

## مقایسه چهار روش اندازه‌گیری درجای هدایت آبی اشباع خاک

فاطمه قانی<sup>۱</sup>، سید حسن طباطبائی<sup>۲\*</sup>، محمد شایان نژاد<sup>۳</sup>، شجاع قربانی دشتکی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: 1390/10/23 تاریخ پذیرش: 1391/5/13

### چکیده

هدایت آبی اشباع خاک ( $k_s$ )، از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک است که اطلاع از تغییرات مکانی و زمانی آن برای بهینه‌سازی مدیریت آب و خاک بسیار ضروری می‌باشد. در این پژوهش چهار روش صحرایی اندازه‌گیری  $k_s$  شامل روش‌های استوانه‌های دوگانه، تک استوانه، نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی در مزرعه‌ای با خاک لومی متوسط در دانشگاه شهرکرد مقایسه شدند. میانگین ارتفاع آب در روش‌های استوانه‌های دوگانه و تک استوانه در طول آزمایش‌ها برابر با 11 سانتی‌متر بود و در روش نفوذسنج گلف دو عمق ثابت 11 و 19 سانتی‌متر به ترتیب در هر چاهک اعمال شدند و آزمایش‌ها با روش نفوذسنج مکشی در پنج مکش 15-، 10-، 6-، 3- و 1- سانتی‌متر به انجام رسیدند. میانگین  $k_s$  اندازه‌گیری شده با روش‌های استوانه‌های دوگانه، تک استوانه، نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی به ترتیب برابر با 0/300، 0/246، 0/011 و 0/295 سانتی‌متر بر دقیقه بود. همچنین، تحلیل آماری نتایج با آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد که به جز روش نفوذسنج گلف، بین سه روش دیگر در سطح احتمال 1 درصد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. دلیل اصلی تفاوت بسیار زیاد  $k_s$  حاصل شده در روش نفوذسنج گلف با سایر روش‌ها وجود یک لایه سخت با نفوذپذیری کم در عمق 25 تا 30 سانتی‌متر از سطح زمین بود. **واژه‌های کلیدی:** استوانه‌های دوگانه، تک استوانه، نفوذسنج گلف، نفوذسنج مکشی، هدایت آبی اشباع خاک.

<sup>1</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

<sup>2</sup> - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

<sup>3</sup> - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

<sup>4</sup> - استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

\*-نویسنده مسئول: [stabaei@agr.sku.ac.ir](mailto:stabaei@agr.sku.ac.ir)

## مقدمه

هدایت آبی اشباع خاک یا ضریب آبگذری اشباع خاک نشان دهنده‌ی وضعیت سرعت حرکت آب در خاک می‌باشد (بوینتن و دنییل، 1985). از دیگر سو، هدایت آبی اشباع خاک یک پارامتر مهم بحرانی برای همه‌ی فعالیت‌های مرتبط با جریان آب در خاک، کنترل نفوذ آب و رواناب سطحی، آیشویی سموم از اراضی کشاورزی و انتقال آلاینده‌ها از مکان‌های آلوده به سمت آب زیرزمینی است (باگارلو و اسگوری، 2007؛ آیوانک، 2008). با توجه به اهمیت این ویژگی، بسته به شرایط مختلف از قبیل نوع خاک، فاصله‌ی سطح آب زیرزمینی تا سطح خاک، مقیاس مورد مطالعه و امکانات موجود روش‌های متفاوتی ارائه شده‌اند. پاره‌ای از این روش‌ها در آزمایشگاه برای نمونه‌های دست خورده (disturbed) و یا دست نخورده (undisturbed)، و برخی دیگر در صحرا و در شرایط طبیعی انجام می‌شوند (علیزاده، 1383). یکی از معایب روش‌های آزمایشگاهی به‌هم‌خوردگی خاک هنگام نمونه‌برداری می‌باشد؛ به همین دلیل در طرح‌های اجرایی، روش‌های صحرائی کاربرد بیشتری دارند (رینولدز، 1993). از روش‌های صحرائی معمول برای اندازه‌گیری هدایت آبی خاک می‌توان به روش‌های استوانه‌های دوگانه (Double-ring)، تک استوانه (Single-ring)، نفوذسنج گلف (Guelph permeameter) و قرص یا نفوذسنج مکشی (Tension infiltrometer) اشاره کرد (رینولدز و الریک، 1990). پایه‌ی این روش‌ها، رسیدن به سرعت نفوذ شبه‌ماندگار آب در خاک می‌باشد (رینولدز، 1993).

استوانه‌های دوگانه، بطور گسترده‌ای در مزرعه برای تعیین هدایت آبی اشباع خاک به کار برده می‌شوند (باور، 1986؛ آیوانک، 2008). این روش به دلیل سهولت کاربرد و کم هزینه بودن، استفاده‌ای گسترده دارد. در روش استوانه‌های دوگانه فرض بر آن است که استوانه‌ی بیرونی مانع از ایجاد جریان جانبی در خاک و در نتیجه باعث ایجاد جریان کاملاً عمودی آب در آن می‌شود، اما مطالعات اخیر نشان داده است که برای رسیدن به چنین هدفی استفاده از استوانه‌های بسیار بزرگ اجتناب‌ناپذیر است (کوک، 2002). لای و لیبو (2010)، بیان کردند که

اندازه‌ی هر دو استوانه‌ی داخلی و خارجی در دستگاه نفوذسنج دوگانه بر اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع مؤثر هستند. این محققین به منظور بررسی اثرات ترکیبی اندازه‌ی قطرهای داخلی و خارجی در استوانه‌های دوگانه، 7224 شبیه‌سازی عددی در ارتباط با ترکیب بهینه‌ی اندازه‌ی قطرهای داخلی و خارجی برای مطالعه‌ی هدایت آبی اشباع با استفاده از 24 نفوذسنج با 6 قطر داخلی (10، 20، 40، 80، 120 و 200 سانتی‌متر) و 4 شاخص‌گیری<sup>1</sup> برای هر قطر استوانه (0/2، 0/33، 0/5 و 0/71) انجام دادند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که در عمل اندازه‌ی استوانه داخلی نسبت به اندازه استوانه‌ی خارجی (شاخص‌گیری) مهمتر می‌باشد. در نهایت در اکثر موارد کاربرد استوانه‌های دوگانه با قطر داخلی بزرگتر از 80 سانتی‌متر و شاخص بافر بزرگتر مساوی 0/33 را برای اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک در شرایط مزرعه پیشنهاد نمودند. یکی دیگر از روش‌های معمول در اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک روش تک استوانه است. در این روش، فرض بر آن است که نفوذ آب به خاک از درون استوانه به صورت سه بعدی است و بر این اساس، جریان آب درون استوانه بر مبنای معادله‌ی ریچاردز حل شده و با حل آن بر اساس شرایط مرزی و اولیه‌ی اعمال شده، جریان یک بعدی شبیه‌سازی شده و سپس هدایت آبی اشباع عمودی خاک تعیین می‌گردد (رینولدز و همکاران، 2002).

دیگر روش اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک، روش نفوذسنج گلف می‌باشد. این روش به دلیل برخورداری از مبانی انگاره‌ای قوی، سرعت عمل در انجام آزمایش و هزینه‌ی بسیار کم، یکی از روش‌های پرکاربرد در اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک می‌باشد (رینولدز و الریک، 1985). در این روش، بدهی ثابت آب خروجی از چاهک به خاک اطراف تحت بار آبی ثابت اندازه‌گیری می‌شود (رینولدز و الریک، 1987).

نفوذسنج مکشی، به علت سهولت استفاده، یکی از معروفترین ابزارها برای اندازه‌گیری ویژگی‌های آبی اشباع و غیراشباع خاک در مزرعه می‌باشد (مورت و آرزو، 2007). این روش قابلیت استفاده نسبتاً سریع را در

<sup>1</sup> - Buffer

جای تک استوانه وجود ندارد. علیزاده و همکاران (1388)، به منظور ارزیابی روش‌های مختلف اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع، نتایج حاصل از روش‌های بار افتان ساده‌سازی شده، نفوذسنج تک استوانه و نفوذسنج استوانه‌های دوگانه را در خاکی با بافت متوسط مقایسه کردند. تحلیل آماری نشان داد که بین میانگین مقادیر به دست آمده برای هدایت آبی خاک از سه روش فوق در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

رئوف و همکاران (1390) آزمایش‌های نفوذ را با استفاده از دستگاه‌های نفوذسنج استوانه‌های دوگانه و نفوذسنج مکشی در دو حالت اشباع و غیراشباع به انجام رساندند. مقادیر هدایت آبی که با کاربرد دو روش مذکور محاسبه شدند، حاکی از آن بودند که دستگاه نفوذسنج استوانه‌های دوگانه مقادیر هدایت آبی را بیشتر از دستگاه نفوذسنج مکشی تخمین می‌زند، اما از لحاظ آماری، و در سطح اطمینان 90 درصد، این اختلاف معنی‌دار نمی‌باشد. مرادی‌باصری و همکاران (1391) پارامتر هدایت آبی اشباع را در خاک‌های ورتی‌سول و انتی‌سول با سه روش بار افتان ساده‌سازی شده، بار ثابت چندگانه و نفوذسنج مکشی اندازه‌گیری کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که در رطوبت اولیه مرطوب، بین مقادیر هدایت آبی اشباع حاصل از سه روش مذکور، در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. همچنین کاربرد روش‌های بار افتان ساده‌سازی شده و نفوذسنج مکشی را در اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در خاک‌های سنگین توصیه نمودند. رضایی‌پور و قبادی‌نیا (1391) دو روش نفوذسنج مکشی و استوانه‌های دوگانه را برای اندازه‌گیری پارامتر هدایت آبی اشباع خاک به کار بردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که بین مقادیر هدایت آبی اشباع حاصل از دو روش مذکور در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی‌دار وجود نداشت.

گوپتا و همکاران (1993)، برای مقایسه روش‌های مختلف صحرایی اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع (نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، شبیه باران‌ساز، نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی) مطالعاتی را در مورد دو نوع خاک در اتاوی کانادا انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان دادند که در خاک‌های رسی، روش نفوذسنج گلف دارای مقادیر کمتری

مزرعه با حداقل به هم‌خوردگی در سطح خاک دارد. این دستگاه را نیز می‌توان در محدوده توان ماتریک نزدیک صفر، یعنی جایی که منافذ خاک فعالیت آبی بالایی را در انتقال آب و املاح دارند، به کار برد (آنکنی و همکاران، 1991). با توجه به آن که مطالعات فراوانی به منظور اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع و دیگر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با روش‌های مختلف انجام شده است، در زیر به برخی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

ترابی (1383) پنج روش مختلف تعیین هدایت آبی اشباع خاک شامل روش چاهک، نفوذسنج استوانه‌های دوگانه (معادله‌ی نفوذ فیلیپ)، نفوذسنج گلف (معادله‌ی ریچاردز) و دو روش همبسته موسوم به شبیه ساکتون و همکاران و شبیه جابرو را مورد مطالعه قرار داد. نتایج نشان دادند که بالاترین ضریب تغییرات مربوط به روش استوانه‌های دوگانه بوده است. نتایج آزمون دانکن نشان دادند که به جز روش استوانه‌های دوگانه و نفوذسنج گلف، بین سایر روش‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال 5 درصد وجود داشته است. غفاری و همکاران (1386) هدایت آبی اشباع را در خاک متوسط رسی لومی در عمق 40 تا 50 سانتی‌متر از خاک با استفاده از روش‌های نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی اندازه گرفتند، بدین ترتیب که برای اندازه‌گیری‌های نفوذسنج گلف از دو بار فشاری 5 و 10 سانتی‌متری و برای اندازه‌گیری‌های نفوذسنج مکشی از چهار بار مکشی 1، 3، 6 و 10 سانتی‌متری، استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان دادند که میانگین هدایت آبی اندازه‌گیری شده در روش نفوذسنج مکشی بیشتر از نفوذسنج گلف است، و علت این امر را وجود نفوذ سه بعدی در زیر نفوذسنج مکشی بیان کردند.

یمین مشرفی و همکاران (1387) در منطقه‌ی دوشان سنندج تحقیقاتی را انجام دادند که طی آن دو روش استوانه‌های دوگانه و تک استوانه در سه قطعه زمین آزمایشی، و سه نمونه برای هر روش، مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که بین این دو روش در سطح احتمال 5 درصد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت؛ بنابراین، ضرورتی برای بهره‌وری از استوانه‌های دوگانه به

آزمایشگاهی، کوچک بودن نمونه‌های خاک، باعث افزایش ضریب تغییرات در این روش شده است. باگارلو و اسگوری (2007) هدایت آبی اشباع را با دو روش بار افتان ساده‌سازی شده و تک استوانه در یک خاک لوم شنی اندازه‌گیری نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که هدایت آبی اشباع به دست آمده از روش بار افتان ساده‌سازی شده مشابه روش تک استوانه می‌باشد.

