

ارزیابی روش نفوذ بیرکن در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

مهدی کیخا^{۱*}، میثم امیری^۲ و محسن فراهی^۳

^{۱*} - نویسنده مسئول، مربی پژوهشکده تالاب بین المللی هامون، گروه مدیریت منابع آب، دانشگاه زابل، Mahdikeikha@uoz.ac.ir

^۲ - مربی پژوهشکده تالاب بین المللی هامون، دانشگاه زابل.

^۳ - مربی مجتمع آموزش عالی سراوان.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۸

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در شرایط مزرعه بسیار متغیر می‌باشد. بنابراین، تحلیل و شبیه سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی مثل روان آب حاصل از باران نیاز به تعداد زیادی داده هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حتی در مقیاس کوچک دارد. در این تحقیق، هشت روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع شامل: استوانه‌های مضاعف، دیسک مکشی، گلف، تک استوانه، بیرکن (بر اساس شیب)، بیرکن (بر اساس عرض از مبدأ)، وو ۱ و وو ۲ برای ارزیابی روش نفوذ بیرکن با هم مقایسه شده‌اند. در روش تک استوانه از یک استوانه فلزی به شعاع ۱۰ سانتیمتر استفاده شد. نتایج نشان داد که هدایت هیدرولیکی در روش وو ۱ با 0.104 سانتی‌متر بر دقیقه دارای بیشترین و روش دیسک مکشی (0.063 سانتی‌متر بر دقیقه) کمترین برآورد را دارند. همچنین روش‌های تک، استوانه‌های مضاعف و دیسک مکشی از لحاظ آماری با یکدیگر در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. همچنین هر دو روش بیرکن در یک گروه آماری قرار گرفت، اما مقدار هدایت هیدرولیکی برآورد شده در روش بیرکن (شیب)، 28 درصد بیشتر از روش بیرکن (عرض از مبدأ) بود. با توجه به نتایج این تحقیق هدایت هیدرولیکی برآورد شده با استفاده از روش بیرکن (شیب) نسبت به روش بیرکن (عرض از مبدأ) به واقعیت نزدیک‌تر بود. به طور کلی روش بیرکن می‌تواند جایگزین خوبی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و پرهیز از اندازه‌گیری‌های زمان‌بر میدانی باشد.

کلید واژه‌ها: تک استوانه، استوانه‌های مضاعف، بیرکن، هدایت هیدرولیکی اشباع، نفوذ.

Evaluation of Beerkan Infiltration Method in Estimation of Saturated Hydraulic Conductivity of Soil

M. Keikha^{1*}, M. Amiri² and M. Farahi³

^{1*} - Corresponding Author, lecturer of Hamoun International Wetland Research Institute, University of Zabol.

² - Lecturer of Hamoun International Wetland Research Institute, University of Zabol.

³ - Lecturer of Higher Education Complex Saravan.

Received: 16 April 2016

Accepted: 11 September 2016

Abstract

Determination of the field-saturated hydraulic conductivity can result in very high variability. So, analysis and simulation of hydrological processes such as runoff from rain requires a lot of data of field-saturated hydraulic conductivity even on a small scale. To identify this variability as well as its source, eight widely used measurement methods were compared: (Double-ring, Single-ring, Guelph permeameter, Tension infiltrometer, BEST_{slope}, BEST_{intercept}, Wu1 and Wu2) to evaluate the BEST method. In the single-ring method was used a metal cylinder with a radius of 10 cm. It was found that the maximum and minimum estimates of hydraulic conductivity are in Wu1 method (0.104 cm/min)

کیخا و همکاران: ارزیابی روش نفوذ بیرکن در برآورد هدایت...

and tension infiltrometer (0.0063 cm/min), respectively. The methods of double-ring, single-ring and Tension infiltrometer were not statistically significant differences at 5%. BEST methods were not statistically significant differences but BEST_{intercept} method 28% more than BEST_{slope} method. According to the experiment data, K_{fs} was estimated using the BEST_{intercept} method is closer to reality than BEST_{slope} method. In generally, the BEST methods can be a good alternative to estimate field-saturated hydraulic conductivity and prevent from a lot of field measurements.

Keywords: Single ring, Double ring, Beerkan, Field-saturated hydraulic conductivity, Infiltration.

(۲۰۰۷) به دلیل مبنای قوی، سرعت آزمایش و هزینه کم برای

محاسبه هدایت هیدرولیکی خاک کارایی دارند.

رئوف و همکاران (۱۳۹۰) گزارش کردند که مقادیر برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع با استفاده از استوانه‌های مضاعف بزرگتر از دیسک مکشی می‌باشد. ترابی (۱۳۸۴) پنج روش چاهک، استوانه‌های مضاعف، گلف، ساکسون و جابرو را با هم مقایسه کرد و نشان داد که بالاترین ضریب تغییرات هدایت هیدرولیکی در روش استوانه‌های مضاعف می‌باشد و روش‌های مختلف با یکدیگر در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار دارند. وربیست و همکاران (۲۰۰۹) با مقایسه روش‌های تک استوانه و دیسک مکشی به این نتیجه رسیدند که مقادیر هدایت هیدرولیکی اختلاف معنی‌دار با هم دارند. این تغییرات مقدار هدایت هیدرولیکی خاک با روش‌های متفاوت حتی در خاک‌های همگن (گونزی و همکاران^۹، ۲۰۱۱) نشان‌دهنده نقش بافت و ساختمان خاک در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد (رینولدز و همکاران، ۲۰۰۰).

از جمله روش‌های نوین اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک روش بیرکن^{۱۰} مبتنی بر آزمایش‌های نفوذ صحرایی است (هاورکمپ و همکاران^{۱۱}، ۱۹۹۶). در این روش به کمک یک حلقه ساده (تک استوانه) و اندازه‌گیری‌های ممتد نفوذ و رطوبت خاک، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی و نیز تحلیل توزیع اندازه ذرات می‌توان منحنی هدایت هیدرولیکی خاک را تعیین نمود (برود و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۵). سادگی، هزینه کم و قابلیت‌های این روش باعث استفاده گسترده آن شده است (ژو و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۲؛ گاله و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۱؛ برود و همکاران، ۲۰۰۳؛ باگارلو و همکاران^{۱۵}، ۲۰۱۱). بر مبنای آزمایش بیرکن، روش تخمین پارامترهای هدایت هیدرولیکی خاک با نام بیرکن^{۱۶} را (لاساباتر و همکاران^{۱۷}، ۲۰۰۶) ارائه نمودند. در این روش هدایت هیدرولیکی خاک با فرض روابط تحلیلی از

مقدمه

مدیریت پایدار منابع آب و خاک به خصوص با افزایش روزافزون جمعیت و کمبود منابع آب موجود، نیاز اساسی می‌باشد (روسکتروم و همکاران^۱، ۲۰۰۷). با توجه به مصرف اعظم منابع آب در بخش کشاورزی مخصوصاً در مناطق گرم و خشک که محدودیت منابع آب محسوس می‌باشد، نیاز به مدیریت بهینه منابع موجود از طریق شناخت ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد. اندازه‌گیری نفوذ و هدایت هیدرولیکی خاک یک بخش اساسی از این ویژگی‌ها می‌باشد که برای مدیریت کارای آب در مزرعه مورد نیاز است. هدایت هیدرولیکی، در تعادل آب در خاک، رشد محصول، انتقال املاح و مدل‌سازی فرسایش خاک کارایی دارد (وربیست و همکاران^۲، ۲۰۰۹). هدایت هیدرولیکی خاک را می‌توان به دو روش میدانی و آزمایشگاهی برآورد کرد. یکی از معایب روش‌های آزمایشگاهی، بر هم خوردن نمونه خاک می‌باشد (رینولدز^۳، ۱۹۹۳). اندازه‌گیری‌های میدانی هدایت هیدرولیکی می‌تواند به وسیله روش‌های مختلفی انجام شود. روش‌های میدانی گلف، دیسک مکشی، استوانه‌های مضاعف و تک استوانه از جمله این روش‌ها می‌باشند که روش استوانه‌های مضاعف به طور گسترده در این راستا مورد استفاده قرار می‌گیرد (رینولدز و الریک^۴، ۱۹۹۰). پایه این روش‌ها سرعت نفوذ آب در خاک در حالت شبه پایدار می‌باشد (رینولدز، ۱۹۹۳). برآورد هدایت هیدرولیکی در شرایط اشباع و غیر اشباع همراه با تغییرات زیادی حتی در مقیاس کوچک می‌باشد (آیوانک^۵، ۲۰۰۸. باور^۶، ۱۹۸۶). روش تک استوانه یکی دیگر از این روش‌ها بر مبنای فرض نفوذ سه بعدی از حلقه می‌باشد. جریان آب در حلقه بر اساس معادله ریچاردز حل شده و شرایط مرزی اعمال می‌شود و از جریان شبیه‌سازی شده یک بعدی هدایت هیدرولیکی محاسبه می‌شود (رینولدز و همکاران^۷، ۲۰۰۲). همچنین روش‌های گلف و اندازه‌گیری خروج ثابت آب از چاهک (رینولدز و الریک، ۱۹۸۷) و دیسک مکشی (مورت و آرو^۸،

9- Gwenzi *et al.*

10- Beerkan method

11- Haverkamp *et al.*

12- Braud *et al.*

13- Xu *et al.*

14- Galle *et al.*

15- Bagarello *et al.*

16- Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters

17- Lassabatere *et al.*

1- Rockstrom *et al.*

2- Verbist *et al.*

3- Rynolds

4- Rynolds and Elric

5- Iwanek

6- Bouwer

7- Rynolds *et al.*

8- Moret and Arro

آزمایش دیسک مکشی کف زمین صاف و تراز می‌شود. برای به دست آمدن سطح تماس خوبی مابین خاک و دستگاه یک لایه نازک ۳ میلی‌متری شامل ۹۹ درصد شن با قطر بیشتر از (۵۰ میکرومتر) روی پارچه‌ای که روی خاک قرار گرفته می‌شود، ریخته و تراز می‌گردد. ماسه به دلیل افزایش یکنواختی سطح تماس دیسک و خاک، و پارچه برای سهولت جابجایی ماسه به تکرارهای دیگر و برای جلوگیری از ورود خاک به داخل منافذ دیسک به کار می‌رود. آزمایش‌های نفوذسنج دیسک از مکش کمتر به مکش بیشتر (۱-، ۳-، ۵-، ۷- و ۱۰- سانتی‌متر) انجام می‌شود. همچنین با استفاده از آگر با حفر چاهک‌هایی به عمق ۵۰ سانتی‌متر در قطعه‌هایی از شبکه مورد نظر روش پرماترگلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. دستگاه پرماترگلف به منظور ایجاد بار ثابت فشاری در چاهک مورد نظر نصب می‌شود. تا زمانی که ارتفاع آب در چاهک به بار فشاری ۵ سانتی‌متری برسد اندازه‌گیری‌های نفوذ در هر دقیقه ثبت خواهد شد. زمانی که شرایط یکنواخت حاصل شود و میزان نفوذپذیری در سه بازه زمانی متوالی به مقدار ثابتی رسید بار فشاری به ۱۰ سانتی‌متر افزایش داده می‌شود و روند ثبت داده‌های نفوذ از سر گرفته می‌شود. توزیع اندازه ذرات نیز با استفاده از دستورالعمل اداره استاندارد جهانی (بی نام، ۲۰۱۰) معین شد.

تئوری محاسبات

برای هر یک از روش‌های نفوذ مورد استفاده، مجموعه‌ای از محاسبات با تئوری‌های متفاوت موجود می‌باشد که می‌توان از آنها برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده کرد. این محاسبات با توجه به تحلیل‌های عددی متفاوت، نیاز به تعیین پارامترهای منحصر به فرد دارد.

استوانه‌های مضاعف

روش‌های تحلیلی متنوعی بر پایه از حل عددی معادله ریچاردز بنا نهاده شده‌اند (ریچاردز^۷، ۱۹۳۱) که با توجه به نوع شرایط کاربردی می‌توانند به بررسی شرایط جریان در حالت سه بعدی و یا حالت ساده تر یعنی جریان یک بعدی عمودی بپردازند:

پارامترهای شکل با تحلیل توزیع اندازه ذرات خاک و پارامتر اندازه و همچنین آزمایش صحرایی نفوذ تحت بار هیدرولیکی صفر برآورد می‌شود (لاساباتر و همکاران، ۲۰۰۶). از معایب این روش در شرایط جذب آب زیاد، منفی شدن هدایت هیدرولیکی خاک می‌باشد که برای رفع این مشکل، روش بیرکن به دو روش بیرکن (بر اساس شیب معادله^۱) و بیرکن (بر اساس عرض از مبدأ معادله^۲) اصلاح گردید (ایلماز و همکاران^۳، ۲۰۱۰). روش بیرکن توسط بسیاری از دانشمندان به دلیل ساختار تحلیلی و کم هزینه بودن آن توصیه شده‌است (مبارک و همکاران^۴، ۲۰۱۰؛ گونزالز-سوسا و همکاران^۵، ۲۰۱۰؛ باگالرو و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳؛ باگالرو و یووینو^۶، ۲۰۱۲). آزمایشات ژو و همکاران (۲۰۱۲)، موسوی و همکاران (۱۳۹۴) و ایلماز و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که مقادیر پارامتر هدایت هیدرولیکی با استفاده از روش بیرکن (بر اساس عرض از مبدأ معادله) بیشتر از روش بیرکن (بر اساس شیب معادله) می‌باشد. در این تحقیق هدایت هیدرولیکی اشباع در منطقه سیستان با استفاده از روش‌های مختلف، برای ارزیابی و کارایی روش بیرکن در سه تکرار انجام شد و در نهایت نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه و با توجه به اعتبار فیزیکی هدایت هیدرولیکی تخمینی عملکرد هر یک از آنها مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در اراضی کشاورزی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی زهک در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق شهر زابل (E ۴۹°۴۰'۶۱ و N ۳۸°۵۳'۳۰) با ۴۸۳ متر ارتفاع از سطح دریا، متوسط بارندگی ۵۵ میلی‌متر و ۴۵۰۰ میلی‌متر تبخیر، در سه تکرار انجام شده‌است. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

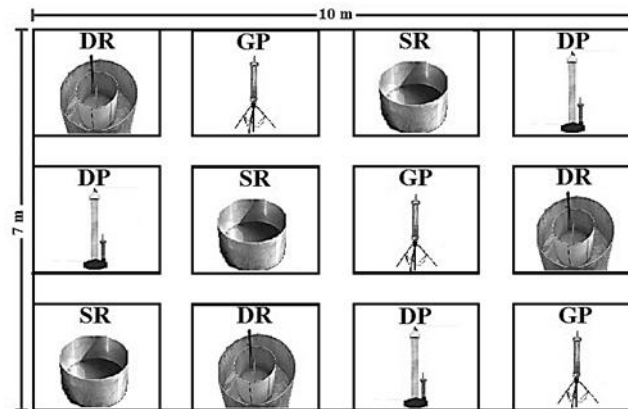
آزمایش در زمینی به طول ۱۰ و عرض ۷ متر برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به وسیله چهار دستگاه اندازه‌گیری نفوذ استوانه‌های مضاعف (DR)، تک استوانه (SR)، گلف (GP) و دیسک مکشی (DP)، انجام شده‌است (شکل ۱). برای روش تک استوانه، از یک استوانه فلزی به شعاع ۵ سانتی‌متر و روش استوانه-های مضاعف دو استوانه آهنی متحدالمرکز به شعاع‌های (۱۳ و ۲۶ سانتی‌متر) به عمق حداقل ۵ سانتی‌متر وارد خاک می‌شود. آزمایش تا زمان اندازه‌گیری سه قرائت یکسان ادامه می‌یابد (لاساباتر و همکاران، ۲۰۰۶؛ مبارک و همکاران، ۲۰۱۰). به منظور انجام

- 1- BESTslope
- 2- BESTintercept
- 3- Yilmaz *et al.*
- 4- Mubarak *et al.*
- 5- Gonzalez-Sosa *et al.*
- 6- Bagarello and Iovino

کیخا و همکاران: ارزیابی روش نفوذ بیر کن در بر آورد هدایت...

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

عمق (سانتی-متر)	درصد وزنی رطوبت (درصد)	ذرات خاک (درصد)	بافت خاک	کربن آلی (درصد)	سدیم (میلی گرم در لیتر)	جرم مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)
۰-۵۰	۷/۴	۱۰/۹	رس سیلت شن	لومی شنی	۲۳۲/۱	۱/۲۷
	۵۱/۸۹	۶۲/۸				۲/۶۹



شکل ۱- طرح میدانی اندازه گیری نفوذ بوسیله استوانه های مضاعف (DR)، تک استوانه (SR)، گلف (GP) و دیسک مکشی (DP)

استوانه (متر)، در این رابطه α^* از روش نفوذسنج مکشی محاسبه می شود.

تک استوانه

از دیگر روش های مورد استفاده در این تحقیق می باشد که به حل نیمه تحلیلی معادله ریچاردز با برازش بر منحنی نفوذ تجمعی و به صورت جریان تک بعدی می پردازد (تالسما و پارلنگ^۲، ۱۹۷۲):

$$I = \frac{I}{K_{fs}} - \frac{S^2}{2K_{fs}^2} \left[\exp\left(\frac{-K_{fs}I}{S^2}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

که در آن، I: نفوذ تجمعی (متر) و S: ضریب جذب خاک (متر بر مجذور دقیقه) می باشد.

روش ووا

این روش با فرض اینکه منحنی نفوذ تجمعی می تواند مراحل نفوذ را شرح دهد بنیان نهاده شده است:

$$I = St^{0.5} + A_p t \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \left[K(\theta) \left(1 + \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن، t: زمان (دقیقه) ، K: هدایت هیدرولیکی (متر بر دقیقه)، ψ : فشار آب (متر)، z: ارتفاع عمودی از سطح مبنا (متر) و θ : رطوبت حجمی می باشد. از جمله متداول ترین این روش ها رابطه (رینولدز و الریک، ۱۹۹۰) می باشد که با استفاده از داده های به دست آمده از روش تک استوانه ای در شرایط جریان یکنواخت هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را تخمین می زند:

$$K_{fs} = \frac{q_s}{\pi R_s^2 \{ [H/(C_1 d + C_2 R_s)] + [1/\alpha^* (C_1 d + C_2 R_s)] + 1 \}} \quad (2)$$

که در آن، q_s : سرعت نفوذ پایه در شرایط ماندگار (متر بر دقیقه)، α^* : عکس طول درشت موینگی خاک است که به نوع خاک بستگی دارد و بیانگر اهمیت نسبی نیروهای گرانشی و موینگی در فرایند نفوذ می باشد (رتز^۱، ۱۹۷۶)، K_{fs} : هدایت هیدرولیکی اشباع (متر بر دقیقه)، H: متوسط عمق آب موجود روی سطح خاک (متر)، $C_1 = 0.184\pi$ ، $C_2 = 0.316\pi$ ضرایب نیمه تجربی بدون بعد، d: عمقی که استوانه در خاک وارد شده است (متر)، r: شعاع

2- Talsma and Parlange

1- Raats

بافت لومی ۰/۱۲ سانتی‌متر و برای خاک رسی ۰/۰۴ سانتی‌متر می‌باشد. برای به دست آوردن هدایت هیدرولیکی اشباع از معادله (۱۰) استفاده می‌شود.

$$K_s = \frac{i}{af} \quad (11)$$

روش بیرکن

روش بیرکن بر پایه رابطه بروکس و کوری به تخمین هدایت هیدرولیکی می‌پردازد (بروکز و کوری، ۱۹۶۴):

$$\frac{K(\theta)}{K_{fs}} = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta \quad (12)$$

برای یک آزمایش نفوذ، میزان نفوذ تجمعی سه بعدی را با وجود فشار صفر بر روی سطحی دایره‌ای شکل، با شعاع r (متر) در یک خاک همگن با توزیع یکنواخت رطوبت در شرایط ابتدایی آزمایش و در حالت غیرماندگار و انتقالی نفوذ براساس رابطه دو جمله‌ای صریح زیر برآورد می‌کنند (لاساباتر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$I(t) = S\sqrt{t} + (E S^2 + F K_{fs})t \quad (13)$$

و در حالت ماندگار نفوذ:

$$I_{+\infty}(t) = (ES^2 + K_s)t + G \frac{S^2}{K_s} \quad (14)$$

$$q_s = ES^2 + K_s \quad (15)$$

که، I : نفوذ تجمعی در شرایط نفوذ غیرماندگار، $I_{+\infty}$: نفوذ تجمعی در شرایط ماندگار، q_s : سرعت نفوذ در شرایط ماندگار، S : ضریب جذب خاک (متر بر مجذور دقیقه) و E ، F و G : ضرایب ثابت می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند (هاورکمپ و همکاران، ۱۹۹۴):

$$E = \frac{\gamma}{r(\theta_s - \theta_0)} \quad (16)$$

$$F = \frac{2-\beta}{3} \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right] + \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta \quad (17)$$

$$G = \frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right]^{1-\beta}} \ln \left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (18)$$

که A و B ضرایب تجربی هستند. ضرایب تجربی این معادله با استفاده از منحنی نفوذ حاصل از نتایج میدانی تک استوانه به دست می‌آید. بنابراین هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از معادله (۵) محاسبه می‌شود (وو و همکاران، ۱۹۹۹):

$$K_s = \frac{\Delta\theta(\sqrt{(H+G)^2 + 4GC} - (H+G))}{2T_c} \quad (5)$$

که در آن، $\Delta\theta$: تفاوت بین رطوبت حجمی اولیه و اشباع خاک، H : ارتفاع متوسط آب درون استوانه فلزی (متر) و C ، G و T_c : ضرایبی هستند که با استفاده از معادله‌های (۶) تا (۸) به دست می‌آیند. در این تحقیق از تخلخل خاک به جای رطوبت اشباع استفاده شده است (لاساباتر و همکاران، ۲۰۱۰؛ مبارک و همکاران، ۲۰۱۰ و ایلماز؛ همکاران، ۲۰۱۰):

$$G = d + \frac{r}{2} \quad (6)$$

$$C = \frac{1}{4\Delta\theta} \left(\frac{B}{b}\right)^2 \frac{a}{A} \quad (7)$$

$$T_c = \frac{1}{4} \left(\frac{Ba}{bA}\right)^2 \quad (8)$$

در این معادله‌ها، d : و r : به ترتیب عمق آب و شعاع استوانه (متر)، $a=0/9084$ و $b=0/1682$ می‌باشد.

روش وو

در این معادله با فرض ثابت شدن نفوذ در آزمایش میدانی، می‌توان هدایت هیدرولیکی اشباع را به دست آورد. بدین منظور بین معادله (۴) و قسمت انتهایی منحنی میدانی نفوذ (نفوذ ثابت) رگرسیون گرفته می‌شود:

$$I = it + c = afK_s t + c \quad (9)$$

که i : در این معادله شیب منحنی نفوذ (قسمت ثابت نفوذ)، a : ثابت بدون بعد $0/9084$ و f : ضریب تصحیح می‌باشد که به شکل استوانه و نوع خاک بستگی دارد و از معادله (۹) به دست می‌آید:

$$f = \frac{H + \left(\frac{1}{\alpha}\right)}{G} \quad (10)$$

که H : عمق آب (متر) و α : بستگی به بافت خاک دارد، طبق پیشنهاد (وو و همکاران، ۱۹۹۹) برای بافت شنی $0/36$ بر سانتی‌متر،

کیخا و همکاران: ارزیابی روش نفوذ بیرکن در برآورد هدایت...

$$K_{fs} = \frac{G_2 Q_2 - G_1 Q_1}{2\pi H^2 + G\pi r^2 + (2\pi H/\alpha^*)} \quad (22)$$

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi[2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (23)$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi[2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + r^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (24)$$

Q_s : سرعت نفوذ جریان پایدار (متر بر دقیقه)، H : حد بار فشار آب داخل مخزن (متر)، r : شعاع چاهک (متر) و C : ضریب شکل و بی بعد می‌باشد.

دیسک مکشی

روش جریان پایدار در تحقیقات محققانی همچون آنکنی و همکاران^۲ (۱۹۹۱)، لوگسدون و جینز^۳ (۱۹۹۳)؛ رینولدز و الریک (۱۹۸۵) به کار برده شده است.

در این روش با به کارگیری معادله‌های آنکنی و همکاران (۱۹۹۱) مقدار مناسب برای هدایت هیدرولیکی ($K(\psi)$) با میانگین گیری از مقادیر به دست آمده هدایت هیدرولیکی در دو بار فشاری ψ_1 و ψ_2 (بار فشاری بیشتر) به دست می‌آید:

$$(\psi_1) = \frac{q_{\infty}(\psi_1)}{1 + \left(\frac{2}{\pi R}\right) \frac{(\psi_1 - \psi_2)[q_{\infty}(\psi_1) + q_{\infty}(\psi_2)]}{q_{\infty}(\psi_1) - q_{\infty}(\psi_2)}} \quad (25)$$

$$K(\psi_2) = \frac{q_{\infty}(\psi_2) K(\psi_1)}{q_{\infty}(\psi_1)} \quad (26)$$

در رابطه فوق ψ : مکش (متر)، q_{∞} : سرعت نفوذ حجمی جریان پایدار برای یک مکش معین (مترمکعب بر دقیقه)، R : شعاع دیسک مکش (متر) و $K(\psi)$: هدایت هیدرولیکی (متر بر دقیقه) در بارهای مکشی منفی (ψ) می‌باشند.

تحلیل آماری

برای محاسبه خطای نسبی (Et) از معادله (۲۶) استفاده شده است که نشان دهنده دقت همگرایی نتایج حاصل از مدل های نفوذ با داده‌های میدانی می‌باشد (لاساباتر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$E_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (y_i^{exp} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^k (y_i^{exp})^2}} \quad (26)$$

که θ_0 و θ_s : به ترتیب شعاع استوانه، رطوبت اولیه و اشباع خاک می‌باشند همچنین η : ضریب شکل است که از توزیع اندازه ذرات خاک و تخلخل خاک می‌تواند برآورد شود (برای جزییات مراجعه شود به لاسابتر و همکاران (۲۰۰۶) و موسوی و همکاران، (۱۳۹۴)، همچنین با توجه به تحقیقات هاورکمپ و همکاران (۱۹۹۴) و اسمتیم و همکاران^۱ (۱۹۹۴) مقادیر B و γ در شرایط $\theta_s < 0.25 \theta_0$ به ترتیب 0.06 و 0.75 می‌باشند.

در این روش ابتدا سرعت نفوذ در شرایط ماندگار (qs) به وسیله برازش نفوذ تجمعی بر قسمت انتهایی منحنی نفوذ میدانی به دست می‌آید. سپس ضریب جذب خاک (S) با فرض حرکت آب در خاک صرفاً تحت تأثیر موینگی ($E=0$) و با برازش قسمت غیر ماندگار منحنی نفوذ با معادله (۱۲) تخمین زده می‌شود. البته این تخمین فقط در شرایط غیرماندگار معتبر است. در گام آخر بر مبنای مقدار واقعی ضریب ثابت E معادله های (۱۲) تا (۱۴) بر داده‌های نفوذ تجمعی میدانی برازش داده می‌شود. با توجه به اهمیت تعیین محدوده جریان غیرماندگار نفوذ و به کارگیری آن در تخمین‌های مورد نظر این کار بر مبنای پارامتر t_{max} (حداکثر زمان رخ دادن جریان غیرماندگار یا انتقالی) انجام می‌شود (لاساباتر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$T_{max} = \frac{1}{4(1-F)^2} t_{grav} \quad (19)$$

$$T_{grav} = \left(\frac{S}{K_s}\right)^2 \quad (20)$$

ایلماز و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند در مواردی که $AS^2 \geq Ks$ روش بیرکن (بر اساس عرض از مبدأ) به برآورد غیر واقعی هدایت هیدرولیکی اشباع ختم می‌شود، لذا برای رفع این مشکل و برآورد صحیح هدایت هیدرولیکی اشباع در چنین شرایطی معادله‌های روش بیرکن را با استفاده از عرض از مبدأ بخش ماندگار منحنی نفوذ تجمعی ($+\infty$) و معادله (۱۳) اصلاح نمودند:

$$K_s = G \frac{S^2}{b_{+\infty}} \quad (21)$$

در این تحقیق روش ابتدایی بیرکن با عنوان بیرکن (بر اساس شیب) و روش اصلاح شده با نام بیرکن (بر اساس عرض از مبدأ) مشخص می‌باشد.

پرومتر گلف

در این روش اندازه‌گیری‌ها در دو بار آبی ثابت H_1 و H_2 سانتی‌متر انجام می‌شوند و سپس با استفاده از معادله‌های زیر، هدایت آبی اشباع خاک تعیین می‌گردد (رینولدز و الکریک، ۱۹۸۵):

2- Ankeny et al

3- Logsdon and Jaynes

1- Smettem et al

گرفته‌اند. باگارلو و همکاران (۲۰۱۶) در اندازه گیری هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از روش تک استوانه دریافتند که ناهمگنی خاک باعث تفاوت هدایت هیدرولیکی در این روش با سایر روش ها می باشد. طبق نظر مرادی باصری و همکاران (۱۳۹۱) روش دیسک مکشی بیشتر برای خاک‌های سنگین توصیه می‌شود. روش پرمامتر گلف نیز با روش‌های استوانه‌های مضاعف، تک استوانه و دیسک مکشی اختلاف معنی‌دار دارد و هدایت هیدرولیکی را بیشتر از این روش‌ها تخمین زده است. نفوذ سه بعدی در این روش نسبت به نفوذ یک بعدی در روش های یاد شده عامل این افزایش می‌باشد (غفاری و همکاران، ۱۳۸۶، گوپتا و همکاران، ۱۹۹۳).

در دیسک مکشی (DP) معادله آنکنی و همکاران (۱۹۹۱) در مکش‌های پایین با داده‌های میدانی تفاوتی ایجاد نمی‌کند و به خوبی مدل سازی صورت می‌پذیرد اما در مکش‌های بالا در شرایط اشباع خاک با داده‌های میدانی اختلاف ایجاد می‌شود، که نشان دهنده دقت پایین هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از این روش در فشارهای بالا می‌باشد (وربیسست و همکاران، ۲۰۱۲). علت این امر بر می‌گردد به شرایط دانه‌بندی خاک و ناپوستگی‌هایی کوچک ماتریس خاک (لوگسدون و جینز، ۱۹۹۳) که باعث تفاوت سرعت نفوذ در مکش‌های متفاوت می‌شود (فیس و همکاران، ۲۰۰۲). تحقیقات باگارلو و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که بهترین همگرایی بین هدایت هیدرولیکی حاصل از روش بیرکن و دیسک مکشی وقتی اتفاق می‌افتند که هدایت هیدرولیکی در روش دیسک مکشی در مکش‌های پایین اندازه گیری شود.

در روش پرمامتر گلف (GP) میزان هدایت هیدرولیکی در تکرارهای مختلف آزمایش نسبت به سایر روش‌ها دارای تغییرات بیشتری می‌باشد که علت آن افزایش ناهمگنی خاک در عمق‌های زیرین می‌باشد (وربیسست و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین در تکرار دوم در این روش هدایت هیدرولیکی منفی شده است که یکی از مشکلات رایج استفاده از روش تخمین هدایت هیدرولیکی با دو عمق می‌باشد. باگارلو و پروونزانو^۴ (۱۹۹۶) دلیل آن را در عدم توجه به شرایط رطوبت اولیه خاک در این مدل توصیف می‌کنند. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل مدل‌سازی های نفوذ بیرکن، منحنی‌های تغییرات نفوذ تجمعی نسبت به زمان در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل‌ها وضعیت جریان انتقالی که فقط در بازه زمانی (۰ و t_{max}) اعتبار دارند نمایش داده شده است. پس از برآورد پارامترها در روش بیرکن علاوه بر مبنای خطای نسبی از معیار مثبت بودن مقادیر برآوردی پارامتر قابلیت جذب و هدایت هیدرولیکی و معیار برقراری رابطه $q_{+\infty}^{exp} > K_s$ در صورت برآورد درست ضریب

که y_i^{exp} ($i=1\dots k$) داده های نفوذ میدانی و y_i ($i=1\dots k$) نیز نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های مربوطه می‌باشد. بالطبع هر چه میزان خطای نسبی کمتر باشد نشان دهنده همگرایی بیشتری با داده‌های میدانی نفوذ می‌باشد. کمترین مربعات خطای غیر خطی برای بهترین همگرایی بین مدل‌ها و داده های میدانی محاسبه شده است. تحلیل‌های آماری نیز با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شده است.

نتایج و بحث

با تعیین توزیع اندازه ذرات خاک پارامترهای m (بر اساس دو فرض $m=1-1/n$ و $m=1-2/n$ ، n فاکتور شکل (پارامتر تجربی)) و Dg (پارامتر مقیاس) برآورد شده‌است. با توجه به تحلیل آماری هدایت هیدرولیکی در روش‌های مختلف، روش وو با 0.104 سانتی متر بر دقیقه دارای بیشترین و روش دیسک مکشی 0.063 سانتی متر بر دقیقه) کمترین برآورد را دارند. همچنین روش‌های تک، استوانه‌های مضاعف و دیسک مکشی از لحاظ آماری با یکدیگر در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار ندارند. گرچه روش‌های بیرکن در یک گروه آماری قرار گرفته‌اند اما مقدار هدایت هیدرولیکی برآورد شده در روش بیرکن (عرض از مبدأ) 28 درصد بیشتر از روش بیرکن (شیب) می‌باشد (شکل ۲). نتایج تحقیقات (ایلماز و همکاران، ۲۰۱۰) نیز نشان دهنده تخمین بیشتر هدایت هیدرولیکی روش روش بیرکن (عرض از مبدأ) نسبت به بیرکن (شیب) می‌باشد. دقت پایین روش وو به دلیل تغییرات زیاد تخمین هدایت هیدرولیکی می‌باشد. از بین روش‌های مورد استفاده تک استوانه (وو، وو، وو، بیرکن) (عرض از مبدأ)، بیرکن (شیب) و تک استوانه، روش‌های وو و بیرکن (عرض از مبدأ) دارای بیشترین تخمین می‌باشند. از لحاظ آماری نیز این روش‌ها با یکدیگر در سطح 5% اختلاف آماری دارند. مدل‌های وو در شرایط اشباع خاک همگرایی ضعیفی با منحنی‌های نفوذ میدانی داشتند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش تک استوانه مقادیر بیشتری از هدایت هیدرولیکی را نسبت به استوانه‌های مضاعف نشان می‌دهد، اما از لحاظ آماری در سطح پنج درصد اختلاف معنی‌دار با یکدیگر ندارند. هدایت هیدرولیکی بیشتر در این روش نسبت به استوانه‌های مضاعف، نفوذ افقی در خاک به دلیل عدم وجود استوانه مجزا می‌باشد در صورتی که در روش استوانه‌های مضاعف نفوذ خاک صرفاً عمودی می‌باشد (کوک^۱، ۲۰۰۲). این نتیجه با تحقیقات یمین مشرفی و همکاران (۱۳۸۷) و عزیزاده و همکاران (۱۳۸۸) مطابقت دارد.

مطابق نظر یمین مشرفی و همکاران (۱۳۸۷) ضرورتی برای استفاده از استوانه‌های مضاعف به جای تک استوانه ندارد. همچنین میزان هدایت هیدرولیکی در روش استوانه‌های مضاعف و دیسک مکشی از لحاظ آماری تفاوتی ایجاد نکرده و در یک گروه آماری قرار

2- Gupta et al.

3- Fies et al.

4- Bagarello and Provenzano

1- Cook

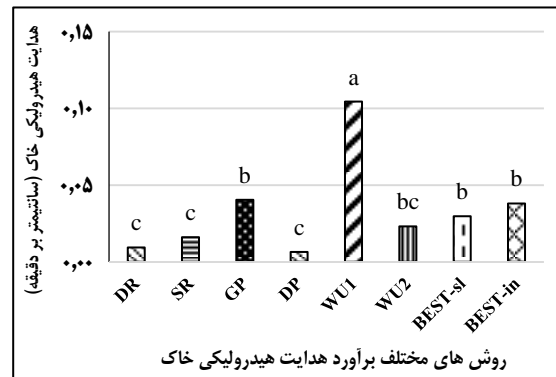
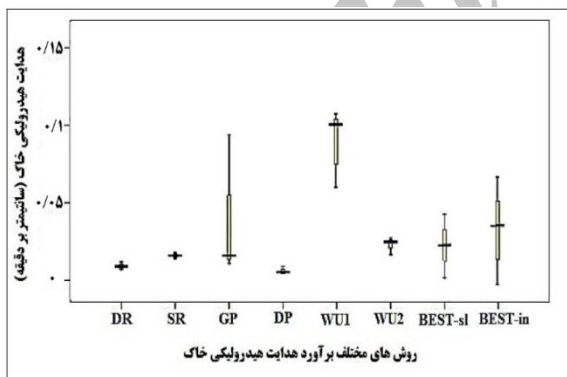
کیخا و همکاران: ارزیابی روش نفوذ بیرکن در برآورد هدایت...

زیاد ES^2 به سرعت نفوذ ماندگار در معادله (۱۴) می‌باشد. همچنین ایلماز و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند هنگامی که تخمین ES^2 از سرعت نفوذ در انتهای آزمایش تجاوز کند، مقدار هدایت هیدرولیکی منفی می‌شود. به همین دلیل فرمول بیرکن (شیب) را به بیرکن (عرض از مبدأ) اصلاح کردند تا موارد ذکر شده برطرف گردد. ضرایب β و γ مورد استفاده در این تحقیق (به ترتیب $0/75$ و $0/6$) برای شرایط خشکی خاک در ابتدای نفوذ ($\theta_0 < 0.25\theta_s$) می‌باشد. مطالعات لاسابتر و همکاران (۲۰۰۶) نشان می‌دهد بر اساس شبیه-سازی‌های عددی، ضرایب β و γ وابستگی کمی به درجه اشباع خاک دارد.

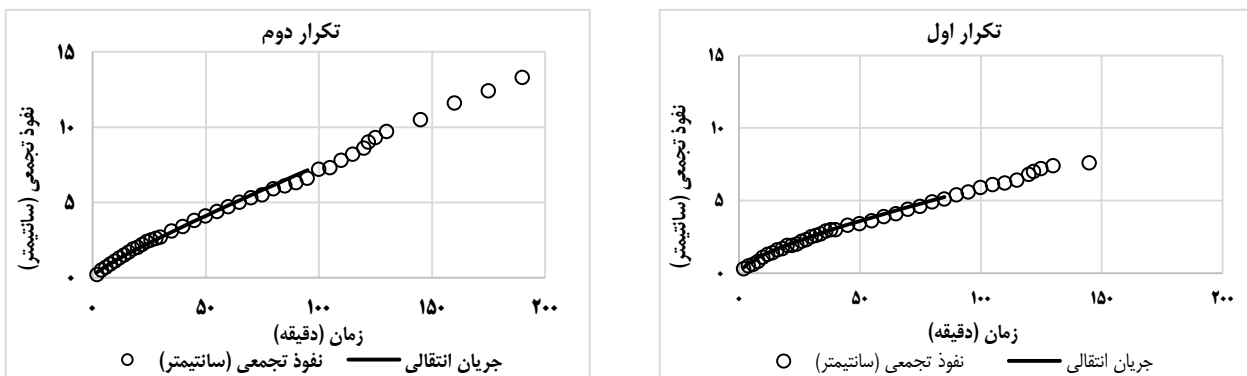
از لحاظ میزان خطای نسبی، روش استوانه‌های مضاعف و وو ۱ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان دقت می‌باشند. همچنین دقت روش‌های روش بیرکن (شیب) از بیرکن (عرض از مبدأ) بیشتر می‌باشد. از بین روش‌های مورد آزمایش، روش‌های استوانه‌های مضاعف، تک استوانه، پرامتر گلف، وو ۲ و بیرکن (شیب) دارای خطای نسبی زیر ۶ درصد هستند. اما مدل‌سازی‌های به کار رفته در روش‌های بیرکن (عرض از مبدأ)، دیسک مکشی و وو ۱ خطای نسبی بالاتر از ۶ درصد دارند (شکل ۴). البته با توجه به بافت خاک مورد آزمایش (لومی شنی)، بخشی از دقت پایین مدل‌سازی‌ها به ضریب جذب نسبتاً بالای بافت خاک بر می‌گردد.

جذب و هدایت هیدرولیکی، برای بررسی اعتبار فیزیکی پارامترهای برآوردی استفاده شده است. بر همین اساس در نقاط مورد آزمایش میزان ضریب جذب در بازه ($0 < S < S_{max}$) قرار گرفته و منجر به مثبت بودن این پارامترها و همچنین بیشتر بودن سرعت نفوذ نسبت به هدایت هیدرولیکی مدل سازی شده، می‌باشد. در تحقیق ایلماز و همکاران (۲۰۱۰) روش بیرکن (عرض از مبدأ) موفق به برآورد پارامترهای اندازه در همه نمونه‌ها شده است. اما روش بیرکن (شیب) در خاک‌های با قابلیت جذب زیاد قادر به مدل‌سازی نمی‌باشد. بر اساس این روش برای خاک‌هایی که $KS \leq AS^2$ باشد قادر به تخمین هدایت هیدرولیکی نمی‌باشد. گرچه در نقاط مورد آزمایش روش‌های بیرکن موفق به تخمین هدایت هیدرولیکی شده‌اند، اما روش بیرکن (عرض از مبدأ) دارای دقت کمتری نسبت به بیرکن (شیب) می‌باشد (شکل ۴). نتایج پارامترهای تخمینی با این دو روش نشان می‌دهد که گرچه مقادیر ضریب جذب تخمینی در یک محدوده می‌باشند اما هدایت هیدرولیکی حاصل از مدل‌سازی آنها دارای تفاوت فاحشی هستند.

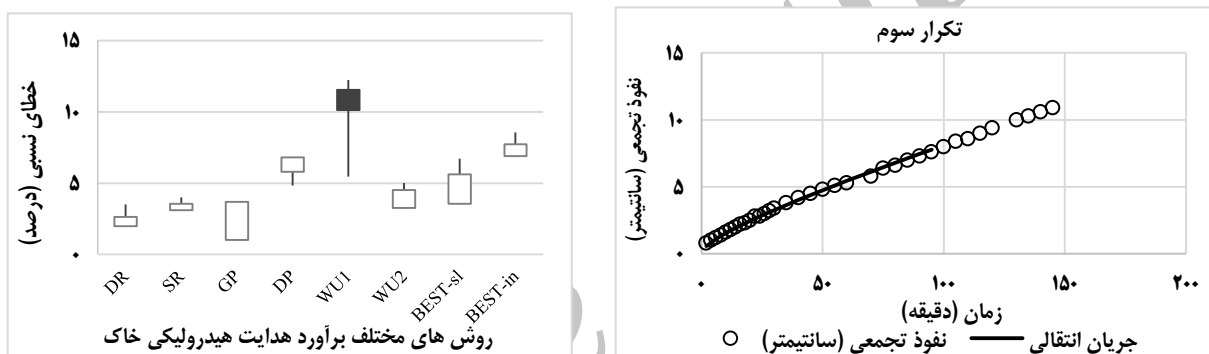
در خاک‌های دارای شن زیاد تخمین هدایت هیدرولیکی با این روش دچار مشکل می‌شود. علت این امر عدم به دست آوردن داده کافی در شرایط غیرماندگار نفوذ که در روش بیرکن مورد نیاز می‌باشد، است (ژو و همکاران، ۲۰۰۹). مشکل دیگر روش بیرکن (عرض از مبدأ) تخمین خیلی کم هدایت هیدرولیکی در بعضی مواقع به دلیل نزدیکی



شکل ۲- مقایسه میانگین روش‌های مختلف برآورد هدایت هیدرولیکی (سمت راست) و تغییرات برآورد هدایت هیدرولیکی در تکرارهای مختلف (سمت چپ)



شکل ۳- نمونه ای از تشکیل جریان انتقالی و ماندگار نفوذ در مدل سازی به روش بیرکن (عرض از مبدأ)



شکل ۴- نمونه ای از تشکیل جریان انتقالی و ماندگار نفوذ در مدل سازی به روش بیرکن (عرض از مبدأ) (سمت راست) و خطای نسبی روش های مختلف برآورد هدایت هیدرولیکی (سمت چپ)

نتیجه گیری

در این تحقیق هشت روش (استوانه های مضاعف، دیسک مکشی، پرماترگلف، تک استوانه، بیرکن (شیب)، بیرکن (عرض از مبدأ)، وو ۱ و وو ۲) برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در بافت شنی خاک با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج نشان داد که علی رغم اینکه خطای نسبی روش های بیرکن تا حدودی نسبت به روش های میدانی دیگر بیشتر می باشد، اما قابلیت هایی مثل تعیین منحنی های هدایت هیدرولیکی و رطوبتی خاک و برآورد پارامترهای منحنی های مشخصه به پشتوانه میانی نظری مستدل در کنار برتری هایی مثل حجم آب مصرفی کم و تجهیزات سبک برای اجرای آزمایش صحرایی نفوذ، این روش را می توان روشی مناسب، ساده و ارزان در تعیین ویژگی های هیدرولیکی خاک در مقایسه با روش های میدانی مورد اشاره، به حساب آورد. با توجه به نتایج این تحقیق و تحقیقات مشابه هدایت هیدرولیکی برآورد شده با استفاده از روش بیرکن (شیب) نسبت به روش بیرکن (عرض از مبدأ) به واقعیت نزدیک تر می باشد. بنابراین

آیلو و همکاران^۱ (۲۰۱۴) نشان دادند که روش های وو در مقایسه با روش های بیرکن، هدایت هیدرولیکی را نسبتاً بیشتر برآورد می کنند. دی پریمو و همکاران^۲ (۲۰۱۴) نیز بیان داشتند که روش های بیرکن هنگامی که مدت زمان نفوذ غیر ماندگار کوتاه باشد، ممکن است اندازه گیری های هدایت هیدرولیکی منجر به اعداد قابل قبولی نشوند. با توجه به تحقیقات محققان زیادی هدایت هیدرولیکی خاک فقط به بافت خاک بستگی ندارد بلکه عواملی هم چون موقعیت زمین، میزان و نوع سنگ ریزه، میزان و نوع مواد آلی، توزیع اندازه ذرات، پایداری خاک دانه و نوع رس نیز بر میزان آن تاثیر گذار هستند. همچنین نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی خاک به لحاظ مکانی و زمانی از نقطه ای به نقطه دیگر با توجه به اثرگذاری موارد یاد شده، متغیر می باشد (دب و شوکلا^۳، ۲۰۱۲؛ نیلسن و وندروس^۴، ۲۰۰۳).

- 1 - Aiello *et al.*
- 2- Di Prima *et al.*
- 3- Deb and Shukla
- 4- Nielsen and Wendroth

کیخا و همکاران: ارزیابی روش نفوذ بیرکن در برآورد هدایت...

در استفاده از نتایج حاصل از هدایت هیدرولیکی روش بیرکن (عرض از مبدأ) باید احتیاط بیشتری کرد.
کشاورزی و منابع طبیعی زابل انجام شده است؛ که از کارکنان مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی زابل برای حمایت از این طرح قدردانی می‌شود.

سپاسگزاری

این مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی با کد ۱/۱/۱۰۱۳ است که در پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون تصویب و در مرکز تحقیقات

منابع

- ۱- ترابی، م. ۱۳۸۴. بررسی پنج روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع در یک خاک شور. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک، ۲۳ و ۲۴ اردیبهشت، شیراز.
- ۲- رئوف، م.، صدرالدینی، س.، ع.ا.، ناظمی، ا. ح. و ص. معروفی. ۱۳۹۰. بررسی تاثیر شیب زمین روی میزان نفوذ و برخی از مشخصه‌های فیزیکی خاک. مجله دانش آب و خاک، ۲۱ (۱): ۶۸-۵۷.
- ۳- علیزاده، ع.، نظری، ب. و ع. لیاقت. ۱۳۸۸. ارزیابی روش بار افتان ساده شده در اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۳ (۲): ۶۲-۵۵.
- ۴- غفاری، پ.، ح. کشکولی، ح. و ر. مختاران. ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی با استفاده از گلف و نفوذ سنج مکشی. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، بهمن، کرمان.
- ۵- مرادی باصری، ح.، قربانی، ش.، گیوی، ج.، خداوردی، ح. و ب. خلیل مقدم. ۱۳۹۱. مقایسه سه روش صحرایی اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در برخی خاک‌های ورتی سل و آتی سل. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۶ (۱): ۱۸۲-۱۷۳.
- ۶- موسوی، ع.، خالدیان، م.، اسدی، ح.، گلی، م. و م. نوروزی. ۱۳۹۴. برآورد و تحلیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از طریق آزمایش نفوذ بیرکن. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۶ (۱): ۱۹۵-۱۰۷.
- ۷- یمین مشرفی، گ.، معروف پور، ع.، ب. بهرام نژاد، ب. و ا. فاریابی. ۱۳۸۷. بررسی فرآیند نفوذ با استفاده از استوانه‌های مضاعف و منفرد. سومین همایش منطقه‌ای یافته‌های پژوهشی کشاورزی و منابع طبیعی، اسفند، کردستان.
- 8- Aiello, A., Bagarello, V., Barbagallo, S., Consoli, S., Di Prima, S., Giordano, G. and M. Iovino. 2014. An assessment of the Beerkan method for determining the hydraulic properties of a sandy loam soil. Geoderma, 235: 300–307.
- 9- Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kaspar, T.C. and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Journal, 55: 467–470.
- 10- Anonymous. 2010. Standard Test Method for Particle Size Analysis and Sand Shape Grading of Golf Course Putting Green and Sports Field Root Zone Mixes. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 11- Bagarello, V., Castellinib, M., Di-Prima, S., Giordano, G. and M. Iovino. 2013. Testing a simplified approach to determine field saturated soil hydraulic conductivity. Procedia Environmental Sciences, 19: 599–608.
- 12- Bagarello, V., Di Prima, S. and M. Iovino. 2014. A test of the Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) procedure. Geoderma, 221: 20–27.
- 13- Bagarello, V., Di-Prima, S., Iovino, M., Provenzano, G. and A. Sgroi. 2011. Testing different approaches to characterize Burundian soils by the BEST procedure. Geoderma, 162: 141–150.

- 14-Bagarello, V. and M. Iovino. 2012. Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve. *Geoderma*, 188: 67-76.
- 15-Bagarello, V. and G. Provenzano. 1996. Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity. *Trans ASAE*, 39:153-159.
- 16-Bagarello, V., Iovino, M. and J. Lai. 2016. Testing steady-state analysis of single-ring and square pressure infiltrometer data. *Geoderma*, 261: 101-109.
- 17-Bouwer, H. 1986. Intake rate cylinder infiltrometer in klute a *Methods of soil analysis (Part 1)*. America Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, 825-843.
- 18-Braud, I., De Condappa, D., Sora, J.M., Haverkamp, R., Angulo-Jaramillo, R., Galle, S. and M. Vauclin. 2005. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulics properties (the Beerkan method). *European Journal of Soil Science*, 56: 361-374.
- 19-Braud, I., Haverkamp, R., Arru, J. L. and M. V. Lopez. 2003. Spatial variability of soil surface properties and consequences for the annual and monthly water balance of a semiarid environment (EFEDA Experiment). *Journal of Hydrometeorology*, 4: 121-137.
- 20-Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Pap*, State University, Fort Collins.
- 21-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. Cress well, *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation (Part 7)*. CSIRO Publishing, Pp: 108-118.
- 22-Deb, S. K. and M. K. Shukla. 2012. Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *American Journal of Environmental Science*, 8(5): 489-502.
- 23-Di Prima, S., Lassabatere, L., Bagarello, V., Iovino, M. and R. Angulo-Jaramillo. 2014. Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. *Geoderm*, 262: 20-34.
- 24- Fies, J.C., de Louvigny, N. and A. Chanzy. 2002. The role of stones in soil water retention. *European Journal of Soil Science*, 53:95-104.
- 25-Galle, S., Angulo Jaramillo, R., Braud, I., Boubkraoui, S., Bouchez, J. M., de Condappa, D., Derive, G., Gohoungssou, A., Haverkamp, R., Reggiani, P. and J. Soria-Ugaldes. 2001. Estimation of soil hydrodynamic properties of the Donga watershed (CATCH Be'nin). In: *Proceedings of the GEWEX 4th International Conference*, 10-14 Sept, Insitut Pierre Simon Laplace, Paris, France, 136.
- 26-Gonzalez-Sosa, E., Braud, I., Dehotin, J., Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Lagouy, M., Branger, F. Jacqueminet, C., Kermadi, S. and M. Michel. 2010. Impact of land use on the hydraulic properties of the topsoil in a small French catchment. *Hydrological Processes*, 24: 2382-2399.
- 27-Gupta, R. K., Rudra, R. P., Dickinson, W. T., Patni, N.K. and G. J. Wall. 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.

- 28-Gwenzi, W., C. Hinz, C., Holmes, k., Phillips, I. R. and I.J. Mullins. 2011. Field scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on a recently constructed artificial ecosystem. *Geoderma*, 166:43–56.
- 29-Haverkamp, R., Arrue, J.L., Vandervaere, J. P., Braud, I., Boulet, G., Laurent, J.P., Taha, A., Ross, P.J. and R. Angulo-Jaramillo. 1996. Hydrological and thermal behaviour of the vadose zone in the area of Barrax and Tomelloso (Spain): experimental study, analysis and modeling. Project UE n EV5C-CT 920090.
- 30-Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J. and J.Y. Parlange. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resource Research*, 30: 2931–2935.
- 31-Iwanek, M. 2008. A method for measuring saturated hydraulic conductivity in anisotropic soils. *Soil Science Society of America Journal*, 72(6):1527–1531.
- 32- Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I. and R. Haverkamp. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through Infiltration Experiments-BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 521–532.
- 33-Logsdon, S.D. and D.B. Jaynes. 1993. Methodology for determining hydraulic conductivity with tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 1426– 1431.
- 34-Moret, D. and J. L. Arrue. 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, 96: 103-113.
- 35-Mubarak, I., Angulo-Jaramillo, R., Mailhol, J., Ruelle, C. P., Khaledian, M. and M. Vauclin. 2010. Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: Is infiltration method dependent. *Agricultural Water Management*, 97: 1517–1526.
- 36-Nielsen, D. and O. Wendroth. 2003. *Spatial and temporal statistics: Sampling field soils and their vegetation*. Germany, Reis kirchen: Catena-Verlag.
- 37-Raats, P.A.C. 1976. Analytical solutions of a simplified flow equation. *Trans ASAE*, 19:683–689.
- 38-Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Brunke, R. R., Drury, C. F. and C. S. Tan. 2000. Comparison infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2): 478-484.
- 39-Reynolds, W.D. 1993. Saturated hydraulic conductivity: Field measurement. In: M.R. Carter editor soil sampling and methods of analysis. CRC Press, Boca Raton, FL, Pp: 599–613.
- 40-Reynolds, W.D. and D.E. Elrick. 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the a-parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*, 140: 292–302.
- 41-Reynolds, W. D. and D. E. Elrick. 1987. Laboratory and numerical assessment of the guelph permeameter method. *Soil Science*, 144: 244-282.
- 42- Reynolds, W.D. and D.E. Elrick. 1990. Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Science Society of America Journal*, 54:1233–1241.
- 43-Reynolds, W.D., Elrick, D.E., Youngs, E.G., Booltink, H.W.G and J. Bouma. 2002. Saturated and field-saturated water flow parameters: Laboratory methods. In: J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of soil analysis (Part4). Physical methods*, SSSA Book Seri, 5. SSSA, Madison, Pp: 802–803.

- 44-Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1: 318–333.
- 45-Rockstrom, J., Nuhu Hatibu, J., Oweis, T.Y., Wani, S., Barron, J. and A. Bruggeman. 2007. Managing water in rainfed agriculture. In: *Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. International Water Manage, Colombo, Sri Lanka, Pp: 315–352.
- 46-Smettem, K.R.J., Parlange, J. Y., Ross, J.P. and R. Haverkamp. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from disc infiltrometer a capillary-based theory. *Water Resource Research*, 30: 2925–2929.
- 47- Talsma, T. and J. Y. Parlange. 1972. One-dimensional vertical infiltration. *Australian Journal of Soil Research*, 10: 143–150.
- 48- Verbist, K., Baetens, J.M., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Torres, C. and G. Soto. 2009. Hydraulic conductivity as influenced by stoniness in degraded dry lands of Chile. *Soil Science Society of America Journal*, 73:471–484.
- 49- Verbist, K.M.J., Cornelis, W.M., Torfs S. and D. Gabriels, 2012. Comparing Methods to Determine Hydraulic Conductivities on Stony Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 77(1): 25-42.
- 50- Wu, L., Pan, L., Mitchell, J. and B. Sanden. 1999. Measuring saturated hydraulic conductivity using a generalized solution for single-ring infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 788–792.
- 51-Xu, X., Kiely, G. and G. Lewis. 2009. Estimation and analysis of soil hydraulic properties through infiltration experiments: comparison of BEST and DL fitting methods. *Soil Use Manage*, 25: 354–361.
- 52-Xu, X., Lewis, C., Liu, W., Albrtson, J. D. and G. Kiely. 2012. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. *Agricultural Water Management*, 107: 34– 41.
- 53-Yilmaz, D., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Deneele, D. and M. Legret. 2010. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. *Vadose Zone Journal*, 9: 107–116.