

## ارزیابی دقت روش‌های برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع برای خاک‌های مختلف

علی رسول‌زاده<sup>1\*</sup>، سکینه رضوی قلعه جوق و محمدرضا نیشابوری

استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی؛

[arasoulzadeh@gmail.com](mailto:arasoulzadeh@gmail.com)

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد رشته علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی؛

[srazavig@gmail.com](mailto:srazavig@gmail.com)

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز؛

[Neyshmr@hotmail.com](mailto:Neyshmr@hotmail.com)

### چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از خصوصیات مهم فیزیکی خاک در مدل کردن انتقال آب و املاح، مدیریت آبیاری و مسائل زهکشی می‌باشد. روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی برای اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی زمان بر و پرهزینه می‌باشد. به همین منظور، روش‌های غیرمستقیم استفاده از توابع انتقالی برای برآورد این ویژگی توسعه یافته است. هدف از این تحقیق، ارزیابی مدل‌های توابع انتقالی رگرسیونی مختلف، مدل تابع انتقالی رزتا (Rosetta) با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی و مدل فرکتال برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع است. همچنین، به علت اهمیت و نقش جریان‌های ترجیحی در انتقال ترکیبات شیمیایی در خاک، هدایت هیدرولیکی منافذ درشت خاک با استفاده از مدل فرکتال بدست آمد. این هدف با انتخاب 31 نمونه خاک با بافت‌های مختلف و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع با روش بار افتان، مورد آزمون قرار گرفت. خصوصیات فیزیکی زود یافت خاک شامل توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری، جرم مخصوص حقیقی، محتوای مواد آلی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از خصوصیات زود یافت خاک به وسیله مدل‌های ذکر شده، برآورد شد. به منظور مقایسه و ارزیابی مدل‌های مختلف محک‌های آماری درجه انحراف (DT)، نسبت خطای متوسط هندسی (GMER) و نسبت خطای انحراف معیار هندسی (GSDER) برای تمام مدل‌ها محاسبه شد. نتایج نشان داد مدل وستن و همکاران بالاترین دقت را با DT و GMER به ترتیب 23/117 و 0/055 و با GSDER برابر با 3/372 نسبت به سایر مدل‌ها برای مناطق مورد مطالعه دارد. مدل کمپل و شوزاوا با DT برابر 4931/854 ضعیف‌ترین برآورد را برای هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک ارائه داد. محک‌های آماری حاکی از آن است که مدل فرکتال تعدیل شده در این تحقیق، با DT برابر 4/91 بهترین برآورد را برای هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، جریان‌های ترجیحی، فرکتال، هدایت هیدرولیکی

<sup>1</sup> آدرس نویسنده مسؤل: اردبیل - انتهای خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فناوری کشاورزی - گروه مهندسی آب -

کدپستی: 5619911367 - صندوق پستی: 179

\* دریافت: اردیبهشت، 1391 و پذیرش: شهریور، 1391

## مقدمه

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از متغیرهای کلیدی در مدل سازی آب های زیرزمینی، حرکت آب در خاک و انتقال املاح می باشد. اندازه گیری مستقیم این خصوصیت هیدرولیکی با استفاده از روش های آزمایشگاهی و صحرایی امکان پذیر می باشد ولی، این روش ها زمانبر و پرهزینه بوده و اندازه گیری آن ها برای مطالعات در مقیاس های وسیع تر عملی نمی باشد. اهمیت و تقاضا برای بدست آوردن داده های هدایت هیدرولیکی اشباع محققان را به سمت توسعه روش های غیرمستقیم برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع سوق داده است. یکی از روش های غیرمستقیم برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع، استفاده از توابع انتقالی است.

توابع انتقالی خصوصیات هیدرولیکی خاک را از خصوصیات فیزیکی زود یافت خاک مانند بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، محتوای مواد آلی برآورد می کنند. سالازر و همکاران (20) جریان زهکشی را با استفاده از هدایت هیدرولیکی اشباع برآورد شده با توابع انتقالی رزتا (با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی) ارزیابی کرده و نتیجه گرفتند، قدر مطلق درصد خطای نرمال شده، برای شبیه سازی جریان خروجی از زهکش ها با هدایت هیدرولیکی برآورد شده توسط رزتا 15 درصد هدایت هیدرولیکی اندازه گیری شده در آزمایشگاه می باشد.

مانیام و همکاران (10) توانایی سه تابع انتقالی رگرسیونی کمپل، وان گنوختن و واکلین را برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک های شنی نیجر آزمودند. ایشان گزارش کردند تابع انتقالی کمپل و واکلین هدایت هیدرولیکی را کم برآورد کرده و دقت این توابع با ریشه مربعات خطای 0/61 الی 1/01 (متر در روز) نسبت به توابع انتقالی وان گنوختن با ریشه مربعات خطای 0/26 الی 0/47 (متر در روز) برای

منطقه مورد مطالعه کمتر می باشد. شاپ<sup>1</sup> و لیج (22) از شبکه های عصبی مصنوعی برای مدل سازی هدایت هیدرولیکی اشباع و منحنی مشخصه آب خاک استفاده کردند. این محققین نشان دادند با افزایش تعداد ورودی در شبکه عصبی مصنوعی، دقت برآوردها افزایش می یابد بطوریکه RMSR<sup>2</sup> برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع توسط شبکه عصبی مصنوعی با سه ورودی (درصد های شن، سیلت و رس) برابر با 0/831 و با چهار ورودی (درصد های شن، سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری) برابر با 0/775 می باشد.

