N-1}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

حل عددی

در تجزیه و تحلیل داده‌های دیسک مکشی، از حل عددی معادله ریچاردز همراه با روش حداقل‌سازی غیرخطی Levenberg-Marquard استفاده شد (Marquard, 1963). معادله حاکم برای جریان دارسی به صورت شعاعی در یک محیط متخلخل همگن توسط معادله اصلاح‌شده ریچاردز به صورت رابطه ۱، مورد استفاده قرار گرفت.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rK \frac{\partial h}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial r} (K \frac{\partial h}{\partial z}) - \frac{\partial K}{\partial z} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در رابطه ۱، θ رطوبت حجمی، h بارفشاری، K هدایت هیدرولیکی، r مختصات شعاعی، z مختصات عمودی مثبت رو به پایین و t زمان می‌باشد.

رابطه (۱) تحت شرایط مرزی و اولیه مشخصی $h(r,z,t)=h(z)$ $t=0$ and $h(r,z,t)=h_0(z)$ $z=0$ با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D حل شد (Simunek et al., 1999). در این مطالعه برای حل عددی معادله ریچاردز از تابع هدایت هیدرولیکی خاک غیراشباع ون‌گونوختن- معلم استفاده شد (رابطه ۲).

$$K(\theta) = K_s S_e^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2 \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + \alpha |h|^n)^{-m} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این معادله، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع [LT-1]، m و n ضرایب تجربی، θ درصد رطوبت خاک (m^3/m^3)، θ_s درصد رطوبت اشباع خاک (m^3/m^3)، θ_r درصد رطوبت باقیمانده خاک (m^3/m^3) می‌باشند.

روند حل معکوس مسئله:

تابع هدف ϕ در طول روند برآورد پارامترها، بر مبنای داده‌های نفوذ تجمعی، رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR و یا داده‌های تانسیموتر به حداقل می‌رسد. تابع هدف به صورت زیر تعریف شده است:

$$\phi(\beta, q_m) = \sum_{j=1}^m \{v_j \sum_{i=1}^{n_j} w_{ij} [q_j^*(t_i) - q_j(t_i, \beta)]^2\} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن m نشان دهنده مجموعه‌های مختلف اندازه‌گیری (داده نفوذ، مکش و رطوبت)، n_j تعداد اندازه‌گیری‌ها در یک مجموعه، $q_j^*(t_i)$ اندازه‌گیری خاص در زمان t_i برای i امین مجموعه اندازه‌گیری، β بردار پارامترهای بهینه‌سازی (مانند: $\theta_r, \theta_s, \alpha, n, k_s, l$)، $q_j(t_i, \beta)$ تخمین‌های مدل مربوطه برای یک مجموعه خاص اندازه‌گیری j یا اندازه‌گیری i در مجموعه j می‌باشند.

دستگاه نفوذسنج دیسک قابلیت تنظیم مکش‌های مختلف را دارد. پارامترهای برازشی α و K_s ، طبق روش Logsdon and Janes (1993)، با رگرسیون غیرخطی و با استفاده از سرعت‌های نفوذپذیری در مقابل پتانسیل‌های ماتریک، بدست آمدند. هدایت‌های هیدرولیکی اشباع برآورد شده در چهار آزمایش، در جدول (۱) نشان داده شده است. هدایت‌های هیدرولیکی اشباع بدست آمده از چهار آزمایش مختلف، نزدیک به هم هستند. بیشترین هدایت هیدرولیکی اشباع مربوط به آزمایش اول و کمترین مقدار مربوط به آزمایش سوم است. عدد α گاردنر، که با رگرسیون غیرخطی بدست آمده، در جدول (۱) قابل مشاهده است. با توجه به اینکه بافت و ساختمان خاک در هر چهار لایسیمتر یکسان است و همچنین لایسیمترها فاقد پوشش گیاهی هستند، مقادیر α برآورد شده در چهار آزمایش نزدیک به هم بودند. در آزمایش سوم α کمتر از بقیه آزمایش‌ها است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار α مربوط به آزمایش دوم است. مقایسه نتایج دو روش وودینگ و حل معکوس در چهار آزمایش نشان‌دهنده بیش‌برآوردی روش وودینگ نسبت به روش حل معکوس در تعیین میزان α و K_s است.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

در روابط بالا P_i و O_i به ترتیب مقادیر برآورد شده از روش حل معکوس و مقادیر مشاهداتی و \bar{O} میانگین داده‌های مشاهداتی و N تعداد داده‌های مشاهداتی است.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک بر اساس اندازه‌گیری‌های دستگاه نفوذسنج دیسک و تانسیموتر ارائه می‌گردد. پس از بهینه کردن تخمین پارامترها، توابع هدایت هیدرولیکی و نگهداشت بدست‌آمده با نتایج روش وودینگ مورد مقایسه قرار گرفتند.

