مقایسه روش‌های مختلف برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

حمید کلیشادی، محمدرضا مصدقی و محمدعلی حاج‌عباسی
۱- دانشجوی دکتری گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان،۲-دانشیار گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان،۳- استاد گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده
به‌دلیل اهمیت ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری یا برآورد آنها ارائه شده‌است. هدف از این پژوهش اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌صورت درجا و آزمایشگاهی در منطقه کوهرنگ بود. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مزرعه توسط نفوذسنج مکشی و در آزمایشگاه هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) به روش بار ثابت و منحنی مشخصه رطوبتی روی نمونه‌های دست‌نخورده اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد رطوبت اشباع (s) برآوردشده از روی داده‌های نفوذسنج مکشی کم‌تر از s اندازه‌گیری‌شده و بهینه‌شده با نرم‌افزار RETC و محاسبه از روی داده‌های تخلخل است. Ks اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه بزرگ‌تر از Ks برآوردشده با داده‌های نفوذسنج مکشی به روش‌های تحلیلی و عددی بود. تخمین پارامترهای و n معادله ون‌گنوختن از روی داده‌های نفوذسنج مکشی بزرگ‌تر از تخمین آنها از روی داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی بود. می‌توان گفت پارامترهای هیدرولیکی خاک به دست آمده از روی منحنی مشخصه رطوبتی و داده‌های نفوذسنج مکشی قابل‌استفاده به جای یکدیگر در منطقه مورد بررسی نیستند.

واژه‌های کلیدی: نفوذسنج مکشی، منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی خاک، مدل ون‌گنوختن.

مقدمه
از جمله ویژگی‌های مهم هیدرولیکی خاک منحنی مشخصه رطوبتی و منحنی هدایت هیدرولیکی می‌باشند. منحنی مشخصه رطوبتی خاک در واقع رابطه بین مقدار رطوبت و مکش ماتریک خاک می‌باشد. منحنی هدایت هیدرولیکی خاک بیان‌کننده تابع تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک در مکش‌های ماتریک مختلف است.

به دلیل اهمیت هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری و برآورد این پارامتر در مزرعه و آزمایشگاه وجود دارد. متأسفانه این روش‌ها اغلب جواب مشابهی ارائه نمی‌دهند چون این پارامتر به اندازه نمونه، هندسه جریان، روش نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک بسیار حساس است. علاوه براین اکثر (شاید همه) روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع برای همه کاربری‌ها و تیپ‌های مختلف خاک یا شرایط مختلف خاک مناسب نباشند. بنابراین روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع پیش از کاربرد باید ارزیابی شود تا اطمینان از نتایج قابل قبول حاصل شود (Reynolds et al., ۲۰۰۰). از نمونه دست نخورده به عنوان یک روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاك استفاده شده است. در این روش ساده، ارزان و آسان مستقیماً از قانون دارسی برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده می‌شود. محدودیت‌های این روش شامل کوچک‌بودن اندازه نمونه، بهم‌خوردن خاک هنگام نمونه‌برداری، احتمال وجود جریان در طول دیواره سیلندر حاوی خاک می‌باشند. با وجود محدودیت‌ها، این روش یک روش رایج برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاك است و اغلب به عنوان معیار برای ارزیابی سایر روش‌ها به کار می‌رود (Reynolds et al., ۲۰۰۰).

در دو دهه اخیر، استفاده از نفوذسنج مکشی به عنوان یک وسیله عام‌پسند برای اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی اشباع و نزدیک اشباع خاک به صورت درجا (در مزرعه) توسعه یافته است. دلیل اصلی استفاده از آن ساده و سریع‌بودن این روش و هم‌چنین تخریب کم واحدهای بزرگ ساختمان خاک و کنترل مکش در جریان نزدیک اشباع و اشباع است. از دیگر مزیّت‌های این روش اندازه‌گیری (برآورد) پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع، ضریب جذب (جذب‌پذیری) و توزیع جریان در منافذ درشت و هم‌چنین پارامترهای انتقال مواد مانند ضریب انتشار-پخشیدگی به صورت درجا (در مزرعه) است (Reynolds et al., ۲۰۰۰).

