

کاربرد مدل‌های فراکتالی دو و سه‌فازی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

الناز رضائی آباجلو¹ - کامران زینال زاده^{2*}

تاریخ دریافت: 1394/05/25

تاریخ پذیرش: 1395/06/16

چکیده

هدایت هیدرولیکی خاک یکی از مهمترین خصوصیات هیدرولیکی در حرکت آب و املاح در محیط متخلخل به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر، مدل‌های متعددی به صورت توابع انتقالی، مدل‌های فراکتالی، مدل‌های تجربی و تکنیک مقیاس‌سازی به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع بکار گرفته شده است. هدف اصلی تحقیق حاضر، ارزیابی مدل‌های فراکتالی مختلف در برآورد پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک می‌باشد. به این منظور از مدل راولزو داده‌های اسخاپ و همکاران مشتمل بر شصت نمونه خاک استفاده شده است. در این مجموعه، بافت خاک به روش هیدرومتری، وزن مخصوص ظاهری به روش نمونه دست نخورده، هدایت هیدرولیکی اشباع با روش آزمایشگاهی بار ثابت، منحنی دانه‌بندی خاک به روش الک خیس و منحنی نگهداشت آب خاک به روش دستگاه صفحات فشاری برای تمام نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شده است. نتایج تحقیق بیانگر برتری مدل سه‌فاز یهانگ و زانگبا بالاترین میزان همبستگی، کمترین ریشه مجذور مربعات خطا ($RMSE=0.41$ cm/h) و آکائیک ($AIC=0.63$ cm/h) در بین مدل‌های فراکتالی مورد مطالعه، در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت، مدل ترکیبی راولز-هانگ کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات تخلخل و مکش ورود هوا و بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات بعد فراکتال دارد. بررسی شاخص‌های خطا، بیانگر بالا بودن دقت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در ترکیب مدل‌های سه‌فازی (PSF) مبتنی بر داده‌های بافت خاک با مدل راولز می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد با وجود اینکه تمام نمونه‌های مورد بررسی دارای کمتر از 8 درصد رس در ترکیب خود می‌باشند، اما میزان رس خاک در برآورد بعد فراکتالی نقش تعیین‌کننده و اساسی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: بعد فراکتال خاک، مدل فراکتالی هانگ و زانگ، مدل راولز

مقدمه

دسته‌بندی شامل توابع انتقالی (به صورت توابع رگرسیونی (27) و شبکه‌های هوشمند (35))، مدل‌های تجربی (4)، روش مقیاس‌سازی (36 و 23) و روش بعد فراکتال (28) قرار می‌گیرند. در حدود بیست سال اخیر، هندسه فراکتال به صورت گسترده‌ای در شبیه‌سازی محیط‌های متخلخل و خصوصیات هیدرولیکی آنها مانند هدایت هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (14، 17، 20، 21، 29 و 33). با این حال، تفسیر شاخص‌های مؤثر در بعد فراکتال به دلیل تأثیرپذیری از تعداد زیاد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پیچیده خاک به راحتی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

مدل‌های فراکتالی³ با دو زیرمجموعه دوفازی (بخش جامد و منافذ خاک) و مدل‌های فراکتالی سه‌فازی (بخش جامد، منافذ و فراکتال خاک) (PSF⁴) برای برآورد بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات خاک موجود می‌باشد. هانگ و همکاران (16) در تحقیقی با استفاده از مدل فراکتال دوفازی، منحنی SWRC را مدل‌سازی کردند. آنها در

گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی سبب انتقال آلاینده‌ها، پسماندها و زه‌آب‌ها به خاک، رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی شده است. این امر مسائل زیست محیطی فراوانی را سبب گردیده است. در این راستا، مدل‌سازی حرکت و انتقال آب و املاح در خاک برای کنترل آلودگی‌ها اجتناب ناپذیر می‌باشد. پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s) یکی از مهمترین داده‌های ورودی مدل‌های مذکور است. تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این شاخص و وقت‌گیر و پرهزینه بودن روش‌های اندازه‌گیری مستقیم آن، سبب توسعه بسیار زیاد روش‌های برآورد غیرمستقیم در سال‌های اخیر شده است. در حال حاضر، روش‌های برآورد غیرمستقیم هدایت هیدرولیکی اشباع در چهار

1- دانشجوی دکتری تخصصی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

2- استادیار گروه مهندسی آب، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه

* - نویسنده مسئول: (Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v30i6.48517

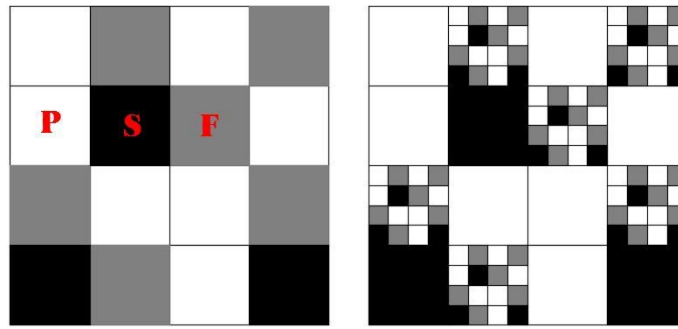
به ترتیب 0/69 و 0/91 سانتی‌متر بر روز حاصل شد. نتایج این تحقیق، قابلیت بالای مدل هدایت هیدرولیکی جدید توسعه یافته در مقابل مدل ون گنوختن معلم به خصوص در مقادیر بالای رطوبت محیط متخلخل را نشان دادند.

در سال 1993 با ارائه مدلی توسط راولز (29)، هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریکس خاک را با استفاده از بعد فراکتال سطحی (دو فازی) برآورد گردید. این مدل، اصلاح شده مدل مارشال بر اساس یازده بافت خاک متفاوت است. نتایج نشان داد که مدل هدایت هیدرولیکی اشباع راولز، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع مربوط به منافذ ماتریکس و ماکروپور را در دامنه وسیعی از بافت‌های خاکی مختلف با دقت بالایی برآورد می‌نماید. خاتمی‌نژاد (19)، مقادیر برآوردی هدایت هیدرولیکی اشباع حاصل از بعدهای مختلف فراکتالی خاک (بعد فراکتال تجربی، بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات، بعد فراکتالی منافذ جامد و بعد فراکتالی SWRC) را با مدل راولز (29) مورد تحلیل قرار داد. در این تحقیق، مقادیر اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی در نمونه‌های با بافت سنگین اختلاف معنی‌دار با مقادیر برآورد شده نشان داد، ولی برای نمونه‌های با بافت سبک، بعدهای فراکتالی توزیع اندازه ذرات، بعد فراکتالی منافذ جامد و بعد فراکتالی SWRC نتایج قابل قبولی را ارائه نمودند. در مقابل، قهرمان و همکاران (9) نیز در ارزیابی مدل فراکتال راولز، برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع مربوط به منافذ درشت خاک، کارایی مناسبی را نتیجه‌گیری نکردند. دلیل این امر احتمالاً می‌تواند به علت عدم استفاده از پارامتر بعد فراکتال ذرات خاک در مدل راولز (29) باشد. در این تحقیق، کاربرد شاخص ماکزیم شعاع خلل و فرج (R_i) به جای بعد فراکتال می‌تواند عامل ارائه نتایجی با دقت پایین‌تر باشد.