اگرچه هر کدام از روش‌های مذکور استفاده‌ی فراوانی در مطالعات خاک و آب دارد، اما بسته به بافت و ساختمان خاک، شرایط منطقه‌ی مورد مطالعه و علت کاربرد روش، امکانات در دسترس و روش‌های مختلف تحلیل داده‌های به دست آمده از این روش‌ها نتایج متفاوتی حاصل شده است. از سوی دیگر، الگوی نفوذ آب به خاک و هدایت آبی اشباع خاک در خاک‌های مختلف، متفاوت است؛ لذا هدف از این پژوهش، مقایسه و ارزیابی روش‌های صحرایی اندازه‌گیری هدایت آبی خاک شامل استوانه‌های دوگانه، تک استوانه، نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی در یک خاک لومی بود.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه‌ای در ضلع غربی دانشگاه شهرکرد واقع در طول جغرافیایی 50 درجه و 49 دقیقه و 38/74 ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی 32 درجه و 21 دقیقه و 20/14 ثانیه شمالی، در سال 1390 انجام شد. برخی مشخصات خاک و آب مزرعه مورد مطالعه در جدول 1 آورده شده‌اند.

جدول 1- برخی ویژگی‌های خاک و آب مورد استفاده.

| ویژگی‌های آب                   |               |               |      |              | ویژگی‌های خاک                        |                                      |      |      |          |
|--------------------------------|---------------|---------------|------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------|------|----------|
| SAR<br>(mmol/L) <sup>0.5</sup> | TSS<br>(mg/L) | TDS<br>(mg/L) | pH   | EC<br>(dS/m) | چگالی حقیقی<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | چگالی ظاهری<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | pH*  | EC*  | بافت خاک |
| 0/13                           | 0             | 38            | 7/54 | 0/3          | 2/60                                 | 1/26                                 | 8/37 | 0/26 | لوم      |

\* اندازه‌گیری در عصاره یک: دو (خاک و آب مقطر)

دوگانه، دو استوانه به قطرهای داخلی 40 و 49 سانتی‌متر بطور هم محور تا عمق 8 سانتی‌متر در خاک فرو رفتند و داخل هر دو استوانه، عمقی معادل 11 سانتی‌متر آب ریخته شد. سپس اندازه‌ی ورود آب به خاک در استوانه

نسبت به آزمایش شبیه باران‌ساز، و دارای مقادیر مساوی و یا بیشتر نسبت به نفوذسنج مکشی و استوانه‌های دوگانه می‌باشد. مهناتی و همکاران (1994) چهار روش صحرایی اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع شامل روش‌های نفوذسنج گلف، نفوذسنج سرعتی، نفوذسنج قرص و استوانه‌های دوگانه، و یک روش آزمایشگاهی در مورد نمونه‌های دست نخورده را در چهار عمق و پنج بافت مختلف انجام دادند. در این تحقیق نفوذسنج گلف مقادیر هدایت آبی اشباع را کمتر، و روش‌های نفوذسنج قرص و استوانه‌های دوگانه مقادیر بیشترین هدایت آبی اشباع را نشان دادند، که احتمالاً "به ترتیب به خاطر کوچک و بزرگ بودن نمونه باشد. همچنین تغییرات زیاد مقادیر هدایت آبی اشباع در اعماق کم دیده شد.

لین و همکاران (1999) هدایت آبی اشباع را با استفاده از روش‌های تک استوانه، استوانه‌های دوگانه، نفوذسنج مکشی و نفوذسنج گلف اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان دادند که هدایت آبی اشباع اندازه‌گیری شده با استفاده از روش تک استوانه نسبت به سایر روش‌ها اختلاف معنی‌داری نداشته و می‌تواند به عنوان یک روش مناسب در اندازه‌گیری هدایت آبی خاک استفاده شود. رینولدز و همکاران (2000) هدایت آبی اشباع را در سه نوع خاک با بافت‌های شنی، متوسط و متوسط رسی با استفاده از روش‌های نفوذسنج قرص، نفوذسنج تک استوانه و روش نمونه‌های دست نخورده در آزمایشگاه اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان دادند که هدایت آبی اشباع اندازه‌گیری شده با استفاده از روش نفوذسنج مکشی به ترتیب در خاک‌های شنی، متوسط و متوسط رسی نسبت به دو روش دیگر کمتر است. همچنین، در روش

هدایت آبی اشباع خاک با استفاده از استوانه‌های دوگانه (DR)، تک استوانه (SR)، نفوذسنج گلف (GP) و نفوذسنج مکشی (TI) اندازه‌گیری شد. در هر روش، هر آزمایش با سه تکرار انجام گردید. در روش استوانه‌های

که در آن،  $q_s$  سرعت نفوذ پایه در شرایط ماندگار ( $LT^{-1}$ )،  $\alpha^*$  عکس طول درشت موینگی خاک است که به نوع خاک بستگی دارد ( $L^{-1}$ )،  $H$  متوسط عمق آب موجود روی سطح خاک ( $L$ )،  $c_1=0.316\pi$ ،  $c_2=0.184\pi$ ، ضرایب نیمه تجربی بدون بعد،  $d$  عمقی که استوانه در خاک وارد شده است ( $L$ )،  $r$  شعاع استوانه داخلی ( $L$ ) و  $k_s$  هدایت آبی اشباع خاک ( $LT^{-1}$ ) می‌باشد. در این رابطه  $\alpha^*$  از روش نفوذسنج مکشی محاسبه شد.