مواد و روش‌ها
منطقه مورد مطالعه بین طول‌های جغرافیایی ۲۸ ۵۰ و ۵ ۵۰ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۱۳ ۳۲ و ۳۵ ۳۲ شمالی واقع در استان چهارمحال بختیاری در بخشی‌هایی از شهرستان‌های کوهرنگ و فارسان در زاگرس مرکزی ایران قرار دارد. رس غالب خاک‌های این منطقه از نوع اسمکتیت است و خاک‌های مورد بررسی بر روی سازندهای آهکی دوران سوم زمین‌شناسی قرار دارند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

اندازه‌گیری‌های صحرایی نفوذ غیراشباع آب به خاک توسط دستگاه نفوذسنج مکشی (شرکت Soil Measurement Systems, Tucson, AZ USA ۸۵۷۰۴) در مکش‌های مرز ورودی ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر آب در ۱۰۰ نقطه انجام شد. در پایان اندازه‌گیری، پس از کنار زدن شن تماس از زیر صفحه نفوذسنج یک نمونه خاک برای تعیین مقدار رطوبت نظیر آخرین مکش (۲ سانتی‌متر) و هم‌چنین یک نمونه دست‌نخورده برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت و منحنی مشخصه رطوبتی خاک تهیه شد. پس از پایان اندازه‌گیری‌های منحنی مشخصه رطوبتی (در دامنه ۰ تا ۵۰۰۰ سانتی‌متر آب)، نمونه خاک دوباره از آب اشباع گردید و به روش بار ثابت هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اندازه‌گیری شد. شدت جریان ماندگار عبوری از نمونه خاک اندازه‌گیری شد و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک توسط قانون دارسی محاسبه گردید.

داده‌های نفوذ جمع‌آوری‌شده توسط دستگاه نفوذسنج مکشی با روش تحلیلی وودینگ و هم‌چنین به روش حل عددی و مدل‌سازی معکوس توسط نرم‌افزار DISC که مشتق‌شده از نرم‌افزار HYDRUS-2D است، تجزیه و تحلیل شد و از این روش‌ها پارامترهای هیدرولیکی خاک تخمین زده شد.

جریان آب از نفوذسنج مکشی یک جریان سه‌بعدی متقارن است و نتایج آن تابع نیروی ثقل در حرکت رو به پایین، نیروی موئینگی در همه جهات و مشخصه‌های هندسی منبع تغذیه آب (دیسک) است. وودینگ معادله زیر را به روش تحلیلی برای بیان شدت جریان ماندگار زیر صفحه نفوذسنج مکشی ارائه نمود (Wooding, ۱۹۶۸):

(۱)
$$q = K_{wet}\left[1+\frac{4\lambda_c}{\pi r_0}\right]$$

که در این معادله q شدت جریان ماندگار در واحد سطح (L-1)، r۰ شعاع صفحه نفوذسنج (L)، Kwet هدایت هیدرولیکی (L-1) نظیر مکش اعمال‌شده (hwet) و c طول موئینگی درشت (L) می‌باشند. وودینگ فرض کرد خاک یکنواخت، همگن و تورم‌ناپذیر است و هدایت هیدرولیکی آن از معادله گاردنر (۱۹۵۸) به شکل زیر پیروی می‌کند:

(۲)
$$K(h) = K_s\left(\frac{-h}{\lambda_c}\right)$$

که در این معادله K هدایت هیدرولیکی غیراشباع (L-1) در مکش ماتریک h (L) و Ks هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (L-1) و c طول موئینگی درشت (L) می‌باشد. در معادله ۱ عبارت اول معادله سهم نیروی ثقل و عبارت دوم سهم نیروهای موئینه و مشخصه‌های هندسی منبع تغذیه آب در جریان آب به درون خاک را نشان می‌دهد (Hussen and Warrick, ۱۹۹۵).