آنالیز وودینگ

داده‌های آزمایشی ابتدا با استفاده از حل تحلیلی وودینگ آنالیز شدند (معادله ۷). برای حل معادله وودینگ به سرعت نفوذ در حالت پایدار در مکش‌های متفاوت نیاز است. در این بررسی، آزمایش‌های نفوذ با چهار تکرار انجام شد. تنها تفاوت در لایسیمترها، در مقدار مکش اولیه در ابتدای آزمایش‌ها بود که

جدول ۱. مقایسه مقادیر بهینه‌شده (حل معکوس) و اندازه‌گیری‌شده (وودینگ) α و K_s در آزمایش‌های انجام‌شده

آزمایش اول		آزمایش دوم		آزمایش سوم		آزمایش چهارم	
وودینگ	معکوس	وودینگ	معکوس	وودینگ	معکوس	وودینگ	معکوس
۰/۲۰۱	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۱۵۴	۰/۱۹۹	۰/۱۶۸	۰/۲۰۵	۰/۱۷۵
۰/۱۵۸	۰/۱۷۸	۰/۱۴۷	۰/۱۶۹	۰/۱۳۹۸	۰/۱۸۵	۰/۱۵۱	۰/۱۷۶۸

روش حل معکوس

برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک

داده‌های برآوردشده به روش حل معکوس، با استفاده از ترکیب کد عددی HYDRUS-1D با روش مینیمم‌سازی غیرخطی Levenberg-Marquardt تجزیه تحلیل شدند. به عنوان شرایط مرزی بالا، از مکش اعمال شده توسط نفوذسنج دیسک مکشی استفاده شد. از آنجا که از ابتدای نفوذ تا ۲ ساعت پس از پایان آن، مکش قرائت شده توسط تانسیموتر انتهایی تغییر نکرد، برای شرایط مرزی پایین از گزینه بار فشاری ثابت استفاده گردید. در طول فرآیند بهینه‌سازی پدیده پسماند خاک در نظر گرفته نشد. مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بدست آمده از روش وودینگ در چهار آزمایش انجام‌شده، در جدول (۲) آورده شده است. هدف نهایی در تعریف تابع هدف برای حل معکوس این

است که بتوان با استفاده از حداقل اطلاعات ممکن مشخصات هیدرولیکی خاک را برآورد کرد. بر این اساس سناریوهای مختلف با تاکید بر ورودی‌های متفاوت تقسیم‌بندی شد تا در نهایت بتوان سناریوی برتر را مشخص نمود. داده‌های اندازه‌گیری‌شده با سناریوها و با تعریف‌های متفاوت تابع هدف تجزیه و تحلیل شدند. در سناریوی اول، داده‌های مکش و نفوذ تجمعی مورد استفاده قرار گرفت. در این سناریو با استفاده از روش حل معکوس، پارامترهای α ، θ_s ، K_s و n بهینه شدند. در سناریوی دوم، علاوه بر پارامترهای α ، θ_s ، K_s و n ، پارامتر l نیز بهینه شد. در این سناریو از داده‌های اندازه‌گیری‌شده مکش و نفوذ استفاده شد. در سناریوی سوم، فقط داده‌های اندازه‌گیری‌شده مکش در تعریف تابع هدف گنجانده شدند. در نهایت در سناریوی آخر، تنها از داده‌های اندازه‌گیری‌شده نفوذ تجمعی با

می‌دارد و پارامترهای هیدرولیکی خاک با این سناریو بهینه می‌شوند. همچنین با مقایسه نتایج جدول (۳)، همچنین هر دو آزمایش در سناریوی سوم از ضریب تعیین (R^2) پایین‌تری نسبت به سایر سناریوها برخوردارند. با این حال باید در نظر داشت که تابع هدف سناریو سوم در مقایسه با سناریو اول با پارامترهای ورودی کمتری قادر به برآورد قابل قبولی از پارامترها است.

جدول ۲. هدایت هیدرولیکی غیر اشباع بدست آمده از روش وودینگ

هدایت هیدرولیکی غیر اشباع (cm.min^{-1})				
آزمایش	$h = -1 \text{ cm}$	$h = -3$	$h = -6 \text{ cm}$	$h = -15 \text{ cm}$
۱	۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۸۶	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۰۷۷
۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۰۶۳
۳	۰/۰۱۱۵	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۰۷۱
۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۶۹۸
میانگین	۰/۰۱۲۱	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۷۰۲

نفوذسنج مکشی دیسک برای حل روش معکوس استفاده شد. هر چهار سناریو برای داده‌های لایسیمترها توسط نرم افزار HYDRUS-1D به اجرا در آمدند. نتایج بدست آمده با گزینه‌های مختلف بهینه‌سازی برای آزمایش اول و چهارم، در جدول (۳) خلاصه شده است. در این جدول، Φ_i ، Φ_{ii} سهم باقیمانده‌های بین مقادیر اندازه‌گیری شده و بهینه‌سازی شده نفوذ تجمعی و بار فشاری، در کل تابع هدف می‌باشند. بهترین برازش برای هر مجموعه اندازه‌گیری خاص (مانند داده‌های نفوذ تجمعی یا داده‌های مکش) و بهترین برازش کلی با بالاترین مقدار R^2 و کمترین مقدار تابع هدف Φ مشخص شده است.

با توجه به نتایج جدول (۲) هدایت هیدرولیکی حاصل از روش وودینگ در آزمایش اول، در تمام مکش‌ها، بیشتر از سایر آزمایش‌ها است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۳) در سناریوی دوم مقدار تابع هدف، کمترین و مقدار R^2 بیشترین است. بنابراین این سناریو بهترین تعریف از تابع هدف را بیان

جدول ۳. خلاصه‌ای از نتایج برآورد پارامترها با گزینه‌های مختلف بهینه‌سازی برای آزمایش اول و چهارم