مروری بر مطالعات گذشته بیانگر عدم استفاده از داده‌های بافت خاک در مدل‌های فراکتالی دو و سه‌فازی (PSF) به منظور برآورد بعد فراکتال و کاربرد آن در مدل راولز می‌باشد (9 و 19). وجه تمایز این تحقیق با تحقیق خاتمی‌نژاد و همکاران، در کاربرد مدل‌های فراکتالی سه‌فازی می‌باشد. با توجه به نتایج مقالات و پژوهش‌های مختلف (10، 11، 12 و 13) و در این تحقیق، مدل‌های PSF به عنوان مدل‌های فراکتالی سه‌فازی معرفی و به کار گرفته شدند که بر اساس منابع جدید توانایی بالایی در برآورد بعد فراکتال خاک و کاربرد در برآورد خصوصیات فیزیکی خاک همچون منحنی نگهداشت رطوبتی (12)، هدایت هیدرولیکی غیر اشباع (13) و ... دارند (10). بنابراین این مدل‌ها نیز به سبب دقت بالای آنها در ارزیابی برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در نظر گرفته شدند. در این ارتباط، تحقیق حاضر در گام اول ترکیب مدل‌های پرکاربرد فراکتالی با مدل راولز در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع را ارزیابی نموده و در گام دوم کاربرد مدل‌های فراکتالی مبتنی بر داده‌های بافت خاک (به خصوص میزان رس خاک) در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع و بهبود تخمین مدل راولز را بررسی می‌نماید.

بررسی خود، روابط بین بعد فراکتالی SWRC، بعد فراکتالی جرم خاک و بافت خاک را ارائه نمودند. در این تحقیق، چهار روش به منظور تعیین بعد فراکتالی SWRC ارزیابی شد و قابلیت برآورد رطوبت خاک در مکش‌های مختلف توسط هر روش مقایسه گردید. نتایج تحقیق مذکور، مدل‌های مورد مطالعه را با خطای نسبی کمتر از 10 درصد، در 60 درصد نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد. ابعاد فراکتالی حاصل از خصوصیات مورفولوژیک خاک، به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع توسط گیمینز (14) مورد تحلیل قرار گرفت. در تحقیق ایشان، مقادیر بعد فراکتالی دو فازی مربوط به حجم منافذ و زبری سطح منافذ، توسط روش پردازش تصاویر تعیین گردید. توصیف فراکتالی ساختار منافذ نشان داد که محاسبه بعد فراکتالی بر اساس منافذ فعال در عبور جریان می‌تواند موجب افزایش دقت در برآورد هدایت هیدرولیکی گردد.

مدل‌های PSF که اولین بار توسط پیبر و همکاران (26) ارائه شده است، خصوصیات هندسی و نحوه توزیع منافذ و بخش جامد خاک را تا اعمال آخرین مرحله تکرار تقسیم‌بندی، یکسان در نظر می‌گیرند (شکل 1). در این مدل‌های سه فازی، نسبت حجم بخش منافذ، جامد و فراکتال خاک دارای مقادیری بین صفر تا یک می‌باشند. مدل‌های PSF می‌توانند بعد فراکتال فصل مشترک منافذ و بخش جامد خاک¹ را با استفاده از داده‌های منحنی دانه‌بندی خاک (PSD^1) به طور مستقیم برآورد نمایند (10). بررسی مدل هانگ و زانگ (15) نشان داد که همبستگی بالایی بین بعد فراکتال سطح داخلی خلل و فرج و درصد رس خاک وجود دارد. پیبر و بیرد (2003) (27) مدل‌های PSF را با در نظر گرفتن هندسه سطوح فراکتال، به منظور برای توصیف ساختمان خاک، خصوصیات فیزیکی و هندسی خاک مورد استفاده قرار دادند. بیرد و همکاران (2) و قنبریان و همکاران (10، 11، 12 و 13) با کاربرد مدل‌های فراکتالی سه‌فازی (PSF)، مشخصه‌های فیزیکی خاک همچون منحنی مشخصه رطوبتی خاک، هدایت هیدرولیکی و ... را با دقت بالایی برآورد نمودند. بررسی‌ها نشان دادند که استفاده از مقادیر رس، شن و سیلت به خصوص درصد رس خاک به جای داده‌های PSD، موجب افزایش دقت مدل‌های PSF در برآورد منحنی رطوبتی خاک شده است (15). قنبریان و همکاران (2012) (13) با کاربرد مدل‌های PSF مدل جدیدی را برای هدایت هیدرولیکی غیر اشباع توسعه دادند. این تحقیق با کاربرد 104 نمونه از پایگاه داده‌ای UNSODA انجام شد. مدل جدید توسعه یافته با مدل هدایت هیدرولیکی غیر اشباع ون گنوختن - معلم مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان RMSE میانگین که برای مدل جدید توسعه یافته و مدل ون گنوختن معلم محاسبه گردید



شکل 1- شماتیک مدل PSF ارائه شده توسط پییر و همکاران (1999)
Figure 1- Schematic of PSF model (28)

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از داده‌های اسخاپ و همکاران (31) استفاده شده است. این مجموعه مشتمل بر شصت نمونه خاک از سایت پژوهشی واقع در شرق هانفورد¹ (کشور آمریکا) تهیه شده می‌باشد و در آن، بافت خاک به روش هیدرومتری، وزن مخصوص ظاهری به روش نمونه دست نخورده، تخلخل (با استفاده از رابطه 1)، هدایت هیدرولیکی اشباع با روش آزمایشگاهی بار ثابت، منحنی دانه‌بندی خاک به روش الک خیس و منحنی نگهداشت آب خاک به روش دستگاه صفحات فشاری (به صورت یک مجموعه 16 جفتی) برای تمام نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شده است. ایشان در تحقیق خود، مقدار جرم مخصوص حقیقی نمونه‌های خاک را مقدار ثابت 2/65 گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفتند. میزان تخلخل با استفاده از رابطه 1، محاسبه شده است.

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_b}{2.65}\right) \quad (1)$$

در رابطه 1، ϕ میزان تخلخل و ρ_b برابر با میزان جرم مخصوص ظاهری خاک می‌باشد. خلاصه اطلاعات آماری مربوط به خصوصیات فیزیکی نمونه‌های خاک مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (1) ارائه شده است. با توجه به جدول (1) مشخص می‌گردد که بافت خاک نمونه‌های مورد آزمایش بیشتر به صورت درشت دانه بوده به صورتی که بیش از 80 درصد نمونه‌ها، دارای درصد شن بالای 85 درصد می‌باشند.

$$K_s = 4.41 \times 10^7 \left(\frac{\phi^x}{n^2}\right) R_1^2 \quad (2)$$

در رابطه فوق، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ماتریس خاک ϕ (cm.hr⁻¹)، تخلخل کل (رابطه 1)، R_1 (cm) ماکزیم شعاع خلل و

فرج (رابطه 3)، x به عنوان توان پارامتر تخلخل که معمولاً برابر با 1/33 در نظر گرفته می‌شود (24) و پارامتر n کلاس‌های اندازه منافذ خاک می‌باشد (معادله 5).

$$R_1 = \frac{0.148}{h_{min}} \quad (3)$$

رابطه (3)، مقدار R_1 را برای نمونه‌های خاک تعیین می‌کند (34). در رابطه فوق، h_{min} (cm) مکش ورود هوا در منحنی نگهداشت رطوبتی نمونه خاک می‌باشد. برای برآورد این پارامتر از روی داده‌های منحنی نگهداشت رطوبتی نمونه‌های خاک با استفاده از رابطه (4) استفاده شد (3).

