

آزمودن ورودی‌های جدید برای برآورد هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک

پیمان شاکر شه‌ماربیگلو^۱، حبیب خداوردیلو^{۲*}، حمیدرضا ممتاز^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲)

چکیده

هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع (K_s) خاک از ویژگی‌های کلیدی برای اهداف مختلف از جمله شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی، تعیین تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک و مدل‌سازی جریان آب و انتقال املاح است. چون K_s یک ویژگی وابسته به ساختمان خاک است، برای به حداقل رساندن دست‌خوردگی حجم خاک نمونه‌برداری شده معمولاً از روش‌های اندازه‌گیری صحرائی استفاده می‌شود. به دلیل تغییرپذیری بالای مکانی-زمانی K_s ، اندازه‌گیری‌های (تکرار) زیادی لازم است؛ بنابراین روش مورد استفاده، همانند روش بار افتان ساده‌سازی شده (SFH)، باید به اندازه کافی سریع و ساده باشد. همچنین می‌توان از توابع انتقالی خاک (PTFs) برای برآورد غیرمستقیم K_s از طریق دیگر ویژگی‌های خاک بهره برد. هدف از این پژوهش، آزمودن ورودی‌های جدید برای برآورد K_s خاک در خاک‌های متأثر از نمک حاشیه دریاچه ارومیه بود. از استوانه‌ای با قطر ۳۲ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری K_s با روش SFH در خاک‌هایی با سطوح مختلف شوری (هدایت الکتریکی عصاره اشباع، $EC_e = 0.1-9.5$ dS/m) و سدیم (درصد سدیم تبدیلی، $ESP = 4-80\%$) استفاده شد. در کل ۱۹۰ نمونه با روش SFH اندازه‌گیری شد و از همسایگی نزدیک هر نقطه، تعدادی نمونه خاک دست‌نخورده (با استوانه-ای به قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) و دست‌خورده به صورت تصادفی از خاک سطحی جمع‌آوری و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تعیین شدند. خاک‌های مورد مطالعه عمدتاً دارای K_s متوسط (تقریباً ۴۰ درصد از خاک‌ها) تا نسبتاً تند (تقریباً ۴۸ درصد) بودند. تجزیه همبستگی و رگرسیون گام‌به‌گام نشان داد که K_s با جرم ویژه ظاهری (ρ_b) ($r = -0.205$)، شاخص سله‌بندی (I_e) ($r = -0.180$) و درجه تراکم خاک (SDC) ($r = -0.206$) همبستگی منفی ($P \leq 0.01$) و با شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) ($r = 0.184$) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) ($r = 0.157$) همبستگی مثبت ($P \leq 0.05$) داشت. افزون بر این، K_s با EC_e و ESP خاک ارتباطی منفی داشت.

واژه‌های کلیدی: بار افتان ساده‌سازی شده، تغییرپذیری مکانی، توابع انتقالی خاک، هدایت هیدرولیکی خاک.

شاکر شه‌ماربیگلو پ.، خداوردیلو ح.، ممتاز ح. ر. ۱۳۹۸. آزمودن ورودی‌های جدید برای برآورد هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷ شماره ۱. ص: ۵۴-۶۹.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه (مکاتبه کننده)

۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*پست الکترونیک: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

مقدمه

1998؛ Wosten *et al.*, 2001؛ Navabian *et al.*, 2004؛

(Nemes *et al.*, 2005؛ Aimrun *et al.*, 2004

فرر جولیا و استرلا (Ferrer Julia & Estrela, 2004)

برای تخمین K_s خاک در مناطق مدیترانه‌ای اسپانیا از

دو نوع تابع انتقالی رگرسیونی استفاده نمودند که

در یکی از آنها از سه متغیر درصد شن و رس و درصد

مواد آلی استفاده شده و در دیگری تنها از متغیر درصد

شن استفاده شده بود. نتایج نشان داد که تابع سه

متغیره نتایج بهتری در مقایسه با تابع یک متغیره ایجاد

می‌نماید. در پژوهشی دیگر مردون و همکاران (Merdu

Merdu *et al.*, 2006)، با استفاده از روش رگرسیون خطی

چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی K_s را برآورد

نمودند. نتایج ایشان بیانگر توانایی بهتر مدل‌های

رگرسیونی در برآورد K_s خاک نسبت به شبکه‌های

عصبی مصنوعی می‌باشد. با این وجود، اختلاف

معنی‌داری در بین مدل‌ها مشاهده نگردید. در برخی از

پژوهش‌های صورت گرفته، پارامترهای شیمیایی خاک

نیز به‌عنوان عوامل مؤثر در تخمین K_s خاک در نظر

گرفته شده است. مؤذن‌زاده و همکاران (Moazenzadeh

Moazenzadeh *et al.*, 2009) از هدایت الکتریکی عصاره اشباع، اسیدیت

خاک، مقدار کربنات کلسیم و مواد آلی و جلالی و

همایی (Jalali & Homae, 2011) از هدایت الکتریکی

عصاره اشباع، مقدار مواد خنثی شونده و درصد کربن

آلی، به‌عنوان پارامترهای شیمیایی زودیافت همراه با

سایر پارامترهای فیزیکی خاک استفاده کرده‌اند. تاکنون

ویژگی‌های زودیافت (فیزیکی و شیمیایی) بسیاری در

ایجاد توابع انتقالی برای برآورد K_s خاک وارد شده‌اند،

ولی دلیل تغییرپذیری بالای K_s و تأثیرپذیری آن از

عواملی گوناگون، ایجاد توابع انتقالی کارآمد برای برآورد

K_s نیازمند بررسی ورودی‌های جدید در ایجاد این

PTFها است. هدف کلی از این پژوهش، بررسی امکان

برآورد K_s با استفاده از ویژگی‌های پایه‌ای خاک و

آزمودن ورودی‌های جدید برای برآورد K_s خاک‌های

متأثر از نمک حاشیه غربی دریاچه ارومیه بود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در خاک‌های اراضی منطقه جبل‌کندی واقع

در حاشیه غربی دریاچه ارومیه و به وسعت تقریباً ۱۰۰

هکتار انجام گردید. این منطقه بخشی از مناطق

بیان کمی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در بسیاری از

مطالعات مربوط به جریان در محیط‌های متخلخل که از

مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی حرکت آب و املاح

استفاده می‌کنند، ضروری است. هدایت هیدرولیکی

نزدیک اشباع (K_s) یکی از ویژگی‌های کلیدی در چرخه

آب است (Hassler *et al.*, 2014) که بسیاری از

رفتارهای خاک از جمله نفوذ آب، رواناب سطحی،

آبشویی سموم از زمین‌های کشاورزی و حرکت آلاینده‌ها

از مکان‌های آلوده به آب‌های زیرزمینی و غیره را کنترل

می‌کند (Reynolds *et al.*, 2000).

مقدار K_s عموماً تغییراتی گسترده در مکان و زمان دارد.

از این رو برای داشتن اطلاعات کافی از K_s خاک و مدل

کردن حرکت آب در خاک باید نمونه‌های زیادی از

مزرعه برداشت شود. افزون بر این، اندازه‌گیری K_s نیاز به

تکرار در زمان‌های مختلف دارد تا تغییرات زمانی آن نیز

برآورد گردد. لذا، برای بدست آوردن داده‌هایی

قابل‌اعتماد از K_s استفاده از روش‌های تا حد ممکن

سریع و ساده ضروری است (Bagarello *et al.*, 2012).

روش‌های متفاوتی برای اندازه‌گیری K_s ارائه شده است

ولی عموماً از روش‌های صحرائی معمول، مانند روش‌های

نفوذسنج تک‌استوانه برای اندازه‌گیری آن استفاده

می‌شود (Reynolds, 2006؛ Reynolds & Elrick,

1992).

به دلیل طبیعت پیچیده خاک و تغییرات زیاد مکانی-

زمانی K_s اندازه‌گیری مستقیم آن وقت‌گیر، هزینه‌بر و

دشوار بوده و به دست آوردن نتایج رضایت‌بخش مستلزم

تکرارهایی فراوان می‌باشد. به همین دلیل، روش‌های

غیرمستقیم مانند توابع انتقالی خاک (PTFs)^۱ به‌عنوان

راهکاری مناسب برای رفع نسبی این مشکلات ارائه

شده‌اند. PTFها، معادلاتی رگرسیونی هستند که

مشخصات و ویژگی‌های پایه‌ای خاک را با سایر ویژگی-

های زودیافت خاک ارتباط می‌دهند (Bouma, 1989).