تابع هدف	$\Phi(i, h; \theta_s, \alpha, K_s, n)$		$\Phi(i, h; \theta_s, \alpha, K_s, n, \ell)$		$\Phi(h; \theta_s, \alpha, K_s, n)$		$\Phi(i, h; \theta_s, \alpha, K_s, n)$	
سناریو	سناریوی اول		سناریوی دوم		سناریوی سوم		سناریوی چهارم	
آزمایش	اول	چهارم	اول	چهارم	اول	چهارم	اول	چهارم
Φ	۰/۵۴۲	۰/۵۵۰	۰/۵۱۵ ^a	۰/۵۲۴ ^a	۰/۱۶۷	۰/۱۶۶	۰/۵۵۱	۰/۵۶۹
$\Phi_i^*(-)$	۰/۳۷۲	۰/۳۷۴	۰/۳۵۶ ^a	۰/۳۶۰ ^a	.....	.....	۰/۵۵۱	۰/۵۶۹
$\Phi_h^*(-)$	۰/۱۶۹۹	۰/۱۷۵	۰/۱۵۹ ^a	۰/۱۶۸ ^a	۰/۱۶۸	۰/۱۶۶	.....	.....
$\theta_r (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
$\theta_s (\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$	۰/۳۳۴	۰/۳۵۶	۰/۳۷۵	۰/۳۴۵	۰/۳۲۳	۰/۳۶۱	۰/۳۲۸	۰/۳۵۳
$\alpha (1/\text{cm})$	۰/۱۴۱	۰/۱۶۵	۰/۱۶	۰/۱۷۵	۰/۰۷۲	۰/۰۸۵	۰/۱۳۳	۰/۱۵۲
n	۲/۰۳۱	۲/۲۴۵	۱/۸۹	۱/۸۵	۲/۱۲	۲/۱۹۸	۲/۴۴	۲/۴۵
$K_s (\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۲۶	۰/۰۰۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۴
ℓ	۰/۵ ^b	۰/۵ ^b	۱/۷۲	۱/۶۸	۰/۵ ^b	۰/۵ ^b	۰/۵ ^b	۰/۵ ^b
R^2	۰/۹۶۵	۰/۹۵۸	۰/۹۶۶	۰/۹۶۷	۰/۸۸۲	۰/۸۸۶	۰/۹۰۰	۰/۹۰۴۸

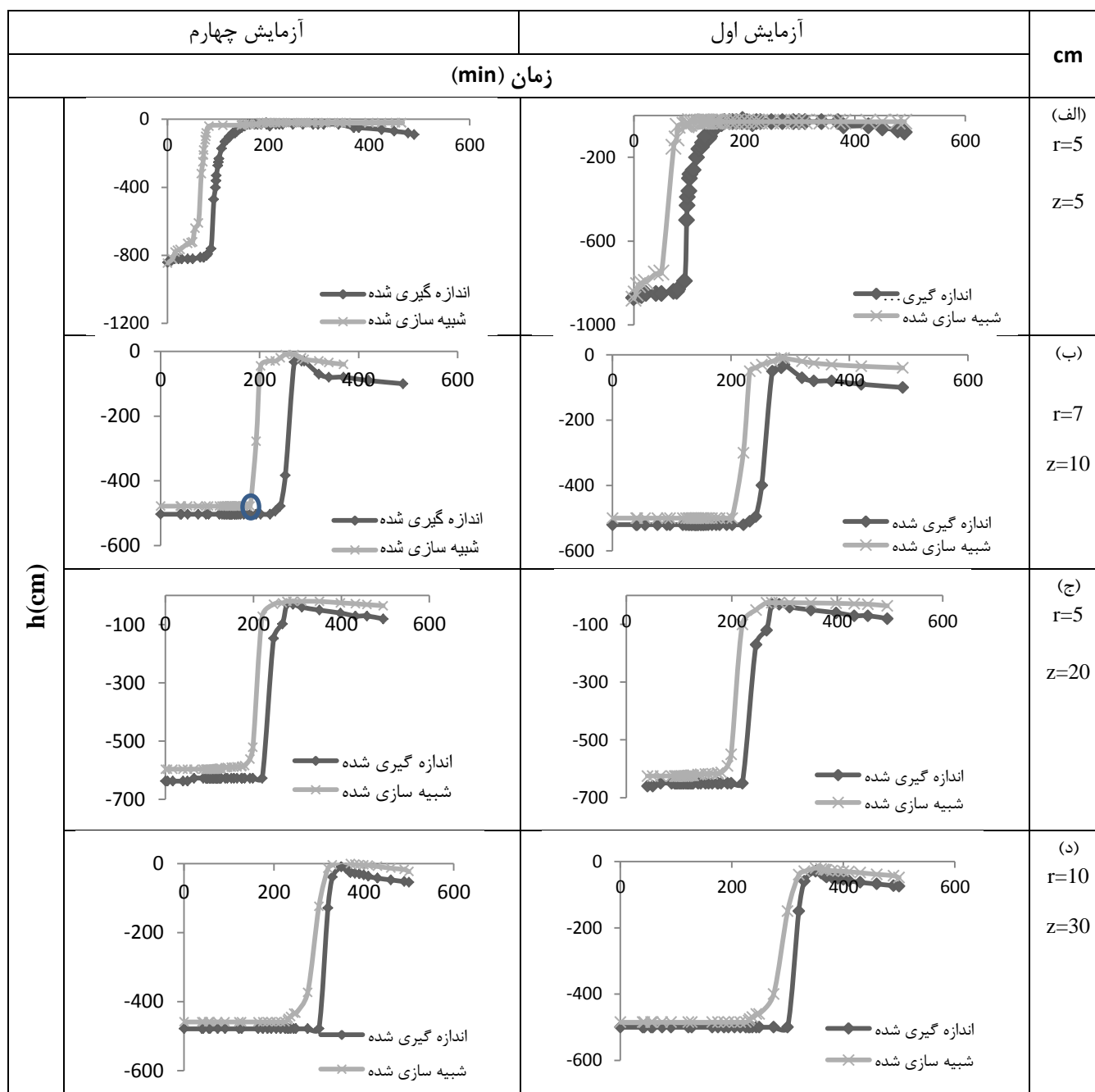
a: بهترین برازش برای هر مجموعه اندازه‌گیری و بهترین برازش کلی با بیشترین مقدار R^2 و کمترین مقدار تابع هدف مشخص شده است.

b: نشان‌دهنده پارامتری که در حل معکوس ثابت گرفته شده و بهینه نشده است.