روش حل عددی معکوس در نرم‌افزار DISC که در این پژوهش از آن استفاده شد، حل عددی معادله ریچاردز در ترکیب با روش بهینه‌سازی غیرخطی مارکواردت-لونبرگ می‌باشد. راه‌کار مورد نیاز جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل‌سازی معکوس، انتخاب مدل‌های پارامتریک برای منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک است. در نرم‌افزار DISC از توابع هیدرولیکی ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و معلم (۱۹۷۶) استفاده شده است:

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

(۴)
$$K(h) = K_s S_e^l\left[1-(1-S_e^{\frac{1}{m}})^m\right]^2$$

که در این معادلات، Ks هدایت هیدرولیکی اشباع (L-1)، s رطوبت حجمی اشباع (L3L-3)، r رطوبت حجمی باقی‌مانده (L3L-3)، L پارامتر پیوستگی منافذ، n (L-1) و m=1-1/n پارامترهای مقیاس و شکل منحنی مشخصه رطوبتی، رطوبت حجمی (L3L-3)، Se اشباع موثر و K(h) هدایت هیدرولیکی غیراشباع (L-1) به عنوان تابعی از مکش (پتانسیل) ماتریک (h) می‌باشند.

برای برازش مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) با محدودیت معلم (m=1-1/n) بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده منحنی مشخصه رطوبتی خاک و بهینه‌سازی پارامترهای آن، از نرم‌افزار RETC استفاده شد.

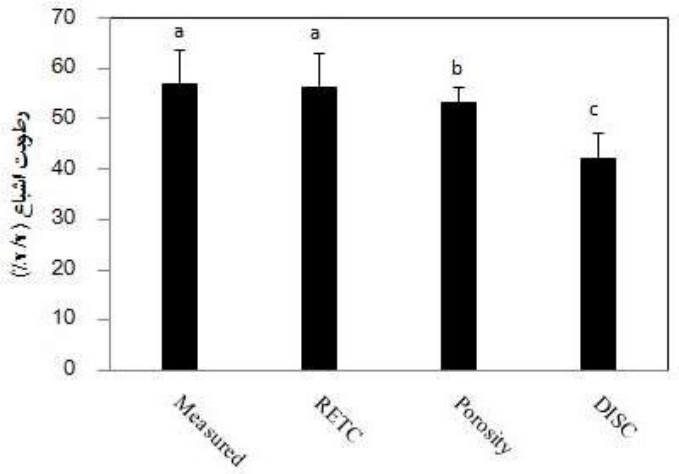
نتایج و بحث

جزء سیلت در اکثر خاک‌های مورد بررسی بخش عمده ذرات معدنی خاک را تشکیل می‌دهد. به طوری که در نام‌گذاری بافت تمامی خاک‌ها صفت سیلتی وجود دارد. در خاک‌های مورد بررسی دامنه درصد شن ۱ تا ۳۲، درصد سیلت ۳۴ تا ۸۲، و درصد رس ۱۶ تا ۵۸ بود. دامنه درصد ماده آلی بین ۱/۰ تا ۸/۳ بود که نشان‌دهنده میزان ماده آلی کم تا متوسط خاک‌های مورد بررسی است. دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل خاک ۱ تا ۴۵ درصد می‌باشد.

مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری و برآورد رطوبت اشباع خاک

