

ارزیابی هدایت هیدرولیکی نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی به عنوان مرجع در برخی مدل‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک

حجت امامی^{۱*}، مهدی شرفا^۲ و محمدرضا نیشابوری^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۲۵)

چکیده

اندازه‌گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی غیراشباع ($K(h)$ یا $K(\theta)$) بسیار دشوار و وقت‌گیر است و در بسیاری از مدل‌های کاربردی، اغلب پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی براساس اندازه‌گیری‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) انجام می‌شود. با وجود این، استفاده از K_s به عنوان یک مرجع در بسیاری از مدل‌های تخمینی ممکن است باعث بیش برآورد $K(\theta)$ در ناحیه خشکی شود. بنابراین در این پژوهش از هدایت هیدرولیکی نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (K_i) و K_s به عنوان مرجع برای برآورد $K(h)$ استفاده گردید. برای اندازه‌گیری $K(h)$ ، ۳۰ نمونه خاک براساس تنوع بافت (۸ کلاس بافتی از شنی تا رسی) و سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از دشت کرج جمع‌آوری شدند. علاوه بر اندازه‌گیری K_s ، مقادیر $K(\theta)$ در نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از روش جریان خروجی چند مرحله‌ای در مکش‌های ماتریک ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ بار و نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی به کمک ستون آب آویزان و دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد. سپس مقادیر $K(h)$ و پخشیدگی هیدرولیکی $D(\theta)$ اندازه‌گیری شده با مقادیر تخمینی از مدل‌های وان‌گنوختن و بروکس و کوری (با فرضیات معلم و بردین) مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در ۸۰ درصد نمونه‌ها مدل وان‌گنوختن-معلم با K_i دقیق‌ترین و بهترین مدل برای پیش‌بینی $K(\theta)$ بود. یعنی استفاده از K_i به عنوان مرجع در مدل وان‌گنوختن-معلم، باعث برآورد بهتر مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده گردید. هم‌چنین در ۶/۷ درصد موارد (دو نمونه خاک رس شنی) مدل بروکس و کوری-معلم با K_i و در ۱۳/۳ درصد خاک‌ها (دو نمونه رس سیلتی و دو نمونه لوم رسی سیلتی)، مدل وان‌گنوختن-معلم دارای برآورد خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده $K(h)$ بود. علاوه بر این، در ۲۰ درصد موارد (چهار نمونه لوم رسی و دو نمونه لوم سیلتی) دقت و کارایی مدل‌های وان‌گنوختن-معلم با K_i و وان‌گنوختن-معلم در برآورد $K(h)$ تقریباً یکسان بود. براساس آزمون t-Student میانگین پارامترهای RMSE و GSDER در مدل وان‌گنوختن-معلم با K_i در سطح آماری ۱٪، به طور معنی‌داری کمتر از مدل وان‌گنوختن-معلم بود. در ۹۰ درصد از نمونه‌های خاک مورد بررسی، مدل‌های وان‌گنوختن-معلم و بروکس و کوری-بردین برآورد خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده $D(\theta)$ داشتند، ولی در مواردی مدل وان‌گنوختن-بردین با K_i بهترین مدل برای برآورد $D(\theta)$ بود.

واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی غیراشباع، منحنی مشخصه رطوبتی، نقطه عطف منحنی مشخصه، پخشیدگی هیدرولیکی

۱. استادیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳. استاد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hemami@ferdowsi.um.ac.ir

مقدمه

هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع، پارامترهای ضروری برای مدل‌سازی حرکت آب و نمک‌ها (آلاینده‌ها) در خاک می‌باشند، زیرا این پارامترها نشان‌دهنده توانایی ذاتی خاک برای انتقال آب هستند (۶). مدل‌های عددی که در مسائل مربوط به کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، رفتار آلاینده‌های خاک را پیش‌بینی و فرآیندهای انتقال در ناحیه غیراشباع را شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها معمولاً دانسته‌های مربوط به رابطه بین مقدار آب (θ)، پتانسیل ماتریک (h) و هدایت هیدرولیکی (K) را لازم دارند (۱۷). هدایت هیدرولیکی خاک غیراشباع، اساساً تابعی از رطوبت یا مکش ماتریک خاک است. به طور کلی، وقتی که مقدار آب خاک کاهش می‌یابد، هوا وارد منافذ خاک می‌شود. این منافذ پر از هوا، کانال‌های غیرمؤثر برای جریان آب می‌باشند. بنابراین با کاهش مقدار آب، تخلخل مؤثر کاهش می‌یابد که با کاهش هدایت هیدرولیکی خاک همراه است. از آنجا که نسبت K در واحد سطح با مربع شعاع منافذ تغییر می‌کند، K خیلی بیشتر از مقدار آب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مکش ماتریک (یا کاهش رطوبت) ابتدا منافذ بزرگ تخلیه می‌شوند که به طور عمده‌ای سطح مقطع مؤثر بر جریان آب کاهش می‌یابد. در نتیجه منافذ درشت که محل اصلی حرکت آب هستند، با افزایش مکش ماتریک غیرفعال می‌شوند. اکنون آب باید از راه منافذ ریز که مقاومت زیادی در مسیر جریان دارند حرکت کند و در نتیجه هدایت آن کاهش می‌یابد (۹).

در بین روش‌های مختلف تخمین غیرمستقیم هدایت هیدرولیکی غیراشباع، مدل‌های توزیع اندازه منافذ مانند بردین (۴) و معلم (۱۶) به کرات برای تخمین هدایت هیدرولیکی نسبی ($K(h)/K_s$) از روی منحنی مشخصه آب خاک (WRC) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این وجود، محققین مختلف پیشنهاد می‌کنند که پیش‌بینی‌های هدایت هیدرولیکی نسبی براساس مدل‌های بردین و معلم برای برخی از خاک‌های ناهمگن مناسب نمی‌باشد (۲۰، ۲۱). اندازه‌گیری مستقیم تابع

هدایت هیدرولیکی غیراشباع ($K(\theta)$) بسیار دشوار و وقت‌گیر است. بنابراین در بسیاری از مدل‌های کاربردی، اغلب پیش‌بینی‌های هدایت هیدرولیکی براساس اندازه‌گیری‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک و K_s انجام می‌شود (۲۱). با وجود این، استفاده از K_s اندازه‌گیری شده به عنوان یک نقطه مرجع (Matching point) در بسیاری از مدل‌های تخمینی، ممکن است باعث تخمین بیشتر هدایت غیراشباع در ناحیه خشکی به علت اثرات غالب ساختمان خاک بر جریان آب در شرایط نزدیک اشباع شود (۱۲). در ضمن مشاهده شده است که هدایت هیدرولیکی در محدوده پتانسیل‌های ماتریک نزدیک به اشباع (صفر تا 10^{-1} سانتی‌متر) به علت اثرات منافذ درشت ساختمانی یک تا سه برابر کاهش می‌یابد. بنابراین با حذف اثر منافذ درشت و استفاده از هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع به عنوان یک K مرجع برای پیش‌بینی $K(\theta)$ ، باید پیش‌بینی معتبرتر و بهتر باشد (۱۳).