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h}{h_{min}}\right)^{-\lambda} \quad (4)$$

در رابطه فوق، θ و h مقادیر رطوبت و مکش‌های اعمال شده در منحنی رطوبتی خاک، θ_s رطوبت اشباع خاک (cm³/cm³)، θ_r میزان رطوبت باقی‌مانده (برابر با رطوبت در نقطه پژمردگی دائم در نظر گرفته شد) و λ شاخص توزیع خلل و فرج بروکس-کوری (3) می‌باشند. دو پارامتر h_{min} (مکش ورود هوا) و λ شاخص توزیع خلل و فرج بروکس-کوری که مورد استفاده در مدل بروکس-کوری، با استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی خاک و ابزار CurveFitting نرم افزار متلب (نسخه 2014) به روش الگوریتم بهینه‌سازی لونیبرگ-مارکوآرت برای نمونه‌های خاک استخراج شد. پارامتر n نیز با استفاده از رابطه (5) تعیین گردید (9). در رابطه (5)، D_s بعد فراکتالی تخلخل خاک (بعد سطحی) می‌باشد.

$$n = 1.86 D_s^{5.34} \quad (5)$$

1- Leak Simulation TestSite, located at the Sisson and Lu (1984) injection site in the 200 East Area of the Hanford Site

جدول 1- خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مورد تحلیل در این تحقیق (31)
Table 1- The physical properties of the analyzed samples in this study (31)

ویژگی (Property)	واحد (Unit)	کمینه (Minimum)	بیشینه (Maximum)	میانگین (Average)	انحراف معیار (Standard deviation)	ضریب تغییرات (CV)
جرم مخصوص ظاهری (Bulk density)	(g .cm ⁻³)	1.40	1.71	1.57	0.09	0.06
گراول (Gravel)	درصد (%)	0	4.46	0.98	1.07	1.09
شن (Sand)	درصد (%)	72.65	98.48	89.49	6.23	0.07
سیلت (Silt)	درصد (%)	0	21.93	6.1	5.04	0.83
رس (Clay)	درصد (%)	1.25	7.5	3.44	1.5	0.44
تخلخل (Porosity)	درصد (%)	0.35	0.47	0.41	0.03	0.08
هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks)	(cm .h ⁻¹)	1.48	3800	86.4	94.8	1.1

در این پژوهش، برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از مدل فراکتالی راولز (29) به صورت رابطه (2) استفاده شد.

برداشت و ثبت خصوصیات مورد نیاز توابع انتقالی خاک توأم با خطاهای انسانی و سیستماتیک می‌باشد. لذا بررسی تأثیر تغییرات این عوامل در نتایج حاصل از این توابع ضروری به نظر می‌رسد. بر این اساس، با ایجاد تغییرات ± 10 ، ± 20 و ± 30 درصد در پارامترهای ورودی مدل برتر مورد مطالعه شامل مقادیر تخلخل، بعد فراکتال و مکش ورود هوا، حساسیت توابع انتقالی مورد نظر در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارزیابی گردید (13).

ب: ارزیابی

پس از برآورد پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از مدل‌های فراکتالی مختلف، نتایج برآوردی و اندازه‌گیری شده پارامتر مذکور با شاخص‌های RMSE، AIC و R² مقایسه شدند. آزمون معنی‌داری بین مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع نیز با استفاده از آزمون توکی و نرم‌افزار SPSS انجام شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (O_i - P_i)^2}{j}} \quad (8)$$

$$AIC = j \times \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^j (O_i - P_i)^2}{j} \right) + 2k \quad (9)$$

در نهایت با ترکیب روابط (1) الی (5)، مدل راولز برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع به صورت رابطه (6) ارائه می‌گردد. در این رابطه، پارامترهای Φ و h_{min} از رابطه‌های (1) و (4) برآورد می‌شوند. به این ترتیب پارامتر Ks را می‌توان به صورت تابعی از D_s (شاخص بعد فراکتال) با استفاده از مدل‌های هفت‌گانه فراکتالی (جدول 2) برآورد نمود.

(6)

$$K_s = 4.41 \times 10^7 \left(\frac{\phi^{1.33}}{3.46 D_s^{10.68}} \right) \left(\frac{0.0219}{h^2_{min}} \right) = 279130.058 \times \left(\frac{\phi^{1.33}}{h^2_{min} \times D_s^{10.68}} \right)$$

مدل‌های فراکتال ارزیابی شده در این تحقیق در جدول (2) ارائه می‌شود. این مدل‌ها (به جز مدل a)، اساس ریاضی داشته و پارامترهای مورد استفاده در آنها دارای معنا و مفهوم فیزیکی می‌باشند. اساس مدل‌های b, c و d جزو مدل‌های سه‌فازی محسوب گردیده و بقیه مدل‌ها جزو مدل‌های دوفازی می‌باشند. بعد فراکتال موجود در مدل‌های جدول (2) می‌تواند بر اساس داده‌های منحنی نگهداشت رطوبتی خاک (مدل‌های c و e)، منحنی دانه‌بندی خاک (مدل‌های b و f) یا بافت خاک (مدل‌های d و g) محاسبه شود (جدول 2). در رابطه تجربی فوونتز (4)، (جدول 2)، D_s به صورت مستقیم و در سایر مدل‌ها، پارامتر مذکور با استفاده از رابطه (7) تعیین شده است (19).

$$D_s = D_m - I \quad (7)$$

الف: آنالیز حساسیت

جدول 2- توابع فراکتالی مورد مطالعه در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک
Table 2- The studied fractal functions for saturated hydraulic conductivity estimation

ردیف Row	نوع مدل (Models)	مرجع (References)	رابطه (Equation)
A	مدل دو فازی Two Phases Model	Fuentes at al. (1996)	$D_s = 2 + 3 \frac{\phi^{4/3} + (1-\phi)^{2/3} - 1}{2\phi^{4/3} \ln \phi^{-1} + (1-\phi)^{2/3} \ln(1-\phi)^{-1}}$
B	مدل سه فازی Three-Phases Model	Hunt and Gee (2002)	$D_s = 3 - \left(\frac{\log(1-\phi)}{\log\left(\frac{R_{min}}{R_{max}}\right)} \right)$
C	مدل سه فازی Three-Phases Model	Bird et al. (2000)	$\frac{\theta}{\phi} = 1 - \frac{\eta}{\phi} \left(1 - \left(\frac{h}{h_{min}} \right)^{D_s - 3} \right)$
D	مدل سه فازی Three-Phases Model	Huang and Zhang (2005)	$D_s = 2.35 + \frac{1 - e^{0.0822C}}{-0.497(1 + e^{0.0822C}) + 1.238(1 - e^{0.0822C})}$
E	مدل دو فازی Two Phases Model	Tyler and Wheatcraft (1990)	$\frac{\theta}{\phi} = \left(\frac{h}{h_{min}} \right)^{D_m - 3}$
F	مدل دو فازی Two Phases Model	Kutlu et al. (2008)	$\frac{M(r < R)}{M_r} = \left(\frac{R}{R_{upper}} \right)^{3 - D_m}$
G	مدل دو فازی Two Phases Model	Sepaskhah and Tafteh(2013)	$D_m = 3 - 0.118 [-\ln(C/100) + ((S + Sa)/100)]$

