گزارش کوتاه علمی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و دوم، شماره پنجم، ۱۳۹٤
http://jwsc.gau.ac.ir

استفاده از خصوصیات هیدرولیکی برای تخمین هدایت گرمایی خاک

*حسین بیات[۱] و شیما صاحبی‌همراه[۲]

[۱]دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، [۲]دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۳۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: ویژگی‌های گرمایی خاک در حوزه‌های مختلف کشاورزی، مهندسی و علوم خاک اهمیت بالایی دارند. همچنین این ویژگی‌ها از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده انتشار گرما در خاک به‌شمار می‌روند و برای مدل‌سازی انتقال گرما در خاک مورد نیاز می‌باشند. با این وجود اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی‌ها امری دشوار، هزینه‌بر و وقت‌گیر می‌باشد و تغییرپذیری آن‌ها به‌طور اساسی بررسی نشده است. از این‌رو در این پژوهش سعی شد هدایت گرمایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های گرمایی خاک با استفاده از توابع انتقالی برآورد گردد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش هدایت گرمایی خاک با استفاده از ۱۵۶ داده در ۱۲ مرحله، با استفاده از روش رگرسیونی برآورد شد. به‌طوری‌که در مرحله اول فقط از اجزای بافت خاک و در مراحل بعدی از ویژگی‌های جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی و خصوصیات هیدرولیکی خاک شامل رطوبت باقی‌مانده، رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، هدایت هیدرولیکی اشباع و ضرایب آلفا و n مدل ون‌گنوختن، به‌عنوان متغیرهای ورودی برای برآورد هدایت گرمایی استفاده شد. دقت برآورد هدایت گرمایی در هر مرحله با استفاده از آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و دیگر آماره‌ها ارزیابی شد.

یافته‌ها: دقیق‌ترین مدل‌ها برای تخمین هدایت گرمایی مدل‌های ۲ با ورودی‌های رس، نسبت سیلت به شن و جرم مخصوص ظاهری با مقدار RMSE و R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۱۸۶، ۰/۶۲۸ و ۱۲ با ورودی‌های رطوبت اشباع و باقی‌مانده، ضرایب n و آلفا مدل ون‌گنوختن با مقدار RMSE و R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۲۳۵ و ۰/۳۱۹ در مرحله ارزیابی بودند. مقدار RI به‌دست آمده برای ۲ مدل مذکور در فوق نیز بر صدق این موضوع تأکید دارد زیرا در مرحله ارزیابی مقدار RI مدل ۲ و ۱۲ به‌ترتیب برابر ۴۲/۴ و ۲۷/۰ درصد بود. مدل ۷ با ورودی‌های رس، نسبت سیلت به شن و کربن آلی با مقدار RMSE و R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۳۲۶ و ۰/۰۶۴ ضعیف‌ترین مدل بود.

نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست آمده نشان داد هدایت گرمایی به‌طور موفقیت‌آمیزی با استفاده از خصوصیات هیدرولیکی و سایر خصوصیات فیزیکی قابل تخمین می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: توابع انتقالی، خصوصیات هیدرولیکی، روش رگرسیونی، هدایت گرمایی

* مسئول مکاتبه: h.bayat@basu.ac.ir

مقدمه

ویژگی‌های گرمایی خاک در حوزه‌های مختلف کشاورزی، مهندسی و علوم خاک اهمیت بسیار بالایی دارند. جوانه‌زنی بذر، استقرار و رشد نهال و توسعه محصولات کشاورزی تحت‌تأثیر خرد اقلیم[1] قرار می‌گیرند. ویژگی‌های گرمایی خاک نیز از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خرد اقلیم محسوب می‌شوند (1, 10). همچنین این ویژگی‌ها برای مدل‌سازی انتقال گرما در خاک مورد نیاز می‌باشند (7).