در این پژوهش میزان رطوبت اشباع خاک توسط روش مستقیم (با اشباع‌نمودن نمونه دست‌نخورده) اندازه‌گیری شد. هم‌چنین میزان رطوبت اشباع خاك توسط سه روش (محاسبه از روی تخلخل، تخمین توسط نرم‌افزار DISC و تخمین توسط نرم‌افزار RETC) برآورد شد. برای قابل مقایسه‌بودن رطوبت‌ها، رطوبت وزنی اندازه‌گیری‌شده در مکش ۲ سانتی‌متر زیر صفحه نفوذسنج با توجه به چگالی ظاهری خشک به رطوبت حجمی تبدیل شد و به عنوان ورودی به نرم‌افزار DISC داده شد. هم‌چنین رطوبت‌های اندازه‌گیری‌شده برای ورود به نرم‌افزار RETC ابتدا به صورت وزنی به نرم‌افزار معرفی شدند و پس از برازش منحنی، میزان رطوبت اشباع برآوردشده با توجه به چگالی ظاهری خشک به رطوبت حجمی تبدیل شد. دلیل دیگر واردکردن رطوبت‌ها به طور وزنی به نرم‌افزار تغییر حجم نمونه در مسیر خشک‌شدن خاک بود.

در شکل ۱ چهار روش اندازه‌گیری و برآورد رطوبت اشباع خاك با یکدیگر مقایسه میانگین شده‌اند. علت اینکه رطوبت اشباع اندازه‌گیری‌شده بیش‌تر از تخلخل است می‌تواند به دلیل انبساط‌پذیری خاک‌ها و وجود رس اسمکتیت در خاک‌های مورد بررسی و محاسبه تخلخل با استفاده از داده‌های چگالی ظاهری خشک باشد.



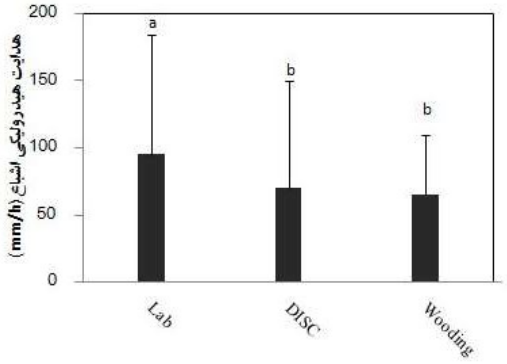
شکل ۱- مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری و برآورد رطوبت اشباع خاك

رطوبت اشباع توسط نرم‌افزار DISC به میزان قابل توجهی کم‌تر از دیگر روش‌ها برآورد شده است (شکل ۱). علت اصلی آن این است که نرم‌افزار DISC میزان رطوبت اشباع خاك را به صورت حل معکوس داده‌های تجمعی نفوذ و برون‌یابی با توجه به میزان رطوبت اندازه‌گیری‌شده در مکش آخر (۲ سانتی‌متر) تخمین می‌زند. در این پژوهش معمولاً پس از گذشت ۱۶-۱۲ دقیقه، نفوذ به شدت جریان ماندگار می‌رسید و مدت زمان لازم برای حصول ماندگاری شدت جریان در مکش ۲ سانتی‌متر حدود ۵ دقیقه بود. بنابراین به نظر می‌رسد این زمان برای برقراری تعادل آبی برای جذب آب بین لایه‌های رسی خاک کافی نبوده و رطوبت در مکش ۲ سانتی‌متر و در نتیجه رطوبت اشباع کم‌تر از مقدار واقعی برآورد شده است. این نتایج با یافته‌های عسگرزاده و همکاران (۲۰۱۴) در برخی از خاك‌های استان همدان هم‌خوانی دارد. مصدقی (۱۳۸۶) با اندازه‌گیری رطوبت اشباع در ۱۲۶ نمونه از افق های بالا و زیرین خاک‌های همدان را گزارش کرده که در اکثر موارد رطوبت اشباع اندازه‌گیری‌شده بیش‌تر از تخلخل محاسبه‌شده است و دلیل آن را آماس نمونه‌های دست‌نخورده به ویژه در خاک‌های رسی در حین اشباع‌شدن با آب دانسته است.

مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری و برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاك

میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری‌شده از نمونه خاك دست‌نخورده به طور معنی‌داری بزرگ‌تر از هدایت هیدرولیکی اشباع برآوردشده توسط دو روش دیگر است. ولی بین برآوردهای هدایت هیدرولیکی اشباع روش تحلیلی وودینگ و روش عددی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد (شکل ۲)؛ اگرچه روش حل عددی هدایت هیدرولیکی اشباع را مقداری بیش‌تر از روش وودینگ تخمین می‌زند. علت بیش‌تربودن هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده توسط روش بار ثابت این است که در این روش نمونه کاملاً اشباع از آب می‌شود ولی در شرایط مزرعه در زیر صفحه نفوذسنج هیچ‌گاه خاك به شرایط اشباع کامل نمی‌رسد و هر دو روش، هدایت هیدرولیکی اشباع را از برون‌یابی نقاط نزدیک اشباع برآورد می‌کنند. چون آخرین مکش اعمال‌شده ۲ سانتی‌متر بود، ممکن است روش‌های برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از روی داده‌های نفوذسنج، نقش منافذ درشت موثر در هدایت آب بین مکش ۲ سانتی‌متر تا اشباع را کاملاً در نظر نگیرد. ولی به نظر می‌رسد که روش عددی نرم‌افزار DISC نقش منافذ درشت موثر در دامنه مکش ۰ تا ۲ سانتی‌متر را تا حدودی لحاظ می‌کند. هم‌چنین در روش تحلیلی تنها از داده‌های نفوذ ماندگار استفاده می‌شود ولی در حل عددی از تمامی داده‌های نفوذ استفاده می‌شود که احتمالاً اطلاعات جامع‌تر و بیش‌تری در رابطه با ویژگی‌های هیدرولیکی خاک ارائه می‌کند. البته مدل‌های هیدرولیکی مورد استفاده در روش تحلیلی (مدل گاردنر) و روش عددی (ون‌گنوختن-معلم) نیز متفاوت

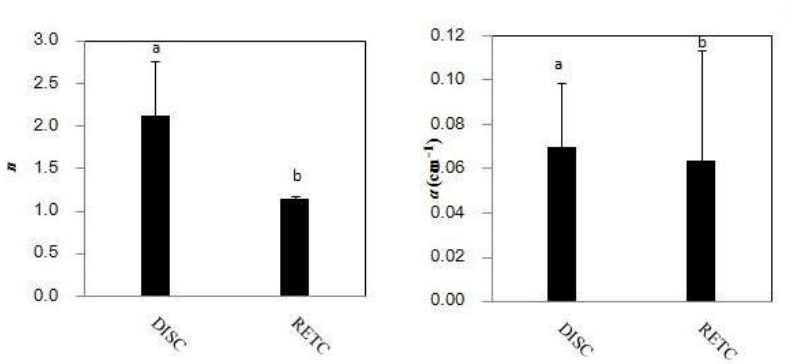
بود. علت دیگر بالا بودن هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده توسط روش بار ثابت، می‌تواند ماهیت و اندازه نمونه‌ها و فرضیات رابطه مورد استفاده (قانون دارسی) برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع باشد. چون در خاک‌های مورد بررسی درز وشکاف‌های ریز و درشت زیادی در خاک دیده می‌شد، وجود جریان‌های لبه‌ای در طول دیواره سیلندر نمونه‌برداری خاك در روش بار ثابت می‌تواند عامل دیگری برای بیش‌تربودن هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده در این روش باشد.



شکل ۲- مقایسه روش‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای اندازه‌گیری و برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاك

مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری (برآورد) پارامترهای مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰)