واگنت و همکاران (Wagenet *et al.*, 1991) بر این

باورند که PTFها به‌عنوان مترجم‌هایی هستند که

ویژگی‌های پایه‌ای خاک را به شکل کاربردی آنها

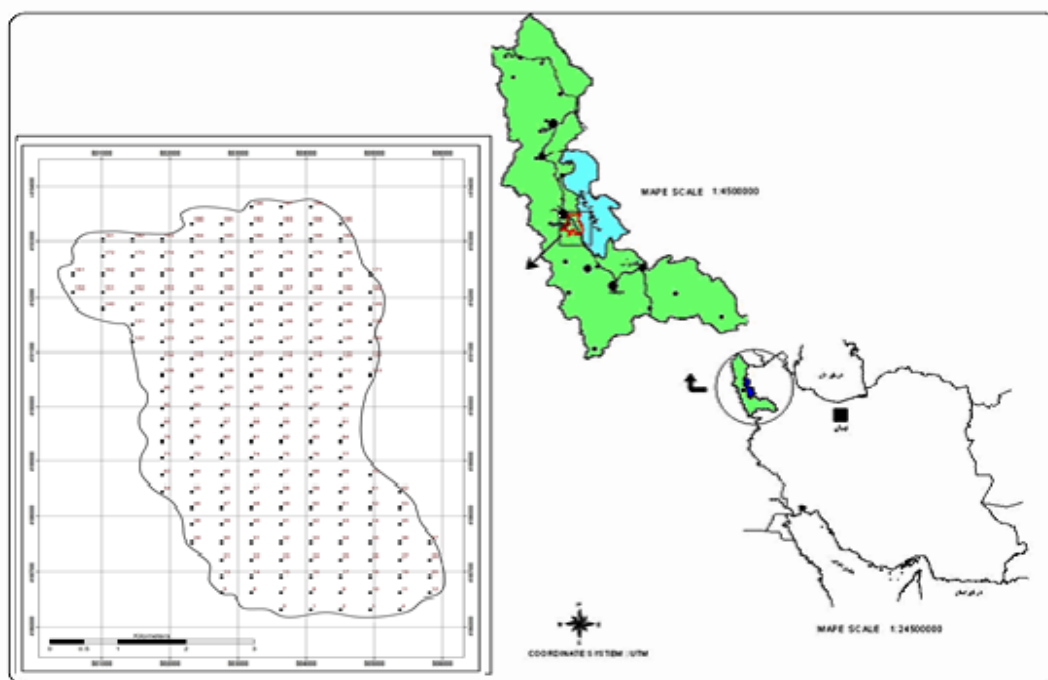
درمی‌آورند. طی دو دهه اخیر، چندین تابع انتقالی برای

برآورد K_s ایجاد شده‌اند (Jabro, 1992؛ Rawls *et al.*,

1- Pedotransfer functions

نخورده بدست آمد. نمونه‌های دست‌نخورده برای اندازه-گیری جرم ویژه ظاهری خشک (ρ_b (Mgm⁻³) و مقدار رطوبت اولیه و رطوبت اشباع در زمان نمونه‌برداری استفاده شدند. بافت خاک با روش هیدرومتری (Gee & Or, 2002) و ویژگی‌های شیمیایی خاک نظیر pH و هدایت الکتریکی (EC_e) عصاره اشباع (Miller & Nelson & Sommers, 2006)، مواد آلی (Curtin, 2006)، کربنات کلسیم معادل (CCE) با روش خنثی‌سازی با اسیدکلریدریک (Rayment & Higginson, 1992)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با روش استات سدیم (Chapman, 1965)، درصد سدیم تبادل (ESP) در عصاره اشباع با استفاده از فلیم فتومتر (Lavkulich, 1981) در نمونه‌های دست‌خورده خاک اندازه‌گیری شدند.

کوهستانی زاگرس و دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک است. خاک‌های مورد مطالعه دارای رژیم رطوبتی مزیک و رژیم حرارتی زیریک و نوع کاربری اراضی شامل کاربری‌های زراعی، بایر (بستر دریاچه)، باغی و مرتع می‌باشد. به‌منظور نمونه‌برداری صحرائی، ابتدا منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS به شبکه‌هایی با طول مساوی ۵۰۰ متر تقسیم و مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری به دستگاه GPS داده شد و نمونه‌برداری به‌صورت سیستماتیک انجام گرفت. نقاط مورد مطالعه (تعداد ۱۹۰ نمونه از عمق ۵ - ۰ سانتی‌متری سطح خاک) در خاک‌های اراضی منطقه جیل‌کندی به‌گونه‌ای انتخاب شد که دامنه وسیعی از خاک‌هایی با درجات مختلف شوری و سدیم را در برگیرد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با تهیه نمونه‌های دست‌خورده و دست-



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه همراه با الگوی پراکنش نقاط نمونه‌برداری

Figure 1. Geographic location of study area with distribution pattern of sampling points

خاک فرو برده شد. سپس مقدار آبی به ارتفاع حدود ۲/۵ سانتی‌متر (متناسب با تخلخل کل و رطوبت اولیه خاک) به داخل استوانه اعمال شد و مدت‌زمان نفوذ کامل آن به داخل خاک یادداشت شد. جزئیات این روش در باگارلو و همکاران (Bagarello *et al.*, 2004) و خداوردیلو و همکاران (Khodaverdiloo *et al.*, 2017)

برای اندازه‌گیری K_s از روش تک‌استوانه با بار افتان ساده‌سازی شده (SFH)^۱ با استوانه‌ای به قطر ۳۲ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. برای این کار، نخست گیاهان سطح خاک منطقه موردنظر بدون تخریب سطح خاک به کمک چاقو بریده شد و سطح خاک نقطه موردنظر آماده شد. استوانه تا عمق ۵ سانتی‌متری در

1- Simplified falling head

قرار می‌دهند. آگاهی درباره ویژگی‌های هیدرودینامیک سله خاک سطحی، برای برآورد و کاهش اثرات منفی آن مهم است. فائو (FAO, 1979) شاخص سله‌بندی را بر اساس ترکیبات بافت خاک و محتوای مواد آلی به شکل زیر پیشنهاد داد:

$$I_c = \frac{(1.5 \times S_f) + (0.75 \times S_c)}{\text{Clay} + (10 \times \text{SOM})} \quad (3)$$

در این رابطه، S_f : درصد سیلت ریز ($2 - 5 \mu\text{m}$)، S_c : درصد سیلت درشت ($50 - 20 \mu\text{m}$)، Clay : رس و SOM : درصد مواد آلی خاک هستند. شاخص I_c با محتوای رس و مواد آلی نسبت معکوس و با محتوای سیلت ریز و درشت رابطه مستقیم دارد.

شاخص پایداری ساختمان خاک^۳ (SSI)

مقدار این شاخص با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (Reynolds et al., 2009):

$$SSI = \left(\frac{\text{SOC} \times 1.724}{\text{Clay} + \text{Silt}} \right) \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه SOC : کربن آلی خاک و $1/724$ ضریبی است که کربن آلی را به مواد آلی خاک تبدیل می‌کند.

جرم ویژه ظاهری نسبی (ρ_{b-rel})

با اینکه ρ_b از خصوصیات مهم فیزیکی خاک بوده و به-طور کلی مشخصه ساختمان خاک می‌باشد ولی شاخص مناسبی برای بیان درجه تراکم خاک نیست و نمی‌تواند درجه‌ای از فشردگی خاک را در منطقه رشد ریشه گیاه، عملکرد محصول و آب قابل دسترس برای گیاهان، به درستی تعیین نماید (Kelishadi et al., 2014). از این رو برای ارزیابی میزان فشردگی خاک‌ها صرف نظر از نوع خاک پیشنهاد گردید. جرم ویژه ظاهری نسبی از رابطه زیر قابل محاسبه است (Kelishadi et al., 2014):

$$\rho_{b-rel} = \frac{\rho_b}{\rho_{b-ref}} \quad (5)$$

که در آن ρ_b : جرم ویژه ظاهری خاک و ρ_{b-ref} جرم ویژه ظاهری مرجع است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

آمده است. در این روش K_s با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد (Bagarello et al., 2004):

$$K_s = \frac{\Delta \theta}{T_a (1 - \Delta \theta)} \left[\frac{D}{\Delta \theta} - \frac{D + \frac{1}{\alpha^*}}{(1 - \Delta \theta)} \ln \left(1 + \frac{(1 - \Delta \theta) D}{\Delta \theta (D + \frac{1}{\alpha^*})} \right) \right]$$

که در آن K_s (LT^{-1})، هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک، D ارتفاع آب ($D=V/A$)، V حجم آب نفوذ یافته، $\Delta \theta$ اختلاف بین رطوبت حجمی اشباع و رطوبت اولیه مزرعه و T_a زمان نفوذ است (Reynolds & Elrick, 1992). مقدار پارامتر عکس طول درشت موینگی α^* (L^{-1}) بر اساس بافت و ساختمان خاک و بر پایه پیشنهاد الریک و رینولدز (Reynolds & Elrick, 1992)، cm^{-1} 0.12 (با توجه به شرایط خاک مورد مطالعه) در نظر گرفته شد و مقدار K_s محاسبه گردید. بر پایه مطالعات باگارللو و همکاران (Bagarello et al., 2012) استفاده از تخمین‌های موجود α^* به جای تعیین مستقیم آن تأثیر معنی‌داری بر نتایج روش SFH ندارد.

