

برآورد گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک

محمودرضا سعدی خانی^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۶)

چکیده

گنجایش تبادل کاتیونی خاک (CEC) یکی از ویژگی‌های بسیار مهم خاک است. این ویژگی می‌تواند نشان‌دهنده بسیاری از ویژگی‌های خاک از جمله حاصلخیزی، سطح ویژه و میزان نگهداشت آب خاک باشد. از آنجائی که اندازه‌گیری این ویژگی پرهزینه، زمان‌بر و نیاز به دستگاه‌های آزمایشگاهی ویژه‌ای دارد، از این رو برآورد آن با استفاده از توابع انتقالی خاک و به کمک ویژگی‌های زودیافت خاک در مطالعات خاکشناسی اهمیت زیادی دارد. لذا هدف از این مطالعه، پی‌ریزی توابع انتقالی رگرسیونی در برآورد گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از بعد فرکتال اندازه ذرات خاک است. برای این منظور ۱۰۶ سری داده از بانک اطلاعاتی آمریکا (UNSODA) انتخاب، بعد فرکتال اجزای بافت محاسبه و از آن‌ها برای پی‌ریزی تابع انتقالی استفاده شد. کارایی تابع پیشنهادی با استفاده از خصوصیات زودیافت خاک مقایسه گردید. نتایج نشان داد از میان همه ویژگی‌های زودیافت خاک تنها ضرایب بعد فرکتال، درصد رس و ماده آلی معنی‌دار و در مدل رگرسیونی وارد شدند. مدل رگرسیونی پیشنهادی فرکتالی ($R^2=0/62$ ، $RMSE=5/3$ و $ME=-0/004$) و اعتبارسنجی ($R^2=0/59$ ، $RMSE=5/4$ و $ME=-0/054$) کارایی بسیار بهتری در مقایسه با توابع پیشنهادی، توابع بل و ونکولن و بروسما و همکاران داشت.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، توابع انتقالی، حاصلخیزی، ویژگی‌های زودیافت خاک

سعدی خانی م. ر. ۱۳۹۸. برآورد گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از بعد فرکتال توزیع اندازه ذرات خاک. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷ شماره ۲. ص: ۵۶-۶۶.

۱-دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خرم‌آباد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، خرم‌آباد، ایران (مکاتبه کننده)
* پست الکترونیک: mahmoodrezasadikhani@yahoo.com

مقدمه

تابعی ریاضی از متغیر (های) مستقل است. این روش در مطالعات خاکشناسی جهت ایجاد توابع انتقالی بسیار استفاده شده است. کرووک و همکاران (Krogh *et al.*, 2000) در تحقیقی اهمیت رس در برآورد CEC را با استفاده از یک رابطه رگرسیونی نشان داد (Krogh *et al.*, 2000). بل و ونکولن (Bell & Van Kullen, 1995) در تحقیقی با استفاده از روش رگرسیونی به پی‌ریزی توابع انتقالی برآورد CEC پرداختند (Bell & Van Kullen, 1995) در این مطالعه، ضریب تبیین مدل رگرسیونی ۰/۹۶ شد و رس تأثیرگذارترین ویژگی در مدل رگرسیونی بود. هورن و همکاران (Horn *et al.*, 2005) ارتباط بین CEC و دو ویژگی درصد رس و ماده آلی را در یک رابطه رگرسیونی نشان دادند. بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2014) به برآورد CEC خاک با استفاده از روش شبکه عصبی-مصنوعی پرداختند. برای این منظور از اطلاعات ۱۶۶۲ نمونه خاک مرکز برنج ایران استفاده شد. سه نوع تابع انتقالی بر اساس بعد فرکتال اجزای بافت خاک توسعه پیدا کرد. نتایج نشان داد که توابع انتقالی توسعه‌یافته بر اساس بعد فرکتال کارایی بالاتری نسبت به توابع انتقالی توسعه‌یافته بر اساس اجزای بافت خاک دارد. فولادمند (Fooladmand, 2008) CEC خاک را با استفاده از برخی از ویژگی‌های خاک تخمین زد. در این پژوهش ۲۰ نمونه خاک از مناطق اطراف شهرستان‌های مرودشت و فسا تهیه و CEC و برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که همبستگی خطی با درصد شن و همبستگی‌های توانی با میانگین هندسی قطر ذرات، درصد‌های رس و سیلت به ترتیب مناسب‌ترین حالت‌های برآورد CEC خاک بودند. مهربانیان و همکاران (Mehrbanian *et al.*, 2010) به بررسی کارایی توابع انتقالی جهت تخمین CEC خاک‌های آهکی و گچی استان یزد پرداختند. در این مطالعه از اجزای بافت خاک و ماده آلی در تخمین CEC استفاده گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که روش رگرسیون چندگانه کارایی خوبی در برآورد CEC خاک دارد. معماریان فرد و بیگی‌هرچگانی (Memarin-fard & Beigi, 2010) کارایی توابع انتقالی رگرسیونی در پیش‌بینی CEC خاک‌های استان چهارمحال و بختیاری را ارزیابی کردند. در این مطالعه، توابع انتقالی برای پیش‌بینی CEC از ویژگی‌های اساسی ۲۰۰ خاک مانند توزیع اندازه ذرات، کربن آلی،

گنجایش تبدالی خاک (Cation Exchange Capacity: CEC) از ویژگی‌های مهم شیمیایی خاک که نقش نشان‌دهنده وی‌گی‌های شیمیایی مانند سطح ویژه، حاصلخیزی خاک و نگهداشت آب خاک است. از آنجائی- که اندازه‌گیری CEC آزمایشگاه هزینه‌بر، دشوار و زمان‌بر است، پژوهشگران در تلاش برای برآورد این ویژگی با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک به کمک توابع انتقالی خاک ((Pedotransfer function (PTFs) هستند (Shirani & Rafienejad, 2012; Bayat *et al.*, 2014) توابع انتقالی خاک یکی از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد ویژگی‌های دریافت خاک است که بین پارامترهای دریافت خاک و پارامترهای زودیافت خاک مانند جرم ویژه ظاهری و درصد اجزای بافت خاک که اندازه‌گیری آن‌ها سریع، آسان، کم‌هزینه است ارتباط برقرار می‌کند (Abbasi *et al.*, 2011). بافت خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد که تا حد زیادی تعیین‌کننده رفتار فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک است. تجزیه مکانیکی بافت خاک شامل اندازه‌گیری میزان سه بخش رس، سیلت و شن و تعیین کلاس بافت با استفاده از مثلث بافت خاک است. بعد فرکتال از شاخص‌های بافتی ذرات خاک که قادر است شکاف بین استفاده از مدل‌های تجربی و تفسیر فیزیکی توزیع اندازه ذرات را بیان می‌کند (Huang & Ghang, 2005). بعد فرکتال اساساً با استفاده از داده‌های کسر تجمعی ذرات- قطر محاسبه می‌شود (Sepaskhah & Tafteh, 2013). اخیراً توابعی ارائه شده که در آن‌ها از درصد‌های اجزای بافت خاک برای تخمین بعد فرکتال استفاده می‌شود. از نمونه‌های آن می‌توان به توابع هوانگ و ژانگ (Huang & Ghang, 2005) و سپاسخواه و تفته (Sepaskhah & Tafteh, 2013) اشاره کرد. روش‌های مختلفی مانند روش-های رگرسیونی، شبکه عصبی-مصنوعی و منطقه فازی در پی‌ریزی توابع انتقالی استفاده شده است. رگرسیون یک روش آماری برای بررسی و مدل‌سازی رابطه‌ی بین متغیرهاست. یکی از اهداف غالب بررسی آماری، یافتن روابطی است که به کمک آن بتوان اثر تغییرات یک یا چند متغیر (متغیر مستقل) را بر متغیرهای دیگر (متغیر وابسته) تخمین زد. روش رگرسیون خطی چندگانه روش رایجی است که هدف از آن، بیان متغیر وابسته به شکل

$$D = 3 - 0.118 \left[-\ln \left(\frac{Cl}{100} \right) + \left(\frac{Si + Sa}{100} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن D، بعد فرکتال cI، درصد رس، Si درصد سیلت و Sa درصد شن است. تابع رگرسیونی توسعه یافته با دو تابع انتقالی رگرسیونی رابطه ۲ و ۳ در برآورد CEC مقایسه می شود.

$$CEC = 0.301 \text{ Clay} + 1.09 \text{ OM} \quad (\text{Breeuwmsa. } 1986) \quad (2)$$

$$CEC = 6.49 + 0.1 \text{ Clay} + 0.34 \text{ OM} \quad (\text{Bell \& Van Kullen } 1995) \quad (3)$$

که در این معادلات، OM، درصد ماده آلی و Clay، درصد رس است.

ارزیابی کارایی مدل‌ها

جهت ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیونی از خطوط ۱:۱، معیارهای ضریب تعیین (R^2)، میانگین خطا (ME)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و نسبت میانگین هندسی خطا (GMER) استفاده شد. ضریب تبیین از نرم افزار STATISTICA استخراج و آماره‌های دیگر از رابطه‌های ۴، ۵ و ۶ به دست آمدند:

$$ME = \sum [(Pi - Oi) / n] \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum [(Pi - Oi)^2 / n]} \quad (5)$$

$$GMER = \exp [\sum \ln (Pi / Oi)] \quad (6)$$

که در آن‌ها Pi مقادیر برآورد شده CEC، Oi مقادیر اندازه‌گیری شده CEC، n: تعداد نمونه‌ها است (Wagner et al., 2001). مقایسه میانگین پارامترها در مجموعه داده‌های صحت و اعتبارسنجی با آزمون t و در سطح ۵ درصد انجام شد. کلیه محاسبات آماری در محیط نرم افزار STATISTICA 8.0 انجام گرفت.

نتایج و بحث

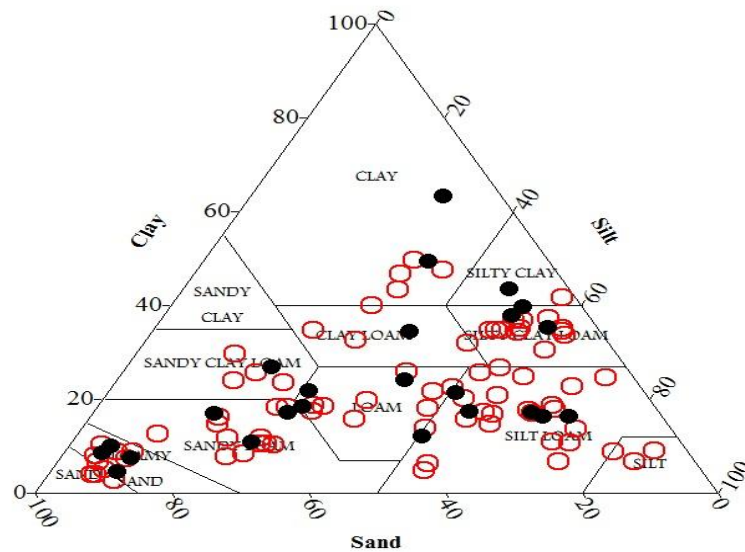
شکل ۱ توزیع بافت نمونه‌های خاک در مثلث بافت خاک را نشان می‌دهد. نمونه‌های خاک در ۱۱ کلاس از ۱۲ بافت کلاس USDA قرار دارند (شکل ۱). هیچ نمونه‌ای در کلاس رسی شنی (SaC) قرار نداشت. توزیع دو دسته نمونه‌های داده‌های صحت و اعتبارسنجی در کلاس‌های بافتی مشابه بود (شکل ۱). خلاصه آماری بافت، ماده آلی، چگالی ظاهری و CEC نمونه‌های خاک در جدول ۱ آمده است.