گاردنر (۸) انتخاب K_s را به عنوان مرجع برای $K(\theta)$ مورد انتقاد قرار داد. او عنوان کرد که گرچه به کارگیری K_s مزایایی دارد، اما خاک مزرعه اغلب کاملاً اشباع نیست. او نتیجه گرفت که انتخاب K مرجع غیر از K_s در رطوبت‌های کمتر ممکن است ترجیح داده شود، اما او نتوانست آن را مشخص سازد. یکی از پیچیدگی‌های استفاده از K_s به عنوان مرجع این است که در وضعیت اشباع K_s اغلب توسط منافذ درشت مانند شکاف‌ها یا کانال‌های ایجاد شده توسط کرم‌های خاکی کنترل می‌شود که در تعیین و حتی نشان دادن منحنی رطوبتی خاک این منافذ درشت منظور نمی‌شوند (۵). برای فائق آمدن بر این مشکل، یارویس و همکاران (۱۴) استفاده از K مانند $h=10\text{ cm}$ را به عنوان مرجع پیشنهاد کردند و توابع انتقالی را ارائه دادند که قادر بود (K_{10}) را براساس ترکیب و تخلخل خاک تخمین بزند. دکستر (۵)، K نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (K_i) را به عنوان K مرجع پیشنهاد کرد. در پتانسیل $h(i)$ منافذ ساختمانی کنترل‌کننده هدایت هیدرولیکی هستند. K_i را می‌توان به عنوان یک نقطه مرجع برای تخمین هدایت

استفاده از روش جریان خروجی چند مرحله‌ای و به کمک دستگاه صفحه فشاری (۷) در مکش‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ بار و به کمک ستون آب آویزان در مکش نظیر نقطه عطف منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شد. با توجه به این‌که پیش از اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی در نقطه عطف منحنی رطوبتی، برای هر خاک تکرارهای دیگری در نظر گرفته شده بود، منحنی مشخصه رطوبتی هر خاک تعیین و با برازش داده‌های حاصل از منحنی رطوبتی با معادله وان‌گنوختن (۲۰) پارامترهای این معادله و مقادیر مکش و رطوبت نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی مشخص گردید. سپس با داشتن مکش نقطه مذکور مقادیر هدایت هیدرولیکی آن تعیین شد. قطع خروج آب از دستگاه به منزله پایان آزمایش برای هر فشار بود (دقت گردید که خروج آب به صورت واقعی قطع شود). طبق مشاهدات ممکن بود که در عرض یک ۲۴ ساعت هیچ آبی خارج نشود و بعد از آن، دوباره آب از نمونه خارج شود. در این تحقیق به صورت تجربی ملاک خارج نشدن آب از نمونه و حصول تعادل در هر فشار سه روز به صورت پیوسته در نظر گرفته شد. معادله مربوط به مکش و رطوبت در نقطه عطف منحنی رطوبتی براساس معادله وان‌گنوختن به صورت زیر می‌باشد (۵):

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{m} \right]^n \quad [1]$$

$$\theta_i = (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + \theta_r \quad [2]$$

در معادلات فوق θ_s و θ_r به ترتیب مقادیر رطوبت اشباع و باقی‌مانده (cm³ . cm⁻³)، h_i مقدار مکش (cm) در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی، α تقریباً معادل عکس پتانسیل در نقطه ورود هوا و m و n پارامترهای تجربی هستند.

ب) انتخاب K_i به عنوان مرجع به جای K_s
مدل‌های متعددی برای برآورد هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(h)$ ارائه شده‌اند. عمدتاً در تمامی آنها از K_s به عنوان مرجع استفاده شده است. در این تحقیق از K_i به عنوان یک نقطه مرجع به جای K_s در مدل‌های تخمین $K(\theta)$ استفاده شد. نسبت

هیدرولیکی در سایر پتانسیل‌های آب استفاده کرد. مؤلفه‌های نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی (مقادیر رطوبت و پتانسیل یا مکش) براساس محاسبات ریاضی به راحتی تعیین می‌شوند و حتی می‌توان به صورت دستی و با رسم منحنی رطوبتی در مقیاس نیمه لگاریتمی (ln مکش) نیز مشخصات نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی هر خاک را تعیین نمود. با توجه به این‌که نسبت‌های بین مقادیر $K(h)$ اندازه‌گیری شده و برآورد شده به میزان ۱۰^۳ تا ۱۰^۴ غیرمعمول نیست (۲۳)، بهتر است پژوهش‌های بیشتری انجام شود تا هدایت هیدرولیکی غیراشباع با دقت مناسبی برآورد شود. با توجه به آنچه گفته شد، تعیین مناسب‌ترین K مرجع جهت تخمین دقیق هدایت هیدرولیکی غیراشباع در مدل‌های مربوط به هدایت هیدرولیکی غیراشباع و پخشیدگی هیدرولیکی از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین هدف از این پژوهش جایگزینی K_i با K_s به عنوان مرجع برای برآورد $K(h)$ در برخی از مدل‌های مشهور هدایت هیدرولیکی غیراشباع و مقایسه آن با مقادیر اندازه‌گیری شده بود.

مواد و روش‌ها

الف) اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع در نمونه‌های دست‌نخورده

با توجه به این‌که اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع $K(h)$ بسیار وقت‌گیر است و امکان اندازه‌گیری و قرار دادن چند نمونه به طور هم‌زمان در دستگاه صفحه فشاری وجود ندارد، لذا برای اندازه‌گیری $K(h)$ ، ۳۰ نمونه از خاک‌های دشت کرج براساس تنوع بافت و سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی انتخاب شدند که شامل ۶ نمونه بافت رسی، ۸ نمونه لوم رسی، ۴ نمونه لومی، ۵ نمونه لوم رسی شنی، ۲ نمونه رس سیلتی، ۲ نمونه لوم رسی سیلتی، ۲ نمونه لوم سیلتی و یک نمونه لوم شنی بود. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) و غیراشباع ($K(h)$) از استون‌های دست‌نخورده با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر استفاده شد. سپس K_s به روش بار ثابت و $K(h)$ با

$$K_r = \left[\frac{\int_0^{Se} \frac{1}{\alpha [Se^{1/m} - 1]^{1/n}} dSe}{\int_0^{Se_i} \frac{1}{\alpha [Se^{1/m} - 1]^{1/n}} dSe} \right]^2 \quad [8]$$

ج) مدل‌های پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی غیراشباع بر مبنای K_s معادلات مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:
معادله وان‌گنوختن - معلم $(VG-M(K_s))$

$$m=1-1/n \quad [9]$$

$$K(h) = K_s \frac{\left[(1 - (\alpha h)^{n-1}) \left([1 + (\alpha h)^n]^{-m} \right) \right]^2}{(1 + (\alpha h)^n)^{m/2}}$$

معادله وان‌گنوختن - بردین $(VG-B(K_s))$

$$m=1-2/n \quad [10]$$

$$K(h) = K_s \frac{(1 - (\alpha h))^{n-2} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}}{(1 + (\alpha h)^n)^{2m}}$$

بروکس و کوری - معلم $(BC-M(K_s))$

$$\lambda=n-1 \quad [11]$$

$$K(h) = K_s (\alpha h)^{-2-(5\lambda/2)}$$

بروکس و کوری - بردین $(BC-B(K_s))$

$$\lambda=n-1 \quad [12]$$

$$K(h) = K_s (\alpha h)^{-2-3\lambda}$$

د) جایگزینی K_s با K_i در مدل‌های تخمین $K(h)$

یکی از اهداف پژوهش حاضر این بود که جایگزینی K_s با K_i در مدل‌های تخمین $K(h)$ تا چه حدی باعث بهبود توان یا دقت تخمین می‌گردد. به همین منظور در تعدادی از مدل‌های ذکر شده در بخش پیشین (معادلات ۹، ۱۰ و ۱۱) K_i به جای K_s به کار گرفته شد که در زیر به آنها اشاره شده است.