راولز و همکاران (19) به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس و منافذ درشت خاک، مدل فرس سرینسکی را با معادله هدایت هیدرولیکی مارشال (11) ترکیب کرده و به این نتیجه رسیدند که معادله هدایت هیدرولیکی اشباع تعدیل شده مارشال برآوردهایی منطقی از هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس و منافذ درشت خاک می دهد. ضریب همبستگی بین مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت برآورد شده و اندازه گیری شده توسط این محققین 0/89 به دست آمد. در تحقیق انجام شده به وسیله امید و قهرمان (14)، هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس و منافذ درشت خاک با استفاده از شش تابع انتقالی، یک مدل فرکتال و روش نفوذ لوله های مویین مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل کاسبای و همکاران با DT<sup>3</sup> برابر با 1/86، برآورد بهتری نسبت به سایر مدل ها از هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک دارد. همچنین، ایشان گزارش کردند مدل فرکتالی راولز برای محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک نتایجی دور از واقعیت نشان می دهد.

محققین مختلفی مدل های زیادی را برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه نمودند. از آنجا که

<sup>1</sup> Schaap

<sup>2</sup> Root mean square residuals

<sup>3</sup> Deviation Time

بر روی نمونه‌های دست نخورده به ترتیب با روش‌های بار افتان، خشک کردن نمونه خاک دست نخورده درآون اندازه‌گیری شد. توزیع اندازه‌ی ذرات، جرم مخصوص حقیقی و محتوای مواد آلی بر روی نمونه‌های دست خورده به ترتیب با روش‌های هیدرومتری، پیکنومتر (9) و والکلی بلاک (13) بدست آمد. هر پارامتر در سه تکرار در آزمایشگاه اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها در مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. رطوبت اشباع حجمی خاک برابر با تخلخل کل در نظر گرفته شد.

### برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک

#### توابع انتقالی رگرسیون، رزتا و سویل پار 2

با استفاده از چگونگی توزیع اندازه ذرات (درصد‌های شن، سیلت و رس) و جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع با استفاده از نرم افزار رزتا برآورد شد (23). نرم افزار سویل پار-2 از سه تابع انتقالی شامل توابع نقطه‌ای جبرو، جایز - تایلر و پاکت و همکاران برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده می‌کند (1).

متغیرهای ورودی مورد نیاز برای توابع انتقالی جبرو، جایز - تایلر، جرم مخصوص ظاهری و توزیع اندازه ذرات (شامل درصد‌های شن، سیلت و رس) بوده و برای تابع پاکت و همکاران تنها فراوانی رس می‌باشد. همچنین، از 11 توابع انتقالی متداول دیگر که همگی از دسته مدل‌های رگرسیونی می‌باشند، به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده شد. این 11 توابع انتقالی شامل توابع ارائه شده به وسیله کمپل (5)، براکنسیک و همکاران (3)، وریکن و همکاران (25)، کاسبای و همکاران (6)، سکستون و همکاران (21)، وستن و همکاران (28)، وستن (27)، فرر جولیا و همکاران (7)، کمپل و شوزاوا (به نقل از فر جولیا و همکاران (7))، ذنی و پاکت (به نقل از فر جولیا و

توسعه‌ی مدل‌های جدید برای هر منطقه‌ای، نیاز به پایگاه‌های اطلاعاتی بزرگ و معتبر دارد و استفاده از چنین داده‌هایی بطور معمول قابل دسترس نمی‌باشد لذا ارزیابی و استفاده از مدل‌های توسعه یافته‌ی موجود راهکار مناسبی به نظر می‌رسد. اگر چه مدل‌های توسعه یافته نباید برای اهداف برون یابی استفاده شوند. به عبارت دیگر، مدل‌های توسعه یافته باید برای خاک‌هایی مشابه با شرایط توسعه‌ی آن‌ها مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از آن‌ها برای برآورد خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های مناطق دیگر، ابتدا باید ارزیابی شده و سپس با احتیاط جدی صورت گیرد. بنابراین هدف از این تحقیق، ارزیابی دقت توابع انتقالی رگرسیونی مختلف و همچنین مدل کامپیوتری رزتا با ماهیت شبکه عصبی مصنوعی، توابع نرم افزاری سویل پار 2، مدل‌های فرکتال در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس و منافذ درشت خاک برای خاک های مختلف ایران می باشد. همچنین، مدل فرکتال راولز و همکاران به منظور برآورد بهتر هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک‌های مورد تحقیق تعدیل شده و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد تحقیق و روش اندازه‌گیری خصوصیات خاک

در این تحقیق، داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک (درصد‌های شن، سیلت و رس)، جرم مخصوص ظاهری و محتوای ماده آلی 31 نمونه خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمونه های مذکور شامل 13 نمونه از دشت توابع ارسنجان، استان فارس (16)، هشت نمونه از دشت اردبیل (8 و 29)، 10 نمونه خاک از دشت سولدوز شهرستان نقده (17) می‌باشند. تعداد 31 نمونه خاک و از هر کدام نمونه‌های دست خورده و دست نخورده و به صورت تصادفی، از عمق 0-10 سانتی‌متر تهیه شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و جرم مخصوص ظاهری

$$R_1 = \frac{0.148}{h_b} \quad (2)$$

در معادله 2،  $h_b$  مکش ورود هوا بر حسب سانتی متر می باشد. راولز و همکاران (19) مکش ورود هوا را برای هر بافت خاک ثابت فرض کردند. در این تحقیق برای برآورد  $h_b$ ، از توابع انتقالی رگرسیونی ارائه شده توسط راولز (18) استفاده گردید. متغیرهای ورودی مورد نیاز برای توابع انتقالی برآورد کننده  $h_b$ ، تخلخل و درصدهای شن و رس می باشد. برای هر نمونه خاک مقدار  $R_1$  مشخصی محاسبه شد.

راولز و همکاران (19) رابطه زیر را به منظور محاسبه  $n$  پیشنهاد کردند:

$$n = m \left( \frac{\phi}{(\phi - \theta_1)} \right) \quad (3)$$

همکاران (7)، پاکت و همکاران (15) می باشند که در جدول (1) ارائه شده اند.

