

تخمین نقطه‌ای منحنی رطوبتی خاک با استفاده از برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک

مهسا کاظمی پور اسفهلان^۱، محمدحسین محمدی^{۲*}، علیرضا واعظی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶)

چکیده

منحنی رطوبتی از ویژگی‌های بنیادی خاک بوده که برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال توأمان آب و املاح در بخش غیراشباع خاک کاربرد دارد. بدلیل وقت‌گیر و پرهزینه بودن اندازه‌گیری منحنی رطوبتی خاک، امروزه روش‌های غیرمستقیم مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف تخمین منحنی رطوبتی خاک با استفاده از حدود آتربرگ و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک برنامه‌ریزی شد. در این پژوهش تعداد ۴۳ نمونه خاک از مناطق شمال غرب ایران برداشت شد به طوری که ۲۸ نمونه برای توسعه مدل‌ها و ۱۵ نمونه بمنظور ارزیابی اعتبار مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. منحنی رطوبتی خاک در مکش‌های (۰/۱)، (۰/۲)، (۰/۳)، (۰/۴)، ۱، ۲، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ (بار) و ویژگی‌های فیزیکی و حدود آتربرگ خاک‌ها به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. پس از بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل و ترکیبی در محیط نرم افزار SPSS با روش رگرسیون گام به گام، مناسب‌ترین ترکیب از متغیرهای مستقل انتخاب و معادله رگرسیونی چند متغیره برای تخمین منحنی رطوبتی ارائه شد. نتایج نشان داد که از بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، درصد رس، جرم ویژه ظاهری، حد روانی و خمیری بیش‌ترین همبستگی را با مقدار رطوبت داشتند. مقادیر آماره‌های ضریب تبیین (۸۹ درصد) و مجذور میانگین مربعات خطا (۰/۰۲۸) حاصل از تجزیه‌های آماری در کلیه مکش‌ها نشان دهنده اعتبار بالای توابع پیشنهادی برای تخمین منحنی رطوبتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خاک غیراشباع، انتقال آب در خاک، توابع انتقالی نقطه‌ای، حدود آتربرگ، ویژگی‌های خاک

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (مکاتبه کننده)

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

*پست الکترونیک: hmohmad@ut.ac.ir

مقدمه

منحنی مشخصه رطوبتی خاک^۱ ضمن بیان تأثیر ساختمان خاک، تخلخل، توزیع اندازه خلل و فرج و جذب سطحی بر رفتار آب در خاک، امکان آگاهی از نحوه نگهداری آب و مقدار آب قابل ذخیره در خاک در هر پتانسیل را فراهم می‌کند (Desbarats, 1995). منحنی رطوبتی خاک، به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تعیین می‌شود. روش‌های مستقیم اغلب وقت‌گیر و پرهزینه و نیازمند تجهیزات آزمایشگاهی گران‌قیمت بوده (Abbasi, 2007) که از این‌رو در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های غیرمستقیم بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Tomasella et al., 2003; Huang et al., 2006; Jana et al., 2007; Weynants et al., 2009; Khodaverdiloo et al., 2011). توابع انتقالی^۲ یکی از روش‌های غیرمستقیم بوده که ویژگی‌های پایه‌ای و قابل دسترس خاک را به سایر ویژگی‌های خاک ارتباط می‌دهند. اغلب توابع انتقالی برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی زود یافت خاک مانند بافت خاک، جرم ویژه ظاهری و یا میزان ماده آلی استفاده کرده (Rawls & Pachepsky, 2002; Haverkamp et al., 2005) که ویژگی‌های مکانیکی خاک کم‌تر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. خمیرایی یا پلاستیسیته^۳ از شاخص‌های مکانیکی خاک محسوب شده که جزء ویژگی‌های خاک-های ریز بافت می‌باشد. در واقع شکل‌پذیری به تعداد لایه-های مولکول‌های آب جذب شده به سطح ذرات رس بستگی دارد (Grimshaw, 1971). خاک‌های سنگین بافت بر اساس درصد محتوای رطوبتی خود دارای یکی از حالت‌های جامد، نیمه جامد، خمیری می‌باشد. به عبارتی درصدی از رطوبت که در آن خاک به صورت سیال بوده را حد روانی^۴، درصدی از رطوبت که در آن خاک به صورت خمیری رفتار کرده را حد خمیری^۵ و درصدی از رطوبت که باید به خاک اضافه شود تا از حد خمیری به حد روانی خود برسد را شاخص خمیری^۶ می‌نامند. حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری تحت عنوان حدود آتربرگ^۷ نامیده شده (Grimshaw, 1971) که همبستگی بالایی با

هدایت هیدرولیکی، نفوذپذیری، تورم‌پذیری و مقاومت برشی خاک دارند (Carter, 1993). لیونه و همکاران (Livneh et al., 1970) نیز با استفاده از منحنی رطوبتی خاک، رابطه بین لگاریتم نیروی مکش (بر حسب سانتی-متر آب) و شاخص خمیرایی و حد خمیری را در دامنه‌ای از تغییرات لگاریتم نیروی مکش بین دو تا ۴/۲ و برای خاک‌های مختلف تعیین نموده و روابطی را ارائه کردند. شاخص خمیرایی یک ویژگی قابل تشخیص در خاک بوده که ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Rawls & Pachepsky, 2002). بنابراین هدف از این تحقیق توسعه توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد منحنی رطوبتی با استفاده هم‌زمان از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک و ارزیابی دقت آن‌ها در تعدادی از خاک‌های ایران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش، تعداد ۴۳ نمونه خاک با طیف وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به دو شکل دست نخورده (به حجم ۱۰۰ سانتی‌مترمکعب با استفاده از استوانه‌های فلزی) و دست‌خورده به روش نمونه‌برداری کاملاً تصادفی اعماق صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری از خاک‌های مناطق شمال‌غرب ایران (استان‌های زنجان، اردبیل، همدان، آذربایجان غربی و شرقی و گیلان) برداشته شد. کل خاک‌ها به دو دسته تقسیم شد. به طوری که ۲۸ نمونه خاک برای توسعه مدل‌ها و ۱۵ نمونه برای ارزیابی آن‌ها استفاده شد. پس از آماده سازی نمونه-های خاک در آزمایشگاه و جداسازی ذرات کوچک‌تر از دو میلی‌متر، فراوانی نسبی ذرات خاک به روش هیدرومتر در ۱۲ قرائت (Rowell, 2014) اندازه‌گیری شد. جرم ویژه ظاهری نمونه‌های دست‌نخورده به روش استوانه اندازه-گیری شد (Blake & Hartge, 1986). برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت در مکش‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۱ و ۲ بار از دستگاه صفحات فشاری و در مکش‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار از دستگاه غشای فشاری استفاده شد (Klute & Dirksen, 1986). حدود آتربرگ بر اساس خاک عبوری از الک ۰/۴۲۵ میلی‌متر (شماره ۴۰) اندازه‌گیری شد (ASTM, 2010).