سریع‌تر افت می‌نماید و خاک سریع‌تر رطوبت خود را از دست می‌دهد. با توجه به اینکه این تانسیمتر نزدیک‌ترین محل به منبع نفوذ آب (دیسک) است، مشاهده می‌شود که مدت زمان بیشتری خاک در محدوده اشباع می‌باشد. همچنین، نمودار فقط در حدود ۹۰ دقیقه مکش اولیه خود را حفظ می‌نماید و سریع رطوبت خاک به محدوده اشباع می‌رسد. در این مختصات، خاک زودتر از پایان آزمایش نفوذ به حالت اشباع دست می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند، نزدیکی به دیسک باشد. شکل (ب) مقادیر مکش را در مختصات (۷ و ۱۰) نشان می‌دهد.

برآورد بار فشاری

شکل (۲) مکش‌های اندازه‌گیری شده با تانسیمترها را با مکش‌های برآورد شده توسط روش حل معکوس برای آزمایش اول در چهار محل در زیر دیسک مقایسه می‌کند. شکل (الف) پیشروی جبهه رطوبتی را در ۵ سانتی‌متری زیر دیسک نشان می‌دهد. در این مختصات ارتفاعی، تانسیمتر در محدوده شعاع دیسک قرار داده شده است. در این مختصات جبهه رطوبتی بدست آمده از روش حل معکوس سریع‌تر به حالت اشباع می‌رسد. پس از اتمام آزمایش نفوذ، نمودار مربوط به مکش‌های اندازه‌گیری شده



شکل ۲. مکش‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده در ۴ محل در زیر دیسک نفوذسنج (برای نمونه در آزمایش اول و چهارم)

دقیقه خاک به محدوده اشباع می‌رسد. روش حل معکوس نیز تقریباً در همین زمان به حالت اشباع رسیده است. با این تفاوت که در روش حل معکوس رطوبت با سرعت کمتری افزایش یافته است. همچنین به دلیل دور بودن از منبع نفوذ، خاک مدت زمان کمتری در محدوده اشباع باقی مانده و رطوبت را از دست داده است. شکل (د) نشان دهنده مکش در مختصات (۳۰ و ۱۰) است. از آنجا که این تانسومتر از لحاظ مختصات شعاعی و هم مختصات ارتفاعی از منبع نفوذ (دیسک) دور بود، تقریباً در انتهای آزمایش نفوذ به حالت اشباع رسیده و پس از آن به سرعت رطوبت خود را از دست داده است. نمودارهای مکش

در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری زیر دیسک، تانسومتر در خارج از محدوده شعاع دیسک قرار گرفته است. در این مختصات، دو نمودار با هم و در زمان‌های تقریباً یکسان به رطوبت حالت اشباع دست یافتند. اما روش حل معکوس در این ارتفاع، مقادیر مکش را نسبت به قرائت‌های تانسومتر کمتر برآورد کرد. از آنجا که این تانسومتر خارج از محدوده شعاع دیسک قرار داشت، خاک مدت زمان کمتری در حالت اشباع باقی ماند. قسمت (ج) شکل (۲)، مقادیر مکش‌های قرائت شده و برآورد شده را در مختصات (۲۰ و ۵) نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تانسومتر در ۱۰ سانتی‌متری زیر دیسک قرار دارد، پس از گذشت ۳۰۰

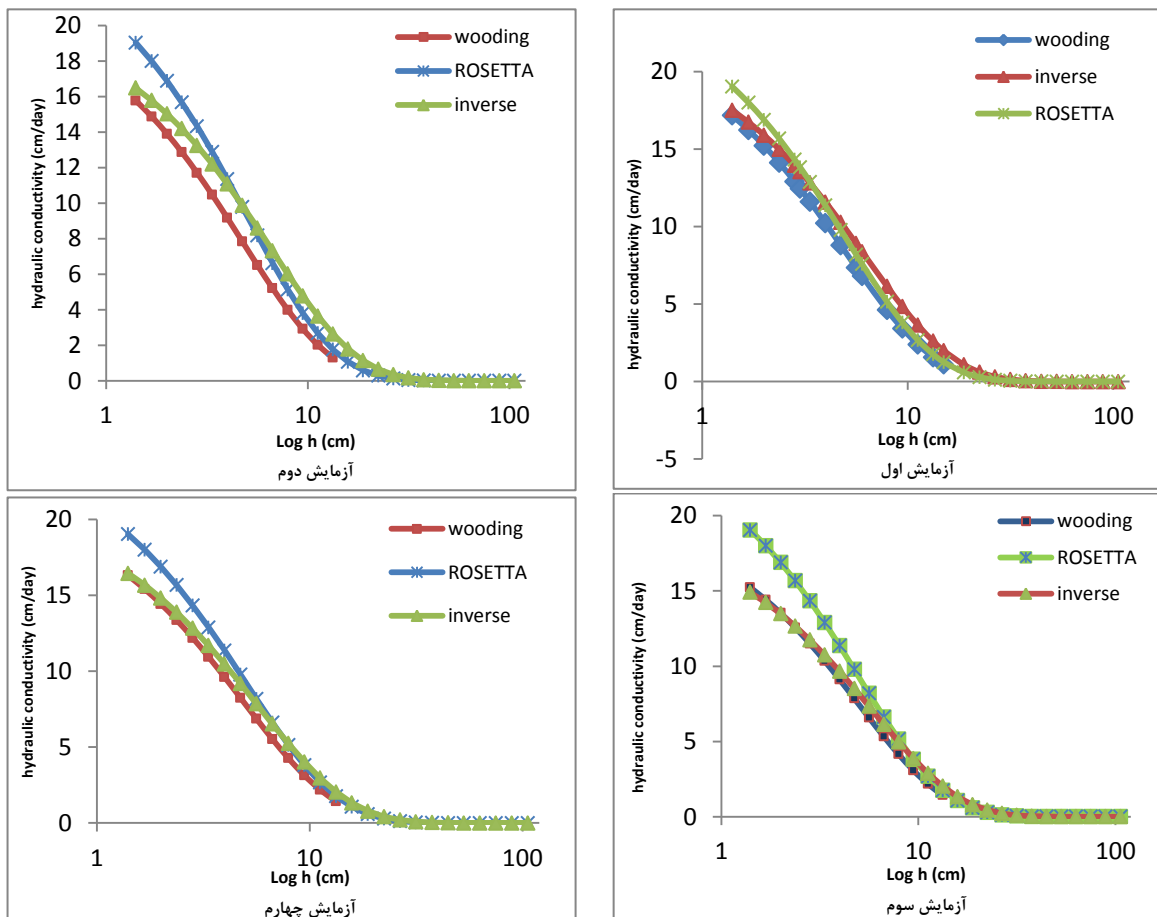
نرم افزار ROSETTA و با استفاده از ویژگی‌های بافت خاک، چگالی ظاهری و رطوبت ظرفیت زراعی، نمودار هدایت هیدرولیکی برآورد شد (شکل ۳). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مکش‌های بالا، برآوردهای روش حل معکوس بسیار نزدیک به برآوردهای نرم‌افزار ROSETTA است و با مرطوب شدن خاک و کاهش مکش خاک، این فاصله بیشتر شده است.

