Research Paper

Comparison of Methods for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity of Soil in Palmetum Lands

Hamid Zare Abyaneh[1*], Ali Soleimani[2], Saeid Jalili[3], Mehdi Jovzi[4]

[1.] **Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. (* Corresponding author) Email: zare@basu.ac.ir**
[2.] **M.Sc. Alumni, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: Alireza1774soleimani@gmail.com**
[3]**. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Rural Engineering, Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mollasani, Iran. Email: s.jalily@ramin.ac.ir**
[4.] **Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran. Email: m.jovzi@areeo.ac.ir**

Corresponding Author: Hamid Zare Abyaneh
Address: Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
Email: zare@basu.ac.ir
Tel: +988134425402

10.22125/IWE.2023.173259

Received:
January 12, 2022
Accepted:
May 1, 2022
Available online:
June 25, 2023

Keywords:
Double ring method,
Falling head method,
Guelph permeameter,
Pedotransfer functions,
Rosetta model.

Abstract

Saturated hydraulic conductivity of soil (Ks) is an important soil property in the management of irrigation and drainage issues, including areas covered with palm trees. This study was conducted to determine the amount of Ks in the palmetum lands of Bavi city of Khuzestan province. The amount of Ks was also evaluated using field, laboratory methods and Pedotransfer functions. The amount of Ks in five distances of 0.5, 1, 2, 3 and 5 meters from palm trees with three replications by double ring methods, Guelph permeameter, falling head, Rosetta model and Pedotransfer functions of Cosby et al., Ferrer-Julia et al., Campbell and Shiozawa, Dane and Puckett and Puckett et al. were obtained. Evaluation of the results showed that the double ring methods, Rosetta model and Pedotransfer function of Cosby et al. with a geometric mean error ratio of about 1 were more accurate than other methods. The deviation time of these methods were 4.75, 5.31 and 26.14, respectively. The geometric standard deviation error ratios of these methods to the falling head method were 1.10, 1.40 and 2.08, respectively.

1. Introduction

Saturated hydraulic conductivity of soil is an important soil property in the management of irrigation and drainage issues, including areas covered with palm trees. The study of soil physical properties, including saturated hydraulic conductivity, is very important in the context of tree root development, especially in areas of Khuzestan that are in dire need of a drainage system. The aim of this study was to compare and evaluate the methods of measuring the hydraulic conductivity of the soil by the methods of double ring, Guelph permeameter with laboratory method of falling head in a silty clay loam soil. Another purpose of this research is to evaluate the accuracy of different Pedotransfer functions as well

as Rosetta model with the nature of artificial neural network in estimating the saturated hydraulic conductivity of a fine-textured soil subject to drainage problems.

2. Materials and Methods

This study was conducted in the palmetum lands of Bavi city of Khuzestan province. Saturated hydraulic conductivity was evaluated using field, laboratory methods and Pedotransfer functions. The amount of saturated hydraulic conductivity in five distances of 0.5, 1, 2, 3 and 5 meters from palm trees with three replications by double ring methods, Guelph permeameter, falling head, Rosetta model and Pedotransfer functions of Cosby et al. (1984), Ferrer-Julia et al. (2004), Campbell and Shiozawa (1994), Dane and Puckett (1994) and Puckett et al. (1985) were obtained. The independent input variables for the Pedotransfer functions were the clay and sand abundance of the soil samples. Hydraulic conductivity in Rosetta model was determined using soil particle size distribution values (percentage of sand, silt and clay particles) and bulk density. In the double ring method, the base infiltration was measured with two coaxial rings with an inner diameter of 55 and 35 cm and a height of 25 cm.

3. Results

Evaluation of the results showed that the double ring methods, Rosetta model and Pedotransfer function of Cosby et al. (1984) with a geometric mean error ratio of about 1 were more accurate than other methods. The deviation time of these methods were 4.75, 5.31 and 26.14, respectively. The geometric standard deviation error ratios of these methods to the falling head method were 1.10, 1.40 and 2.08, respectively.

4. Discussion and Conclusion

One of the reasons for the lower accuracy of the other Pedotransfer functions under study is the regional nature of these functions, lack of attention to large pores and soil structure. In fact, the priority of using these functions should be for soils similar to their development conditions, and to estimate the hydraulic properties of soils in other areas, they should first be evaluated and then used with great caution for other areas. The overall results of this study showed that in the study area there was a high correlation between the values of saturated hydraulic conductivity obtained from the double ring method, falling head and Rosetta model and each of them can be used instead of each other. The application of Guelph permeameter method led to the presentation of results that require further investigation of this method in soils covered with palm trees.

5. The most important references

1) Campbell, G.S. and S. Shiozawa. 1994. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside.

2). Cosby, B.J., G.M. Hornberger, R.B. Clapp and T.R. Ginn. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. Water Resources Research, 20 (6): 682-690.

3) Dane, J.H. and W.E. Puckett. 1994. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In Proceedings of an international workshop: Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. University of California, Riverside.

4) Ferrer-Julia M., T. Estrela Monreal, A. Sánchez del Corral Jiménez and E. García Meléndez. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. Geoderma, 123: 275-277.

5) Puckett, W. E., J.H. Dane and B.F. Hajek. 1985. Physical and mineralogical data to determine Soil hydraulic properties. Soil Science Society of America Journal, 49: 831-836.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال سیزدهم. شماره پنجاه و دو .تابستان ۱۴۰۲

مقایسه روش‌های برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در اراضی نخلستان

حمید زارع ابیانه[۱*]، علی سلیمانی[۲]، سعید جلیلی[۳]، مهدی جوزی[۴]

تاریخ ارسال:۱۴۰۰/۱۰/۲۲
تاریخ پذیرش:۱۴۰۰/۱۱/۱۱

مقاله پژوهشی

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) یک ویژگی مهم خاک در مدیریت مسائل آبیاری و زهکشی از جمله زمین‌های تحت پوشش درختان نخل است. این مطالعه به منظور تعیین مقدار Ks در اراضی نخلستان‌های شهرستان باوی استان خوزستان انجام شد. مقدار Ks نیز با استفاده از روش‌های صحرایی، آزمایشگاهی و توابع انتقالی مورد بررسی قرار گرفت. مقدار Ks در پنج فاصله ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۵ متر از درختان نخل با سه تکرار به‌روش‌های استوانه‌های دوگانه، نفوذسنج گلف، بارافتان، مدل رزتا و توابع انتقالی کاسبای و همکاران، فرو جولیا و همکاران، کمپل و شوزاوا، دَنی و پاکت و پاکت و همکاران به‌دست آمد. ارزیابی نتایج نشان داد روش‌های استوانه‌های دوگانه، مدل رزتا و تابع انتقالی کاسبای و همکاران با نسبت خطای متوسط هندسی حدود ۱ نسبت به‌دیگر روش‌ها دارای بیشترین دقت بودند. مقدار درجه انحراف این روش‌ها به‌ترتیب ۴/۷۵، ۵/۳۱ و ۲۶/۱۴ بود. مقدار نسبت خطای انحراف استاندارد هندسی این روش‌ها نسبت به‌روش بارافتان به‌ترتیب ۱/۱۰، ۱/۴۰ و ۲/۰۸ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، روش استوانه دوگانه، روش بار افتان، روش نفودسنج گلف، مدل رزتا.

[۱] استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. (* نویسنده مسئول) E-mail: zare@basu.ac.ir
[۲] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. E-mail: Alireza1774soleimani@gmail.com
[۳] استادیار، گروه مهندسی علوم آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران. E-mail: s.jalily@ramin.ac.ir
[۴] استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران. E-mail: m.jovzi@areeo.ac.ir

مقدمه

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ks) پارامتری مهم برای نشان دادن فعالیت‌های مرتبط با آب در خاک و وضعیت سرعت حرکت آب در خاک است. بدون آگاهی از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، توصیف دقیق حمل و نقل رسوبات، مواد محلول یا معلق در خاک، محاسبه مقدار انتقال آب زیرزمینی و تعیین کمیت تبادل بین خاک و اتمسفر دشوار است (Zhang and Schaap, 2019). تعیین هدایت هیدرولیکی خاک به دو روش آزمایشگاهی و صحرایی قابل انجام است که هر دو روش هم می‌توانند ساده و هم پرهزینه باشند (Zhang and Schaap, 2019). Feki et al. (2020) روش نفوذسنج گلف را روشی ساده و پرکاربرد برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع عمودی و افقی خاک در اعماق ۱۵ تا ۷۵ سانتی‌متر زیر سطح خاک در بازه ۰/۸۶۴ تا ۸۶۴ سانتی‌متر بر روز توصیف نمودند. هم‌چنین، آن‌ها محدودیت نفوذسنج گلف را کم‌برآوردی ناشی از فشردگی خاک و به‌هم خوردن ساختمان خاک در اثر حفر چاهک دانستند. از دیگر محدودیت‌های روش نفوذسنج گلف می‌توان به نتایج منفی و غیر منطقی روش گلف علی‌رغم مبانی تئوریکی قوی آن (مشعل و همکاران، ۱۳۹۰) و تاثیرگذاری منفی شرایط غیراشباع خاک اطراف چاهک‌ها بر نتایج آزمایش اشاره کرد (خوارزمی و همکاران، ۱۳۹۱).