معادله وان‌گنوختن - معلم با K_i $(VG-M(K_i))$

این معادله شکل دیگر معادله وان‌گنوختن - معلم است، ولی بر عکس معادله وان‌گنوختن - معلم که هدایت هیدرولیکی را در

هدایت هیدرولیکی در هر Se به هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) ، هدایت هیدرولیکی نسبی (K_r) نامیده می‌شود:

$$K_r = \frac{K(Se)}{K_s} \quad [3]$$

$$K_r = Se^1 \left[\frac{\int_0^{Se} \frac{1}{h(Se)} dSe}{\int_0^1 \frac{1}{h(Se)} dSe} \right]^2 \quad [4]$$

$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ درجه اشباع مؤثر و 1 ضریب شاخص پیوستگی نافذ است که می‌تواند مثبت یا منفی باشد، اما اغلب از مقدار $1=0/5$ استفاده می‌شود. در معادله مذکور $h(Se)$ مدل منحنی رطوبتی خاک است. با به کارگیری معادله وان‌گنوختن (۲۰) برای $h(Se)$ خواهیم داشت:

$$h(Se) = \frac{1}{\alpha} \left[Se^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^n \quad \text{یا} \quad Se = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad [5]$$

و با قرار دادن مقدار $h(Se)$ در معادله (۴) و انتگرال‌گیری، نهایتاً K_r به فرم زیر در می‌آید.

$$K_r = \frac{\left[(1 + (\alpha h)^n)^m - (\alpha h)^{n-1} \right]^2}{(1 + (\alpha h)^n)^{2m}} \quad [6]$$

در صورت جای‌گذاری ثابت‌های a ، m و n می‌توان K_r را نسبت به K_s مرجع به دست آورد. حال اگر بخواهیم K_i را به عنوان مرجع به جای K_s در نظر بگیریم، کفایت که در رابطه (۴) در مخرج کسر، حد بالایی انتگرال را از 1 به Se_i تغییر دهیم. در چنین صورتی، K_r به صورت زیر می‌آید:

$$K_r = \frac{K(h)}{K_i} = \left[\frac{\int_0^{Se} \frac{1}{h(Se)} dSe}{\int_0^{Se_i} \frac{1}{h(Se)} dSe} \right]^2 \quad [7]$$

باید توجه داشت که معادله ۷ هدایت هیدرولیکی نسبی را برای هر Se در حد فاصل صفر تا Se_i به دست می‌آورد. با قرار دادن مقدار $h(Se)$ از معادله ۵ در معادله (۷)، K_r نسبت به مرجع K_i به صورت زیر در می‌آید:

و) مدل‌های پیش‌بینی $D(\theta)$

معادلات مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

معادله وان‌گنوختن- معلم (VG-M (KS))

$$m=1-1/n \quad [19]$$

$$D(\theta) = \frac{(1-m)K_S}{\alpha m(\theta_S - \theta_r)} Se^{1/2-1/m}$$

$$\left[(1-Se^{1/m})^{-m} + (1-Se^{1/m})^m - 2 \right]$$

معادله وان‌گنوختن- بردین (VG-B (KS))

$$m=1-2/n \quad [20]$$

$$D(\theta) = \frac{(1-m)K_S}{2\alpha m(\theta_S - \theta_r)} Se^{(2-1/m)/2}$$

$$\left[(1-Se^{1/m})^{-(m+1)/2} - (1-Se^{1/m})^{(m-1)/2} \right]$$

بروکس و کوری- معلم (BC-M (KS))

$$\lambda=n-1 \quad [21]$$

$$D(\theta) = \frac{K_S}{\alpha \lambda (\theta_S - \theta_r)} Se^{3/2+1/\lambda}$$

بروکس و کوری- بردین (BC-B (KS))

$$\lambda = n-2 \quad [22]$$

$$D(\theta) = \frac{K_S}{\alpha \lambda (\theta_S - \theta_r)} Se^{2+1/\lambda}$$

علاوه بر این، مدل‌های وان‌گنوختن- معلم و وان‌گنوختن- بردین عیناً و تنها با جایگزینی K_i به جای K_S به کار رفتند و مقادیر $D(\theta)$ محاسبه و با مقادیر اندازه‌گیری شده برای 30° نمونه خاک مقایسه شدند.

ز) ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی دقت مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق، مقادیر هدایت هیدرولیکی غیراشباع برآورد شده توسط هر مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده، از ضریب تبیین (R^2) و آماره‌های زیر استفاده شد:

جذر میانگین مربع خطا (Root mean square error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_p - y_m)^2}{N}} \quad [23]$$

حد فاصل Se مساوی صفر تا یک می‌دهد، این معادله هدایت هیدرولیکی را در حد فاصل Se مساوی صفر تا Se_i می‌دهد، که در مخرج معادله زیر نشان داده شده است (۵).

$$K(h) = K_i \times K_r \quad [13]$$

$$K_r = \frac{K(h)}{K_i} = \left[\frac{\int_0^{Se} \frac{1}{h(Se)} dSe}{\int_0^{Se_i} \frac{1}{h(Se)} dSe} \right]^2 \quad [14]$$

این معادله از طریق تعدیل جزئی (تبدیل انتگرال به سری و توابع بتای ناقص $\beta(x,a,b)$) ارائه می‌شود.

بروکس و کوری- معلم با $(BC-M (Ki)) Ki$:

$$\lambda=n-1 \quad [15]$$

$$K(h) = K_i (\alpha h)^{-2-(5\lambda/2)}$$

بروکس و کوری- بردین با $(BC-B (Ki)) Ki$:

$$\lambda=n-1 \quad [16]$$

$$K(h) = K_i (\alpha h)^{-2-3\lambda}$$

در تمامی معادلات فوق، h مقدار مکش (cm)، α تقریباً معادل عکس پتانسیل در نقطه ورود هوا و m و n پارامترهای تجربی هستند. K_S هدایت هیدرولیکی اشباع، K_i هدایت هیدرولیکی در نقطه عطف منحنی رطوبتی، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع، Se درجه اشباع و λ شاخص توزیع اندازه منافذ (بدون بعد) است.

ه) پخشیدگی هیدرولیکی

مقادیر پخشیدگی هیدرولیکی براساس معادله زیر از اطلاعات اندازه‌گیری شده منحنی رطوبتی خاک و مقادیر $K(\theta)$ محاسبه گردید (۱).

$$D(\theta) = K(\theta) |dh/d\theta| \quad [17]$$

$dh/d\theta$ گرادیان مکش نسبت به رطوبت حجمی خاک بوده و از معکوس نمودن معادله ۱۸ به صورت زیر محاسبه می‌گردد (۲۰):

$$\frac{d\theta}{dh} = \frac{-\alpha m(\theta_S - \theta_r)}{1-m} Se^{1/m} (1-Se^{1/m})^m \quad [18]$$

نتایج و بحث

هدایت هیدرولیکی غیراشباع

در جدول ۱ میانگین برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی برای خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که دامنه K_i برحسب کلاس بافت خاک بین $0/012$ تا $0/039$ متغیر است. دامنه تغییرات مکش و رطوبت در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی نیز به ترتیب بین 38 تا 51 (cm)، $0/49$ تا $0/6$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) می‌باشد. مطابق جدول ۱ کمترین مکش در نقطه عطف منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی متناظر با آن مربوط به خاک لوم شنی است که در این مکش دارای 37 درصد رطوبت است. از آنجا که در بین خاک‌های مورد مطالعه در این تحقیق بافت این خاک از همه درشت‌تر است، با مکش کمی منافذ درشت از آب تخلیه می‌شوند. بیشترین رطوبت در نقطه عطف منحنی مشخصه رطوبتی نیز متعلق به کلاس‌های بافتی رس سیلتی، رسی و لوم رسی است که دارای بیشترین مقادیر هدایت هیدرولیکی در این مکش نیز می‌باشند.

