

## رابطه شاخص انبساط آزاد با نگهداری رطوبت در خاک

حسین بیات<sup>۱</sup>، شبنم جوانشیر<sup>۲</sup> و سیده فاطمه اسلامی<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- دانشیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشگاه بوعلی سینا همدان

### چکیده

تخمین غیرمستقیم منحنی مشخصه رطوبتی خاک از داده‌های زودیافت بخش مهمی از تحلیل داده‌های خاک را تشکیل می‌دهد. در این تحقیق تعداد ۱۴۷ نمونه خاک دست خورده و دست نخورده از چهار استان ایران تهیه و متغیرهای توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری (BD)، شاخص انبساط آزاد (FSI) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) اندازه‌گیری شد. از CEC و FSI به همراه ویژگی‌های پایه خاک (نسبت سیلت به شن، رس و BD) به عنوان تخمینگر در تخمین نقطه‌ای منحنی مشخصه رطوبتی خاک با روش رگرسیونی استفاده شد. استفاده از شاخص انبساط آزاد باعث بهبود دقت تخمین مقدار رطوبت در تمام مکش‌ها (۱۰، ۳۰، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) شد. استفاده از CEC موجب بهبود تخمین رطوبت در بخش ایجاد و اعتبارسنجی غالب مکش‌ها شد. به طور کلی CEC نسبت به FSI بهبود بیشتری در تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف ایجاد کرد، ولی FSI متغیر ارزانتری برای استفاده به عنوان تخمین‌گر است.

واژه‌های کلیدی: تراکم خاک، توابع انتقالی، جرم مخصوص ظاهری

### مقدمه

تاکنون پارامترهای متعددی برای تخمین منحنی مشخصه رطوبتی خاک<sup>۱</sup> (SMCC) در PTFها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ولی یکی از نکات اصلی در استفاده از توابع انتقالی سهل‌الوصول بودن متغیرهای ورودی آنها می‌باشد. سطوح داخلی و خارجی رس‌ها، به شدت نگهداری رطوبت در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (دلینار و ترانر، ۲۰۰۵) و سطح ویژه توسط محققین متعددی (والزاک و همکاران، ۲۰۰۴) برای تخمین SMCC مورد استفاده قرار گرفته است، ولی اندازه‌گیری آن نیز مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه است. از طرف دیگر بر اساس مطالعات آرنپالی و همکاران (۲۰۰۸) سطح ویژه دارای رابطه بسیار نزدیک با شاخص انبساط آزاد می‌باشد، که اندازه‌گیری آن بسیار ساده، سریع و کم هزینه است. بنابراین می‌توان از این متغیر به عنوان جایگزینی برای سطح ویژه در تخمین SMCC استفاده نمود، که تاکنون هیچ مطالعه‌ای در این زمینه انجام نگرفته است. فرآیندهای تورم و آبگیری و یا پراکندگی و همآوری ذرات خاک بستگی به ظرفیت تبادل کاتیونی آن دارد. ظرفیت تبادل کاتیونی یکی از خصوصیات مهم خاک است که در پایگاه‌های اطلاعاتی مربوط به خاک مورد نیاز بوده است (مانریکو و همکاران، ۱۹۹۱). بنابراین هدف از این مطالعه بررسی تأثیر شاخص انبساط آزاد و ظرفیت تبادل کاتیونی بر بهبود تخمین SMCC با استفاده از رگرسیون چند متغیره بود.

### مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق تعداد ۱۴۷ نمونه دست خورده و دست نخورده از لایه سطحی و زیر سطحی در استان‌های آذربایجان غربی (۳۰ نمونه)، آذربایجان شرقی (۳۰ نمونه)، مازندران (۳۰ نمونه)، همدان (۲۷ نمونه) و کرمانشاه (۳۰ نمونه) جمع آوری شد. نمونه‌های دست خورده با استفاده از سیلندرهای نمونه‌برداری به ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر و قطر ۵/۳ سانتی‌متر تهیه گردید. آزمایشات فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های رایج، اندازه‌گیری شدند. در آزمایش نگهداری آب خاک برای به دست آوردن SMCC، مقدار رطوبت در مکش‌های ۱۰، ۳۰، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال برای ۱۴۷ نمونه برداشت شده با استفاده از دستگاه صفحات تحت فشار تعیین گردید. اندازه‌گیری‌های فوق تا مکش ۱۰۰ کیلوپاسکال بر روی نمونه‌های دست نخورده و

<sup>1</sup> . Soil moisture characteristic curve

بالتر از آن بر روی نمونه‌های دست خورده انجام گردید. برای آزمایش شاخص انبساط آزاد نیز ۲۰ گرم خاک آون خشک از الک ۴۰ مش عبور داده شد. هر ۱۰ گرم آن در یک استوانه مدرج ۱۰۰ میلی‌لیتری مجزا ریخته شد. یکی از آن‌ها با آب و دیگری با محلول کروزن به حجم رسانده و با استفاده از یک میله شیشه‌ای محتویات داخل استوانه‌ها به هم زده شدند. در این مطالعه به این دلیل از کروزن استفاده شد که کروزن مایعی غیرقطبی است که برعکس آب باعث انبساط خاک نمی‌شود. بنابراین ۲۴ ساعت اجازه داده شد تا نمونه‌ها به تعادل برسند و بعد از ۲۴ ساعت حجم نهایی خاک در هر کدام از استوانه‌ها قرائت شد. شاخص انبساط آزاد خاک با استفاده از فرمول زیر به دست آمد:

$$FSI (\%) = \frac{V_d - V_k}{V_k} \times 100 \quad (1)$$

$V_d$ : حجم خاک داخل استوانه حاوی آب مقطر و  $V_k$ : حجم خاک داخل استوانه حاوی کروزن

### مراحل ایجاد توابع

ابتدا آزمون نرمال بودن متغیرها (کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۲</sup>) با استفاده از نرم افزار Minitab انجام شد. متغیرهایی که توزیع نرمال نداشتند، تبدیل شدند. از تبدیل‌های  $\log x$  و  $x^{0.5}$  به ترتیب برای نرمال کردن رس و Silt/Sand استفاده شد. سپس بر روی کل داده‌ها تبدیل استاندارد صورت گرفت تا از میانگین صفر و واریانس یک برخوردار باشند. انتخاب داده‌ها برای ایجاد به صورت تصادفی انجام شد. متغیرهای نسبت سیلت به شن (Silt/Sand)، درصد رس (Clay)، جرم مخصوص ظاهری (BD) شاخص انبساط آزاد (FSI) و گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) به عنوان متغیرهای مستقل یا ورودی و مقادیر رطوبت در مکش‌های ۱۰، ۳۰، ۱۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به عنوان متغیرهای وابسته یا خروجی مورد استفاده قرار گرفتند. ایجاد توابع با روش رگرسیون در چهار مرحله صورت گرفت. برای بررسی صحت توابع انتقالی نیز از آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) و ضریب تعیین<sup>۴</sup> ( $R^2$ )، استفاده شد. متغیرهای ورودی در هر مرحله در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- جزئیات توابع ایجاد شده در مراحل مختلف برای رگرسیون

مرحله	متغیرهای ورودی	تابع انتقالی ایجاد شده
مرحله ۱	Silt/Sand, Clay و BD	PTF1
مرحله ۲	Silt/Sand, Clay, BD, FSI	PTF2
مرحله ۳	Silt/Sand, Clay, BD, CEC	PTF3
مرحله ۴	FSI	PTF4

### نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری کلیه متغیرهای استفاده شده در این تحقیق برای ۱۴۷ نمونه خاک در جدول ۲ نشان داده شده است.

2. Kolmogorov-Smirnov

3. Root mean square error

4. Coefficient of determination

جدول ۲- ویژگی‌های آماری متغیرها برای کل داده‌ها

$\theta_{1500}$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\theta_{100}$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\theta_{30}$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$\theta_{10}$ ( $m^3 m^{-3}$ )	FSI (%)	CEC (meq/100 g <sup>-1</sup> )	BD (gcm <sup>-3</sup> )	Clay (%)	Silt/Sand (-)	
18.27	32.96	36.67	40.14	23.03	26.94	1.43	23.21	1.95	میانگین
0.30	0.22	0.22	0.21	0.73	0.48	0.11	0.59	0.88	ضریب تغییرات
									(%)
34.0	51.9	53.92	56.04	77.78	63.4	1.95	65.6	13.47	حداکثر
3.08	13.3	11.0	17.13	0.0	0.65	1.02	3.47	0.03	حداقل

نتایج توابع ایجاد شده به تفکیک در مراحل مختلف مورد بررسی قرار گرفت:

### مرحله ۱

در PTF1 استفاده از نسبت سیلت به شن، رس و جرم مخصوص ظاهری به عنوان تخمینگر موجب تخمین ضعیف تا قابل قبول رطوبت در مکش‌های مختلف شد. داس و ورما (۲۰۱۱) با استفاده از ۵۹ نمونه خاک مقدار رطوبت در مکش ۳۳ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال را با استفاده از سیلت، رس و جرم مخصوص ظاهری تخمین زدند و مقدار RMSE به ترتیب برابر با ۰/۰۲۳ و ۰/۰۲۳ و در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال با استفاده از سیلت و رس برابر با ۰/۰۲۴ سانتیمترمکعب بر سانتیمترمکعب گزارش کردند. حق وردی و همکاران (۲۰۱۲) نیز از شن، سیلت، رس و BD، برای تخمین SMCC استفاده کردند و مقدار RMSE در مکش ۵، ۳۳، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال را به ترتیب برابر ۰/۰۵۵، ۰/۰۳۲، ۰/۰۳۷، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۵ مترمکعب بر مترمکعب گزارش کردند. ولی در این تحقیق RMSE به دست آمده برای این مرحله از ۰/۰۴۵ تا ۰/۰۸۸ سانتیمترمکعب بر سانتیمترمکعب متغیر بود که نسبت به نتایج مطالعات گزارش شده دقت معادل و یا کمتری داشت. شاید تنوع بافتی نمونه‌های این تحقیق عامل این نتیجه بوده باشد.

### مرحله ۲

در PTF2 اضافه کردن FSI به ویژگی‌های پایه خاک موجب کاهش مقدار RMSE و افزایش R<sup>2</sup> در بخش ایجاد و اعتبارسنجی تمام مکش‌ها گردید. رابطه‌ای بین FSI و نگهداشت رطوبت در خاک وجود دارد که باعث بهبود تخمین رطوبت شده است. مقدار رس‌های موجود در خاک و نوع آنها به شدت بر میزان نگهداشت آب در خاک تأثیر دارند. به گونه‌ای که هرچه قدر میزان رس‌های خاک افزایش یابد و یا نوع رس‌ها از نوع دو به یک و بویژه اسمکتایت باشد، نگهداری رطوبت در خاک بیشتر خواهد شد (یوکلسن و کایا، ۲۰۱۰). از طرف دیگر مقدار و نوع رس از عوامل اصلی کنترل کننده FSI می‌باشند (داس و ورما، ۲۰۱۱). به همین علت استفاده از FSI موجب بهبود تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف شد.

### مرحله ۳

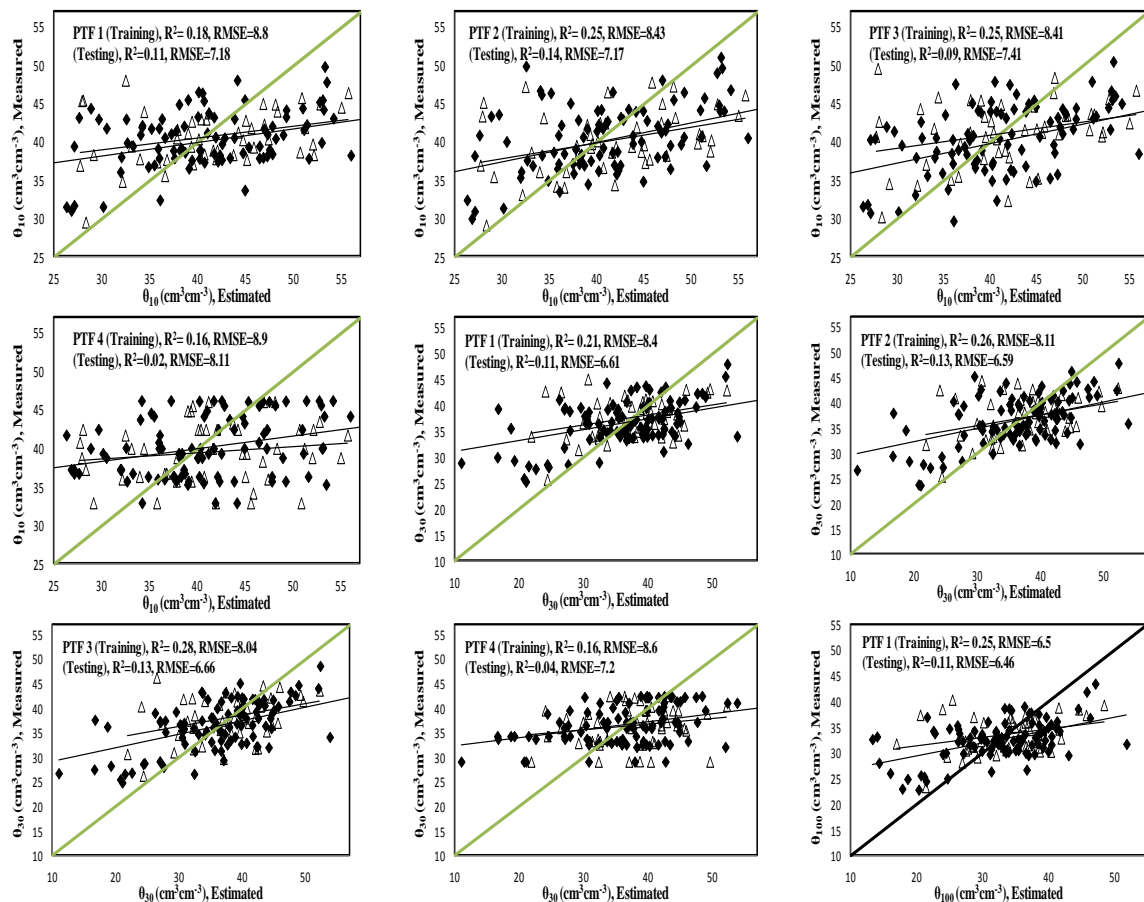
در PTF3 با اضافه کردن CEC به ویژگی‌های پایه خاک در بخش ایجاد و اعتبارسنجی همه مکش‌ها (بجز اعتبارسنجی مکش‌های ۱۰ و ۳۰ کیلوپاسکال) مقدار RMSE کاهش و مقدار R<sup>2</sup> افزایش یافت و باعث بهبود دقت تخمین PTFها شد. در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال نیز بهبود نسبی ۱۵/۴ و ۱۶/۷ درصد، به ترتیب در مراحل ایجاد و اعتبارسنجی به دست آمد، که معنی‌دار شد. با توجه به اینکه در خاک‌های معدنی گنجایش تبادل کاتیونی بیشتر به نوع و میزان رس‌ها مربوط است (میرخانی و همکاران، ۱۳۸۴)، به همین علت تأثیر آن در نگهداشت رطوبت در مکش‌های بالا باید بیشتر باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۸) که نتیجه حاصله دقیقاً آن را تأیید می‌کند.

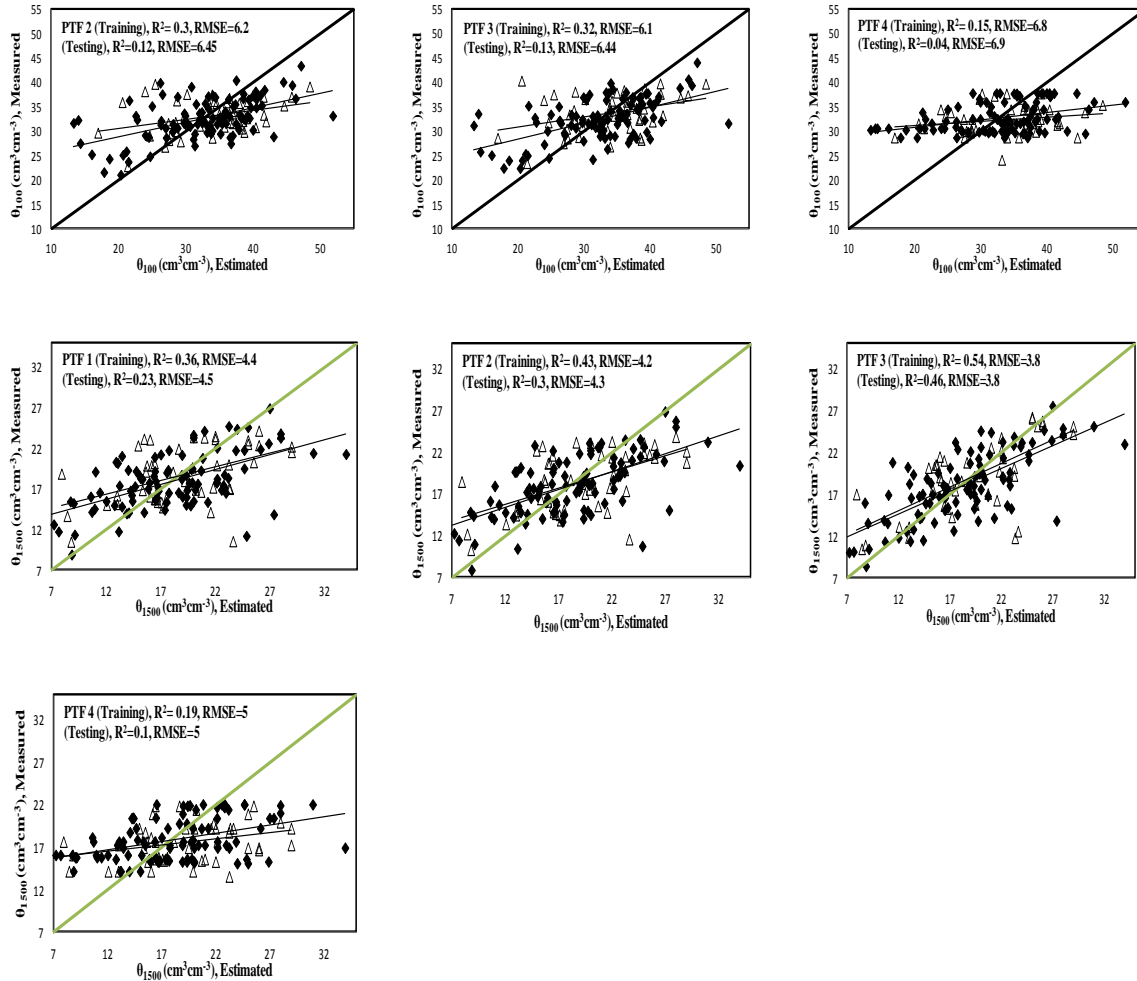
بهبود دقت تخمین PTFها هم در PTF2 و هم در PTF3 با افزایش مکش افزایش یافت. بطوری‌که در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در PTF3 در بخش ایجاد، بهبود دقت تخمین PTFها معنی‌دار شد. شیرانی (۱۳۹۰) گزارش کرد که همبستگی بین نقطه پژمردگی دائم با درصد رس مثبت و معنی‌دار بود (r=۰/۸۳) که بیانگر تأثیر زیاد رس بر نگهداری رطوبت در این نقطه است. در نگهداری رطوبت در مکش‌های بالا بافت خاک بویژه بخش رس اهمیت بیشتری دارد و شاخص انبساط آزاد و CEC با بافت خاک

مخصوصاً بافت رسی همبستگی بالایی دارند (هاریشکومار، ۲۰۱۱). به همین علت تأثیر آن‌ها در مکش‌های بالا بیشتر شده است. حق وردی و همکاران (۲۰۱۲) از شن، سیلت، رس و BD، برای تخمین SMCC استفاده کردند و مقدار RMSE در مکش ۵، ۳۳، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به ترتیب برابر ۰/۰۵۵، ۰/۰۳۲، ۰/۰۳۷، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۵ مترمکعب بر مترمکعب را گزارش کردند. این نتیجه با نتایج این مطالعه مطابقت داشت که با افزایش مکش RMSE کاهش و دقت تخمین‌ها بهبود یافت.

#### مرحله ۴

در PTF4 شاخص انبساط آزاد بدون ویژگی‌های پایه خاک برای تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف استفاده شد. با توجه به کاهش مقدار  $R^2$  و افزایش مقدار RMSE نسبت به PTF1 استفاده از FSI بدون ویژگی‌های پایه خاک باعث بهبود دقت تخمین مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف نشد. شاید تنوع بافتی موجود در کل داده‌ها علت نتیجه حاصله باشد. در واقع FSI به تنهایی نمی‌تواند در تمام کلاس‌های بافتی جایگزین متغیرهای مرتبط با بافت و ساختمان خاک شود که نگاه‌داشت رطوبت در کل دامنه مکش را کنترل می‌کنند. توماسلا و همکاران (۲۰۰۳) نیز گزارش کردند که در هر دو روش، اجزای بافت خاک در معادلات تأثیر معنی‌داری داشتند و برای تخمین PWP، یکی از ورودی‌های مهم، درصد رس (یکی از اجزای بافت خاک) است. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی مدل‌های نقطه‌ای در ۴ تابع انتقالی ایجاد شده توسط رگرسیون خطی و غیرخطی در شکل ۱ آورده شده است.





شکل ۱- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و تخمینی مدل‌های نقطه‌ای در ۴ تابع انتقالی ایجاد شده برای تخمین رطوبت در هر مکش توسط رگرسیون خطی و غیرخطی با منحنی ۱:۱

در این مطالعه با استفاده از رگرسیون چند متغیره تأثیر شاخص انبساط آزاد و ظرفیت تبادل کاتیونی بر بهبود تخمین SMCC بررسی شد. نتایج تخمین نقطه‌ای منحنی مشخصه رطوبتی خاک با روش رگرسیون خطی در کل داده‌ها نشان داد که هر دو متغیر FSI و CEC موجب بهبود تخمین رطوبت در مکش‌های مختلف شدند. هر چند معمولاً CEC متغیر مؤثرتری بود. با این وجود، چون اندازه‌گیری CEC مشکل‌تر، وقت‌گیرتر و پرهزینه‌تر می‌باشد و در مقابل اندازه‌گیری FSI ساده‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر است، لذا استفاده از FSI برای تخمین SMCC توصیه می‌شود. استفاده از FSI بدون ویژگی‌های پایه خاک باعث بهبود دقت تخمین مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف نشد. همچنین تأثیر اضافه کردن FSI با افزایش مکش، در بخش ایجاد، افزایش یافت. علت آن تأثیرپذیری بیشتر FSI و CEC از نوع و مقدار ذرات ریز و سطح ویژه ذرات خاک است که کنترل کننده نگاهداشت آب در مکش‌های بالا می‌باشند.

## منابع

- Arnepalli, D., Shanthakumar, S., Rao, B. H., and Singh, D. (2008). Comparison of methods for determining specific-surface area of fine-grained soils. *Geotechnical and Geological Engineering* 26, 121-132.
- Das, M., and Verma, O. (2011). Derivation and Validation of Pedotransfer Functions for Point Estimation of Soil Moisture in Sandy to Clayey Soil Texture. *Journal of Agricultural Physics* 11, 21-25.



- Dolarin, B., and Trauner, L. (2005). Impact of soil composition on fall cone test results. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 131, 126-130.
- Haghverdi, A., Cornelis, W., and Ghahraman, B. (2012). A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. *Journal of Hydrology* 442, 46-54.
- Harishkumar, K and K. Muthukkumaran. (2011). Study on swelling soil behaviour and its improvements. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 4, 19-25
- Liao, K.-H., Xu, S.-H., Wu, J.-C., Ji, S.-H., and Lin, Q. (2011). Assessing soil water retention characteristics and their spatial variability using pedotransfer functions. *Pedosphere* 21, 413-422.
- Manrique, L., Jones, C., and Dyke, P. (1991). Predicting cation-exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal* 55, 787-794.
- Merdun, H., Çınar, Ö., Meral, R., and Apan, M. (2006). Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research* 90, 108-116.
- Patil, N., and Rajput, G. (2009). Evaluation of Water Retention Functions and Computer Program "Rosetta" in Predicting Soil Water Characteristics of Seasonally Impounded Shrink-Swell Soils. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 135, 286-294.
- Tamari, S., Wösten, J., and Ruiz-Suarez, J. (1996). Testing an artificial neural network for predicting soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal* 60, 1732-1741.
- Walczak, R., Witkowska-Walczak, B., and Sławiński, C. (2004). Pedotransfer studies in Poland. *Developments in Soil Science* 30, 449-463.
- Yukselen-Aksoy, Y., and Kaya, A. (2010). Method dependency of relationships between specific surface area and soil physicochemical properties. *Applied Clay Science* 50, 182-190.

### Relationship free swelling index with moisture retention of soil

H. Bayat<sup>1</sup> Sh. Javanshir<sup>2</sup> and S.F. Eslami<sup>3</sup>

1, 2 and 3- Associate Professor, Garduated student (M.Sc.), and Ph.D. Student of Soil Science, Bu-Ali Sina University

#### Abstract

Indirect estimates of soil moisture characteristic curve from the readily available soil data is an important part of the analysis of soil data. In this study, a total of 147 disturbed and undisturbed soil samples were taken from the four provinces of Iran and their particle size distribution, bulk density (BD), free swelling index (FSI), cation exchange capacity (CEC) water content at different matric suctions were measured. Free swelling index, along with the soil basic properties (ratio of silt to sand, clay and BD) were used as estimators to estimate soil moisture characteristic curve by regression method. Using free swelling index improved the accuracy of estimates of the moisture content at all matric suctions (10, 30, 100 and 1500 kPa. Using CEC as an estimator improved the estimation of moisture content, in the training and testing steps of most matric suctions. In general, CEC was more efficient than the FSI in the estimates of soil moisture content at different matric suctions, but FSI was a cheaper estimator.

**Keywords:** Soil compaction, Transfer functions, Bulk density