مدل فرکتال

به منظور برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس از مدل زیر استفاده شد (19).

$$K_s (cm/h) = 4.41 \times 10^7 \left( \frac{\phi^x}{n^2} \right) R_1^2 \quad (1)$$

که در آن:  $\phi$  تخلخل کل،  $R_1$  بزرگترین شعاع منفذ معادل برای مدل فرش سرپینسکی،  $n$  کل گروه های توزیع منافذ و  $x$  توان برهم کنش منفذ است. نمای  $x$  در معادله 1 برابر 1/333 فرض می شود (12). راولز و همکاران (19)  $R_1$  را معادل بزرگترین منفذ در ماتریس و منافذ درشت خاک فرض نمودند که از معادله خیز موئینه ای محاسبه می شود:

جدول 1- توابع انتقالی رگرسیونی مورد استفاده در تحقیق

نام مدل	رابطه
کمپل (1985)	$K_s (m/s) = 4 \cdot 10^{-5} \left( \frac{1.3}{BD} \right)^{1.3b} \exp(-6.9(m_c) - 3.7(m_s))$ $b = d_g^{-0.5} + 0.2\sigma_g$ $d_g = \exp\left(0.01 \sum_{i=1}^3 f_i \ln d_i\right)$ $\sigma_g = \exp\left[\left(0.01 \sum_{i=1}^3 f_i \ln^2 d_i\right) - \left(0.01 \sum_{i=1}^3 f_i \ln d_i\right)^2\right]$
براکنسیک و همکاران (1984)	$K_s (m/s) = 2.78 \times 10^{-6} \exp(x)$ $x = 19.52348(\theta_s) - 8.96847 - 0.028212(Clay) + 1.8107 \times 10^{-4}(Sand^2) - 9.4125 \times 10^{-3}(Clay^2) - 8.395215(\theta_s^2) + 0.077718(Sand)(\theta_s) - 0.00298(Sand^2)(\theta_s^2) - 0.019492(Clay^2)(\theta_s^2) + 1.73 \times 10^{-5}(Sand^2)(Clay) + 0.02733(Clay^2)(\theta_s) + 0.001434(Sand^2)(\theta_s) - 3.5 \times 10^{-6}(Clay^2)(Sand)$
وریکن و همکاران (1990)	$K_s (m/s) = 1.1574 \times 10^{-7} \exp(20.62 - 0.96 \ln(Clay) - 0.66 \ln(Sand) - 0.46 \ln(Om) - 8.43(BD))$
کاسبای و همکاران (1984)	$K_s (m/s) = 7.05556 \times 10^{-6} \cdot (10^{[-0.6 + 0.0126(Sand) - 0.0064(Clay)]})$

- (1986) سکستون و همکاران  $K_s (m/s) = 2.778 \times 10^{-6} \exp(x)$
- $$x = 12.012 - 7.55 \times 10^{-2} (Sand) + (-3.895 + 3.671 \times 10^{-2} (Sand) - 0.1103 (Clay) + 8.7546 \times 10^{-4} (Clay^2)) / \theta_s$$
- (1999) وستن و همکاران  $K_s (m/s) = 1.15741 \times 10^{-7} \exp(x)$
- $$x = 7.755 + 0.0352 (Silt) + 0.93 (topsoil) - 0.967 (BD^2) - 0.000484 (Clay^2) - 0.000322 (Silt^2) + 0.001 / (Silt) - 0.0748 / (Om) - 0.643 \ln (Silt) - 0.01398 (BD) (Clay) - 0.1673 (BD) (Om) + 0.02986 (Topsoil) (Clay) - 0.03305 (Topsoil) (Silt)$$
- (1997) وستن  $K_s (m/s) = 1.15741 \times 10^{-7} \exp(x)$
- $$(خاک شنی) x = 9.5 - 1.471 (BD^2) - 0.688 (Om) + 0.0369 (Om^2) - 0.332 \ln (CS)$$
- $$(خاک لومی و رسی) x = -43.1 + 64.8 (BD) - 22.21 (BD^2) + 7.02 (Om) - 0.1562 (Om^2) + 0.985 \ln (Om) - 0.01332 (Clay) (Om) - 4.71 (BD) (Om)$$
- (2004) فرز جولیا و همکاران  $K_s (mm/h) = 0.920 e^{(0.0491 (Sand))}$
- (1994) کمپل و شوزاوا  $K_s (mm/h) = 54 \exp(-0.07 Sand - 0.167 Clay)$
- (1994) ذنی و پاکت  $K_s (mm/h) = 303.84 \exp(-0.144 Clay)$
- (1985) پاکت و همکاران  $K_s (mm/h) = 156.96 \exp(-0.1975 Clay)$

Clay، Silt و Sand به ترتیب درصد های رس، سیلت و شن؛ Om درصد ماده آلی؛ BD جرم مخصوص ظاهری ( $g\ cm^{-3}$ )؛ CS مجموع درصد رس و سیلت؛ مقدار Topsoil برابر با یک اگر نمونه از سطح الارض تهیه گردد و برابر صفر اگر نمونه از تحت الارض تهیه شود؛  $\theta_s$  رطوبت اشباع حجمی؛  $m_c$  و  $m_s$  به ترتیب بیانگر فراوانی ذرات رس و سیلت؛  $d_i$  میانگین اندازه ی حدود ذرات متوالی خاک می باشد که برای شن، سیلت و رس به ترتیب 1/025، 0/026 و 0/001 میلی متر می باشد  $f_i$  درصد فراوانی ذرات شن، سیلت و رس می باشد.