درصد رطوبت اشباع و pH توسعه داده شد. نتایج نشان داد که ماده آلی، درصد رطوبت اشباع و درصد رس به‌عنوان ورودی در مدل رگرسیونی استفاده شد. CEC از ویژگی‌های بسیار مهم خاک بوده که می‌تواند معیاری از حاصلخیزی، بار منفی رس و به تعبیری دیگر مقادیر بازهای تبدیلی خاک باشد، لذا برآورد این ویژگی خاک بسیار حائز اهمیت است. توابع انتقالی زیادی تاکنون برای برآورد این ویژگی خاک صورت گرفته است ولی مطالعات اندکی در برآورد این ویژگی با استفاده از بعد فرکتال اجزای بافت خاک صورت گرفته است. لذا هدف از این مطالعه (۱) توسعه توابع انتقالی با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک و (۲) مقایسه کارایی توابع ایجادشده با دو تابع دیگر است.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از داده‌های ۱۰۶ نمونه خاک بانک اطلاعاتی UNSODA^۱ استفاده شد. داده‌های بانک اطلاعاتی UNSODA دامنه گسترده‌ای از خاک‌ها با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مختلف را در بر گرفته است. لذا استفاده از این بانک داده در بسیاری از مناطق دنیا قابل کاربرد است. این بانک اطلاعاتی شامل داده‌های هیدرولیکی و توزیع اندازه ذرات، ماده آلی و CEC است. داده‌ها به دو دسته ۸۱ تایی و ۲۵ تایی تقسیم شدند. دسته ۸۱ تایی و ۲۱ تایی به ترتیب برای صحت سنجی مدل رگرسیونی و اعتبارسنجی مدل رگرسیونی استفاده شدند. داده‌های دسته دوم طوری انتخاب شدند که دارای توزیع بافتی یکسانی با داده‌های دسته اول باشند. دو نوع تابع انتقالی در برآورد CEC در نظر گرفته شد. در نوع اول از ویژگی‌های زودیافت خاک شامل اجزای بافت خاک، ماده آلی و چگالی ظاهری استفاده شد. در تابع دوم علاوه بر ویژگی‌های زودیافت از بعد فرکتال اجزای بافت خاک نیز استفاده شد. جهت پی‌ریزی توابع در ابتدا نرمالیده داده‌ها بررسی شد. همبستگی چندگانه داده‌ها با استفاده از شاخص تورم واریانس بررسی شد و ویژگی‌هایی که مقادیر تورم واریانس بیشتر از ۵ داشتند در توسعه تابع انتقالی استفاده نشدند. جهت تعیین داده‌های پرت از معیار دو برابر انحراف معیار استفاده شد. بعد فرکتال اجزای بافت خاک با استفاده از رابطه ۱ (سپاسخواه و تفته، ۲۰۱۳) برآورد شد.

1- The unsaturated soil hydraulic database



شکل ۱ - توزیع بافت خاک. دایره‌های توخالی و توپر به ترتیب داده‌های صحت‌سنجی و داده‌های اعتبارسنجی هستند.

Figure 1. Distribution of soil texture. Hollow and solid circles are calibration and validation datasets, respectively.

داده‌های صحت‌سنجی مقدار چگالی ظاهری خاک‌ها از $1/0.2$ تا $1/7.6$ گرم بر سانتی‌متر متغیر است. میانگین مقدار ماده آلی 0.70 درصد و از 0.08 تا $7/70$ درصد متغیر است. میانگین CEC $16/5$ و از حداقل 0.7 تا حداکثر $40/3$ میلی‌اکی‌والان در 100 گرم در مجموعه داده‌های صحت‌سنجی متغیر است (جدول ۱). اگرچه سعی شده است که خلاصه‌ی آماری دو مجموعه داده به هم نزدیک باشند وجود اندکی تفاوت، حتی اگر معنی‌دار نباشد، برای هر متغیر در بین دو مجموعه داده طبیعی است. حداقل مقدار D برابر $2/34$ و حداکثر آن $2/9$ بود. در این داده‌ها، طبق معمول، مقادیر کم D در بافت‌های شنی و مقادیر بزرگ D در بافت‌های رسی دیده شد.

بر اساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف همه ویژگی‌های خاک نرمال بودند. میانگین اجزای بافت، چگالی ظاهری، ماده آلی، pH و CEC در دو مجموعه داده‌های صحت و اعتبارسنجی تفاوت معنی‌داری باهم ندارند ($p > 0.05$). مقدار میانگین و میانه متغیرها نزدیک به هم بوده حاکی از نرمال بودن توزیع داده‌ها است (جدول ۱). در داده‌های صحت‌سنجی شن با میانگین $45/6\%$ بیشترین و رس با میانگین $18/3\%$ کمترین مقدار را در اجزای بافت خاک دارد (شکل ۱، جدول ۱). همین‌طور، بیشینه‌ی رس 58% است در حالی‌که بیشینه‌ی شن به 89% هم می‌رسد (جدول ۱). بنابراین تعدادی از نمونه‌های خاک در کلاس سبک: شنی (S) و شنی‌لومی (LS) قرار داشتند. در

جدول ۱- خلاصه آماری CEC و برخی از خصوصیات دیگر خاک. (A) و (B) به ترتیب داده‌های صحت‌سنجی و اعتبارسنجی خاک UNSODA می‌باشند

Table 2. Statistical summary of CEC and some other soil properties. (A) and (B) are calibration validation datasets for UNSODA soils

Properties	Unit	Mean		Median		Minimum		Maximum		Standard deviation	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Clay	%	18.3 ^a	15.8 ^a	15.0	15.9	1.2	2.0	58.3	63.1	14.0	10.1
Sand	%	45.6 ^a	47.2 ^a	41.3	49.0	4.0	4.0	89.8	86.0	29.6	28.9
Silt	%	40.5 ^a	38.4 ^a	38.2	39.5	4.3	3.9	85.5	70.1	21.2	23.3
pH	—	5.7	5.5	5.8	5.6	3.3	3.2	8.3	8.1	2.2	2.3
BD	$g\ m^{-3}$	1.40 ^a	1.46 ^a	1.45	1.49	1.02	1.07	7.76	1.69	0.18	0.14
OM	%	0.70 ^a	0.81 ^a	0.75	0.78	0.08	0.08	7.70	7.50	1.5	2.1
Fractal Dimension	—	2.66 ^a	2.65 ^a	2.67	2.68	2.34	2.42	2.90	2.85	0.12	0.11
CEC	$Cmol\ +Kg^{-1}$	16.5 ^a	20.4 ^a	16.6	23.3	0.7	0.7	40.3	37.6	9.4	9.9

توانایی ایجاد بار منفی هستند کاهش می‌یابد. افزایش چگالی ظاهری در نتیجه افزایش مقدار اجزای شن است، لذا چنانچه گفته شد با افزایش شن توانایی ایجاد و نگهداشت بار منفی و در نتیجه CEC کاهش می‌یابد. در پژوهش معماریان فر و بیگی هرچگانی نیز بین CEC با ماده آلی و درصد رس رابطه‌ی مستقیم و با درصد شن رابطه‌ی معکوس معنی‌داری وجود داشت (Memarin fard & Beigi, 2010). میرزاخانی و همکاران نیز بین CEC با درصد رس و ماده آلی همبستگی خوبی مشاهده کردند (Mirzakhani et al., 2005). بین درصد شن با دیگر اجزای بافت خاک (درصدهای سیلت و رس) رابطه‌ی منفی معنی‌داری وجود داشت که با پژوهش معماریان فر و بیگی هرچگانی همخوانی دارد (Memarin fard & Beigi, 2010).

همبستگی CEC با پارامترهای اجزای بافت خاک، چگالی ظاهری، ماده آلی و pH خاک‌های UNSODA در جدول ۲ آمده است. نتایج نشان داد که CEC با ماده آلی ($r=0/70$)، درصد رس ($r=0/59$) همبستگی مستقیم و با درصد شن ($r=-0/41$) و چگالی ظاهری ($r=-0/41$) همبستگی معکوس معنی‌داری دارد (جدول ۲). CEC با دیگر پارامترها (pH و درصد سیلت) رابطه‌ی معنی‌داری نداشت. در پژوهش همبستگی بالاتر درصد رس ($r=0/92$) با CEC را نسبت به همبستگی CEC با ماده آلی ($r=0/56$) گزارش شده است (Keshavarzi et al., 2011). در پژوهش دیگر نیز همبستگی قوی CEC با درصد رس نسبت به ماده آلی گزارش شد (Shirani & Rafienezad, 2012). همبستگی منفی بین درصد شن و CEC به این دلیل است که با افزایش شن ذراتی که دارای

جدول ۲- ضرایب همبستگی CEC با برخی از ویژگی‌های خاک خاک

Table 2. Correlation coefficient CEC and some soil properties

Sand	Silt	Clay	pH	OM	Bd	CEC	Parameter
						1.00	CEC
					1.00	-0.41*	Bd
				1.00	-0.57*	0.70*	OM
			1.00	0.09	0.15	0.13	pH
		1.00	0.20	0.45*	-0.12	0.59*	Clay
	1.00	0.19	0.03	0.02	0.08	0.14	Silt
1.00	-0.88*	-0.49*	0.15	-0.21	-0.03	-0.35*	Sand
-0.53*	-0.16	0.91*	0.12	0.38*	-0.13	0.58*	D-Fractal

*Shows a significant level of 5%

فرکتال و ضریب ماده آلی در سطح ۵٪ معنی‌دار شدند، لذا مدل نهایی برآورد CEC به شکل معادلات ۷ و ۸ توسعه یافت:

$$CEC=2.41+0.2 \text{ Clay}+ 0.85 \text{ OM} \quad P<0.001 \quad (7)$$

$$CEC= 4.158+ 3.156 \text{ OM} \quad P<0.001 \quad (8)$$

که در این معادلات D بعد فرکتال، OM ماده آلی (درصد) و Clay درصد رس هستند. چنانچه از رابطه سپاسخواه و تفته (Sepaskhah & Tafteh, 2013) مشخص است بعد فرکتال تحت تأثیر درصد رس خاک قرار دارد و اثرات توأم اجزای بافت خاک و عمدتاً ذرات رس خاک را نشان می‌دهد. در بین ذرات معدنی خاک، ذرات رس بیشترین ظرفیت تبادل کاتیونی را دارا هستند. هم‌چنین مواد نیز دارای ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی می‌باشند. ذرات رس

توسعه تابع رگرسیونی خطی برآورد CEC

جهت ایجاد تابع رگرسیونی خطی برآورد CEC، براساس جدول ۲ پارامترهایی که همبستگی مثبتی با CEC داشتند وارد مدل شدند. در رگرسیون چندگانه خطی اگر بین متغیرهای مستقل وابستگی خطی قوی مشاهده شود، هم‌راستایی^۱ چندگانه به وجود می‌آید. از میان متغیرهای مستقل بین درصدهای شن و سیلت همبستگی قوی ($r=0/88$) وجود داشت که احتمال هم‌راستایی چندگانه را ایجاد می‌کرد ولی چون درصد سیلت با CEC رابطه‌ی معنی‌داری نداشت، این متغیر در ایجاد تابع انتقالی وارد مدل نشد، لذا احتمال هم‌راستایی چندگانه در ایجاد تابع رگرسیونی وجود نداشت. از میان ضرایب پارامترهای ورودی مدل رگرسیونی، تنها ضرایب بعد

1 - Multiple alignment

آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE، ME و GMER روش‌های رگرسیونی خطی (مدل پیشنهادی، مدل بروسما و همکاران و بل و ونکولن) در برآورد CEC در داده‌های صحت‌سنجی خاک‌های UNSODA در جدول ۳ آمده است. از بین سه روش رگرسیونی خطی، مدل پیشنهادی مقدار R^2 بالاتری نسبت به مدل‌های بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) و بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) دارد ولی تفاوت زیادی بین مدل بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) و بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) وجود ندارد (جدول ۳). آماره RMSE خطا را نشان می‌دهد. مقدار RMSE در حالت بهینه یا حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند صفر است.

هر اندازه مقدار RMSE کوچک‌تر باشد تخمین از صحت بیشتری برخوردار است. بر اساس آماره RMSE روش رگرسیون خطی پیشنهادی فرکتالی کمترین خطا (meq $100^{-1}g$ RMSE = ۵/۳) را نسبت به سه روش رگرسیونی خطی دیگر دارد. شکل ۳ نیز مبین خطای کم‌تر روش رگرسیون خطی پیشنهادی نسبت به روش‌های رگرسیونی خطی بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) و بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) است (مقدار CEC تخمین زده شده به مقدار اندازه‌گیری شده نزدیک بوده و پراکندگی حول خط ۱:۱ بیشتر است).

آماره ME نشان‌دهنده وجود اریبی است (Abbasi *et al.*, 2011). مقادیر مثبت آن تخمین بیش از مقدار واقعی و مقادیر منفی آن تخمین کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد. هر اندازه آماره ME به صفر نزدیک‌تر باشد تخمین از اریبی کمتری برخوردار است (Abbasi *et al.*, 2011). روش‌های رگرسیونی خطی کم‌برآوردی در تخمین CEC را داشت. مدل بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) و مدل بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) کم‌برآوردی شدیدی را نشان می‌داد (در شکل ۲ کم‌برآوردی این دو مدل رگرسیونی خطی در برآورد CEC به‌طور وضوح مشخص است). مقدار آماره GMER برابر ۱ نشان‌دهنده تطابق دقیق مقدار تخمین-زده شده و مشاهده شده می‌باشد. مقدار GMER کمتر از ۱ دلالت بر کم‌برآوردی و GMER بیشتر از ۱ دلالت بر بیش‌برآوردی مدل دارد (Abbasi *et al.*, 2011). بر اساس این آماره در داده‌های صحت‌سنجی روش‌های رگرسیونی

به دلیل داشتن سطح ویژه بالا، دارای مکان‌های بیشتری برای تبادل کاتیون‌ها می‌باشند. بنابراین بسته به نوع رس که دارای بار منفی متفاوت هستند، ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌های مختلف، متفاوت است. ماده آلی نیز به دلیل سطح ویژه بالا و داشتن گروه‌های عامل آنیونی به مقدار زیاد، مکان مناسبی برای جذب و تبادل کاتیون‌ها می‌باشد (Krogh *et al.*, 2000). هورن و همکاران (Horn *et al.*, 2005) نیز از یک تابع انتقالی با متغیرهای ورودی درصد رس و ماده آلی به‌صورت رابطه ۹ در برآورد CEC استفاده کردند.

$$CEC = a_0 + a_1 OC + a_2 \text{ Clay} \quad (9)$$

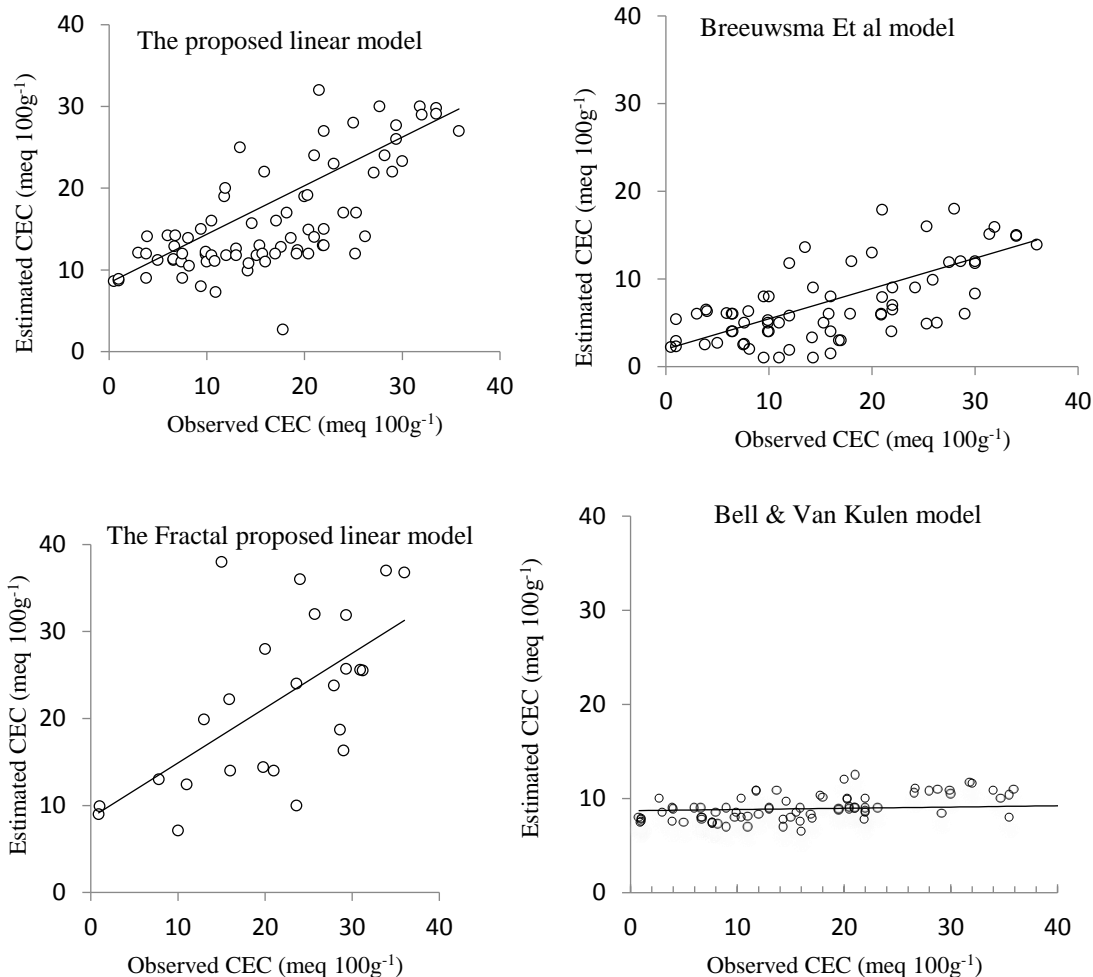
در مطالعه کروق و همکاران (Krogh *et al.*, 2000). در پیش‌بینی CEC خاک‌های دانمارک به‌وسیله روش رگرسیون چند متغیره، ۹۰٪ از تغییرات در مقادیر CEC با استفاده از مقدار رس و مواد آلی به‌عنوان متغیرهای وابسته توجیه شد. در پژوهش شیرانی و رفیع‌نژاد (Shirani & Rafienezad, 2012) نیز تنها ضرایب متغیرهای درصد رس و ماده آلی معنی‌دار شد، اگرچه اثر درصد رس بر CEC به‌صورت کاهشی بود با این حال در مدل رگرسیونی این اثرات معنی‌دار نشد.

صحت‌سنجی مدل‌های رگرسیونی

شکل ۲ نمودار خطوط ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر تخمین زده شده CEC توسط روش‌های مدل رگرسیونی پیشنهادی، پیشنهادی فرکتالی، مدل بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) و مدل بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) در داده‌های صحت‌سنجی خاک‌های UNSODA را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۲، تابع انتقالی پیشنهادی فرکتالی نسبت به توابع بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986)، مدل بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) و مدل رگرسیونی کارایی بیشتری دارد. توابع بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) و بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) کم‌برآوردی زیادی را نشان می‌دهد (پراکنش بیشتر داده‌ها در زیر خط ۱:۱ قرار دارد؛ شکل ۲). دلیل این کم‌برآوردی را می‌توان به ضریب بسیار کمتر ماده آلی در مدل‌های بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) و بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) نسبت به مدل پیشنهادی این پژوهش مربوط دانست.

خطی پیشنهادی کارایی بسیار بالاتری نسبت به روش‌های رگرسیونی خطی پیشنهادی توسط بل و همکاران (Bell & Van Kulen, 1995) و بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) در برآورد CEC دارد.

خطی کم‌برآوردی را در برآورد CEC نشان می‌دهد (جدول ۳). بر اساس آماره‌ی GMER نیز دو مدل بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) و مدل بل و ونکولن (Bell & Van Kulen, 1995) کم‌برآوردی بسیار زیادی را نشان می‌داد. به‌طور کلی بر اساس آماره‌ها روش رگرسیون



شکل ۲- خطوط ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر تخمین زده شده CEC توسط روش‌های رگرسیونی خطی (مدل پیشنهادی، مدل بروسما و همکاران و بل و ونکولن) در داده‌های صحت سنجی

Figure 2. 1:1 lines of measured values versus predicted values for CEC estimation using linear regression methods (The proposed model, Breeuwsma *et al* and Bell & Van Kulen) in calibration dataset.

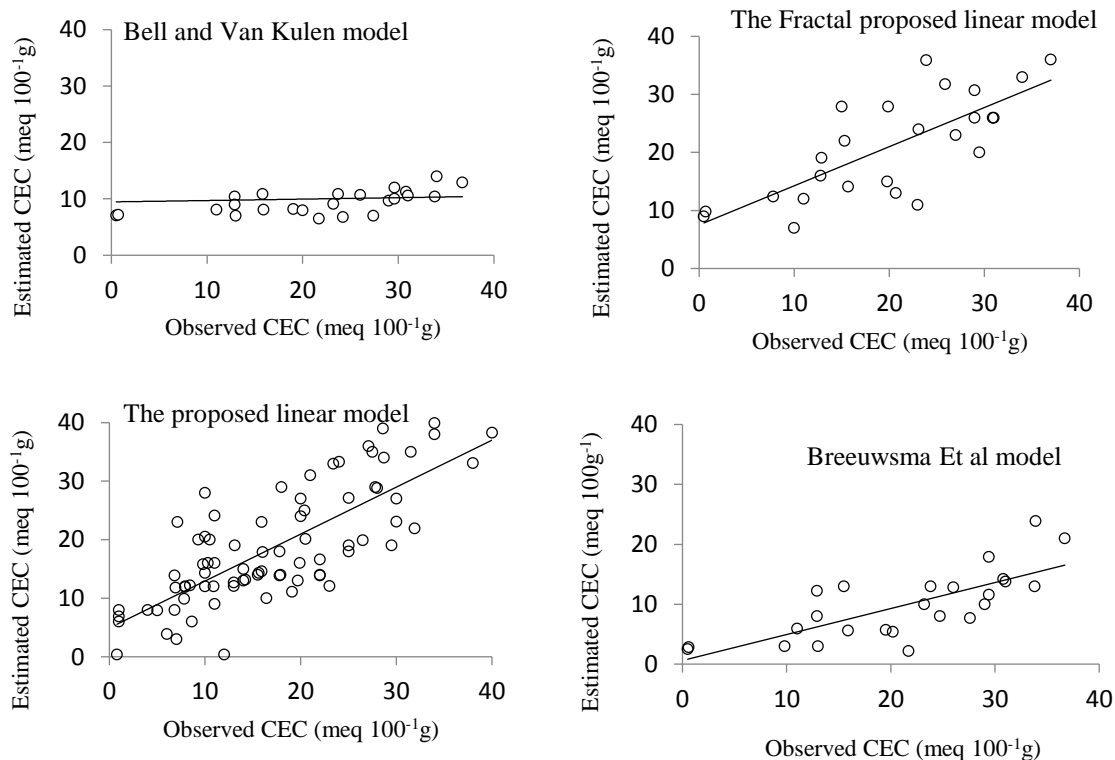
Regression model	R ²	RMSE (meq100 ⁻¹ g)	ME (meq100 ⁻¹ g)	GMER
The Fractal proposed linear model	0.68	5.3	-0.004	1.11
The proposed linear model	0.61	6.2	0.01	1.12
Bell & Van Kulen model	0.51	11.2	-7.5	0.69
Breeuwsma Et al model	0.52	11.1	-8.7	0.50

بروسما و همکاران) در داده‌های اعتبارسنجی در شکل ۳ آمده است. در داده‌های اعتبارسنجی نیز همانند داده‌های صحت سنجی روش رگرسیون خطی پیشنهادی در برآورد CEC کارایی بیشتری نسبت به روش‌های رگرسیونی

اعتبارسنجی مدهای رگرسیونی نمودار خطوط ۱:۱ مقادیر CEC تخمین‌زده شده در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده با روش‌های رگرسیونی خطی (مدل رگرسیونی پیشنهادی، مدل بل و ونکولن و مدل

اعتبارسنجی نیز مشابه با داده‌های صحت‌سنجی رگرسیون خطی پیشنهادی در برآورد CEC بر اساس آماره‌ها کارایی بالاتری نسبت به مدل بل و ونکولن (Bell & Van Kullen, 1995) و مدل بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) دارد. مدل پیشنهادی در داده‌های اعتبارسنجی نسبت به داده‌های صحت‌سنجی مقدار R^2 پایین‌تر و RMSE بیشتری دارد.

خطی مدل بل و ونکولن و مدل بروسما و همکاران دارد. مدل‌های بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) و بل و همکاران (Bell & Van Kullen, 1995) در داده‌های اعتبارسنجی همانند داده‌های صحت‌سنجی کم‌برآوردی شدیدی را نشان می‌دهد (شکل ۳). جدول ۴ آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE، ME و GMER روش‌های رگرسیونی خطی (مدل‌های توسعه‌یافته فرکتالی و پیشنهادی، مدل بروسما و همکاران و بل و ونکولن) در برآورد CEC در داده‌های اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. در داده‌های



شکل ۳- خطوط ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر تخمین زده شده CEC توسط روش‌های رگرسیونی خطی (مدل پیشنهادی، مدل بروسما و همکاران و بل و ونکولن) در داده‌های اعتبارسنجی

Figure 3. 1:1 lines of measured values versus predicted values for CEC estimation using linear regression methods (The proposed model, Breeuwsma *et al* and Bell & Van Kullen) in validation dataset.

جدول ۴- آماره‌های ارزیابی R^2 ، RMSE، ME و GMER روش‌های رگرسیونی خطی در داده‌های اعتبارسنجی

Table 4. Evaluation statistics of R^2 ، RMSE، ME and GMER for Linear regression methods in validation dataset

Regression model	R^2	RMSE (meq100 ⁻¹ g)	ME (meq100 ⁻¹ g)	GMER
The Fractal proposed linear model	0.59	5.4	-0.054	1.09
The proposed linear model	0.54	6.4	0.068	1.13
Bell and Van Kullen model	0.53	14.2	-11.7	0.57
Breeuwsma Et al model	0.52	13.3	-11.5	0.50

ارایی بیشتری (بیش‌برآوردی) دارد (جدول‌های ۳ و ۴). بر اساس آماره‌ها، مدل رگرسیون خطی پیشنهادی نسبت به

همچنین بر اساس آماره‌های ME و GMER مدل پیشنهادی در داده‌های اعتبارسنجی بر خلاف داده‌های صحت‌سنجی

این مطالعه نشان داد با توجه به اینکه بیشتر ویژگی‌های زودیافت خاک دارای همبستگی خوبی با CEC بودند با این حال تنها ضرایب متغیرهای ماده آلی و بعد فرکتال معنی‌دار شده و مدل رگرسیونی بر اساس این دو پارامتر توسعه یافت. درصد رس و ماده آلی بیشترین همبستگی را با CEC داشتند لذا معنی‌دار شدن بعد فرکتال با توجه به ارتباط این پارامتر با درصد رس بسیار منطقی و قابل توجیه است. همچنین بر اساس آماره‌های ارزیابی مدل رگرسیونی پیشنهادی با استفاده از بعد فرکتال نسبت به توابع ارائه‌شده پیشنهادی بدون در نظر گرفتن بعد فرکتال و نیز ارائه‌شده توسط بل و ونکولن و بروسما و همکاران دارای کارایی بالاتری بوده و با دقت و صحت بیشتری پیش‌بینی می‌کند. با توجه به کارایی مناسب و خوب تابع پیشنهادی بر اساس بعد فرکتال می‌توان بیان داشت استفاده از بعد فرکتال به‌عنوان پارامتری که اثرات توأم همه اجزای بافت خاک را نشان می‌دهد بسیار کارآمد و روشی نوین است.

مدل‌های بل و ونکولن (Bell & Van Kullen, 1995) و بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) کارایی بالاتری دارد (جدول ۴). مقدار بالاتر ضریب تعیین ($R^2 = 0.59$)، خطای پایین‌تر ($RMSE = 5/4 \text{ meq } 100^{-1} \text{ g}$) کارایی بهتر و تخمین‌های صحیح‌تر مدل رگرسیونی پیشنهادی را نسبت به مدل‌های بل و ونکولن (Bell & Van Kullen, 1995) و بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) را نشان می‌دهد (جدول ۴). مدل‌های بل و ونکولن (Bell & Van Kullen, 1995) و بروسما و همکاران (Breeuwsma, 1986) بر اساس آماره‌های ME و GMER در داده‌های اعتبارسنجی همانند داده‌های صحت سنجی کم‌برآوردی شدید این دو مدل را در برآورد CEC نشان می‌دهد (جدول ۴، شکل ۴).

نتیجه‌گیری کلی

References

- Abbasi Y., Ghanbarian-Alavijeh B., Liaghat A. M., and Shorafa M. 2011. Evaluation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve of saline and saline-alkali soils of Iran. *Pedosphere*, 21(2): 230-237.
- Bayat H., Davatgar N., and Jalali M. 2014. Prediction of CEC using fractal parameters by artificial neural networks. *International Agrophysics*, 28: 143-152.
- Bell M. A., & Van Keulen H. 1995. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. *Soil Science Society of America Journal*, 59(3): 865-871.
- Breeuwsma A. J. H. M., Wosten J. H. M., Vleeshouwer J. J., Van Slobbe A. M., and Bouma J. 1986. Derivation of land qualities to assess environmental problems from soil surveys. *Soil Science Society of America Journal*, 50(1): 186-190.
- Fooladmand H.R. 2008. Cation Exchangeable Capacity estimation using some soil properties. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 1: 1-8. (In Persian)
- Horn R., Fleige H., Richter F. H., Czyz E. A., Dexter A., Diaz-Pereira E., and De la Rosa D. 2005. SIDASS project: Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil and Tillage Research*, 82(1): 47-56.
- Huang G., and Zhang R. 2005. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 127(1): 52-61.
- Keshavarzi A., Sarmadian F., Labbafi R., and Vandechali M. R. 2011. Modeling of soil cation exchange capacity based on fuzzy table look-up scheme and artificial neural network approach. *Modern Applied Science*, 5(1): 153.
- Krogh L., Breuning-Madsen H., and Greve M. H. 2000. Cation-exchange capacity pedotransfer functions for Danish soils. *Acta Agriculturae Scandinavica*, Section B-Plant Soil Science, 50(1): 1-12.
- Mehrbanian M., Mehrjerdi R., and Dehghani F. 2010. The efficiency of Transfer functions to estimate CEC of lime and plaster soils, Yazd province. *Journal of Soil and Water Conservation*. 17(1): 113-129. (In Persian)
- Memarianfard M., and Beigi H. H. 2010. Comparison of Artificial Neural Network and Regression Pedotransfer Functions Models for Prediction of Soil Cation Exchange Capacity in Chaharmahal-Bakhtiari Province. *Iranian Journal of Soil Research*, 23(4): 90-99. (In Persian)

- Mirzakhni R., Shabanpoor Shahrestani M., and Saadat S. 2005. Estimates of soil moisture characteristic curve by using transfer functions. *Journal of Agricultural Science*. 15(3): 151-162. (In Persian)
- Schaap M. G. 2004. Accuracy and uncertainty in PTF predictions. *Developments in Soil Science*, 30 33-43.
- Sepaskhah A. R., and Tafteh A. 2013. Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(1): 93-103.
- Shirani H., and Rafienezad, N. 2012. Prediction of some difficult-to-measure soil characteristics using regression pedotransfer functions and artificial neural network in Kerman Province. *Iranian Journal of Soil Research*, 25 (4): 349-359. (In Persian)
- Stat Soft, I. N. C. 2011. STATISTICA (data analysis software system), version 10. Tulsa, USA, 150.
- Wagner, B., Tarnawski, V. R., Hennings, V., Muller, 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.

Prediction of Cation Exchange Capacity using fractal dimension of soil particle size distribution

Mahmood Reza Sadikhani^{1*}

(Received: April 2017

Accepted: March 2018)

Abstract

Cation exchange capacity (CEC) is one of the most important soil properties. This property can describe many of soil properties such as soil fertility, specific area and soil water content. Whereas measuring this property is expensive, time-consuming and laboratory tools needed, hence, prediction of CEC using pedotransfer function (PTF) and soil easily properties is very important in soil science studies. So, the objective of the present study was to develop regression pedotransfer functions to predict the CEC using fractal dimension of soil particles. Consequently, 106 soil samples of UNSODA dataset were used. Fractal dimension of soil particle size was calculated and then was used to develop a PTF to predict the soil CEC. Performance of suggested fractal regression was compared the existed functions that use other soil properties as input. Results showed that between all soil easily properties only fractal dimension, % clay and organic matter had a significant coefficient. Suggested fractal regression model ($R^2= 0.62$, RMSE= 5.3 and ME= 0.004) and validation ($R^2= 0.59$, RMSE= 5.4 and ME= 0.054) had a better performance that other functions including suggested function, Bell and Vankulen. With considering of good performance of the suggested fractal function, applying fractal dimension that shows effects of soil texture with a number is approved.

Keywords: Fertility, Soil texture, Transfer function, Readily available soil properties

Sadikhani M. R. 2019. Prediction of Cation Exchange Capacity using fractal dimension of soil particle size distribution. *Applied Soil Research*, 7 (2):56-66.

1- Young Researchers and Elite Club, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

* Corresponding author: mahmoodrezasadikhani@yahoo.com