در مکش‌های پایین، روش حل معکوس مقادیر هدایت هیدرولیکی را نزدیک به روش وودینگ برآورد می‌کند. با بیشتر شدن مکش مقادیر برآوردی حل معکوس بیشتر از روش وودینگ شده است. این در حالی است که تا مکش چهار سانتی-متر، نرم‌افزار ROSETTA هدایت هیدرولیکی را بیشتر از روش معکوس برآورد کرده است و بعد از این مکش برآوردهای حل معکوس بیشتر شده است.

بدست‌آمده از قرائت‌های تانسیمتر و برآوردهای روش حل معکوس در این مطالعه، بسیار نزدیک به نتایج مطالعات *et al. Simunek (1999)* است. *Abbasi (2013)* از روشی متفاوت برای مرطوب کردن خاک استفاده کردند. با این وجود نمودار مکش-های قرائت‌شده و شبیه‌سازی‌شده آنها قابل مقایسه با نمودارهای این پژوهش می‌باشند.

برآورد تابع هدایت هیدرولیکی خاک

در شکل (۳) تابع هدایت هیدرولیکی برای آزمایش اول تا چهارم با روش‌های مختلف برآورد و رسم شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های نفوذسنج دیسک و روش تحلیلی وودینگ، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و α بکار برده شده در معادله گاردنر (۷) بدست آمد و نمودار هدایت هیدرولیکی غیراشباع رسم شد. هدایت هیدرولیکی غیراشباع با نرم‌افزار HYDRUS-1D به روش حل معکوس برآورد و نمودار آن رسم شد. همچنین با کمک



شکل ۳. توابع هدایت هیدرولیکی برآوردشده با روش حل معکوس و تابع ون گنوختن-معلم (Rosetta) و روش وودینگ برای آزمایش‌های اول تا چهارم

روش حل معکوس و روش تحلیلی وودینگ، برآوردهای نزدیکی از هدایت هیدرولیکی غیراشباع بدست می‌آورد. *Ventrella et al., (2005)* تابع هدایت هیدرولیکی را هم از

Simunek et al. (1999) نیز نمودار تابع هدایت هیدرولیکی را با روش‌های مختلف آزمایشگاهی و مدل حل معکوس برآورد کردند. آنها نیز به این نتیجه دست یافتند که،

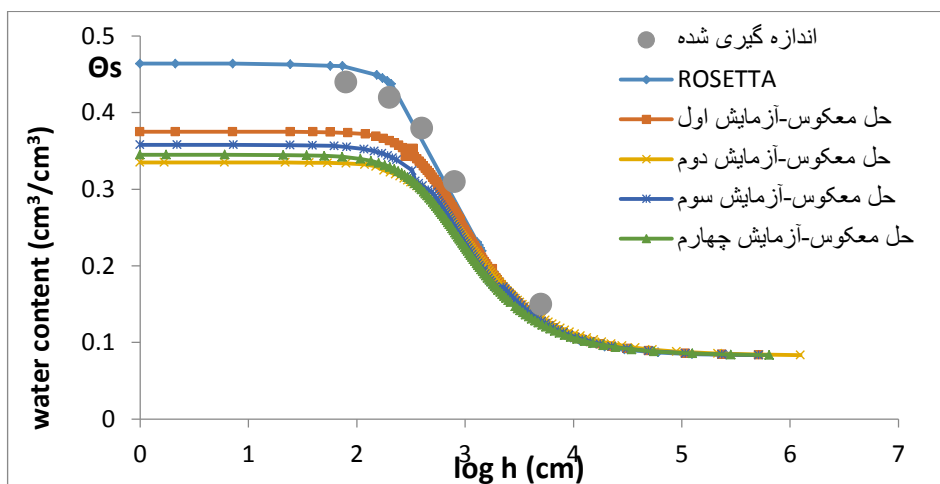
نسبت به دو روش دیگر دارد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، رطوبت اندازه‌گیری شده در نقطه ظرفیت زراعی بسیار نزدیک به مقدار برآورد شده آن با نرم‌افزار ROSETTA است. مقادیر شبیه-سازی شده رطوبت نقطه زراعی به روش حل معکوس، در چهار آزمایش بسیار نزدیک به هم هستند. همچنین این مقادیر تفاوت نسبتاً قابل‌قبولی با مقدار اندازه‌گیری شده رطوبت ظرفیت زراعی دارند. مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده در این نقطه ۴۰/۱۵٪ است. مقدار بهینه‌شده رطوبت ظرفیت زراعی در چهار آزمایش در محدوده ۳۱/۸٪ تا ۳۳/۸٪ متغیر است که این مقادیر نزدیک به مقدار اندازه‌گیری شده است.