Nam et al. (2021) دو روش میدانی گلف و چاهک را در مقایسه با روش آزمایشگاهی بار ثابت برای تعیین هدایت هیدرولیکی در رسوبات حاشیه رودخانه به‌کار گرفتند. میانگین Ks در روش چاهک 10^{-5} متر بر ثانیه بود که بزرگ‌تر از میانگین Ks در روش گلف (10^{-7} متر بر ثانیه) و میانگین Ks در روش بار ثابت (10^{-9} متر بر ثانیه) بود. آن‌ها علت این تفاوت را علاوه بر ماهیت روش‌ها، در اندازه نمونه‌ها، به‌هم‌ریختگی نمونه‌ها، ناهمگنی خاک‌ها و عدم لحاظ درز و ترک‌های ناشی از توسعه ریشه‌ها در نمونه‌های آزمایشگاهی بیان کردند. مرادی‌باصری و همکاران (۱۳۹۱) با مقایسه Ks به‌دو روش آزمایشگاهی بارافتان و بار ثابت و روش نفوذسنج مکشی برای دو نوع خاک رسی تیره و متورم[1] و خاک تکامل نیافته[2] نشان دادند بیشترین همبستگی بین نتایج روش بار ثابت با بار افتان به‌میزان r = ۰/۹۷ برقرار بود. نتایج آنان بیان‌گر عدم تفاوت معنی‌دار بین نتایج و مناسب بودن روش بارافتان برای اندازه‌گیری هدایت هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های سنگین است.

یکی از عوامل موثر در مقدار هدایت هیدرولیکی خاک، ریشه گیاه است که با رشد خود درون خاک و ایجاد منافذ و یا پرکردن منافذ و یا پوسیده شدن خود اثر مهمی بر هیدرولیک جریان درون خاک دارد. Scanlan (2009) بیان می‌کند که ریشه گیاه در حین رشد منجر به تقسیم منافذ بزرگ‌تر خاک به منافذ کوچک‌تر می‌شود و پس از پوسیدگی ریشه، منافذ درشت و ریزی تشکیل می‌شود. منافذ حاصل از فعالیت‌های بیولوژیکی مانند رشد ریشه گیاه از نظر اندازه و شکل متفاوت بوده و سیستم‌های ریشه‌ای متفاوت گیاهان باعث ایجاد ساختارهای متمایز برای منافذ خاک می‌گردد (Bodner et al., 2014). در این خصوص ریشه درختان با توجه به اندازه قطر ریشه و نیز خشبی بودن قسمت‌های مهمی از آن به‌نظر باید اثر بیشتری نسبت به گیاهان زراعی و یکساله داشته باشند. یکی از مهم‌ترین درختان مثمر نخل می‌باشد، که هم اکنون در ۱۵ استان کشور درخت نخل کشت می‌شود و استان خوزستان یکی از استان‌های مهم در کاشت این درخت می‌باشد. نخل دارای یک ریشه اصلی است که در سال‌های ابتدایی رشد به‌مقدار زیادی رشد کرده و در اعماق زمین فرو می‌رود. به‌علاوه درخت نخل دارای ریشه‌های نابجا نیز می‌باشد که از اطراف تنه و طوقه درخت به‌حالت نابجا به‌وجود می‌آیند و در سطح و عمق خاک گستردگی زیادی دارند. از طرفی خاک‌های با بافت سنگین هدایت هیدرولیکی پایینی داشته و در نتیجه سرعت نفوذ و سرعت جریان آب درون خاک پایین است. لذا وجود ریشه‌های عمیق و افشان و ریزدانه بودن خاک، اثرات متفاوتی بر روی پارامترهای طراحی سامانه‌های آبیاری و زهکشی دارند. به‌طوری‌که کاشت گیاه و توسعه ریشه گیاهان به‌خصوص درختان میان‌سال و کهن‌سال، باعث

[1] Vertisols

[2] Entisols

ایجاد تغییر در مشخصات هیدرولیکی خاک شده و به‌طور حتم پارامترهای طراحی را متاثر خواهد ساخت. بنابراین مطالعه خصوصیات فیزیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در شرایط توسعه ریشه درختان، به‌خصوص در مناطقی از خوزستان که نیاز مبرم به سامانه زهکشی دارند بسیار اهمیت دارد.

بررسی مطالعات حاکی از آن است که نتایج هر کدام از روش‌های تعیین هدایت هیدرولیکی بسته به نوع روش، بافت و ساختمان خاک، شرایط محل مطالعه، امکانات در دسترس و نحوه تحلیل داده‌ها متفاوت است. در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع، برای اعتماد به یک روش میدانی، معمولا نتایج بین روش (های) صحرایی مختلف و آزمایشگاهی مقایسه می‌گردند. به‌علاوه مدل‌هایی نیز برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه شده‌اند که نیازمند ارزیابی آن‌ها است. به‌عبارتی دیگر مدل‌های پیشنهادی باید برای خاک‌هایی مشابه با شرایط توسعه آن‌ها مورد آزمون قرار گیرند. بنابراین هدف از این مطالعه، مقایسه و ارزیابی روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی خاک به‌روش‌های استوانه‌های دوگانه، نفوذسنج گلف با روش آزمایشگاهی بارافتان در یک خاک ریزبافت سیلتی‌رسی‌لومی بود. از دیگر اهداف پژوهش، ارزیابی دقت توابع انتقالی رگرسیونی مختلف و هم‌چنین مدل کامپیوتری رزتا با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع یک خاک ریزبافت در معرض مشکل زهکشی می‌باشد.

مواد و روش

این تحقیق در قسمتی از اراضی نخلستان‌های شهرستان باوی از استان خوزستان در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان اهواز در ۴۸/۸۸ درجه طول شرقی و ۳۰/۶۰ درجه عرض شمالی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ انجام شد. در شکل ۱ موقعیت شهرستان باوی نشان داده شده است.

با احداث ترانشه در نخلستان و با توجه به مشاهده توزیع ریشه نخل، اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای هر روش در پنج فاصله ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۵ متری از درختان نخل در سه تکرار انجام شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از دو روش صحرایی استوانه‌های دو گانه[1] (DR)، نفوذسنج گلف[2] (GP)، یک روش آزمایشگاهی بارافتان[3] (FHM) و مدل مبتنی بر شبکه عصبی رزتا و نیز از ۵ تابع انتقالی برآورد مقادیر هدایت هیدرولیکی کاسبای و همکاران (Cosby et al., 1984)، فروجولیا و همکاران (Ferrer-Julia et al., 2004) ، کمپل و شوزاوا (Campbell and Shiozawa, 1994) ، دَنی و پاکت (Dane and Puckett, 1994) و پاکت و همکاران (Puckett et al. 1985) مطابق جدول ۱، برآورد گردید. متغیرهای مستقل ورودی برای توابع انتقالی فراوانی رس و شن نمونه‌های برداشتی بود. هدایت هیدرولیکی در مدل رزتا با استفاده از مقادیر توزیع اندازه ذرات خاک (درصد ذرات شن، سیلت، رس) و جرم مخصوص ظاهری تعیین شد (رسول‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). در روش استوانه‌های دوگانه، اندازه‌گیری نفوذ پایه با دو استوانه هم‌محور به‌قطر داخلی ۵۵ و ۳۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر صورت گرفت. سرعت ورود آب به خاک، پس از فرو فرستادن استوانه‌ها تا عمق ۸ سانتی‌متری خاک و آبگیری آن‌ها تا عمق ۱۵ سانتی‌متر، در شرایط بار تقریبا ثابت، از استوانه داخلی تعیین گردید. مقدار نفوذ پس از ثابت شدن تغییرات سطح آب در استوانه داخلی در سه اندازه‌گیری متوالی، به‌عنوان نفوذ پایه (qs) منظور شد. زمان رسیدن به نفوذ پایه در این روش از معادله ۱ محاسبه شد.