استفاده از رگرسیون غیر خطی به منظور برآورد n از طریق مرتبط کردن آن با بعد فرکتال (D) ارائه داده اند.

$$n = 1.86 D^{5.34}, \quad r = 0.91 \quad (4)$$

در معادله 3،  $\theta_1$  تخلخل در رطوبت ظرفیت مزرعه می باشد. مارشال (11) مقدار m را برابر 12 پیشنهاد کرد. راولز و همکاران (19) رابطه دیگری با

صورت و مخرج کسر با یکدیگر ساده شده و معادله فاقد پارامتر  $R_1$  یا شعاع منفذ خواهد بود:

$$K_s = 4.41 \times 10^{-7} \left( \frac{\phi^x}{60.135^2} \right) \quad (7)$$

با توجه به اینکه معادله (7) مستقل از  $R_1$  می باشد، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک بدست آمده از آن تنها تابعی از تخلخل کل خواهد بود. بنابراین، برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک با استفاده از تنها تخلخل کل و بدون در نظر گرفتن بزرگترین شعاع منفذ نتایج قابل قبولی ارائه نمی دهد. بدین منظور، بر اساس داده های راولز و همکاران (19)، در این تحقیق معادله دیگری به منظور محاسبه  $n$  با اعمال عرض از مبدأ با استفاده از نرم افزار SPSS به صورت زیر ارائه شد.

$$n = 50.695 R_1 + 3.15, \quad r = 0.85 \quad (8)$$

با توجه به این که  $r$  بدست آمده برای این معادله برابر با 0/85 بوده و این مقدار نسبت به  $r$  ارائه شده برای معادلات راولز و همکاران (19) و امیدی و قهرمان (14) اندکی کمتر می باشد، ولی معایب معادلات فوق الذکر را برطرف نموده است.

#### ارزیابی عملکرد توابع انتقالی

به منظور ارزیابی عملکرد توابع انتقالی برآورد کننده هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس و منافذ درشت خاک از محک های آماری نسبت خطای ( $\varepsilon$ )، نسبت خطای متوسط هندسی ( $GMER^2$ ) و نسبت خطای انحراف معیار هندسی ( $GSDER^3$ ) به ترتیب با استفاده از روابط (9) تا (11) استفاده شد (26).

$$\varepsilon = \frac{K_{sp}}{K_{sm}} \quad (9)$$

$$GMER = \exp \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(\varepsilon_i) \right) \quad (10)$$

که در آن:  $D$  بعد فرکتال منافذ خاک بوده که از طریق رابطه  $D = 2 - \lambda$  قابل محاسبه است و در آن  $\lambda$ ، شاخص توزیع اندازه ی منفذ بروکز و کوری (4) و  $r$  بیانگر ضریب همبستگی است (24). در این تحقیق،  $\lambda$  از توابع انتقالی رگرسیونی ارائه شده توسط راولز (18) با متغیرهای ورودی تخلخل و درصد های شن و رس محاسبه گردید.

#### هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک

##### مدل فرکتال راولز و همکاران

وجود منافذ درشت در ماتریس خاک، سبب می شود آب مستقیماً از سطح خاک توسط این منافذ درشت متصل به هم تا خاک زیرسطحی جریان یابد. به این گونه جریانها، جریان ترجیحی<sup>1</sup> گویند. هدایت هیدرولیکی اشباع این نوع جریانها را هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک گویند. راولز و همکاران (19) از معادله (1) به منظور محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک استفاده کردند. ایشان مقدار 1/333 را برای  $x$  در نظر گرفته و مقدار  $R_1$  را از معادله (2) محاسبه نمودند. آن ها به منظور محاسبه  $n$  رابطه زیر را ارائه دادند:

$$n = -5.7 + 77.0 R_1, \quad r = 0.93 \quad (5)$$

در رابطه (5)، محدوده ی مقادیر  $R_1$  استفاده شده برای بدست آوردن معادله 0/12 تا 0/49 سانتی متر می باشد و این معادله برای مقادیر  $R_1$  کمتر از 0/08 مقادیر منفی می دهد که واقعی نمی باشد. امیدی و قهرمان (14) به منظور برطرف کردن عیب معادله، رابطه دیگری بر مبنای اطلاعات راولز و همکاران به شرح ذیل ارائه نمودند.

$$n = 60.135 R_1, \quad r = 0.89 \quad (6)$$

این معادله یک معادله خطی با عرض از مبدأ صفر می باشد. چنان که  $n$  بدست آمده از معادله (6) در معادله (1) جایگزین شود مقادیر  $R_1$  های موجود در

<sup>2</sup>. Geometric mean error ratio

<sup>3</sup>. Geometric standard deviation error ratio

<sup>1</sup>. Preferential

(11)

### هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک

در جدول (2) دامنه تغییرات برخی خصوصیات زود یافت اندازه گیری شده برای مناطق مورد تحقیق ارائه شده است. با استفاده از این خصوصیات، هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک از طریق چندین مدل توابع انتقالی برآورد شد. شکل (1) لگاریتم مقادیر اندازه گیری شده را در برابر برآورد شده آن به وسیله مدل های تابع انتقالی رگرسیونی، مدل تابع انتقالی رزتا و مدل فرکتال راولز و همکاران نشان می دهد. در ارتباط با مدل فرکتال، مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک با استفاده از معادله (1) محاسبه و به همراه مقادیر اندازه گیری شده (محور افقی) در شکل (1) رسم شد و با علایم Fractal Rawls -1 و Fractal Rawls -2 نشان داده شد. شماره های 1 و 2 همراه این عبارات به ترتیب نشان دهنده هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس مرتبط با n محاسبه شده از رابطه (3) و هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس مرتبط با n محاسبه شده از رابطه (4) می باشد.

با توجه به شکل (1) و همچنین مقایسه مقادیر محک های آماری GMER، GSDER و DT از جدول (3) مشاهده می شود که مدل ها دقت های متفاوتی در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک دارند. برای مدل هایی که بیشتر نقاط زیر خط 1:1 قرار گرفته اند ( $GMER < 1$ ) کم برآورد و برای آن هایی که بالای خط 1:1 قرار می گیرند، بیش برآورد برای  $K_s$  ارائه شده است. با این وصف تمام مدل ها تمایل به کم برآورد کردن نشان داده اند و GMER کمتر از یک در جدول (3) نیز به خوبی بیانگر این موضوع می باشد. این مدل ها به ترتیب دقت آن ها در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع عبارتند از: وستن و همکاران، کاسبای و همکاران، وریکن و همکاران، جبرو سویل پار 2، رزتا (شبکه ی عصبی)، وستن، ذنی و پاکت، پاکت - سویل پار 2، کمپل، جایز تایلر سویل پار 2، براکنسیک و همکاران، سکستون و همکاران، فرکتال - راولز 2، فرکتال - راولز 1، فرر جولیا و

$$GSDER = \exp \left[ \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\ln(\epsilon_i) - \ln(GMER)]^2 \right)^{1/2} \right]$$

که در آن  $\epsilon$  نسبت خط،  $K_{sp}$  و  $K_{sm}$  به ترتیب مقادیر برآورد شده و مقادیر اندازه گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع و N تعداد مشاهدات می باشد. GMER معادل با یک تطابق کامل بین مقادیر اندازه گیری شده و تخمین زده شده را نشان می دهد. GMER کمتر از یک نشان می دهد مقادیر تخمین زده شده به طور کلی کم برآورد<sup>1</sup> و GMER بزرگتر از یک نشان می دهد که مقادیر بیش برآورد<sup>2</sup> شده است. هرچه مقدار GSDER بیشتر باشد، نشان دهنده انحراف بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده می باشد.

همچنین، کارایی مدل های برآورد کننده ی هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس و منافذ درشت خاک از طریق مقایسه مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه گیری شده با مقادیر برآورد شده آن با استفاده از لگاریتم پارامتر DT<sup>3</sup> از طریق رابطه زیر ارزیابی شد (به نقل از امید و قهرمان (14)).

(12)

$$\text{Log DT} = \left\{ \sum_{i=1}^N \left[ \text{Log}_{10} \left( \frac{K_{sp}}{K_{sm}} \right) \right]^2 \right\}^{0.5}$$

که در آن:  $K_{sp}$  و  $K_{sm}$  به ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه گیری شده و برآورد شده به وسیله مدل و N تعداد خاک ها می باشد. هرچه مقدار DT بزرگتر باشد، خطای تخمین ها بیشتر و دقت و کارایی مدل در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع کمتر خواهد بود. بنابراین، بهترین مدل، GMER نزدیک به یک و کمترین مقادیر DT و GSDER را خواهد داشت.

### نتایج و بحث

<sup>1</sup> Under estimate

<sup>2</sup> Over estimate

<sup>3</sup> Deviation time

همکاران پاکت و همکاران، کمپل و شوزاوا. نتایج محک‌های آماری در جدول (3) نشان داد مدل کمپل و شوزاوا با DT برابر با 4931/854 کم دقت ترین برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع را برای مناطق مورد تحقیق ارائه می‌کند. مدل وستن و همکاران بالاترین دقت را با DT و GMER به ترتیب 23/117 و 0/055 و با GSDER برابر با 3/372 نشان داده است. لذا، بهترین مدل برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس در مناطق مورد تحقیق وستن و همکاران می‌باشد.

پیش بینی بهتر توسط مدل رزتا می‌تواند به دلیل وجود ماهیت علمی قوی استفاده شده در این مدل و محدوده وسیع نمونه خاک های استفاده شده در آموزش مدل باشد. علاوه بر آن، چون در آموزش شبکه عصبی مصنوعی (رزتا)، از خاک‌های قاره آسیا نیز استفاده شده است (2) می‌توان عملکرد بهتر رزتا را به این موضوع نیز نسبت داد. اصولاً توابع انتقالی می‌توانند خصوصیات

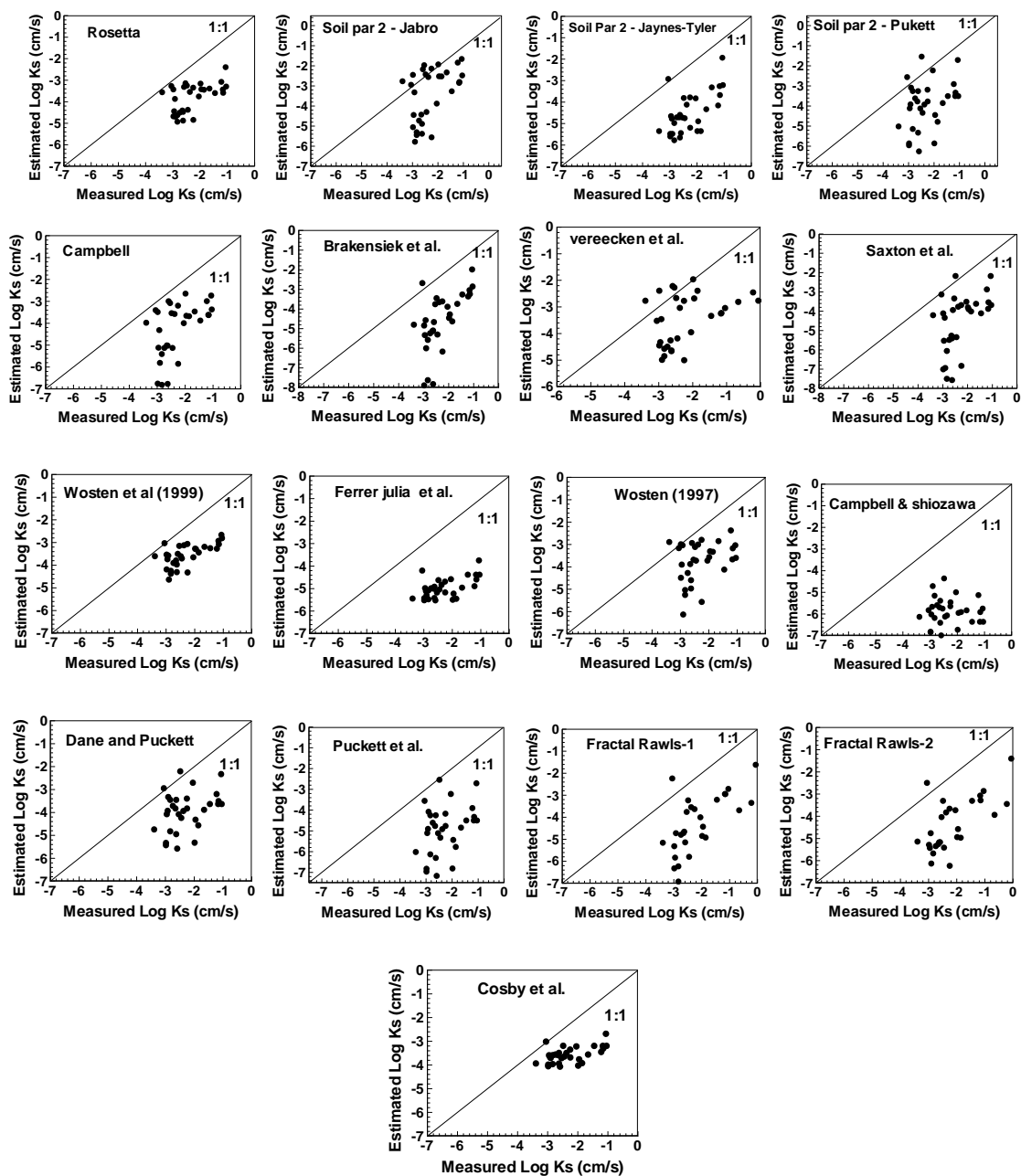
هیدرولیکی مربوط به خاک‌هایی که از آن منشأ گرفته‌اند را بهتر برآورد کنند. مدل پاکت و همکاران که فقط از درصد رس بعنوان ورودی برای تابع انتقالی استفاده کرده است هدایت هیدرولیکی اشباع را کمتر برآورد کرده است. این موضوع به ماهیت رفتار رس خاک بستگی دارد. برخی رس‌ها ممکن است تشکیل خاکدانه‌هایی بدهند که سبب افزایش تخلخل درشت خاک شود.

بنابراین در واقعیت هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده آن‌ها بیشتر از مقدار برآورد شده با استفاده از توابع انتقالی خواهد بود. معادله پاکت مورد استفاده در سویل پار 2 متفاوت از مدل پاکت و همکاران (15) می‌باشد. به علت این‌که صحت و سقم معادله ارائه شده برای مدل پاکت و همکاران به وسیله نرم افزار سویل پار 2 مورد تردید بود، از هر دو مدل (نرم افزار سویل پار 2 و مدل پاکت و همکاران) برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع در این تحقیق استفاده شد.

جدول 2- میانگین، دامنه تغییرات، انحراف معیار، ضریب تغییرات و چولگی و یزگی‌های اندازه‌گیری شده در 31 نمونه خاک

متغیر	تعداد	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	ضریب چولگی
درصد شن	31	26/1	5/2	48/4	11/28	0/43	0/79
درصد سیلت	31	43/2	17/1	65/3	14/93	0/35	-0/88
درصد رس	31	29/1	2/3	67/1	14/14	0/49	0/13
جرم مخصوص ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> )	31	1/44	0/97	1/92	0/28	0/19	0/23
درصد محتوای ماده آلی	31	2/1	1/01	4/1	1/02	0/49	1/44





شکل 1- مقایسه لگاریتم مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده و برآورد شده با استفاده از مدل‌های مختلف

جولیا و همکاران که فقط درصد شن را در بر گرفته‌اند، نیز نتایج قابل قبولی ارائه نداده‌اند. نتایج توابع انتقالی کاسبای و همکاران و وستن و همکاران تقریباً مشابه هم

ماهیت توابع انتقالی به گونه‌ای است که بیشتر ماتریس خاک را در بر می‌گیرند و کمتر به خلل و فرج درشت و ساختمان خاک توجه دارند. مدل‌هایی مانند فر

ذرات در مدل براکنسیک و همکاران دقت برآورد را افزایش نداده است. وگنر و همکاران (26) نتایجی تقریباً مشابه با نتایج بدست آمده در این تحقیق گزارش کردند. در تحقیق ایشان نیز توابع وستن و همکاران، کمپل، کاسبای، سکستون همکاران و براکنسیک و همکاران هدایت هیدرولیکی اشباع را کمتر برآورد کرده اند. امیدی و قهرمان (14) نشان دادند مدل کاسبای و همکاران بهترین برآورد را برای هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس ارائه می دهد. در این تحقیق نیز بعد از وستن و همکاران، مدل کاسبای و همکاران تطبیق بهتری نسبت به سایر مدل ها نشان داد.

بودند. مدل وستن و همکاران نتایج خوبی نشان داده است. دلیل آن را، بانک اطلاعات قوی استفاده شده در توسعه مدل وستن و همکاران می توان ذکر کرد. شایان ذکر است مدل کاسبای و همکاران با اینکه فقط از دو متغیر ورودی شن و رس استفاده می کند تخمین دقیقی از هدایت هیدرولیکی اشباع ارائه داده است.

در توسعه مدل براکنسیک و همکاران از رطوبت اشباع نیز استفاده شده است. به دلیل این که خاک ها بندرت به اشباع کامل می رسند، حتی اگر به مدت طولانی در معرض آب قرار گرفته باشند، شاید داده رطوبت اشباع استفاده شده در توسعه تابع انتقالی کاملاً دقیق نبوده است. به همین دلیل، اضافه کردن رطوبت اشباع به توزیع اندازه

جدول 3- مقادیر آماره های DT، GMER و GSDER مدل های برآورد کننده هدایت هیدرولیکی اشباع ماتریس خاک.

مدل	DT	GMER	GSDER
جبرو-سویل پار 2	39/720	0/075	14/187
وستن و همکاران	23/117	0/055	3/372
رزتا	44/170	0/031	4/452
کمپل	168/494	0/011	11/502
وستن	53/639	0/035	8/950
کاسبای و همکاران	24/917	0/053	3/732
سکستون و همکاران	379/257	0/006	19/397
براکنسیک و همکاران	365/544	0/005	15/222
دنی و پاکت	72/282	0/023	7/728
پاکت - سویل پار 2	95/876	0/023	13/967
جاینز تایلر-سویل پار 2	215/694	0/006	5/543
فرر جولیا و همکاران	536/177	0/002	3/628
پاکت و همکاران	703/612	0/002	13/663
کمپل و شوزاوا	4931/854	0/001	8/273
وریکن و همکاران	30/500	0/068	8/476
فرکتال - راولز 1	453/175	0/005	19/731
فرکتال - راولز 2	363/360	0/005	12/378

مقادیر  $R_1$  استفاده شده برای تعیین معادله 0/12 تا 0/49 سانتی متر می باشد و این معادله برای مقادیر  $R_1$  کمتر از 0/08 مقادیر  $n$  را منفی می دهد که واقعی نمی باشد. بدین منظور، برای محاسبه  $n$  از معادلات تعدیل شده به وسیله امیدی و قهرمان (مطابق با معادله 6) و تعدیل شده در این تحقیق (مطابق با معادله 8) استفاده شد.

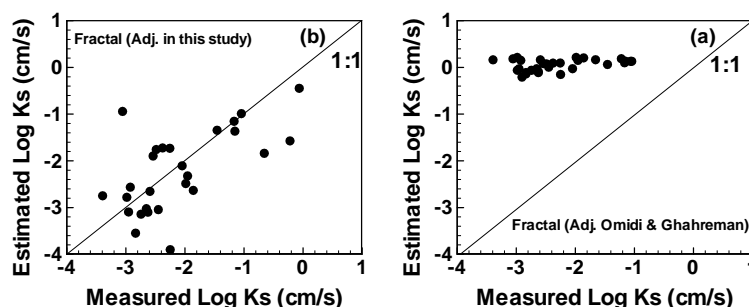
به منظور محاسبه  $R_1$  با استفاده از رابطه (2)، مقدار مکش ورود هوا ( $h_b$ ) با استفاده توابع انتقالی ارائه شده توسط راولز (18) برآورد گردید. با بدست آوردن پارامترهای  $R_1$ ،  $\phi$  و  $n$  مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک با استفاده از معادله (1) برآورد شد. در شکل (2) هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت، برآورد شده با استفاده از مدل فرکتال راولز با  $n$  به ترتیب تعدیل شده به وسیله امیدی و قهرمان (مطابق با رابطه 6) (Fractal Adj. Omid & Ghahreman) و تعدیل شده در تحقیق حاضر (رابطه 8) (Fractal Adj in this study) به همراه مقادیر اندازه گیری شده هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (محور افقی) رسم شده است.

با توجه به شکل (2) و از روی پراکندگی نقاط اطراف خط یک به یک و همچنین مقدار محک های آماری (جدول 4) می توان مشاهده کرد که مدل فرکتال راولز با  $n$  تعدیل شده در این تحقیق با مقدار  $DT$  برابر با 6/88،  $GMER$  نزدیک تر به یک و برابر با 0/63 و با  $GSDER$  برابر با 6/71 بهترین برآورد از هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک نسبت به مدل فرکتال تعدیل شده ی امیدی و قهرمان ارائه داده است.

معیار  $GSDER$  بیانگر انحراف بیشتر مقادیر برآورد شده از اندازه گیری شده می باشد. در واقع، مقادیر زیاد  $GSDER$  نشان دهنده پراکندگی بیشتر بوده و عملکرد غیر یکسان تابع انتقالی برای خاک های مختلف را نشان می دهد. با مقایسه تابع انتقالی جبرو- سویل پار 2 با رزتا مشاهده می گردد. مقدار  $DT$  تابع انتقالی جبرو-سویل پار 2 کمتر از رزتا می باشد، در حالی که مقدار  $GSDER$  این تابع خیلی بیشتر از رزتا است. لذا، می توان نتیجه گرفت جبرو-سویل پار 2 با این که برای بعضی خاک ها برآورد مناسبی داشته، ولی برای برخی دیگر عملکرد نامناسبی داشته و این امر سبب شده مقدار  $GSDER$  آن بیشتر شود. با توجه به شکل (1) مشاهده می شود پراکندگی نقاط در جبرو-سویل پار 2 بیشتر از رزتا می باشد. عدم یکسانی عملکرد ( $GSDER$  زیاد) در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع سبب می شود استفاده از تابع برای خاک های دیگر با احتیاط بیشتری انجام گیرد.

جدول (3) و شکل (1) نشان می دهد با اینکه تابع انتقالی کمپل و شوزاوا کمترین دقت را داشته اما  $GSDER$  آن کم بوده و پراکندگی نقاط کم می باشد. لذا، می توان گفت تابع کمپل و شوزاوا عملکرد یکسانی داشته و هدایت هیدرولیکی اشباع تمام خاک ها را با دقت خیلی کمی برآورد نموده است. بنابراین، برای انتخاب بهترین تابع انتقالی، هر دو معیار ( $GSDER$  و  $DT$ ) باید مدنظر قرار گیرد. با توجه به این دو معیار، جدول (3) نشان می دهد تابع انتقالی وستن و همکاران، کاسبای و همکاران و رزتا به ترتیب کمترین  $DT$  و  $GSDER$  داشته و برای خاک های مورد تحقیق بهترین برآورد را ارائه دادند.

هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک راولز و همکاران به منظور محاسبه هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک با استفاده از معادله (1)، مقدار  $x$  برابر با 1/333 را پذیرفته و برای محاسبه  $R_1$  و  $n$  به ترتیب از روابط (2) و (5) استفاده کردند. در رابطه (5) ارائه شده به وسیله راولز و همکاران محدودی



شکل 2 - مقایسه‌ی لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده ( $K_s$ ) و برآورد شده برای منافذ درشت خاک با (a) مدل فرکتال راولز با  $n$  تعدیل شده به وسیله امید ی و قهرمان، (b) مدل فرکتال راولز با  $n$  تعدیل شده در تحقیق حاضر.