با توجه به نتایج این مدل در بدترین حالت، تفاوت بین میزان هدایت هیدرولیکی اندازه گیری شده با هدایت هیدرولیکی برآوردی مدل، برابر با 2/06 سانتی متر بر ساعت (حدود 27 درصد خطا) می باشد. از نظر شاخص های خطا، اولویت دوم و سوم در برآورد K_s به ترتیب مربوط به مدل های فراکتالی سپاسخواه (32) و کوتلو (22) می باشد. نتایج مدل های اول تا سوم (به ترتیب مدل هانگ و زانگ، سپاسخواه و کوتلو) بسیار به هم نزدیک می باشند و مقادیر RMSE این سه مدل اختلاف معنی داری با هم ندارند (جدول 3). همچنین بر اساس نتایج حاصل شده در این تحقیق، مدل هایی که میزان رس خاک در آنها مورد استفاده قرار گرفته است بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات را با دقت بالاتری برآورد می نمایند. در مدل هانگ و زانگ (17)، میزان رس خاک تنها پارامتر مورد استفاده می باشد.

در جدول (2)، D_m برابر با بعد فراکتال جرمی که در مدل e، از برازش مدل تیلور و ویتکرفت (1990) بر داده های منحنی مشخصه رطوبتی خاک و در مدل f از برازش مدل کوتلو و همکاران (2008) بر داده های توزیع دانه بندی نمونه ها حاصل می گردد (بعد فراکتال جرمی توزیع اندازه ذرات خاک - مشخصه ای می باشد که فقط به یک ذره مستقل بستگی دارد) (11)، D_s : برابر با بعد فراکتال سطحی (بعد فراکتال سطح داخلی خلل و فرج - پیمایشی از سطح ذرات و یا به عبارت دیگر سطح داخلی خلل و فرج خاک می باشد)، C، S، Sa: به

که در این روابط، z: تعداد مشاهدات، O_i : مقدار مشاهده ای داده، O_{ave} : میانگین مقادیر مشاهده ای داده، P_i : مقدار پیش بینی شده برای داده مورد نظر و P_{ave} : میانگین مقادیر پیش بینی شده و k: تعداد ورودی های مدل می باشند. هر چه میزان خطا (RMSE) کمتر و میزان همبستگی داده ها (R^2) بیشتر باشد، میزان کارایی مدل افزایش می یابد. همچنین، هر چه مقدار ضریب AIC کمتر (منفی تر) باشد، بیانگر برآورد بهتر و دقت بالای مدل می باشد. علاوه بر این سه شاخص، از برازش خط مستقیم و آزمون آماری توکی در سطح 95 درصد برای ارزیابی مدل های مختلف استفاده گردید (35).

نتایج و بحث

مقادیر RMSE، AIC و R^2 برای مجموعه داده های مشاهده ای و پیش بینی شده توسط مدل های مورد مطالعه، در جدول (3) ارائه شده است. به جز سه مدل بیرد (2)، هانگ و زانگ (17) و کوتلو (22)، سایر مدل ها دارای مقادیر ضریب همبستگی کمتر از 0/25 می باشند. بالاترین میزان همبستگی برای مدل هانگ و زانگ (13) (مدل d بر اساس داده های رس خاک) حاصل شده است. این مدل از نظر شاخص ریشه مجذور مربعات خطا و آکائیک نیز به عنوان برترین مدل فراکتالی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارزیابی گردید.

دانه‌بندی خاک و مدل سه‌پارامتری سپاسخواه (32) به مقادیر رس، شن و سیلت خاک نیازمند است. این نتایج بیانگر اهمیت بالای میزان رس خاک به عنوان داده ورودی در برآورد بعد فراکتالی می‌باشد. همچنین، نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که مدل‌های فراکتالی مبتنی بر داده‌های بافت خاک، قابلیت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با دقت بالا را دارند. بر اساس نتایج احمدی و همکاران (2011) (1) نیز، در بررسی رابطه بعد فراکتالی با خصوصیات فیزیکی خاک، شامل اجزای بافت خاک، تخلخل و هدایت هیدرولیکی مؤثر، همبستگی مثبت بالا و معناداری بین بعد فراکتالی با درصد رس گزارش شده است. نتایج تحقیق ارساهین و همکاران (2006) (6)، نیز این مسئله را تأیید می‌نماید. با توجه به اینکه، اخیراً کاربرد مدل‌های سه‌فازی در برآورد دقیق‌تر خصوصیات حرکت در محیط متخلخل مورد توجه قرار گرفته است (10)، نتایج این تحقیق هم تأکید بر دقت بالای مدل هانگ و زانگ (15) که در لیست مدل‌های PSF قرار دارد، در برآورد بهتر هدایت هیدرولیکی اشباع می‌گردد.

ترتیب درصد رس، سیلت و شن خاک (از داده‌های بافت خاک حاصل می‌گردد)، h : میزان مکش مورد نظر در اندازه‌گیری رطوبت، h_{min} برابر با مکش ورود هوا (Φ ، (cm)، تخلخل خاک (از رابطه 1 محاسبه می‌گردد)، η : شاخص مدل بیرد (2)، $\eta = \frac{p}{p+s}$ ، p و s برابر با مقدار منافذ و بخش جامد خاک می‌باشد. مقدار η / ϕ بر اساس نتایج وانگ و همکاران (2005) در بازه 0/67 تا 1/64 تغییر نموده و بر اساس تحقیق فالیکو و همکاران (2010) در محدوده 1 تا $1/\phi$ تغییر می‌نماید. در این مقاله، شاخص η / ϕ با استفاده از برآزش این مدل بر روی داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی حاصل شده است، Θ : میزان درصد رطوبت حجمی خاک و h : مکش متناظر با رطوبت مد نظر در منحنی رطوبتی، R_{min} و R_{max} : کوچکترین و بزرگترین قطر ذره خاک (از منحنی دانه‌بندی نمونه‌های مورد تحلیل به دست می‌آید)، $M(r < R)$: جرم خاکی است که شعاع ذرات آن کمتر از R است، M_r : جرم کل خاک، R_{upper} : کران بالایی اندازه در فراکتال (برابر با 2 میلی‌متر) (17) است.