در خاک‌های رسی (۶ نمونه)، لوم رسی (۸ نمونه)، لومی (۴ نمونه) و لوم سیلتی (۲ نمونه) مدل وان‌گنوختن - معلم با K_i به عنوان K مرجع دقیق‌ترین مدل برای برآورد $K(h)$ بود. در خاک‌های رسی پس از مدل وان‌گنوختن - معلم با K_i ، مدل وان‌گنوختن - معلم در سه نمونه و مدل بروکس و کوری - معلم نیز در سه نمونه از نظر دقت و کارایی در برآورد $K(h)$ ، در مرتبه دوم اهمیت قرار داشتند. اما در خاک‌های لوم رسی پس از مدل وان‌گنوختن - معلم با K_i ، مدل وان‌گنوختن - معلم در تمام موارد دارای برآورد خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده $K(h)$ بود و حتی در چهار نمونه از هشت نمونه خاک لوم رسی، دقت و کارایی مدل وان‌گنوختن - معلم در برآورد $K(h)$ مشابه مدل وان‌گنوختن - معلم با K_i بود. هم‌چنین پس از دو مدل مذکور در هفت نمونه از هشت نمونه خاک لوم رسی، مدل بروکس و کوری - معلم نیز دارای برآورد نسبتاً خوبی با داده‌های $K(h)$ ، به ویژه در مکش‌های زیاد، بود.

y_m لگاریتم مقادیر اندازه‌گیری شده و y_p لگاریتم مقادیر پیش‌بینی شده هدایت یا پخشیدگی هیدرولیکی و N تعداد مشاهدات است که در این آزمایش برابر 30 بود. تیتجی و هنینگز (۱۹) به علت توزیع لگاریتمی - نرمال هدایت هیدرولیکی اشباع، خطای توابع انتقالی را با استفاده از میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی نسبت خطای مقادیر پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع، به صورت کمی بیان نمودند. نسبت خطای میانگین هندسی (GMER) و نسبت خطای انحراف معیار هندسی (GSDER) از نسبت خطای ε مقادیر پیش‌بینی شده (y_p) و اندازه‌گیری شده (y_m) محاسبه می‌شود:

نسبت خطا:

$$\varepsilon = \frac{y_p}{y_m} \quad [24]$$

میانگین هندسی نسبت خطا (GMER)

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\varepsilon_i)\right) \quad [25]$$

انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER)

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \ln(\varepsilon_i) - \ln(GMER)\right)^2\right]^{1/2} \quad [26]$$

GMER مساوی یک نشان‌دهنده برآورد دقیق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است، $GMER < 1$ نشان می‌دهد که به طور کلی مقادیر پیش‌بینی شده کم‌برآوردی (Underestimation) مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است، $GMER > 1$ نشان‌دهنده بیش‌برآوردی (Overestimation) بودن مدل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است. GMSDER مساوی یک نشان‌دهنده برآورد کامل است و با انحراف از داده‌های اندازه‌گیری شده مقدار آن زیاد می‌شود. بنابراین مقادیر GMER و GMSDER در بهترین مدل مساوی یک می‌باشد (۱۹). $\bar{\varepsilon}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت یا پخشیدگی هیدرولیکی است.

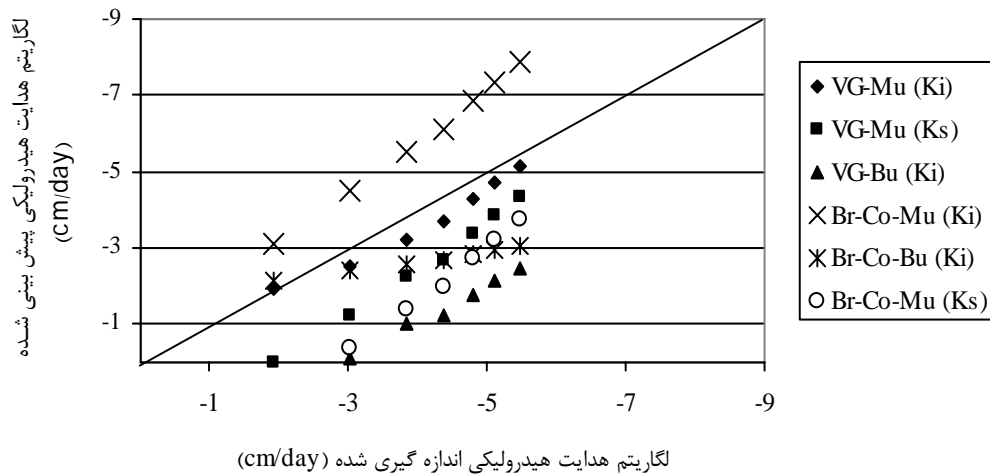
جدول ۱. میانگین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد بررسی در هر کلاس بافتی

تعداد	هدایت هیدرولیکی در نقطه عطف	رطوبت در نقطه عطف	مکش در نقطه عطف (cm)	درصد			کلاس بافتی
				رس	سیلت	شن	
۶	۰/۰۳۴۲	۰/۵۹	۴۴/۴	۴۳/۲۸	۳۰/۶۳	۲۶/۰۹	رس
۸	۰/۰۳۹۴	۰/۵۶	۴۱/۶	۳۵/۸۳	۳۷/۰۸	۲۷/۰۹	لوم رسی
۴	۰/۰۲۳۰	۰/۴۹	۴۰/۶	۱۸/۹۷	۴۳/۶۸	۳۷/۳۵	لوم
۵	۰/۰۲۲۵	۰/۴۴	۴۷/۲	۲۷/۲۶	۱۷/۳۲	۵۵/۴۲	لوم رسی شنی
۲	۰/۰۳۷۹	۰/۶۰	۴۶/۳	۴۴/۵۸	۴۰/۵۴	۱۴/۸۸	رس سیلتی
۲	۰/۰۲۸۸	۰/۵۱	۵۱/۳	۴۰	۴۳/۴۶	۱۶/۵۴	لوم رسی سیلتی
۲	۰/۰۲۳۵	۰/۴۹	۴۰/۶	۲۳/۰۲	۵۲/۷۲	۲۴/۲۶	لوم سیلتی
۱	۰/۰۱۲۲	۰/۳۸	۳۸/۱	۱۹/۸۴	۱۳/۸۴	۶۶/۳۲	لوم شنی

در هر دو خاک رس سیلتی مدل وان گنوختن- معلم برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده به ویژه در مکش‌های زیاد داشت. هم‌چنین مدل وان گنوختن- معلم با Ki نیز دارای برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده K(h) بود. در دو خاکی که بافتشان لوم رسی سیلتی بود، مدل‌های وان گنوختن- معلم و وان گنوختن- معلم با Ki برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند، ولی به طور نسبی و براساس مقادیر RMSE، GMER، GSDER و به ویژه R^۲ کارایی و دقت مدل وان گنوختن- معلم با Ki در برآورد K(h) بیشتر از مدل وان گنوختن- معلم بود. نتایج حاصل از برازش مدل‌های مورد بررسی بر یک نمونه خاک لوم شنی به عنوان نمونه در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که مدل وان گنوختن- معلم با Ki دقیق‌ترین مدل در برآورد K(h) می‌باشد و بیشترین پراکنش نقاط در اطراف خط ۱:۱ مشاهده می‌گردد.

در تمامی خاک‌های مورد بررسی، با آن‌که استفاده از Ki به عنوان نقطه برازش در مدل بروکس و کوری- بردین باعث بهبود خیلی زیاد آن شد، ولی دقت آن برای برآورد K(h) خیلی کم بود. بالعکس، در مدل بروکس و کوری- معلم استفاده از Ki به عنوان نقطه مرجع باعث کاهش درجه دقت و برازش آن گردید.