جدول 4- مقادیر آماره‌های DT، GMER و GSDER برای هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک برآورد شده با

مدل فرکتال راولز با  $n$  تعدیل شده در تحقیق حاضر، تعدیل شده به وسیله ی امید ی و قهرمان (14)

GSDER	GMER	DT	مدل
6/71	0/63	6/88	فرکتال راولز با $n$ تعدیل شده در تحقیق حاضر
4/36	222/83	269/85	فرکتال راولز با $n$ تعدیل شده به وسیله ی امید ی و قهرمان

### نتیجه گیری کلی

هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک نسبت به مدل فرکتال تعدیل شده‌ی امید ی و قهرمان را داشت. در ارتباط با مدل‌های هدایت هیدرولیکی منافذ درشت، ذکر این نقطه قابل توجه خواهد بود که هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده با روش بار افتان بدست آمده و این روش صرفاً اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت را در بر نمی‌گیرد و شامل ماتریس خاک نیز می‌باشد. به عبارت دیگر، هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده خاک تحت تاثیر توأمان جریان ماتریس خاک و جریان در منافذ درشت خاک است. در حالی که مدل فرکتال تنها هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک را محاسبه می‌کند که این موضوع می‌تواند منجر به عدم تطبیق کامل شود. توصیه می‌شود در مطالعات آینده مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع منافذ درشت خاک نیز اندازه‌گیری شده و توانایی مدل ارائه شده در این تحقیق با آن مقایسه گردد.

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از خصوصیات مهم و تعیین کننده در مدل سازی جریان آب و املاح در خاک بوده و نقش ارزنده در مدیریت آب و خاک دارد. اندازه گیری مستقیم هدایت هیدرولیکی زمان‌بر، هزینه بر و دارای خطای سیستماتیک می باشد. به منظور کاهش خطای سیستماتیک حاصل از روش اندازه گیری 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، توابع نرم افزاری سویل پار2، مدل‌های فرکتال برای خاک های مختلف آزموده شد. تمام مدل‌ها هدایت هیدرولیکی اشباع را کم برآورد می کنند.

مدل وستن و همکاران با DT برابر 23/117 بالاترین دقت و مدل کمپل و شوزاوا با DT برابر 4931/854 کمترین دقت را داشتند. مدل فرکتال راولز با  $n$  تعدیل شده در این تحقیق، با مقدار DT برابر با 6/88 بهترین برآورد از

1. Acutis M. and Donatelli, M. 2003. SOILPAR 2.00: software to estimate soil hydrological parameters and functions. *European Journal of Agronomy*, 18: 373-377.
2. Borgesen, C. D. and Schaap, M. G. 2005. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. *Geoderma*, 127:154-167.
3. Brakensiek, D. L., Rawls, W. J. and Stephenson, G. R. 1984. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. ASAE Paper No. PNR-84-203, St. Joseph, MI.
4. Brooks, R. H. and Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrological paper No. 3, p. 27.
5. Campbell, C. S. 1985. *Soil physics with basic*. Elsevier, New York.
6. Cosby, B. J., Hornberger, G. M. Clapp, R. B. and Ginn, T. R. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20 (6): 682-690.
7. Ferrer-Julià M., Estrela Monreal, T. Sánchez del Corral Jiménez, A. and García Meléndez, E. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 123: 275-277.
8. Heydari, F. 2011. Effect of residue application and stubble burning on soil hydraulic and physical properties in a cropping system. MSc. Thesis. University of Mohaghegh Ardabili. Ardabil, Iran, (In Farsi).
9. Jacob, H. and Clarke, G. 2002. *Methods of soil analysis, Part 4, Physical Method*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
10. Manyam, C., Morgan, C. L. Heilman, J. L. Fatondji, D. Gerard, B. and Payne, W.A. 2007. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. *Geoderma*, 141: 407 – 415.
11. Marshal, T. J. 1958. A relationship between permeability and size distribution of pores. *Soil Science*, 9: 1-8.
12. Millington, R. J. and Quirk, J. P. 1961. Permeability of porous media. *Transactions of the Faraday Society*, 57: 1200-1206.
13. Nelson, D. W. and Sommers, L. E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2*. Second ed. Agron. Monogr. Soil Science Society of America, Madison, WI, 539-579.
14. Omidi, S., Ghahreman, B. 2008. Estimation of matrix and large pores hydraulic conductivity (using Pedotransfer functions, Fractal and capillary tubes methods). The 7<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Nov. 11-13. Tehran, Iran (In Farsi).
15. Puckett, W. E., Dane, J. H. and Hajek, B. F. 1985. Physical and mineralogical data to determine Soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 831-836.
16. Rasoulzadeh, A. 2007. Three-Dimensional variably-saturated numerical modeling of groundwater management in a coastal aquifer (case study: Tavabe-e Arsanjan, Iran). PhD Thesis. Shiraz University. Shiraz, Iran.
17. Razavi, S. 2011. Pedotransfer functions to estimate hydraulic properties of agricultural soils in naghadeh county (Iran). MSc. Thesis. University of Mohaghegh Ardabili. Ardabil, Iran, (In Farsi).
18. Rawls, W. J. 2004. Pedotransfer functions for the United States. *Developments in Soil Science*, 30, 437-447.
19. Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. and Logsdon, S. D. 1993. Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles. *Soil Science*, 57: 1193-1197.

20. Salazar, O., Wesstrom, I. and Joel, A. 2008. Evaluation of Drainmod using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Journal of Agricultural Water Management*, 95: 1135 – 1143.
21. Saxton K. E., Rawls, W. J. Romberger, J. S. and Papendick, R. I.1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1301-1036.
22. Schaap, M. G. and Leij, F. J. 1998. Using neural networkes to predict soil water retention and soil hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 47: 37-42.
23. Schaap, M. G., Leij, F. J. and van Genuchten, M. T. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251: 163-176.
24. Tyler, S. W. and Wheatcraft, S. W. 1990. Fractal processes in soil water retention. *Water Resources Research*, 26: 1047-1054.
25. Vereecken, H., Maes, J. and Feyen, J. 1990. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149: 1-12.
26. Wagner, B., Tarnawski, V. R. Hennings, V. Müller, U. Wessolek, G. and Plagge, R. 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102: 275-297.
27. Wösten, J. H. M. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In:Gegorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soils Science*, vol. 25, Elsevier, Amesterdam 221-245.
28. Wösten, J. H. Lilly, M., A. Nemes, A. and Le Bas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma*, 90: 169-185.
29. Yaghoubi, A. 2010. Investigation of cattle manure effect on soil hydraulic properties by inverse method. MSc. Thesis. University of Mohagheh Ardabili. Ardabil, Iran, (In Farsi).