در روش نفوذسنج گلف، در هر نقطه چاهکی به قطر 10 و ژرفای 25 سانتی‌متر حفر گردید. سپس برای جلوگیری از مسدود شدن سوراخ‌های تعبیه شده در قسمت فرورونده‌ی دستگاه نفوذسنج گلف در چاهک بر اثر برخورد به کف آن، به اندازه 2 الی 3 سانتی‌متر در کف چاهک شن ریخته شد، و تمام چاهک‌ها قبل از اجرای آزمایش از 24 ساعت قبل بطور کامل اشباع گردیدند تا از ایجاد خطا به واسطه‌ی نفوذهای افقی و مرطوب نبودن خاک جلوگیری به عمل آید. همچنین با استفاده از یک برس جداره چاهک خراش داده شد تا حالت لیسه‌ای شدن (براق و صاف شدن) جداره چاهک در هنگام حفر آن با کاربرد مته حاصل می‌شود از بین رفته، و آب به راحتی به درون چاهک نفوذ کند. اندازه‌گیری‌ها در دو بار آبی ثابت  $H_1=11$  و  $H_2=19$  سانتی‌متر انجام شدند و در هر چاهک برای هر دو بار آبی ثابت، تغییرات سطح آب در مخزن گلف در واحد زمان اندازه‌گیری شد و هنگامی که طی 3 الی 4 بازه‌ی متوالی این مقدار ثابت ماند به عنوان نرخ جریان ثابت آب خارج شده از چاهک به خاک اطراف آن ( $R$ )، در نظر گرفته شد (رینولدز و الریک، 1985). سپس با استفاده از روابط زیر، هدایت آبی اشباع خاک تعیین گردید (رینولدز و همکاران، 1985).

$$k_s = A(E_2 R_2 - E_1 R_1), R_2 \mathbf{f} R_1 \quad (5)$$

$$E_1 = \frac{H_2 C_1}{\left\{ p \left[ 2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1) \right] \right\}} \left\{ \frac{H_2 \mathbf{f} H_1}{C_2 \mathbf{f} C_1} \right\} \quad (6)$$

$$E_1 = \frac{H_1 C_2}{\left\{ p \left[ 2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1) \right] \right\}} \left\{ \frac{H_2 \mathbf{f} H_1}{C_2 \mathbf{f} C_1} \right\} \quad (7)$$

که در آن‌ها،  $k_s$  هدایت آبی اشباع ( $LT^{-1}$ )،  $A$  سطح مقطع بین جداره‌ی داخلی منبع نفوذسنج گلف و جداره‌ی خارجی لوله ورود هوا که در این دستگاه

داخلی در شرایط بار ثابت تعیین گردید (باور، 1986). در این روش، هرگاه تغییرات سطح آب در استوانه داخلی در واحد زمان در سه اندازه‌گیری متوالی، مقادیر تقریباً یکسان و ثابتی شد، به عنوان نفوذ پایه ( $q_s$ ) در نظر گرفته شد و زمان رسیدن به نفوذ پایه از معادله زیر محاسبه شد (پرچی عراقی و همکاران، 2012).

$$\frac{dI}{dt} = -600 \left( \frac{d^2 I}{dt^2} \right) \quad (1)$$

که در آن،  $dI/dt$  تغییرات نفوذ تجمعی نسبت به زمان (سرعت نفوذ در هر لحظه) و  $d^2 I/dt^2$  تغییرات سرعت نفوذ نسبت به زمان می‌باشد. سپس بر داده‌های نفوذ تجمعی - زمان معادله‌ی سه جمله‌ای فیلیپ برازش داده شد. در این روش برای تخمین هدایت آبی اشباع از معادله‌ی مزبور به شکل زیر استفاده شد (کوئیلک و نیلسن، 1994):

$$I = C_1 t^{0.5} + C_2 t + C_3 t^{1.5} \quad (2)$$

$$k_s = (3 \times C_1 \times C_3)^{0.5} + C_2 \quad (3)$$

که در آن‌ها،  $I$  نفوذ تجمعی ( $L$ )،  $t$  زمان ( $T$ )،  $C_1, C_2, C_3$  ضرایب معادله‌ی فیلیپ می‌باشند.

در روش تک استوانه، استوانه‌ای به قطر داخلی 40 سانتی‌متر تا عمق 8 سانتی‌متر در خاک مستقر گردید و عمقی معادل 11 سانتی‌متر آب ریخته شد. سپس سرعت ورود آب به خاک در استوانه در شرایط بار ثابت تعیین گردید (باور، 1986). در این روش افت سطح آب در استوانه داخلی نسبت به زمان در 3 تکرار سنجش گردید و هرگاه تغییرات سطح آب در استوانه داخلی در واحد زمان در سه اندازه‌گیری متوالی، مقادیر تقریباً یکسان و ثابتی شد، به عنوان نفوذ پایه ( $q_s$ ) در نظر گرفته شد و زمان رسیدن به نفوذ پایه از معادله‌ی (1) محاسبه شد. همچنین فراسنج عکس طول درشت موینگی خاک با روش نفوذسنج مکشی به دست آمد؛ سپس برای تعیین هدایت آبی اشباع از رابطه زیر استفاده شد (رینولدز و الریک، 1990).

$$K_s = \frac{q_s}{\left[ \frac{H}{c_1 d + c_2 r} \right] + \left[ \frac{1}{a^* (c_1 d + c_2 r)} \right] + 1} \quad (4)$$

عامل شکل (حدود 0/25) و نمایه‌های X و Y توان‌های اعمال شده می‌باشند.

تجزیه و تحلیل‌های آماری نتایج حاصل شده در قالب طرح پایه‌ی کاملاً تصادفی با 4 تیمار (روش‌های اندازه‌گیری) و 3 تکرار با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.0 انجام گردید. همچنین، مقایسه‌ی میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال 1 درصد صورت گرفت.

### نتایج و بحث

این پژوهش با هدف مقایسه روش‌های مختلف اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک در مزرعه، با استفاده از 4 روش صحرائی شامل استوانه‌های دوگانه، تک استوانه، نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی انجام گرفت. نتایج حاصل گردیده از این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شده و نتایج زیر به دست آمدند.

### نتایج روش‌های اندازه‌گیری

در روش استوانه‌های دوگانه، ورود آب به خاک در استوانه داخلی در شرایط بار ثابت در 3 تکرار سنجش گردید. نتایج حاصل از این روش در جدول 2 ارائه شده است. شکل 1 نفوذ تجمعی در برابر زمان را در مزرعه‌ی مطالعاتی با کاربرد روش استوانه‌های دوگانه نشان می‌دهد. در روش تک استوانه، ورود آب به خاک در استوانه داخلی در شرایط بار ثابت در 3 تکرار سنجش گردید و فراسنج عکس طول درشت موپینگی خاک با کاربرد روش نفوذسنج مکشی برابر با  $\alpha^*=0/152$  بر سانتی‌متر به دست آمد. نتایج حاصل از این روش در جدول 3 ارائه شده‌اند.

آزمایش نفوذسنج گلف در 3 چاهک انجام شد و مقادیر مربوط به عامل بی‌بعد شکل چاهک در دو بار آبی ثابت 11 و 19 سانتی‌متر به ترتیب برابر با  $C_1=1/002$  و  $C_2=1/393$  به دست آمدند. نتایج حاصل از این روش در جدول 4 ارائه شده است.

آزمایش نفوذسنج مکشی در 3 تکرار انجام شدند. نتایج حاصل از این روش در جدول 5 ارائه شده است.

$R=\Delta H/\Delta T$ ،  $(L^2)$ ،  $A=3.674\hat{I} 10^{-3}$  مترمربع بود در چاهک  $(LT^{-1})$ ،  $\Delta H$  افت سطح آب در منبع نفوذسنج گلف  $(L)$ ،  $\Delta T$  مدت زمانی که آب به اندازه‌ی  $\Delta H$  افت می‌کند  $(T)$ ،  $H$  ارتفاع آب در داخل چاهک  $(L)$ ،  $a$  شعاع چاهک  $(L)$  و  $C$  عامل بدون بعد شکل چاهک می‌باشد. عامل شکل چاهک با داشتن  $H/a$ ، و با توجه به بافت خاک به دست آمد (زینولدز و الریک، 1987).

پیش از آغاز آزمایش نفوذ، با کاربرد روش نفوذسنج مکشی، سطح خاک از هر نوع پوشش گیاهی، سنگ و کاه و کلس تمیز شد و به سطح هموار و ترازوی تبدیل گردید. سپس بر روی این سطح آماده شده برای تماس بهتر قرص با سطح خاک، مقداری ماسه بادی نرم به شعاع قرص و به ضخامت حدوداً 5 میلی‌متر ریخته شد. بعد از آماده کردن محل هر آزمایش و قرار دادن دستگاه بر روی خاک، اندازه‌گیری‌ها در پنج بار مکشی 15-، 10-، 6-، 3- و 1- سانتی‌متر انجام شد. در هر تکرار برای هر پنج بار مکشی تغییرات سطح آب در مخزن قرص در واحد زمان تعیین شد، و هنگامی که طی 3 الی 4 بازه‌ی متوالی این مقدار ثابت ماند به عنوان سرعت نفوذ ثابت گردیده به ازاء مکش اعمال شده  $(q)$ ، در نظر گرفته شد (مک‌کنزی و همکاران، 2002). سپس با استفاده از روابط زیر هدایت آبی و عکس طول درشت موپینگی خاک تعیین گردید (زینولدز و الریک، 1991):

$$a^*_{(x,y)} = \frac{\ln(q_x/q_y)}{(\Psi_x - \Psi_y)}, \begin{cases} x = 1, 2, 3, \dots \\ y = x + 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$k_s = \frac{G_d \times a^*_{(x,y)} \times q_x}{r \times (1 + G_d \times a^*_{(x,y)} \times pr) \left( \frac{q_x}{q_y} \right)^p} \quad (9)$$

که در آن‌ها،  $\alpha^*$  فراسنج عکس طول درشت موپینگی است که به ساختمان خاک بستگی دارد  $(L^{-1})$ ،  $q$  سرعت نفوذ ثابت شده به ازاء مکش  $(\psi)$  اعمال شده  $(LT^{-1})$ ،  $k_s$  هدایت آبی اشباع خاک  $(LT^{-1})$ ،  $P = \psi_x / \psi_x - \psi_y$ ،  $G_d$ ،

جدول 2- نتایج روش استوانه‌های دوگانه در تکرارهای مختلف.

| شماره‌ی آزمایش | $q_s$ (cm/min) | $K_s$ (cm/min) |
|----------------|----------------|----------------|
| 1              | 0/292          | 0/285          |
| 2              | 0/307          | 0/302          |
| 3              | 0/325          | 0/312          |
| میانگین        | 0/310          | 0/302          |

جدول 3- نتایج روش تک استوانه در تکرارهای مختلف.

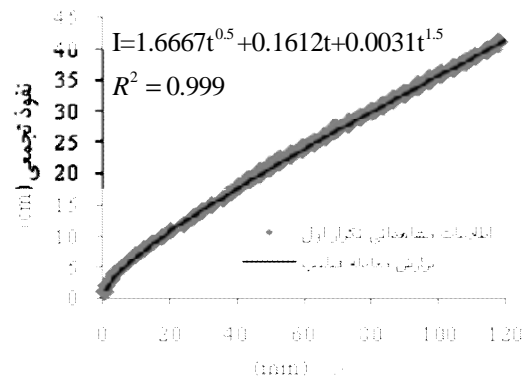
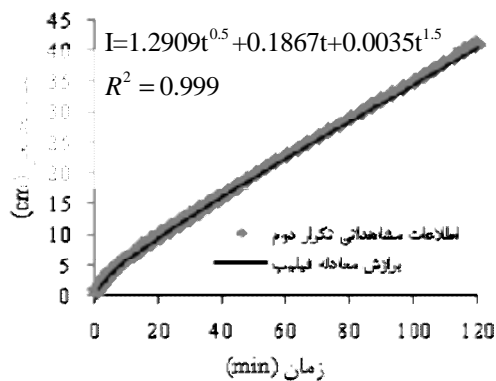
| شماره‌ی آزمایش | $q_s$ (cm/min) | $K_s$ (cm/min) |
|----------------|----------------|----------------|
| 1              | 0/451          | 0/236          |
| 2              | 0/472          | 0/247          |
| 3              | 0/490          | 0/256          |
| میانگین        | 0/471          | 0/246          |

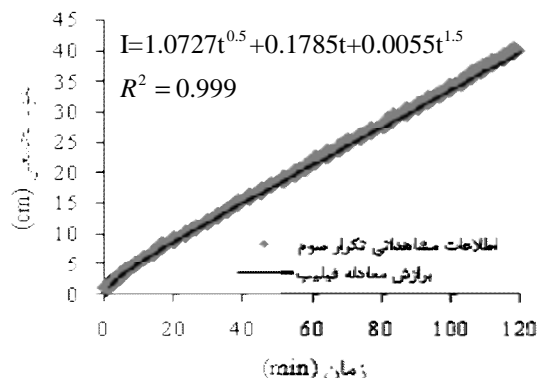
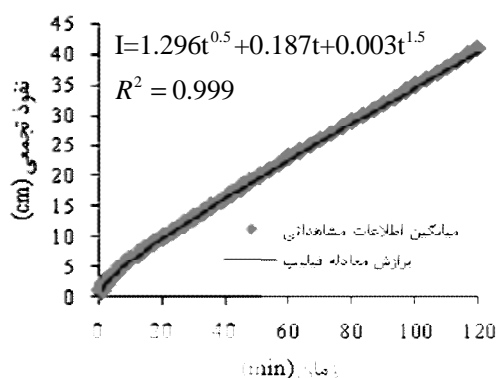
جدول 4- نتایج روش نفوذسنج گلف در تکرارهای مختلف.

| شماره‌ی آزمایش | $R_1$ (cm/min) | $R_2$ (cm/min) | $K_s$ (cm/min) |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1              | 0/367          | 0/633          | 0/010          |
| 2              | 0/400          | 0/700          | 0/011          |
| 3              | 0/433          | 0/767          | 0/013          |
| میانگین        | -              | -              | 0/011          |

جدول 5- نتایج روش نفوذسنج مکشی در تکرارهای مختلف.

| شماره‌ی آزمایش | $q_1$ ( $\psi=-15$ cm)<br>(cm/min) | $q_2$ ( $\psi=-10$ cm)<br>(cm/min) | $q_3$ ( $\psi=-6$ cm)<br>(cm/min) | $q_4$ ( $\psi=-3$ cm)<br>(cm/min) | $q_5$ ( $\psi=-1$ cm)<br>(cm/min) | $\alpha^*$<br>(1/cm) | $k_s$<br>(cm/min) |
|----------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1              | 0/100                              | 0/133                              | 0/200                             | 0/333                             | 0/467                             | 0/168                | 0/314             |
| 2              | 0/117                              | 0/167                              | 0/267                             | 0/400                             | 0/533                             | 0/144                | 0/327             |
| 3              | 0/100                              | 0/133                              | 0/200                             | 0/300                             | 0/400                             | 0/144                | 0/245             |
| میانگین        | -                                  | -                                  | -                                 | -                                 | -                                 | 0/152                | 0/295             |





شکل 1- نفوذ تجمعی به ازاء زمان در مزرعه مطالعاتی به روش استوانه‌های دوگانه.

این نتیجه با گزارش‌های یمین مشرفی و همکاران (1387) و علیزاه و همکاران (1388) مطابقت دارد. بنابراین مطابق با نظر یمین مشرفی و همکاران (1387) ضرورتی جهت استفاده از استوانه‌های دوگانه به جای استوانه‌ی منفرد وجود ندارد. همچنین مقدار هدایت آبی اشباع در روش استوانه‌های دوگانه 0/300 و در روش نفوذسنج مکشی 0/295 سانتی‌متر بر دقیقه به دست آمده است که نشان می‌دهد مقدار حاصل از روش استوانه‌های دوگانه، اندکی بیشتر از روش نفوذسنج مکشی است ولی این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نیست و به نظر می‌رسد بار آبی مثبت و سطح وسیع‌تر در روش استوانه‌های دوگانه باعث افزایش مقدار هدایت آبی می‌گردد و مطابق با نظر مرادی‌باصری و همکاران (1391) کاربرد روش نفوذسنج مکشی در اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در خاک‌های سنگین و خاک مزرعه مورد مطالعه در دانشگاه شهرکرد توصیه می‌شود. همچنین رئوف و همکاران (1390) و رضایی‌پور و قبادی‌نیا (1391) برای محاسبه هدایت آبی اشباع با استفاده از روش‌های استوانه‌های دوگانه و نفوذسنج مکشی، به نتایج مشابهی در این زمینه دست یافتند.

در این مطالعه نیز هدایت آبی اشباع به دست آمده از روش نفوذسنج مکشی بزرگتر از روش نفوذسنج گلف می‌باشد و دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان نمود که در نفوذسنج مکشی، نفوذ سه بعدی اما در نفوذسنج گلف، نفوذ یک بعدی می‌باشد و از سوی دیگر، سطح نمونه خاک مورد اندازه‌گیری در روش نفوذسنج مکشی (قطر دیسک 20 سانتی‌متر) نسبت به روش گلف (قطر چاهک 10

### مقایسه بین روش‌ها

با توجه به جدول 6، میانگین هدایت آبی اشباع اندازه‌گیری شده با روش‌های استوانه‌های دوگانه (DR)، تک استوانه (SR)، نفوذسنج گلف (GP) و نفوذسنج مکشی (TI) به ترتیب برابر با 0/011، 0/246، 0/300 و 0/295 سانتی‌متر بر دقیقه بود. بررسی نتایج نشان داد که بالاترین ضریب تغییرات مربوط به روش نفوذسنج مکشی بوده، و روش تک استوانه کمترین ضریب تغییرات را داراست.

نتایج تجزیه واریانس مربوط به تأثیر روش اندازه‌گیری بر هدایت آبی اشباع در جدول 7 آمده‌اند. بر این اساس، تأثیر روش اندازه‌گیری بر هدایت آبی اشباع در سطح احتمال 1 درصد معنی‌دار شده، و این بدان معنی است که روش اندازه‌گیری بر هدایت آبی اشباع مؤثر بوده است. بنابراین آزمون مقایسه میانگین‌ها صورت گرفت که نتایج آزمون در شکل 2 نمایش داده شده‌اند. با توجه به این شکل می‌توان گفت که در بررسی هدایت آبی اشباع، از لحاظ آماری در سطح احتمال 1 درصد، روش‌های استوانه‌های دوگانه، تک استوانه و نفوذسنج مکشی اختلاف معنی‌داری ندارند. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که از لحاظ آماری سه روش مذکور در تعیین هدایت آبی به یک میزان تأثیر داشته‌اند و اختلاف مشاهده شده بین آن‌ها قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

بررسی نتایج نشان داد که روش استوانه‌های دوگانه، مقادیر بزرگتری از هدایت آب اشباع را نسبت به روش تک استوانه به دست می‌آورد، اما از لحاظ آماری بین میانگین مقادیر هدایت آبی اشباع حاصل از دو روش مذکور در سطح احتمال 1 درصد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.



نظر کوک (2002) قرار دادن استوانه‌ی خارجی به عنوان بافر، باعث نزدیک شدن سرعت نفوذ واقعی به نرخ نفوذ یک بعدی می‌شود. از طرفی در روش‌های استوانه‌های دوگانه و تک استوانه، یک هد آبی بر روی سطح خاک قرار می‌گیرد و نفوذ آب در خاک به صورت غرقابی در سطح خاک اندازه‌گیری می‌شود. اما در نتایج حاصل شده از این پژوهش اختلاف کاربرد نفوذسنج گلف با سه روش دیگر بسیار زیاد است، و می‌توان دلیل اصلی این اختلاف غیرمنطقی را به این صورت بیان کرد که در عمق 25 تا 30 سانتی‌متری از سطح خاک یک لایه سخت با نفوذپذیری بسیار کم وجود داشت که منجر به کاهش نفوذ آب در خاک شد؛ و در نتیجه هدایت آبی اشباع خاک بسیار کم به دست آمد.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر است:  
 - از لحاظ آماری، بین روش‌های صحرائی شامل استوانه‌های دوگانه، تک استوانه و نفوذسنج مکشی برای اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در سطح احتمال 1 درصد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.  
 - با توجه به این کاربرد نفوذسنج مکشی نیاز به زمان اندکتر و آب کمتر نسبت به استوانه‌های دوگانه داشت، بنابراین می‌توان به جای استفاده از استوانه‌های دوگانه از نفوذسنج مکشی بهره برد.  
 - کاربرد روش نفوذسنج گلف منجر به ارائه‌ی نتایج نامعقول برای هدایت آبی اشباع خاک شده است، به گونه‌ای که با سه روش دیگر اختلاف بسیار زیادی داشت.  
 - علت اصلی متفاوت بودن نتایج کاربرد روش گلف با دیگر روش‌ها، وجود یک سخت لایه با نفوذپذیری کم در عمق 25 تا 30 سانتی‌متر از سطح زمین بود که سبب کاهش هدایت آبی اشباع خاک شده است.  
 - بر اساس نتایج این تحقیق، کاربرد روش نفوذسنج گلف برای اندازه‌گیری هدایت آبی لایه‌ی سطحی خاک در خاک‌های غیرهمگن (مشابه شرایط این آزمایش) توصیه نمی‌شود.

سانتی‌متر) بیشتر است. این نتیجه نیز با گزارش غفاری و همکاران (1386) مطابقت دارد.

نتایج نیز نشان می‌دهد که هدایت آبی اشباع به دست آمده از روش‌های استوانه‌های دوگانه، تک استوانه و نفوذسنج مکشی بزرگتر از نفوذسنج گلف می‌باشد. با این حال لین و همکاران (1999) بیان کردند که بین روش‌های تک استوانه، استوانه‌های دوگانه، نفوذسنج مکشی و نفوذسنج گلف به منظور اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک، اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همچنین ترابی (1383) بیان کرد که بین مقادیر هدایت آبی اشباع خاک با دو روش استوانه‌های دوگانه و نفوذسنج گلف اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. گوپتا و همکاران (1993) نیز نتیجه گرفتند که مقادیر هدایت آبی اشباع در روش نفوذسنج گلف بزرگتر و یا مساوی نفوذسنج مکشی و استوانه‌های دوگانه می‌باشد. یکی از دلایل عدم مطابقت نتایج این مطالعه با سایر مطالعات مذکور آن است که در روش نفوذسنج گلف اندازه‌گیری‌ها در عمق خاک صورت می‌گیرد و در اثر حفر چاهک با مته، دیواره خاک در چاهک، لایه‌ای شده و نفوذپذیری کاهش می‌یابد اما در سه روش استوانه‌های دوگانه، تک استوانه و نفوذسنج مکشی، اندازه‌گیری‌ها در سطح خاک انجام می‌گیرد و این روش‌ها خاک را بر هم نمی‌زنند و خلل و فرج را قطع نمی‌کنند و این امر باعث افزایش احتمال جریان از خلل و فرج درشت می‌شود. اما در این مطالعه با توجه به اینکه رطوبت اولیه خاک در هنگام حفر چاهک (12/93 درصد وزنی) کمتر از رطوبت ظرفیت زراعی (24/74 درصد وزنی) بوده است، عامل لایه‌ای شدن چاهک به عنوان دلیل غالب بر حاصل شدن هدایت هیدرولیکی اشباع بسیار کم در روش پرماتر گلف نمی‌باشد. همچنین دلیل دیگر این امر را می‌توان این‌طور بیان نمود که مطابق با نتایج مهندسی و همکاران (1994) به دلیل کوچکتر بودن اندازه نمونه در روش گلف نسبت به سه روش دیگر، هدایت آبی روش نفوذسنج گلف کمتر به دست آمده است. علت دیگر را نیز می‌توان به این صورت بیان کرد که در روش‌های تک استوانه و نفوذسنج مکشی، نفوذ آب در خاک به صورت سه بعدی می‌باشد و در روش استوانه‌های دوگانه، مطابق با

جدول 6- مقایسه هدایت آبی اشباع اندازه‌گیری شده برای چهار روش صحرائی.

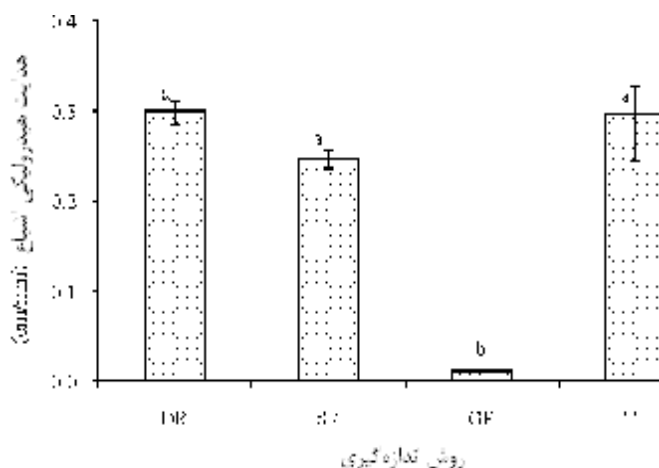
| نفوذسنج مکشی   | نفوذسنج گلف    | تک استوانه    | استوانه‌های دوگانه | هدایت آبی اشباع (cm/min) |
|----------------|----------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| (12/184) 0/295 | (11/005) 0/011 | (3/320) 0/246 | (3/719) 0/300      |                          |

اعداد داخل دوکمان نشان دهنده‌ی ضریب تغییرات می‌باشد.

جدول 7- تجزیه واریانس هدایت آبی اشباع برای روش‌های صحرائی.

| معنی‌داری | F      | میانگین مربعات | مجموع مربعات | درجه آزادی | منابع تغییرات | فراسنج          |
|-----------|--------|----------------|--------------|------------|---------------|-----------------|
| <0/0001** | 100/51 | 0/05607        | 0/16821      | 3          | تیمار         |                 |
|           |        | 0/00056        | 0/00447      | 8          | خطا           | هدایت آبی اشباع |
|           |        |                | 0/17267      | 11         | کل            |                 |

\*\* معنی دار بودن اثر روش اندازه‌گیری در سطح احتمال 1 درصد



شکل 2- مقایسه‌ی میانگین هدایت آبی اشباع اندازه‌گیری شده برای چهار روش صحرائی.

روش‌های اندازه‌گیری که حرف مشترک دارند از لحاظ آماری اختلاف بین آن‌ها در سطح احتمال 1 درصد معنی‌دار نمی‌باشد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از اداره‌ی تحصیلات تکمیلی دانشگاه شهرکرد به دلیل حمایت‌های مالی و مسئول محترم آزمایشگاه آبیاری، برای در اختیار قرار دادن امکانات انجام این پژوهش، سپاسگزاری می‌شود.

## منابع

- نفوذ و برخی از مشخصه‌های فیزیکی خاک. مجله دانش آب و خاک. (1)21: 57-68.
- علیزاده، ا. 1383. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). مشهد. 440 ص.
- علیزاده، ح. ع؛ ب. نظری و ع. لیاقت. 1388. ارزیابی روش بار افتان ساده شده در اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). (2)23: 55-62.
- غفاری، پ؛ ح. کشکولی و ر. مختاریان. 1386. مقایسه روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با استفاده از نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. بهمن ماه. دانشگاه کرمان.

- ترابی، م. 1383. بررسی پنج روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک شور. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک. 23 و 24 اردیبهشت ماه. دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.
- رئوف، م؛ س. ع. اشرف‌صدرالدینی، ا. ح. ناظمی و ص. معروفی. 1390. بررسی تأثیر شیب زمین روی میزان

- and interpretation for land evaluation. Part 7. CSIRO Publishing. pp. 108-118.
14. Gupta, R. K., Rudra, R. P., Dickinson, W. T., Patni, N.K. and Wall, G. J. 1993. Comparison of saturated hydraulic conductivity measured various field methods. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE. 36(1): 51-55.
  15. Iwanek, M. 2008. A method for measuring saturated hydraulic conductivity in anisotropic soils. Soil Science Society of America Journal. 72(6):1527-1531.
  16. Kutilek, M. and D. R. Nielsen. 1994. Soil hydrology. Catena Verlag Cremlingen. 370 pp.
  17. Lin, H. S., K. J. McInnes, L. P. Wilding and C. T. Hallmark. 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties: II. Hydraulic pedotransfer functions. Soil Science Society of America Journal. 63: 955-961.
  18. Lai, J. and Y. Luo. 2010. Buffer index effects on hydraulic conductivity measurements using numerical simulations of double-ring infiltration. Soil Science Society of America Journal. 74: 1526-1536.
  19. McKenzie, N. J., H. P. Cresswell and T. w. Green. 2002. Field measurement of unsaturated hydraulic conductivity using tension infiltration. In: McKenzie, N., K. Coughlan and H. Cresswell, Soil physical measurement and interpretation for land evaluation. Part 8. CSIRO Publishing. pp. 119-130.
  20. Mohanty, B. P., R. S. Kanwer and C. J. Everts. 1994. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. Soil Science Society of America Journal. 58(3): 672-677.
  21. Moret, D. and J. L. Arrue. 2007. Dynamics of soil hydraulic properties
  6. رضایی‌پور، ص. و قبادی‌نیا م. 1391. بررسی فرآیند نفوذ با استفاده از پرماتر دیسک و استوانه‌های مضاعف. سومین همایش ملی علوم کشاورزی و صنایع غذایی. 16 آذر ماه. دانشگاه آزاد اسلامی فسا.
  7. مرادی‌باصری، ح.، ش. قربانی‌دشتکی، ج. گیوی، ح. خداوردی‌لو و ب. خلیل‌مقدم. 1391. مقایسه سه روش صحرائی اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در برخی خاک‌های ورتی‌سول و انتی‌سول. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). 26(1): 173-182.
  8. یمین‌مشرقی، گ؛ ع. معروف‌پور، ب. بهرام‌نژاد و ا. فاریابی. 1387. بررسی فرآیند نفوذ با استفاده از استوانه‌های مضاعف و منفرد. سومین همایش منطقه‌ای یافته‌های پژوهشی کشاورزی و منابع طبیعی (غرب ایران)، 14 و 15 اسفند ماه. دانشگاه کردستان.
  9. Ankeny, M. D., Ahmed, M. T., Kaspar, C. and Horton, R. 1991. Simple field methods for determining unsaturated hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Journal. 55: 467-470.
  10. Bagarello, V. and Sgroi, A. 2007. Using the simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity at the surface of a sandy loam soil. Soil & Tillage Research. 94: 283-294.
  11. Boynton, S. S. and Daniel, D. E. 1985. Hydraulic conductivity test on compacted clay. Journal of Geotechnical Engineering. 111(4): 465-478.
  12. Bouwer, H. 1986. Intake rate. Cylinder infiltrometer. In: Klute A. (Eds), Methods of soil analysis. Part 1. America Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA. pp. 825-843.
  13. Cook, F. J. 2002. The twin-ring method for measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity in the field. In: McKenzie, N., K. Coughlan and H. Cresswell, Soil physical measurement

30. Reynolds, W. D., D. E. Elrick and E. G. Youngs. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). In: Dane, J. H. and G. C. Topp (Eds), *Methods of soil analysis, Part 4. Physical methods*, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA. pp. 818-826.
22. Parchami Araghi, F., S. M. Mirlatifi, S. Ghorbany Dashtaki and M. H. Mahdian. 2012. Point estimation of soil water infiltration process using artificial neural networks for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol>.
23. Reynolds, W. D. and D. E. Elrick. 1985. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity sorptivity parameter using guelph permeameter. *Soil Science*. 140(4): 292-302.
24. Reynolds, W. D., D. E. Elrick and B. E. Clothier. 1985. The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. *Soil Science*. 136: 172-180.
25. Reynolds, W. D. and D. E. Elrick. 1987. Laboratory and numerical assessment of the guelph permeameter method. *Soil Science*. 144: 244-282.
26. Reynolds, W. D. and D. E. Elrick. 1990. Pondered infiltration from a single ring: I. Analysis of steady state flow. *Soil Science Society of America Journal*. 54(5): 1233-1241.
27. Reynolds, W. D. and D. E. Elrick. 1991. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*. 55(3): 633-639.
28. Reynolds, W. D. 1993. Saturated hydraulic conductivity: field measurement. In: Carter, M. R. (Eds), *Soil Sampling and Methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton. 599-613.
29. Reynolds, W. D., B. T. Bowman, R. R. Brunke, C. F. Drury and C. S. Tan. 2000. Comparison osion infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*. 64(2): 478-484.