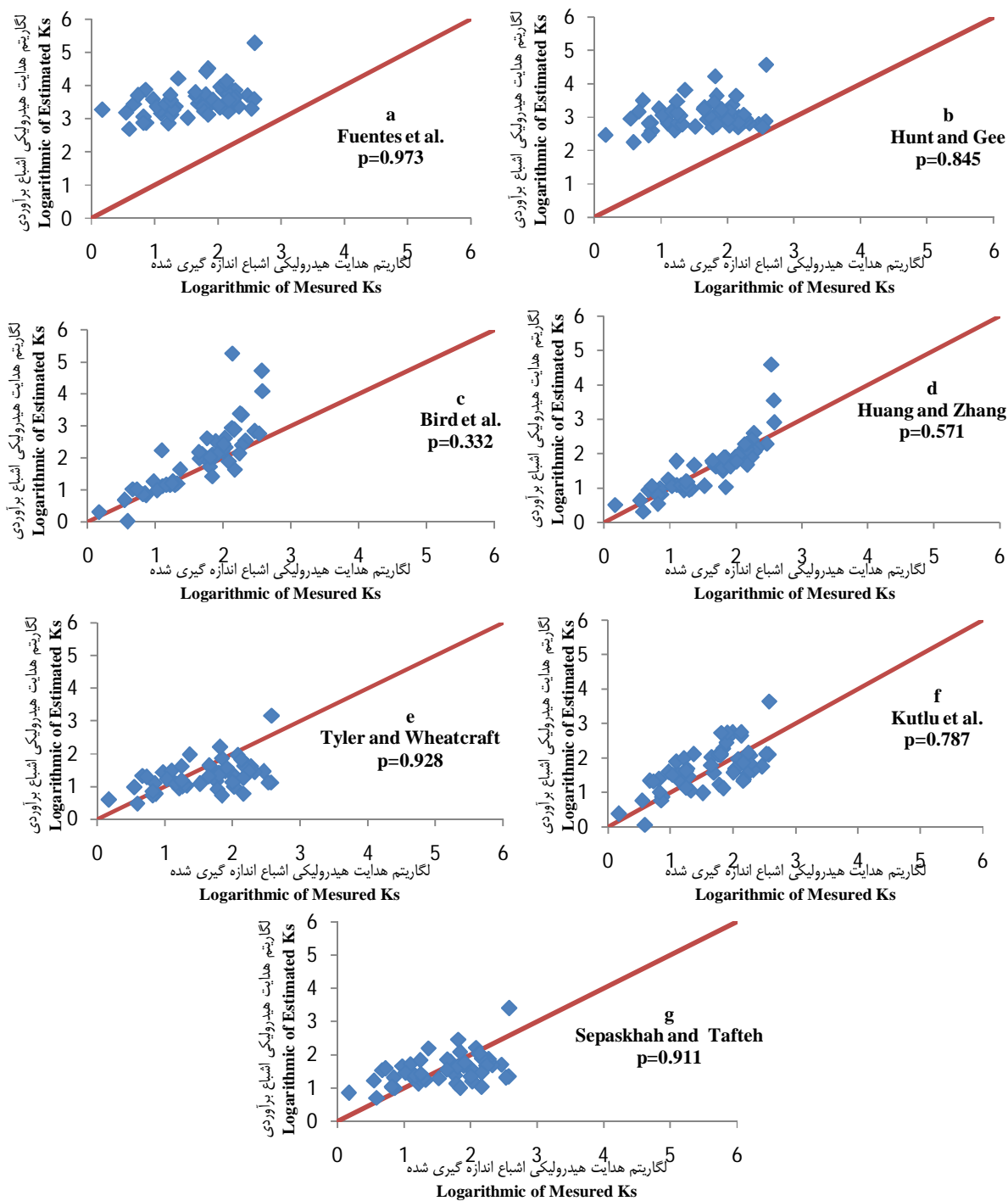
این در حالی است که مدل کوتلو (22) به تمامی داده‌های منحنی

جدول 3- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های فراکتالی مورد مطالعه
Table 3- Evaluated indices related to studied fractal models.

انواع مدل‌ها (models)		شاخص‌های ارزیابی (Evaluation indices)		
		R^2	RMSE (cm/h)	AIC (cm/h)
a	Fuentes et al. (1996)	0.2	2	2.56
b	Hunt and Gee (2002)	0.17	1.57	2.06
c	Bird et al. (2000)	0.69	0.73	0.54
d	Huang and Zhang (2005)	0.72	0.41	-0.63
e	Tyler and Wheatcraft (1990)	0.24	0.62	0.19
f	Kutlu et al. (2008)	0.43	0.52	-0.13
g	Sepaskhah and Tafteh (2013)	0.24	0.55	-0.03

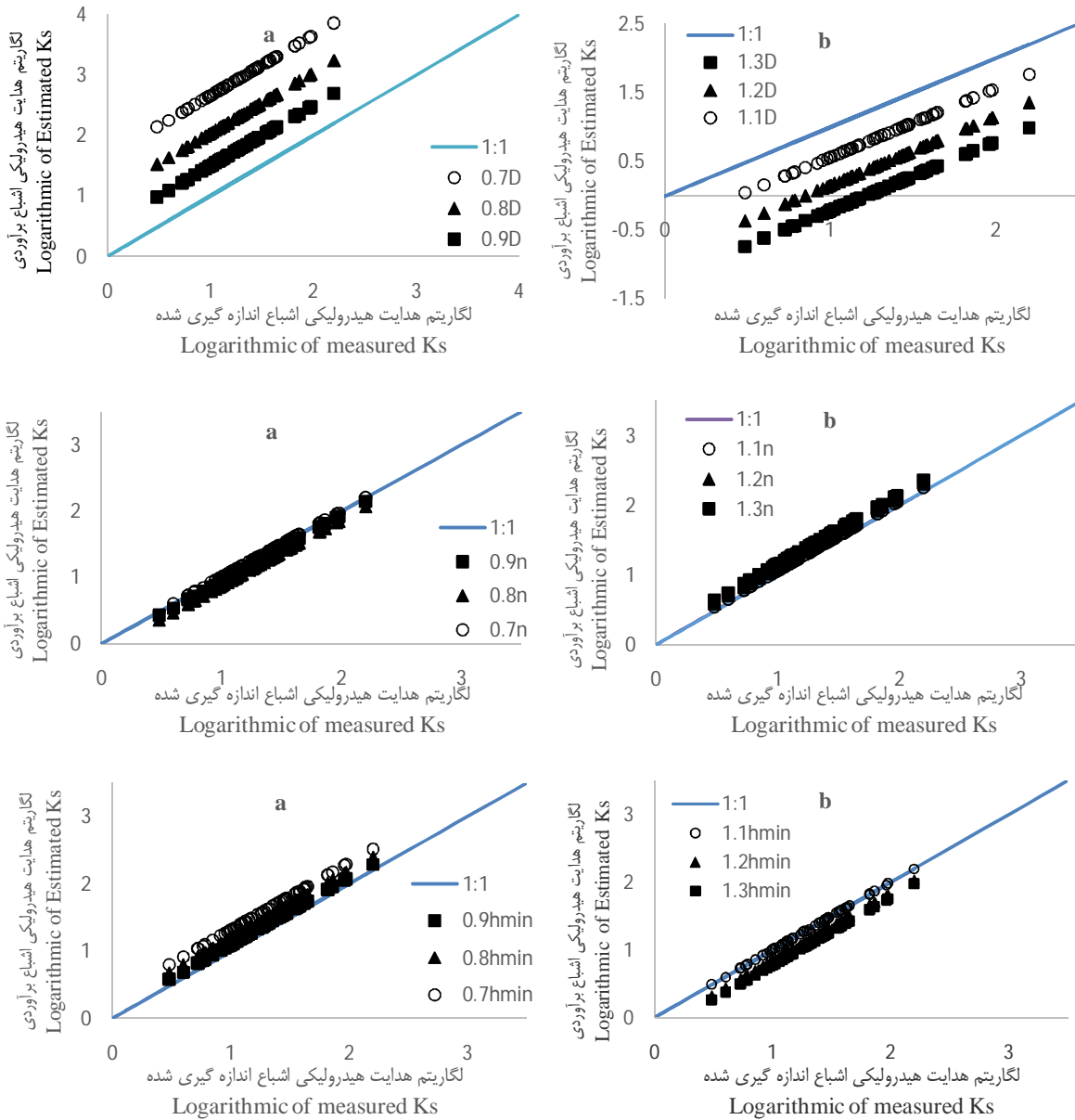
خاتمی‌نژاد و همکاران (19) تغییر نماید. در بین مدل‌های مورد مطالعه، مدل فراکتالی فوونتز (8) نتایج بسیار ضعیفی را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع داشت. در این راستا، نتایج مشابهی توسط خاتمی‌نژاد (19) گزارش شده است. به نظر می‌رسد مدل فراکتالی فوونتز که بر اساس روابط تجربی استخراج شده است، نتایج با دقت پایین‌تری را در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه نموده است. پراکندگی لگاریتم مقادیر K_s برآورد شده از مدل‌های مختلف در مقابل لگاریتم مقادیر اندازه‌گیری شده در شکل (2) ارائه شده است. با استفاده از آزمون معنی‌داری توکی، اختلاف معنی‌داری بین نتایج تمام مدل‌های ارائه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده K_s در سطح 5 درصد مشاهده نگردید که بیانگر قابل قبول بودن نتایج تمامی مدل‌های فراکتالی برای نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد. درصد معنی‌داری (p) نیز، در شکل (2) نشان داده شده است.

