

ارزیابی روش بار افتان ساده شده در اندازه گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

حمزه علی علیزاده^۱ - بیژن نظری^{۲*} - عبدالمجید لیاقت^۳

تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۲۷

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) یکی از مهمترین مشخصه‌های فیزیکی خاک است که تخمین آن در مطالعات آب و خاک اهمیت زیادی دارد. در مناطقی که سطح آب زیر زمینی پایین است، روش‌های متعددی برای تخمین K_s وجود دارد که می‌توان به روش چاهک معکوس، استوانه مضاعف و نفوذسنج تک‌حلقه‌ای اشاره کرد. اندازه‌گیری K_s با این روش‌ها اغلب نیازمند صرف زمان زیاد و حجم آب فراوان می‌باشد. روش بار افتان ساده شده (SFH) یکی از روش‌های سریع اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی می‌باشد که حجم آب مورد نیاز آن کم بوده و حمل و نقل تجهیزاتش آسان است. از این رو، این روش برای مطالعات تفصیلی و افزایش تعداد نمونه‌برداری در گستره‌های وسیع بسیار مناسب است. در این مطالعه، به منظور ارزیابی کارایی روش SFH در تخمین K_s ، نتایج این روش با نتایج روش‌های نفوذسنج تک‌حلقه‌ای و استوانه مضاعف مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در خاک با بافت لومی روش SFH هدایت هیدرولیکی را به ترتیب ۹/۶ و ۱۸/۵ درصد بیشتر از استوانه مضاعف و نفوذسنج تک‌حلقه‌ای تخمین می‌زند. تحلیل آماری نتایج بدست آمده نشان داد که بین میانگین مقادیر بدست آمده برای K_s از سه روش فوق در سطح ۵ درصد اختلاف معنی داری وجود ندارد. طبق نتایج این مطالعه، با توجه به مزایای ذکر شده برای روش SFH، این روش می‌تواند به عنوان یک روش مناسب در تخمین K_s در خاک‌های لومی توصیه گردد.

واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی اشباع، نفوذسنج تک‌حلقه‌ای، استوانه مضاعف

مقدمه

جدید است، اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی آن قسمت از نیمرخ خاک که در بالای سطح ایستابی قرار گرفته است اهمیت فوق العاده‌ای دارد. روش‌های متعددی برای تخمین K_s در مناطقی که سطح آب زیرزمینی پایین است، ارائه شده است. این روش‌ها به دو دسته کلی صحرایی و آزمایشگاهی تقسیم‌بندی می‌شوند. در طرح‌های اجرایی، بیشتر از روش‌های صحرایی استفاده می‌شود. از روش‌های صحرایی معمول می‌توان به روش نفوذسنج تک‌حلقه‌ای^۴ (PI)، روش چاهک معکوس، روش استوانه مضاعف، روش نفوذسنج گلف^۵ (GP) و نفوذسنج ورود هوا^۶ (AEP) اشاره کرد. پایه و اساس اغلب روش‌های صحرایی متداول مبتنی بر دستیابی به جریان پایا می‌باشد (۱۷ و ۱۶ و ۱۵). لزوم دستیابی به جریان پایا در روش‌های صحرایی، استفاده از این روش‌ها را در خاک‌های سنگین بافت و با هدایت هیدرولیکی کم محدود می‌کند زیرا ایجاد جریان پایا در این خاک‌ها زمان زیادی را

هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) یکی از مهمترین مشخصات فیزیکی خاک است که نقش به‌سزایی در نفوذ آب در خاک، کنترل رواناب‌های سطحی، آب‌شویی مزارع کشاورزی و انتقال آلودگی‌های سطحی به آب‌های زیرزمینی دارد. K_s به عوامل متعددی از جمله خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، پایداری خاکدانه‌ها، اقلیم، عملیات شخم و زرع، کاربری اراضی، دینامیک ریشه و فعالیت موجودات زنده خاک بستگی دارد (۹). از این رو برای داشتن اطلاعات کافی از هدایت هیدرولیکی خاک و مدل کردن حرکت آب در خاک باید نمونه‌های زیادی از مزرعه برداشت شود. در مناطقی که اجرای طرح‌های عمرانی مستلزم آبیاری اراضی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران

* - نویسنده مسئول: (Email: binazari@ut.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

4- Single-Ring Pressure Infiltrometer
5- Guelph Permeameter
6- Air Entry Permeameter

با α^* از طریق رابطه زیر جایگزین شود (۵).

$$\alpha^* = \frac{K_{fs}}{\phi_m} = -\frac{1}{\psi_f} \quad (2)$$

که در آن $\phi_m (L^2 T^{-1})$ پتانسیل ماتریک جریان اشباع در مزرعه است (۱۰).

با توجه به رابطه (۲)، رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$t = \frac{\Delta\theta}{K_{fs}(1-\Delta\theta)} \left[\frac{I(t)}{\Delta\theta} - \frac{H_0 + \frac{1}{\alpha^*}}{(1-\Delta\theta)} \text{Ln} \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)I(t)}{\Delta\theta(H_0 + \frac{1}{\alpha^*})} \right) \right] \quad (3)$$

باگارلو و همکاران (۳) از رابطه (۳) برای تخمین K_s استفاده کردند. در این روش حجم معینی از آب (V) روی سطح خاک محدود شده به وسیله استوانه‌ای که تا عمق d در خاک فرو برده شده است، در مدت زمان T_a از سطح مقطع (A)، نفوذ کند. در زمان $T_a = t$ نفوذ تجمعی برابر $I(T_a) = H_0 = D = \frac{V}{A}$ می‌باشد. باگارلو و همکاران (۳) با جایگزینی پارامترهای فوق در رابطه (۳)، رابطه (۴) را برای تخمین K_{fs} ارائه کردند. این معادله اساس روش SFH می‌باشد.

$$K_s = \frac{\Delta\theta}{T_a(1-\Delta\theta)} \left[\frac{D}{\Delta\theta} - \frac{D + \frac{1}{\alpha^*}}{(1-\Delta\theta)} \text{Ln} \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)D}{\Delta\theta(D + \frac{1}{\alpha^*})} \right) \right] \quad (4)$$

در این معادله، $\Delta\theta$ اختلاف بین رطوبت حجمی اشباع و رطوبت اولیه خاک ($\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$)، اعشاری، D عمق آب ($D = \frac{V}{A}$)، میلی‌متر، V حجم آب نفوذ یافته (لیتر)، A سطح مقطع نفوذ (متر مربع)، T_a زمان نفوذ (دقیقه) و α^* (m^{-1}) پارامتری است که به بافت و ساختمان خاک وابسته است (۷). در رابطه (۴) برای اطمینان از یک بعدی بودن جریان، حجم آب به کار رفته باید کمتر یا مساوی حجم خلل و فرج آزاد خاک (حجمی از خلل و فرج خاک که با آب پر نشده است) باشد. این مسئله برای این است که چنانچه جبهه رطوبتی از انتهای استوانه عبور کند جریان یک بعدی به جریان سه بعدی تبدیل خواهد شد (۳). بر اساس گزارش وایت و سولی (۱۸) دامنه تغییرات پارامتر α^* بین ۰/۱ و ۱۰۰۰ می‌باشد. به طور کلی در آزمایش‌های بار افتان برای تخمین پارامتر α^* سه روش وجود دارد که شامل روش تخمین مستقل پارامتر α^* ، روش استفاده از جداول ارائه شده و روش آزمون و خطا می‌باشد.

می‌تواند (۷ و ۶). به طور کلی محدودیت‌های روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی تحت بار ثابت (پایا) عبارتند از: نیاز به زمان طولانی برای نصب دستگاه، زمان بر بودن اندازه‌گیری‌ها، حجم زیاد آب مورد نیاز (۱۰۰۰ لیتر و یا بیشتر) و لزوم حداقل دو نفر برای هر اندازه‌گیری (۱).

در خاک‌های سنگین بافت، می‌توان با استفاده از جریان انتقالی (غیر پایا) K_s را در مدت زمانی کوتاه اندازه‌گیری کرد (۱۳). باگارلو و اسگروی (۳) روش بار افتان ساده شده^۱ (SFH) را برای اندازه‌گیری سریع هدایت هیدرولیکی در خاک‌های سنگین بافت پیشنهاد کردند. این روش به حجم آب کمی نیاز دارد و حمل و نقل تجهیزات لازم در آن آسان است. در مطالعاتی که تاکنون انجام شده است، نتایج حاصل از روش SFH در برآورد K_s مشابه نتایج حاصل از سایر روش‌های آزمایشگاهی مانند روش بار ثابت (۸) و روش‌های صحرائی مانند روش نفوذسنج تک‌حلقه‌ای (PI) (۱۶ و ۴ و ۳) بوده است. استفاده از روش SFH و امکان برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مدت زمانی کوتاه، بدون نیاز به تجهیزات و یا روش‌های تحلیلی پیچیده بسیار امیدوار کننده به نظر می‌رسد زیرا امکان تفصیل در نمونه‌برداری‌ها و افزایش تراکم نمونه‌برداری در گستره‌های وسیع را فراهم می‌سازد. با این وجود سنجش قابلیت‌های این روش نیازمند آزمایش‌ها و بررسی‌های بیشتری است (۴).

با توجه به هزینه‌بر بودن روش‌های معمول تعیین K_s و مدت زمان زیادی که این روش‌ها لازم دارند و با توجه به مزایای روش جدید SFH، در این مطالعه به بررسی قابلیت‌های این روش پرداخته شده است. در این راستا نتایج روش SFH با روش‌های استوانه مضاعف و نفوذسنج تک حلقه‌ای (از روش‌های معمول تخمین K_s در بالای سطح ایستابی) مقایسه و ارزیابی شده است.

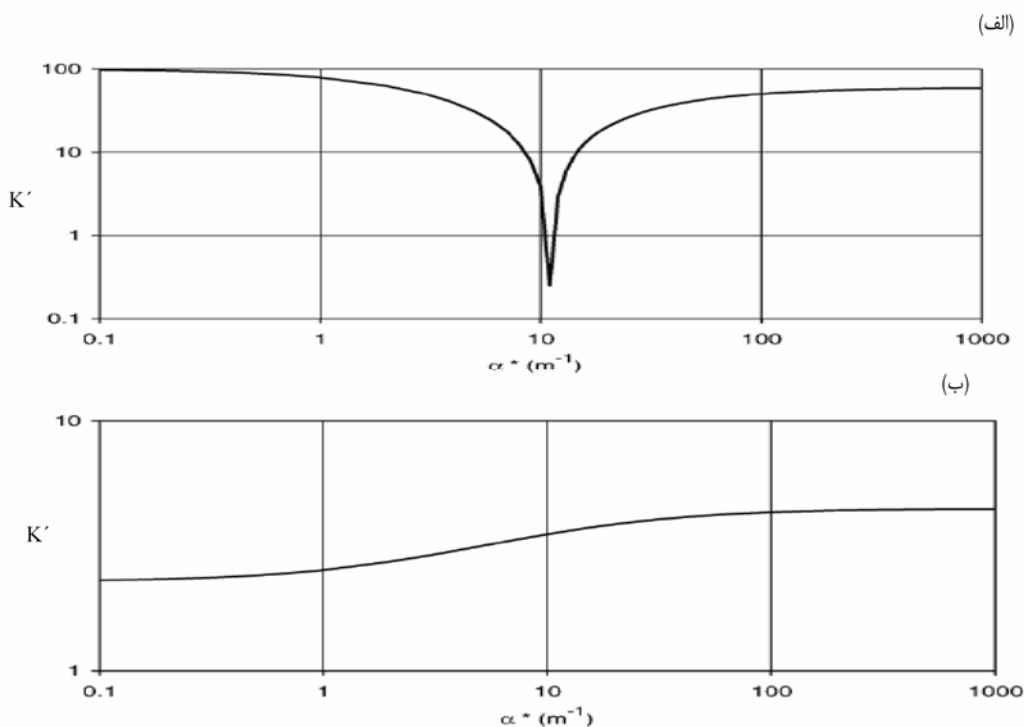
مواد و روش‌ها

تئوری روش SFH

فیلیپ (۱۴) بر اساس معادله گرین و امپ (۱۱) رابطه زیر را برای نفوذ تجمعی یک بعدی در شرایط بار افتان ارائه کرد:

$$t = \frac{\Delta\theta}{K_s(1-\Delta\theta)} \left[\frac{I(t)}{\Delta\theta} - \frac{H_0 - \Psi_f}{1-\Delta\theta} \text{Ln} \left(1 + \frac{(1-\Delta\theta)I(t)}{\Delta\theta(H_0 - \Psi_f)} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن t زمان، $\Delta\theta$ اختلاف بین رطوبت حجمی اشباع و رطوبت اولیه مزرعه، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، H_0 ارتفاع آب در داخل مخزن در زمان $t = 0$ و Ψ_f بار مکش مؤثر در جبهه رطوبتی که مقداری منفی دارد، $I(t)$ نفوذ تجمعی است. عبارت Ψ_f می‌تواند



(شکل ۱ الف و ب) - نمودارهای شماتیک روش تخمین مستقل پارامتر α^* (باگارلو و اسگری، ۲۰۰۴)

درشت دانه تغییر می‌کند و با ریزتر شدن این ذرات مقدار آن کاهش می‌یابد. در این خاک‌ها محدوده پارامتر α^* بین ۴ و ۱۲ گزارش شده است.

در تعیین α^* به روش آزمون و خطا، برای هر آزمایش مقادیر K_s و α^* به‌طور همزمان تخمین زده می‌شوند. برای این منظور ابتدا داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده (نفوذ تجمعی - زمان) را در معادله (۳) قرار داده و برای آزمون و خطا از قابلیت دستور Solver در نرم افزار اکسل استفاده می‌شود. در همه آزمایش‌ها مطابق پیشنهاد الریک و رینولدز (۷) مقدار $12 \text{ (m}^{-1}\text{)}$ به عنوان تخمین اولیه α^* در نظر گرفته می‌شود و با جایگزاری این مقدار در معادله (۴)، تخمین اولیه K_s بدست می‌آید. در ادامه به همین ترتیب با آزمون و خطای بین معادلات (۳) و (۴) مقدار α^* و K_s بهینه بدست می‌آید.

روش استوانه مضاعف و روش نفوذسنج تک حلقه ای

روش استوانه مضاعف یکی از روش‌های معمول در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مزرعه است. به علت شناخته بودن این روش، در اینجا به ارائه معادله نهایی مورد استفاده در محاسبه هدایت هیدرولیکی خاک بسنده می‌شود. معادلات (۵) و (۶) در این روش جهت محاسبه هدایت هیدرولیکی خاک استفاده می‌شوند. معادله (۵) به معادله سه جمله‌ای فیلیپ موسوم است (۱۲).

در روش تخمین مستقل پارامتر α^* که به روش دو نقطه‌ای نیز موسوم است، ابتدا دو جفت داده نفوذپذیری تجمعی $(I(t), t)$ انتخاب و سپس مقادیر هدایت هیدرولیکی معادل این جفت داده‌ها K_{s1} و K_{s2} به ازای مقادیر مختلف α^* با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌گردد. در انتخاب مقادیر α^* در این روش از مقدار ۰/۱ برای α^* آغاز کرده و در بازه‌های ۰/۱ تا ۱، ۱ تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۰۰ و ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مقادیر α^* را به ترتیب با فاصله‌های ۰/۱ و ۱ و ۱۰ و ۱۰۰ انتخاب می‌کنیم. در ادامه نمودار K' که معادل $\left| \frac{[K_{s2} - K_{s1}]}{K_{s1}} \times 100 \right|$ است، بر حسب α^* رسم شده و نقطه حداقل این نمودار به عنوان α^* بهینه انتخاب می‌گردد (شکل ۱-الف). چنانچه این نمودار همگرا نباشد باید از روش‌های دیگر تخمین α^* استفاده کرد. وایت و سولی (۱۸) نشان دادند که این نمودار در بعضی از خاک‌های لومی واگرا است (شکل ۱-ب).

چنانچه ذکر شد روش اول همواره مؤثر واقع نمی‌افتد. الریک و رینولدز (۷) بر اساس بافت و ساختمان خاک مقادیری را برای پارامتر α^* پیشنهاد کردند. مطابق این پیشنهادها مقدار α^* در خاک‌های رسی متراکم با ساختمان توده‌ای ۱، در خاک‌های ریز بافت و بدون ساختمان ۴، در خاک‌های لومی و رسی دارای ساختمان ۱۲ و برای خاک‌های سنگریزه‌ای و خاک‌های شنی درشت دانه با ساختمان خوب ۳۶ می‌باشد. در خاک‌های لومی پارامتر α^* بر حسب ذرات

(جدول ۱) - پارامترهای مورد نیاز روش SFH در تکرارهای مختلف

شماره آزمایش	تخلخل خاک	وزن مخصوص ظاهری $(\rho_b)^*$	حجم آب V (لیتر)	اختلاف رطوبت $(d\theta)$	متوسط رطوبت اولیه $(\theta_i)^{**}$	بار آبی D (متر)	زمان نفوذ T_a (دقیقه)
۱	۰/۵۱۵	۱/۳۰	۲/۸۲	۰/۴۶	۰/۰۵۵	۰/۰۴۶	۸/۳۸
۲	۰/۵۱۹	۱/۲۸	۳/۲۳	۰/۴۵۸	۰/۰۶۱	۰/۰۴۵۸	۱۰/۵
۳	۰/۵۲۶	۱/۲۷	۲/۸۴	۰/۴۶۱	۰/۰۶۵	۰/۰۴۶۱	۹/۴۵
میانگین	۰/۵۲۲	۱/۲۸	۲/۹۵	۰/۴۵۹	۰/۰۶۳	۰/۰۴۵۹	۹/۴۴

* متوسط وزن مخصوص ظاهری لایه سطحی تا عمق ۱۰ سانتی متری
 ** متوسط رطوبت اولیه لایه سطحی تا عمق ۱۰ سانتی متری

قرار داده و با یک چکش پلاستیکی به آرامی و تا عمق ۱۲ سانتی-متری به داخل خاک کوبیده شد. نصب استوانه‌ها باید به گونه‌ای انجام گیرد که کمترین تراکم و تخریب ساختمان در خاک ایجاد شود (۱۵). سطح خاک هر یک از نواحی انتخابی به آرامی مسطح گردید. برای کاهش احتمال خطای حاصل از جریان ترجیحی بین خاک و جداره استوانه، سطح خاک نزدیک دیواره‌های استوانه را به آرامی حرکت داده تا خاک با دیواره‌ها تماس داشته باشد. سپس حجم معینی از آب (۲/۸۲ تا ۳/۲۳ لیتر (بسته به میزان تخلخل و رطوبت خاک (جدول ۱-)) روی سطح خاک داخل استوانه ریخته شد. مدت زمان نفوذ این حجم آب (T_a) اندازه‌گیری گردید. برای بدست آوردن حجم آب مورد نیاز (V) دو روز قبل از انجام آزمایش SFH از خاک‌های مجاور استوانه دو نمونه دست نخورده با قطر و ضخامت یکسان ۵ سانتی‌متر بترتیب از عمق‌های ۵-۰ سانتی‌متر و ۱۰-۵ سانتی‌متر برداشت شد. وزن مخصوص ظاهری و درصد رطوبت اولیه خاک (میانگین درصد رطوبت حجمی) دو نمونه ۵-۰ و ۱۰-۵ سانتی‌متری تعیین گردید. با استفاده از وزن مخصوص ظاهری و وزن مخصوص حقیقی خاک، درصد رطوبت اشباع و حجم آب مورد استفاده (V) محاسبه گردید (جدول ۱).

در استوانه مضاعف در هر یک از محل‌های اندازه‌گیری، دو استوانه فولادی با ضخامت دو میلی‌متر و با قطرهای داخلی ۳۰ و ۶۰ به طور هم‌محور تا عمق ۱۲ سانتی‌متر در خاک نصب گردید. سپس به طور هم‌زمان داخل استوانه درونی و بیرونی تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر آب ریخته شود. ارتفاع نفوذ تجمعی آب نسبت به زمان یادداشت گردید. در هر نقطه، آزمایش به مدت ۱۵۰ دقیقه طول کشید. در نهایت با استفاده از معادلات (۵) و (۶) که در قسمت تئوری شرح داده شده است، هدایت هیدرولیکی خاک محاسبه گردید. در روش نفوذ سنج تک‌حلقه‌ای از استوانه‌های فولادی با قطر تقریبی ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع نصب ۲۵ سانتی‌متر استفاده گردید. در این روش نیز حدود ۱۰ سانتی‌متر آب داخل استوانه ریخته و سعی شد ارتفاع آب بین ۶ تا ۹/۵ سانتی‌متر ثابت بماند. در طول آزمایش دبی جریان مرتباً اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از رابطه (۷) هدایت هیدرولیکی محاسبه گردید.

$$I = C_1 t^{\frac{1}{2}} + C_2 t + C_3 t^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$$K_s \cong (3C_1 \cdot C_3)^{\frac{1}{2}} + C_2 \quad (6)$$

دقیقه خواهد بود.

یکی دیگر از روش‌های معمول و پر کاربرد اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در مزرعه، روش تراوش سنجی به وسیله نفوذ سنج تک حلقه‌ای (PI) است. اساس کار این روش برخلاف روش استوانه مضاعف و روش SFH بر جریان سه بعدی بنیان نهاده شده است. جریان سه بعدی حاصل از بار ثابت موجود در داخل استوانه که وارد خاک غیر اشباع می‌شود، با استفاده از رابطه زیر برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۶).

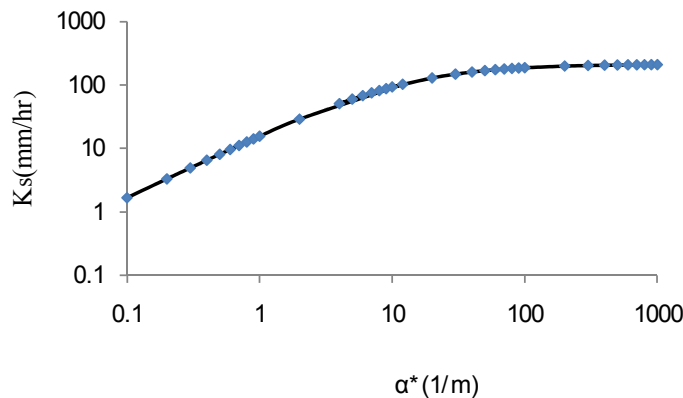
$$Kfs = \frac{(0.316(d/a) + 0.184)Q_s}{(0.316(d/a) + 0.184)\pi a^2 + a(H + (1/a^*))}$$

در این رابطه a شعاع استوانه، Q_s ($L^3 T^{-1}$) دبی جریان دائم، d عمقی از استوانه که داخل خاک قرار می‌گیرد، H (L) بار ثابت ایجاد شده و α^* (L^{-1}) پارامتری است که به بافت و ساختمان خاک وابسته است.

روش تحقیق

برای انجام این آزمایش سه نقطه مجاور هم در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران واقع در شهرستان کرج انتخاب گردید. بافت خاک مزرعه بر اساس سیستم طبقه بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) و استفاده از مثلث بافت خاک، لوم (۱۳٪ رس، ۳۹٪ سیلت و ۴۸٪ شن) است.

در هر یک از این نواحی برای انجام آزمایش SFH یک استوانه فولادی با ضخامت دو میلی‌متر نصب گردید. قطر داخلی هر یک از استوانه‌های انتخابی ۲۸ یا ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع هر یک از آنها ۲۵ سانتی‌متر بود. لبه تیز استوانه را به صورت عمودی روی سطح خاک



شکل ۲- نمودار هدایت هیدرولیکی بر حسب پارامتر α^*

همگرا نمی‌شود. به عبارت دیگر با افزایش مقدار α^* درصد خطا افزایش می‌یابد. این نتیجه با گزارش‌های وایت و سولی (۱۸) و باگارلو و اسگوری (۴) در مورد خاک‌های لوم مطابقت دارد (شکل ۱b). پس از اینکه روش تخمین مستقل نتوانست به جواب مطلوب منتج شود، روش‌های دیگر مورد بررسی قرار گرفت.

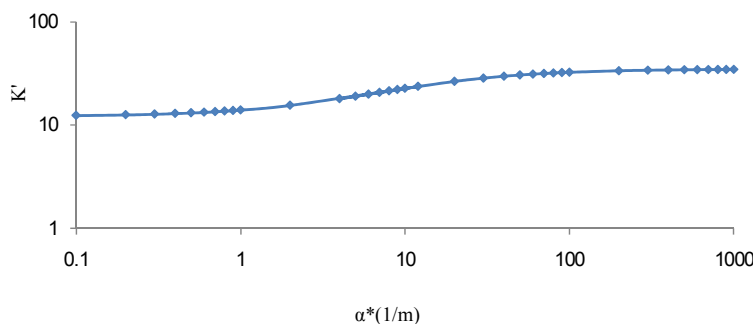
از طرفی روش دوم تخمین پارامتر α^* (استفاده از جدول ارائه شده توسط الریک و رینولدز، (۷) باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در محاسبه هدایت هیدرولیکی می‌شود. به طوری که اختلاف هدایت هیدرولیکی منتج از حد بالای α^* برای خاک‌های لوم ($\alpha^* = 12$) و حد پایین آن ($\alpha^* = 4$) بیشتر از ۱۰۰ درصد می‌باشد. به عبارتی این مسئله اطمینان‌پذیری استفاده از جدول ارائه شده را زیر سؤال می‌برد و بدین جهت در این مطالعه از این روش نیز استفاده نگردید. روشی که در این مطالعه برای برآورد مقدار α^* به کار گرفته شد، روش تخمین هم‌زمان α^* و K_s با استفاده از دستور Solver نرم افزار اکسل بود. جزئیات بیشتر در قسمت تئوری شرح داده شده است.

نتایج

روش SFH

مهمترین بخش محاسبه K_s به روش SFH، محاسبه پارامتر α^* می‌باشد. شکل ۲ نمودار هدایت هیدرولیکی خاک را بر حسب پارامتر α^* و حساسیت آن را نسبت به این پارامتر نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که با افزایش مقدار α^* از ۰/۱ تا ۴۰، K_s افزایش می‌یابد و از آن پس افزایش α^* تأثیر چندانی بر افزایش K_s ندارد. این نتیجه با نتایج الریک و رینولدز (۷) و وایت و سولی (۱۸) مطابقت دارد.

نظر به اهمیت روند محاسبه پارامتر α^* ، در این مطالعه از هر سه روش مطرح در این زمینه که در قسمت تئوری شرح داده شده است، استفاده شد. در آغاز در هر آزمایش SFH، از روش تخمین مستقل α^* استفاده شد. فاصله α^* ‌های انتخابی بر اساس توصیه وایت و سولی (۱۸) صورت گرفت و برای تعیین مقدار بهینه α^* نمودار K' که معادل $\left| \frac{K_{s2} - K_{s1}}{K_{s1}} \right| \times 100$ است، بر حسب α^* در مقیاس لگاریتمی رسم شد (شکل ۳). این شکل نشان می‌دهد که نمودار به ازای مقادیر α^* بین ۰/۱ تا ۱۰۰۰ هرگز



شکل ۳- نمودار $\left| \frac{K_{s2} - K_{s1}}{K_{s1}} \right| \times 100$ بر حسب α^*

(جدول ۲) - نتایج اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش SFH در تکرارهای مختلف

شماره آزمایش	هدایت هیدرولیکی اشباع K_s (mm/hr)	زمان نفوذ Ta (دقیقه)
۱	۹۱/۴	۸/۳۸
۲	۷۳/۱	۱۰/۵
۳	۸۱/۷	۹/۴۵
میانگین	۸۲/۰	۹/۴۴

(جدول ۳) - نتایج روش استوانه مضاعف در تکرارهای مختلف

روش استوانه مضاعف				روش نفوذسنج تک حلقه‌ای	
C_1	C_2	C_3	K_s (mm/hr)	K_s (mm/hr)	شماره آزمایش
۱/۳۴۴	۰/۰۳۷۶۵	۰/۰۰۲۷۱	۸۵/۳	۷۶/۸	۱
۱/۷۲۳۱۵	۰/۰۲۳۳۳	۰/۰۰۳۷۸	۵۷/۱	۵۸/۹	۲
۱/۱۷۱۵۲۳	۰/۰۲۳۳۳	۰/۰۰۳۵۲	۷۹/۹۹	۷۲/۰	۳
-	-	-	۷۴/۱۳	۶۹/۲	میانگین

روش‌های معمول اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی بالای سطح ایستابی می‌باشند، استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که اختلاف نتایج سه روش فوق در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی، قابل اغماض بوده است و نتایج سه روش در سطح ۵ درصد اختلاف معناداری با هم نداشته است. در این مطالعه مشاهده شد که زمان آزمایش و حجم آب مورد نیاز برای انجام هر آزمایش در روش SFH بسیار کمتر از روش استوانه مضاعف و نفوذ سنج تک حلقه‌ای است. به طوری که مدت زمان اندازه‌گیری و حجم آب مورد نیاز در روش SFH به‌طور متوسط ۹/۴۴ دقیقه و ۳ لیتر اندازه‌گیری شد، در حالی که این مقادیر برای روش استوانه مضاعف و نفوذ سنج تک حلقه‌ای به ترتیب ۱۵۰ و ۱۸۰ دقیقه و ۸۰ و ۶۰ لیتر اندازه‌گیری گردید. به عبارتی روش SFH در مدت زمانی کوتاه نتایجی مشابه روش‌های سخت و وقت گیر استوانه مضاعف و نفوذ سنج تک حلقه‌ای ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک در مدت زمان کوتاه و با حجم آب کم، کاربردی بودن روش SFH را در مطالعات صحرایی و در شرایطی که فراهم کردن آب آسان نیست افزایش می‌دهد. بنابراین این روش برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی و تهیه نقشه هدایت هیدرولیکی خاک منطقه (بافت لوم) و همچنین مدل کردن حرکت آب در خاک (که دستیابی به آنها مستلزم برداشت نمونه‌های زیاد می‌باشد) روش مناسبی است. با این وجود توصیه و کاربرد این روش در خاک‌های مختلف نیازمند آزمایش‌ها و بررسی‌های بیشتر می‌باشد. همچنین بررسی حساسیت روش نسبت به پارامترهای مطرح در آن می‌تواند در بالا بردن دقت روش مؤثر باشد.

در این مطالعه برای تسریع در همگرایی آزمون و خطا پس از هر مرحله آزمون و خطا برای کلیه جفت داده‌های نفوذ، متوسط α^* های بدست آمده پیش فرض مرحله بعد قرار گرفت. در نهایت مقدار پارامتر α^* برابر ۱۰/۲ بدست آمد. جدول ۲ نتایج اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش SFH در تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد.

روش استوانه مضاعف و نفوذ سنج تک حلقه‌ای

برای محاسبه هدایت هیدرولیکی به روش استوانه مضاعف، ابتدا با جایگذاری جفت داده‌های نفوذ تجمعی (t,I) در معادله (۵) ضرایب C_1 و C_2 و C_3 تعیین و سپس هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با استفاده از معادله (۶) محاسبه گردید. جدول ۳ نتایج روش استوانه مضاعف و نفوذسنج تک حلقه‌ای را در تکرارهای مختلف نشان می‌دهد.

مقایسه بین روش‌ها

با توجه به جداول ۲ و ۳ اختلاف میانگین هدایت هیدرولیکی نتایج نشان داد که روش SFH هدایت هیدرولیکی را به ترتیب ۹/۶ و ۱۸/۵ درصد بیشتر از روش استوانه مضاعف و روش نفوذسنج تک-حلقه‌ای تخمین می‌زند. در این آزمایش برای مقایسه میانگین‌های سه روش، از آزمون t در سطح ۵ درصد استفاده شد. نتایج نرم افزار MSTATC نشان داد که بین نتایج سه روش اختلاف معنی داری وجود ندارد. به بیانی دیگر اختلاف مشاهده شده بین سه روش قابل اغماض است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور ارزیابی روش بار افتان ساده شده (SFH) از روش‌های استوانه مضاعف و نفوذسنج تک حلقه‌ای که هر دو از

منابع

- ۱- برزگر، ع. ۱۳۸۰. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- 2- Bagarello, V., Iovino, M. and Elrick, D.E. 2004. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 66–73.
- 3- Bagarello, V. and Sgroi, A., 2004. Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Till. Res.* 76: 13–24.
- 4- Bagarello, V., Sgroi, A. 2007. Using the simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Till. Res.* 94: 283–294.
- 5- Elrick, D.E., Angulo-Jaramillo, R., Fallow, D.J., Reynolds, W.D., Parkin, G.W. 2002. Analysis of infiltration under constant head and falling head conditions. In: Raats, P.A.C., et al. (Eds.), *Environmental mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere*, Geophysical Monograph Series, Vol. 129. AGU, Washington, DC, pp. 47–53.
- 6- Elrick, D.E., Reynolds, W.D. 1992b. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. In: Topp, G.C., Reynolds, W.D., Green, R.E. (Eds.), *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. SSSA Special Publication No. 30, Madison, WI, pp. 1–24.
- 7- Elrick, D.E., Reynolds, W.D. 1992a. Methods for analyzing constant head well permeameter data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 320–323.
- 8- Fallow, D.J., Elrick, D.E., Reynolds, W.D., Baumgartner, N., Parkin, G.W. 1994. Field measurement of hydraulic conductivity in slowly permeable materials using early-time infiltration measurements in unsaturated media. In: Daniel, D.E., Trautwein, S.J. (Eds.), *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, ASTM STP 1142. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 375–389.
- 9- Fuentes, J.P., Flury, M., Bezdicsek, D.F. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional tillage and no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1679–1688.
- 10- Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85: 228–232.
- 11- Green, W.H., Ampt, G.A. 1911. Studies in soil physics. I. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1–24.
- 12- Kutilek, M. and D.R. Nielsen. 1994. *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen.
- 13- Odell, B.P., Groenevelt, P.H. Elrick, D.E., 1998. Rapid determination of hydraulic conductivity in clay liners by early-time analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 56–62.
- 14- Philip, J.R. 1992. Falling head ponded infiltration. *Water Resour. Res.* 28: 2147–2148.
- 15- Reynolds, W.D. 1993. Saturated hydraulic conductivity: field measurement. In: Carter, M.R. (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 599–613.
- 16- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. 1990. Ponded infiltration from a single ring. I. Analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1233–1241.
- 17- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., 1986. A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship. *Ground Water Monit. Rev.* (winter), 84–95.
- 18- White, I., Sully, M.J. 1992. On the variability and use of the hydraulic conductivity alpha parameter in stochastic treatments of unsaturated flow. *Water Resour. Res.* 28 (1): 209–213.



Evaluation of Simplified Falling Head (SFH) method for measuring saturated hydraulic conductivity

H.A. Alizadeh – B.Nazari* - A. Liaghat¹

Abstract

Determining saturated hydraulic conductivity (K_s) is one of the important soil characteristics that its estimation is important in soil and water studies. There are several methods for estimating K_s in unsaturated conditions. These methods include the inversed-auger-hole method, the double-ring infiltrometer and the single-ring pressure infiltrometer. The measurement of K_s by these methods requires large volumes of water and long period of time. The Simplified Falling Head (SFH) technique is for rapid determination of K_s , using small volumes of water and easily transportable equipments. The SFH technique appears hopeful and suitable for detailed and repeated sampling, also, over large areas. In this study, K_s was measured by SFH method, double-ring and single-ring pressure infiltrometers for evaluating SFH method. Results showed that in a loam soil, the SFH method estimate higher values for K_s , compared with the double-ring and the single-ring pressure infiltrometers (respectively 9.6% and 18.5%). Statistical analysis of the results of above methods showed that there is no significant difference between K_s values ($P < 0.05$). Results of this study showed that the SFH technique yielded reliable K_s values in a relatively short period of time without the need for extensive instrumentation or analytical methodology. So, it can be recommended as a suitable method in loam soils.

Key words: Saturated hydraulic conductivity, Single-Ring Infiltrometer, Double ring infiltrometer.

(* - Corresponding author Email: Email: binazari@ut.ac.ir)

1 - Contribution from College of Agriculture, Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran