

## ارزیابی و توسعه توابع انتقالی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقیاس زمین نما در زاگرس مرکزی

حمید کلیشادی<sup>۱\*</sup>، محمد رضا مصدقی<sup>۲</sup>، محمد علی حاج عباسی<sup>۲</sup>، شمس اله ایوبی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- بترتیب دانشیار، استاد و دانشیار گروه علوم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\*نویسنده مسئول: [kelishadi.h@gmail.com](mailto:kelishadi.h@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۳۱

### چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) خاک یکی از ویژگی‌های ضروری برای مدیریت پروژه‌های آبیاری، مدل‌سازی حرکت آب و املاح و پیش‌بینی توابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک می‌باشد. اندازه‌گیری  $K_s$ ، به ویژه در مقیاس بزرگ در آزمایشگاه و مزرعه زمان‌بر و پرهزینه است. از طرفی  $K_s$  تحت تأثیر عوامل مختلف دارای تغییرات مکانی و زمانی زیادی می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی و مدل‌سازی آن توسط توابع انتقالی خاک برای بسیاری از پژوهش‌ها می‌تواند مفید باشد. این پژوهش در بخشی از شهرستان‌های کوه‌رنگ و فارس واقع در استان چهارمحال و بختیاری با هدف ارزیابی کارایی برخی توابع انتقالی موجود در منابع و استخراج توابع انتقالی جدید (PTFs) برای برآورد  $K_s$  انجام گرفت. نمونه‌های دست‌نخورده به حجم  $100\text{ cm}^3$  از خاک سطحی در ۱۰۰ نقطه که توزیع مناسب و یکنواختی در منطقه و در کاربری‌های مختلف داشتند، برداشت شد. ضریب  $K_s$  به روش بار ثابت برای این نمونه‌های دست‌نخورده در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. برخی ویژگی‌های زودپافت خاک نیز اندازه‌گیری شده و PTFs برای برآورد  $K_s$  به روش رگرسیون چندمتغیره گام به گام استخراج شد. هم‌چنین مقادیر  $K_s$  اندازه‌گیری شده با برآورد PTFs موجود در منابع مقایسه شد. نتایج نشان داد که PTFs موجود در منابع قادر به برآورد مناسب  $K_s$  در منطقه نیستند. در بین توابع انتقالی بررسی شده موجود در منابع، مدل توانمند شبکه عصبی Rosetta (SSC+BD) بهترین بود. ناکارآمدترین PTFs برای برآورد  $K_s$  در خاک‌های مورد بررسی مربوط به مدل‌های رگرسیونی براکینز و همکاران (۱۹۸۴) بود. بهر حال PTFs استخراج شده برای منطقه بهتر از PTFs موجود در منابع توانست  $K_s$  را برآورد کنند ( $R^2=0.52$ ،  $\text{RMSE} = 0.52 \text{ mmh}^{-1}$ ). یافته‌ها نشان داد که لگاریتم  $K_s$  با چگالی ظاهری نسبی (تراکم نسبی)، چگالی ظاهری مؤثر، نسبت درصد رس به کربنات کلسیم ( $\text{Clay}/\text{CaCO}_3$ )، نسبت درصد کربنات کلسیم به ماده آلی ( $\text{CaCO}_3/\text{OM}$ ) و لگاریتم برهم‌کنش چگالی ظاهری و درصد رس ( $\ln(\text{BD} \times \text{Clay})$ ) هم‌بستگی منفی دارد و با OM، لگاریتم نسبت OM/Clay، درصد شن خیلی ریز و تخلخل خاک هم‌بستگی مثبت دارد. چون خاک‌های مورد بررسی دارای ساختمان نسبتاً خوبی بودند و در استخراج PTFs ویژگی‌های ساختمانی نقش بیش‌تری داشتند، پیشنهاد می‌شود در آینده برای پیش‌بینی بهتر  $K_s$  خاک‌ها در این منطقه برخی ویژگی‌های ساختمانی دیگری مانند میانگین قطر خاک‌دانه‌ها به عنوان تخمین‌گر مد نظر قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** توابع انتقالی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، تراکم نسبی، چگالی ظاهری مؤثر، زاگرس مرکزی

## مقدمه

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل منحنی مشخصه رطوبتی ( $\theta(h)$ ) و تابع هدایت هیدرولیکی ( $K(h)$ ) خاک می‌باشند. اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در مزرعه و آزمایشگاه زمان‌بر و همچنین هزینه‌بر است. علاوه بر این، نتایج آن به خاطر تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک ممکن است خیلی دقیق نباشد (Merdun *et al.*, 2006). بنابراین نیاز به کاربرد تعداد زیادی نمونه برای کمی‌کردن این ویژگی‌ها برای یک سطح وسیع وجود دارد. اگرچه روش‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای زیادی اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک پیشنهاد شده است ولی اکثر این روش‌ها (به ویژه برای خاک‌های ریزبافت) هزینه‌بر و وقت‌گیر هستند (van Genuchten & Nielsen, 1985)؛ بنابراین مدل‌سازی و پیش‌بینی دقیق آنها برای بسیاری از کاربردها می‌تواند مفید باشد (Wösten *et al.*, 2001).

تلاش‌ها برای تخمین غیرمستقیم این ویژگی‌ها از روی دانسته‌های پایه و زودیافت (آسان-قابل اندازه‌گیری) خاک مانند میزان شن، سیلت، رس، چگالی ظاهری و ماده آلی با استفاده از توابع انتقالی خاک<sup>1</sup> (PTFs) گسترش چشم‌گیری یافته است (Wösten *et al.*, 1998). به عبارت دیگر به کمک یک تابع انتقالی خاک، از "داده‌هایی که داریم (ویژگی‌های نقشه‌برداری خاک)" به "داده‌هایی که نیاز داریم (ویژگی‌های هیدرولیکی خاک)" می‌توان پی برد (Bouma, 1989). سه گروه روش‌های غیرمستقیم یا PTFs برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک ارائه شده است (Rawls *et al.*, 1991; Wösten *et al.*, 2001; Pachepsky & Rawls, 2004): (۱) تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی بر اساس یک مدل ساختمان خاک (مدل‌های فیزیکی)، (۲) روش‌های رگرسیونی نقطه‌ای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و (۳) روش‌های رگرسیونی برآورد پارامترهای مدل‌های ویژگی‌های هیدرولیکی خاک.

توابع انتقالی خاک متعددی در کشورهای مختلف جهان برای تیپ‌های مختلف خاک ارائه شده است. چون هر تابع انتقالی بر اساس یک پایگاه اطلاعاتی محدود توسعه می‌یابد، بنابراین عدم قطعیت‌های زیادی برای کاربرد توابع انتقالی در شرایطی غیر از شرایط استخراج آنها وجود دارد. از دلایل این دقت کم می‌توان به تفاوت

اقلیم (بارندگی و دما)، تفاوت ویژگی‌های ذاتی خاک مانند مقدار رس، نوع کانی‌های رسی، مقدار و نوع ماده آلی خاک و همچنین روش‌های اندازه‌گیری اشاره کرد. بنابراین، هنگامی که از توابع انتقالی برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک استفاده می‌شود بهتر است حداقل روش اندازه‌گیری یکسان و هماهنگ باشد (Tomasella *et al.*, 2003).

پاراسوماران و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند در مقیاس مزرعه‌ای مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی طراحی-شده با همان ورودی‌های مورد نیاز Rosetta (مدل SSC) شامل درصد شن، سیلت و رس، بهتر از بسته نرم‌افزاری Rosetta ارائه شده توسط اسچاپ و همکاران (۱۹۹۸) هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) خاک را تخمین می‌زند و دلیل آن را آموزش بسته نرم‌افزاری Rosetta در شرایطی غیر از شرایط مزرعه مورد آزمایش بیان کردند (Parasuraman *et al.*, 2006). ساکستون و راولز (۲۰۰۶) با مقایسه توابع انتقالی استخراجی خودشان با توابع انتقالی ارائه شده توسط راولز و همکاران (۱۹۹۸) بیان کردند که مقدار رطوبت در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال ( $\theta_{1500}$ )، رطوبت در مکش ۳۳ کیلوپاسکال ( $\theta_{33}$ )، رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) و  $K_s$  در خاک‌های ایالات متحده توسط هر دو گروه توابع تقریباً مشابه برآورد می‌شود و دلیل آن را شبیه بودن تخمین رطوبت و به کار بردن رابطه مشابه برای برآورد هدایت هیدرولیکی ذکر کردند. آن‌ها در مقایسه توابع انتقالی استخراج شده با توابع انتقالی ارائه شده توسط ساکستون (۱۹۸۶) بیان کردند برآورد مقدار  $\theta_{1500}$  و  $\theta_{33}$  توسط هر دو گروه توابع انتقالی شبیه هستند ولی مقادیر برآوردی  $\theta_s$  و  $K_s$  دو گروه توابع شبیه نیستند. در نهایت آنها نتیجه گرفتند توابع انتقالی ارائه شده توسط ساکستون و راولز (۲۰۰۶) برای خاک‌های ایالات متحده بهتر است (Saxton & Rawls, 2006). لی (۲۰۰۵) گزارش کرد تابع انتقالی وستن و همکاران (۱۹۹۹)، هنگامی که با تابع کاسبی و همکاران (۱۹۸۴) برای برآورد  $\theta_s$  ترکیب شود بهترین پیش‌بینی را برای  $K_s$  دارد و تابع راولز و براکینز (۱۹۸۴) هنگامی که با تابع ساکستون (۱۹۸۶) برای برآورد  $\theta_s$  ترکیب شود ضعیف‌ترین پیش‌بینی را برای  $K_s$  دارد (Lee, 2005).

در ایران نیز پژوهش‌هایی در مورد توابع انتقالی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک انجام شده است

1- Pedotransfer Functions

دست نخورده، از سیلندرهای استیل با حجم ۱۰۰ سانتی-متر مکعب (قطر ۵/۳ سانتی متر و ارتفاع ۴/۵ سانتی متر) استفاده شد. هم‌چنین نمونه‌های خاک دست‌خورده به روش مرکب از لایه مذکور برداشت شده و به آزمایشگاه منتقل گردید.

#### اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

نمونه‌های خاک به مدت دو شبانه‌روز از زیرسیلندر اشباع شده و هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) خاک به روش بار ثابت (۴ سانتی متر بار آبی) اندازه‌گیری شد. شدت جریان ماندگار عبوری از نمونه خاک اندازه‌گیری شد و  $K_s$  توسط قانون داریسی محاسبه گردید:

$$K_s = \frac{QL}{At\Delta\Psi_h} \quad (1)$$

که در این فرمول:  $Q$  حجم آب جمع‌آوری شده بر حسب سانتی متر مکعب در مدت زمان  $t$  (ساعت)،  $A$  سطح مقطع نمونه خاک بر حسب سانتی متر مربع،  $\Delta\Psi_h$  اختلاف پتانسیل هیدرولیکی بر حسب سانتی متر بار آبی (۴/۵+۴) سانتی متر) بین دو سر نمونه خاک،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع بر حسب سانتی متر در ساعت و  $L$  طول نمونه خاک بر حسب سانتی متر (۴/۵) می‌باشند (Klute & Dirksen, 1986).

(Khalilmoghadam, 2009; Mosaddeghi, 2007; Rezae Arshad et al., 2012). این پژوهش در بخشی از شهرستان‌های کوه‌رنگ و فارسان واقع در استان چهارمحال و بختیاری با هدف ارزیابی کارایی توابع انتقالی موجود در منابع و استخراج توابع انتقالی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در مقیاس زمین‌نما<sup>۲</sup> انجام گرفت.

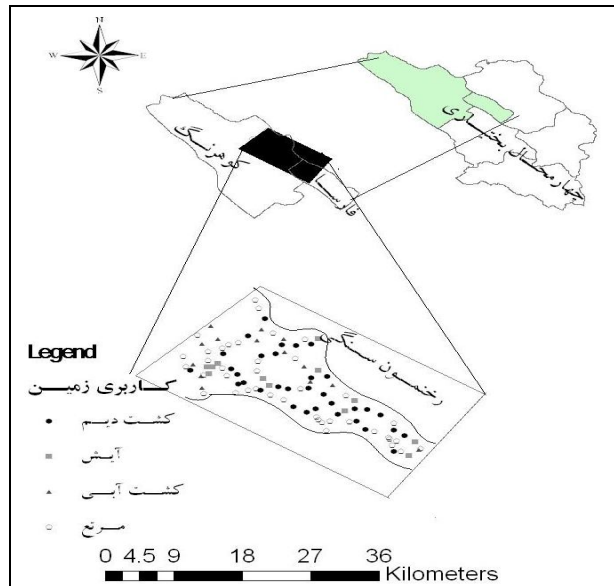
#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری خاک

منطقه مورد مطالعه بین طول‌های جغرافیایی ۲۸° ۵۰' و ۵۰° ۵۰' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۱۳° ۳۲' و ۳۵° ۳۲' شمالی واقع در استان چهارمحال بختیاری در بخشی‌هایی از شهرستان‌های کوه‌رنگ و فارسان در زاگرس مرکزی ایران قرار دارد. میانگین ارتفاع منطقه از سطح دریا ۲۳۶۰ متر است. میانگین دما ۹/۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ۱۴۴۰ میلی‌متر است. میانگین دمای کمینه ماهانه در ماه بهمن و برابر ۵/۱- درجه سانتی‌گراد و دمای بیشینه ماهانه در ماه تیر و برابر ۲۲ درجه سانتی‌گراد است. بیشینه بارندگی ماهانه در ماه اسفند و برابر ۳۱۷ میلی‌متر و کمینه بارندگی ماهانه در ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور ۱/۱ میلی‌متر است. منطقه مورد مطالعه طبق طبقه‌بندی کوپن دارای اقلیم معتدل سرد با تابستان‌های خنک و خشک است.

رس غالب خاک‌های این منطقه عمدتاً از نوع مونت‌موریلینیت بوده و اکثر خاک‌ها بر روی سازندهای آهکی دوران سوم زمین‌شناسی قرار دارند (Sharifi, 2011).

این منطقه دارای کاربری‌های مرتع، کشت دیم، کشت آبی و آیش است. پوشش عمده مراتع گون و بروموس است. کشت دیم منطقه عمدتاً به گندم پاییزه اختصاص دارد و کشت آبی آن عمدتاً یونجه است. در ۱۰۰ نقطه، که توزیع مناسب و یکنواختی در منطقه و در کاربری‌های مختلف داشتند (شکل ۱)، به طور تصادفی-نظارتی نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده خاک سطحی (۵-۰ سانتی-متر) برای اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تهیه شد. برای برداشت نمونه خاک



شکل (۱) نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه و مکان‌های نمونه‌برداری خاک.

Figure 1) Study area and sampling locations

ظاهری خشک در مکش ۲ cm نیز در این نمونه‌ها اندازه-گیری شد که بیان‌گر چگالی ظاهری نزدیک اشباع می-باشد.

اجزاء شن خاک نیز توسط سری الک‌های USDA(ASTM) شامل شن خیلی درشت (۱-۲ mm)، شن درشت (۰/۵-۱ mm)، شن متوسط (۰/۲۵-۰/۵ mm)، شن ریز (۰/۱-۰/۲۵ mm) و شن خیلی ریز (۰/۱ mm-۰/۰۵) جداسازی شدند. همچنین سه جزء سیلت خاک (۰/۰۲-۰/۰۵، ۰/۰۱-۰/۰۲ و ۰/۰۰۲-۰/۰۱ میلی‌متر) با استفاده از قانون استوکس و روش پیپت اندازه‌گیری شد. میانگین هندسی قطر ذرات ( $d_g$ ) و انحراف معیار هندسی اندازه ذرات ( $\sigma_g$ ) هم برای گروه ذرات اصلی خاک و هم برای ذرات خاک با توجه به تقسیم‌بندی فرعی آنها با استفاده از روابط شیرازی و بورسما (۱۹۸۴) محاسبه شد (Shirazi & Boersma, 1984):

$$d_g = \exp(a) \quad , \quad a = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i \quad (2)$$

$$\sigma_g = \exp(b) \quad b = \left( 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 M_i - a^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

خاک را کمی نموده و گاهی در استخراج توابع انتقالی خاک به عنوان تخمین‌گر بهتر از درصد ذرات اولیه ظاهر می‌شوند (Mosaddeghi, 2007).

#### اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نمونه‌های خاک دست‌خورده پس از انتقال به آزمایشگاه، کوبیده شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش پیپت (Gee & Bauder, 1986)، درصد ماده آلی خاک به روش اکسایش تر یا والکی-بلاک (Nelson & Sommers, 1986) و آهک خاک به روش تیتراسیون اسید باقی‌مانده با سود نیم نرمال (Nelson, 1982) اندازه‌گیری شد. همچنین چگالی ظاهری خاک دست‌نخورده توسط سیلندرهای نمونه‌برداری اندازه-گیری شد. چون هدف دیگر این پژوهش برآورد ویژگی-های هیدرولیکی خاک توسط دستگاه نفوذسنج مکشی به روش حل عددی بود، برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی نظیر آخرین مکش اعمال‌شده (۲ cm) توسط دستگاه نفوذسنج مکشی یک نمونه دست‌نخورده نیز در این حالت از زیر دیسک نفوذسنج برداشت شد؛ بنابراین چگالی

که در این روابط  $f_i$  درصد فراوانی جز نام و  $M_i$  میانگین حسابی اندازه ذرات جز نام است. این دو کمیت ( $\sigma_g$  و  $d_g$ ) به خوبی توزیع غیرنرمال (لگ-نرمال) اندازه ذرات اولیه

مؤثر ( $BD_{eff}$ ) که مستقل از درصد رس است و همچنین شاخصی از تراکم خاک است استفاده شد (Abu-Hashim, 2011):

$$BD_{eff} = BD + 0.009Clay \quad (۶)$$

استفاده از توابع انتقالی موجود در منابع برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های منطقه مورد بررسی

مقادیر  $K_s$  اندازه‌گیری شده با برآورد توابع انتقالی خاک ارائه شده توسط وریکین و همکاران (۱۹۹۰)، کاسبی و همکاران (۱۹۸۴)، براکینز و همکاران (۱۹۸۴)، وستن و همکاران (۱۹۹۷)، وستن و همکاران (۱۹۹۸)، ساکستون و همکاران (۱۹۸۶) و راولز و همکاران (۱۹۹۸)، مدل‌های سلسله مراتبی شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار Rosetta (SSC)، (SSC+BD)، مصدقی ۱ و ۲ (۲۰۰۷) و رضایی ارشد و همکاران (۲۰۱۲) مقایسه شد.

الف) کاسبی و همکاران (1984, *Cosby et al.*):

$$K_s = 25.4 \cdot 10^{(-0.6+0.0126(Sand)-0.0064(Clay))} \quad (۷)$$

ب) براکینز و همکاران (1984, *Brakensiek et al.*):

$$K_s = 10 \exp(x) \quad (۸)$$

در این معادله:

از دو کمیت چگالی ظاهری نسبی<sup>۳</sup> ( $RBD$ ) و چگالی ظاهری مؤثر<sup>۴</sup> ( $BD_{eff}$ ) به عنوان ورودی برای بیان درجه تراکم خاک در استخراج توابع انتقالی نیز استفاده شد. برای بیان درجه تراکم<sup>۵</sup> خاک‌ها مستقل از نوع یا بافت خاک (درصد رس)،  $RBD$  محاسبه شد که حاصل تقسیم چگالی ظاهری طبیعی بر یک چگالی ظاهری مرجع<sup>۶</sup> می‌باشد. در این پژوهش از رابطه جونز (۱۹۸۳) برای محاسبه چگالی ظاهری مرجع استفاده شد (Jones, 1983) که چگالی ظاهری بحرانی برای رشد ریشه<sup>۷</sup> ( $BD_c$ ) را به عنوان تابعی از درصد رس خاک محاسبه می‌کند (Dexter, 2004):

$$BD_c = 1.985 - 0.00857Clay \quad (۴)$$

$$RBD = \frac{BD}{BD_{ref}} \quad (۵)$$

که در این معادله  $BD$  چگالی ظاهری طبیعی خاک و  $BD_{ref}$  چگالی ظاهری مرجع است که در اینجا برابر  $BD_c$  در نظر گرفته شده و  $RBD$  تراکم نسبی یا چگالی ظاهری نسبی خاک است.

مصدقی و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که مقادیر چگالی ظاهری مرجع محاسبه‌ای با معادله ۴ هم‌بستگی قوی با چگالی ظاهری طبیعی خاک دارد (Mosaddeghi *et al.*, 2009). هم‌چنین عسگرزاده (۲۰۱۲) رابطه خطی بسیار قوی بین مقادیر چگالی ظاهری مرجع به روش تراکم استاندارد پروکتور و محاسبه‌ای به روش جونز برای ۲۰ خاک در استان همدان استخراج کرد (Asgarzadeh, 2012). عسگرزاده و همکاران (۲۰۱۰، ۲۰۱۱) گزارش کردند برخی ویژگی‌های کیفیت خاک مانند نگه‌داشت آب و تهویه خاک، مقاومت مکانیکی خاک در برابر رشد ریشه و میزان آب قابل استفاده گیاه با  $RBD$  ارتباط قوی‌تری نسبت به  $BD$  دارند (Asgarzadeh *et al.*, 2010, 2011). چون منطقه مورد مطالعه دارای رس‌های با خاصیت تورم و چروکیدگی است از رابطه ابوهاشیم و همکاران (۲۰۱۱) برای محاسبه چگالی ظاهری

3- Relative bulk density  
4- Effective bulk density  
5- Degree of compactness  
6- Reference bulk density  
7- Critical bulk density

$$\begin{aligned}
 x = & 19.52348(\theta_s) - 8.96847 - 0.028212(\text{Clay}) + 1.8107 \cdot 10^{-4}(\text{Sand})^2 \\
 & - 9.4125 \cdot 10^{-3}(\text{Clay})^2 - 8.395215(\theta_s)^2 + 0.077718(\text{Sand})(\theta_s) \\
 & - 0.00298(\text{Sand})^2(\theta_s)^2 - 0.019492(\text{Clay})^2(\theta_s)^2 + 1.73 \cdot 10^{-5}(\text{Sand})^2(\text{Clay}) \\
 & + 0.02733(\text{Clay})^2(\theta_s) + 0.001434(\text{Sand})^2(\theta_s) - 3.5 \cdot 10^{-6}(\text{Clay})^2(\text{Sand})
 \end{aligned}
 \tag{۹}$$

ج) وستن (Wösten, 1997):

$$K_s = 0.416 \exp(x) \tag{۱۰}$$

در این معادله

$$\begin{aligned}
 x = & -43.1 + 64.8BD - 22.21BD^2 + 7.02OM - 0.1562OM^2 + 0.985 \ln(OM) \\
 & - 0.01332Clay * OM - 4.71BD * OM
 \end{aligned}
 \tag{۱۱}$$

د) وستن و همکاران (Wösten et al., 1998):

$$K_s = 0.416 \exp(x) \tag{۱۲}$$

در این معادله

$$\begin{aligned}
 x = & 7.755 + 0.0352 * Silt + 0.93 * topsoil - 0.967 * BD^2 - 0.000484 * Clay^2 - \\
 & 0.000322 * Silt^2 + 0.001 * Silt^{-1} - 0.0748 * OM^{-1} - 0.643 * \ln(Silt) - \\
 & 0.01398 * BD * Clay - 0.01673 * BD * OM + 0.02986 * topsoil * Clay - \\
 & 0.03305 * topsoil * Silt
 \end{aligned}$$

ه) ساکستون و همکاران (Saxton et al., 1986):

$$K_s = 10 \exp(x) \tag{۱۳}$$

در این معادله

$$\begin{aligned}
 x = & 12.012 - 7.55 \cdot 10^{-2}(\text{Sand}) + \{-3.895 + 3.671 \cdot 10^{-2}(\text{Sand}) \\
 & - 0.1103(\text{Clay}) + 8.7546 \cdot 10^{-4}(\text{Clay})^2\} / \theta_s
 \end{aligned}
 \tag{۱۴}$$

نرم افزار Rosetta بر اساس داده‌های هیدرولیکی خاک جمع‌آوری شده برای خاک‌های جهان توسعه یافته است. مدل‌های سلسله مراتبی شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار Rosetta (SSC, SSC+BD) به ترتیب با ورودی درصد ذرات اولیه (شن، سیلت و رس)، درصد ذرات اولیه + چگالی ظاهری خاک اجرا شدند (Schaap et al., 1998).

**توابع انتقالی خاک ارائه شده برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در ایران**

الف) مصدقی (Mosaddeghi, 2007)

مصدقی (۲۰۰۷) برای ۱۲۶ نمونه خاک رویین و زیرین در ۶۳ سری مهم خاک‌های همدان توابع انتقالی زیر را برای تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارائه کرد:

در تمامی توابع انتقالی فوق هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) بر حسب میلی‌متر بر ساعت است. در این توابع Sand درصد شن (۲-۰/۰۵ mm)، Silt درصد سیلت (mm) مقدار رطوبت اشباع، BD چگالی ظاهری بر حسب  $Mg m^{-3}$ ، OM درصد ماده آلی و topsoil یک متغیر کیفی است و در صورتی که خاک رویین باشد مقدار آن برابر ۱ و در صورتی که خاک در افق زیرین باشد مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

ی) مدل‌های سلسله مراتبی شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار Rosetta (SSC, SSC+BD) (Schaap et al., 1998):

$$\ln K_s = 10(6.58 - 5.60BD + 0.05Sand + 0.05Gravel + 0.57OM) \quad (15)$$

$$\ln K_s = 10(5.90 - 5.66BD + 9.49d_g - 0.13\sigma_g - 0.05Gravel)$$

Rezae Arshad *et al.*, (رضایی ارشد و همکاران) 2012

رضایی ارشد و همکاران (۲۰۱۲) برای ۱۲۰ نمونه خاک در خوزستان توابع انتقالی زیر را برای هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ارائه کردند:

که در این توابع  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع بر حسب  $d_g$  و  $\sigma_g$  به ترتیب میانگین هندسی قطر ذرات بر حسب میلی متر و انحراف معیار هندسی قطر ذرات و  $Gravel$  درصد سنگریزه خاک می باشند. بقیه متغیرها قبلاً تعریف شده اند.

$$\log K_s = 10(-2.9 + 0.02Gravel + 5.4n + .01Sand + 0.23OM) \quad (16)$$

که در این توابع  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع بر حسب  $n$  و  $mm\ h^{-1}$  و  $n$  تخلخل خاک است و بقیه متغیرها قبلاً تعریف شده اند.

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N} \quad (18)$$

که در این دو معادله،  $y_i$  و  $\hat{y}_i$  به ترتیب مقادیر لگاریتم طبیعی هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه گیری شده و برآورد شده توسط PTFs بود و  $N$  تعداد داده های اندازه گیری شده (برابر با تعداد خاک های مورد بررسی = ۱۰۰) می باشند.

شاخص های ارزیابی کارایی توابع انتقالی خاک برای تخمین  $K_s$  بر پایه روش تیات جی و هنینگ (۱۹۹۶) شامل میانگین هندسی خطای نسبی  $GMER$  و انحراف معیار هندسی خطای نسبی  $GSDER$  (نیز استفاده شد (Tietje & Hennings, 1996):

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{\hat{y}_i}{y_i}\right)\right) \quad (19)$$

(۲۰)

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\ln\left(\frac{\hat{y}_i}{y_i}\right) - \ln(GMER)\right]^2\right)^{1/2}\right]$$

اگر  $GMER$  برابر ۱ باشد یعنی مقادیر پیش بینی شده با مقادیر اندازه گیری شده یا برازش یافته برابرند.  $GMER$  کوچک تر از ۱ نشان می دهد که مقادیر پیش بینی شده عمدتاً کم تر از مقادیر اندازه گیری شده یا برازش یافته برآورد شده اند. چنانچه  $GMER$  بزرگ تر از ۱ باشد یعنی مقادیر

### آنالیزهای آماری

تجزیه های آماری شامل محاسبه میانگین، بیشینه، کمینه، آزمون نرمال بودن، چولگی و کشیدگی توسط نرم افزار SAS 9.0 انجام شد (SAS Institute, 1996). هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اندازه گیری شده که به عنوان متغیر وابسته مدل رگرسیونی معرفی شد دارای توزیع نرمال نبود. بنابراین با تبدیل لگاریتمی داده های  $K_s$  نرمال شده و سپس توابع انتقالی رگرسیونی برای متغیر تبدیل شده توسط نرم افزار SAS استخراج شد. پس از نرمال سازی داده های  $K_s$ ، ابتدا رابطه رگرسیونی بین  $K_s$  و متغیرهای مستقل اصلی شامل چگالی ظاهری، اجزا ذرات اصلی و فرعی بافت خاک، میانگین و انحراف معیار هندسی قطر ذرات اصلی و فرعی، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل، تراکم نسبی و چگالی ظاهری مؤثر استخراج شد. از آنجا که دقت این رابطه رگرسیونی رضایت بخش نبود؛ بنابراین، متغیرهای مستقل نیز با روابط  $\ln(x)$ ،  $(x)^2$ ،  $(x)^{-1}$  و  $(x)^{0.5}$  تبدیل شدند. سپس متغیرهای اندازه گیری شده و تبدیل شده به طور هم زمان (در مجموع ۱۳۵ متغیر مستقل) به عنوان ورودی به مدل رگرسیونی معرفی شدند.

برای ارزیابی دقت توابع انتقالی خاک استخراجی یا موجود در منابع، مقادیر برآورد شده در برابر مقادیر اندازه گیری شده رسم شده و با خط ۱:۱ مقایسه شدند. برای کمی کردن دقت توابع انتقالی خاک استخراجی و مقایسه مقادیر  $K_s$  اندازه گیری شده و برآورده شده با توابع انتقالی موجود در منابع، از آماره های ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ )، استفاده شد.

8- Geometric mean error ratio

9- Geometric standard deviation of error ratio

برآورد کرده و در همه موارد  $K_s$  را کم‌تر (و در بیشتر موارد آن را به طور قابل توجهی کم‌تر) از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زنند ( $GMER < 1$ ). شاید علت اصلی این کم‌برآورد توابع انتقالی موجود در منابع، به حساب نیاوردن ساختمان و جریان‌های ترجیحی ناشی از وجود شکاف‌های انقباضی در خاک‌های مورد بررسی باشد. این شکاف‌ها باعث افزایش  $K_s$  خاک علی‌رغم بافت ریز آن می‌شود. در توابع انتقالی ارائه‌شده در منابع اثر مقدار رس بر  $K_s$  کاهش است یعنی با افزایش درصد رس  $K_s$  کاهش یافت. ولی در این پژوهش به دلیل وجود رس اسمکتیت در خاک‌های منطقه (Sharifi, 2011) با افزایش میزان رس درز و ترک‌های انقباضی افزایش یافته و لذا  $K_s$  خاک افزایش می‌یابد. دلیل دیگر آن می‌تواند خطا در اندازه‌گیری  $K_s$  به دلیل وجود جریان‌هایی لبه‌ای در طول دیواره سیلندر نمونه‌برداری باشد. همچنین اندازه کوچک نمونه خاک برداشت‌شده می‌تواند سبب شده باشد که برخی از منافذ درشت مؤثر در جریان آب اشباع را در نظر نگیرد.

با توجه به جدول ۲، در بین توابع انتقالی موجود در منابع، شبکه عصبی Rosetta (SSC+BD) بهترین مدل بود که دلیل آن استفاده از روش توانمند شبکه عصبی مصنوعی در استخراج توابع انتقالی بود. پس از آن، مدل‌های شبکه عصبی ساده‌تر Rosetta (SSC) و مصدقی ۲ (۲۰۰۷) برای خاک‌های استان همدان قرار داشتند. دلیل این یافته شاید نزدیک‌تر بودن ویژگی‌های خاک‌های استان همدان به خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش نسبت به دیگر خاک‌های مورد استفاده در توابع انتقالی بوده باشد. ناکارآمدترین توابع انتقالی برای برآورد  $K_s$  در خاک‌های مورد بررسی مربوط به توابع کاسبی و همکاران (۱۹۸۴)، براکینز و همکاران (۱۹۸۴) و ساکستون و همکاران (۱۹۸۶) بود که در استخراج آنها به ویژگی‌های بافتی خاک به عنوان تخمین‌گر توجه بیشتری شده است در صورتی که در خاک‌های مورد بررسی، ساختمان خاک اهمیت زیادی دارد.

در مجموع با توجه به شاخص‌های آماری به دست آمده (جدول ۲ و شکل ۳)، دیده می‌شود هیچ‌یک از توابع انتقالی خاک موجود در منابع برای تخمین  $K_s$  خاک‌های منطقه کوه‌رنگ مناسب نیستند. بنابراین بهتر است توابع انتقالی خاک اختصاصاً برای این منطقه استخراج شود.

پیش‌بینی‌شده عمدتاً بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده یا برازش‌یافته برآورد شده‌اند. اگر GSDER برابر ۱ باشد یعنی انحراف مقادیر پیش‌بینی‌شده از مقادیر اندازه‌گیری شده یا برازش‌یافته بیش‌ترین است. بنابراین بهترین مدل مدلی است که GMER آن نزدیک به ۱ و GSDER آن کوچک (نزدیک صفر) باشد.

## نتایج و بحث

نتایج آنالیزهای برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. جزء سیلت در اکثر خاک‌ها بخش عمده ذرات معدنی خاک را تشکیل می‌دهد. به طوری که در نام‌گذاری بافت تمامی خاک‌ها صفت سیلتی وجود دارد (به جز چهار مورد که یک مورد بافت رسی و سه مورد دیگر دارای بافت لوم‌رسی می‌باشند) (شکل ۲). دامنه درصد شن ۱ تا ۳۲، درصد سیلت ۳۴ تا ۸۲، و درصد رس ۱۶ تا ۵۸ بود. عمده ذرات شن در بخش‌های شن ریز و شن خیلی ریز قرار داشت و عمده ذرات سیلت هم در بخش سیلت ریز قرار داشت؛ بنابراین توزیع ذرات شن و سیلت در اجزای آن همگن نبود. دامنه درصد ماده آلی بین ۰/۱ تا ۳/۷۸ بود که نشان‌دهنده میزان ماده آلی کم تا متوسط خاک‌های مورد بررسی است. دامنه تغییرات کربنات کلسیم معادل خاک رویین ۱ تا ۴۵ درصد می‌باشد. نمونه نیم‌رخ خاک‌ها در منطقه نشان می‌دهد که تقریباً در تمامی منطقه در زیر افق A یک لایه آهکی وجود دارد که با توجه به غالب بودن سازندهای زمین‌شناسی آهکی در منطقه مورد مطالعه هم‌خوانی دارد (Mehnatkesh et al., 2013). در خاک‌های مورد بررسی میانگین چگالی ظاهری خشک اندازه‌گیری‌شده روی نمونه مرطوب (نمونه برداشت‌شده از زیر صفحه نفوذسنج پس از اعمال مکش ۲ سانتی‌متر) نسبت به چگالی ظاهری خشک اندازه‌گیری‌شده روی نمونه خشک (نمونه برداشت‌شده در شرایط رطوبتی اولیه هوا خشک خاک) کاهش یافته است که علت آن به خاطر تورم‌پذیری خاک‌ها پس از جذب آب می‌باشد. با وجود تغییر نه چندان زیاد بافت خاک در خاک‌های مورد بررسی، دامنه تغییرات  $K_s$  در خاک‌های مورد بررسی زیاد می‌باشد (جدول ۱) که نشان‌دهنده تغییرات شدید ساختمانی در خاک‌های مورد مطالعه است. توابع انتقالی خاک موجود در منابع  $K_s$  را در منطقه مورد بررسی ضعیف

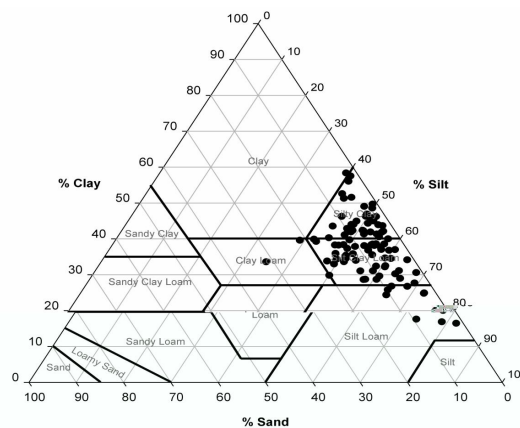


تخمین می‌زنند (Cronican & Gribb, 2004). خلیل‌مقدم (۲۰۰۹) با اندازه‌گیری  $K_s$  توسط روش تک استوانه در منطقه زاگرس و مقایسه مقادیر به دست آمده با توابع انتقالی جابرو (۱۹۹۲)، براکینز (۱۹۸۴)، کمپل و شیوزاوا (۱۹۹۴)، کاسبی و همکاران (۱۹۸۴)، پکت و همکاران (۱۹۸۵)، دانه و پکت (۱۹۹۴)، ساکستون و همکاران (۱۹۸۶) و مدل‌های Rosetta (SSC+BD و SSC) گزارش کرد تمامی توابع انتقالی موجود  $K_s$  را کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند. وی هم‌چنین گزارش کرد بهترین توابع انتقالی برای برآورد  $K_s$  در منطقه مورد مطالعه مدل‌های شبکه عصبی Rosetta می‌باشند.

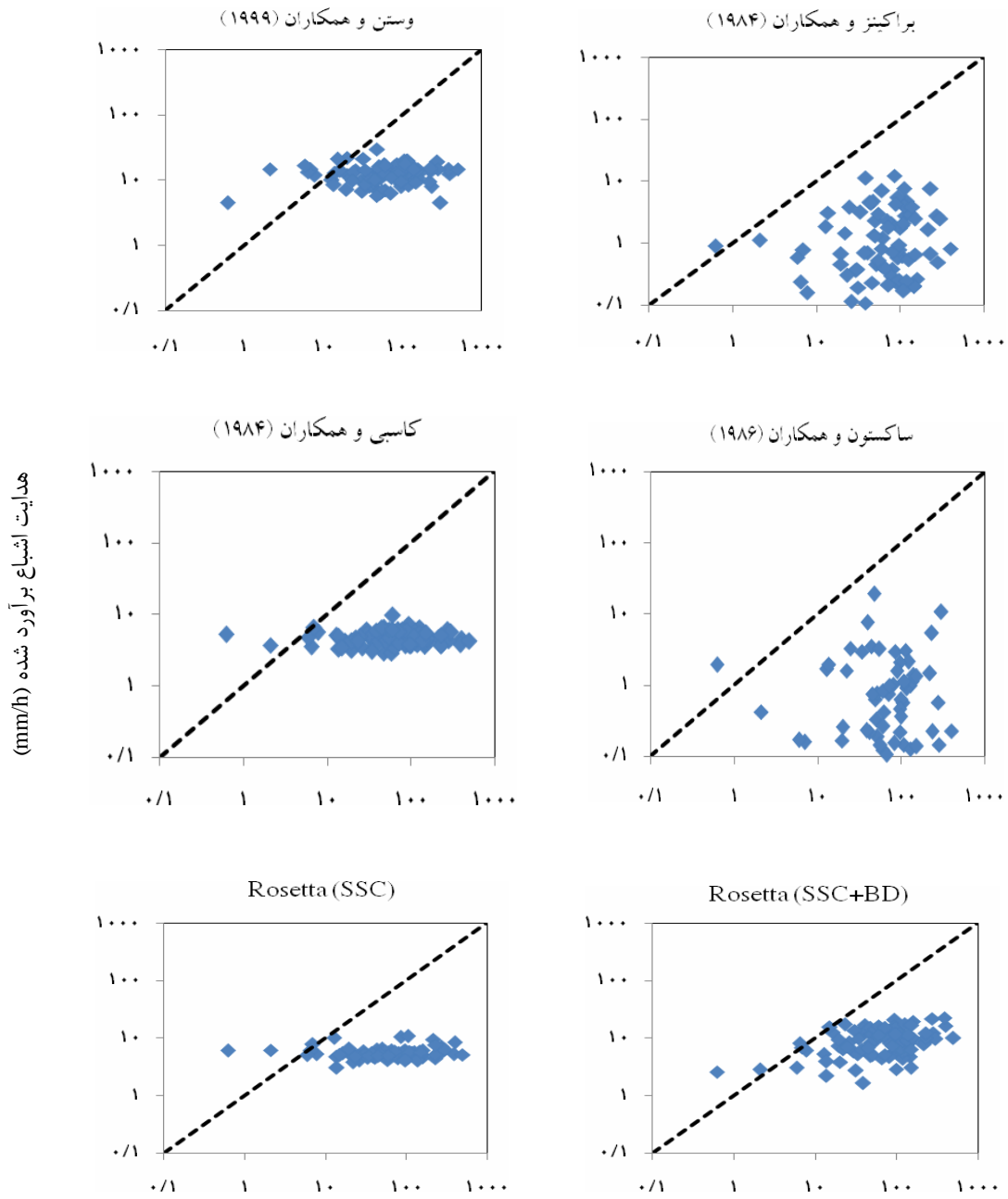
ونگر و همکاران (۲۰۰۱) در پژوهشی روی ۶۳ خاک آلمان گزارش کردند توابع انتقالی براکینز و همکاران (۱۹۸۴)، کمپل (۱۹۸۵)، ساکستون و همکاران (۱۹۸۶) و وستن (۱۹۹۹) معمولاً  $K_s$  را کم‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده برآورد می‌کنند در حالی که توابع انتقالی راولز و همکاران (۱۹۹۸)، ویریکین و همکاران (۱۹۹۷)، کاسبی و همکاران (۱۹۸۴) و وستن (۱۹۹۷) معمولاً مقدار  $K_s$  را نسبتاً زیاد برآورد می‌کنند (Wanger et al., 2001). کرونیکان و گریب (۲۰۰۴) گزارش کردند که توابع انتقالی استخراجی آنها برای خاک‌های با بیش از ۷۰٪ شن بهتر از مدل Rosetta (SSC) و توابع راولز و براکینز (۱۹۸۹) را

جدول ۱) خلاصه آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی  
Table 1) Statistics summary of physical and chemical properties in evaluated soils.

ویژگی خاک	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	کشیدگی	چولگی
چگالی ظاهری	Mg m <sup>-3</sup>	1.09	1.52	1.24	0.09	8.08	1.57	0.40
چگالی ظاهری خشک در مکش ۲ cm	Mg m <sup>-3</sup>	0.97	1.49	1.18	0.09	8.08	0.58	0.41
ماده آلی	%	0.10	3.87	1.47	0.68	46.55	1.62	1.19
کربنات کلسیم	%	1.00	45.20	14.67	11.70	79.75	-0.56	0.68
شن (۰/۰۵-۲ mm)	%	1.02	31.53	8.03	5.40	67.62	2.57	1.27
سیلت (۰/۰۰۲-۰/۰۵ mm)	%	34.88	82.05	54.21	8.85	16.32	0.90	0.77
رس (<۰/۰۰۲ mm)	%	16.46	58.36	37.75	8.25	21.87	0.42	0.15
میانگین هندسی قطر ذرات ( $d_g$ )	mm	0.01	0.03	0.01	0.004	36.92	2.01	0.99
انحراف معیار هندسی قطر ذرات ( $\sigma_g$ )		3.70	16.37	7.68	2.09	27.28	2.36	1.16
هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ )	mm h <sup>-1</sup>	0.62	500.8	92.41	85.25	92.25	6.49	2.17

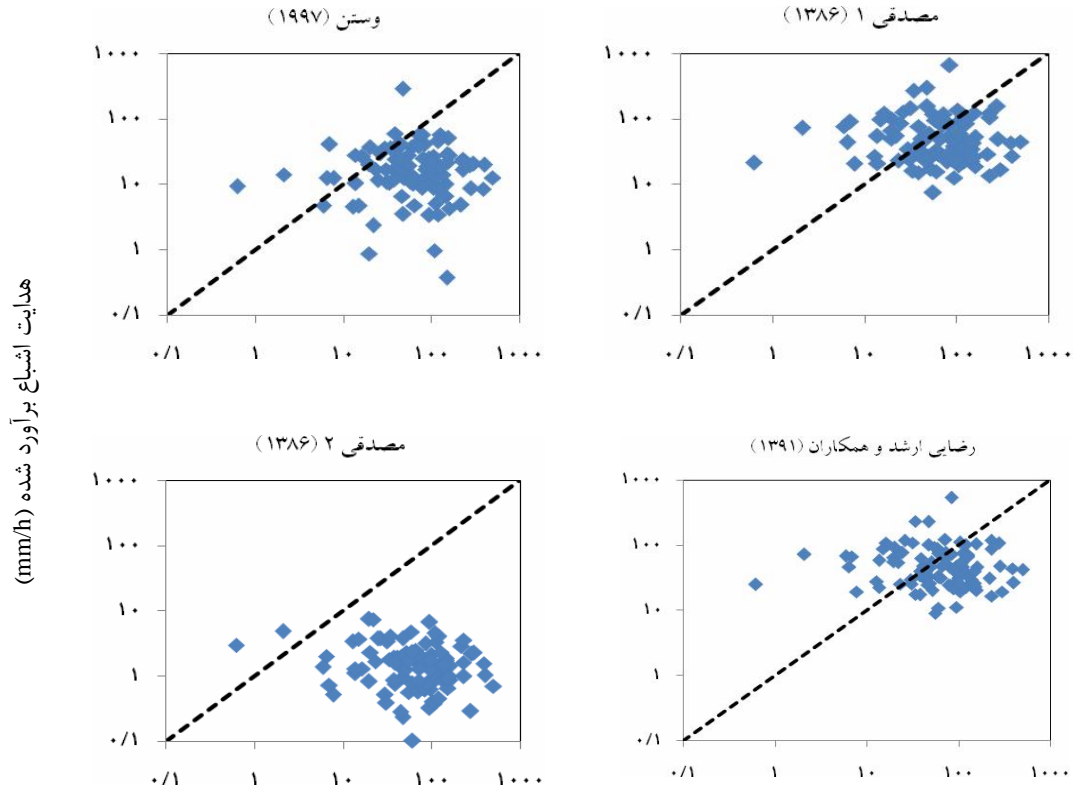


شکل ۲) توزیع بافت خاک‌های مورد بررسی روی مثلث بافت خاک USDA  
Figure 2) Textural distribution of soil samples of this experiment on USDA triangle



هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده (mm/h)

شکل ۳) مقایسه مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برآورد شده توسط توابع انتقالی موجود در منابع و اندازه‌گیری شده با خط ۱:۱  
 Figure 3) Measured vs. estimated saturated hydraulic conductivity for the PTFs in literature. The dashed lines indicate the 1:1 diagonals.