در خاک‌های لومی، پس از مدل وان گنوختن- معلم با Ki در دو نمونه تنها مدل وان گنوختن- معلم و در دو نمونه دیگر نیز مدل بروکس و کوری- بردین با Ki برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده K(h) داشتند. در سه نمونه از پنج نمونه خاک لوم رسی شنی و خاک لوم شنی، در بین مدل‌های مورد بررسی، مدل وان گنوختن- معلم با Ki بهترین و دقیق‌ترین مدل برای برآورد K(h) بود و حتی در سه نمونه تنها مدل وان گنوختن- معلم با Ki توانست مقادیر K(h) را به خوبی پیش‌بینی کند و هیچ کدام از مدل‌های دیگر نتوانستند مقادیر K(h) را در این سه نمونه به خوبی برآورد کنند. هم‌چنین در یکی از خاک‌های لوم رسی شنی، هیچ یک از مدل‌های مورد بررسی نتوانستند مقادیر K(h) را با دقت زیاد برآورد نمایند و تنها مدل بروکس و کوری- معلم با Ki برازش نسبتاً خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده K(h) به ویژه در مکش‌های کم داشت. علاوه بر این، در یک نمونه لوم رسی شنی نیز مشابه خاک قبلی مدل‌های مورد بررسی دقت کمی در برآورد K(h) داشتند، اما به طور نسبی مدل بروکس و کوری- معلم با Ki و مدل وان گنوختن- معلم برازش نسبتاً خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده K(h) نشان دادند، ولی دقت مدل بروکس و کوری- معلم با Ki در برآورد K(h) در این نمونه بیشتر از مدل وان گنوختن- معلم بود.



شکل ۱. مقایسه هدایت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با مدل‌های مختلف در خاک لوم شنی

مختلف (۵، ۸، ۱۴) نقطه‌ای غیر از نقطه اشباع باید به عنوان مرجع برای برآورد $K(h)$ در مدل‌های برآوردکننده $K(h)$ لحاظ شود.

علاوه بر این، گاردنر (۸) انتخاب K_S به عنوان مرجع برای برآورد $K(\theta)$ را مورد انتقاد قرار داد. او عنوان کرد که گرچه به کارگیری K_S مزایایی دارد، اما خاک در شرایط طبیعی اشباع نیست و نتیجه گرفت که انتخاب K مرجع در رطوبت‌های کمتر ممکن است ترجیح داده شود اما او نتوانست آن رطوبت‌ها را مشخص سازد. یکی از پیچیدگی‌های استفاده از K_S به عنوان مرجع، این است که در وضعیت اشباع K_S اغلب توسط منافذ درشت مانند شکاف‌ها یا کانال‌های ایجاد شده توسط کرم‌های خاکی کنترل می‌شود (۵). برای فائق آمدن بر این مشکل یارویس و همکاران (۱۴) استفاده از K نظیر $h=10\text{cm}$ را به عنوان مرجع پیشنهاد کردند و توابع انتقالی را ارائه دادند که قادر بود $K(10)$ را براساس ترکیب و تخلخل خاک تخمین بزنند. نتایج به دست آمده در این بررسی (جدول ۲) نشان می‌دهد که استفاده از هدایت هیدرولیکی نقطه عطف (K_i) باعث بهبود دقت مدل‌های $K(h)$ وان‌گنوختن-معلم، بروکس و کوری-معلم و کوری-بردین می‌شود. براساس آزمون t میانگین پارامترهای RMSE

با توجه به توضیحات فوق، در اکثر خاک‌های مورد بررسی (۸۰ درصد نمونه‌ها) مدل وان‌گنوختن-معلم با K_i دقیق‌ترین و بهترین مدل برای پیش‌بینی $K(h)$ بود. یعنی استفاده از K_i به عنوان مرجع در مدل وان‌گنوختن-معلم باعث برآورد بهتر مدل بر داده‌های اندازه‌گیری شد. هم‌چنین در ۶/۷ درصد موارد (دو نمونه خاک رس شنی) مدل بروکس و کوری-معلم با K_i و در ۱۳/۳ درصد خاک‌ها (دو نمونه رس سیلتی)، دو نمونه لوم رسی سیلتی، مدل وان‌گنوختن-معلم دارای برآورد خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده $K(h)$ بود. هم‌چنین در ۲۰ درصد موارد (دو نمونه لوم رسی) و دو نمونه لوم سیلتی دقت و کارایی مدل‌های وان‌گنوختن-معلم با K_i و وان‌گنوختن-معلم در برآورد $K(h)$ تقریباً یکسان بود.

دکستر (۵) نیز K_i را به عنوان مرجع پیشنهاد کرد. وی عنوان کرد که در پتانسیل h_i منافذ ساختمانی کنترل‌کننده هدایت هیدرولیکی هستند و با افزایش h_i خیلی سریع زه‌کشی می‌شوند. با تعیین K_i می‌توان آن را به عنوان یک مرجع برای تخمین هدایت هیدرولیکی در سایر پتانسیل‌های آب استفاده کرد. در نقطه اشباع، منافذ درشت در انتقال آب نقش زیادی دارند، ولی در مکش‌های غیراشباع منافذ متوسط و ریز در حرکت و انتقال آب نقش دارند و براساس نظر پژوهشگران

جدول ۲. مقادیر متوسط RMSE، GMER، GSDER و R^2 توسط مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی $K(h)$

مدل‌های مورد بررسی	RMSE	GMER	GSDER	R^2
وان‌گنوختن- معلم (Ki)	۰/۴۷۶	۳/۹۶	۲/۰۱	۰/۹۴
وان‌گنوختن- معلم (K_S)	۰/۶۸۷	۵/۹۹	۲/۷۲	۰/۱۳
وان‌گنوختن- بردین (K_S)	۱/۴۸۳	۱۳۴/۱۵	۲/۱۹	۰/۲۰
بروکس و کوری- معلم (Ki)	۱/۴۳۹	۰/۰۲۳	۴/۱۶	۰/۷۶
بروکس و کوری- معلم (K_S)	۱/۱۹۰	۳۴/۰۹	۴/۱۶	۰/۲۰
بروکس و کوری- بردین (Ki)	۱/۱۳۰	۵۶/۰۴	۹/۲۵	۰/۱۹
بروکس و کوری- بردین (K_S)	۳/۴۲۳	۷۴۷۳۷/۶	۹/۲۵	۰/۰۲

وان‌گنوختن- معلم با Ki بسیار کمتر است. در برخی از خاک‌ها (دو نمونه خاک رس شنی) استفاده از Ki سبب بهبود بالای مدل بروکس و کوری- معلم گشت، به طوری که در این دو خاک فقط مدل مذکور توانست $K(h)$ را با دقت خوبی برآورد نماید. مشابه مدل وان‌گنوختن- معلم استفاده از Ki به عنوان مرجع در مدل بروکس و کوری- بردین باعث افزایش دقت آن گردید، زیرا براساس آزمون t Student میانگین RMSE در مدل بروکس و کوری- بردین با Ki (۱/۱۳) به طور معنی‌داری در سطح ۱٪ کمتر از مدل بروکس و کوری- بردین (۳/۴۲) است و مقدار میانگین GMER نیز در مدل بروکس و کوری- بردین با Ki (۵۶/۰۴) در مقایسه با مدل بروکس و کوری- بردین با (۷۴۷۳۷/۵۷) به یک نزدیک‌تر است و تفاوت معنی‌داری با یکدیگر در سطح یک درصد دارند و مقادیر GSDER دو مدل مشابه است.

علاوه بر این استفاده از Ki به عنوان مرجع در مدل بروکس و کوری- بردین توانست مقدار R^2 را از ۰/۰۲ به ۰/۱۹ افزایش دهد، ولی به طور کلی کارایی و دقت دو مدل در مقایسه با مدل‌های وان‌گنوختن- معلم با Ki و بروکس و کوری- معلم با Ki بسیار کم است. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که در تمامی مدل‌هایی که از K_S به عنوان مرجع استفاده شده است، مقادیر GMER تفاوت فاحشی با مدل‌هایی که از Ki به عنوان مرجع استفاده شده است دارد. به عبارت دیگر همه آنها

و GSDER در مدل وان‌گنوختن- معلم با Ki در سطح آماری ۱٪ به طور معنی‌داری کمتر از مدل وان‌گنوختن- معلم بود. بالعکس، با آن‌که میانگین GMER در مدل وان‌گنوختن- معلم با Ki (۳/۹۶) کمتر از مدل وان‌گنوختن- معلم (۵/۹۹) و به یک نزدیک‌تر بود ولی تفاوت GMER به دست آمده از دو مدل معنی‌دار نبود. استفاده از Ki به عنوان مرجع در مدل بروکس و کوری- معلم در مجموع ۳۰ نمونه خاک، روند مشخصی نداشت، به طوری که میانگین مقدار RMSE در مدل بروکس و کوری- معلم به طور معنی‌داری در سطح ۵٪ کمتر از مدل بروکس و کوری- معلم با Ki بود.

هم‌چنین تفاوت معنی‌داری بین میانگین GMER دو مدل در سطح ۱٪ وجود داشت، ولی میانگین GMER ۳۰ نمونه خاک در مدل بروکس و کوری- معلم با Ki (۳۴/۰۹) در مقایسه با مدل بروکس و کوری- معلم (۰/۰۲) به یک نزدیک‌تر است و مقادیر GSDER هر دو مدل یکسان است. استفاده از Ki به عنوان مرجع در مدل بروکس و کوری- معلم سبب افزایش مقدار R^2 از ۰/۰۲ به ۰/۷۶ گشته است، لذا با این‌که براساس مقادیر RMSE و GMER نمی‌توان بین دو مدل تفاوتی قائل شد، اما چون مقدار R^2 در مدل بروکس و کوری- معلم با Ki بسیار بالاتر از مدل بروکس و کوری- معلم است، استفاده از Ki به عنوان مرجع توصیه می‌گردد. با این وجود دقت این دو مدل و به ویژه مدل بروکس و کوری- معلم در مقایسه با مدل

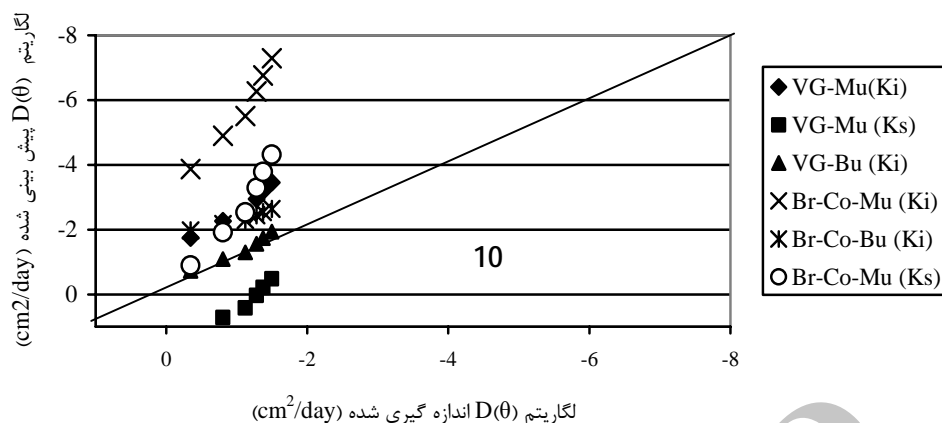
K_s دریافتند که برآزش در مدل‌های وان‌گنوختن (۲۰) و یارویس (۱۱) به میزان قابل توجهی بهبود یافت و استفاده از مدل بهبود یافته برای توصیف هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در مدل یارویس بهتر از مدل قبلی بود. بورگسن و همکاران (۲) هدایت هیدرولیکی در مکش ۴ سانتی‌متر را به عنوان مرجع برای تخمین هدایت هیدرولیکی غیراشباع در نظر گرفتند. نتایج بررسی‌های بورگسن و همکاران (۲) نشان داد که به طور متوسط، میزان بیش‌برآوردی هدایت هیدرولیکی در مدل وان‌گنوختن (۲۰) حدود ۳ برابر بود. میزان بیش‌برآوردی در کلاس‌های بافتی مختلف متغیر بود و بهترین برآزش مربوط به کلاس بافتی لوم و شن بود. نتایج به دست آمده از این پژوهش نیز نشان می‌دهند که استفاده از K_s به عنوان مرجع سبب بیش‌برآورد شدن هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌شود و استفاده از K_i سبب افزایش دقت مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش گشته است. علاوه بر این چون نقطه عطف منحنی رطوبتی و مؤلفه‌های آن (مقدار رطوبت و پتانسیل) را می‌توان نسبت به سایر نقاط غیراشباع راحت‌تر تعیین نمود، بنابراین می‌توان از آن به عنوان نقطه مرجع برای تخمین $K(h)$ استفاده نمود. در بین مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش، مدل بروکس و کوری-معلم با K_i در تمامی موارد و مدل وان‌گنوختن-معلم در ۳۰ درصد نمونه‌ها کم‌برآورد و سایر مدل‌ها بیش‌برآورد بودند.

پخشیدگی هیدرولیکی

نتایج به دست آمده در این بررسی نشان داد که در شش نمونه خاک رسی، مدل‌های وان‌گنوختن-معلم و بروکس و کوری-بردین برآزش خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده $D(\theta)$ داشتند که در سه نمونه از آنها مدل بروکس و کوری-بردین دقیق‌ترین مدل در برآورد $D(\theta)$ بود و در سه نمونه دیگر مدل وان‌گنوختن-معلم کارایی بیشتری در برآورد $D(\theta)$ داشت. مشابه خاک‌های رسی، در دو نمونه از چهار نمونه خاک لومی مدل بروکس و کوری-بردین برآزش خوبی با داده‌های $D(\theta)$ داشت.

بیش‌برآوردی بوده و در مواردی مقدار $K(h)$ پیش‌بینی شده چندین برابر مقادیر اندازه‌گیری شده است. نتایج مشابهی توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده است. به عنوان مثال، وان‌گنوختن و نیلسون (۲۱)، لوکنر و همکاران (۱۵) عنوان کردند که استفاده از K_s به عنوان مرجع مناسب نیست و استفاده از آن در مدل هدایت هیدرولیکی وان‌گنوختن (۲۰) می‌تواند منجر به بیش‌برآوردی هدایت هیدرولیکی غیراشباع ناشی از منافذ درشت که بر هدایت هیدرولیکی اشباع تأثیر می‌گذارند، شود. آنها استفاده از هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع را به عنوان مرجع توصیه نمودند. هافمن-ریم و همکاران (۱۰) و اسخاپ و لیچ (۱۸) دریافتند که برآزش هدایت هیدرولیکی غیراشباع با $K_s < k_0$ بسیار بهتر از $k_0 = K_s$ و $k_0 = 0.5$ در مدل وان‌گنوختن (۲۰) است. اسخاپ و لیچ (۱۸) دریافتند که استفاده از K_s مرجع در مدل وان‌گنوختن (۲۰) باعث می‌شود میزان بیش‌برآوردی هدایت هیدرولیکی غیراشباع یک برابر مقادیر واقعی شود. با این وجود، آنها عنوان کردند مدل برآزش یافته با k_0 نمی‌تواند هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع را به طور دقیق توصیف کند و ثابت نمودند با آن که معادله اصلاح‌شده وان‌گنوختن (۲۰)، مقادیر هدایت هیدرولیکی را در دامنه مکش صفر تا ۱۰ سانتی‌متر کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند، ولی در مقایسه با مدل وان‌گنوختن (۲۰) اولیه (با $k_0 = 0.5$ و $K_s = k_0$) هدایت هیدرولیکی در مکش‌های بیشتر را بهتر توصیف می‌کند (۱۸).