هدایت گرمایی خاک اندازه انتقال گرما را بیان می‌کند و به‌شدت توسط خصوصیات فیزیکی خاک مانند جرم مخصوص ظاهری، مقدار رطوبت، توزیع اندازه ذرات و آرایش ساختمانی خاک تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (18). هیلل (1998) گزارش نمود که با افزایش جرم مخصوص ظاهری تماس بین ذرات خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه هدایت گرمایی نیز افزایش می‌یابد (13).

رژیم رطوبتی خاک ویژگی‌های گرمایی خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی، که چگونگی رفتار آب در سه فاز خاک را بیان می‌نمایند برای درک بهتر فرآیندهای گرمایی در خاک ضروری می‌باشد (6).

به‌دلیل فقدان اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک پژوهشگران به‌طور مداوم آن‌ها را توسط روش‌های مختلف تخمین می‌زنند و سپس موارد خطا یا عدم اطمینان هر یک از روش‌ها را بررسی می‌نمایند (16). یکی از این روش‌ها توابع انتقالی می‌باشد که با استفاده از داده‌های زودیافت خاک داده‌های دیریافت خاک را برآورد می‌کنند. توابع انتقالی در تخمین ویژگی‌های متفاوتی همانند منحنی مشخصه آب خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و غیره به‌کار گرفته شده‌اند. اما تاکنون در هیچ منبعی تخمین هدایت گرمایی و یا سایر ویژگی‌های گرمایی مشابه (ظرفیت گرمایی و ضریب پخشیدگی گرمایی خاک) گزارش نشده است و این نکته یکی از انگیزه‌های اصلی انجام این پژوهش بود. بنابراین هدف این مطالعه تخمین هدایت گرمایی خاک با استفاده از خصوصیات هیدرولیکی و سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌عنوان تخمین‌گر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش داده‌های مربوط به منطقه SGP97[2]، واقع در ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفت (17). شرح جزئیات روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک توسط شوز و همکاران (2002) و موهانتی و همکاران (1999) بیان شده است (17, 19). متغیرهای انتخاب شده برای ایجاد توابع انتقالی به‌همراه علائم اختصاری آن‌ها در جدول ۱ معرفی شده‌اند.

همه متغیرها با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب[3] (آزمون کولموگروف- اسمیرنوف) از نظر نرمال بودن آزمون شدند. برای ایجاد توابع انتقالی حدود دوسوم (۱۰۰ عدد) از داده‌ها برای آموزش و حدود یک‌سوم (۵۶ عدد) از داده‌ها برای ارزیابی توابع ایجاد شده به‌صورت تصادفی انتخاب گردیدند. هدایت گرمایی خاک به‌عنوان متغیر وابسته و سایر متغیرها (جدول ۲) به‌عنوان متغیر مستقل مدل استفاده شدند. ایجاد توابع در ۱۲ مرحله با روش رگرسیون خطی صورت گرفت. انتخاب متغیرهای ورودی بر اساس قابلیت دسترسی آن‌ها برای کاربران و بررسی میزان بهبود تخمین‌ها با اضافه کردن هر کدام از آن‌ها انجام شده است. روش‌های گام به گام تجزیه رگرسیون نیز مورد بررسی قرار گرفتند، ولی چون انتخاب متغیرهای ورودی را بر اساس قابلیت دسترسی انجام نمی‌دادند و بعضاً دقت مدل را کاهش می‌دادند، نتایج آن

1- Microclimate

2- Southern Great Plains 1997

3- MINITAB

گزارش نشد. در مرحله اول فقط از ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات (رس و نسبت سیلت به شن) به‌عنوان متغیر ورودی استفاده گردید و هدایت گرمایی تخمین زده شد. در مراحل بعدی متغیرهای جدیدی به جمع ورودی‌های مدل اضافه شدند. در تمام توابع ایجاد شده مشکل هم‌راستایی چندگانه با استفاده از آماره فاکتور تورم واریانس[1] بررسی شد.

برای بررسی صحت و اعتبار مدل‌ها و مقایسه عملکرد آن‌ها از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)[2]، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)[3] (15)، معیار اطلاعات آکایک (AIC)[4] (3) و بهبود نسبی[5] (RI) (4) استفاده گردید.

جدول ۱- علائم متغیرهای استفاده شده در این پژوهش.

Table 1. Abbreviation of the variables used in this study.

علامت Abbreviation	واحد Unit	متغیر Variable
TC	(W/m °C)	هدایت گرمایی (Thermal conductivity)
WCR	(cm^3 cm^{-3})	رطوبت باقی‌مانده (Residual water content)
WCS	(cm^3 cm^{-3})	رطوبت اشباع (Saturated water content)
OC	(%)	کربن آلی (Organic carbon)
BD	(g cm^{-3})	جرم مخصوص ظاهری (Bulk density)
FC	(cm^3 cm^{-3})	ظرفیت زراعی (Field capacity)
K_s	(cm s^{-1})	هدایت هیدرولیکی اشباع (Saturated hydraulic conductivity)
α	(1 cm^{-1})	ضریب آلفا مدل ون گنوختن (Slpha coefficient of the van Genuchten model)
Si/Sa	(-)	نسبت سیلت به شن (The ratio of silt to sand)
Cl	(%)	رس (Clay)

1- Variance inflation factor

2- Correlation coefficient
3- Root mean square error
4- Akaike information criterion
5- Relative improvement

جدول ۲- متغیرهای ورودی استفاده شده در هر مرحله (مدل).

Table 2. The input variables used in each step (model).

مدل model	ورودی‌های مدل Model inputs
1	رس و نسبت سیلت به شن Clay and the ratio of silt to sand
2	رس، نسبت سیلت به شن و جرم مخصوص ظاهری Clay, the ratio of silt to sand and bulk density
3	رس، نسبت سیلت به شن و رطوبت اشباع Clay, the ratio of silt to sand and saturated water content
4	رس، نسبت سیلت به شن و ظرفیت زراعی Clay, the ratio of silt to sand and field capacity
5	رس، نسبت سیلت به شن، ظرفیت زراعی و رطوبت اشباع Clay, the ratio of silt to sand, field capacity and saturated water content
6	رس، نسبت سیلت به شن و رطوبت باقی‌مانده Clay, the ratio of silt to sand and residual water content
7	رس، نسبت سیلت به شن و درصد کربن آلی Clay, the ratio of silt to sand and organic carbon
8	رس، نسبت سیلت به شن و هدایت هیدرولیکی اشباع Clay, the ratio of silt to sand and saturated hydraulic conductivity
9	رس، نسبت سیلت به شن، رطوبت اشباع و رطوبت باقی‌مانده Clay, the ratio of silt to sand, residual and saturated water contents
10	رس، نسبت سیلت به شن، رطوبت اشباع، رطوبت باقی‌مانده، α و n Clay, the ratio of silt to sand, residual and saturated water contents, α and n parameters of the van Genuchten model
11	رطوبت اشباع و رطوبت باقی‌مانده Residual and saturated water contents
12	رطوبت اشباع، رطوبت باقی‌مانده، α و n Residual and saturated water contents, α and n parameters of the van Genuchten model

نتایج و بحث

ارزیابی مدل ۱: در مرحله اول (مدل یک) ویژگی‌های Cl و Si/Sa به‌عنوان تخمین‌گر برای تخمین هدایت گرمایی با روش رگرسیون خطی مورد بهره‌گیری قرار گرفتند. به‌نظر می‌رسد که این متغیرها به تنهایی تخمین‌گرهای خوبی برای تخمین هدایت گرمایی نیستند. زیرا این مدل در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی کم‌ترین مقدار R^2 و بیش‌ترین مقدار RMSE را نشان داد (جدول ۳). اوت و همکاران (2012) نیز بیان نمودند هنگامی که ویژگی‌های گرمایی توسط داده‌های بافت خاک محاسبه می‌شوند به جهت اثرات پیچیده اندازه و شکل ذرات خاک و نحوه برداشت نمونه، مستعد خطا می‌باشند (9).

ارزیابی مدل ۲: در مدل دوم استفاده از BD موجب افزایش R^2 و کاهش معنی‌دار AIC و RMSE در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی گردید و قابلیت تخمین مدل افزایش یافت (جدول ۳). اکوو و همکاران (2006) مشاهده نمودند که رابطه بین هدایت گرمایی و BD در سه نوع خاک با مقدار رطوبت متفاوت، خطی و معنی‌دار (در سطح ۰/۱ درصد) بود (8).

افزایش هدایت گرمایی با افزایش BD را می‌توان به افزایش تماس بین ذرات اولیه خاک به جهت افزایش حجم فاز جامد نسبت داد (2, 13).

ارزیابی مدل ۳: در مدل سوم علاوه بر Cl و Si/Sa از WCR نیز به‌عنوان تخمین‌گر استفاده شد که سبب کاهش معنی‌دار RMSE و AIC و افزایش R^2 نسبت به مدل یک گردید. احتمالاً علت نتیجه حاصله این است که براساس نتایج لیپیک و همکاران (2007) رابطه هدایت گرمایی و رطوبت غیرخطی می‌باشد و در رطوبت‌های کم افزایش اندک رطوبت خاک منجر به افزایش قابل‌توجهی در هدایت گرمایی می‌شود (14).

جدول ۳- آماره‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های برآوردکننده هدایت گرمایی خاک.

Table 3. The criteria of evaluating the performance of the models in the estimation of the thermal conductivity.

مدل Model	آموزش Train				ارزیابی Test			
	RI	R^2	AIC/n	RMSE, Ln (w/m°c)	RI	R^2	AIC/n	RMSE, Ln (w/m°c)
1		0.116	-2.13	0.340		0.061	-2.33	0.323
2	17.1	0.395	-2.51*	0.282	42.4	0.628	-3.32*	0.186
3	10.1	0.306	-2.34*	0.306	25.9	0.422	-2.82*	0.239
4	4.7	0.167	-2.23	0.324	5.6	0.107	-2.34*	0.305
5	10.5	0.312	-2.35*	0.304	33.2	0.443	-3.02*	0.215
6	2.4	0.165	-2.18	0.332	11.4	0.173	-2.46*	0.286
7	-1.0	0.118	-2.11	0.344	-1.0	0.064	-2.20	0.326
8	13.7	0.361	-2.43*	0.294	5.4	0.114	-2.33	0.305
9	10.1	0.307	-2.34*	0.306	26.2	0.427	-2.82*	0.238
10	19.4	0.442	-2.56*	0.274	27.9	0.485	-2.87*	0.233
11	10.7	0.244	-2.36*	0.304	27.0	0.376	-2.85*	0.235
12	22.1	0.335	-2.63*	0.265	27.0	0.319	-2.85*	0.235

ارزیابی مدل‌های ٤ و ٥: استفاده از متغیر FC به‌همراه Cl و Si/Sa در مدل چهارم و متغیرهای WCR و FC به اضافه Cl و Si/Sa در مدل پنجم باعث بهبود قابلیت تخمین هدایت گرمایی این دو مدل نسبت به مدل یک گردید (جدول ۳). احتمالاً یکی از مهم‌ترین دلایل این نتیجه تأثیر بالای میزان رطوبت خاک بر هدایت گرمایی باشد. نتایج بسیاری از دانشمندان نیز نشان داده است که رطوبت یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر هدایت گرمایی بوده و افزایش رطوبت منجر به افزایش هدایت گرمایی نیز می‌گردد (1, 2, 5, 20). همچنین بین هدایت گرمایی و WCR همبستگی معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) وجود دارد. پژوهش‌های بریستو (1998) نیز نشان داد که با افزایش رطوبت خاک به‌سمت رطوبت اشباع به‌دلیل افزایش پیوستگی بین ذرات خاک در اثر جایگزین شدن هوا توسط آب هدایت گرمایی خاک نیز افزایش می‌یابد (5). لیپیک و همکاران (2007) نیز مشاهده نمودند که در رطوبت‌های نزدیک FC نسبت به حالتی که رطوبت کم می‌باشد، افزایش هدایت گرمایی بیش‌تر بود (14).

ارزیابی مدل ٦: در مدل ششم بهره‌گیری از WCR قابلیت تخمین این مدل را نسبت به مدل یک بهبود بخشید و این بهبود در مرحله ارزیابی معنی‌دار بود (جدول ۳). شاید علت نتیجه حاصله تأثیر بالای میزان رطوبت خاک بر هدایت گرمایی باشد. ابو- حمده و ریدر (2000) نیز در پژوهش‌های خود مشاهده نمودند که با افزایش رطوبت هدایت گرمایی خاک افزایش می‌یابد (1).

ارزیابی مدل ۷: استفاده از متغیر OC در مدل هفتم باعث افزایش RMSE و AIC در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی نسبت به مدل یک گردید (جدول ۳). احتمالاً این نتیجه به‌علت همبستگی ضعیف بین هدایت گرمایی و OC باشد. هر چند ابو- حمده و ریدر (2000) گزارش نمودند که با افزایش محتوی ماده آلی خاک هدایت گرمایی خاک کاهش می‌یابد (1).

ارزیابی مدل ۸: در مدل هشتم استفاده از K_s به‌عنوان تخمین‌گر همراه ورودی‌های مرحله اول موجب بهبود این مدل نسبت به مدل یک شد و این بهبود در مرحله آموزش معنی‌دار بود. مقدار RI در مرحله آموزش و ارزیابی به‌ترتیب برابر ۱۳ و ۵/۴ درصد به‌دست آمد (جدول ۳). چرا که تغییر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع و قابلیت هدایت هوا از فاکتورهای داخلی مؤثر بر ویژگی‌های گرمایی خاک می‌باشند (6).

ارزیابی مدل ۹: در مدل نهم در مقایسه با مدل یک در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی مقدار R^2 بهبود یافت و مقادیر RMSE و AIC به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کردند (جدول ۳). مقادیر به‌دست آمده برای همه معیارهای این مدل مشابه مقادیر به‌دست آمده برای مدل سوم (که از ورودی‌های WCR و Cl و Si/Sa استفاده شده است) است. با استناد به این نتایج می‌توان بیان کرد که تأثیر WCS نسبت به WCR بر هدایت گرمایی بیش‌تر می‌باشد. نتایج مطالعات پژوهشگران دیگر نیز بر اهمیت تأثیر این ویژگی بر هدایت گرمایی تأکید دارند. برای مثال بریستو (1998) نیز مشاهده نمود که با افزایش رطوبت هدایت گرمایی به سرعت افزایش می‌یابد (5).

ارزیابی مدل ۱۰: استفاده از WCS، WCR و ضرایب α و n مدل ون‌گنوختن در مدل دهم به‌طور قابل‌توجهی R^2 را افزایش داد و موجب شد این مدل در مرحله آموزش بیش‌ترین مقدار R^2 را نسبت به سایر مدل‌ها داشته باشد. همچنین مقادیر RMSE و AIC در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی به‌طور معنی‌داری نسبت به مدل یک کاهش یافتند (جدول ۳). تأثیر معنی‌دار متغیرهای α و n بر قابلیت تخمین مدل ۱۰ احتمالاً به این علت است که چگونگی تغییرات این پارامترها روند تغییرات رطوبت خاک را نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر هدایت گرمایی محسوب می‌شود. حق‌شناس و بیگی (2010) بیان نمودند که کاهش n به معنای کاهش از دست دادن آب خاک است و کاهش α در خاک شنی نشان‌دهنده بهبود وضعیت رطوبتی خاک می‌باشد (11). از سوی دیگر این دو پارامتر نشان‌دهنده اندازه و پوستگی منافذ می‌باشند که به‌شدت هدایت گرما در خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین استفاده از این دو متغیر به‌عنوان ورودی، موجب بهبود تخمین هدایت گرمایی گردید.

ارزیابی مدل ۱۱: استفاده از متغیرهای WCR و WCS بدون Cl و Si/Sa در مدل یازدهم باعث افزایش جزئی قابلیت تخمین این مدل نسبت به مدل یک شد (جدول ۳). احتمالاً به این علت که اهمیت مقدار رطوبت خاک در توزیع هدایت گرمایی بیش‌تر از بافت خاک می‌باشد. اکوو و همکاران (2006) نیز بیان نمودند که تأثیر تغییرات رطوبت خاک بر هدایت گرمایی نسبت به جرم مخصوص ظاهری و اندازه

ذرات بیش‌تر می‌باشد (8). لیپیک و همکاران (2007) نیز گزارش کردند که توزیع مکانی هدایت گرمایی غالباً مشابه تغییرات رطوبت حجمی است (14).

ارزیابی مدل ۱۲: در مدل دوازدهم نیز از همان ورودی‌های مدل دهم (WCR، WCS، α و n) به‌جز Cl و Si/Sa جهت تخمین هدایت گرمایی استفاده گردید که موجب بهبود معنی‌دار دقت تخمین در هر دو مرحله آموزش و ارزیابی نسبت به مدل یک گردید. ولی نسبت به مدل ۱۰ تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نشد (جدول ۳). این نتیجه اهمیت بیش‌تر متغیرهای رطوبتی نسبت به اجزای بافت خاک در تخمین هدایت گرمایی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش سعی گردید به‌طور غیرمستقیم و از طریق ایجاد توابع انتقالی هدایت گرمایی با بالاترین دقت ممکن برآورد شود. همچنین میزان تأثیر هر یک از عوامل فیزیکی بر عملکرد توابع در برآورد این ویژگی مورد بررسی قرارگرفت. هدف از این امر پی بردن به بهترین خصوصیات ممکن برای تخمین هدایت گرمایی و تا حد امکان بهبود توابع پیش‌بینی‌کننده این ویژگی بود. بنابراین برای ایجاد توابع علاوه بر برخی خصوصیات فیزیکی از خصوصیات هیدرولیکی نیز استفاده گردید. بهره‌گیری از خصوصیات هیدرولیکی نه تنها منجر به بهبود قابلیت تخمین توابع گردید بلکه باعث شد این توابع بهترین نتایج تخمین را داشته باشند.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از جناب آقای پرفسور موهانتی به‌علت همکاری صمیمانه جهت در اختیار گذاشتن داده‌های این پژوهش سپاسگزاری نمایند.

منابع

1.Abu-Hamdeh, N.H., and Reeder, R.C. 2000. Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 1285-1290.
2.Abu-Hamdeh, N.H. 2003. Thermal properties of soils as affected by density and water content. Biosyst. Eng. 86: 97-102.
3.Akaike, H. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: Petrox, B., and F. Csaki (eds.), Symposium on Information Theory, Akademiai Kiado, Budapest, Hungary. 267p.
4.Bayat, B., Neyshabouri, M.R., Hajabbasi, M.A., Mahboubi, A.A., and Mosaddeghi, M.R. 2008. Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. Turk. J. Agric. For. 32: 425-433.
5.Bristow, K.L. 1998. Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. Agr. Forest Meteorol. 89: 75-84.
6.Dec, D.A. 2006. Thermal properties in Luvisols under conventional and conservation tillage treatment. Ph.D. Thesis. Universität zu Kiel. 151p.
7.De Vries, D.A. 1963. Thermal properties of soils, P 210-235. In: Van Wijik, W.R. (ed.), Physics of Plant Environment. North-Holland, Amsterdam.
8.Ekwue, E.I., Stone, R.J., and Bhagwat, D. 2006. Thermal conductivity of some compacted trinidadian soils as affected by peat content. Biosyst. Eng. 94: 461-469.
9.Evett, S.R., Agam, N., William, P.K., Paul, D.C., and Robert, C.S. 2012. Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux: Comparison to soil heat flux plates. Adv. Water Resour. 50: 41-54.

10. Ghauman, B.S., and Lal, R. 1985. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal capacity of some Nigerian soils. Soil. Sci. 139: 74-80.
11. Haghshenas Gargabi, M., and Beygi Harchagani, H.A. 2010. The effect of Mianeh zeolite on water retention and water retention models in two soil textures. Iran. Water Res. J. 71: 89-99. (In Persian)
12. Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. ACADEMIC PRESS, San Diego, 771p.
13. Lipiec, J., and Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. Geoderma. 116: 107-136.
14. Lipiec, J., Usowicz, B., and Ferrero, A. 2007. Impact of soil compaction and wetness on thermal properties of sloping vineyard soil. Int. J. Heat Mass Tran. 50: 3837-3847.
15. Moghadam, M.R. 2001. Statistical and descriptive ecology vegetation. Tehran University Press, 285p. (In Persian)
16. Mohanty, B.P., and Skaggs, T.H. 2001 Spatio-temporal evolution and time stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope and vegetation, Adv. Water Resour. 24: 1051-1067.
17. Mohanty, B.P., Shouse, P.J., Miller, D.A., and van Genuchten, M.T. 1999. Soil property measurement: SGP97, Oklahoma, http://daac.gsfc.nasa.gov/ CAMPAIGN_DOCS/SGP97/ arssl.html, GSFC Earth Sci. Distrib. Active Arch. Cent. , Greenbelt, Md.
18. Rubio, C.M., Cobos, D.R., and Ferrer, R.J. 2009. A new analytical laboratory procedure for determining the thermal properties in porous media, based on the American standard D. 533-405. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol IX, O. Silva et al. Barcelona.
19. Shouse, P.J., Mohanty, B.P., Miller, D.A., Jobes, J.A., Fargerlund, J., Russell, W.B., Skaggs, T.H., and van Genuchten, M.T. 2002. Soil properties of dominant soil types of the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment: Oklahoma, report, George E. Brown Salinity Lab., Riverside, Calif.
20. Usowicz, B. 2005. Rozkład właściwości cieplnych gleby na czarnym ugorze I pod murawą. Acta Agrophysica, Lublin. 11p.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(5), 2016
http://jwsc.gau.ac.ir

Short Technical Report

Estimation of soil thermal conductivity using hydraulic properties

***H. Bayat[1] and Sh. Sahebi Hamrah[2]**
[1]Associate Prof., Dept. of Soil Science, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran,
[2]M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran
Received: 08/22/2014; Accepted: 03/08/2015

Abstract

Background and Objectives: Thermal properties of soils are very important in different areas of agriculture, engineering and soil science. Also these properties are the most important factors controlling the diffusion of heat in the soil and are needed to model heat transfer in soil. Nevertheless their direct measurements are difficult, costly and time-consuming and their variability have not been studied basically. Thus, in this study thermal conductivity of the soil was estimated using pedotransfer functions.

Materials and Methods: In this study 156 soil samples data were used to create pedotransfer functions in 12 steps by regression method for the estimation of thermal conductivity. At the first step, only the soil texture fractions were used as input variables. Later in other steps bulk density, organic carbon and hydraulic properties including residual and saturated soil water contents, field capacity, saturated hydraulic conductivity and *n* and alpha coefficients of van Genuchten model were applied to estimate thermal conductivity. Precision of the estimation of the hydraulic conductivity at different steps was evaluated using root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2) and other statistical criteria.

Results: The model 2 using clay, silt/sand and bulk density as inputs and model 12 using the residual and saturated moisture contents, *n* and alpha parameters of van Genuchten model as inputs were the most accurate models. The model 2 showed RMSE and R^2 values of 0.186 and 0.628, respectively, and the model 12 showed RMSE and R^2 values of 0.235 and 0.319, respectively, in the evaluation step. Also relative improvement (RI) of 42.4% and 27.0% obtained for the models 2 and 12, respectively, confirmed their best predictions. The model 7, with the inputs of clay, silt/sand and organic carbon resulted in the RMSE and R^2 values of 0.326 and 0.064, respectively, was the weakest model.

Conclusion: The results showed that thermal conductivity was satisfactorily estimated using hydraulic and other physical properties as predictors.

Keywords: Hydraulic properties, Pedotransfer functions, Regression, Thermal conductivity

* Corresponding Author; Email: h.bayat@basu.ac.ir