هدایت هیدرولیکی اشباع اندازه‌گیری شده (mm/h)

ادامه شکل ۳

جدول ۲) مقایسه توابع انتقالی خاک ارائه‌شده در منابع و استخراجی برای برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده به کمک آماره‌های مختلف

Table 2) Comparison between measured saturated hydraulic conductivity with PTFs in literature and derived PTFs using different statistics

$R^2$	RMSE	GMER	GSDER	تابع انتقالی
	$K_s$ ( $\text{mm h}^{-1}$ )			
0.005	7.79	0.38	1.03	کاسبی و همکاران (۱۹۸۴)
0.000	9.05	0.28	1.10	براکینز و همکاران (۱۹۸۴)
0.000	7.89	0.35	1.15	ساکستون و همکاران (۱۹۸۶)
0.000	3.68	0.62	1.07	وستن (۱۹۹۷)
0.001	17.04	0.02	1.11	وستن و همکاران (۱۹۹۹)
0.009	6.98	0.42	1.03	مدل شبکه عصبی Rosetta (SSC)
0.127	4.83	0.52	1.03	مدل شبکه عصبی Rosetta (SSC+BD)
0.009	1.75	0.94	1.03	مصدقی ۱ (۲۰۰۷)
0.045	13.39	0.11	1.13	مصدقی ۲ (۲۰۰۷)
0.013	1.66	0.93	1.03	رضایی ارشد و همکاران (۲۰۱۲)
0.34	1.05	1.01	1.07	تابع انتقالی استخراج شده (۱)
0.52	0.50	1.01	1.02	تابع انتقالی استخراج شده (۲)

### استخراج توابع انتقالی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای منطقه مورد مطالعه

در معادله زیر تابع انتقالی برای برآورد  $K_s$  با استفاده از متغیرهای اصلی ویژگی‌های زودیافت ارائه شده است:

$$\ln K_s = 7/786 - 5/524 RBD + 0/486 OM \quad (21)$$

$$R^2 = 0/25^{**}$$

در این معادله،  $K_s$  بر حسب  $\text{mm h}^{-1}$ ، RBD تراکم نسبی خاک و OM درصد ماده آلی خاک می‌باشند. در این رابطه اثر تراکم نسبی بر  $K_s$  کاهشی و اثر ماده آلی بر آن افزایشی است. در معادله زیر تابع انتقالی برای برآورد  $K_s$  با استفاده از مجموع متغیرهای اصلی و تبدیل شده به عنوان ورودی ارائه شده است:

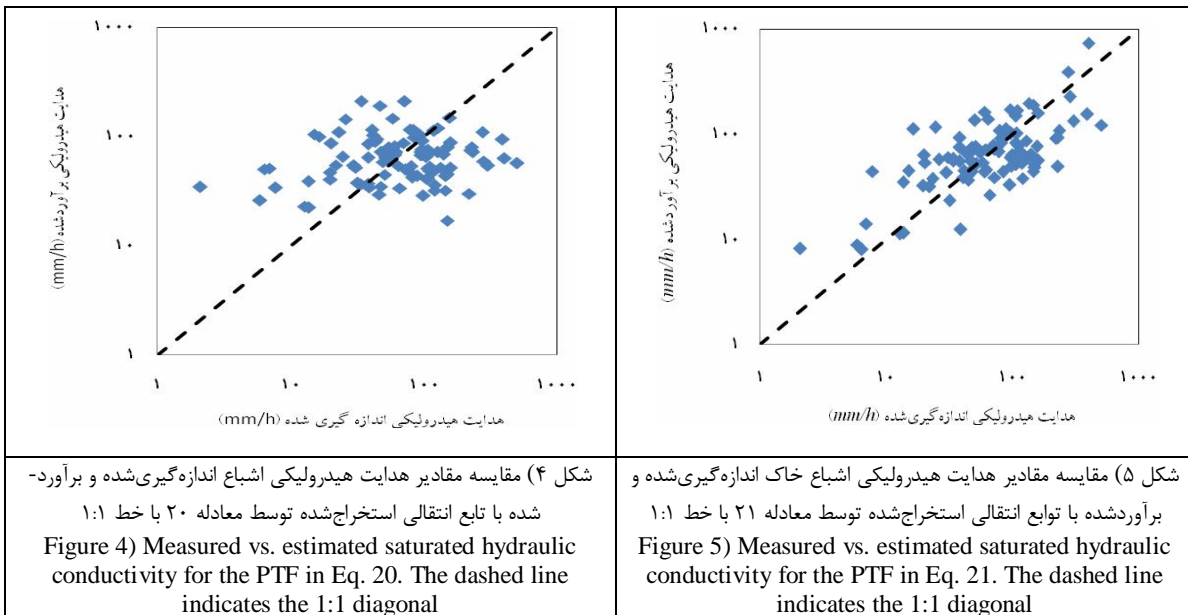
$$\ln K_s = -75/075 - 24/760 RBD + 1/612 OM - 0/043 (CaCO_3 / Clay)^{-1} + \quad (22)$$

$$69/278 BD_{eff}^{1/5} - 5/015 \ln BD * Clay + 0/026 VFS + 0/025 (OM / CaCO_3)^{-1} - \quad R^2 = 0/52^{**}$$

$$2/281 \ln(OM / Clay) + 57/954 porosity_{2cm} - 47/456 porosity_{2cm}^2$$

که در این معادله،  $K_s$  بر حسب  $\text{mm h}^{-1}$ ، BD چگالی ظاهری خاک بر حسب  $\text{Mg m}^{-3}$ ،  $BD_{eff}$  چگالی ظاهری مؤثر بر حسب  $\text{Mg m}^{-3}$ ، RBD تراکم نسبی خاک، OM درصد ماده آلی خاک، VFS درصد ذرات شن خیلی ریز (ذرات کوچکتر از  $0/05-0/1 \text{ mm}$ )،  $CaCO_3$  درصد کربنات کلسیم معادل و  $porosity_{2cm}$  تخلخل خاک در مکش ۲ سانتی‌متر می‌باشند. اثر تراکم نسبی، ماده آلی و توان دوم تخلخل در مکش ۲ سانتی‌متر بر  $K_s$  در سطح آماری ۱٪ معنی‌دار شد. ماده آلی به دلیل اثر بر ساختمان و منافذ درشت سبب افزایش  $K_s$  شده است. اثر نسبت کربنات کلسیم

معادل به رس، چگالی ظاهری مؤثر، حاصل ضرب چگالی ظاهری خشک در درصد رس بر  $K_s$  در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار شد. اثر شن خیلی ریز، نسبت ماده آلی به کربنات کلسیم معادل و نسبت ماده آلی به رس بر این ویژگی در سطح آماری ۱۰٪ معنی‌دار شد. در شکل ۵ و جدول ۲ پراکندگی و پارامترهای آماری مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر برآورد شده توسط معادله ۲۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود تابع انتقالی استخراج شده بهتر از توابع انتقالی موجود در منابع  $K_s$  را تخمین می‌زند ( $R^2$  بزرگ‌تر و RMSE کوچک‌تر).



جدول ۳) همبستگی بین ویژگی‌های مهم مؤثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع در خاک‌های مورد بررسی  
 Table 3) Correlation matrix between important affective properties on saturated hydraulic conductivity at evaluated soils

	LN Ks	RBD2	OM	(CaCO <sub>3</sub> /Clay) <sup>-1</sup>	BD <sup>0.5</sup> eff	Ln (BD×Clay)	VFS <sup>2</sup>	(OM/CaCO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	Ln (OM/Clay)	porosity <sub>2cm</sub>	porosity <sub>22cm</sub>
Ln Ks	1										
RBD2	-0.41 <sup>***</sup>	1									
OM	0.37 <sup>***</sup>	-0.16 <sup>*</sup>	1								
(CaCO <sub>3</sub> /Clay) <sup>-1</sup>	-0.26 <sup>**</sup>	0.19 <sup>*</sup>	0.05 <sup>ns</sup>	1							
BD <sup>0.5</sup> eff	-0.35 <sup>***</sup>	0.97 <sup>***</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	0.20 <sup>**</sup>	1						
Ln(BD×Clay)	-0.22 <sup>**</sup>	0.68 <sup>***</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	0.32 <sup>***</sup>	0.80 <sup>***</sup>	1					
VFS <sup>2</sup>	0.08 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	0.05 <sup>ns</sup>	-0.17 <sup>*</sup>	-0.01 <sup>ns</sup>	-0.10 <sup>ns</sup>	1				
(OM/CaCO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup>	-0.19 <sup>*</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	-0.32 <sup>ns</sup>	-0.29 <sup>***</sup>	0.07 <sup>ns</sup>	-0.05 <sup>ns</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	1			
Ln(OM/Clay)	0.41 <sup>***</sup>	-0.34 <sup>***</sup>	0.80 <sup>***</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>	-0.38 <sup>***</sup>	-0.43 <sup>***</sup>	0.13 <sup>ns</sup>	-0.55 <sup>***</sup>	1		
porosity <sub>2cm</sub>	0.25 <sup>**</sup>	-0.31 <sup>***</sup>	0.23 <sup>***</sup>	0.15 <sup>ns</sup>	-0.28 <sup>***</sup>	-0.56 <sup>ns</sup>	-0.30 <sup>***</sup>	-0.11 <sup>ns</sup>	0.11 <sup>ns</sup>	1	
porosity <sub>2cm</sub> <sup>2</sup>	0.23 <sup>**</sup>	-0.29 <sup>***</sup>	0.25 <sup>***</sup>	0.16 <sup>*</sup>	-0.26 <sup>***</sup>	-0.04 <sup>ns</sup>	-0.29 <sup>***</sup>	-0.13 <sup>ns</sup>	0.12 <sup>ns</sup>	0.99 <sup>***</sup>	1

$K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع (میلی متر بر ساعت)، RBD تراکم نسبی، OM درصد ماده آلی، CaCO<sub>3</sub>/Clay نسبت درصد کربنات کلسیم به درصد رس، BD<sub>eff</sub> چگالی ظاهری مؤثر (Mg m<sup>-3</sup>)، BD×Clay حاصل ضرب چگالی ظاهری (Mg m<sup>-3</sup>) در درصد رس، VFS درصد شن ریز، OM/CaCO<sub>3</sub> نسبت ماده آلی به کربنات کلسیم، OM/Clay نسبت ماده آلی به رس و porosity<sub>2cm</sub> تخلخل خاک محاسبه شده بر اساس چگالی ظاهری خشک اندازه-گیری شده در مکش ۲ سانتی متر

\*\*\* همبستگی معنی دار در سطح آماری ۱٪، \*\* همبستگی معنی دار در سطح آماری ۵٪، \* همبستگی معنی دار در سطح آماری ۱۰٪، ns همبستگی معنی دار وجود ندارد.

معنی‌داری دارد و با میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها هم‌بستگی مثبت دارد. این پژوهش‌گران گزارش کردند چون اکثر خاک‌های مورد مطالعه آنها در کلاس بافتی لوم رسی سیلتی قرار داشتند با کاهش چگالی ظاهری، تخلخل خاک و طول درشت موئینه (پارامتر مشخص‌کننده سهم نسبی نیروهای موئینه نسبت به نیروی ثقل در جریان آب) افزایش یافته و در نتیجه  $K_s$  افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها، پایداری و اندازه خاک‌دانه‌ها افزایش می‌یابد، در نتیجه تخلخل و طول درشت موئینه خاک افزایش یافته و مسیره‌های آب در خاک پایدار می‌شود و در نتیجه عبور آب از خاک افزایش می‌یابد. مصدقی (۲۰۰۷) گزارش کرد که با افزایش درصد شن و سنگریزه و یا افزایش  $d_g$  و کاهش  $\sigma_g$  و درجه تراکم خاک،  $K_s$  افزایش می‌یابد.

دکستر و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که با توجه به اثرات ساختمان خاک و کانال‌های ریشه گیاهان بر  $K_s$ ، چگالی ظاهری نمی‌تواند به تنهایی اثر ساختمان خاک را برای پیش‌بینی  $K_s$  منعکس نماید. چگالی ظاهری خاک به تنهایی هم‌بستگی ضعیفی با ساختمان خاک دارد، علت این است که چگالی ظاهری صرفاً جرم به ازاء واحد حجم خاک را بیان می‌کند و نمی‌تواند نشان‌دهنده ترتیب قرارگرفتن ذرات، آرایش و پیوستگی منافذ در یک حجم مشخص خاک باشد (Dexter, et al., 2004). ساکستون و راولز (۲۰۰۶) بیان کردند افزایش چگالی ظاهری باعث کاهش نگهداشت آب و هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود. هم‌چنین آن‌ها گزارش کردند سنگ‌ریزه باعث کاهش آب قابل استفاده و هدایت هیدرولیکی و افزایش چگالی ظاهری خاک می‌شود (Saxton & Rawls, 2006).

نیمز و همکاران (۲۰۰۵) یک رابطه منفی بین  $K_s$  و مقدار ماده آلی خاک پیدا کردند و دلیل آن را احتمالاً به خاطر نگاه‌داشت (و نه هدایت) آب توسط ماده آلی بیان کردند. اثر ماده آلی بر  $K_s$  خاک پیچیده است؛ مواد آلی نه تنها با افزایش منافذ درشت، هدایت هیدرولیکی بالقوه خاک را افزایش می‌دهند، بلکه با نگاه‌داشت آب یا تقویت آب‌گریزی مانع از جریان آزادانه آب در خاک نیز می‌شوند. بنابراین برآیند این اثرهای متفاوت، تعیین‌کننده اثر خالص ماده آلی بر هدایت هیدرولیکی خاک است (Nemes, et al., 2005). در مطالعه هو و همکاران (۲۰۰۸) ماده آلی و

ماتریس هم‌بستگی بین ویژگی‌های خاک در جدول ۳ آورده شده است. البته به دلیل زیادبودن متغیرهای ورودی در اینجا تنها جدول مربوط به ویژگی‌های زودبافتی که وارد توابع انتقالی استخراج‌شده‌اند، ارائه شده است. همان‌طور که در معادله ۲۲ و جدول ۳ مشاهده می‌شود کمیت‌هایی مانند تراکم نسبی، چگالی ظاهری موثر و حاصل‌ضرب چگالی ظاهری در درصد رس که اثر ساختمان خاک و چگالی ظاهری را مستقل از درصد رس یا در ترکیب با رس بیان می‌کنند، از ویژگی‌های توده خاک در برآورد  $K_s$  مهم‌تر هستند. دیده می‌شود لگاریتم  $K_s$  با تراکم نسبی (چگالی ظاهری نسبی) (RBD)، چگالی ظاهری مؤثر ( $BD_{eff}$ )، نسبت درصد رس به کربنات کلسیم ( $Clay/CaCO_3$ )، نسبت درصد کربنات کلسیم به ماده آلی ( $CaCO_3/OM$ ) و لگاریتم برهم‌کنش چگالی ظاهری و درصد رس ( $\ln(BD \times Clay)$ ) هم‌بستگی منفی دارد (جدول ۳). سه کمیت RBD،  $BD_{eff}$  و  $\ln(BD \times Clay)$  چگالی ظاهری را مستقل از بافت خاک یا در ترکیب به رس خاک بیان می‌کنند. احتمالاً با افزایش هر یک از این کمیت‌ها خاک متراکم‌تر شده، فراوانی نسبی منافذ خاک کاهش می‌یابد و به تبع آن کاهش فراوانی منافذ درشت بیشتر است. در نتیجه با افزایش آن‌ها (مستقل از بافت خاک)  $K_s$  کاهش می‌یابد. هم‌بستگی منفی  $K_s$  با نسبت  $CaCO_3/OM$  (جدول ۳) این‌گونه قابل توجیه است که با افزایش مقدار کربنات کلسیم (مستقل از مقدار ماده آلی خاک)، ساختمان خاک ضعیف‌تر شده که سبب کاهش  $K_s$  می‌شود. ضریب  $K_s$  با ماده آلی و تخلخل خاک هم‌بستگی مثبت دارد (جدول ۳). در واقع با افزایش ماده آلی ساختمان خاک بهبود یافته و منافذ درشت ساختمانی در خاک افزایش می‌یابد، و در نتیجه  $K_s$  افزایش می‌یابد. ضریب  $K_s$  با لگاریتم نسبت  $OM/Clay$  و درصد شن خیلی ریز خاک نیز هم‌بستگی مثبت دارد. در واقع افزایش نسبت  $OM/Clay$ ، که مقدار ماده آلی را مستقل از مقدار رس (بافت خاک) بیان می‌کند، بیان‌گر بهبود خاک‌دانه‌سازی و افزایش هدایت هیدرولیکی خاک است.

رضایی ارشد و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که مدل شامل درصد سنگ‌ریزه، تخلخل کل، درصد شن و درصد ماده آلی دارای بیش‌ترین ضریب تبیین و کم‌ترین خطا برای برآورد  $K_s$  می‌باشد. قربانی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که  $K_s$  با چگالی ظاهری هم‌بستگی منفی و

نمی‌باشند و شاید دلیل اصلی آن به این خاطر است توابع انتقالی وابسته به مکان هستند. همچنین در توابع موجود در منابع کم‌تر به نقش ساختمان خاک و منافذ خاک توجه شده است در حالی که در خاک‌های منطقه مورد مطالعه ساختمان نسبتاً خوبی وجود داشت. توابع انتقالی رگرسیونی استخراج شده بهتر از توابع انتقالی ارائه شده در منابع،  $K_s$  را برآورد می‌کنند. همچنین نتایج نشان داد که در خاک‌های مورد بررسی ویژگی‌های منعکس‌کننده ساختمان خاک (تراکم نسبی و ماده آلی) نسبت به ویژگی‌های بافتی تأثیر بیشتری بر  $K_s$  دارند. بنابراین پیشنهاد می‌شود برای پیش‌بینی بهتر  $K_s$  در این منطقه، ویژگی‌های دیگر ساختمانی خاک مانند توزیع اندازه خاکدانه‌ها نیز در پژوهش‌های آینده مد نظر قرار گیرد.

رس مهمترین فاکتورهای تأثیرگذار بر هدایت هیدرولیکی خاک بودند. تجزیه همبستگی آن‌ها نشان داد که رابطه منفی معنی‌داری بین ماده آلی و مقدار رس با هدایت هیدرولیکی در همه مکش‌ها وجود دارد و هنگامی که مکش افزایش می‌یابد نقش ماده آلی و رس افزایش می‌یابد (افزایش ضریب همبستگی). بنابراین ماده آلی و رس می‌توانند در ذخیره آب و محدود کردن انتقال آب به لایه‌های زیرین نقش داشته باشند که در خاک‌های درشت‌بافت مناطق خشک و نیمه‌خشک این یک پدیده مهم است (Hu et al., 2008).

### نتیجه‌گیری و پیشنهاد

نتایج این پژوهش نشان داد که توابع انتقالی موجود در منابع قادر به برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) خاک در منطقه کوه‌رنگ، استان چهارمحال و بختیاری

### References

- Abu-Hashim MSD. 2011. Impact of land-use and land management on water infiltration capacity of soils on a catchment scale. PhD Thesis. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany.
- Asgarzadeh, H. 2012. New quantities for soil water availability to plants: Consistency between lab and field measurements. PhD Thesis, Department of Soil Science, Bu-Ali Sina University. Iran, Hamadan (in Farsi with English Summary).
- Asgarzadeh H, Mosaddeghi MR, Mahboubi AA, Nosrati A and Dexter AR. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil*, 335(1-2): 229–244.
- Asgarzadeh H, Mosaddeghi MR, Mahboubi AA, Nosrati A and Dexter AR. 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166: 34–42.
- Bouma J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* 9:177–213.
- Brakensiek DL, Rawls WJ and Stephenson GR. 1984. Modifying SCS hydrologic soil groups and curve numbers for rangeland soils. ASAE Paper No. PNR-84-203, St. Joseph, MI .
- Cosby BJ, Hornberger GM, Clapp RB and Ginn TR. 1984. A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.* 20(6): 682–690.
- Cronican AE and Gribb MM. 2004. Hydraulic conductivity prediction for sandy soil. *Ground Water*, 42(3): 459–464.
- Dexter AR. 2004. Soil physical quality. Part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120: 201–214.
- Dexter, AR., EA. Czyż, and OP. Gałę. 2004. Soil structure and saturated hydraulic conductivity of subsoil. *Soil Till. Res.* 79: 185–189.
- Hu, W., MA. Shao, QJ Wang, J. Fan, and K. Reichardt. 2008. Spatial variability of soil hydraulic properties on a steep slope in the loess plateau of China. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 65(3): 268–276.

- Gee GW and Bauder JW. 1986. Particle size analysis. PP. 383–411. In: Klute A (ed.). Method of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Handbook No 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Ghorbani Dashtaki SH, Dehghani Baniani S, Khodaverdiloo H, Mohammad J. and Khalilmoghaddam B. 2012. Estimation of saturated hydraulic conductivity and inverse of macroscopic capillary length using PTFs. *J. Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour., Water and Soil Sci.* 16(60): 145–157 (in Farsi with English Summary).
- Jones CA. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1208–1211.
- Khalilmoghaddam B. 2009. Estimating shear strength, saturated hydraulic conductivity and infiltration rate using pedotransfer function and artificial neural networks. PhD Thesis, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology (in Farsi with English Summary).
- Klute A and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. PP. 687–732. In: Klute A (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Agron. Monogr. 9. ASA/SSSA, Madison. WI.
- Lee, D.H. 2005. Comparing the inverse parameter estimation approach with pedo-transfer function method for estimating soil hydraulic conductivity. *Geosci J*, 9(3): 269–276.
- Loague, K. 1992. Using soil texture to estimate saturated hydraulic conductivity and the impact on rainfall-runoff simulation. *Water Resour. Res.* 28: 678–693.
- Mehnatkesh A, Ayoubi S, Jalalian A and Sahrawat KL. 2013. Relationships between soil depth and terrain attributes in a semi arid hilly region in western Iran. *J. Mount. Sci.* 10: 163–172.
- Merdun H, Çınar Ö, Meral R and Apan M. 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil Till. Res.* 90: 108–116.
- Mosaddeghi MR. 2007. Fitting well-known models of soil water characteristic curve and hydraulic conductivity and deriving pedo-transfer functions for soils in Hamadan Province. Research Report, Department of Soil Science, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University ((in Farsi with English Summary).
- Mosaddeghi MR, Morshedizad M, Mahboubi AA, Dexter AR and Schulin R. 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil Till. Res.* 105: 242–250.
- Nemes, A., W.J. Rawls, and Ya.A. Pachepsky. 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1330–1337.
- Nelson RE. 1982. Carbonate and gypsum. PP. 181–197. In: Buxton DR (ed.). Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods, Agronomy Handbook No 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Nelson DW and Sommers LP. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. PP. 539–579. In: Buxton DR (ed.). Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods, Agronomy Handbook No 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Pachepsky YA Rawls WJ (eds.) 2004. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Parasuraman K, Elshorbagy A and Si BC. 2006. Estimating saturated hydraulic conductivity in spatially variable fields using neural network ensembles. *SSS. Am. J.* 70: 1851–1859.
- Rawls W., Gish TJ and Brakensiek DL. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.* 16: 213–234.
- Rezae Arshad R, Sayyad GH, Mazloom M, Shorafa M and Jafarnejady A. 2012. Comparison of artificial neural networks and regression pedotransfer functions for predicting saturated hydraulic conductivity in soils of Khuzestan province. *J. Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour., Water and Soil Sci.* 16(60): 107–118 (in Farsi with English Summary).
- SAS Institute, 1996. SAS Institute SAS/STAT Software: Changes and enhancements through release 6.11. SAS Institute, Cary, NC.
- Saxton KE and Rawls WJ. 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1569–1578.
- Schaap MG, Leij FL and van Genuchten MTh. 1998. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. *Soil Sci, Soc, Am, J.* 62: 847–855.



- Sharifi J. 2011. Some physicochemical, micromorphological and mineralogical properties of soils on three slope positions in the chelgerd region, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. MSc Thesis, Guilan University, 100 pp. (in Farsi with English Summary).
- Shirazi MA and Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142–147.
- Tietje O and Hennings V. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, 69: 71–84.
- van Genuchten MTh and Nielsen DR. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys.* 3: 625–628.
- Wagner B, Tarnawski VR, 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.
- Wösten JHM. 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. PP. 221–245. In: Gregorich EG and Carter MR (eds.). *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soils Science, Vol .25*, Elsevier, Amsterdam.
- Wösten JHM and vanGenuchten MTh. 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic function. *Geoderma*, 52: 1762–1770.
- Wösten JHM, Lilly A, Nemes A and Le Bas C. 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Report 156, Winand Staring Centre, SC–DLO, Wageningen, Netherlands. 106pp.
- Wösten JHM, Pachepsky YA and Rawls WJ. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251: 123–150.

## Evaluating and Developing Pedotransfer Functions to Predict Soil Saturated Hydraulic Conductivity at Landscape Scale in Central Zagros

H. Kelishadi<sup>1\*</sup>, M.R. Mosaddeghi<sup>2</sup>, M.A. Hajabbasi<sup>2</sup> and S. Ayoubi<sup>2</sup>

1- PhD Student, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

\*Corresponding author, [kelishadi.h@gmail.com](mailto:kelishadi.h@gmail.com)

Received: 19.02.2013

Accepted: 22.09.2013

### Abstract

Soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) is an essential property in managing irrigation projects, water and solute transport modeling and for predicting unsaturated hydraulic conductivity functions. Laboratory and field measurements of  $K_s$  are time-consuming and costly especially in the large scales. Moreover,  $K_s$  is affected by different factors and thus its predicting and modeling by derived pedotransfer functions (PTFs) or those in the literature can be useful for many purposes. This study was performed to evaluate the already existed in literature and derived PTFs for predicting  $K_s$  in Farsan and Koohrang regions, Chaharmahal-va-Bakhtiari province in the central Zagros. Undisturbed samples (volume of 100 cm<sup>3</sup>) were collected from the surface soil at 100 locations which were well distributed in the region and in different land uses. The  $K_s$  of the undisturbed samples was measured using the constant-head method in laboratory. Easily-available soil properties were also determined and PTFs for  $K_s$  prediction were derived by multiple stepwise regression. The measured  $K_s$  values were also compared with the predictions of several PTFs in the literature. Results showed that PTFs in the literature could not accurately predict the  $K_s$  in the region. Among the literature PTFs, powerful neural network model of Rosetta (SCC+BD) was the best. The worse PTFs for  $K_s$  prediction in the studied structured soils were Brakensiek *et al.* (1984) PTFs. However, the derived PTFs predicted the  $K_s$  in the region better ( $R^2=52\%$ , RMSE=0.5 mm/h) than the literature PTFs. The findings revealed that logarithm of  $K_s$  negatively correlates with relative bulk density (relative compaction), effective bulk density, clay to carbonate content (Clay/CaCO<sub>3</sub>) and carbonate to organic matter content (CaCO<sub>3</sub>/OM) ratios and bulk density and clay interaction [ $\ln(BD \times \text{Clay})$ ] and has positive correlations with OM,  $\ln(\text{OM}/\text{Clay})$ , very fine sand content and soil porosity. The studied soils had good structure and the structural properties had significant role in the derived PTFs. Therefore, it is suggested to include additional structural properties such as aggregates' mean diameter as a predictor for better  $K_s$  prediction in future.

**Keywords:** pedotransfer functions, saturated hydraulic conductivity, relative compaction, effective bulk density, central Zagros.