وگل و همکاران (۲۲) نیز تأثیر مدل وان‌گنوختن اصلاح شده (که در آن مکش h_s به عنوان مرجع تعریف شده بود) را بر پیش‌بینی توابع هیدرولیکی نزدیک به اشباع برای پیش‌بینی جریان آب بررسی نمودند و استفاده از نسخه اصلاح شده مدل هدایت هیدرولیکی وان‌گنوختن را برای خاک‌های ریز بافت توصیه نمودند. بررسی‌های بورگسن و همکاران (۲) نشان داد که استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع در مدل وان‌گنوختن باعث بیش‌برآورد نمودن هدایت هیدرولیکی غیراشباع می‌شود. آنها با در نظر گرفتن نقطه مرجع نزدیک به اشباع (k_0) به جای



شکل ۲. مقایسه پخشیدگی هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با مدل‌های مختلف در خاک لوم رسی شنی

شده $D(\theta)$ داشتند، اما در هر دو خاک، دقت و کارایی مدل وان‌گنوختن- معلم در برآورد $D(\theta)$ بیشتر بود. در هر دو خاک لوم سیلتی مدل بروکس و کوری- بردین بهترین برازش را بر داده‌های اندازه‌گیری شده داشت و دقت خیلی بالایی در برآورد مقادیر $D(\theta)$ نشان داد. علاوه بر این، با آن‌که دقت مدل وان‌گنوختن- معلم در هر دو خاک کمتر از مدل فوق بود، ولی این مدل نیز کارایی و دقت خوبی در پیش‌بینی $D(\theta)$ داشت. به طور کلی در ۹۰ درصد از نمونه‌های خاک مورد بررسی، مدل‌های وان‌گنوختن- معلم و بروکس و کوری- بردین برازش خوبی بر داده‌های اندازه‌گیری شده $D(\theta)$ داشتند، ولی در مواردی، مدل وان‌گنوختن- بردین با K_i بهترین مدل برای برآورد $D(\theta)$ بود. مطابق جدول ۳ میانگین مقادیر RMSE در مدل بروکس و کوری- بردین با K_s کمترین مقدار است و پس از آن در مدل بروکس و کوری- بردین با K_i کمتر است، ولی چون مقدار GSDER و به ویژه GMER در مدل بروکس و کوری- بردین با K_i کمتر از مدل بروکس و کوری- بردین بوده و به یک نزدیک‌تر است و از سوی دیگر مقدار R^2 در مدل بروکس و کوری- بردین با K_i در مقایسه با مدل بروکس و کوری- بردین بسیار بالاتر است، لذا دقت و کارایی مدل بروکس و کوری- بردین با K_i نه تنها بسیار بیشتر از مدل بروکس و کوری- بردین است، بلکه از سایر مدل‌های مورد بررسی نیز مقدار R^2 و هم‌چنین دقت و

در دو نمونه دیگر مدل وان‌گنوختن- معلم برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده $D(\theta)$ داشت. هم‌چنین در دو نمونه لومی، مدل وان‌گنوختن- بردین با K_i و در خاک‌های مدل وان‌گنوختن- معلم جهت برآورد $D(\theta)$ در درجه دوم اهمیت قرار داشتند. در دو نمونه خاک رس سیلتی نیز هر دو مدل بروکس و کوری- بردین و مدل وان‌گنوختن- معلم دارای کارایی خوبی در پیش‌بینی $D(\theta)$ داشتند. در همه ۸ نمونه خاک لوم رسی مورد بررسی، مدل وان‌گنوختن- معلم، دقیق‌ترین مدل در برآورد $D(\theta)$ بود. هم‌چنین در چهار نمونه خاک علاوه بر مدل وان‌گنوختن- معلم، مدل بروکس و کوری- بردین نیز دارای برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده $D(\theta)$ بود.

در پنج نمونه از شش نمونه خاک لوم رسی شنی، مدل وان‌گنوختن- بردین با K_i بهترین مدل برای برآورد $D(\theta)$ بود و هیچ یک از مدل‌های دیگر نتوانستند مقادیر $D(\theta)$ را با دقت قابل قبولی برآورد نمایند که به عنوان نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است. پراکنش نقاط در اطراف خط ۱:۱ نشان‌دهنده دقت بالای مدل وان‌گنوختن- بردین با K_i در پیش‌بینی $D(\theta)$ است. هم‌چنین مدل وان‌گنوختن- معلم فقط در یکی از خاک‌های لوم رسی شنی کارآمدترین مدل بود. در دو خاکی که بافتشان لوم رسی سیلتی بود، مدل‌های وان‌گنوختن- معلم و بروکس و کوری- بردین برازش خوبی با داده‌های اندازه‌گیری

جدول ۳. مقادیر متوسط RMSE، GMER و GSDER توسط مدل‌های مختلف برای پیش بینی $D(\theta)$

مدل‌های مورد بررسی	RMSE	GMER	GSDER	R^2
وان‌گنوختن- معلم (Ki)	۲/۰۹	۰/۰۳۸	۲/۶۱	۰/۲۴
وان‌گنوختن- معلم (K _S)	۱/۱۰	۱۰/۳۷	۷/۶۶	۰/۲۶
وان‌گنوختن- بردین (K _S)	۱/۶۰	۱۳۷/۰۹	۲/۷۴	۰/۰۶
بروکس و کوری- معلم (K _S)	۱/۹۷	۰/۰۰۸۲	۲۴/۷۲	۰/۰۵
بروکس و کوری- بردین (Ki)	۰/۹۸	۰/۱۰	۲/۴۹	۰/۴
بروکس و کوری- بردین (K _S)	۰/۷۴	۱۷/۳۰	۳/۲۴	۰/۰۹

کوری- بردین باعث برآزش بهتر مدل بر داده‌های اندازه‌گیری شده $K(h)$ شد، به طوری که در ۸۰ درصد از خاک‌های مورد بررسی مدل وان‌گنوختن- معلم با Ki و در ۶/۷ درصد موارد (دو نمونه خاک رس شنی) مدل بروکس و کوری-معلم با Ki دقیق‌ترین و بهترین مدل برای پیش‌بینی $K(h)$ بود و فقط در ۱۳/۳ درصد خاک‌ها (دو نمونه رس سیلتی)، دو نمونه لوم رس سیلتی، مدل وان‌گنوختن- معلم در مقایسه با مدل وان‌گنوختن- معلم با Ki برآزش بهتری بر داده‌های اندازه‌گیری شده $K(h)$ داشت. نتایج $D(\theta)$ نیز نشان داد که در مجموع دقت و کارایی مدل بروکس و کوری- بردین با Ki در پیش‌بینی $D(\theta)$ بیشتر از سایر مدل‌های مورد بررسی بود و بعد از مدل بروکس و کوری- بردین با Ki، مدل وان‌گنوختن- معلم با Ki نیز دقت بسیار خوبی در برآورد $D(\theta)$ داشت. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش و نقش منافذ ریز در انتقال آب در شرایط اشباع استفاده از Ki به عنوان مرجع جهت تخمین $K(h)$ و $D(\theta)$ در مدل‌های مورد بررسی توصیه می‌شود. علاوه بر این پیشنهاد می‌شود در سایر مدل‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفتند، استفاده از Ki به عنوان مرجع بررسی شود.

کارایی آن بیشتر است. علاوه بر این، با توجه به مقادیر چهار پارامتر ارائه شده در جدول ۳ بعد از مدل بروکس و کوری- بردین با Ki، مدل وان‌گنوختن- معلم با Ki نیز از دقت و کارایی بسیار خوبی در برآورد $D(\theta)$ برخوردار می‌باشد. رضایی و همکاران (۱) با مقایسه مدل‌های مختلف پخشیدگی و هدایت هیدرولیکی دریافتند که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مورد بررسی از روند خاص در نمونه‌های متفاوت بافتی تبعیت نمی‌کند که نتایج مشابهی در این پژوهش نیز به دست آمد. براساس نتایج رضایی و همکاران (۱)، مدل گاردنر (۷) مقادیر پخشیدگی هیدرولیکی را در سه نوع بافت (لوم رس شنی، شن لومی و لومی) بیشتر از سایر مدل‌ها برآورد نمود. در خاک‌های رس سیلتی، لوم رسی، لوم شنی و لوم رسی سیلتی برآوردهای مدل گاردنر (۷) تطابق نسبتاً خوبی با نتایج مدل بردین (۴) داشت (۱).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در ۳۰ نمونه خاک مورد بررسی شامل کلاس‌های بافتی مختلف از شن لومی تا رسی، استفاده از Ki به عنوان مرجع در مدل‌های مدل‌های وان‌گنوختن- معلم، بروکس و کوری-معلم و بروکس و

منابع مورد استفاده

۱. رضایی، ح.، م.ر. نیشابوری و ع. سپاسخواه. ۱۳۸۳. تعیین هدایت و پخشیدگی هیدرولیکی در خاک غیراشباع با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و انتخاب مناسب‌ترین مدل شبیه‌ساز. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۸ (۳): ۱۵-۳۰.
2. Børgesen, C.D., O.H. Jacobsen S. Hansen and M.G. Schaap. 2006. Soil hydraulic properties near saturation, an improved conductivity model. *J. Hydrol.* 324: 40-50.
3. Brooks, R.H. and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper, No. 3, Civil Engineering Dep., Colorado State Univ., Fort Collins, USA.
4. Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Petr. Trans., Amer. Inst. Mining Metall. Eng.* 198: 71-77.
5. Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality. Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120: 227-239.
6. Foley, J.L., P.E. Tolmie and D.M. Silburn. 2006. Improved measurement of conductivity on swelling clay soils using a modified disc permeameter method. *Aust. J. Soil Res.* 44: 701-710.
7. Gardner, W.R. 1956. Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 20: 317-320.
8. Gardner, W.R. 1974. The permeability problem. *Soil Sci.* 117: 243-249.
9. Ghildyal, B.P. and R.P. Tripathi. 2001. Soil physics. New Age International (P) Ltd. Pp: 656.
10. Hoffmann-Riem, H., M.Th. van Genuchten and H. Fluhler. 1999. A general model of the hydraulic conductivity of unsaturated soils. pp. 31-42 *In: van Genuchten, M.Th., F.J. Leij and L. Wu, (Eds.), Proceedings of International Workshop, Characterization and Measurements of Hydraulic Properties of Unsaturated Porous media. Riverside, CA. 22-24th Oct. 1997. University of California, Riverside.*
11. Jarvis, N. 1991. MACRO-a Model of Water Movement and Solute Transport in Macroporous Soils. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Soil Sciences. Reports and Dissertations 9.
12. Jarvis, N.J., I. Messing and M.H. Larsson. 1999. Measurement and prediction of near-saturated hydraulic conductivity for use in dual porosity models. PP. 839-850. *In: M.Th. van Genuchten et al. (Ed.), Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Part 2. University of California, Riverside, CA.*
13. Jarvis, N.J. and I. Messing. 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture as measured by tension infiltrometers. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 59: 27-34.
14. Jarvis, N.J., L. Zavattaro, K. Rajkai, W.D. Reynolds, P.A. Olsen, M. McGechan, M. Mecke, B. Mohanty, P.B. Leeds-Harrison and D. Jacques. 2002. Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma* 108: 1-17.
15. Luckner, L., M.Th. van Genuchten and D.R. Nielsen. 1989. A consistent set of parametric models for two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface. *Water Resour. Res.* 25: 2187-2193.
16. Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
17. Nemes, A., M.G. Schaap, F.J. Leij and J.H.M. Wisten. 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *J. Hydrol.* 251: 151-162.
18. Schaap, G.M. and F.J. Leij. 2000. Improved predictions of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-Van genuchten model. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.* 64: 843-851.
19. Tietje, O. and V. Hennings. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* 69: 71-84.
20. van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44: 892-898.
21. van Genuchten, M.Th. and D.R. Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophysicae* 3: 615-628.
22. Vogel, T., M.Th. van Genuchten and M. Cislerova 2001. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably saturated flow predictions. *Adv. Water Resour.* 24: 133-144.
23. Wagner, B., V.R. Tarnawski, V. Hennings, U. Müller, G. Wessolek and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma* 102: 275-297.

Evaluation of Hydraulic Conductivity at Inflection Point of Soil Moisture Characteristic Curve as a Matching Point for some Soil Unsaturated Hydraulic Conductivity Models

H. Emami^{1*}, M. Shorafa² and M. R. Neyshabouri³

(Received: Sep. 28-2010; Accepted: Jan. 15-2012)

Abstract

Direct measurement of soil unsaturated hydraulic conductivity ($K(h)$ or $K(\theta)$) is difficult and time-consuming, and often in many applied models, predicting hydraulic conductivity is carried out according to measurements of soil retention curve and saturated hydraulic conductivity (K_s). However, using K_s as a matching point in many procedures may result in over-estimation of unsaturated hydraulic conductivity in dry regions. Therefore, the unsaturated hydraulic conductivity at inflection point of retention curve (K_i) and K_s was used as a matching point to predict $K(h)$. For measurement of $K(h)$, 30 soil samples were collected based on variety of soil texture (8 texture classes from sandy to clay) and other chemical and physical properties. In addition to K_s , $K(\theta)$ values of undisturbed samples were measured using multi-step outflow method at matric suctions of 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1 bar and inflection point of retention curve by using hanging water column and pressure plate. Then, the measured $K(h)$, and water diffusivity ($D(\theta)$) values were compared to the predicted values of van Genuchten and Brooks and Corey models (with Mualem and Burdine constraint). The results showed that for 80% of the samples, the van Genuchten–Mualem model with K_i was the best model for predicting $K(h)$ (i.e. using K_i as a matching point in the van Genuchten–Mualem model resulted in best fitting to measured data). Also, in 6.7 % of samples (two sandy clay samples), Brooks and Corey–Mualem model with K_i and in 13.3 % soil samples (2 silty clay and 2 silty clay loam samples), van Genuchten–Mualem model had a best fitting to $K(h)$ measured data. Furthermore, in 20 % samples (4 clay loam, and 2 silt loam textures), the accuracy and efficiency of van Genuchten–Mualem with K_i and van Genuchten–Mualem models in predicting $K(h)$ were almost similar. According to t-Student test, the mean of RMSE and GSDER of van Genuchten–Mualem model with K_i was significantly less than van Genuchten–Mualem model at $P < 0.01$. In 90 percent of samples, van Genuchten–Mualem and Brooks and Corey–Burdine theory had the best fitting to the measured data of water diffusivity, but in some cases van Genuchten–Burdine model with K_i was the best model for predicting $D(\theta)$.

Keywords: Unsaturated hydraulic conductivity, Soil moisture characteristic curve, Inflection point of characteristic curve, Water diffusivity

1. Assis. Prof. of Soil Sci., College of Agric., Ferdowsi Univ. of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Assis. Prof. of Soil Sci., College of Agric. and Natur. Resour., Univ. of Tehran, Tehran, Iran.

3. Prof. of Soil Sci., College of Agric., Tabriz Univ., Tabriz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: hemami@ferdowsi.um.ac.ir