قابل توجه است که مدل دو پارامتری تیلور (34)، که مشابه مدل بروکس و کوری (3) و مدل کمپل (5) است، با فرض تخلخل کل محیط متخلخل برابر با یک استخراج شده است. این شرایط مطابقت کمی با فیزیک محیط متخلخل دارد (12). این مدل با وجود میزان ضریب همبستگی پایین، اما با مقدار شاخص خطای پایین در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در الویت چهارم قرار گرفت. بنابراین با کاربرد مدل‌های فراکتالی سه‌فازی، این مدل‌ها دارای شاخص خطای کمتری از مدل‌های پیشین و ارزیابی شده شدند که باعث شده مدل‌هایی همچون مدل کوتلو در الویت‌های بعدی قرار گیرد. بر اساس گزارش خاتمی‌نژاد و همکاران (19)، مدل‌های تیلور (34) و کوتلو (22) نتایج قابل قبولی را در برآورد K_s ارائه نمودند. نتایج نشان می‌دهند که کاربرد مدل‌های فراکتالی سه‌فازی سبب شده تا الویت‌بندی مدل‌های برتر فراکتالی با مدل‌های ارائه شده در نتایج



شکل 2- پراکندگی لگاریتم مقادیر K_s برآورد شده از مدل‌های مختلف در مقابل لگاریتم مقادیر اندازه‌گیری شده

Figure 2- The logarithmic values of Estimated K_s versus the measured values



شکل 3- آنالیز حساسیت پارامترهای مربوط به مدل ترکیبی هدایت هیدرولیکی اشباع راولز-هانگ

Figure 3- Sensitivity analysis related to the Rawls – Huang saturated hydraulic conductivity model parameters

خاتمی نژاد و همکاران نتایج ضعیفی را ارائه نموده است. هدف تحقیق هم این است که این مدل‌ها با نمونه‌های خاک با مشخصات متفاوت ارزیابی و راستی‌آزمایی شده و بهترین مدل انتخاب شود. نتایج تحلیل هانگ و زانگ (2005) نشان داد که مدل‌های PSD در برآورد بعد فراکتال کم برآورد می‌باشند. همچنین ارزیابی مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که مدل بیرد (2) با وجود مقادیر بالاتری از نظر شاخص خطا در مقایسه با مدل برتر e، (RMSE=0.73cm/h)، برازش خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در مقایسه با مدل‌های سپاسخواه (32) و تیلور

بررسی شکل مذکور بیانگر این است که در بین مدل‌های مورد بررسی، دو مدل فوونتز (8) و هانت (19)، در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع به صورت بیش‌برآورد عمل کرده‌اند. بیش برآوردی در میزان هدایت هیدرولیکی اشباع مدل راولز در واقع از کم برآورد بودن بعد فراکتال مدل‌های فوونتز و هانت (که در واقع یک مدل PSD می‌باشد) ناشی می‌گردد. مدل فراکتالی فوونتز نتایج بسیار ضعیفی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع داشت. مدل فوونتز جزو مدل‌های فراکتالی تجربی است. این مدل در این تحقیق و بررسی

سیلت، درصد شن، بعد فراکتال اندازه ذرات و تخلخل صورت گرفته بود، حساسیت کم مدل به بعد فراکتال و تخلخل را نتیجه‌گیری نمودند. بیشترین میزان شاخص RMSE در بازه $\pm 30\%$ تغییرات بعد فراکتال و تخلخل 0/018 محاسبه شده بود. نتایج نشان دادند که میزان رس خاک در برآورد بعد فراکتالی از نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای برخوردار است. تحلیل‌های آماری صورت گرفته بیانگر بالا بودن دقت برآوردها در مدل‌های PSF مبتنی بر داده‌های بافت خاک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

هندسه فراکتالی به طور گسترده‌ای جهت توصیف غیر یکنواختی در محدوده‌ای وسیع از فرآیندهای طبیعی، شامل سیستم‌های فیزیکی خاک، به کار می‌رود (22). بنابراین فرآیندهای خاک، مانند تجمع آلاینده‌ها و انتقال مواد شیمیایی، تقریباً با پدیده‌های سطحی که بین سطوح داخلی فازهای جامد و مایع رخ می‌دهند مرتبط می‌باشند. در مطالعات مدل‌سازی این فرآیندها، بخش رس اهمیت تعیین‌کننده‌ای دارد. در این تحقیق تلاش گردید تا دقت هفت مدل رایج فراکتالی دو و سه‌فازی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع مدل راولز، ارزیابی گردد. مدل هانگ-زانگ (2005) از نظر شاخص ریشه مجذور مربعات خطا و آکائیک نیز به عنوان برترین مدل فراکتالی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارزیابی گردید. بررسی شاخص‌های خطا، بیانگر بالا بودن دقت برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در ترکیب مدل‌های سه‌فازی (PSF) مبتنی بر داده‌های بافت خاک با مدل راولز می‌باشد. نتایج حاصل بیانگر اهمیت بالای میزان رس خاک به عنوان داده ورودی در برآورد بعد فراکتالی می‌باشد. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت در مدل ترکیبی راولز-هانگ، کمترین حساسیت نسبت به تغییرات تخلخل و مکش ورود هوا و بیشترین حساسیت نسبت به تغییرات بعد فراکتال مشاهده می‌گردد. حساسیت بالای مدل ترکیبی راولز-هانگ نسبت به تغییرات بعد فراکتال مشاهده می‌گردد. حساسیت نسبت به تغییرات بعد فراکتال مشاهده می‌گردد. حساسیت بالای مدل ترکیبی راولز-هانگ نسبت به تغییرات بعد فراکتال اندازه ذرات خاک، به عنوان یکی از محدودیت‌های این مدل به شمار می‌رود.