برای اندازه‌گیری حد روانی خاک از دستگاه کاساگرانده استفاده و پس از رسم نمودار درصد رطوبت در مقابل

1. Soil moisture characteristics curve (SMC)
2. Pedotransfer functions (PTFs)
3. Plasticity
4. Liquid Limit (LL)
5. Plastic Limit (PL)
6. Plasticity Index (PI)
7. Atterberg Limits

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن‌ها: y_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \hat{y}_i مقادیر برآورد شده، \bar{y}_i میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

جدول (۱) دامنه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک‌های انتخابی برای توسعه مدل را نشان می‌دهد. بازه تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مورد مطالعه بیان‌گر وجود تنوع در ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. توزیع کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه به نسبت گسترده بوده و به‌طور عمده در کلاس‌های بافتی: رسی، لوم رسی و لوم رسی شنی توزیع شده‌اند (شکل ۱).

مقایسه میانگین‌های داده‌های کمی سری آموزش و آزمون، از آزمون دو نمونه‌ای مستقل t استفاده شد. مقادیر p -value به دست آمده ($p > 0.05$) نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری در داده‌های مرحله آزمون و آموزش وجود ندارد.

جدول (۲) ماتریس ضرایب همبستگی جزئی (۲) بین ویژگی‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۲) بین مقدار رس و سیلت و حدود روانی، خمیری و شاخص خمیرایی همبستگی مثبت و معنی‌دار و با مقدار شن در سطح ($\alpha = 0.01$) همبستگی منفی وجود داشت. ذرات رس و گاهی سیلت باعث ایجاد ویژگی‌های خمیرایی در خاک شده و هر چه مقدار رس خاک بیش‌تر بوده، دامنه‌ای از رطوبت که در آن خاک به صورت خمیر باقی مانده، بیش‌تر شد (Bayburdi, 2014). با افزایش درصد ذرات شن در خاک به دلیل کاهش نیروی جاذبه بین مولکولی حدود روانی و خمیری در خاک کاهش پیدا کرد (Nath & Dalal, 2004). سید و همکاران (Seed et al., 1964) با بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی بر حدود آتربرگ گزارش دادند که حدود روانی و خمیری خاک تحت تأثیر مقادیر رس در خاک تغییر می‌کند و با افزایش مقدار رس، حدود روانی و خمیری افزایش می‌یابند.

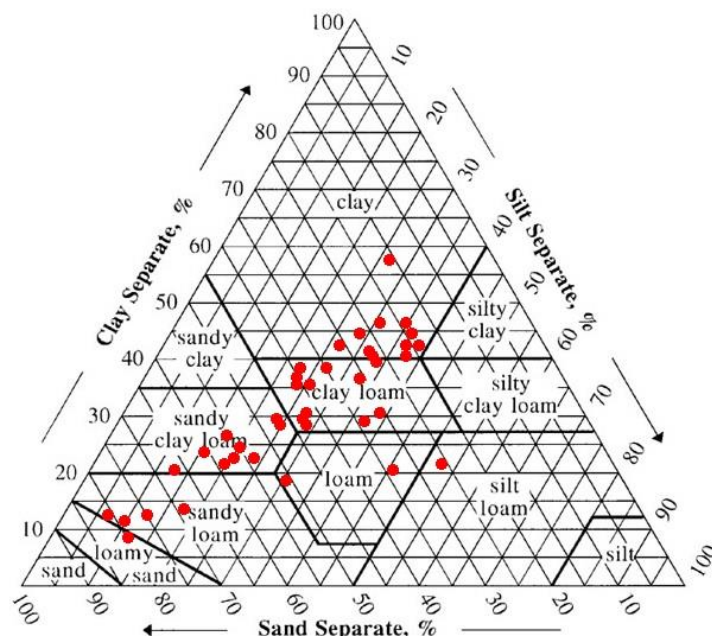
لگاریتم تعداد ضربات مختلف، مقدار رطوبت در ضربه ۱۲۵ام، تعیین و به‌عنوان حد روانی نمونه خاک گزارش شد. برای اندازه‌گیری حد خمیرایی نمونه‌ها از روش تهیه فتیله استفاده و شاخص خمیرایی نیز از اختلاف حد روانی و حد خمیری محاسبه شد (Carter, 1993; ASTM, 2010). در این تحقیق به‌جز متغیرهای مستقل اندازه‌گیری شده (درصد شن، سیلت، رس، جرم ویژه ظاهری، حدود آتربرگ (حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیرایی)) از متغیرهای ترکیبی مانند حاصل‌ضرب مقدار رس در حد روانی و نسبت‌های رس بر سیلت و سیلت بر رس نیز استفاده شد. رطوبت خاک‌ها در مکش‌های مختلف به‌عنوان متغیر وابسته و سایر ویژگی‌های خاک به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شد (توابع انتقالی نقطه‌ای). با توجه به اینکه غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها آزمون‌های فرضیه را نامعتبر می‌سازد لذا چگونگی توزیع داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری MINITAB 17 مورد بررسی قرار گرفت. در بین پارامترهای مورد بررسی تنها دو پارامتر حد خمیری و کربن آلی دارای توزیع نرمال نبودند. برای نرمال کردن حدخمیری از روش آنتی‌لوگ و برای کربن آلی نیز از جذر مقادیر استفاده شد. پس از نرمال کردن داده‌ها و بررسی میزان همبستگی جزئی، توسط رگرسیون چندگانه^۱ (روش گام به گام^۲) رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته بدست آمد. در رگرسیون چندگانه اگر بین متغیرهای مستقل، وابستگی خطی قوی مشاهده شود، هم‌راستایی چندگانه به وجود می‌آید. لذا در زمان انتخاب متغیرهای ورودی برای ایجاد مدل‌ها، به همبستگی بین متغیرهای مستقل توجه شده، و متغیرهایی که همبستگی بالایی باهم داشتند به صورت هم‌زمان وارد مدل‌سازی نشده‌اند. برای ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ایی و تجزیه و تحلیل داده‌ها از محیط Excel و SPSS 18 استفاده شد. برای ارزیابی دقت و اعتبار توابع بدست آمده از آماره‌های ضریب تبیین^۳ و مجذور میانگین مربعات خطا^۴ (روابط (۱) و (۲)) استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