با مقایسه منحنی‌های نگهداشت (Ramos et al. 2006) و منحنی‌های نگهداشت این مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار ROSETTA نسبت به روش حل معکوس برآورد دقیق-تری از رطوبت بدست می‌آورد. Ramos et al. (2006) برای تعریف تابع هدف خود تنها از داده‌های مکش و رطوبت اولیه و نهایی استفاده کرده‌اند. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که برای برآورد منحنی نگهداشت آب خاک، روش حل معکوس در صورتی قابل اعتماد است که از داده‌های ورودی کامل (مکش و رطوبت) استفاده شود.

روش وودینگ و هم از روش حل معکوس بدست آوردند. آنها به این نتیجه رسیدند که برآوردهای دو روش نزدیک به هم هستند. البته روش حل معکوس برآورد پایین‌تری از هدایت هیدرولیکی داشت.

بر اساس مقایسه نتایج هدایت هیدرولیکی خاک در مکش‌های مختلف می‌توان بیان نمود که روش‌های حل معکوس، وودینگ و Rosetta از همبستگی بالایی نسبت به هم برخوردار بوده‌اند. همچنین بهترین همبستگی بین روش‌های مختلف بین مکش ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر بوده و در بازه مکش‌های ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر، حل معکوس مقادیر متفاوت‌تری نسبت به دو روش دیگر را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که در مکش‌های بالاتر بایستی در انتخاب مدل، دقت بیشتری مد نظر قرار گیرد.

در مکش‌های پایین، روش حل معکوس مقادیر هدایت هیدرولیکی را نزدیک به روش وودینگ برآورد می‌کند. با بیشتر شدن مکش، مقادیر برآوردی حل معکوس بیشتر از روش وودینگ می‌گردد. این در حالی است که تا مکش چهار سانتی-متری، نرم‌افزار ROSETTA هدایت هیدرولیکی را بیشتر از روش معکوس برآورد کرده است و بعد از این مکش تا مکشی در حدود ۹/۵ سانتی‌متری روش حل معکوس هدایت هیدرولیکی را بیشتر از دو روش دیگر برآورد نموده است. در کل تغییرات هدایت هیدرولیکی حاصل از روش حل معکوس شیب کمتری



شکل ۴. منحنی‌های نگهداشت آب خاک بدست آمده از چهار آزمایش با روش حل معکوس و دیگر روش‌ها

جدول ۴. نتایج تحلیل آماری رطوبت ($\Theta(h)$) برآورد شده از روش حل معکوس و نرم‌افزار ROSETTA

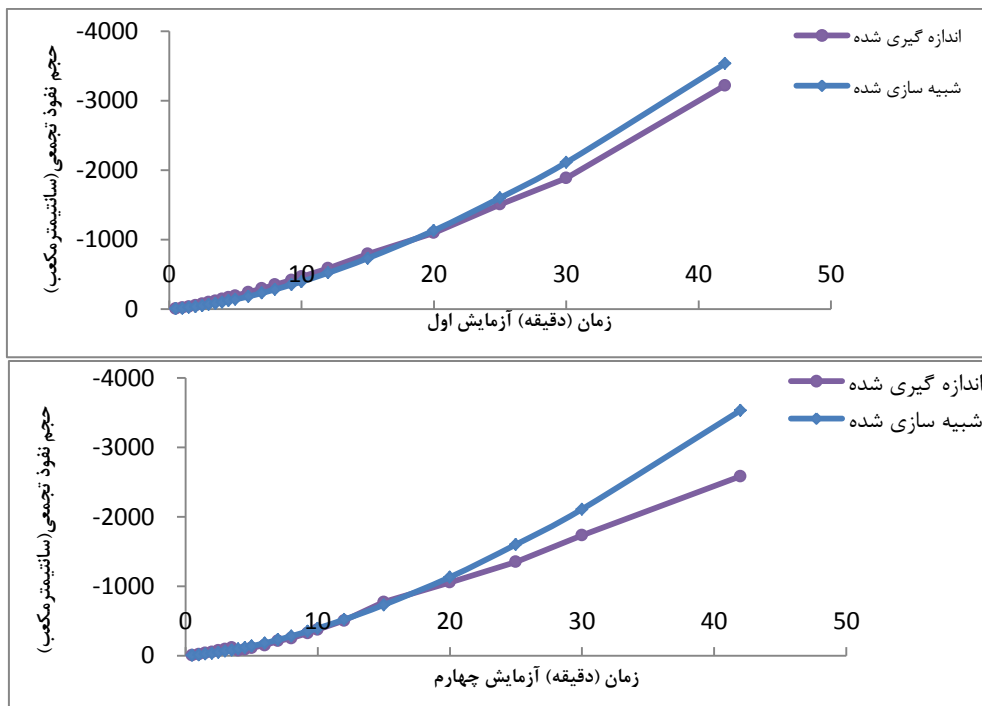
آزمایش	۱		۲		۳		۴		مدل
	Inverse	Rosseta	Inverse	Rosseta	Inverse	Rosseta	Inverse	Rosseta	
MAE	۰/۰۴۷۸	۰/۰۳۹۵	۰/۰۵۹۸	۰/۰۳۳	۰/۰۴۸۹	۰/۰۳۹۱	۰/۰۵۵۷	۰/۰۲۴۸	
RMSE	۰/۰۴۴۱	۰/۰۵۷۸	۰/۰۵۴۱	۰/۰۴۷۲	۰/۰۴۴۷	۰/۰۵۳۹	۰/۰۵۸۴	۰/۰۳۹۶	
CD	۱/۲۱۴	۲/۲۸۵	۲/۴۵۸	۱/۳۶۸	۱/۹۸۱	۱/۷۴۶	۲/۰۵۲۱	۱/۰۶۱	
CRM	۰/۱۴۰	۰/۱۵۴	۰/۱۷۸	۰/۱۰۶	۰/۱۴۸	۰/۱۳۸	۰/۱۸۹	۰/۰۹۷	