(34) به خصوص در مورد مقادیر هدایت هیدرولیکی پایین داشته است. نتایج قبریان و همکاران (2011) (12) در ارزیابی انواع مدل‌های فراکتالی¹ دو و سه‌فازی (PSF) به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی خاک نشان داد که مدل‌های PSF (2) با میانگین $RMSE=0/015$ ، در برآورد منحنی نگهداشت رطوبتی از دقت بالایی در مقایسه با سایر مدل‌های فراکتالی برخوردار هستند. مقادیر $RMSE$ مدل‌های مذکور به ترتیب برابر با 0/616 و 0/545 سانتی‌متر بر ساعت تعیین شد. ولی باید در نظر داشت که دلیل تغییرات مکانی بسیار زیاد هدایت هیدرولیکی اشباع به خصوص در اندازه‌گیری صحرائی (25)، کاربرد مدل دقیقتر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. حساسیت مدل ترکیبی راولز (29) و هانگ (10) با ± 10 ، ± 20 و ± 30 درصد تغییر در پارامترهای ورودی تخلخل (ϕ)، بعد فراکتال (D) و مکش ورود هوا (h_{min}) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تغییرات در شکل (3) و نیز در قالب درصد تغییرات در فرانسج‌های آماری $RMSE$ و AIC در جدول (4) ارائه شده است. شکل (3) به دو بخش a و b تقسیم گردیده است که در بخش a تغییرات مربوط به -10% ، -20% و -30% شاخص مورد

تحلیل و در بخش b تغییرات مربوط به $+10\%$ ، $+20\%$ و $+30\%$ شاخص مورد نظر ارائه شده است. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت (جدول 4)، مدل راولز - هانگ (29 و 15) کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات تخلخل و مکش ورود هوا و بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات بعد فراکتال دارد. این مسئله در شکل 3 نیز به خوبی مشاهده می‌گردد. با افزایش میزان بعد فراکتال در مدل راولز-هانگ، میزان هدایت هیدرولیکی اشباع به شدت کمتر از میزان واقعی برآورد می‌گردد (شکل 3). حساسیت بالای این مدل نسبت به تغییرات بعد فراکتال اندازه ذرات خاک، با توجه به امکان بروز خطا در محاسبه آن، به عنوان یکی از محدودیت‌های این مدل به شمار می‌رود. به عبارت دیگر، کم‌برآوردی بعد فراکتال به خصوص در مقادیر بالای هدایت هیدرولیکی، سبب افزایش شاخص خطا می‌گردد. یزدانی و همکاران (37) نیز در آنالیز حساسیت مدل رگرسیون برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع، که برای پارامترهای چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، درصد

جدول 4- نتایج مربوط به ارزیابی آنالیز حساسیت مدل راولز - هانگ

Table 4- The evaluation for Rawls - Huang model Sensitivity analysis.

پارامتر آماری (Statistical Parameter)	h_{min}			D			ϕ		
	± 10	± 20	± 30	± 10	± 20	± 30	± 10	± 20	± 30
RMSE	0.05	0.18	0.27	0.47	0.94	1.44	0.06	0.12	0.08
AIC	-5.71	-2.32	1.48	-0.37	1.03	1.87	-4.53	-3.13	-3.62

1- Fractal, prefractal and pore-solid-fractal models

منابع

- 1- Ahmadi A., Neyshabouri M. R., and Asadi H. 2011. Relationship between Fractal Dimension of Particle Size Distribution and Some Physical Properties of Soils. *Water and Soil Science Journal of Tabriz University*, 20.1(4), 72-81. (In Farsi).
- 2- Bird N. R. A., Perrier E., and Rieu M. 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of soil science*. 51, 55-63.
- 3- Brooks R. H., and Corey A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper No. 3. Colorado State University, Fort Collins, CO.
- 4- Campbell C. S. 1985. *Soil Physics with basic: Transport models for Soil-Plant Systems*. Elsevier, Amsterdam.
- 5- Campbell G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. *SoilScience*. 117, 311-314.
- 6- Ersahin S., Gunal H., Kutlu T., Yetgin B., and Coban S. 2006. Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution. *Geoderma* 136, 588-597.
- 7- Fallico C., Tarquini A. M., De Bartolola S., and Veltria M. 2010. Scaling analysis of water retention curves for unsaturated sandy loam soils by using fractal geometry. *Eur. J. Soil Sci.* 61: 4 25_436.
- 8- Fuentes C., Vauclin M., Parlange J. Y., and Haverkamp R. 1996. A note on the soil-water conductivity of a fractal soil, *Transport in Porous Media Journal*. 23,31-36.
- 9- Ghahraman B., Omid S., and Khoshnood Yazdi A. 2012. Scaling and fractal concepts in saturated hydraulic conductivity: comparison of some models, *Iran Agricultural Research Journal*, 31(1), 1-16.
- 10- Ghanbarian-Alavijeh B. 2014. Modeling physical and hydraulic properties of disordered porous media: Applications from percolation theory and fractal geometry. Ph. D. dissertation, Wright State University.
- 11- Ghanbarian-Alavijeh B., and Milla'n H. 2009. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. *Geoderma* 151, 224_232.
- 12- Ghanbarian-Alavijeh B., Humberto M., and Huang G. 2011. A review of fractal, prefractal and pore-solid-fractal models for parameterizing the soil water retention curve, *Canadian Journal of soil science*. 91, 1-14.
- 13- Ghanbarian- Alavijeh B., and Hunt A. G. 2012. Unsaturated hydraulic conductivity in porous media: Percolation theory, *Geoderma* 187-188, 77-84. doi:10.1016/j.geoderma. 2012.04.007
- 14- Gimenez D., Perfect E., Rawls W. J., and Pachepsky Ya .1997. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review. *Energygeology*. 48, 161-183.
- 15- Huang G., and Zhang R. 2005. Evaluation of soilwater retention curve with the pore-solid fractal approach. *Geoderma* 127, 52-61.
- 16- Huang G., Zhang R., and Huang Q. 2006. Modelling soil water retention curve with a fractal model, *Pedosphere* 16(2), 137-146.
- 17- Hunt A. G., and Gee G. W. 2002. Water-retention of fractal soil models using continuum percolation theory: Tests of Hanford Site soils. *Vadose Zone Journal*. 1: 252-260.
- 18- Hwang S. I., Lee K. P., Lee D. S., and Powers S. E. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1143-1150.
- 19- Khatamainejad S.A., Tabatabaei S.H., Mohammadi J., and Hoshmand A. 2011. Estimating soil saturated hydraulic conductivity Using fractal dimension theory in different soils, *Iranian journal of irrigation and drainage*, 5(1), p.1-8. (In Farsi).
- 20- Kravchenko A., and Zhang R. 1997. Estimating soil hydraulic conductivity from soil particle-size distribution. Proceedings of the International Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media.
- 21- Kravchenko A., and Zhang R. 1998. Estimating the soil water retention from particle-size distributions: a fractal approach. *Soil science*. 163: 171-179.
- 22- Kutlu T., Ersahin S., and Yetgin B. 2008. Relations between solid fractal dimension and some physical properties of soils formed over alluvial and colluvial deposits, *Journal of food, Agriculture and Environmental*, 6 (3&4): 445-449.
- 23- Miyazaki T. 1996. Bulk density dependence of air entry suctions and saturated hydraulic conductivities of soils. *Soil Sci.* 161: 484-490.
- 24- Milington R. J., and Quirk J. P. 1961. Permeability of porous solids. *Trans. Faraday society*. 57, 1200-1206.
- 25- Omidifard M., and Mousavi S. A.A. 2015. The hydraulic properties Estimation in calcareous soils of Badjgah, Fars province Using regression transfer functions , *Journal of soil and water science*, 29 (1), P.83-92. (In Farsi).
- 26- Perrier E., Bird N., and Rieu M. 1999. Generalizing a fractal model of soil structure: the pore-solid fractal approach. *Geoderma*, 88, 137_164.
- 27- Perrier EMA., and Bird NRA. 2003. The PSF model of soil structure: a multiscale approach. In: Pachepsky Y, Radcliffe DE, Selim HM, editors. *Scaling methods in soil physics*. New York: CRC Press. p. 1-18.
- 28- Perfect E., Rasiah V., and Kay B.D. 1992. Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass. *Soil science society American journal*, 56, 1407-1409.