1. Multiple regression
2. Stepwise
3. Coefficient of determination (R2)
4. Root mean square error (RMSE)

جدول ۱- مقادیر آماری داده‌های آموزشی (واسنجی) و اعتبارسنجی
Table1. Statistical values of both training (calibration) and validation data

Variation range		Clay	Silt	Sand	Calcium carbonate equivalent	Organic carbon	Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index	Bulk density
										(g cm ⁻³)
Training data	Minimum	11	9	20	0.9	0.06	0	0	0	1.2
	Maximum	46	38	80	43.53	1.9	42.79	25.04	20.95	1.8
	Average	32.32	26.03	41.64	19.94	0.67	30.31	17.58	12.72	1.4
	Standard deviation	10.07	7.71	16.90	12.88	0.41	10.67	5.79	5.72	0.15
Testing data	Minimum	8	6.5	17	0.7	0.38	0	0	0	1.08
	Maximum	57	52	82	40.73	2.24	32.5	27.10	13.90	1.62
	Average	28.05	27.71	44.24	23.75	1.09	18.52	11.26	7.27	1.35
	Standard deviation	13.56	12.79	21.27	11.66	0.53	9.7	8.76	3.80	0.16



شکل ۱- توزیع کلاس بافتی نمونه خاک‌های مورد مطالعه
Figure 1. Distribution of soil textural classes of the studied soil samples

افزایش می‌دهد. ملکاوی و همکاران (Malkawi, 1999) نشان دادند که در مقدار ماده آلی کم، شاخص خمیرایی به‌طور اندکی افزایش و سپس با افزایش ماده آلی کاهش می‌یابد. علت این تناقضات شاید به خاطر اختلاف در ویژگی‌های ذاتی خاک، مقدار و مینرالوژی رس، نوع و ویژگی مواد آلی مورد استفاده در تحقیقات باشد.

بسیاری از محققین گزارش دادند که با افزایش درصد ذرات رس، حدود آتبرگ نیز افزایش می‌یابد (Davidson & Sheeler, 1952; Odell *et al.*, 1960; Archer, 1975; Mulqueen, 1976). حدود آتبرگ با کربن آلی به‌دلیل پایین بودن مقدار کربن آلی در نمونه‌های مورد آزمایش، همبستگی معنی‌دار نشان نداد. مصدقی و همکاران (Mosaddghi *et al.*, 2000) بیان کردند که افزایش کد کاوی به خاک لوم رسی حدود آتبرگ را بطور معنی‌داری

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل

Table 2. Pearson correlation coefficient among independent variables

Soil Property	Clay	Silt	Sand	Bd	CaCO ₃	OC	LL	PL	PI
		%		g cm ⁻³			%		
Clay (%)	1								
Silt (%)	0.80**	1							
Sand (%)	-0.96**	-0.93**	1						
Bd (g/cm ³)	-0.59**	-0.68**	0.66**	1					
CaCO ₃ (%)	0.44*	0.41*	-0.45*	-0.42*	1				
OC (%)	0.49**	0.48**	-0.45*	-0.49**	0.26	1			
LL(%)	0.79**	0.67**	-0.77**	-0.46*	0.45*	0.36	1		
PL(%)	0.63**	0.62**	-0.66**	-0.48**	0.43*	0.35	0.93**	1	
PI (%)	0.83**	0.63**	-0.79**	-0.37*	0.40*	0.32	0.93**	0.72**	1

* and ** Correlation is significant at the 0.05 and 0.01 level respectively

Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن، Bd: جرم ویژه ظاهری، CaCO₃: کربنات کلسیم معادل، OC: کربن آلی، LL: حد روانی، PL: حد خمیری، PI: شاخص خمیرایی

در بافت خاک، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار روی حد رطوبت نقطه پژمردگی بود (Cazemier *et al.*, 2001; Haverkamp *et al.*, 2005). مقدار شن با مقدار رطوبت در کلیه مکش‌ها همبستگی منفی داشت ($\alpha=0/01$). شیرانی و رفیع‌نژاد (Shirani & Rafinejad, 2011) گزارش نمودند که وجود شن سبب ایجاد خلل و فرج بزرگ در خاک شده که مناسب برای نگهداری هوا هستند. بنابراین وجود شن موجب خروج سریع‌تر آب از خاک شده و ظرفیت نگهداری آب در خاک کاهش می‌یابد. نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققین گزارش شده است (Rawls & Pachepsky, 2002; Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2011). حدود روانی و خمیری و شاخص خمیرایی با رطوبت حجمی در کلیه مکش‌های اندازه‌گیری شده همبستگی معنی‌دار داشتند ($\alpha=0/01$). با توجه به جدول (۳) مقدار همبستگی حدود روانی و خمیری با مقدار رطوبت در مکش‌های مورد مطالعه به نسبت بیشتر از شاخص خمیری بود. مقدار شاخص پلاستیسته در خاک‌های مختلف به ظرفیت جذب و نگهداری رطوبت در آن خاک بستگی داشته که با افزایش ظرفیت جذب آب، مقدار پلاستیسته نیز افزایش می‌یابد (Alkhafaji & Andersland, 1992). کانو و هولمز (Kawano & Holmes, 1958) بیان کردند که همبستگی حد خمیری با مقدار رطوبت خاک نسبتاً بیشتر از حد روانی است. آن‌ها همبستگی معنی‌داری بین شاخص خمیری و مقدار رطوبت مشاهده نکردند.

جدول (۳) ضرایب همبستگی جزئی بین مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک را نشان می‌دهد. درصد رس و سیلت با مقدار رطوبت و جرم ویژه ظاهری در تمامی مکش‌های اندازه‌گیری شده، به ترتیب با ضرایب ۰/۵۷ و ۰/۵۸ همبستگی مثبت و منفی در سطح احتمال یک درصد داشت. ریچرت و همکاران (Reichert *et al.*, 2009) نشان دادند که مقدار رس، سیلت و مواد آلی همبستگی مثبتی با مقدار آب در نقطه پژمردگی و ظرفیت زراعی دارد، در حالی که جرم ویژه ظاهری همبستگی منفی با مقدار آب در ظرفیت زراعی دارد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که مقدار آب قابل دسترس برای گیاهان در خاک شنی به دلیل پایین بودن سطوح ویژه، کم‌تر است. در حالی که در کلاس‌های بافتی با مقدار سیلت بیشتر، مقدار آب قابل دسترس بیشتر است. میرمحمد حسینی و همکاران (Mir Mohammad Hosseini *et al.*, 2011) توابع رگرسیونی برای بیان نگاه داشت آب در خاک را در مکش‌های مختلف توسعه داده و بیان کردند که رس تأثیر مثبت بر حفظ رطوبت توسط خاک داشته که با افزایش رس، مقدار رطوبت در یک مکش معین افزایش می‌یابد. طی یک مطالعه راتولز و پاچسکی (Rawls & Pachepsky, 2002) مشاهده نمودند که در مواردی تأثیر مثبت مقدار رس بر رطوبت زراعی به حدی است که دیگر پارامترها تحت تأثیر مقدار آن، اثر خود را در مدل‌های تجربی نمی‌توانند نشان دهند. پژوهش‌های دیگری نیز نشان دادند که درصد رس موجود

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل و مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف

Table 3. Pearson correlation coefficient between independent variables and moisture content in different suctions

Volumetric moisture in different suctions (cm ³ .cm ⁻³)	Bd (g cm ⁻³)	Clay	Silt	Sand	CaCO ₃	OC	LL	PL	PI
					%				
θ _s	-0.98**	0.57**	0.65**	-0.64**	0.40*	0.48**	0.45*	0.47*	0.36
θ100	-0.60**	0.65**	0.58**	-0.65**	0.48**	0.21	0.65**	0.65**	0.56**
θ200	-0.70**	0.71**	0.66**	-0.73**	0.44*	0.30	0.72**	0.73**	0.61**
θ300	-0.64**	0.72**	0.63**	-0.71**	0.44*	0.25	0.69**	0.69**	0.59**
θ400	-0.65**	0.70**	0.61**	-0.70**	0.42*	0.28	0.66**	0.68**	0.56**
θ1000	-0.66**	0.75**	0.68**	-0.76**	0.41*	0.28	0.69**	0.67**	0.60**
θ2000	-0.64**	0.74**	0.69**	-0.75**	0.43*	0.28	0.70**	0.69**	0.60**
θ3000	-0.63**	0.76**	0.71**	-0.76**	0.40*	0.25	0.75**	0.72**	0.68**
θ5000	-0.67**	0.73**	0.68**	-0.74**	0.45*	0.22	0.75**	0.73**	0.67**
θ10000	-0.67**	0.71**	0.64**	-0.71**	0.53**	0.18	0.80**	0.80**	0.68**
θ15000	-0.71**	0.72**	0.65**	-0.72**	0.52**	0.18	0.72**	0.71**	0.63**

θ_s رطوبت اشباع و اندیس θ، نشان‌دهنده مقدار رطوبت در آن مکش بر حسب سانتی‌متر آب می‌باشد.

θ_s is saturated water and the subscripts of θ shows the water content at subject suction head (cm water)

جدول (۴) روابط رگرسیونی چندگانه بین متغیرهای مستقل و وابسته را برای تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف نشان می‌دهد.

پس از نرمال کردن داده‌ها و بررسی میزان همبستگی جزئی، اقدام به مدل‌سازی رگرسیونی از طریق روش گام به گام شد. متغیرهای مستقلی که اثر آن‌ها در سطح آماری کمتر از پنج درصد معنی‌دار بود از مدل حذف شد.

جدول ۴- توابع انتقالی نقطه‌ای برای تخمین مقدار رطوبت خاک در مکش‌های مختلف واسنجی شده با استفاده از داده‌های منحنی رطوبتی
Table 4. Point pedotransfer functions (PTFs) for estimating soil moisture at different suctions calibrated using the data of SMC

Volumetric moisture (cm ³ cm ⁻³)	Regression equation	Coefficient of determination (R ²)	Root mean square error (RMSE)
θ _s	0.46+0.004Clay-0.99 Clay/Silt	0.50	0.042
θ100	0.3+0.002LL -0.045Bd ²	0.54	0.037
θ200	0.156+ 0.041 lnClay – 0.035Bd ² + 9.163*10 ⁻⁵ PL ²	0.73	0.022
θ300	0.104+ 0.06 lnClay -0.032 Bd ²	0.62	0.026
θ400	0.133+0.057 lnClay – 0.037 Bd ²	0.61	0.033
θ1000	0.401-0.062 lnSand + 0.003PL	0.66	0.029
θ2000	0.374-0.057 lnSand + 0.003PL	0.66	0.023
θ3000	0.2+ 4.97*10 ⁻⁵ LL.Clay-0.026Bd ²	0.68	0.023
θ5000	0.196+4.644*10 ⁻⁵ LL.Clay-0.031Bd ²	0.70	0.022
θ10000	0.222+0.004PL -0.092Bd	0.75	0.019
θ15000	0.199+4.05*10 ⁻⁵ LL.Clay – 0.043Bd ²	0.71	0.023

Clay، رس، Silt، سیلت، Sand، شن، Bd: جرم مخصوص ظاهری، CaCO₃: کربنات کلسیم معادل، OC: کربن آلی، LL: حد روانی، PL: حد خمیری، PI: شاخص خمیرایی

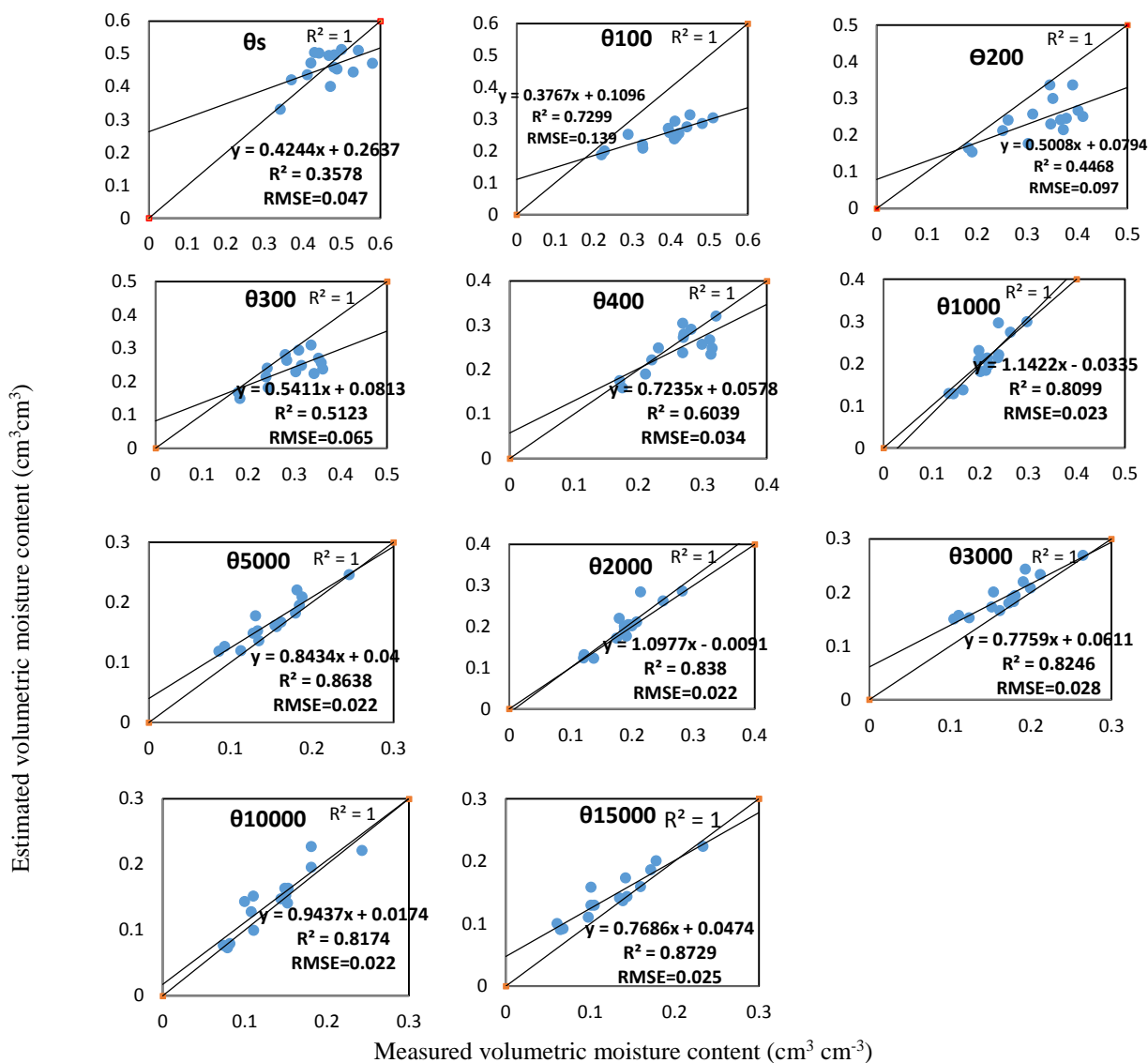
ماده آلی، تأثیر آن در محاسبات معنی‌دار نشد. راتولز و همکاران (Rawls et al., 1982) و راتولز و همکاران (Rawls et al., 1983) و کرن (Kern, 1995) تأثیر مثبت مقدار کربن آلی در رطوبت‌های نقطه پژمردگی و مزرعه نشان دادند. در مقابل لال (Lal, 1979) و دانالآتوس و همکاران (Danalatos et al., 1994) هیچ تأثیری از ماده آلی روی منحنی رطوبتی بدست نیاوردند. هاور کمپ و

از بین متغیرهای مستقل، فقط تأثیر درصد حدروانی، حد خمیری و مجذور آن، مقدار رس، مقدار شن و جرم ویژه ظاهری و مجذورش و از بین متغیرهای ترکیبی حاصل‌ضرب حدخمیری در رس و هم‌چنین نسبت رس بر سیلت برای مدل‌سازی استفاده شد. سایر متغیرها به دلیل عدم تأثیرگذار معنی‌دار فرایند مدل‌سازی استفاده نشدند. در خاک‌های نمونه‌برداری شده به دلیل پایین بودن میزان

نسبت به رس، بر حفظ رطوبت خاک دارد. از طرفی استفاده از متغیرهای حدود روانی و خمیری در برآورد مقدار رطوبت باعث افزایش دقت مدل‌ها شد. در خاک‌هایی با مینرالوژی مشخص، حدود روانی و خمیری متناسب با افزایش مقادیر رس در خاک افزایش می‌یابد (Davidson & Sheeler, 1952; Odell *et al.*, 1960; Archer, 1975; Mulqueen, 1976). زیرا با افزایش درصد ذرات رس، مقدار آب جذب سطحی نیز افزایش یافته و در نتیجه خاک باید رطوبت بیشتری جذب کرده تا به حد روانی برسد (Seed *et al.*, 1964). رس‌ها با داشتن سطوح ویژه بالا و بارهای منفی در سطوح خود موجب جذب مولکول‌های آب شده که در این راستا مقدار آب در خاک به‌طور مستقیم با سطوح ویژه و مکش ماتریکس خاک متناظر است (Tuller *et al.*, 1999). درصد مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در حدود آتربرگ بیان‌گر مقدار رطوبت جذب شده به‌وسیله سطوح داخلی و خارجی خاک‌های دانه ریز می‌باشد و شاخص پلاستیسیته بهترین شاخص از سطح ویژه ذرات بوده که می‌تواند در برآورد منحنی رطوبتی استفاده شود (Tuller *et al.*, 1999). راسل و مایکل (Russell & Mickle, 1970) با مطالعه خاک‌های مختلف بیان کرد که رابطه خطی بین مقدار آب در حد خمیری و پتانسیل آب در خاک وجود دارد. وپراسکاس (Vepraskas, 1992) تغییراتی هم‌راستا در هدایت هیدرولیکی و ویژگی‌های پلاستیسیته در افق‌های انتقالی و ساپرولیت‌ها مشاهده کرد. شکل (۲) همبستگی بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمینی برای نمونه‌های مورد استفاده در ارزیابی مدل‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی، همبستگی معنی داری برای نمونه‌های مورد استفاده در ارزیابی مدل‌های توسعه یافته در مکش‌های مورد مطالعه وجود داشته که نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل‌های ارائه شده می‌باشد.

جدول ۵ نتایج ارزیابی داده‌ها با روش ارزیابی متقابل را نشان می‌دهد. با توجه به جدول تفاوت چندانی در روش ارزیابی متقابل با روش انتخاب داده‌ها بصورت تصادفی مشاهده نشد.

همکاران (Haverkamp *et al.*, 2005) نیز تأثیر ناچیز ماده آلی را در تحقیقات خود نشان دادند. والزاک و همکاران (Walczak *et al.*, 2004) بیان کردند که اگر چه ماده آلی خاک در بسیاری از موارد به‌عنوان متغیر ورودی مدل‌های رگرسیونی به‌منظور تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک به‌کار می‌رود، ولی به‌دلیل رفتار پیچیده آن (قدرت نگه‌دارندگی آب از یک طرف و بهبود ساختمان خاک از سوی دیگر) به سختی می‌توان رابطه مستقیمی بین مقدار ماده آلی خاک و محتوای رطوبتی خاک برقرار کرد. کربنات کلسیم نیز با مقدار رطوبت در تمامی مکش‌های اندازه‌گیری شده همبستگی مثبت داشت، ولی وجود متغیرهای مؤثرتری مثل رس و شن، شاید مانع بروز اثر آن شده است. مقادیر ضریب تبیین در محدوده ۰/۵۰ تا ۰/۷۵ نشان‌دهنده همبستگی بالای توابع بدست آمده با مقادیر واقعی است. و نیز مقادیر پایین مجذور میانگین مربعات خطا در محدوده ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۴۲ نشان‌دهنده انحراف کم نتایج برآوردی از نتایج واقعی است. در اغلب مکش‌های اندازه‌گیری شده جرم ویژه ظاهری تخمین مناسبی از مقدار رطوبت خاک داشت. جرم ویژه ظاهری شاخصی از تخلخل و در نتیجه تا حدودی بیان‌گر ساختمان خاک بوده که در مکش‌های کم، نگه‌داشت رطوبت تحت تأثیر خلل و فرج درشت خاک یا به‌عبارتی ساختمان خاک است (Farrokhan Firuzi & Homaei, 2005). با توجه به توابع بدست آمده، رس دارای بیش‌ترین تأثیر روی مقدار رطوبت در پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده بود. در مکش‌های بالا، منافذ خاک از آب خالی بوده و فقط آب به‌صورت جذب سطحی وجود داشته و در حالی که رس دارای بیش‌ترین سطح ویژه در بین ذرات خاک است. از این رو، با افزایش مقدار رس، ظرفیت جذب و نگهداری آب در خاک افزایش می‌یابد (Aina & Periaswamy, 1985). قربانی دشتکی و همکاران (Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2011) و آینا و پریاسوامی (Aina & Periaswamy, 1985) نیز بیان کردند که مقدار رطوبت در نقطه پژمردگی با درصد رس رابطه معنی‌دار دارد. راولز و پاچسکی (Rawls & Pachepsky, 2002) نشان دادند که سیلت تأثیر کم‌تری



شکل ۲- رابطه بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و رطوبت حجمی تخمینی از توابع نقطه‌ای در مکش‌های مختلف در نمونه‌های مورد استفاده برای ارزیابی توابع

Figure 2. Relationship between the measured and estimated volumetric moisture content ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) using the point pedotransfer functions (PTFs) of testing soils

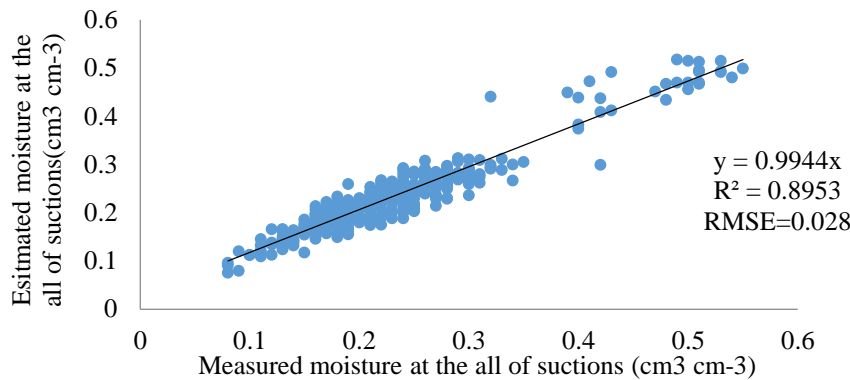
جدول ۵- نتایج ارزیابی داده‌ها با روش ارزیابی متقابل

Table 5. Result of data validation through leave-one-out cross validation procedure

Testing data		Training data		Volumetric moisture ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)
Root mean square error (RMSE)	Coefficient of determination (R^2)	Root mean square error (RMSE)	Coefficient of determination (R^2)	
0.041	0.57	0.038	0.62	θ_s
0.025	0.72	0.042	0.61	100θ
0.077	0.61	0.051	0.59	200θ
0.065	0.62	0.034	0.58	300θ
0.034	0.60	0.031	0.61	400θ
0.023	0.81	0.023	0.72	1000θ
0.031	0.79	0.024	0.71	2000θ
0.028	0.83	0.022	0.76	3000θ
0.024	0.81	0.021	0.75	5000θ
0.022	0.87	0.024	0.81	10000θ
0.025	0.85	0.019	0.79	15000θ

توابع پیشنهادی می‌باشد. مقادیر کم مجذور میانگین مربعات خطا که شاخصی از خطای کل مدل می‌باشد، نیز مؤید همین مطلب است. شیب خط رگرسیونی نزدیک به واحد بوده و بیان‌گر عدم خطای سیستماتیک (یا وجود بیش برآوردی یا کم برآوردی قابل توجه) توسط مدل‌های پیشنهادی می‌باشد.

شکل (۳) نمایی کلی از نمودار همبستگی بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمینی از توابع نقطه‌ای در کلیه مکش‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مدل رگرسیونی نقطه‌ای تطابق مناسبی بر داده‌های تجربی دارد که این امر دور از انتظار نمی‌باشد، زیرا این توابع با استفاده از اطلاعات هیدرولیکی خود خاک‌ها بدست آمده است. ضریب تبیین بالای مدل (۸۹ درصد) نشان‌دهنده دقت



شکل ۳- نمای کلی بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و تخمینی با استفاده از توابع نقطه‌ای در کلیه مکش‌های مورد مطالعه
Figure 3. Overview between the measured and estimated volumetric moisture content ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) using the point pedotransfer functions (PTFs) at the all of the suctions

مقدار رطوبت در یک مکش معین افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش مقدار رس، حد روانی و خمیری افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده حدود آتربرگ (حدود روانی و خمیری در ایجاد توابع نقطه‌ای برای برآورد صحیح و آسان منحنی رطوبتی مفید و موثر هستند و می‌توانند در برآورد منحنی رطوبتی مورد استفاده قرار بگیرند به دلیل اینکه این پارامترها نشان دهنده ویژگی‌هایی از خاک هستند که ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با توجه به تفاوت ذاتی خاک‌های مناطق مختلف با یکدیگر پیشنهاد می‌شود کارایی توابع بدست آمده در تعداد نمونه‌های بیشتر در سطح وسیع‌تر و در خاک‌هایی که دارای ویژگی‌های پلاستیکی بیشتری هستند انجام بگیرد تا قابلیت تعمیم به مناطق وسیع‌تر و خاک‌های متنوع‌تر را داشته باشد.

نتیجه‌گیری کلی

توابع نقطه‌ای به‌دست آمده در مکش‌های مورد مطالعه نشان داد که از بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، درصد رس، جرم ویژه ظاهری، حد روانی و خمیری و در بین متغیرهای ترکیبی، حاصل‌ضرب حدخمیری در رس بیش‌ترین همبستگی را با مقدار رطوبت داشتند. سایر ویژگی‌های به‌دلیل تأثیرگذاری غیرمعنی‌دار در فرآیند مدل‌سازی استفاده نشدند. در توابع ارائه شده به‌طور نسبی عملکرد توابع با افزایش پتانسیل ماتریکس بهبود یافت. در مکش‌های بالا، منافذ خاک تهی از آب بوده و آب به صورت جذب سطحی وجود داشته که از بین ذرات تشکیل دهنده خاک، رس دارای بیش‌ترین سطح ویژه بود. لذا هر چه رس در خاک بیش‌تر بود سطح بیش‌تری برای جذب و نگهداری آب وجود داشت. به‌طور کلی با افزایش رس،

References

- Abbasi F. Advanced Soil Physics. 2007. 1st Ed. Tehran University Press, 260p. (In Persian)
- Aina P.O., and Periaswamy S.P. 1985. Estimating available water-holding capacity of western Nigerian soils from soil texture and bulk density, using core and sieved samples. *Journal of Soil Science*, 140:55-58.
- Alkhafaji A., and Andersland O. 1992. Equations for Compression Index Approximation. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(1): 148-153.
- Archer J.R. 1975. Soil consistency. In: Soil physical conditions and crop production. *Technical Bulletin 29, Ministry of Agriculture, Fishers and food, HMSO, London*, pp. 289-297.
- ASTM (American Society for testing and Materials). 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM Designation*, D4318-05.
- Bayburdi M. 2014. Soil Physics. 7th Ed. Tehran University Press, 671p. (In Persian)
- Blake G.R., and Hartge K.H. 1986. Bulk density. In: Klute A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1, 2nd, Agronomy. Monograph. 9. American Society of Agronomy*, Madison, WI, pp. 363-375.
- Carter M.R. 1993. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis Publishing, 823p.
- Cazemier D.R., Lagacherie P., and Clouaire R.M. 2001. A possibility theory approach for estimating available water capacity from imprecise Information contained in soil data bases. *Geoderma*, 103: 113-132.
- Danalatos N.G., Kosmas C.S., Driessen P.M., and Yassoglou N. 1994. Estimation of the draining soil moisture characteristics from standard data as recorded in soil surveys. *Geoderma*, 64: 155-165.
- Davidson D.T., and Sheeler J.B. 1952. Clay Fraction in Engineering Soils: Influence of Amount on Properties. *Proceedings of the Highway Research Board*, pp. 558-563.
- Desbarats A.J. 1995. Upscaling capillary pressure–saturation curves in heterogeneous porous media, *Geoderma*, 31: 281-28.
- Farrokhian Firuzi A., and Homae M. 2005. Predicting water retention curve of gypsiferous soils using the derived point pedotransfer functions. *Journal of Agricultural engineering Research*, 6(24): 129-142. (In Persian)
- Ghorbani Dashtaki S., Homae M., and Khodaverdiloo H. 2011. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26: 68-74.
- Grimshaw R.W. 1971. *The chemistry and physics of clays*. 4th Ed, Wiley Inter-science, New York, 1024p.
- Haverkamp R., Leij F.J., Fuentes C., Sciortino A., and Ross P.J. 2005. Soil water retention. Introduction of shape index. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 1881-1890.
- Huang G.H., Zhang R. D., and Huang Q. Z. 2006. Modeling soil water retention curve with a fractal method. *Pedosphere*, 16: 137-146.
- Jana R.B., Mohanty B. and Springer E.P. 2007. Multiscale pedotransfer functions for soil water retention. *Vadose Zone Journal*, 6: 868-878.
- Kawano Y., and Holmes W.E. 1958. Compaction tests as a means of soil structure evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 22: 369-372.
- Kern J.S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59: 1134-1141.
- Khodaverdiloo H., Homae M., van Genuchten M.T., and Ghorbani Dashtaki S. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93-99.
- Klute A., and Dirksen C. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: Klute A. (Ed). *Method of Soil Analysis, Part 1. Agronomy Soil Science Society of America* Madison.W.I, pp. 687-734.
- Lal R. 1979. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. *Geoderma*, 21: 209-223.
- Livneh M., Kinsky J., and Zaslavsky D. 1970. Correlation of suction curves with the plasticity index of soils. *Journal of Materials, JMLSA*, pp. 209-220.
- Malkawi A.I.H., Alawneh A.S., and Abu-Safaqah O.T. 1999. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Applied Clay Science*, 14: 257-278.
- Mir Mohammad Hosseini S.M., Ganjian N., and Pashang Pisheh Y. 2011. Estimation of the water retention curve for unsaturated clay. *Canadian Journal of Soil Science*, 91:543-549.

- Mosaddghi M.R., Hajabbasi M.A., Hemmat A., and Afyni M. 2000. Soil compactibility as affect by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil Tillage Research*, 55: 87-97.
- Mulqueen J. 1976. Plasticity Characteristics of Some Carboniferous Clay soils in north central Ireland and their significance. *Irish Journal of Agricultural Research*, 15(1): 129-136.
- Nath A., and Dalal S.S. 2004. The role of plasticity index in predicting compression behavior of clays, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 9, Bundle E.
- Odell R.T., Thornburn I. H., and McKenzie L. J. 1960. Relationships of Atterberg limit to some other properties of Illinois soils. *Soil Science Society of America Journal*, 24: 297-300.
- Rawls W.J., and Pachepsky Y.A. 2002. Soil consistence and structure as predictors of water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1115-1126.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., and Saxton K.E. 1982. Estimation of soil water properties. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 25: 1316-1320.
- Rawls W.J., Brakensiek D.L., and Soni B. 1983. Agricultural management effects on soil water processes: Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 26:1747-1752.
- Reichert J.M., Aluquerque J.A., Kaiser D.R., Reinert D.J., Urach F.L., and Carlesso R. 2009. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande Do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Brazil*, 33: 1547-1560.
- Rowell D.L., 2014. Soil science: Methods & applications. *Longman Scientific & Technical*, 350p.
- Russell E.R., and Mickle J.L. 1970. Liquid limit values by soil moisture tension. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96: 967-989.
- Seed H.B., Woodward R.J., and Lundgren R. 1964. Fundamental aspects of the atterberg limits. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(6): 75-105.
- Shirani H., and Rafinejad N. 2011. Prediction of some costly measured properties using neural network and statistical regression in Kerman area. *Journal of Soil Research*, 25(4): 350-359. (In Persian)
- Tomasella J., Pachepsky Y., Crestana S., and Rawls W.J. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 1085-92.
- Tuller M., Or D., and Dudley L.M. 1999. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configuration in angular pores. *Water Resource Research*, 35(7): 1949-1964.
- Vepraskas M.J. 1992. Redoximorphic features for identifying aquic conditions. Issue 301 of Technical bulletin (*North Carolina Agricultural Research Service*), 33p.
- Walczak R., Witkowska-Walczak B., and Sławinski C. 2004. Pedotransfer studies in Poland. In: Pachepsky Y.A. and Rawls W.J. (Ed.). Development of pedotransfer functions in soil hydrology). *Developments in Soil Science*, 30: 449-463.
- Weynants M., Vereecken H., and Javaux M. 2009. Revisiting vereecken pedotransfer functions: Introducing a closed-form hydraulic model. *Vadoze Zone Journal*, 8(1): 86-95.

Point Estimation of Soil Moisture Characteristics Curve Using Some Soil Physical and Mechanical Properties

Mahsa Kazemipour Esfahlan¹, Mohammad Hossein Mohammadi^{2*}, Alireza Vaezi³

(Received: November 2016

Accepted: May 2017)

Abstract

Soil moisture characteristic curve (SMC) is a fundamental soil property for predicting and modeling water flow and solute transport in the unsaturated soil, but its direct measurement is tedious and time consuming. Therefore, various indirect methods (e.g., pedotransfer functions, PTFs) have been developed to predict SMC from easily available soil properties (EASP). We develop a procedure to predict SMC from ESAP and soil liquid limit (LL), and plastic limit (PL). Forty three soils were sampled from north-west of Iran. All of soil samples were divided in two groups; 28 and 15 soils samples were used to train and evaluate of the models, respectively. The SMC, (water content at the suctions 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 1, 2, 3, 5, 10 and 15 bar) and LL, PL and ESAP were measured through standard methods. Multiple linear regression analysis was used to make correlation between LL, PL and ESAP data as independent variables along with SMC data as the dependent variable, using the SPSS software and the stepwise algorithm. Results showed that among all measured soil properties, the clay content, bulk density, LL and PL had high correlation with the soil moisture content at different suction heads. Values of the coefficient of determination (89%) and root mean square error (0.028), obtained by the statistical analysis, and indicated the validity of the models in the all of the suction heads.

Keywords: Atterberg limits; Point pedotransfer functions; Soil water-transmission; Soil properties; unsaturated soil

1- MSc graduated, Department of Soil Science, Agriculture Faculty, Zanjan University, Iran

2- Associate professor, Department of Soil Science, Agriculture and Natural Resources Faculty, University of Tehran

3- Associate professor, Department of Soil Science, Agriculture Faculty, Zanjan University

* Corresponding Author Email: mhmohmad@ut.ac.ir