$$\frac{di}{dt} = 600\left(\frac{d^2i}{dt^2}\right) \qquad (۱)$$

که در آن، $\frac{di}{dt}$ سرعت نفوذ لحظه‌ای و $\frac{d^2i}{dt^2}$ تغییرات زمانی سرعت نفوذ است. مقادیر هدایت هیدرولیکی با برازش معادله سه جمله‌ای فیلیپ بر داده‌های زمانی نفوذ تجمعی، از معادله ۳ برآورد گردید.

$$I = C_1 t^{0.5} + C_2 t + C_3 t^{0.5} \qquad (۲)$$

$$k_s = (3 \times C_1 \times C_3)^{0.5} + C_2 \qquad (۳)$$

که در آن‌ها I نفوذ تجمعی (L)، t زمان (T)، C_1، C_2 و C_3 ضرایب معادله فیلیپ (-) می‌باشند.

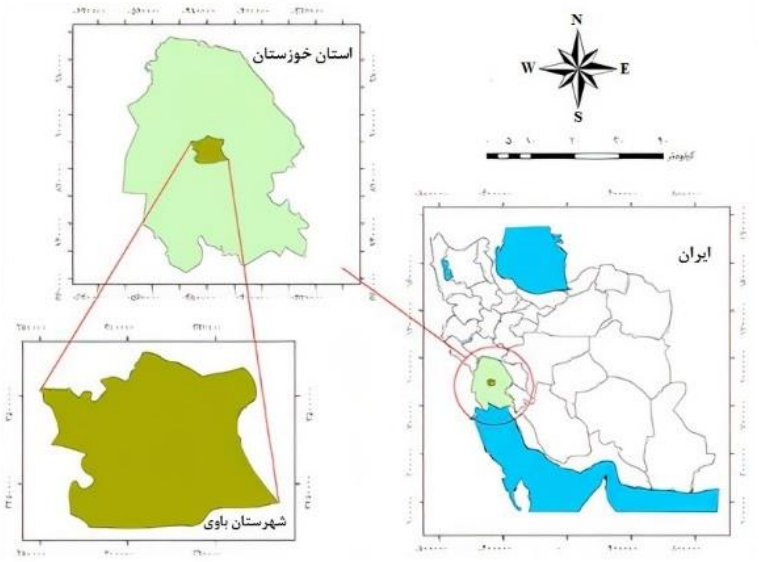
روش نفوذسنج گلف از نوع تک چاهکی بود که با حفر چاهک‌هایی به قطر ۱۰ سانتی‌متر و عمق حدود ۳۵

[1] Double ring
[2] Guelph Permeameter
[3] Falling head method

سانتی‌متر در فواصلی مشابه روش استوانه دوگانه مطابق شکل ۲، اقدام به اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک گردید. در روش نفوذسنج گلف ضریب آبگذری اشباع خاک با ثابت شدن سطح آب مخزن دستگاه در ۳ الی ۴ بازه زمانی انتهایی آزمایش، که بیان‌گر نرخ جریان ثابت آب از چاهک به خاک اطراف است و از رابطه ۴ تعیین گردید (Reynolds et al., 1985).

$$K_s = \frac{CQ}{2\pi H^2 + C\pi a^2 + \frac{2\pi H}{a^*}} \quad (۴)$$

که در آن Q دبی خروجی از دستگاه نفوذ سنج، H ارتفاع آب در داخل چاهک، a شعاع چاهک و C ضریب شکل چاهک می‌باشد.



شکل (۱): موقعیت شهرستان باوی در استان خوزستان و ایران

جدول (۱): توابع انتقالی مورد استفاده در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک نخلستان (رسول‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱).

نام مدل	رابطه
کاسبای و همکاران (Cosby et al., 1984)	$K_s\left(\frac{m}{s}\right)=7.05556\times10^{-6}\times\left(10^{[-0.6+0.0126(Sand)-00064(Clay)]}\right)$
فرو جولیا و همکاران (Ferrer-Julia et al., 2004)	$K_s\left(\frac{mm}{h}\right)=0.920\exp^{(-0.0491Sand)}$
کمپل و شوزاوا (Campbell and Shiozawa, 1994)	$K_s\left(\frac{mm}{h}\right)=54\exp(-0.07Sand-0.167Clay)$
دَنی و پاکت (Dane and Puckett, 1994)	$K_s\left(\frac{mm}{h}\right)=303.84\exp(-0.144Clay)$
پاکِت و همکاران (Puckett et al., 1985)	$K_s\left(\frac{mm}{h}\right)=156.96\exp(-0.1975Clay)$

Clay، Sand به‌ترتیب درصد اندازه ذرات رس و شن است.

ضریب شکل چاهک با داشتن H/a به دست آمد (Reynolds and Elrick, 1987). پارامتر α* با توجه به نوع بافت - ساختمان برابر با ۱۲ منظور شد (Reynolds et al., 1985). این پارامتر نشان‌دهنده اهمیت نسبی مولفه‌های اشباع و غیراشباع خاک اطراف چاهک می‌باشد. روش گلف، یکی از روش‌های اندازه‌گیری از نوع بار ثابت برای به‌دست آوردن هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است.

در روش آزمایشگاهی بارافتان نیز ضریب آبگذری اشباع خاک، براساس افت سطح آب در نمونه‌های دست نخورده خاک مطابق رابطه ۵ محاسبه شد.

$$K_s = 2.3\frac{L}{t}log\frac{h_1}{h_2} \quad (۵)$$

که در آن K_s ضریب آبگذری اشباع خاک، h_1 ارتفاع هیدرولیکی در شروع آزمایش، h_2 ارتفاع هیدرولیکی در انتهای آزمایش، L طول ستون خاک و t مدت زمان نزول

سطح آب از h_1 به h_2 است. هدایت هیدرولیکی اشباع در روش بارافتان شامل هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت و هدایت هیدرولیکی ماتریس خاک می‌باشد. به‌عبارتی، هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده خاک در روش بار افتان تحت تاثیر توأمان جریان ماتریس خاک و جریان منافذ درشت خاک است (رسول‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱).

به‌منظور ارزیابی عملکرد برآورد توابع انتقالی و روش‌های اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی، از آماره نسبت خطا (er)، نسبت خطای متوسط هندسی[1] (GMER) و نسبت خطای انحراف استاندارد هندسی[2] (GSEDR) در قالب روابط ۶، ۷ و ۸ برای هر یک از تکرارها استفاده شد.

$$er = \frac{K_{sp}}{K_{sm}} \quad (۶)$$

$$GMER = exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} ln(er_i)\right) \quad (۷)$$

[1] Geometric mean error ratio

این روش به‌دلیل اطمینان از اشباع شدن کامل خاک و کنترل شرایط آزمایش به‌عنوان روش مقایسه‌ای در نظر گرفته شد. مرادی‌باصری و همکاران (۱۳۹۱) روش بارافتان را برای خاک‌های رسی مناسب و Mohanty et al. (1994) این روش را مبنای مقایسه‌ای خوبی برای دیگر روش‌ها دانستند.

شکل (۲): استوانه دوگانه (راست بالا) نفوذ سنج گلف (چپ بالا)، بررسی مشاهده‌ای توزیع ریشه در اطراف نخل (راست پایین) دستگاه آزمایش بارافتان (چپ پایین)

$$GSDER = exp\left[\left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}[ln(er_i) - ln(GMER)]^2\right)^{0.5}\right] \quad (۸)$$

که در آن er نسبت خطا، K_{sp} مقادیر هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری (برآوردی)، K_{sm} مقادیر هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده به‌روش بار افتان، n تعداد مشاهدات می‌باشد. GMER برابر ۱، نشان‌دهنده تطابق کامل بین مقادیر اندازه‌گیری (برآوردی) با مقادیر بارافتان، مقادیر

[2] Geometric standard deviation error ratio

کمتر از ۱، کم‌برآوردی[1] و مقادیر بزرگتر از ۱، بیش‌برآوردی[2] است. انحراف مقادیر اندازه‌گیری (برآوردی) با آماره GSEDR مشخص می‌گردد که بزرگی آن نشانه انحراف بیشتر از مقادیر بارافتان است.

هم‌چنین با ترسیم مقادیر هدایت هیدرولیکی هر یک از روش‌های دارای درجه انحراف[3] (DT) کمتر از ۱۰، به‌صورت

$$Log\ DT = \left\{\sum_{i=1}^{n}\left[Log\left(\frac{K_{sp}}{K_{sm}}\right)\right]^2\right\}^{0.5} \quad (۹)$$

معیار مطلوبیت در روابط ارائه شده برای بهترین روش اندازه‌گیری (مدل برآوردی)، مقادیر DT و GSDER کمتر و GMER نزدیک به یک است تا خطای تخمین کمتر و کارایی بالاتر باشد.

برای مقایسه میانگین هدایت هیدرولیکی حاصل از روش‌های به‌کار گرفته شده در این پژوهش از نرم‌افزار SAS و آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

متناظر با روش بارافتان و با برازش مدل رگرسیون خطی با عرض از مبداء صفر و عرض از مبداء غیر صفر بر داده‌های آن کارآیی روش‌ها ارزیابی شد. در این مطالعه آماره DT با کارکردی مشابه آماره انحراف استاندارد از رابطه ۹ محاسبه گردید.

نتایج و بحث

در جدول ۲ دامنه تغییرات برخی خصوصیات زودیافت اندازه‌گیری شده در منطقه مورد تحقیق ارائه شده است. با استفاده از این خصوصیات، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مدل رزتا و توابع انتقالی جدول ۱، برآورد گردید.

جدول (۲): برخی ویژگی‌های خاک مورد آزمایش

مشخصه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
درصد رس	۲۹	۵۱	۳۹/۵	۶/۸۳	۰/۱۷
درصد سیلت	۸	۴۵	۲۵/۳	۲۵/۱۲	۰/۴۸
درصد شن	۱۵	۶۱	۳۵/۲	۱۲/۹۴	۰/۳۷
وزن مخصوص ظاهری (gcm^{-3})	۱/۰۵	۱/۵	۱/۲۵	۰/۱۳	۰/۱۱
وزن مخصوص حقیقی (gcm^{-3})	۲/۵۵	۲/۷۱	۲/۶۳	۰/۱۷	۰/۰۶
شوری عصاره اشباع خاک (dSm^{-1})	۳/۵	۴/۴	۳/۸۵	۰/۲۱	۰/۰۵

جدول ۲ نشان می‌دهد بیشترین ضریب تغییرات متوجه درصد اندازه ذرات سیلت و شن و کمترین ضریب تغییرات مربوط به شوری عصاره اشباع خاک و وزن مخصوص حقیقی خاک است. ضریب تغییرات، بالا نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر متغیرها و ضریب تغییرات پایین نشان‌دهنده پراکندگی کمتر به‌ازای یک واحد از میانگین هر متغیر است.

در جدول ۳ مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده به‌روش بارافتان، استوانه‌های دوگانه، نفوذسنج گلف و برآورد شده از مدل رزتا و توابع انتقالی برای ۵ فاصله ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵ متر در سه تکرار آمده است. هم‌چنین آماره نسبت خطا (e_r) برای هر یک از تکرارها در جدول ۳ محاسبه شده است.

جدول (۳): مقادیر خطای هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری و برآوردی از توابع انتقالی نسبت به‌روش آزمایشگاهی بار افتان

فاصله تکرار	هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری (cmd^{-1})			هدایت هیدرولیکی برآوردی از توابع انتقالی (cmd^{-1})												
	بار	استوانه	نسبت	نفوذسنج	نسبت	مدل	نسبت	فررجولیا و	نسبت	کمپل و	نسبت	دنی و	نسبت	پاکت و	نسبت	کاسبای و	نسبت
(m)	افتان	دوگانه	خطا	گلف	خطا	رزتا	خطا	همکاران	خطا	شوزاوا	خطا	پاکت	خطا	همکاران	خطا	همکاران	خطا
	۱	۳۵/۴۱	۰/۵	۵۳/۲۸	۰/۶۱	۱۳/۷۰	۰/۱۴	۳۰/۲۵	۰/۵۵	۱۵/۷۳	۰/۰۱	۰/۹۹۹	۲/۳	۰/۹۳۵	۰/۱۴	۰/۹۹۶	۲۷/۱۰	۰/۲۳۴
۰/۵	۲	۱۵/۳۴	۰/۵۳	۲۳/۵۱	۰/۷۶	۳/۷۰	۰/۶۶	۵/۱۹	۰/۰۲۵	۱۵/۷۴	۰/۰۵	۰/۹۹۶	۹/۷۰	۰/۳۶۷	۱/۰۰۶	۰/۹۳۴	۳۱/۴۱	۱/۰۴
	۳	۱۶/۰۲	۰/۴۸	۲۳/۷۴	۰/۶۲	۶/۰۲	۰/۵۲	۷/۶۹	۰/۶۸	۲۷	۰/۰۰۵	۰/۹۹۶	۲/۶۵	۰/۸۳۴	۰/۱۷	۰/۹۸۹	۳۷/۸۵	۱/۳۶

[1] Under estimate
[2] Over estimate
[3] Deviation time

	۱	۶۴/۵۴	۹۰/۵۰	۰/۴	۳/۸۸	۰/۹۴	۵۰/۹۴	۰/۲۱	۲۲/۱۹	۰/۶۵	۰/۰۰۳	۰/۹۹۹	۱/۱۲	۰/۹۸۲	۰/۰۵۲	۰/۹۹۹	۳۰/۸۴	۰/۵۲۲
۱	۲	۵۱/۳۲	۷۲/۳۶	۰/۴۱	۰/۸۸	۰/۹۸	۳۸/۳۸	۰/۲۵	۴۴/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۱۴	۰/۹۹۹	۱۱/۲	۰/۷۸۱	۱/۲۳	۰/۹۷۶	۵۸/۶۲	۰/۱۴۲
	۳	۸۵/۳۲	۱۱۹/۳۰	۰/۴	۳/۵۳	۰/۹۶	۶۶/۰۵	۰/۲۳	۹/۶۳	۰/۸۹	۰/۰۴۶	۰/۹۹۹	۴/۷۲	۰/۹۴۴	۰/۳۷۵	۰/۹۹۵	۲۱/۸۲	۰/۷۴۴
	۱	۷۱/۲۰	۹۵/۶۶	۰/۳۴	۷/۶۳	۰/۸۹	۶۰/۱۳	۰/۱۵	۱۲/۳۱	۰/۸۳	۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۴/۷۲	۰/۹۸۴	۰/۰۵۲	۰/۹۹۹	۲۱/۷۸	۰/۶۹۴
۲	۲	۸۵/۴۸	۱۱۱/۰۴	۰/۳	۰/۴۴	۰/۹۹	۶۳/۵۲	۰/۲۶	۶/۵	۰/۹۲	۰/۰۰۹	۰/۹۹۹	۰/۷۳	۰/۹۹۱	۰/۰۲۸	۰/۹۹۹	۱۴/۲۹	۰/۸۳۲
	۳	۱۷/۴۲	۲۸/۹۴	۰/۶۶	۰/۴۳	۰/۹۷	۹/۱۱	۰/۴۸	۴/۶۱	۰/۷۳	۰/۰۵۷	۰/۹۹۶	۲/۳۰	۰/۸۶۸	۰/۱۳۹	۰/۹۹۲	۱۳/۱۲	۰/۲۴۶
	۱	۶۳/۷۵	۹۲/۱۴	۰/۴۴	۱/۸۵	۰/۹۷	۵۶/۳۴	۰/۱۲	۲۴/۴۸	۰/۶۱	۰/۰۱	۰/۹۹۹	۰/۷۳	۰/۹۳۵	۰/۳۰۷	۰/۹۹۵	۳۷/۳۳	۰/۴۱۴
۳	۲	۵۰/۴۹	۷۴/۸۴	۰/۴۸	۰/۶۷	۰/۹۷	۴۳/۹۱	۰/۱۳	۹/۱۷	۰/۸۲	۰/۰۰۳	۰/۹۹۹	۰/۴۷	۰/۹۹	۰/۰۱۶	۰/۹۹۹	۱۶/۷۵	۰/۶۶۸
	۳	۱۷/۳۵	۳۰/۵۶	۰/۷۶	۰/۵۴	۰/۹۷	۱۷/۰۹	۰/۰۱	۵/۰۸	۰/۷۰	۰/۰۵۸	۰/۹۹۶	۲/۶۵	۰/۸۴۷	۰/۱۷	۰/۹۹	۱۴/۱۱	۰/۱۸۵
	۱	۳۶/۱۷	۵۲/۱۹	۰/۴۴	۲/۴۵	۰/۹۳	۲۸/۸۴	۰/۲	۱۰/۱۱	۰/۷۲	۰/۱۲	۰/۹۹۶	۱۱/۲	۰/۶۹۰	۱/۲۳	۰/۹۶۶	۲۴/۵۵	۰/۳۲۱
۵	۲	۱۸/۴۰	۳۲/۳۳	۰/۷۶	۰/۳۳	۰/۹۸	۲۷/۳۳	۰/۴۸	۸/۷۳	۰/۵۲	۰/۰۱۹	۰/۹۹۹	۱/۹۹	۰/۸۹۱	۰/۱۱۴	۰/۹۹۳	۱۸/۸۶	۰/۰۲۴
	۳	۴۱/۸۲	۵۷/۷۴	۰/۳۸	۰/۳۱	۰/۹۹	۳۲/۴۵	۰/۲۲	۱۱/۱۶	۰/۷۳	۰/۰۰۶	۰/۹۹۹	۰/۹۷	۰/۹۷۶	۰/۰۴۲	۰/۹۹۹	۲۰/۲۵	۰/۵۱۵
میانگین		۴۴/۶۷	۶۳/۸۷	۰/۴۹	۳/۰۹	۰/۹۴	۳۵/۸۱	۰/۲۱	۱۵/۱۱	۰/۶۴	۰/۰۳	۱/۰	۳/۸۱	۰/۸۷	۰/۳۴	۰/۹۹	۲۵/۹۱	۰/۵۳

از جدول ۳، مشاهده می‌شود میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع از روش‌های استوانه دوگانه، بارافتان و نفوذسنج گلف به‌ترتیب ۶۳/۸۷، ۴۴/۶۷ و ۳/۰۹ سانتی‌متر بر روز و از مدل رزتا ۳۵/۸۱ سانتی‌متر بر روز است. به‌گونه‌ای‌که بیشترین میانگین نسبت خطا (e_r) برابر ۰/۹۴ به‌روش نفوذسنج گلف و کمترین e_r برابر ۰/۲۱ به مدل رزتا تعلق دارد. در بین توابع انتقالی نیز بیشترین e_r برابر ۱/۰ به‌روش کمپل و شوزاوا، پاکت و همکاران و کمترین e_r برابر ۰/۵۳ به‌روش کاسبای و همکاران، مربوط بود که می‌تواند ناشی از لحاظ دو متغیر مستقل اندازه ذرات خاک و رابطه غیرنمایی آن باشد. رسول‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) برآوردهای مدل کاسبای و همکاران برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک را مناسب گزارش کردند. در خصوص بالا بودن e_r در روش‌های برآوردی می‌توان اظهار داشت که بیشتر بودن تعداد متغیرهای مستقل موثر در برآورد هدایت هیدرولیکی می‌تواند در افزایش دقت برآوردها تاثیر داشته باشد. متغیرهای مستقل در روش کمپل و شوارتز و کاسبای و همکاران درصد شن و رس و در سایر توابع انتقالی تنها یک پارامتر درصد رس یا شن می‌باشد. کم بودن تعداد متغیرهای مستقل در برآورد هدایت هیدرولیکی می‌تواند موجب برآورد غیر واقعی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری مانند روش بارافتان باشد. ماهیت رفتاری اجزای خاک اثر زیادی بر هدایت هیدرولیکی اشباع دارد و مطابق اطلاعات جدول ۲ ضریب تغییرات ذرات شن و سیلت ۴۸ و ۳۷ درصد است که بیش از ضریب تغییرات ذرات رس (۱۷ درصد) است. بنابراین زیاد بودن ضریب تغییرات می‌تواند موجب تشدید تفاوت در ماهیت رفتاری اجزای خاک شود و برای دوری جستن از آن و افزایش دقت می‌توان تعداد نقاط اندازه‌گیری را افزایش داد. هم‌چنین دقت توابع انتقالی خاک به پایگاه اطلاعاتی آن‌ها نیز وابسته است که در کشورهای مختلف و براساس پایگاه‌های اطلاعاتی محدود منطقه‌ای برای تیپ‌های متفاوت خاک‌ها ارائه شده‌اند. عدم قطعیت‌های فراوان متغیرهای مستقل توابع انتقالی در شرایط غیر استخراج، امری است که موجب کاهش دقت توابع انتقالی می‌شود (کلیشادی و همکاران، ۱۳۹۲).

در جدول ۴ خلاصه شاخص‌های کمی ارزیابی برای روش‌های اندازه‌گیری و توابع انتقالی مبتنی بر اطلاعات خاک در قالب پارامترهای درجه انحراف، نسبت خطای متوسط هندسی و نسبت خطای انحراف معیار هندسی نسبت به‌روش بارافتان، آورده شده است.

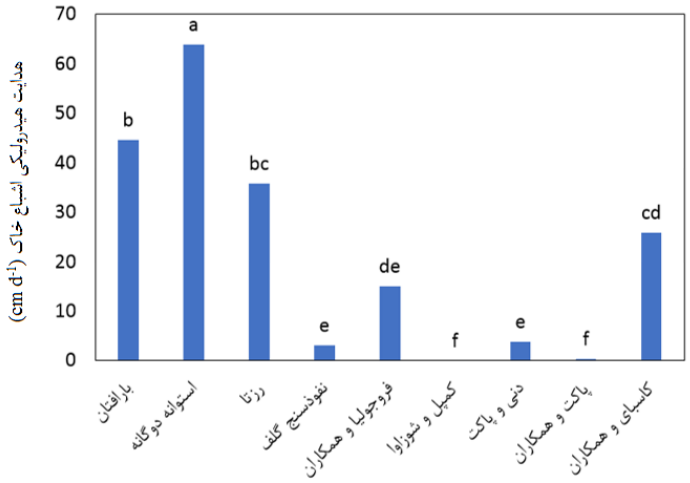
جدول (۴): مقادیر آماره‌های خطاسنجی روش‌های مختلف برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نسبت به‌روش بارافتان

آماره	استوانه دوگانه	مدل رزتا	نفوذسنج گلف	فررجولیا و همکاران	کمپل و شوزاوا	دنی و پاکت	پاکت و همکاران	کاسبای و همکاران
درجه انحراف (DT)	۴/۷۵	۵/۳۱	$۵/۷۲\times۱۰^{۸}$	۱۹۱/۰۲	$۲/۵۲\times۱۰^{۱۳}$	$۱۱/۳۹\times۱۰^{۴}$	$۴/۲۷\times۱۰^{۹}$	۲۶/۱۴
نسبت خطای متوسط هندسی (GEMR)	۱/۴۸	۰/۷۵	۰/۰۴	۰/۳۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۷	۰/۰۰۴	۰/۶۳
نسبت خطای انحراف معیار هندسی (GSDER)	۱/۱۰	۱/۴۰	۳/۷۹	۲/۲۶	۴/۷۱	۳/۷۲	۵/۱۹	۲/۰۸

آماره‌های خطاسنجی در جدول ۴ نشان می‌دهند که روش‌های مختلف، از دقت‌های متفاوتی برخوردارند. روش استوانه دوگانه براساس آماره GEMR>۱ بیش‌برآوردی دارد و دیگر روش‌ها با GEMR<۱ کم‌برآوردی دارند. روش استوانه دوگانه، مدل رزتا و تابع انتقالی کاسبای و همکاران به‌ترتیب با DT، ۴/۷۵، ۵/۳۱ و ۲۶/۱۴، GMER نزدیک به ۱ و GSEDR کمتر، بیشترین دقت و کمترین انحراف را نسبت به‌روش بارافتان نشان دادند. در حالی‌که روش نفوذسنج گلف و سایر توابع انتقالی از دقت کمی برخوردارند.

یکی از دلایل دقت کمتر توابع انتقالی، ماهیت منطقه‌ای این توابع، وابستگی بیشتر به متغیرهای ماتریس خاک مانند درصد ذرات رس خاک و عدم توجه به خلل و فرج درشت و ساختمان خاک است. در واقع اولویت استفاده از این توابع باید برای خاک‌هایی مشابه با شرایط توسعه‌ی آن‌ها باشد و برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های مناطق دیگر، ابتدا باید ارزیابی شوند و پس از آن با احتیاط جدی برای دیگر مناطق استفاده شوند. کلیشادی و همکاران (۱۳۹۲) نیز ناکارآمدی توابع انتقالی در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک را ناشی از توجه این توابع به ویژگی‌های بافتی خاک و اهمیت کمتر به ساختمان خاک به‌عنوان تخمین‌گر دانسته‌اند. در خصوص مدل رزتا جدول ۴ نشان می‌دهد، این مدل دقت مناسبی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک دارد که علت آن داده محور بودن این مدل است. کارایی مدل رزتا به‌دلیل وجود فرآیند آموزش و یادگیری آن براساس بانک جامع داده‌های هیدرولیکی خاک‌های جهان است. مدل رزتا توانایی برآورد هدایت هیدرولیکی خاک را با مقادیر درصد اندازه ذرات شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری خاک دارد (رسول‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). عملکرد نسبتا مناسب روش استوانه دوگانه نیز می‌تواند ناشی از عدم وجود نیروی رو به بالای کاپیلاریته خاک در اثر اشباع شدن حجم بیشتری از خاک به‌واسطه سطح بیشتر مورد آزمایش و وجود استوانه بزرگ‌تر باشد. دقت پایین روش گلف نسبت به‌روش استوانه‌های دوگانه در مقایسه با روش بارافتان، ناشی از اشباع شدن حجم کمتر خاک اطراف چاهک‌ها، عدم برقراری فرض فشار منفذی صفر و لیسه شدن دیواره چاهک در هنگام حفر است. مطالعات انجام شده هم نشان داده که در خاک‌های رسی، روش گلف مقادیر کمتری نسبت به روش استوانه دوگانه برآورد می‌نماید (Gupta et al., 1993). البته لایه لایه بودن خاک به‌دلیل ترددهای ناشی از هم‌جواری با سازه‌های ساختمانی، مسدود شدن مسیرهای جریان با ذرات ریز خاک، تراکم و در هم تندیدن ریشه علف‌های هرز چند ساله با ریشه افشان نخیلات به‌دلیل عدم توجه جدی به عملیات باغداری، از مواردی بود که در حین حفاری مشاهده شد (شکل ۲). وجود چنین شرایطی مانع از نفوذ کامل آب به لایه‌های زیرین و ماندابی شدن کاذب لایه‌های بالایی می‌شود.

در شکل ۳، مقایسه میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد آمده است. این مقایسه برای تشخیص اختلاف معنی‌دار بین میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع روش‌های مختلف است.

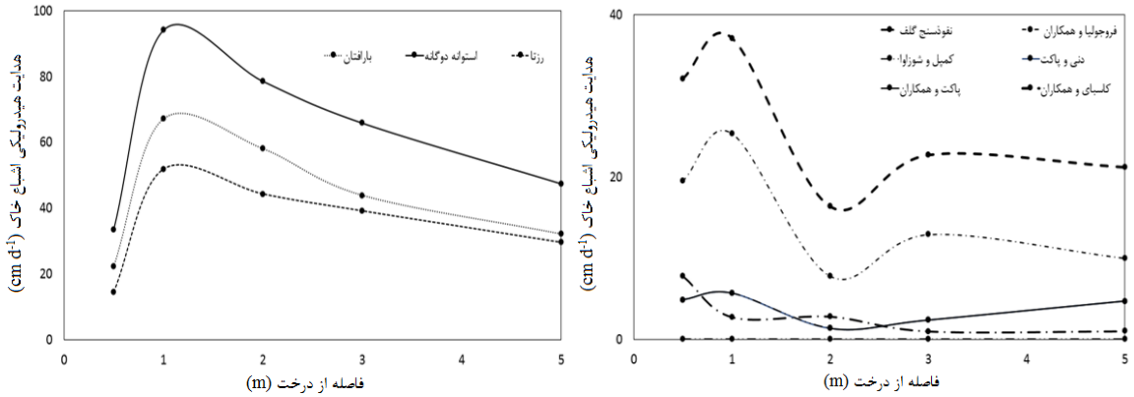


شکل (۳): مقایسه میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در روش‌های مختلف

شکل ۳ نشان می‌دهد که تفاوت بین میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع روش‌های مختلف درسطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. این بدان معنی است که نوع روش اندازه‌گیری بر مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع اثر داشته است. نتایج آزمون دانکن نشان دادکه از لحاظ آماری اختلاف بین نتایج روش‌های استوانه‌های دوگانه و نفوذسنج گلف با نتایج روش بارافتان در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار و بین مدل رزتا با روش بارافتان، رزتا با مدل کاسبای و همکاران فاقد تفاوت معنی‌دار است. همچنین تفاوت بین میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع به‌دست آمده از دیگر توابع انتقالی با روش بارافتان معنی‌دار بود. مطابق نتایج شکل ۳، همواره مقادیر میانگین هدایت هیدرولیکی از روش استوانه دوگانه، در مقایسه با دیگر روش‌ها بیشتر است که در راستای نتایج جدول ۴ مبنی بر بیشتر بودن شاخص نسبت خطای متوسط هندسی (GEMR) این روش نسبت به دیگر روش‌ها است. بالا بودن مقدار هدایت هیدرولیکی در روش استوانه دوگانه در تحقیقات قانی و همکاران (۱۳۹۱) نیز گزارش شده است. آنان علت این فزونی را در ماهیت روش استوانه دوگانه دانسته‌اند که تا عمق مشخصی از خاک، جریان آب تنها عمودی بوده و فاقد حرکت جانبی است. هم‌چنین بار آبی مثبت و سطح بیشتر آزمایش در روش استوانه‌های دوگانه باعث افزایش مقدار هدایت هیدرولیکی می‌گردد. دلیل دیگر بیشتر بودن هدایت هیدرولیکی خاک در روش استوانه‌های دوگانه احتمال افزایش جریان از خلل و فرج درشت به‌واسطه عدم برهم خوردن ساختمان خاک، وجود جریان‌های ترجیحی از محل تماس استوانه‌ها با خاک و کمتر بودن هدایت هیدرولیکی خاک در روش گلف به‌واسطه کوچک‌تر بودن اندازه‌ی نمونه مورد آزمون است (Mohanty et al., 1994). در هر حال نتایج منفی روش گلف به‌ویژه در خاک‌های رسی، هم‌چنان به‌عنوان یک محدودیت این روش است (مشعل و همکاران، ۱۳۹۰). لذا راه‌کارهای کاهش نتایج منفی در روش گلف، گام موثری در گسترش و استفاده مفید از این دستگاه، محسوب می‌شود. یکی از این راه‌کارها انتخاب مقداری مناسب برای α^* در رابطه گلف (رابطه ۴) و اجرای روش دو عمقی به‌جای روش تک عمقی است. پارامتر α^* وابسته به نوع بافت - ساختمان است و نمایان‌گر میزان تأثیر عوامل اشباع و غیر اشباع خاک در اطراف محل چاهک است (خوارزمی و همکاران، ۱۳۹۱). کمترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز از دو تابع انتقالی کمپل و شوزاوا، برابر ۰/۰۳ cm d^{-1} و پاکت و همکاران، ۰/۳۴ cm d^{-1} به‌دست آمد که در یک گروه آماری مشترک با حرف f جای گرفتند. برآوردهای کمتر این دو تابع هم‌سو با کمترین مقدار GEMR، ۰/۰۰۰۴ و ۰/۰۰۴ در جدول ۴ می‌باشد. در مجموع با توجه به شاخص‌های آماری به‌دست آمده در جدول ۴ و مقایسه میانگین‌های صورت گرفته در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد هیچ‌یک از توابع انتقالی مورد بررسی، برای تخمین Ks در مقایسه با روش بارافتان مناسب نیستند. بنابراین بهتر است توابع انتقالی خاک اختصاصی برای

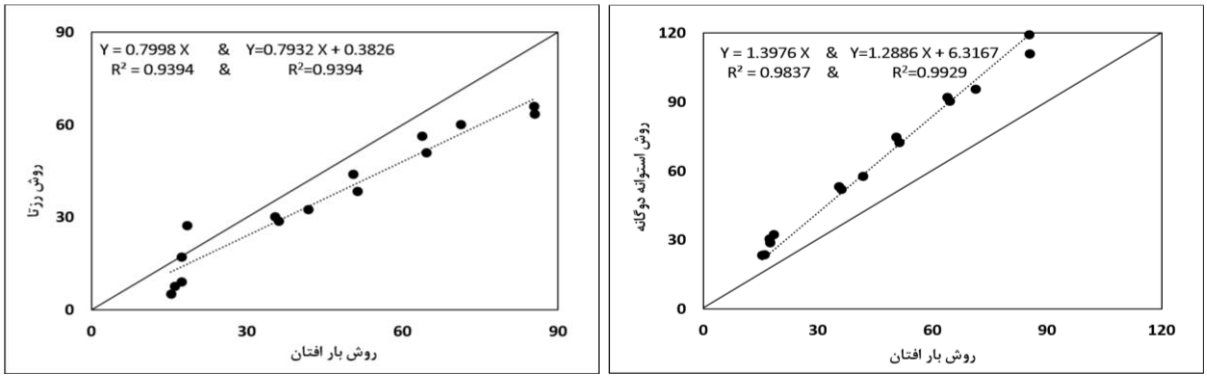
منطقه استخراج شود و یا توابعی با تعداد متغیر مستقل بیشتر به‌کار گرفته شوند.

در شکل ۴ میانگین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در فواصل ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۵ متری از درخت نخل به‌روش‌های مختلف ارائه شده است. شکل ۴ (راست) تغییرات افقی هدایت هیدرولیکی به‌روش توابع انتقالی و روش نفوذسنج گلف و شکل ۴ (چپ) تغییرات افقی هدایت هیدرولیکی به‌روش بارافتان، استوانه دوگانه و مدل رزتا را نشان می‌دهد.



شکل (۴): تغییرات افقی هدایت هیدرولیکی

مطابق شکل ۴ (چپ)، روند تغییرات افقی هدایت هیدرولیکی در سه روش استوانه دوگانه، بارافتان و رزتا مشابه است. مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع، در فاصله یک متری از درخت نخل، هدایت هیدرولیکی خاک افزایش و پس آن کاهش و در فواصل دور از نخل، به سمت مقداری تقریبا ثابت با تغییرات کم ختم می‌شود (شکل ۴، چپ). در حالی‌که شکل ۴ (راست) نشان می‌دهد تغییرات هدایت هیدرولیکی در روش نفوذسنج گلف متفاوت از سه روش استوانه‌های دوگانه، بارافتان و مدل رزتا است. روش گلف برای خاک‌های همسان و یکنواخت عملکرد خوبی دارد و کم‌برآوردی آن می‌تواند به‌دلیل وجود لایه‌های خاک، ترک‌ها و حفره‌های درون خاک باشد و نادیده انگاشتن اثر غیراشباع خاک اطراف چاهک باشد (خوارزمی و همکاران، ۱۳۹۱). برای توابع انتقالی نیز از شکل ۴ ملاحظه می‌گردد که تغییرات هدایت هیدرولیکی برآوردی با توابع انتقالی خاک ضمن تفاوت درونی بین توابع (تفاوت نقطه به نقطه متناطر با یکدیگر) با روند تغییرات هدایت هیدرولیکی روش‌های بارافتان، استوانه‌های نفوذسنج و مدل رزتا نیز متفاوت است. اما همچنان که قبلا اشاره شد با توجه به معیارهای آماریِ مناسب‌تر دو روش استوانه دو گانه و مدل رزتا، روند نشان داده شده در شکل ۴ (سمت چپ) می‌تواند نشان‌دهنده روند احتمالی تغییرات افقی هدایت هیدرولیکی اشباع باشد. کلیشادی و همکاران (۱۳۹۲) دقت توابع انتقالی خاک را متاثر از تعداد متغیرهای مستقل برآورد کننده هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و عدم قطعیت آن‌ها گزارش کرده‌اند که در توابع انتقالی مورد کاربرد در این مطالعه حداکثر دو متغیر درصد اندازه شن و رس خاک است. در مجموع به‌نظر می‌رسد تغییرات افقی مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و عدم هم‌خوانی کامل نتایج روش‌ها با یکدیگر با توجه به‌عدم تغییر بافت خاک در محدوده افقی از نخل، ناشی از تغییرات ساختمان خاک، گستردگی فعالیت ریشه در اطراف ساقه نخل و فعالیت کمتر آن در فواصل دورتر است. بدین ترتیب تفاوت در هدایت هیدرولیکی‌ها، علاوه بر تغییرات ساختمان خاک می‌تواند ناشی از وجود ریشه گیاهان (ریشه علف‌های هرز و ریشه نخیلات)، ماهیت روش‌ها، درز و ترک‌های سطحی و درونی خاک باشد (Nam et al., 2021). از نتایج دیگر شکل ۴ (چپ) تشابه در روند تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک دو روش استوانه دوگانه و مدل رزتا با روش بار افتان است که وضعیت بهتر این‌دو روش مطابق آماره‌های خطاسنجی در جدول ۴، نیز نشان داده شد. براین اساس سعی گردید تا رابطه بین این دو روش با روش بارافتان در قالب مدل خطی با عرض از مبداء صفر و مدل خطی دارای با عرض استخراج شود (شکل ۵).



شکل (۵): مقایسه هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌دست آمده از روش‌های استوانه دوگانه و مدل رزتا با روش بار افتان

شکل ۵، تغییرات مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری به‌روش استوانه دوگانه و برآوردی از مدل رزتا در محور عمودی در مقایسه با هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده به‌روش بارافتان در محور افقی به‌صورت نظیر به نظیر نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد رابطه همبستگی نسبتا خوبی بین هدایت هیدرولیکی بار افتان به‌عنوان متغیر مستقل با هدایت هیدرولیکی به‌روش‌های استوانه دوگانه و مدل رزتا به‌عنوان متغیر وابسته، برقرار است. همبستگی برقرار شده در هر دو حالت عرض از مبداء صفر و دارای عرض از مبداء غیر صفر برقرار است. به‌طوری‌که از شکل ۵، ملاحظه می‌گردد ضریب تعیین بین هدایت هیدرولیکی روش استوانه دوگانه و مدل رزتا با روش بارافتان در حالت عرض از مبداء صفر به‌ترتیب ۹۸ و ۹۴ درصد و در حالت عرض از مبداء غیر صفر ۹۹ و ۹۴ درصد است. یکی از دلایل کمتر بودن ضریب تعیین مدل رزتا، پراکندگی بیشتر نقاط هدایت هیدرولیکی به‌ویژه در فاصله ۰/۵۰و ۱ متری نسبت به‌روش استوانه‌های دوگانه در قیاس با مقادیر متناظر در روش بارافتان است که در شکل ۵ به‌صورت چشمی مشهود است. هم‌چنین شکل ۵، بیش‌برآوردی روش استوانه دوگانه و کم‌برآوردی روش رزتا در شکل ۴، شکل ۳ و جدول ۴ را در هر دو حالت عرض از مبداء صفر و عرض از مبداء غیر صفر تایید می‌نماید. از مقایسه بین نتایج و تحلیل آماری انجام شده می‌توان نتیجه گرفت روش استوانه دوگانه، با GSDER=۱/۱ مقادیر نزدیکتری به‌روش بارافتان داشته و از این نظر رتبه نخست را دارد و مدل رزتا با GSDER=۱/۴ در رتبه دوم قرار دارد. بیشتر بودن ضریب تعیین در روش استوانه دوگانه در هر دو حالت عرض از مبداء صفر و عرض از مبداء غیر صفر بیان‌گر برتری این روش در قالب آماره DT=۴/۷۵، و GMER نزدیک به ۱ است. از طرفی همان‌گونه‌که در شکل ۳ نشان داده شد میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع برآوردی از مدل رزتا فاقد تفاوت معنی‌دار با مقادیر متناظر در روش بارافتان است و نتایج هر دو روش در سطح ۵ درصد در یک گروه آماری مشترک با حرف b قرار دارند. مدل رزتا به‌دلیل داشتن مبانی تئوریکی قوی و بانک اطلاعاتی از خاک‌های جهان و آسیا توانایی برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع از خاک منطقه مورد مطالعه را دارد. از مزایای مدل رزتا داشتن جواب‌های قابل قبول و منطقی براساس اطلاعات زودیافت خاک است که در مطالعات رسول‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) نیز گزارش شده است. ارزشمندی مدل رزتا در ممانعت از هدررفت زمان و جلوگیری از هزینه انجام آزمایش‌ها برای تسریع در رسیدن به جواب براساس اطلاعات زودیافت خاک‌ها می‌باشد. تکرار آزمایشات، دقت در انجام آزمایشات، داشتن اطلاعات پایه مربوط به خاک، استخراج توابع انتقالی خاص منطقه می‌تواند در جهت کاهش اختلاف بین نتایج، گسترش استفاده از مدل رزتا و یا توابع انتقالی موثر باشد.

نتیجه‌گیری

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از خصوصیات مهم و تاثیرگذار در مدل‌سازی جریان آب و املاح در خاک است که نقش تعیین کننده در مدیریت آب و خاک دارد. اندازه‌گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی زمان‌بر، هزینه‌بر و دارای خطای سیستماتیک می‌باشد. به‌منظور کاهش خطای حاصل از روش اندازه‌گیری و یا خطای تخمین ذاتی مدل‌ها برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع، دقت مدل توابع

انتقالی رگرسیونی مختلف و هم‌چنین مدل کامپیوتری رزتا با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی، برای خاک‌های مختلف آزموده شد. نتایج بیان‌گر کم‌برآوردی هدایت هیدرولیکی اشباع به جز روش استوانه دوگانه در تمام مدل‌ها نسبت به روش بارافتان است.

نتایج کلی حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

- از لحاظ آماری، بین روش‌های استوانه دوگانه، بارافتان، نفوذسنج گلف و مدل روزتا اختلاف معنی‌دار وجود داشت.

- در منطقه مورد مطالعه همبستگی بالایی بین داده‌های به‌دست آمده از روش استوانه دوگانه، بارافتان و مدل روزتا وجود داشت و می‌توان از آن‌ها به‌جای یکدیگر استفاده کرد.

- در منطقه مورد مطالعه بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از طریق روش استوانه دوگانه به‌دست آمد.

-کاربرد روش نفوذسنج گلف منجر به ارائه نتایجی گردید که نیازمند بررسی بیشتر این روش در خاک‌های تحت پوشش درختان نخل دارد.

منابع

خوارزمی، ع.، م. مشعل، ق. زارعی و م. وراوی‌پور. ۱۳۹۱. اثر ضریب شکل چاهک در برآورد هدایت هیدرولیکی با پرامتر گلف. مجله پژوهش آب در کشاورزی، دوره ۲۶، شماره ۳، ص ۲۶۲-۲۵۱.

رسول‌زاده، ع.، س. رضوی قلعه‌جوق و م.ر. نیشابوری. ۱۳۹۱. ارزیابی دقت روش‌های برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع برای خاک‌های مختلف. مجله پژوهش آب در کشاورزی، دوره ۲۶، شماره ۳، ص ۳۱۶-۳۰۳.

قانی، ف.، س.ح. طباطبایی، م. شایان نژاد و ش. قربانی دشتکی. ۱۳۹۱. مقایسه چهار روش اندازه‌گیری درجای هدایت آبی اشباع خاک. مجله مهندسی منابع آب، دوره ۵، شماره ۱۵، ص ۶۸-۵۷.

کلیشادی، ح.، م. مصدقی، م.ع. حاج عباسی و ش.ا. ایوبی. ۱۳۹۲. ارزیابی و توسعه توابع انتقالی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقیاس زمین نما در زاگرس مرکزی. مجله تحقیقات کاربردی خاک، دوره ۱، شماره ۲، ص ۳۳-۱۶.

مرادی‌باصری، ح.، ش. قربانی‌دشتکی، ج. گیوی، ح. خداوردی‌لو و ب. خلیل‌مقدم. ۱۳۹۱. مقایسه سه روش صحرایی اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در برخی خاک‌های ورتیسول و انتیسول. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). دوره ۲۶، شماره ۱، ص ۱۸۲-۱۷۳.

مشعل، م.، ح. سهرابی، م. وراوی‌پور و ق. زارعی. ۱۳۹۰. اثر روش‌های مختلف تعیین عامل شکل چاهک بر نتایج اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به‌روش گلف. مجله مدیریت آب و آبیاری، دوره ۱، شماره ۱، ص ۶۸-۵۵.

Bodner, G., D. Leitner and H.P. Kaul. 2014. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. Plant and Soil, 380(1): 133-151.

Campbell, G.S. and S. Shiozawa. 1994. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside.

Cosby, B.J., G.M. Hornberger, R.B. Clapp and T.R. Ginn. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. Water Resources Research, 20 (6): 682-690.

Dane, J.H. and W.E. Puckett. 1994. Field soil hydraulic properties based on physical and mineralogical information. In Proceedings of an international workshop: Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. University of California, Riverside.

Feki, M., G. Ravazzani, S. Barontini, A. Ceppi and M. Mancini. 2020. A comparative assessment of the estimates of the saturated hydraulic conductivity of two anthropogenic soils and their impact on hydrological model simulations. Soil and Water Research, 15 (3): 135–147.

Ferrer-Julia M., T. Estrela Monreal, A. Sánchez del Corral Jiménez and E. García Meléndez. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. Geoderma, 123: 275-277.

Gupta, R.K., R.P. Rudra, W.T. Dickinson, N.K. Patni and G.J. Wall. 1993. Comparison of saturated hydraulic conductivity measured various field method. Transactions of the ASAE, 36(1):51-55.

Mohanty, B.P., R.S. Kanwar 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.

Nam, S., M. Gutierrez, P. Diplas and J. Petrie. 2021. Laboratory and in situ determination of hydraulic conductivity and their validity in transient seepage analysis. Water, 13 (8): 1-20.

Puckett, W. E., J.H. Dane and B.F. Hajek. 1985. Physical and mineralogical data to determine Soil hydraulic properties. Soil Science Society of America Journal, 49: 831-836.

Reynolds, W.D. and D.E. Elrick. 1987. Laboratory and numerical assessment of the guelph permeameter method. Soil Science, 144 (4): 282-299.

Reynolds, W. D., D.E. Elrick and B. E. Clothier. 1985. The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. Soil Science, 139 (2): 172-180.

Scanlan, C.A. 2009. Processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties. PhD Thesis, University of Western Australia.

Zhang, Y. and M.G. Schaap. 2019. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. Journal of Hydrology, 575: 1011-1030.

Comparison of Methods for Estimating Saturated Hydraulic Conductivity of Soil in Palmetum Lands

Hamid Zare Abyaneh[1*], Ali Soleimani[2], Saeid Jalili[3], Mehdi Jovzi[4]

Abstract

Saturated hydraulic conductivity of soil (Ks) is an important soil property in the management of irrigation and drainage issues, including areas covered with palm trees. This study was conducted to determine the amount of Ks in the palmetum lands of Bavi city of Khuzestan province. The amount of Ks was also evaluated using field, laboratory methods and Pedotransfer functions. The amount of Ks in five distances of 0.5, 1, 2, 3 and 5 meters from palm trees with three replications by double ring methods, Guelph permeameter, falling head, Rosetta model and Pedotransfer functions of Cosby et al., Ferrer-Julia et al., Campbell and Shiozawa, Dane and Puckett and Puckett et al. were obtained. Evaluation of the results showed that the double ring methods, Rosetta model and Pedotransfer function of Cosby et al. with a geometric mean error ratio of about 1 were more accurate than other methods. The deviation time of these methods were 4.75, 5.31 and 26.14, respectively. The geometric standard deviation error ratios of these methods to the falling head method were 1.10, 1.40 and 2.08, respectively.

Keywords: Double ring method, Falling head method, Guelph permeameter, Pedotransfer functions, Rosetta model.

[1] Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. (* Corresponding author) Email: zare@basu.ac.ir
[2] M.Sc. Alumni, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: Alireza1774soleimani@gmail.com
[3] Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Rural Engineering, Khuzestan Agricultural Sciences and Natural Resources University, Mollasani, Iran. Email: s.jalily@ramin.ac.ir
[4] Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran. Email: m.jovzi@areeo.ac.ir