CRM در آزمایش اول کمترین و در آزمایش چهارم بیشترین مقدار را دارد.

برآورد حجم نفوذ تجمعی

نرم افزار HYDRUS قادر است در طی روند بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس، سرعت نفوذ و مکش را نیز شبیه سازی کند. شکل (۵) نتایج این شبیه سازی را برای آزمایش اول و چهارم نشان می دهد. در این آزمایش ها داده های اندازه گیری شده نفوذ تجمعی، با نفوذسنج مکشی دیسک با مقادیر شبیه سازی شده توسط HYDRUS1D مقایسه شده اند.

جدول (۴) نتایج تحلیل آماری رطوبت خاک را نشان می دهد. رطوبت خاک در مکش های متفاوت هم با نرم افزار ROSETTA، و هم به روش حل معکوس برآورد شدند. سپس داده ها مورد تجزیه تحلیل آماری قرار گرفتند. آماره MAE که نشان دهنده حداکثر خطاست در آزمایش دوم بیشترین و در آزمایش اول کمترین مقدار را دارد. همچنین مقدار RMSE در آزمایش اول کمترین می باشد. می توان نتیجه گرفت که نتایج برآورد معکوس رطوبت در آزمایش اول، به مقادیر برآوردی از ROSETTA نزدیک تر است. مقدار CD در آزمایش اول نسبت به بقیه آزمایش ها، بیشتر به یک نزدیک می باشد و این نشانگر کارایی روش حل معکوس در این آزمایش می باشد. ضریب



شکل ۵. حجم نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای آزمایش اول و چهارم

نشان می دهد که میزان نفوذ کاهش یافته است. اختلاف نمودار اندازه گیری شده و شبیه سازی شده ممکن است به همین علت باشد. در آزمایش اول مقادیر حجم نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در انتهای آزمایش به هم نزدیک تر شده اند. ولی در آزمایش چهارم مقادیر شبیه سازی شده حجم تجمعی نفوذ در انتهای آزمایش تفاوت بیشتری را نشان می دهد. البته در هر چهار آزمایش در ابتدای نفوذ، شرایط متفاوت است. تفاوت چهار آزمایش به میزان مکش تنظیم شده به دستگاه دیسک نفوذ وابسته بوده و تفاوت اصلی آزمایش ها اختلاف مکش منفی ایجاد شده از دستگاه است. (Nakhaei and Simunek 2014) بجای استفاده از آزمایش نفوذسنج دیسک، از آزمایش

در ابتدای آزمایش، مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده حجم نفوذ تجمعی بسیار نزدیک به هم است. تا زمان ۲۵ دقیقه این روند ادامه دارد و این دو نمودار تقریباً بر هم منطبق هستند. پس از این زمان این دو نمودار کمی از هم فاصله می گیرند و روش حل معکوس مقادیر حجم نفوذ تجمعی را کمی بیشتر برآورد می کند. این اختلاف می تواند ناشی از عدم توجه به ناهمگونی لایه های خاک باشد. البته در هنگام پر کردن لایسیمترها سعی شد تا لایه های خاک یکنواخت باشند. اما احتمال دارد تراکم لایه های خاک متفاوت باشد. در ابتدای آزمایش، فرآیند نفوذ تحت تاثیر پتانسیل ثقلی است. اما در انتهای آزمایش، نفوذ ناشی از اختلاف پتانسیل ماتریک بوده و

درصد مقدار K ، در مکش یک سانتیمتر است. نتایج نشان داد تعریف تابع هدف روش حل معکوس، در ترم‌هایی از داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ با دیسک مکشی و داده‌های اندازه‌گیری شده مکش با تانسومتر، بهترین سناریوی عملی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک است. در این سناریو مقدار R^2 بیشترین و مقدار تابع هدف مینیمم بوده است ($R^2 = 0.966$) و $R^2 = 0.515$ (Φ=). بر اساس نتایج، مکش‌های قرائت شده از تانسومترها و مکش‌های برآورد شده از روش حل معکوس، در تمامی زمان‌ها و در هر چهار آزمایش تطابق خوبی با هم داشتند. روش حل معکوس به درستی می‌تواند مقادیر مکش را در مختصات‌های مختلف برآورد کند، به طوری که این مقادیر نزدیک به قرائت‌های تانسومترها بود. همچنین روش حل معکوس در برآورد زمان رسیدن به محدوده اشباع بسیار دقیق عمل نمود. در مکش‌های پایین، روش حل معکوس مقادیر هدایت هیدرولیکی را نزدیک به روش وودینگ برآورد کرد. با بیشتر شدن مکش مقادیر برآوردی حل معکوس بیشتر از روش وودینگ گردید. در این راستا برای تکمیل و ارتقا نتایج این پژوهش توصیه می‌گردد براساس روش کار انجام شده در این تحقیق مطالعات بر روی خاک با پوشش گیاهی انجام گیرد و جذب ریشه نیز به روش حل معکوس برآورد گردد.

REFERENCES

- Abbasi, F. (2013). Estimating Soil Water Retention Curve Including Hysteresis Using Inverse Modeling and Scott's and Mualem's Models in two Different Soils, *Journal of Water and Soil*, 27(2), 313-327
- Dohnal, M., Dusek, J., and Vogel, T. (2010). Improving Hy-draulic Conductivity Estimates from Minidisk Infiltrometer Measurements for Soils with Wide Pore-Size Distribu-tions. *Soil Science Society of America Journal*, 74(3), 804–811.
- Farkas, Cs., Fodor, N. and Tóth, E. (2000). Research Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry of the Hungarian Academy of Sciences, 1022 Budapest, Herman Ottó 15.
- Gupta N. Rudra R.P. and Parkin. G. (2006). Analysis of spatial variability of hydraulic conductivity at field scale. *Canadian Biosystems Engineering*, 48(1), 55-62.
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., Parlange, J.Y., (1994). Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. Part 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*. 30, 2931–2935.
- Iwata, H. , Tanabe, S. , Ueda, K. and Tatsukawa, R. (1995). Persistent Organochlorine Residues in Air, Water, Sediments, and Soils from the Lake Baikal Region, Russi, *Environmental Science & Technology*, 29 (3), 792–801
- Latorre, B., Moret-Fernández, D. and Pena, C. (2013). Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve: theoretical analysis and field applicability, *Procedia Environmental Sciences*, 19, 580 – 589.
- Latorre, B., Pena, C., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Moret-Fernndez, D. (2015). Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve. Numerical analysis and field application. *Journal of Hydrology*: 43 (4),1–12.
- Logsdon, S.D., Jaynes, D.B., (1993). Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil. Sci.Soc. Am. J.* 57, 1426–1431.
- Mashayekhi, P. Ghorbani-Dashtaki, S. Mosaddeghi, M.R. Shirani, H. Panahi, M. and Nouri, M.R. (2017). Estimation of soil hydraulic parameters using double-ring infiltrometer data via inverse method. *Iranian Journal of soil and water research*, 47(4), 829-838.
- Mashayekhi, P. Ghorbani-Dashtaki, S. Mosaddeghi, M.R. Shirani, H. and Mohammadi Nodoushan, A.R. (2016). Different scenarios for inverse estimation of soil hydraulic parameters from double-ring infiltrometer data using HYDRUS-2D/3D. *International Agrophysics*, 30(2), 203-

نفوذ تک حلقه‌ای استفاده کردند. نمودارهای بدست آمده در دو مطالعه از لحاظ نزدیکی مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی- شده، تطابق نسبتاً خوبی با هم دارند. در مطالعه انجام شده توسط Mashayekhi *et al.* (2016)، نیز تطابق خوبی بین داده- های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های دوگانه و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D مشاهده شد.

نتیجه گیری کلی

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع بسیار مشکل تر از اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع است. از آنجایی که مقدار این ویژگی به شدت وابسته به درصد رطوبت خاک است، باید برای توصیف مناسب و کامل تابع هدایت هیدرولیکی، شیب هیدرولیکی و درصد رطوبت برای محدوده مورد نظر تعیین گردد. در این پژوهش، روش برآورد حل معکوس برای آنالیز آزمایش‌های نفوذسنج مکشی دیسک به کار برده شد که با استفاده از داده‌های میدانی محدود می‌تواند کاربردی و دقیق باشد. بر اساس روش تحلیلی وودینگ، مقدار K در مکش ۱۵ سانتیمتر ۵/۹۷ درصد K در مکش یک سانتیمتر است. همچنین مقدار K در مکش ۶ و ۳ سانتیمتر به ترتیب ۳۶/۴ و ۶۶/۷

210. Meshgi, A. and T. F. M. Chui. (2012). Analysing tension infiltrometer data from sloped surface using two dimensional approximation. *Hydrological Processes*, 20 (3), 744–752.
- Mohanty, B. P., Kanwar, R. S., and Everts, C. J. (1994). Comparison of Saturated Hydraulic Conductivity Measurement Methods for a Glacial-Till Soil, *Soil Science Society of America Journal*, 58, 672-677
- Nakhaei, M. and Simunek, J. (2014). Parameter estimation of soil hydraulic and thermal property functions for unsaturated porous media using the HYDRUS-2D code. *J. Hydrol. Hydromech.*, 621, 7–15 DOI: 10.2478/johh-2014-0008.
- 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., Gonçalves, M. C., Martins, J. C., van Genuchten, M. Th., and Pires, F. P. (2006). Published in *Vadose Zone Journal* 5:684–696. Original Research Soil Science Society of America 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711 USA.
- Simunek, J., and M. Th. van Genuchten. (1996). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disk infiltrometer data by numerical inversion, *Water Resources Research*. 32(9), 2683-2696
- Simunek, J., O. Wendroth, and M. Th. van Genuchten. (1999). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. *Water Resources Research*. 35:2965–2979.
- Ventrella, D., Losavio, N., Vonella, A. and Leij, F. (2005). Estimating hydraulic conductivity of a fine-textured soil using tension infiltrometry. *Geoderma*, 124, 267–277.
- Wooding, R.A. (1968). Steady infiltration from large shallow circular pond. *Water Resources Research*. 4, 1259–1273.