- 29- Rawls W. J., Brakensiek D. L., and Logsdon S. D. 1993. Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. *Soil science society of American journal*, 57, 1193-1197.
- 30- Rawls W. J., Brakensiek D. L., and Saxton K. E. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 25:1316-1320 and 1328.
- 31- Schaap M.G., Shouse P.J., and Meyer P.D. 2003. Laboratory measurements of the unsaturated hydraulic properties at the vadose zone transport field study Site, Department of Energy under Contract DE-AC06-76RL01830.
- 32- Sepaskhah A.R., and Taftah A. 2013. Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(1), 93-103.
- 33- Shepard S. J. 1993. Using a fractal model to compute the hydraulic conductivity function. *Soil science society of American journal*, 57:300-306.
- 34- Tyler S. W., and Wheatcraft S. W. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research*. 26, 1047-1054.
- 35- Wang K., Zhang R., and Wang F. 2005. Testing the pore-solid fractal model for the soil water retention function. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 776_782.
- 36- Wagner B., Tarnawski V. R., Hennings V.M., Muller U., Wessolek G., and Plagge R. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102, 275-297.
- 37- Yazdani V., Ghahreman B., Davari K., and Fazeli M.E. 2012. Using fractal dimension of particle size in estimating saturated hydraulic conductivity, *Journal of Water and Soil*, 26 (3), Jul-Aug, p. 648-659. (In Farsi).
- 38- Zhuang J., Yu G. R., Miyazaki T., and Nakayama K. 2000. Modeling effects of compaction on soil hydraulic properties—a NSMC scaling method for saturated hydraulic conductivity. *Adv. Geocol.* 32: 144-153.

Two and Three-Phases Fractal Models Application in Soil Saturated Hydraulic Conductivity Estimation

E. Rezaei Abajelu¹- K. Zeinalzadeh^{2*}

Received: 16-08-2015

Accepted: 06-09-2016

Introduction: Soil Hydraulic conductivity is considered as one of the most important hydraulic properties in water and solution movement in porous media. In recent years, various models as pedo-transfer functions, fractal models and scaling technique are used to estimate the soil saturated hydraulic conductivity (K_s). Fractal models with two subset of two (solid and pore) and three phases (solid, pore and soil fractal) (PSF) are used to estimate the fractal dimension of soil particles. The PSF represents a generalization of the solid and pore mass fractal models. The PSF characterizes both the solid and pore phases of the porous material. It also exhibits self-similarity to some degree, in the sense that where local structure seems to be similar to the whole structure. PSF models can estimate interface fractal dimension using soil pore size distribution data (PSD) and soil moisture retention curve (SWRC). The main objective of this study was to evaluate different fractal models to estimate the K_s parameter.

Materials and Methods: The Schaapetal data was used in this study. The complex consists of sixty soil samples. Soil texture, soil bulk density, soil saturated hydraulic conductivity and soil particle size distribution curve were measured by hydrometer method, undistributed soil sample, constant head method and wet sieve method, respectively for all soil samples. Soil water retention curve were determined by using pressure plates apparatus. The K_s parameter could be estimated by Rawls model as a function of fractal dimension by seven fractal models. Fractal models included Fuentes et al. (1996), Hunt and Gee (2002), Bird et al. (2000), Huang and Zhang (2005), Tyler and Wheatcraft (1990), Kutlu et al. (2008), Sepaskhah and Tafteh (2013). Therefore The K_s parameter can be estimated as a function of the D_s (fractal dimension) by seven fractal models (Table 2). Sensitivity analysis of Rawls model was assessed by making changes ($\pm 10\%$, $\pm 20\%$ and $\pm 30\%$) in input parameters (porosity, fractal dimension and the intake air suction head). Some indices like RMSE, AIC and R^2 were used to evaluate different fractal models.

Results and Discussion: The results of the sensitivity analysis of Rawls - Huang model, showed the least sensitivity to changes in porosity and suction entry air and the most sensitivity to changes in fractal dimension. The saturated hydraulic conductivity is underestimated by increasing the fractal dimension in Rawls - Huang model. The high sensitivity of the combined model to changes in fractal dimension, is considered as one of the model limitations. In other words, fractal dimension underestimation increased the error related to the hydraulic conductivity estimation. Sensitivity analysis of K_s regression model was done among parameters like bulk density, dry density, silt, sand, fractal dimension of particle size and porosity. Results showed less sensitivity to fractal dimension and porosity. The highest RMSE was 0.018 for fractal dimension and porosity (in the range of $\pm 30\%$ changes). The results showed that the amount of clay in the estimation of fractal dimension is of crucial importance. Statistical analyzes indicated the high accuracy of the PSF models based on soil texture data. Error indices showed the high accuracy of Rawls and three-phase fractal (pore- solid- fractal) models combination in estimating the K_s value. The results suggest that Huang and Zhang model, with the highest correlation, the least Root Mean Square Error and the least Akaike criteria among the studied fractal models for estimation of the K_s values. Fuentes and Hunt models, overestimated soil saturated hydraulic conductivity. Fuentes et al. (1996) as an experimental fractal model to estimate the saturated hydraulic conductivity indicated very poor results. Bird model had higher error values compared with the best model, (RMSE = 0.73). This model fit well with the measured values compared to Sepaskhah and Taylor models particularly at low K_s values. Taylor's two-parameter model, which is similar to the Brooks - Corey and the Campbell model, was inserted in the fourth priority. The RMSE values of Sepaskhah and Taylor models were 0.62 (cm/h) and 0.55 (cm/h) respectively. The fractal dimension is a function of soil texture. Heavy soils resulted in a larger fractal dimension and less hydraulic conductivity. Therefore, the Huang-Zhang model as a result of clay value using model (lower values for K_s), had a close fit with the measured data in probability distribution.

1- Ph.D. Candidate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Urmia

(* - Corresponding Author Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir)

Conclusion: The results showed that the soil clay percent had a significant role in fractal dimension calculation.

Keywords: Fractal dimension, Huang and Zhang fractal model, Rawls model