پارامترهای شکل (n) و مقیاس ( ) مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون‌گنوختن (۱۹۸۰) با استفاده از کل داده‌های نفوذ تجمعی توسط نرم‌افزار DISC برآورد شد. هم‌چنین این پارامترها با استفاده از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه توسط نرم‌افزار RETC بهینه‌سازی شد. همان گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، نرم‌افزار DISC پارامترهای شکل (n) و مقیاس ( ) مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰) را به طور معنی‌داری بیش‌تر از نرم‌افزار RETC تخمین می‌زند. تمامی مقادیر برآوردشده‌هوردا توسط نرم‌افزار DISC برای پارامتر شکل (n) بزرگ‌تر از مقادیر برآوردشده توسط نرم‌افزار RETC بود. در اکثر موارد هم نرم‌افزار DISC پارامتر مقیاس ( ) را بزرگ‌تر از RETC برآورد کرده است. علت آن می‌تواند بزرگ‌تربودن اندازه نمونه و کم‌ترین تخریب نمونه خاك در زیر صفحه نفوذسنج نسبت به نمونه آزمایشگاهی باشد. چون اندازه نمونه خاك زیر صفحه نفوذسنج بزرگ‌تر است بنابراین احتمال وجود تعداد منافذ درشت بیش‌تری در آن وجود دارد که باعث افزایش شیب منحنی مشخصه رطوبتی در ناحیه دوم (یعنی n) می‌شود. از طرفی تخریب‌نشدن نمونه خاك در زیر صفحه نفوذسنج باعث افزایش می‌شود چون این پارامتر به ساختمان خاک بسیار حساس است. این نتایج با یافته‌های عسگرزاده و همکاران (۲۰۱۴) هم‌خوانی دارد.



شکل ۳- مقایسه روش‌های مختلف برآورد پارامترهای شکل (n) و مقیاس ( ) مدل ون‌گنوختن (۱۹۸۰)

منابع

مصدقی، م.ر.، ۱۳۸۶. برازش مدل‌های رایج منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی و استخراج توابع انتقالی خاک برای خاک‌های استان همدان، گزارش طرح پژوهشی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Dexter, A.R., Mahboubi, A.A., Neyshabouri, M.R. ۲۰۱۴. Determination of soil available water for plants: Consistency between laboratory and field measurements. Geoderma ۲۲۶-۲۲۷, ۸-۲۰.

Gardner, W.D. ۱۹۵۸. Some steady-state solution of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science. ۸۵: ۲۲۸-۲۳۲.

Hussen A.A., and Warrick A.W. ۱۹۹۵. Tension infiltrometers for the measurement of vadose zone hydraulic properties. PP. ۱۸۹-۲۰۱. In: Wilson, L.G., L.G. Evertt, and S.J. Cullen (Eds.), Handbook of Vadose Zone Characterization & Monitoring, Lewis Publication, Boca Raton.

Reynolds W.D., Bowman B.T., Brunk P.R., Drury C.F., and Tan C.S.. ۲۰۰۰. Comparison of tension infiltrometers, pressure infiltrometers, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. Soil Science Society of America of Journal, ۶۴: ۴۷۸-۴۸۴.

Sillers W.S., Fredlund, D.G., and Zakerzadeh N.. ۲۰۰۱. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. Geotechnology Geology Engineering , ۱۹: ۲۴۳-۲۸۳.

van Genuchten, M Th. ۱۹۸۰. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, ۴۴: ۸۹۲-۸۹۸.

Wooding, R.A. ۱۹۶۸. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resource Research, ۴: ۱۲۵۹-۱۲۷۳.

Abstract

Due to its variety of uses, there are different methods for measurement or prediction of soil hydraulic properties. This study was conducted to measure or predict soil hydraulic properties in situ and in the laboratory. Soil samples were brought from ۱۰۰ different locations in Koohrang region of central Zagros. Tension infiltrometer was used for in situ prediction of soil hydraulic properties. Saturated hydraulic conductivity (Ks) (by the constant-head method) and soil water retention curve were directly measured on the intact samples in the laboratory. The results showed that predicted saturated water content (s) from the tension infiltrometer data was lower than those measured directly, optimized by RETC and calculated from the porosity values. Laboratory measured Ks (by the constant-head method) were greater than the Ks values predicted from the tension infiltrometer data using analytical and numerical methods. The parameters and n of van Genuchten equation predicted from the tension infiltrometer data were greater than those optimized by RETC from the measured soil water retention data, respectively. Overall, soil hydraulic parameters derived from the measured water retention data and those inferred from the tension infiltrometer data cannot be used interchangeably in the study area.