متغیرهای مستقل مورد بررسی در این پژوهش شامل موارد زیر بودند:

درجه فشردگی خاک^۱ (SDC)

بر اساس ρ_b و ρ_{b-max} (جرم ویژه ظاهری حداکثر)، SDC از رابطه زیر قابل محاسبه است (Klein, 2011):

$$SDC = 100 \times \left(\frac{\rho_b}{\rho_{b-max}} \right) \quad (2)$$

که در آن $\rho_{b-max} = 2.03133855 - 0.00320878 \text{ SOM} - 0.00076508 \text{ Clay}$ می‌باشد و Clay و SOM به ترتیب درصد رس و مواد آلی خاک هستند (Klein, 2011).

شاخص سله‌بندی^۲ (I_c)

سله سطحی خاک، از طریق کاهش نفوذ، جلوگیری از جوانه‌زنی بذر، کاهش هوادهی ریشه و میزان آب قابل دسترس خاک‌های کشاورزی را به شدت تحت تأثیر

1- Soil degree of compactness

2- Index of crusting

3- Structural stability index

توسعه توابع انتقالی چند متغیره

در پیش‌پردازش داده‌ها، آماره توصیفی متغیرها از قبیل میانگین، حداکثر، حداقل و واریانس هر کدام از ویژگی-ها، دیگرام پراکنش داده‌ها و توزیع داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS17 بدست آمد و در صورت وجود داده‌های دورافتاده و یا اشتباه در وارد کردن داده‌ها اقدامات مناسب صورت گرفت و جدول اطلاعات توصیفی به کمک نرم‌افزار Excel تهیه گردید. برای تعیین ویژگی-های مؤثر بر K_s ، ابتدا همبستگی خطی بین متغیرها توسط نرم‌افزار SPSS مشخص گردید و با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (r)، رابطه همبستگی بین K_s با ویژگی‌های زود یافت خاک بدست آمد. پس از پیش-پردازش داده‌ها و گزینش متغیرهایی که با هدایت هیدرولیکی همبستگی معنی‌دار دارند، توابع انتقالی با استفاده از رگرسیون چند متغیره گام‌به‌گام با بهترین زیرمجموعه و با استفاده از نرم‌افزار Minitab16 ایجاد شد. پس از بدست آوردن معادلات رگرسیونی توسط نرم‌افزار Minitab، با قرار دادن مقادیر متغیرهای مستقل در معادله مقدار هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع برآورد شد. سپس ضریب ناهمخوانی (a) بین مقادیر K_s بدست آمده با استفاده از توابع انتقالی و K_s اندازه‌گیری شده، از رابطه زیر محاسبه گردید (Beckwith et al., 2003; Bagarello et al., 2012):

$$a = abs \left[\log \left(\frac{K_s^p}{K_s^m} \right) \right] \quad (9)$$

که در آن abs بیانگر عملگر قدرمطلق، K_s^p و K_s^m نشان‌دهنده میانگین مقدار K_s اندازه‌گیری شده و K_s برآورد شده توسط توابع انتقالی می‌باشد. در این معادله اگر ضریب اختلاف بین دو مقدار مورد مقایسه یکسان باشد، مقدار ضریب ناهمخوانی یکسان بدست خواهد آمد (برای نمونه اگر $\frac{K_s^p}{K_s^m}$ برابر با ۰/۵ یا ۲ باشد برای هر دو مقدار a برابر با ۰/۳۰۱ خواهد بود (Beckwith et al., 2003; Bagarello et al., 2012). باین‌حال، پژوهشگران مختلف (برای نمونه، Reynolds & Elrick, 1992; Bagarello et al., 2012) ابراز داشته‌اند که اختلاف ۲ یا ۳ برابری (معادل ضریب ناهمخوانی برابر با ۰/۳۰ تا

$$\rho_{b-ref} (\text{Mg m}^{-3}) = 1.985 - 0.00857 \text{ Clay } (\%) \quad (6)$$

در این رابطه، Clay درصد رس خاک است.

میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها

پایداری خاکدانه‌های خاک به‌عنوان شاخصی کلیدی برای ارزیابی کیفیت و سلامت خاک در نظر گرفته می‌شود. پایداری ساختمان خاک با استفاده از روش الک تر یودر (Uder, 1990) و روش اصلاح‌شده دبت و دلینیهیر توسط آفندی و همکاران (Afandi et al., 2003) ارزیابی شد. بر طبق روش یودر ابتدا نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شد. سپس ۵۰ گرم از خاک الک شده بر روی سری از الک‌ها با قطر ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۵۳ و کوچکتر از ۰/۰۵۳ میلی‌متر ریخته شدند و با سرعت ۳۰ نوسان در دقیقه و زمان ۱۰ دقیقه تحت الک تر قرار گرفتند. در پایان الک کردن، الک‌ها به‌آرامی از آب خارج شده، خاکدانه‌های باقیمانده روی هر الک به درون پتری‌دیش شسته شده و نهایتاً در آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با استفاده از رابطه Van Bavel (1949) که توسط Camper & Rosna (1986) اصلاح گردیده است، تعیین شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (7)$$

که در این رابطه MWD : میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm)، n : تعداد دامنه اندازه خاکدانه (در اینجا ۸ عدد)، x_i : میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک برحسب میلی‌متر (میانگین قطر سوراخ الک بالا و پایین) و w_i : نسبت جرم خشک خاکدانه‌های روی هر الک به جرم خشک کل خاکدانه‌های خاک است. گاردنر (Gardner, 1958) نشان داد که توزیع خاکدانه‌ها بیشتر توزیعی لگاریتمی دارد که در این صورت می‌توان از شاخص دیگری به نام میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) استفاده کرد:

$$GMD = \exp(\sum_{i=1}^n w_i \log x_i) \quad (8)$$

MLE میانگین خطای برآورد را در داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده با تبدیل لگاریتمی بیان می‌کنند. ضریب *GMER* بیان‌کننده وجود هماهنگی و تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده می‌باشد. چنانچه مقدار ضریب *GMER* برابر با ۱، نشان‌دهنده برازش دقیق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شده است و مقادیر کمتر یا بیشتر از ۱، به ترتیب نشان‌دهنده کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی مدل می‌باشند. بنابراین مقدار *GMER* در بهترین حالت مساوی یک می‌باشد. *GMSDER* مساوی یک نشان‌دهنده برازش کامل است و با انحراف از داده‌های اندازه‌گیری شده مقدار آن زیاد می‌شود. در واقع، مقادیر زیاد *GSDER* نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر بوده و عملکرد غیریکسان PTF برای خاک‌های مختلف را نشان می‌دهد. بنابراین مقادیر *GMER* و *GMSDER* در بهترین مدل مساوی یک می‌باشد (Wagner et al., 2001). از شاخص همخوانی (*d*) برای دوری از مشکلات خاص منتسب به ضریب تبیین (R^2) استفاده شد (Khodaverdilo et al., 2011). شاخص *d* به‌عنوان شاخصی مطرح است که میزان هم‌روندی داده‌های K_s برآورد شده را با داده‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

برخی از آماره‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. در خاک‌های مورد مطالعه دامنه تغییرات *pH* از کمی اسیدی (۶/۸) تا قلیایی (۸/۵) و دارای میانگین ۷/۵ بود (جدول ۱) که این امر را می‌توان به بالا بودن کربنات کلسیم (جدول ۱) نسبت داد زیرا با توجه به آهکی بودن خاک‌های این منطقه، به‌احتمال زیاد کربنات کلسیم با میانگین ۲۱/۶ باعث افزایش و بافر کردن *pH* شده است (Goldberg & Forster, 1991). تعداد ۱۵۲ نمونه از خاک‌های مورد مطالعه دارای خاک غیرشور ($EC_e \leq 4$ dS/m) و تعداد ۳۸ نمونه، شور ($EC_e > 4$ dS/m) بودند. بیشترین مقدار هدایت الکتریکی در این منطقه $95/3$ dS m⁻¹ مربوط به شمال غربی منطقه مورد مطالعه و همجواری و متأثر بودن نسبی این مناطق از دریاچه ارومیه بوده در حالیکه کمترین مقدار آن، dSm^{-1} ۰/۱ متعلق به بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه و میانگین شوری منطقه برابر با $7/4$ dSm⁻¹ بود.

۰/۴۸ مقادیر K_s اندازه‌گیری شده و برآورد شده از نظر کاربردی قابل چشم‌پوشی است.

برای ارزیابی دقت PTF‌های ایجادشده در برآورد داده‌های اندازه‌گیری شده K_s ، از معیارهای ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (*RMSE*)، ریشه میانگین مربعات خطای لگاریتمی (*RMSLE*)، میانگین خطای لگاریتمی (*MLE*)، نسبت خطای میانگین هندسی (*GMER*)، نسبت خطای انحراف معیار هندسی (*GSDER*) و ضریب هم‌خوانی (*d*) استفاده گردید. روابط مربوط به این آماره‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})(P_i - P_{ave})}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2 (P_i - P_{ave})^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (11)$$

$$GMER = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{P_i}{O_i} \right) \right] \quad (12)$$

$$GSDER = \exp \left[\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\ln \left(\frac{P_i}{O_i} \right) - \ln(GMER) \right) \right)^{0.5} \right] \quad (13)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - O_{ave}| + |P_i - O_{ave}|)^2} \right\} \quad (14)$$

$$RMSLE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\text{Log } P_i - \text{Log } O_i]^2 \right)^{0.5} \quad (15)$$

$$MLE = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n [\text{Log } P_i - \text{Log } O_i] \right) \quad (16)$$

در این روابط، *n* تعداد مشاهدات، O_i : مقدار اندازه‌گیری شده داده‌ها (مقادیر K_s)، O_{ave} : میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده داده‌ها، P_i : مقدار برآورد شده برای داده‌های موردنظر و P_{ave} : میانگین مقادیر برآورد شده می‌باشند. ضریب تبیین (R^2) نشان‌دهنده نسبت کوواریانس داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده بر حاصل ضرب واریانس داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد. *RMSLE* و

جدول ۱- دامنه تغییرات برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه (n=190)

Soil Properties	Minimum	Maximum	Mean	STDEV	CV
pH	6.8	8.5	7.5	0.29	3.8
ρ_b (g cm ⁻³)	0.6	1.5	1.2	0.18	14.9
θ_m (%)	0.3	8.2	2	1.41	70.9
EC _e (dS m ⁻¹)	0.1	95.3	7.4	17.84	241.1
CCE (%)	4	49	21.6	15.56	72.1
OM (%)	0.34	6.38	3.49	1.63	46.7
Na _{ex} (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	1.3	16.4	4.5	4	89
Clay (%)	5	45	19.6	9	45.9
Silt (%)	8.8	66.3	43.3	11.8	27.2
Sand (%)	1.3	76.3	36.7	17.8	48.5
σ_g (-)	5.6	17.3	11.1	2.1	18.5
d_g (mm)	0.004	0.35	0.1	0.1	98.6
MWD (mm)	0.8	3.61	1.92	0.51	26.8
GMD (mm)	0.6	1.5	1.1	0.2	15.8
ρ_{b-rel} (-)	0.33	0.83	0.66	0.1	14.9
I_c (-)	0.07	0.91	0.45	0.14	30.3
SDC (%)	40.9	100	77.9	11.5	14.9
SSI (%)	0.6	18.9	5.9	3.1	52.9
K_s (mm hr ⁻¹)	3.2	175.5	57.8	37.9	65.6
Log K_s (mm hr ⁻¹)	0.5	2.2	1.7	0.3	19.5

pH: اسیدیته، ρ_b : جرم ویژه ظاهری، θ_m : رطوبت اولیه جرمی، EC_e: هدایت الکتریکی عصاره اشباع، CCE: کربنات کلسیم معادل، OM: مواد آلی، Na_{ex}: سدیم تبادل، Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، σ_g : انحراف معیار هندسی قطر ذرات، d_g : میانگین هندسی قطر ذرات، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، ρ_{b-rel} : جرم ویژه ظاهری نسبی، I_c : شاخص سلبندی، SDC: درجه تراکم خاک، SSI: شاخص پایداری ساختمان خاک، K_s : هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک می‌باشد.

شامل لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی سیلتی، لوم رسی و رس سیلتی پراکنده بودند. به‌طور کلی K_s دارای توزیع لوگ نرمال است. این یافته توسط پژوهشگرانی دیگر (Gupta et al., 1996؛ Govindaraju et al., 2012) نیز تأیید شده است. در این مطالعه افزون بر K_s ، داده‌های تبدیل لگاریتمی شده آن ($\log K_s$) نیز به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شد.

تجزیه همبستگی K_s با ویژگی‌های خاک

آزمون همبستگی (جدول ۲) با استفاده از داده‌های تمامی نمونه‌های خاک نشان داد که $\log K_s$ بیشترین همبستگی (همبستگی معکوس و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$)) را با جرم ویژه ظاهری، جرم ویژه ظاهری نسبی و درجه تراکم خاک دارد. با توجه به قرار گرفتن بیشتر خاک‌های مورد مطالعه در

ماده آلی خاک‌های منطقه در محدوده ۰/۳۴ تا ۶/۳۸ و با میانگین ۳/۵ درصد بود. بیشترین مقدار ماده آلی خاک‌های مورد مطالعه مربوط به کاربری بایر (بستر دریاچه) واقع در بخش‌های غربی، میانی و قسمت‌هایی از شرق و شمال غربی حوضه می‌باشد. خاک‌هایی که زهکشی ضعیفی دارند، از نظر مواد آلی غنی هستند. زیرا میزان تجزیه مواد آلی در آنها به علت برقراری شرایط بی‌هوازی تقلیل یافته است (Bohn, 1985). با توجه به ضریب تغییرات بسیار بالای شوری و سدیم خاک می‌توان گفت که عمده‌ترین تفاوت خاک‌های مورد مطالعه از نظر شوری و سدیم آن‌ها بوده است. در این مطالعه، ضریب تغییرات pH کمترین (۳/۸) و ضریب تغییرات EC_e (۲۴۲/۱) بیشترین مقدار می‌باشد (جدول ۱). کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه تنوع زیادی داشت، به‌طوریکه ضریب تغییرات d_g خاک‌ها حدود ۹۹ درصد بود (جدول ۱). عمده خاک‌ها در شش کلاس بافتی

خاک، پایدار شده و افزایش گذردهی آب را به همراه دارد. نفوذ آب به خاک به شدت تحت تأثیر منافذ درشت خاک است که فراوانی آنها تحت تأثیر ساختمان خاک می‌باشد. راولز و همکاران (Rawls et al., 1998) بیان کردند که مهم‌ترین عامل در تعیین مقدار K_s ، توزیع اندازه منافذ به ویژه مقدار کل منافذ درشت و متوسط می‌باشد.

سایر پارامترها مانند pH ، مقدار مواد آلی و شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) همبستگی مثبت و معنی‌داری با $\log K_s$ در سطح احتمال ۵ درصد نشان دادند. K_s بیشتر تحت تأثیر ساختمان خاک، اندازه منافذ، پیوستگی و نحوه آرایش و قرار گرفتن آنها می‌باشد. بنابراین هرچه تعداد پارامترهایی که بیان‌کننده خصوصیات منافذ ساختمان خاک هستند بیشتر باشد، توابع انتقالی ایجادشده دارای دقت مناسب‌تری خواهند بود. ماده آلی مهم‌ترین عامل پایداری ساختمان خاک است. کارتر (Carter, 2002)، نشان داد که مواد آلی از مهم‌ترین فاکتورهای یک خاک به شمار می‌آیند که باعث پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه افزایش K_s خاک می‌گردد. همبستگی مثبت بین مواد آلی با K_s توسط لادو و همکاران (Lado et al., 2004) نیز گزارش شده است. افزایش مواد آلی در خاک موجب افزایش پایداری خاکدانه‌های و کاهش پتانسیل انقباض و انبساط خاک می‌گردد (Leroy et al., 2008؛ Papanicolaou et al., 2008).

برای اشتقاق توابع انتقالی از روش رگرسیون خطی چند متغیره به شیوه گام‌به‌گام استفاده گردید. در زمان برقراری رگرسیون خطی چندگانه، هرگاه بین متغیرهای ورودی رابطه خطی قوی مشاهده شود، هم‌راستایی خطی چندگانه به وجود خواهد آمد. هر چند وجود هم‌راستایی تجزیه رگرسیون را غیرمعتبر نمی‌سازد، لیکن برای جلوگیری از مشکلاتی که ممکن است در زمینه برآورد، محاسبه و تفسیر به همراه داشته باشد، باید از بکار گرفتن آن خودداری شود (Navabian et al., 2004).

کلاس بافتی لوم، این همبستگی بالای منفی را می‌توان چنین تفسیر نمود که در خاک‌هایی که اغلب در یک کلاس بافتی قرار دارند با کاهش جرم ویژه ظاهری، تخلخل خاک و احتمالاً درشت مویینه‌های خاک افزایش و در نتیجه K_s افزایش می‌یابد. تراکم خاک در اثر افزایش جرم ویژه ظاهری و مقاومت نفوذ با کاهش اندازه خلل و فرج درشت، مسدود شدن منافذ، تشکیل سله سطحی و کاهش پایداری خاکدانه‌ها، باعث تخریب ساختمان خاک، کاهش تخلخل و نهایتاً کاهش نفوذ آب به خاک می‌گردد (Gupta et al., 1989). کاهت و رینتام (Kuht & Reintam, 2004) بیان کردند که در خاک با بافت لومی، اگر جرم ویژه ظاهری از $1/3$ به $1/4$ مگاگرم بر مترمکعب افزایش یابد، نفوذپذیری آب به خاک به میزان دو برابر کاهش می‌یابد.

شاخص سله‌بندی نیز همبستگی معکوس و معنی‌داری با $\log K_s$ در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد. تشکیل سله موجب کاهش سرعت نفوذ آب به خاک می‌گردد (Shukla & Lal, 2005). تشکیل سله از طریق انسداد منافذ خاک باعث کاهش نفوذ آب در خاک و تجمع آب در سطح خاک و در نتیجه ایجاد شرایط تهویه‌ای نامساعد در ناحیه ریشه می‌شود. رشد جلبک‌ها در مکان‌های تجمع آب، به علت تشدید کاهش نفوذ، افزایش تلفات تبخیر از سطح خاک را به دنبال دارد (Ajwa & Trout, 2006). اگرچه تشکیل سله و نفوذ کند آب در خاک بیشتر در خاک‌های ریزبافت مطرح می‌باشد ولی گزارش‌هایی نیز وجود دارد که در خاک‌های درشت‌بافت (شن، شن لومی و لوم شنی) با ماده آلی ناچیز به علت پایداری کم خاکدانه‌ها در آب و متلاشی شدن آنها طی آبیاری‌های متوالی، منافذ خاک مسدود گردیده و در نتیجه نفوذ آب به خاک کاهش یافته است (Ajwa & Trout, 2006؛ Bagarello & Sgroi, 2007).

میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) همبستگی مثبت و معنی‌داری با $\log K_s$ در سطح احتمال ۵ درصد داشت. با افزایش GMD ، پایداری و اندازه خاکدانه‌ها افزایش یافته و در نتیجه تخلخل خاک و مقدار درشت مویینه‌های خاک زیاد و مسیرهای هدایت‌کننده آب در

جدول ۲- همبستگی خطی بین $\log K_s$ و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک (کل داده‌ها: $n=190$)Table 2. Correlation between selected soil physico-chemical properties and $\log K_s$ (Whole data; $n=190$)

	ρ_b	pH	OM	GMD	ρ_{b-rel}	I_c	SDC	SSI
Log K_s	-0.205**	0.154*	0.183*	0.157*	-0.207**	-0.180*	-0.206**	0.184*
ρ_b		-0.040	-0.564**	0.089	0.948**	0.253**	1.000**	-0.240**
pH			0.090	0.082	-0.036	0.000	-0.039	0.068
OM				0.152*	-0.546**	-0.606**	-0.566**	0.702**
GMD					0.061	-0.027	0.089	0.144*
ρ_{b-rel}						0.235**	0.949**	-0.372**
I_c							0.254**	-0.691**
SDC								-0.242**

* و **: به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد (pH): Significant at 5% and 1% probability level, respectively. * and **: اسیدیت، ρ_b : جرم ویژه ظاهری، OM: مواد آلی، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، ρ_{b-rel} : جرم ویژه ظاهری نسبی، I_c : شاخص سلبندی، SDC: درجه تراکم خاک، SSI: شاخص پایداری ساختمان خاک، K_s : هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک می‌باشد.

ضریب ناهمخوانی نشان داد که در ۸۸/۳ درصد از مقادیر K_s اندازه‌گیری شده و برآورد شده در گروه کل داده‌ها، اختلاف کاربردی چشم‌گیری مشاهده نشد ($a \leq 0/48$). تابع ایجاد شده برای کل داده‌ها بر اساس جدول ۳ و شکل ۲، مقدار K_s را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. از این رو، برای کاهش میزان اختلاف بین مقادیر K_s برآورد شده و K_s اندازه‌گیری شده، تابع خطا (E) ایجاد شد. در واقع چنین پنداشته شد که ممکن است مقدار خطای برآوردهای حاصل از تابع انتقالی ایجاد شده به نوع خاک و ویژگی‌های آن وابسته باشد. در این صورت می‌توان مقدار خطا را نیز به عنوان تابعی از ویژگی‌های خاک برآورد نموده و به مقدار برآورد شده K_s حاصل از تابع انتقالی افزود. در این صورت، مقادیر برآورد شده K_s به مقادیر برآورد شده آن نزدیک‌تر خواهند شد. برای این کار ابتدا با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی بین خطای حاصل از اختلاف بین مقادیر K_s برآورد شده و K_s اندازه‌گیری شده با پارامترهای زود یافت خاک بدست آمد و پس از برطرف نمودن هم‌راستایی خطی بین ویژگی‌های خاک، پارامترهای Na_{ex} ، pH ، GMD و SDC به عنوان ورودی برای ایجاد تابع انتقالی خطا برگزیده شدند و با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه، معادله زیر برای برآورد خطا بدست آمد:

$$E = 10.9 - 89/3 pH - 1/38 Na_{ex} - 176 GMD - 5/33 SDC \quad (18)$$

با توجه به اینکه مجموع مقدار برآورد شده از یک تابع و خطای آن تابع برابر با مقدار واقعی پارامتر خروجی است،

بر اساس آزمون هم‌راستایی بین متغیرهای مستقل (جدول ۲)، مشاهده شد که بین جرم ویژه ظاهری با جرم ویژه ظاهری نسبی و درجه فشردگی خاک و همچنین بین مواد آلی با شاخص سلبندی، شاخص پایداری ساختمان خاک و مقدار بحرانی مواد آلی هم‌راستایی وجود دارد ($r > 0/6$). از بین این متغیرها، پارامتری که همبستگی کمتری با $\log K_s$ داشت، از فهرست متغیرهای ورودی برای ایجاد معادله رگرسیونی حذف گردید. جهت بررسی نهایی، از عامل تورم واریانس (VIF) استفاده شد. در تخمین K_s برای کل خاک‌ها، با حذف پارامترهای ρ_b ، OM ، ρ_{b-rel} و I_c مشکل هم‌راستایی حل شد و پارامترهای pH ، میانگین هندسی قطر ذرات (GMD)، شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) با سطح معنی‌داری ۵ درصد و با ضریب مثبت و درجه فشردگی خاک (SDC) با سطح معنی‌داری ۱ درصد و با ضریب منفی به‌عنوان متغیر ورودی وارد تابع تخمین شدند:

$$\log K_s = 0/617 + 0/144 pH + 0/272 GMD - 0/0529 SDC + 0/0119 SSI \quad (17)$$

ضرایب مربوط به ورودی‌ها در تابع ایجاد شده نشان می‌دهد که با افزایش پایداری ساختمان خاک و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و با کاهش درجه تراکم خاک، K_s افزایش می‌یابد. پژوهشگرانی چند از جمله وستن و همکاران (Wosten et al., 2001)، پاچپسکی و همکاران (Pachepsky et al., 2006) و سلازار و همکاران (Slazar et al., 2008) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. مقادیر

اصلاح K_s برآورد شده با استفاده از تابع خطا دقت بیشتری را نسبت به K_s برآورد شده با استفاده از PTF ایجاد شده برای کل داده‌ها داشت (جدول ۳).

لذا انتظار می‌رود که حاصل مجموع خطای برآورد شده با استفاده از تابع خطا و K_s برآورد شده با استفاده از PTF ایجاد شده برای کل داده‌ها، K_s برآورد شده با استفاده از تابع خطا می‌باشد. بر اساس آماره‌های ارزیابی،

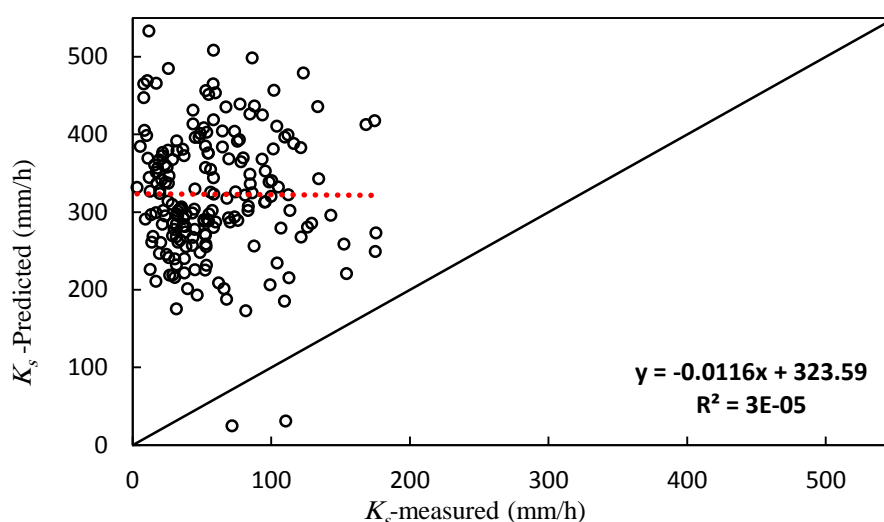
جدول ۳- مقادیر شاخص‌های آماری مورد ارزیابی توابع انتقالی مورد مطالعه

Table 3. The values of statistical criterion used to evaluate the studied pedotransfer functions

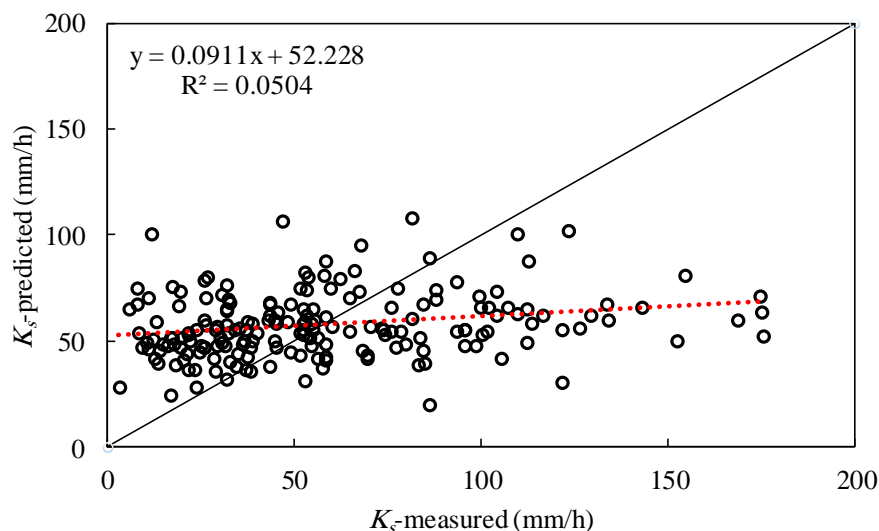
	RMSE	GMER	GSDER	RMSLE	MLE	d
Whole data	281.03	7.02	2.2	0.91	0.85	0.0
Whole data (error function included)	37.5	1.23	2.13	0.33	0.09	0.27

افزودن تابع خطا، نشان داد که همبستگی خطی بین K_s اندازه‌گیری شده و برآورد شده با افزودن تابع خطا افزایش یافت (شکل‌های ۲ و ۳).

شاخص‌های آماری نشان می‌دهد اصلاح توابع انتقالی با افزودن تابع خطا، سبب بهبود برآوردهای K_s شده است (جدول ۳). مقایسه K_s اندازه‌گیری شده و برآورد شده در کل داده‌ها و برآوردهای حاصل از اصلاح توابع انتقالی با



شکل ۲- رابطه بین هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع (K_s) اندازه‌گیری شده و برآوردی در کل داده‌ها (PTF1)
Figure 2. The relationship between measured and estimated near-saturated soil hydraulic conductivity (K_s) for the whole data (PTF1)



شکل ۳- رابطه بین هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع (K_s) اندازه‌گیری شده و برآورد شده پس از افزودن تابع خطا به تابع انتقالی (PTF1+ E)

Figure 3. The relationship between measured and estimated near-saturated soil hydraulic conductivity (K_s) through coupling the pedotransfer function and the error function (PTF1 + E)

انسداد شبکه منافذ خاک و نهایتاً کاهش هدایت هیدرولیکی می‌شود (Lebron *et al.*, 2002). همچنین قرایبه و همکاران (Gharaibeh *et al.*, 2010) بیان کردند که وجود سدیم بالا سبب تخریب ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری و کاهش سرعت حرکت آب در خاک می‌شود. سوبیراج و همکاران (Sobieraj *et al.*, 2002) گزارش نمودند که K_s با تغییر سطوح مختلف شوری و سدیمی، بافت و تخلخل خاک به شدت تغییر می‌کند. در خاک‌های متأثر از نمک مورد مطالعه در این پژوهش بین K_s با EC_e و ESP رابطه عکس و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد وجود داشت (جدول ۵). همچنین بین $\log K_s$ با EC_e و ESP رابطه عکس ولی معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد وجود دارد (جدول ۵).

بررسی ارتباط بین K_s با EC_e و ESP خاک‌های متأثر از نمک در محدوده مورد مطالعه

دامنه تغییرات K_s در سه نوع خاک غیرشور- غیرسدیمی، سدیمی و شور و سدیمی به ترتیب از ۵/۷ تا ۲۹۳/۹، ۱۷/۲۴ تا ۱۱۳/۶۷ و ۰/۲ تا ۱۷۵/۲ میلی‌متر در ساعت بود (جدول ۴). میانگین K_s در خاک غیر شور- غیر سدیمی بیشترین بوده و در خاک سدیمی کاهش یافته (به دلیل تخریب ساختمان خاک و پر شدن منافذ در حضور Na تبدالی بالا) و در خاک‌های شور و سدیمی روند کاهشی شدیدی را نشان می‌دهد. املاح محلول در آب بویژه املاح سدیم عامل اصلی کاهش قابلیت تولید خاک‌های متأثر از نمک هستند. در خاک‌های سدیمی کاتیون سدیم با قرار گرفتن در محل‌های تبدالی رس‌ها باعث افزایش ضخامت لایه دوگانه پخشیده شده که این عمل موجب پراکنش ذرات ثانویه خاک و تخریب و

جدول ۴- دامنه تغییرات هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک (mm/h) در سه نوع خاک غیر شور، سدیمی و شور و سدیمی
Table 4. The range of variation for near-saturated soil hydraulic conductivity (K_s ; mm/h) in the normal, sodic, and saline-sodic soils

CV (%)	Mean	Maximum	Minimum	
90.8	73.4	293.9	5.7	norml soils (n=36)
49.6	66.9	113.7	17.2	sodic soils (n=9)
169	29.2	175.2	0.2	saline-sodic soils (n=15)

جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون بین هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع (K_s) با هدایت الکتریکی (EC_e) و درصد سدیم تبادلی (ESP) ($n=60$)

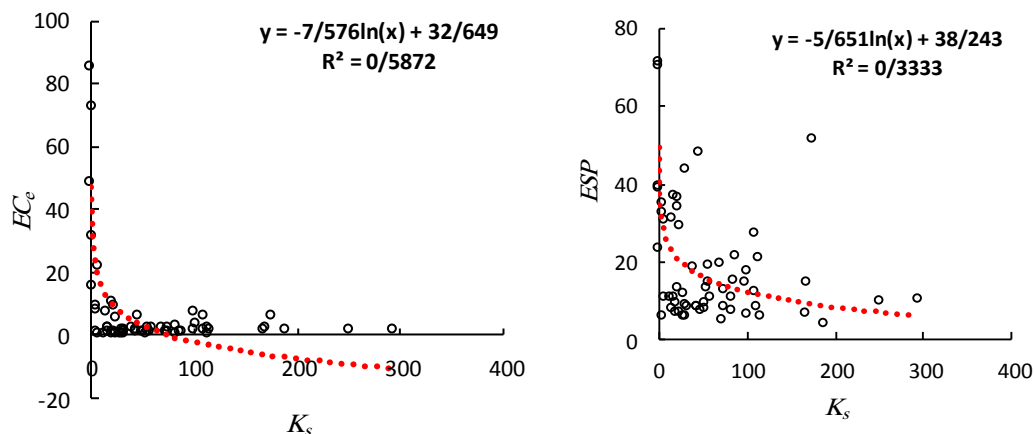
Table 5. Pearson correlation coefficient between near-saturated hydraulic conductivity (K_s) and electrical conductivity (EC_e) and exchangeable sodium percentage (ESP)

	K_s	$\log K_s$	EC_e
EC_e	-0.292*	-0.767**	1
ESP	-0.274*	-0.557**	0.759**

* و **: به ترتیب همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ درصد و ۱ درصد (Significant at 5% and 1% probability level, respectively).

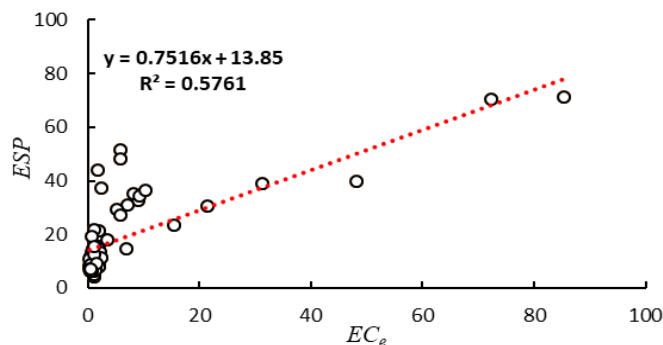
ارتباط آب و خاک و هوا در خاک‌های متأثر از نمک ناچیز می‌شود و در نهایت موجب کاهش K_s خاک می‌گردد (Alizadeh et al., 2009; Srivastava et al., 2014). در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش شوری خاک (EC_e)، مقادیر هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک کاهش یافت (شکل ۴). این به احتمال زیاد به خاطر وقوع هم‌زمان مقادیر بالای EC_e با مقادیر بالای ESP در خاک‌های مورد مطالعه باشد (شکل ۵).

سدیمی بودن از مهم‌ترین مشخصات خاک‌های متأثر از نمک بوده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ارتباط منفی درصد سدیم تبادلی (ESP) با هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع می‌تواند به این خاطر باشد که مقادیر بالای سدیم تبادلی (Na_{ex}) (سطح ESP بالا) موجب تخریب ساختمان خاک (عمدتاً به‌وسیله مکانیزم پراکندگی، تورم رس و پوسته‌ای شدن) می‌گردد که در نتیجه تخریب ساختمان خاک و فروپاشی خاکدانه‌ها، حجم منافذ (عمدتاً منافذ درشت) کم شده و



شکل ۴- رابطه بین K_s با EC_e و ESP در خاک‌های مورد مطالعه

Figure 4. The relationship between near-saturated hydraulic conductivity (K_s) versus electrical conductivity (EC_e) and exchangeable sodium percentage (ESP) of the soils



شکل ۵- رابطه هم‌افزایی درصد سدیم تبادلی (ESP) و شوری (EC_e) در خاک‌های مورد مطالعه

Figure 5. Co-occurrence of high exchangeable sodium percentage (ESP) with high soil salinity (EC_e) in the studied soils

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، همبستگی معنی‌داری بین $\log K_s$ و درصد شن، سیلت و رس مشاهده نشد. بنابراین یا K_s کمتر تحت تأثیر بافت خاک می‌باشد و بیشتر از ویژگی‌های بیان‌کننده ساختمان خاک تأثیر می‌پذیرد و یا فراوانی ذرات اولیه خاک نمی‌تواند تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک را بر K_s بیان نماید. جرم ویژه ظاهری (ρ_b)، شاخص سله‌بندی (I_c) و درجه تراکم خاک (SDC) تأثیری منفی بر مقدار K_s داشتند و افزایش شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) منجر به افزایش K_s گردید. افزون بر این، در خاک‌های متأثر از نمک مورد مطالعه در این پژوهش، K_s با شوری خاک (EC_e) و درصد سدیم تبادلی (ESP) دارای رابطه منفی ($P \leq 0.05$) بود. همچنین بین

داشت. بر اساس نتایج این پژوهش و با توجه به تأثیرپذیری زیاد K_s از ساختمان خاک، به کار گرفتن ویژگی‌هایی با مفهوم فیزیکی که بیشتر بیان‌کننده ساختمان خاک باشند، احتمالاً دقت توابع انتقالی ایجاد شده را افزایش خواهد داد. پیشنهاد می‌شود صحت این یافته‌ها در سایر مناطق نیز آزموده شود.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مشترک صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (طرح شماره ۹۱۰۰۲۲۱۶) و معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه (طرح شماره ۰۲۳/ک/۹۳) انجام شده است که بدینوسیله از حمایت آنها قدردانی می‌گردد.

References

- Afandi A., Manik T.K., Rosadi B., Utomo M., Senge M., Adachi T., and Oki Y. 2003. Soil physical properties under coffee trees with different weed managements in hilly humid tropical area of Lampung, south Sumatra, Indonesia. *Journal of the Japanese Society of Soil Physics*, 92: 3-16.
- Aimrun W., Amin M.S.M., and Eltaib S.M. 2004. Effective porosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, 121: 197-203.
- Ajwa H.A., and Trout T.J. 2006. Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 643-650.
- Alizadeh H.A., Nazari B., and Liaghat A. 2009. Evaluation of simplified falling head (SFH) method for measuring saturated hydraulic conductivity. *Journal of Water and Soil*, 23(2): 55-62.
- Bagarello V., and Sgroi A. 2007. Using the simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 94: 283-294.
- Bagarello V., D'Asaro F., and Iovino M., 2012. A field assessment of the Simplified Falling Head technique to measure the saturated soil hydraulic conductivity. *Geoderma*, 187: 49-58.
- Bagarello V., Iovino M., and Elrick D. 2004. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 168: 66-73.
- Bagarello V., Stefano C.D., Ferro V., Iovino M., and Sgroi A. 2010. Physical and hydraulic characterization of a clay soil at the plot scale. *Journal of Hydrology*, 387(1): 54-64.
- Beckwith C.W., Baird A.J., and Heathwaite A.L. 2003. Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. I: laboratory measurements. *Hydrological Processes*, 17: 89-101.
- Bouma J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advanced Soil Science*, 9: 177-213.
- Carter M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management. *Agronomy Journal*, 94(1): 38-47.
- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis- Part 2*. WI, American Institute of Agronomy, Madison, pp. 891-901.
- Elrick D.E., Angulo-Jaramillo R., Fallow D.J., Reynolds W.D., and Parkin G.W. 2002. Infiltration under constant head and falling head conditions. *Environmental Mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in the Biosphere*. In: Ratts P.A.C., Smiles D., Warrick A.W. (Ed.), *Geophysical Monograph Series*, 129: 47- 53.
- FAO. 1979. *Soil Survey Investigation for Irrigation*. Rome. FAO, pp.188.
- Ferrer Julia M., and Estrela M.T. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 123: 257-277.
- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle-size analysis. In: Dane J.H., and Topp G.C. (Ed.), *Methods of Soil Analysis- Part 4*. SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison, pp. 255-293.

- Gharaibeh M.A., Eltaif N.I., and Shraah S.H. 2010. Reclamation of a calcareous saline-sodic soil using phosphoric acid and by product gypsum. *Soil Use and Management*, 26: 93-195.
- Goldberg S., and Forster H. 1991. Boron Sorption On Calcareous Soils And Reference Calcites. *Soil Science*, 152(4): 304-310.
- Govindaraju R.S., Corradini C., and Morbidelli R. 2012. Local-and field-scale infiltration into vertically non-uniform soils with spatially-variable surface hydraulic conductivities. *Hydrological Processes*, 26(21): 3293-3301.
- Gupta N., Rudra R.P., and Parkin G. 1996. Analysis of spatial variability of hydraulic conductivity at field scale. *Canadian Biosystem Engineering*, 48 (1): 55-62.
- Gupta S.C., Shoarma P.P., and Da Franchi S.A. 1989. Compaction effects on soil structure. *Advances in Agronomy*, 42: 311- 338.
- Hassler S.K., Lark R.M., Zimmermann B., and Elsenbeer H. 2014. Which sampling design to monitor saturated hydraulic conductivity? *European Journal of Soil Science*, 65 (6): 792-802.
- Jabro J.D. 1992. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of the ASAE*, 35(2): 557-560.
- Jalali V.R., and Homae M. 2011. A Nonparametric Model by using k-nearest neighbor Technique for Predicting Soil Saturated Hydraulic Conductivity. *Journal of Water and Soil*, 25 (2): 347-355. (In Persian).
- Kelishadi H., Mosaddeghi M.R., Hajabbasi M.A., and Ayoubi S. 2014. Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213: 426-434.
- Khodaverdiloo H., Khani H., Cheraghabdal V., Bagarello M., Asgarzadeh H., Ghorbani Dashtaki S. 2017. Ring diameter effects on determination of field-saturated hydraulic conductivity of different loam soils. *Geoderma*, 303: 60–69.
- Khodaverdiloo H., Homae M., van Genuchten M.Th., and Ghorbani Dashtaki S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93-99.
- Kuht J., and Reintam E. 2004. Soil compaction effect on soil physical properties and the content of nutrients in spring barley and wheat. *Agronomy Research*, 2(2): 187-194.
- Lado M., Paz A., and Ben-Hur M. 2004. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1): 234-242.
- Lavkulich L.M. 1981. Methods manual, pedology laboratory. Department of Soil Science, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Lebron I., Suarez D.L., and Yoshida T. 2002. Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Science Society American Journal*, 66: 92-98.
- Leroy B.L.M., Herath H.M., Sleutel S., De Neve S., Gabriels D., Reheul D., and Moens M. 2008. The quality of exogenous organic matter: short-term effects on soil physical properties and soil organic matter fractions. *Soil Use and Management*, 24: 139-147.
- Levy G.J., Goldstein D., and Mamedov A.I. 2005. Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: Combined effects of salinity, sodicity, and rate of wetting. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3): 653-662.
- MacDonald A.M., Maurice L., Dobbs M.R., Reeves H.J., and Auton C.A. 2012. Relating in situ hydraulic conductivity, particle size and relative density of superficial deposits in a heterogeneous catchment. *Journal of Hydrology*, 434: 130-141.
- Marcolin C.D., and Klein V.A. 2011. Determination of relative soil density through a pedotransfer function of maximum bulk density. *Acta Scientiarum Agronomy*, 33(2):349-354
- Merdun H., Cinar O., 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 and Tillage Research*, 90: 108-116.
- Miller J.J., and Curtin D. 2006. Electrical conductivity and soluble ions. In: Carter M.R., Gregorich E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Boca Raton, pp. 161–171.
- Moazenzadeh R., Ghahraman B., Fathalian F., and Khoshnood Yazdi A.A. 2009. Effect of type and number of input variables on moisture retention curve and saturated hydraulic conductivity prediction. *Journal of Water and Soil*, 23(3): 57-70. (In Persian).
- Navabian M., Liaghat A.M., and Homae M. 2004. Estimating soil saturated hydraulic conductivity using pedotransfer functions. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 4(16): 1-11.

- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In: Method of Soil Analysis*. 2nd Edition, American Society of Agronomy, Madison, pp. 539-579.
- Nemes A., Rawls W.J., and Pachepsky Y.A. 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 1330-1337.
- Pachepsky Y.A., Rawls W.J., and Lin H.S. 2006. Hydropedology and pedo-transfer functions. *Geoderma*, 131: 308-316.
- Papanicolaou A.T.N., Elhakeem M., Wilson C.G., Burras C.L., West L.T., Lin H.H., and Oneal B.E. 2015. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity at the hillslope scale: Understanding the role of land management and erosional effect. *Geoderma*, 243: 58-68.
- Papanicolaou A.N., Elhakeem M., Wilson C.G., Burras C.L., and Oneal B. 2008. Observations of soils at the hillslope scale in the Clear Creek Watershed in Iowa, USA. *Soil Survey Horizons Journal*, 49: 83-86.
- Philip J.R. 1992. Falling head ponded infiltration. *Water Resources Research*, 28: 2147-2148.
- Rawls W.J., Gimenez D., and Grossman R. 1998. Use of soil texture, bulk density, and slope of the water retention curve to predict saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the ASAE*, 41(4): 983-988.
- Rayment G.E., Higginson F.R. 1992. Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods. Inkata Press, Melbourne.
- Reynolds W.D., Bowman B.T., Brunke R.R., Drury C.F., and Tan C.S. 2000. Comparison of Tension Infiltrometer, Pressure Infiltrometer, and Soil Core Estimates of Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 478-484.
- Reynolds W.D., Drury C.F., Tan C.S., Fox C.A., and Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3): 252-263.
- Reynolds W.D., and Elrick D.E. 1992. Methods for analyzing constant head well permeameter data. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 320-323.
- Reynolds W.D. 2006. Saturated hydraulic properties. Ring infiltrometer. *In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (Ed.), Soil sampling and method of analysis- Part 77*. Taylor and Francis Group, LLC Published, pp. 1043-1056.
- Shukla M.K., and Lal R. 2005. Erosional effects on soil physical properties in an on-farm study on Alfisols in West Central Ohio. *Soil Science*, 170(6): 445-456.
- Slazar O., Westrom I., and Joel A. 2008. Evaluation of DRAINMOD using saturated hydraulic conductivity estimated by a pedotransfer function model. *Agricultural Water Management*, 95(10): 1135-1143.
- Sobieraj J.A., Elsenbeer H., and Vertessy R.A. 2002. Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity. *Journal of Hydrology*, 251: 202-220.
- Srivastava P.K., Gupta M., Pandey A., Pandey V., Singh N., and Tewari S.K. 2014. Effects of sodicity induced changes in soil physical properties on paddy root growth. *Journal of Plant, Soil and Environmental*, 60(4): 165-169.
- Van Bavel C.H.M. 1949. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 14: 20-24.
- Wagenet R.J., Bouma J., and Grossman R.B. 1991. Minimum data sets for use of soil survey information in soil interpretive models. *In: Mausbach M.J., and Wilding L.P. (Ed.), Spatial Variabilities of Soils and Landforms*. SSSA Special Publied, SSSA, Madison, WI.
- 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.
- Wosten J.H., Pachepsky M., Ya A., and Rawls W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, 251: 123-150.
- Zhang Z.F., and Ward A.L. 2011. Determining the porosity and saturated hydraulic conductivity of binary mixtures. *Vadose Zone Journal*, 10(1): 313-321.

Testing of New Inputs to Predict Near-Saturated Soil Hydraulic Conductivity

Peyman Shaker Shahmarbeigloo¹, Habib Khodaverdiloo^{2*}, Hamidreza Momtaz³

(Received: July 2017

Accepted: January 2018)

Abstract

Near-saturated soil hydraulic conductivity (K_s) is a key property for several purposes including simulation of hydrological processes, determination of unsaturated soil hydraulic conductivity function and modelling water flow and solute transport. Since it is soil structure-dependent, field measurement techniques should be used to minimize disturbance of the sampled soil volume. Because of high spatiotemporal variability of K_s , replicated measurements need to be carried out, so that, the method to be applied should be simple and rapid enough as the simplified falling head (SFH) technique is. Alternatively, pedotransfer functions (PTFs) could also be utilized for indirect prediction of K_s through the surrounding soil attributes. The objective of this study was to test some new inputs to predict the K_s of salt-affected soils adjacent to Lake Urmia. A 32 cm diameter ring was used to determine K_s by the SFH technique in soils with different salinity (electrical conductivity of saturated extract, $EC_e = 0.1 - 95.3$ dS/m) and sodicity (exchangeable sodium percentage, $ESP = 4.0 - 70.9$ %) levels. A total of 190 SFH runs were carried out, adjacent to each of which, some undisturbed soil cores (5 cm in height by 5 cm in diameter) and disturbed soil samples were randomly collected from the surface soil and were analyzed for their physicochemical properties. The studied soils mainly had moderate ($\approx 40\%$) to moderately rapid ($\approx 48\%$) conductivities. Correlation and stepwise regression analysis showed that K_s was correlated negatively with bulk density (ρ_b) ($r = -0.205$), index of crusting (I_c) ($r = -0.180$), and degree of compaction (SDC) ($r = -0.206$) ($P \leq 0.01$) and positively with structural stability index (SSI) ($r = 0.184$) and geometric mean diameter of soil aggregates (GMD) ($r = 0.157$) ($P \leq 0.05$). Furthermore, the K_s had negative correlation with both soil EC_e and ESP .

Keywords: Simplified falling head (SFH), Soil hydraulic conductivity, Spatial variability, Pedotransfer functions

Shaker Shahmarbeigloo P., Khodaverdiloo H. and Momtaz H.R. 2019. Testing of new inputs to predict near-saturated soil hydraulic conductivity. *Applied Soil Research*, 7(1): 54-69.

1- Graduated MSc Student, Department of Soil Science, Urmia University, Iran

2- Associate Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Iran

3- Assistant Professor Department of Soil Science, Urmia University, Iran

* Corresponding Author Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir