

Improving the Estimation of Soil Cation Exchange Capacity Using Fractal Dimensions

HASAN MOZAFFARI¹, ALI AKBAR MOOSAVI^{2*}, FARNAZ AHMADI³

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.
(Received: Aug. 19, 2020- Revised: Oct. 24, 2020- Accepted: Oct. 31, 2020)

ABSTRACT

Cation exchange capacity (CEC) is one of the most important soil chemical properties in terms of plant nutrition and pollutants adsorption in soil that its measurement is time-consuming and expensive. Therefore, this study aimed to estimate soil CEC using values of organic matter, soil textural components, and Tyler and Wheatcraft (D_T) and Sepaskhah and Tafteh (D_S) fractal dimensions and also to investigate the efficiency of mentioned fractal dimensions as an independent variable and its effect on the accuracy of regression relationships to estimate soil CEC. In this study, data from 100 soil samples of UNSODA soil database were used. Soil primary particles size distribution was calculated using the Skaggs approach and fractal dimension of soil primary particles was calculated using the Sepaskhah and Tafteh and Tyler and Wheatcraft approaches. Results showed that the CEC values had significant negative relationship with sand content, and significant positive relationship with logarithm (in base 10) of organic matter, clay, D_S and D_T values. Values of training and test data determination coefficients, normalized root mean square error (%) and Nash-Sutcliffe coefficient for multivariate regression relationship between CEC versus logarithm (in base 10) of organic matter and clay were respectively equal to 0.77, 0.84, 17.2 and 0.92; between CEC versus logarithm (in base 10) of organic matter and D_S were respectively equal to 0.77, 0.85, 17.2 and 0.92 and between CEC versus logarithm (in base 10) of organic matter and D_T were respectively equal to 0.77, 0.87, 14.0 and 0.93. Therefore, the most accuracy of regression relationships to estimate CEC obtained when organic matter and D_T variables was used as independent variables. In other words, application of D_T improved CEC estimation.

Keywords: Tyler and Wheatcraft Fractal Dimension, Sepaskhah and Tafteh Fractal Dimension, Soil Primary Particles Size Distribution, Clay, Organic Matter.

بهبود برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از ابعاد فرکتالی

حسن مظفری^۱، سید علی اکبر موسوی^{۱*} و فرناز احمدی^۱

۱. بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۸/۱۰)

چکیده

ظرفیت تبادل کاتیونی^۱ (CEC) یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک از نظر تغذیه گیاه و جذب سطحی آلاینده‌ها در خاک است که اندازه‌گیری آن زمان‌بر و پرهزینه است. بنابراین این پژوهش با هدف برآورد CEC خاک با استفاده از مقادیر ماده آلی، اجزای بافت خاک و ابعاد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت (DT) و سپاسخواه و تافته (Ds) و همچنین بررسی کارایی ابعاد فرکتالی ذکر شده به‌عنوان یک متغیر مستقل و تأثیر آن بر دقت روابط رگرسیونی پیش‌بینی CEC خاک انجام شد. در این پژوهش از داده‌های ۱۰۰ نمونه خاک مربوط به بانک اطلاعات خاک UNSODA^۲ استفاده شد. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با استفاده از روش اسکگز و بعد فرکتالی اندازه ذرات اولیه خاک نیز با استفاده از دو روش پیشنهادی سپاسخواه و تافته و تایلر و ویت‌کرفت محاسبه شد. نتایج نشان داد که مقادیر CEC دارای ارتباط منفی معنی‌دار با مقدار شن و ارتباط مثبت معنی‌دار با مقادیر لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی، رس، Ds و DT داشت. مقادیر ضرایب تعیین داده‌های آموزش و آزمون، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۳ (درصد) و ضریب نش-ساتکلیف برای ارتباط رگرسیون چند متغیره بین CEC با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و رس به ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۴، ۱۷/۲ و ۰/۹۲؛ بین CEC با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و Ds به ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۵، ۱۷/۲ و ۰/۹۲ و بین CEC با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و DT به ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۷، ۱۴/۰ و ۰/۹۳ بودند. بنابراین بیشترین دقت روابط رگرسیونی با ورود متغیرهای مستقل لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و DT حاصل شد و استفاده از بعد فرکتالی DT سبب افزایش دقت تخمین‌ها شد.

واژه‌های کلیدی: بعد فرکتال تایلر و ویت‌کرفت، بعد فرکتال سپاسخواه و تافته، توزیع اندازه ذرات اولیه خاک، رس، ماده آلی.

مقدمه

از جمله ویژگی‌های مهم خاکی که معیاری از تغذیه گیاه و جذب سطحی آلاینده‌ها و جلوگیری از آبتویی آن‌ها از خاک است، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) می‌باشد (Tang et al., 2009). به‌طور کلی ظرفیت تبادل کاتیونی عبارت است از مقدار کل کاتیون-هایی که خاک می‌تواند در واحد جرم خود به‌صورت قابل تبادل نگه دارد (میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم خاک یا سانتی‌مول بار در کیلوگرم خاک). در واقع ظرفیت تبادل کاتیونی یکی از ویژگی‌های مهم خاک است که در کاربردهای مختلفی مانند مسائل کشاورزی و عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در کشاورزی، ظرفیت تبادل کاتیونی بیانگر توانایی خاک برای حفظ مواد مغذی ضروری لازم برای رشد گیاه و همچنین ایجاد خاصیت بافری در برابر تغییرات pH در خاک است. در استفاده‌های مهندسی خاک نیز، ظرفیت تبادل کاتیونی برای برآورد اولیه طراحی ساخت و ساز و ارزیابی پتانسیل تورم خاک و رس‌ها استفاده می‌شود (Yilmaz, 2006).

همچنین از مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی به‌عنوان داده ورودی در مدل‌های خاک و محیط زیست استفاده می‌شود (Keller et al., 2001). رس‌ها و مواد آلی خاک به دلیل دارا بودن سطح ویژه و بارالکتریکی زیاد نقش مهمی در مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارند و با زیاد شدن مقادیر رس و ماده آلی در خاک مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی افزایش می‌یابد (Saidian et al., 2016). با توجه به اهمیت این ویژگی و اینکه اندازه‌گیری آن در مطالعات خاکشناسی هزینه زیادی داشته و وقت‌گیر است؛ بنابراین در بسیاری موارد، ظرفیت تبادل کاتیونی جزء ویژگی‌های دیرپافت و هزینه‌بر خاک محسوب می‌شود. به همین دلیل مطالعات زیادی برای برآورد این ویژگی با استفاده از روش‌های غیرمستقیم انجام شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (Moosavi and Sepaskhah, 2012a; Jafarzadeh et al., 2016; Seyedmohammadi et al., 2016; Bariklo et al., 2018)، روش‌های مبتنی بر طیف‌سنجی و توابع انتقالی طیفی (Ulusoy et al., 2016; Karimi et al., 2017;)

*نویسنده مسئول: aamousavi@gmail.com و aamousavi@shirazu.ac.ir

1 Cation Exchange Capacity (CEC)

2 Unsaturated Soil Hydraulic Database (UNSODA)

3 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

فرکتالی اندازه ذرات خاک مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی را با دقت مناسبی با ضریب تبیین ۰/۸ برآورد کرد. همچنین Mozaffari and Moosavi (2020) در خاک‌های آهکی منطقه باجگاه استان فارس گزارش کردند که بخش زیادی از تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی وابسته به اندازه ذرات خاک است و برآورد این ویژگی با استفاده از ابعاد فرکتالی با دقت مناسبی امکان‌پذیر است.

بنابر اهمیت، زمان‌بر و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی در مطالعات خاکشناسی و همچنین سادگی اندازه‌گیری ماده آلی و توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و وجود آن‌ها در بانک‌های اطلاعات داده، پژوهش حاضر با هدف‌های زیر انجام شد: (۱) بررسی امکان برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از مقادیر ماده آلی، اجزای بافت (شن، سیلت و رس) و ابعاد فرکتالی در خاک‌های بانک اطلاعات خاک UNSODA (۲) بررسی اثر ابعاد فرکتالی بر دقت روابط رگرسیونی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی یا به عبارتی بررسی دقت روابط رگرسیونی پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی با جایگذاری ابعاد فرکتالی به-عنوان یک متغیر مستقل، در خاک‌های بانک اطلاعات خاک UNSODA.

مواد و روش‌ها

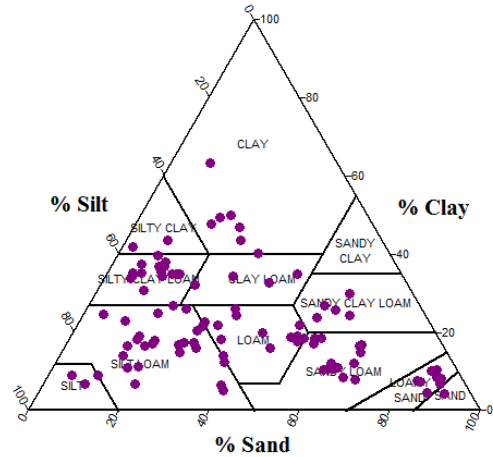
در این پژوهش از داده‌های ۱۰۰ نمونه بانک اطلاعات خاک UNSODA استفاده شد. در این سری داده‌ها اطلاعات کافی هر نمونه خاک شامل ظرفیت تبادل کاتیونی، داده‌های بافت خاک (شن، سیلت و رس) و ماده آلی وجود داشت. در انتخاب داده‌ها سعی شد که داده‌های انتخاب شده محدوده تغییرات نسبتاً زیادی را از نظر مقادیر ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، بافت و کلاس بافت خاک داشته باشند. داده‌های انتخاب شده در ۱۱ کلاس بافت خاک قرار گرفتند (شکل ۱) که نشان دهنده محدوده تغییرات زیاد بافت خاک و به تبع آن تغییرات زیاد بعد فرکتالی خاک است. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با استفاده از روش اسکگز (Skaggs *et al.*, 2001) و با استفاده از ۳ ذره شن، سیلت و رس و بعد فرکتالی اندازه ذرات اولیه خاک نیز با استفاده از دو روش پیشنهادی سپاسخواه و تافته (Sepaskhah and Tafteh, 2013) و تایلر و ویت‌کرفت (Tyler and Wheatcraft, 1992) به-شرح زیر محاسبه شدند.

(Mousavi *et al.*, 2018) و رگرسیون‌های خطی و غیرخطی یک یا چند متغیره (Fooladmand, 2008a; Fooladmand, 2008b; Mehrabian *et al.*, 2010; Esmaeelnejad *et al.*, 2014; Karimi *et al.*, 2017) اشاره کرد. در روش‌های رگرسیونی ویژگی‌های دیرپافت خاک (مانند هدایت هیدرولیکی، منحنی مشخصه رطوبتی، سطح ویژه، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و غیره) به-صورت تابعی از ویژگی‌هایی که به سادگی و با هزینه کمتری قابل اندازه‌گیری هستند (درصد ذرات اولیه، بعد فرکتال، ماده آلی، چگالی ظاهری و غیره)، مرتبط می‌شوند.

فرآیندهای خاک، مانند تجمع آلاینده‌ها، دینامیک عناصر غذایی و آلاینده‌ها و انتقال مواد شیمیایی، تقریباً با پدیده‌های سطحی که بین سطوح داخلی فازهای جامد رخ می‌دهند، مرتبط می‌باشند. بنابراین در مطالعات مدل‌سازی این فرآیندها به سطح ویژه فاز جامد خاک ارتباط داده می‌شوند (Sepaskhah *et al.*, 2010). نظریه فرکتال^۱ عمدتاً بی‌نظمی، پیچیدگی و شباهت در طبیعت و جامعه را توصیف می‌کند و برای شناسایی قوانین توصیف بسیاری از وقایع نامنظم استفاده می‌شود (Mohammadi, 2010). مطالعات زیادی در ارتباط با برآورد ویژگی‌های خاکی با استفاده از بعد فرکتالی^۲ (D) انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به قابلیت بعد فرکتالی خاک در برآورد برخی ویژگی‌های دیرپافت خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع (Sedaghat *et al.*, 2016; Rezaei Abajelu and Zeinalzadeh, 2017) و غیر اشباع (Xu and Dong, 2004; Xu, 2004; Sadeghi, 2011; Hunt *et al.*, 2013; Alfaro Soto *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2019) منحنی مشخصه آب خاک (Zhou *et al.*, 2019) رطوبت نقطه پژمردگی دائم (Zhou *et al.*, 2019) مقدار رطوبت خاک در مکش‌های مختلف (Ostovari and Beigi Harchegani, 2013) و سطح ویژه خاک (Ersahin *et al.*, 2006; Sepaskhah and Tafteh, 2013; Esmaeelnejad *et al.*, 2014) اشاره کرد. با توجه به اینکه بعد فرکتالی ذرات جامد از توزیع اندازه ذرات اولیه خاک محاسبه می‌شود، بنابراین این ویژگی می‌تواند با ظرفیت تبادل کاتیونی که عمدتاً با سطوح داخلی و خارجی ذرات خاک مرتبط است، ارتباط داده شود. مطالعات محدودی در ارتباط با برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از ابعاد فرکتالی انجام شده است. در این راستا (Ersahin *et al.*, 2006) گزارش کردند که بعد فرکتالی با درصد رس و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت، مناسب و معنی‌دار دارد. (Esmaeelnejad *et al.*, 2014) در خاک‌های مناطق جنوبی استان گیلان بیان کردند که می‌توان با استفاده از ابعاد

$$\omega = \frac{(Cl + Si + Sa)^{-1} - 1}{Cl^{-1} - 1} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن‌ها Cl ، Si و Sa به ترتیب مقادیر فراوانی نسبی رس، سیلت و شن می‌باشد. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با استفاده از جایگذاری شعاع‌های $1/0.7$ ، 2 ، 3 ، $5/2$ ، 13 ، 19 ، 29 ، 50 ، 150 ، 500 و 1000 میکرومتر در معادله پیشنهادی Skaggs *et al.* (2001) پیش‌بینی شد و برای محاسبه بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت (Tyler and Wheatcraft, 1992) مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱- پراکنش نقاط مورد مطالعه در مثلث بافت خاک

تعیین بعد فرکتال اندازه ذرات اولیه خاک با روش سپاسخواه و تافته (D_s)

Sepaskhah and Tafteh, (2013) توزیع اندازه ذرات اولیه خاک را با استفاده از روش اسکگز (Skaggs *et al.*, 2001) و Fooladmand and Sepaskhah (2006) برآورد کردند و براساس توزیع تخمینی به‌دست آمده بعد فرکتالی ارائه شده به‌وسیله کراوچنکو و ژانگ (Kravchenko and Zhang, 1998) را محاسبه و این بعد فرکتالی را با استفاده از سه ذره رس، سیلت و شن به‌صورت زیر برآورد کردند:

$$D_s = 3 - 0.118 \left[-\ln \left(\frac{Cl}{100} \right) + \left(\frac{Si + Sa}{100} \right) \right] \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن D_s بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته، Cl درصد رس، Si درصد سیلت و Sa درصد شن می‌باشد.

تعیین بعد فرکتال اندازه ذرات اولیه خاک با روش تایلر و ویت-کرفت (D_T)

Tyler and Wheatcraft (1992) مدل فرکتالی را بر پایه جرم ذرات اولیه خاک ارائه کردند. آنان با فرض ثابت بودن جرم ویژه ذرات در دامنه اندازه‌های مورد آزمایش، رابطه تعداد-اندازه را به-صورت جرم تجمعی ذرات کوچک‌تر از یک اندازه معین بیان کردند. آنان رابطه توانی را بر مبنای جرم نرمال شده ذرات کوچک تر از یک اندازه معین به‌شکل زیر ارائه نمودند:

$$\frac{M_{<d}}{M_T} = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^{3-D_T} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن $M_{<d}$ و M_T به ترتیب جرم تجمعی ذرات کوچک‌تر از قطر معین d و جرم کل نمونه خاک (واحد جرم)، نسبت نرمال شده جرم در هر بخش اندازه‌ای، d_{max} قطر بزرگترین ذرات در نمونه مورد آزمایش (واحد طول) و D_T مقدار بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت می‌باشد. اگر از طرفین رابطه (۹) لگاریتم طبیعی

محاسبه توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با استفاده از روش اسکگز (Skaggs *et al.* (2001) با در نظر گرفتن توزیع لوجستیک اندازه ذرات، مدلی را برای پیش‌بینی این توزیع با استفاده از سه ذره رس، سیلت و سیلت پیشنهاد کردند. آنان مدل زیر را برای محاسبه درصد تجمعی ذرات کوچک‌تر از یک شعاع مشخص گزارش کردند:

$$P_{<R} = \frac{1}{1 + (Cl^{-1} - 1) \exp[-u(R-1)^c]} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن $P_{<R}$ فراوانی تجمعی ذرات اولیه کوچک‌تر از شعاع مشخص R (میکرومتر)، Cl^{-1} فراوانی نسبی رس در خاک و u و c ضرایب مدل هستند که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$c = \alpha \ln \left(\frac{v}{\omega} \right) \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$u = \frac{(-v)^{1-\beta}}{(-\omega)^{-\beta}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

مقادیر ضرایب α و β از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\alpha = \frac{1}{\ln \left(\frac{r_1 - r_0}{r_2 - r_0} \right)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\beta = \alpha \ln \left(\frac{r_1 - r_0}{r_0} \right) \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن‌ها r_2 و r_1 ، r_0 به ترتیب حد بالایی شعاع ذرات رس، سیلت و شن (به ترتیب ۱، ۲۵ و ۹۹۹ میکرومتر) براساس سیستم طبقه‌بندی USDA هستند. همچنین مقادیر ضرایب v و ω با استفاده از فراوانی نسبی ذرات شن، سیلت و رس به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

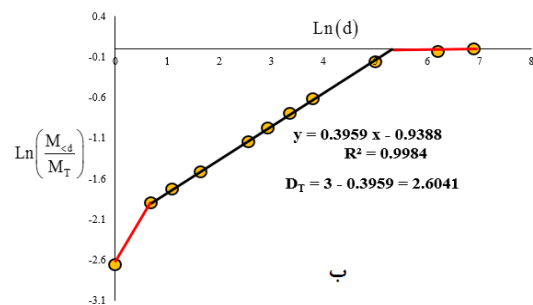
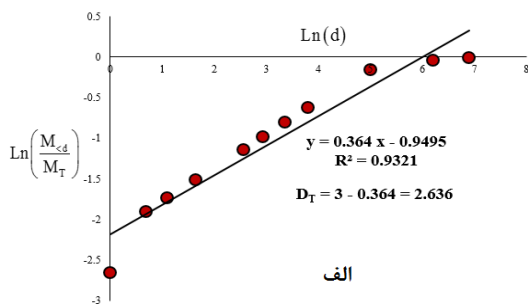
$$v = \ln \left[\frac{(Cl + Si)^{-1} - 1}{Cl^{-1} - 1} \right] \quad (\text{رابطه ۶})$$

گرفته شود این رابطه به صورت تابع خطی زیر در می‌آید:

$$\ln\left(\frac{M_{<d}}{M_T}\right) = (3 - D_T) \cdot \ln(d) - a \quad (\text{رابطه } 10)$$

$$a = (3 - D_T) \cdot \ln(d_{\max}) \quad (\text{رابطه } 11)$$

که a برای هر خاک مقدار ثابتی می‌باشد. اگر خطی به مقادیر $\ln\left(\frac{M_{<d}}{M_T}\right)$ در مقابل $\ln(d)$ به تمام نقاط اندازه‌گیری یا محاسبه شده منحنی دانه‌بندی برازش داده شود، شیب خط به‌دست آمده از تمام مقادیر توزیع اندازه ذرات اولیه خاک عبور نخواهد کرد (شکل ۲، الف) و مقدار بعد فرکتالی محاسبه شده به این روش از مقدار واقعی دور خواهد بود (Ghanbarian and Daigle, 2015). در همین راستا (Daigle, 2015) پیشنهاد کردند که برخی نقاط ابتدایی و انتهایی توزیع اندازه ذرات اولیه خاک که باعث غیرخطی شدن مقادیر



شکل ۲- ترسیم لگاریتم طبیعی مقادیر نسبت نرمال شده جرم ذرات خاک در مقابل لگاریتم طبیعی قطر ذرات. الف) برازش معادله خطی به همه داده‌های توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و ب) برازش معادله خطی به داده‌های توزیع اندازه ذرات اولیه خاک پس از حذف برخی نقاط ابتدایی و انتهایی (Ghanbarian and Daigle, 2015)

متغیره (گام به گام^۱) برای برآورد متغیر وابسته (ظرفیت تبادل کاتیونی) استفاده شد. در این مرحله ویژگی ظرفیت تبادل کاتیونی مربوط به گروه آموزش داده‌ها به‌عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های زودیافت خاک شامل درصد ماده آلی، شن، سیلت و رس و مقادیر ابعاد فرکتالی سپاسخواه و تافته (Sepaskhah and Tafteh, 2013) و تایلر و ویت‌کرفت (Tyler and Wheatcraft, 1992) به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده و روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی یک و چند متغیره (گام به گام) بین متغیر وابسته با متغیرهای مستقل (در سطح معنی‌داری ۵ درصد) به‌دست آمد. پس از به‌دست آوردن روابط رگرسیونی از مرحله آموزش، با قرار دادن مقادیر متغیرهای مستقل موجود در معادلات از داده‌های گروه آزمون، مقدار متغیر وابسته (ظرفیت تبادل کاتیونی) برآورد شد. در نهایت مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی

پی‌ریزی مدل‌های رگرسیونی و ارزیابی کارایی آن‌ها در برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی

در ابتدا ویژگی‌های آمار توصیفی کل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۳ محاسبه شد (جدول ۱). نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون توزیع نرمال کلوموگروف-اسمیرنوف بررسی شد و ویژگی‌هایی که با حذف حداکثر ۱۰ درصد داده‌های پرت به توزیع نرمال نزدیک نشدند، با استفاده از تبدیل لگاریتمی توزیع داده‌ها نرمال شدند. برای ایجاد مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی کننده، داده‌ها به‌طور تصادفی به دو گروه داده‌های آموزش (۷۵ درصد داده‌ها) و آزمون (۲۵ درصد داده‌ها) تقسیم شدند. پس از مشخص شدن بهترین رابطه (خطی یا غیرخطی) بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و ویژگی‌های خاکی مورد مطالعه، در مرحله آموزش از روش رگرسیون خطی و غیرخطی یک و چند

اندازه‌گیری و برآورد شده در یک دستگاه مختصات در برابر یکدیگر ترسیم و پراکندگی آن‌ها حول خط ۱:۱ بررسی شد (Omidifar and Moosavi, 2015).

برای ارزیابی دقیق‌تر کارایی مدل‌های به‌دست آمده از آماره‌های ضریب تبیین داده‌های آموزش، $R^2(T)$ ، ضریب تبیین داده‌های آزمون، $R^2(t)$ ، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، NRMSE، و ضریب نش-ساتکلیف، NS، به شرح زیر استفاده شد:

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 (P_i - \bar{P}_i)^2 \right)} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\bar{O}_i} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

که در آن‌ها O_i و P_i به ترتیب مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده ظرفیت تبادل کاتیونی و n تعداد داده‌ها می‌باشند. آماره NRMSE بیان‌گر میزان خطا است و بین صفر (دقت زیاد) تا بی‌نهایت (بدون دقت) تغییر می‌کند. تقسیم‌بندی NRMSE بیان می‌کند که رابطه‌هایی با مقادیر ۰ تا ۱۰ درصد در کلاس عالی، ۱۰ تا ۲۰ درصد در کلاس خوب و مناسب، ۲۰ تا ۳۰ درصد در کلاس نسبتاً مناسب و بیشتر از ۳۰ درصد در کلاس ضعیف قرار دارند (Bannayan and Hoogenboom, 2009). آماره NS نیز بین ۱ (دقت زیاد) تا منفی بی‌نهایت (بدون دقت) تغییر می‌کند (Feng et al., 2017). در این پژوهش از نسخه ۲۳ نرم‌افزار SPSS برای برقراری روابط رگرسیونی و محاسبه آماره‌های دقت و خطای آن‌ها استفاده شد. همچنین رسم نمودارها با استفاده از نسخه ۲۰۱۳ نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

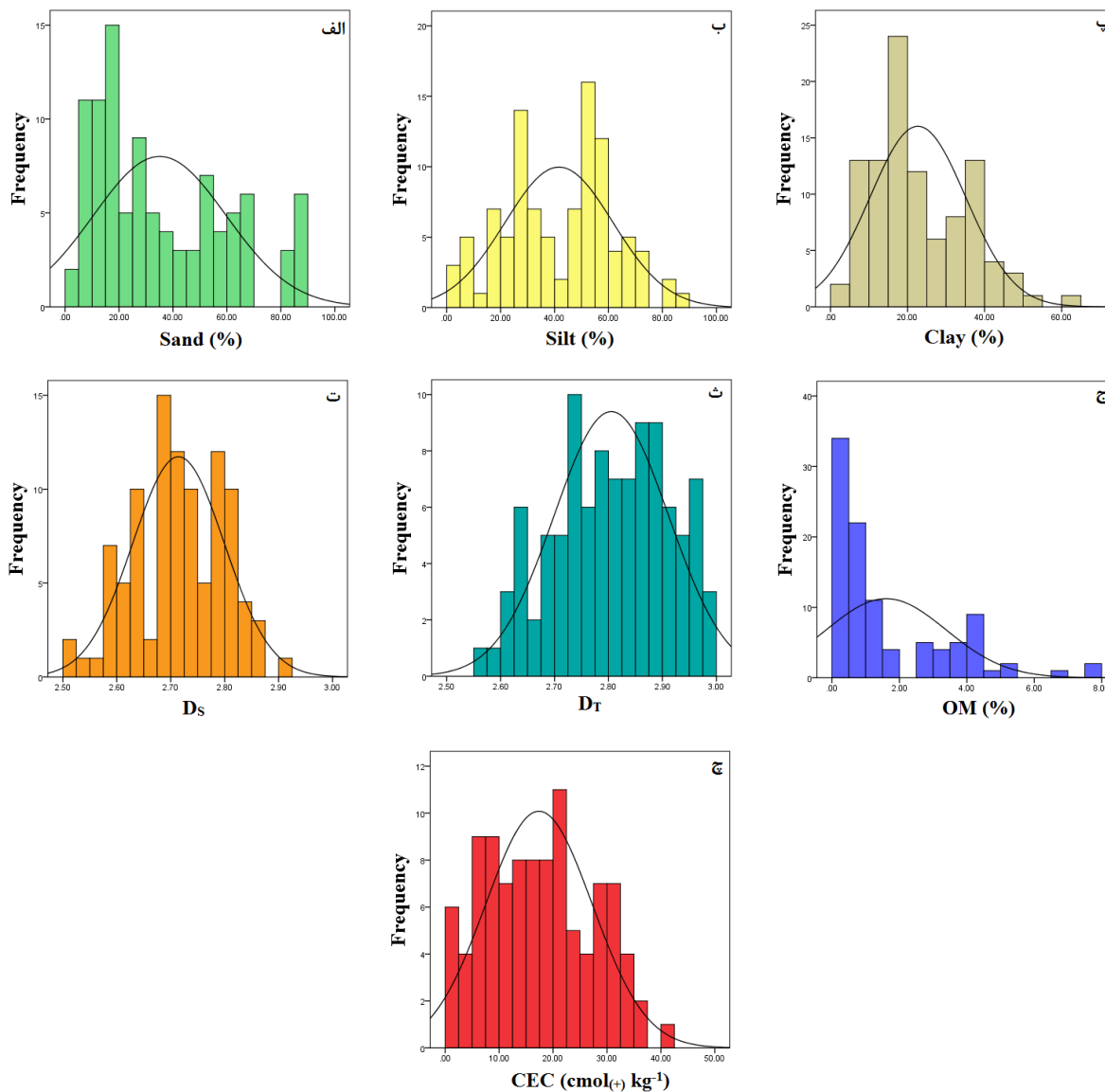
آمار توصیفی

در جدول (۱) نتایج آمار توصیفی ویژگی‌های نمونه‌های خاک مورد مطالعه ارائه شده است. نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین ضریب تغییرات بین ویژگی‌ها در خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب مربوط به بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و درصد ماده

آلی بود. بر اساس معیار Wilding (1985) ویژگی‌های بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و بعد فرکتالی‌تایلر و ویت‌کرفت در کلاس تغییرپذیری کم و بقیه ویژگی‌های مورد مطالعه در کلاس تغییرپذیری زیاد قرار گرفتند (جدول ۱). Wilding (1985) بیان کرد که ویژگی‌های با ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ درصد در کلاس تغییرپذیری کم، بین ۱۵ تا ۳۵ درصد در کلاس تغییرپذیری متوسط و بیشتر از ۳۵ درصد در کلاس تغییرپذیری زیاد قرار می‌گیرند. تغییرات کم بعد فرکتالی به دلیل ماهیت و تغییرپذیری بسیار کم این ویژگی است. تغییرات اندک ابعاد فرکتالی (در مقیاس یک یا دو رقم اعشار) تغییرات زیادی را از لحاظ مقدار فراوانی ذرات اولیه خاک با قطره‌های مختلف ایجاد می‌کند. زیرا همان‌گونه که از نام ابعاد فرکتالی نیز مشخص است، بعد فرکتالی یک جسم که محدوده‌ای از فضا را پر می‌کند (مانند بعد فرکتالی ذرات خاک) بین ۲ تا ۳ (به‌طور معمول ۲/۵ تا ۳) می‌تواند متغیر باشد (البته لازم به ذکر است همان‌گونه که Ghanbarian and Hunt (2012) بیان کردند از نظر ریاضی و تئوریک بعد فرکتال فضای متخلخلی مانند خاک می‌تواند < 3 و منفی نیز باشد). همچنین تغییرپذیری زیاد ویژگی‌های درصد ذرات اولیه (درصد شن، سیلت و رس)، ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی به دلیل تغییرات زیاد مقادیر این ویژگی‌ها در نمونه‌های متنوع و مختلف خاک انتخاب شده است. در همین راستا در پژوهشی در خاک‌های منطقه باجگاه استان فارس گزارش شده است که کمترین ضریب تغییرات بین ویژگی‌های مختلف خاکی در سه کاربری زراعت معمولی، زراعت کشت یونجه و باغ گللابی مربوط به بعد فرکتالی می‌باشد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد؛ درحالی‌که در همین پژوهش ضریب تغییرات درصد ذرات اولیه، ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی در سه کاربری مذکور کم گزارش شده است که با نتایج این تحقیق مطابقت ندارد (Mozaffari et al., 2019). در پژوهشی دیگر، در خاک‌های سنگ‌ریزه‌ای منطقه باجگاه استان فارس گزارش شده است که ضریب تغییرات درصد شن، سیلت، رس و ماده آلی متوسط و ظرفیت تبادل کاتیونی کم می‌باشد که با نتایج این پژوهش مطابقت ندارد (Moosavi and Sepaskhah, 2012b). درحالی‌که نتایج این پژوهش با یافته‌های Rasoulzadeh et al. (2012) در ارتباط با کلاس تغییرپذیری درصد شن در خاک‌های با بافت متفاوت مناطق ارسنجان فارس، دشت اردبیل و دشت سولدوز شهرستان نقده و همچنین با یافته‌های Foroughifar et al. (2010) در ارتباط با کلاس تغییرپذیری درصد شن و رس در خاک‌های دشت تبریز هم‌خوانی دارد. عدم تطابق نتایج مربوط به سایر ویژگی‌ها با نتایج این محققان را می‌

سیلت، بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته، بعد فرکتالی تایلر و ویت-کرفت و ظرفیت تبادل کاتیونی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. درحالی‌که توزیع فراوانی درصد شن، رس و ماده آلی دارای اختلاف معنی‌دار با توزیع نرمال در سطوح ۵ و ۱ درصد هستند (شکل ۳ و جدول ۱).

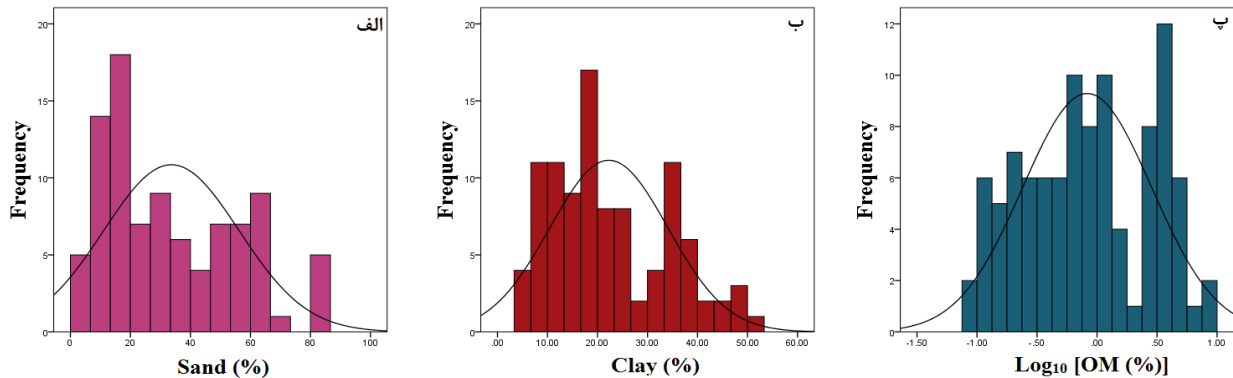
توان به دلیل تفاوت در نوع خاک مورد مطالعه، مقیاس نمونه-برداری و واحد فیزیوگرافی مناطق مورد مطالعه نسبت داد (Mozaffari et al., 2019).
آزمون توزیع نرمال کولموگروف-اسمیرنوف (به نقل از Razali and Wah, 2011) نشان داد که توزیع فراوانی درصد



شکل ۳- نمودار توزیع فراوانی ویژگی‌های مورد مطالعه. الف) درصد شن (Sand)، ب) درصد سیلت (Silt)، پ) درصد رس (Clay)، ت) بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته (D_s)، ث) بعد فرکتالی تایلر و ویت کرافت (D_r)، ج) درصد ماده آلی (OM) و چ) ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)

توزیع نرمال بسیار فاصله داشت (شکل ۳، ج و جدول ۱) و با تبدیل لگاریتمی داده‌های درصد ماده آلی، توزیع داده‌های این ویژگی به توزیع نرمال نزدیک شد (شکل ۴، پ و جدول ۱) و از لگاریتم (در پایه ۱۰) درصد ماده آلی به‌عنوان ورودی در مدل‌های رگرسیونی برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده شد.

از آنجا که فرضیه لازم برای به‌کارگیری رگرسیون خطی توزیع نرمال داده‌های ورودی به مدل و خروجی از مدل است، بنابراین ویژگی‌های درصد شن و رس که مقدار بسیار کمی از توزیع نرمال فاصله داشتند (شکل ۳، الف و پ و جدول ۱) با حذف حداکثر ۳ داده پرت به توزیع نرمال نزدیک شدند (شکل ۴، الف و ب و جدول ۱). درحالی‌که توزیع داده‌های درصد ماده آلی از



شکل ۴- نمودار توزیع فراوانی (هیستوگرام) ویژگی‌هایی که به توزیع نرمال نزدیک شدند. الف) درصد شن (Sand)، ب) درصد رس (Clay) و پ) لگاریتم (در پایه ۱۰) درصد ماده آلی ($\text{Log}_{10} [\text{OM} (\%)]$)

در خاک‌های باجگاه استان فارس در مورد توزیع فراوانی ذرات شن و رس (Moosavi and Sepaskhah, 2013) مطابقت ندارد. همچنین Mozaffari *et al.* (2019) بیان کردند توزیع درصد ذرات اولیه، بعد فرکتالی و درصد ماده آلی در سه کاربری مختلف اراضی در منطقه دشت باجگاه استان فارس نرمال است، درحالی‌که توزیع ظرفیت تبادل کاتیونی از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند. توزیع فراوانی ویژگی‌های خاک می‌تواند به دلیل موقعیت قرار گرفتن در فیزیوگرافی‌های مختلف و همچنین به دلیل تفاوت در نوع خاک تغییر کند که این مورد می‌تواند دلیل عدم تطابق نتایج این پژوهش با نتایج پژوهشگران ذکر شده باشد.

برخی از پژوهشگران بیان کرده‌اند که توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به صورت لوگ-نرمال است (Shirazi and Boersma, 2006; Hwang and Hong, 1984). در پژوهشی دیگر نیز با بررسی توزیع داده‌های مربوط به ویژگی‌های خاک واحدهای اراضی در منطقه آمل ایران گزارش شده است که سیلت در واحد فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای از توزیع نرمال تبعیت می‌کند که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد. اما در همین پژوهش گزارش شده است که مقدار رس در همه واحدهای اراضی از توزیع نرمال تبعیت می‌کند که با نتایج این پژوهش مطابقت ندارد (Momtaz *et al.*, 2009). نتایج این پژوهش همچنین با نتایج پژوهش دیگری

جدول ۱- آمار توصیفی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

KS (N) ^{††}	KS	KR	SK	VC	CV	Mean	Max.	Min.	واحد	ویژگی [†]
۰/۰۵۱ ^{ns}	۰/۰۱۱*	-۰/۶۶۳	۰/۶۷۶	زیاد	۷۰/۳	۳۵/۱	۸۹/۸	۲/۱۰	%	Sand
-	۰/۰۵۲ ^{ns}	-۰/۸۱۰	-۰/۰۶۸	زیاد	۴۸/۰	۴۱/۷	۸۵/۸	۳/۹۰	%	Silt
۰/۰۵۶ ^{ns}	۰/۰۲۱*	۰/۰۰۳	۰/۷۱۶	زیاد	۵۴/۹	۲۲/۷	۶۳/۳	۴/۳۰	%	Clay
-	۰/۰۸۵ ^{ns}	-۰/۵۹۸	-۰/۱۹۸	کم	۳/۱۳	۲/۷۱۴	۲/۹۰۳	۲/۵۱۶	-	Ds
-	۰/۲۰۰ ^{ns}	-۰/۸۲۷	-۰/۲۱۲	کم	۳/۷۸	۲/۸۰۵	۲/۹۹۶	۲/۵۶۶	-	Dt
۰/۰۶۶ ^{ns}	۰/۰۰۰ ^{**}	۱/۵۸	۱/۴۵	زیاد	۱۱۱	۱/۶۱	۷/۷۰	۰/۰۸۰	%	OM
-	۰/۲۰۰ ^{ns}	-۰/۸۶۵	۰/۱۸۷	زیاد	۵۶/۹	۱۷/۴	۴۰/۳	۰/۷۰۰	cmol(+) kg ⁻¹	CEC

†: Sand, Silt, Clay, Ds, Dt, OM و CEC به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر شن، سیلت، رس، بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته، بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت، ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی هستند.

††: Min., Max., Mean, CV, VC, SK, KR, KS و KS (N) به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، ضریب تغییرات، کلاس تغییرپذیری بر اساس معیار Wilding (1985)، ضریب چولگی، ضریب افراستگی، معنی‌داری آزمون توزیع نرمال کولموگروف-اسمیرنوف برای داده‌های اولیه ویژگی‌های مورد مطالعه و معنی‌داری آزمون توزیع نرمال کولموگروف-اسمیرنوف برای داده‌های تبدیل شده به توزیع نرمال ویژگی‌های مورد مطالعه هستند. ns, * و ** به ترتیب به مفهوم عدم وجود تفاوت معنی‌دار با توزیع نرمال و وجود تفاوت معنی‌دار با توزیع نرمال در سطوح ۵ و ۱ درصد می‌باشند.

دو بعد فرکتالی ذکر شده وجود دارد. وجود تفاوت در مقادیر این دو بعد فرکتالی به دلیل روش‌های متفاوت در محاسبه آن‌ها می‌باشد. بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته با استفاده از ۳ ذره شن، سیلت و رس تخمین زده می‌شود درحالی‌که بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت براساس بخش زیادی از توزیع اندازه ذرات اولیه خاک

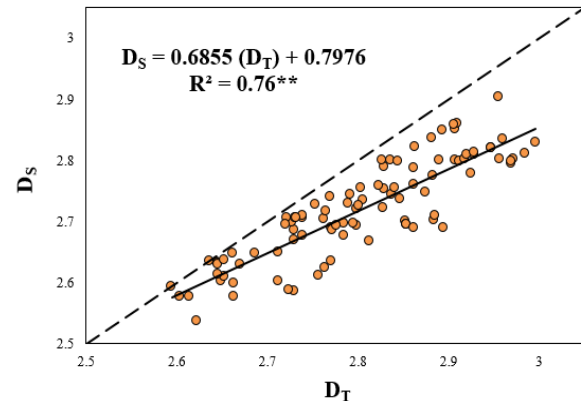
همبستگی بین ابعاد فرکتالی سپاسخواه و تافته (Ds) و تایلر و ویت‌کرفت (Dt)

شکل (۵) همبستگی بین ابعاد فرکتالی سپاسخواه و تافته (Ds) و تایلر و ویت‌کرفت (Dt) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد همبستگی مثبت و معنی‌داری با ضریب تبیین ۰/۷۶ بین

برای برآورد ویژگی‌های خاکی، سادگی مدل و سهولت استفاده از مدل می‌باشد. بنابراین در پژوهش حاضر از بین مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی، مدل-هایی انتخاب شدند که هم دقت بالایی داشتند و هم به اندازه کافی ساده باشند. بنابراین مدل‌های انتخاب شده در ارتباط بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی با ماده آلی، شن و سیلت (به دلیل داشتن دقت بیشتر نسبت به سایر مدل‌ها) به ترتیب به صورت روابط لگاریتمی، نمایی و درجه دوم بودند. در ارتباط بین ظرفیت تبادل کاتیونی و رس به دلیل اینکه روابط خطی و درجه دوم ایجاد شده دارای دقت برابری بودند به دلیل سادگی، مدل خطی انتخاب شد. همچنین دقت رابطه غیرخطی (درجه دوم) بین ظرفیت تبادل کاتیونی با بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت در مقایسه با رابطه خطی دارای اختلاف جزئی بود. بنابراین براساس معیار سادگی، مدل خطی برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از ویژگی‌های ذکر شده انتخاب شد.

در شکل (۶، الف تا ج) بهترین روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی انتخاب شده بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی، شن، سیلت، رس و ابعاد فرکتالی سپاسخواه و تافته (D_s) و تایلر و ویت‌کرفت (D_T) و همچنین بررسی مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده ظرفیت تبادل کاتیونی حول خط ۱:۱ مربوط به هر کدام از روابط رگرسیونی در مجاورت هر شکل نشان داده شده است. همچنین بهترین روابط رگرسیونی انتخاب شده مربوط به رابطه رگرسیونی بین ظرفیت تبادل کاتیونی و ویژگی‌های خاک و مقادیر آماره‌های دقت و خطای هر رابطه رگرسیونی در جدول (۳) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بهترین روابط رگرسیونی بین ظرفیت تبادل کاتیونی با ماده آلی، رس، بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت به صورت معنی‌دار و با شیب مثبت (افزایشی) و به ترتیب دارای ضرایب تبیین داده‌های آموزش ۰/۶۲، ۰/۵۳، ۰/۵۶ و ۰/۵۶؛ ضرایب تبیین داده‌های آزمون ۰/۷۵، ۰/۶۹، ۰/۶۹ و ۰/۸۲؛ ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده ۰/۲۲/۴، ۰/۲۴/۸، ۰/۲۵/۷ و ۰/۲۲/۲ درصد و ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸۷، ۰/۸۴، ۰/۸۲ و ۰/۸۵ می‌باشند. درحالی‌که بهترین رابطه رگرسیونی ظرفیت تبادل کاتیونی با درصد شن به صورت نمایی، معنی‌دار و با شیب منفی (کاهشی) به ترتیب دارای آماره‌های R^2 (T)، R^2 (t)، NRMSE (درصد) و NS برابر با ۰/۴۲، ۰/۴۷، ۰/۴۷ و ۰/۸۷ می‌باشد.

یا منحنی دانه‌بندی محاسبه می‌شود که همین موضوع می‌تواند دلیل تفاوت در مقادیر محاسبه شده ابعاد فرکتالی را توجیه کند. با این حال این دو ویژگی همبستگی نسبتاً بالایی با یکدیگر داشتند.



شکل ۵- همبستگی بین ابعاد فرکتالی سپاسخواه و تافته (D_s) و تایلر و ویت‌کرفت (D_T)

برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی یک و چند متغیره

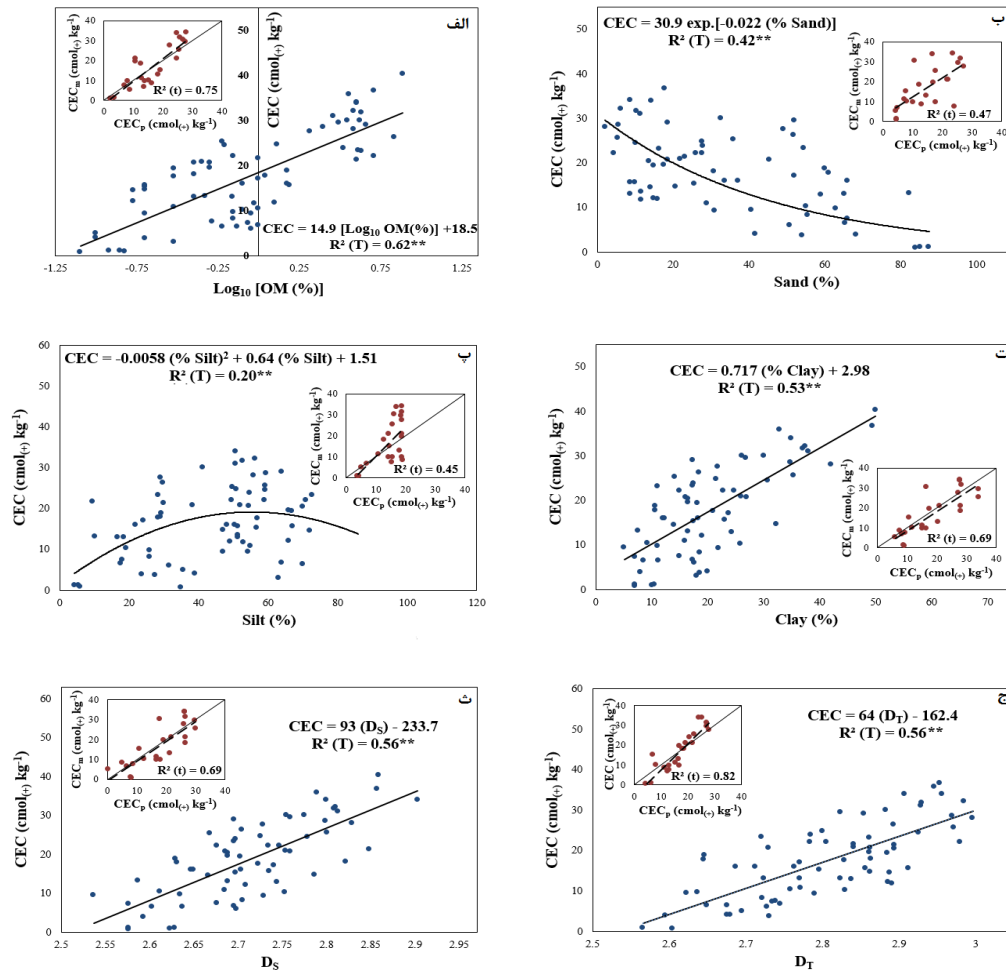
در جدول (۲) تمامی روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و ویژگی‌های خاکی مورد مطالعه همراه با آماره‌های دقت و خطای محاسبه شده برای هر رابطه رگرسیونی آورده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل اینکه توزیع فراوانی داده‌های ماده آلی نرمال نبود و با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی توزیع فراوانی داده‌های این ویژگی به توزیع نرمال نزدیک شد (شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۱)، بنابراین رابطه خطی بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی برقرار نشد. همچنین توزیع فراوانی داده‌های دو ویژگی درصد شن و رس دارای اختلاف کمی با توزیع نرمال بودند که با حذف سه داده پرت، توزیع فراوانی ویژگی‌های ذکر شده به توزیع نرمال نزدیک شد (شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۱). بنابراین رابطه خطی برای این دو ویژگی برقرار شد. بیشترین دقت روابط رگرسیونی بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی با ماده آلی به صورت رابطه لگاریتمی؛ با درصد شن به صورت رابطه نمایی؛ با درصد سیلت به صورت رابطه درجه دوم؛ با درصد رس به صورت رابطه خطی و درجه دوم؛ و با بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت به صورت رابطه درجه دوم بود (جدول ۲). یکی از معیارهای انتخاب مدل‌های رگرسیونی علاوه بر دقت بیشتر (خطای کمتر)

جدول ۲- روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی بین ظرفیت تبادل کاتیونی و ویژگی‌های خاکی مورد مطالعه

NS	NRMSE (%)	R ² (t)	R ² (T) ^{††}	روابط رگرسیونی [†]	
۰/۶۶	۳۵/۸	۰/۶۴	۰/۲۷	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 9.17 \exp.[0.242 (\% OM)]$	درصد ماده آلی
۰/۸۷	۲۲/۴	۰/۷۵	۰/۶۲	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 14.9 [\text{Log}_{10} (\% OM)] + 18.5$	
۰/۷۳	۳۲/۱	۰/۶۶	۰/۵۱	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = -0.492 (\% OM)^2 + 6.5 (\% OM) + 9.89$	
۰/۷۸	۲۸/۴	۰/۶۵	۰/۳۹	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 14.8 (\% OM)^{0.434}$	
۰/۸۲	۲۵/۸	۰/۵۱	۰/۳۴	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = -0.222 (\% Sand) + 25.6$	درصد شن
۰/۸۷	۲۲/۴	۰/۴۷	۰/۴۲	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 30.9 \exp.[-0.022 (\% Sand)]$	
۰/۷۷	۲۹/۵	۰/۴۶	۰/۲۹	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = -13 [\text{Log}_{10} (\% Sand)] + 36.3$	
۰/۸۱	۲۶/۸	۰/۵۱	۰/۳۵	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = -0.0017 (\% Sand)^2 - 0.083 (\% Sand) + 23.7$	
۰/۸۳	۲۵/۶	۰/۴۰	۰/۲۸	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 73.5 (\% Sand)^{-0.498}$	
۰/۵۹	۳۹/۰	۰/۱۹	۰/۱۵	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 0.179 (\% Silt) + 8.57$	درصد سیلت
۰/۵۰	۴۳/۵	۰/۰۹	۰/۱۹	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 5.25 \exp.[-0.0205 (\% Silt)]$	
۰/۶۷	۳۵/۰	۰/۳۵	۰/۱۹	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 13.7 [\text{Log}_{10} (\% Silt)] - 5.22$	
۰/۶۷	۳۵/۲	۰/۴۵	۰/۲۰	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = -0.0058 (\% Silt)^2 + 0.64 (\% Silt) + 1.51$	
۰/۵۵	۴۰/۹	۰/۲۴	۰/۲۹	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 0.860 (\% Silt)^{0.744}$	
۰/۸۴	۲۴/۸	۰/۶۹	۰/۵۳	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 0.717 (\% Clay) + 2.98$	درصد رس
۰/۷۸	۲۸/۵	۰/۵۸	۰/۳۴	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 4.62 \exp.[0.0522 (\% Clay)]$	
۰/۷۸	۲۸/۵	۰/۶۸	۰/۵۰	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 31.8 [\text{Log}_{10} (\% Clay)] - 22.3$	
۰/۸۴	۲۴/۸	۰/۶۹	۰/۵۳	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = -0.0007 (\% Clay)^2 + 0.755 (\% Clay) + 2.6$	
۰/۸۵	۲۳/۵	۰/۶۸	۰/۳۹	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 0.545 (\% Clay)^{1.107}$	
۰/۸۲	۲۵/۷	۰/۶۹	۰/۵۶	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 93 (D_s) - 233.7$	بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته
۰/۷۴	۳۱/۳	۰/۶۷	۰/۴۳	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 4 \times 10^{-8} \exp.(7.31 D_s)$	
۰/۸۲	۲۵/۹	۰/۶۸	۰/۵۶	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 580 [\text{Log}_{10} (D_s)] - 233$	
۰/۸۳	۲۵/۵	۰/۶۹	۰/۵۶	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 28.9 (D_s)^2 - 64 (D_s) + 20.7$	
۰/۸۰	۲۷/۶	۰/۶۸	۰/۴۴	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 3 \times 10^{-8} (D_s)^{19.9}$	
۰/۸۵	۲۲/۲	۰/۸۲	۰/۵۶	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 64 (D_T) - 162.4$	بعد فرکتالی تايلر و ويت كرفت
۰/۸۶	۲۱/۶	۰/۸۱	۰/۵۴	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 5 \times 10^{-6} \exp.(5.29 D_T)$	
۰/۸۴	۲۲/۴	۰/۸۲	۰/۵۶	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 411 [\text{Log}_{10} (D_T)] - 166$	
۰/۸۶	۲۱/۵	۰/۸۴	۰/۵۷	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 61.5 (D_T)^2 - 280 (D_T) + 317$	
۰/۸۵	۲۲/۰	۰/۸۲	۰/۵۵	$CEC (cmol_{(+)} kg^{-1}) = 3 \times 10^{-6} (D_T)^{14.9}$	

†: CEC, OM, Sand, Silt, Clay, D_s و D_T به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه‌گیری شده، ماده آلی، شن، سیلت، رس، بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و بعد فرکتالی تايلر و ويت كرفت هستند.

††: R² (T), R² (t), NRMSE و NS به ترتیب نشان‌دهنده ضریب تبیین داده‌های آموزش، ضریب تبیین داده‌های آزمون، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده مربوط به داده‌های آزمون و ضریب نش- ساتکلیف مربوط به داده‌های آزمون هستند.



شکل ۶- بهترین روابط رگرسیونی خطی و غیرخطی انتخاب شده بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و (الف) لگاریتم (در پایه ۱۰) درصد ماده آلی ($\text{Log}_{10} [\text{OM} (\%)]$), (ب) شن (Sand), (پ) سیلت (Silt), (ت) رس (Clay), (ث) بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته (D_s) و (ج) بعد فرکتالی تایلر و ویت کرفت (D_t). CEC_p و CEC_m به ترتیب نشان دهنده مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه‌گیری شده و برآورد شده هستند.

2006; Ghanbarian-Alavijeh and Millán, 2009; Esmaelnejad *et al.*, 2014; Deng *et al.*, 2017). بنابراین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش رس، مقدار بعد فرکتالی افزایش یافته و به تبع آن مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی نیز افزایش یافته است و بخش زیادی از تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی به مقدار رس و ماده آلی خاک وابسته است. وجود رابطه معنی‌دار با شیب منفی بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و شن می‌تواند به نوعی وجود مقدار رس در خاک را توجیه کند. زیرا با افزایش مقدار شن در خاک ذرات ریزتر خاک که دارای سطح ویژه بیشتری هستند کاهش می‌یابد و کم بودن مقدار شن می‌تواند به دلیل زیاد بودن مقدار رس در خاک باشد. پژوهش‌های زیادی در ارتباط با وجود ارتباط مستقیم بین ظرفیت تبادل کاتیونی با مقدار ماده آلی و رس (Fooladmand, 2008(a); Fooladmand, 2008(b); Taghizadeh Mehrjardi *et al.*, 2009; Memarian Fard and Beigi Harchagani, 2009; Mehrabianian *et al.*, 2010; Esmaelnejad *et al.*, 2014; Karimi *et al.*, 2017) و بعد فرکتالی (Ersahin *et al.*, 2006; Esmaelnejad *et al.*, 2014;)

همچنین بهترین رابطه رگرسیونی ظرفیت تبادل کاتیونی با درصد سیلت به صورت درجه ۲ و معنی‌دار به ترتیب دارای آماره-های $R^2 (T)$, $R^2 (t)$, NRMSE (درصد) و NS برابر با ۰/۴۵، ۳۵/۲، ۰/۶۷ و ۰/۲۰ بود. با توجه به نتایج به دست آمده مقادیر آماره ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای ارتباط رگرسیونی ظرفیت تبادل کاتیونی با مقادیر ماده آلی، شن، رس، بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و بعد فرکتالی تایلر و ویت کرفت در کلاس نسبتاً مناسب و برای ارتباط رگرسیونی ظرفیت تبادل کاتیونی با درصد سیلت در کلاس ضعیف قرار می‌گیرد. ذرات رس (به دلیل ریز بودن و شکل پولکی) و همچنین ماده آلی، به دلیل داشتن سطح ویژه زیاد دارای بار منفی زیادی در واحد حجم هستند و همین موضوع باعث می‌شود کاتیون‌های با بار مثبت بیشتری در سطوح داخلی و خارجی ذرات رس و ماده آلی جذب شوند و به تبع آن ظرفیت تبادل کاتیونی افزایش می‌یابد. همچنین همان‌گونه که سایر پژوهشگران ارتباط بین رس و بعد فرکتالی را با شیب مثبت و بسیار قوی گزارش کرده‌اند (Ersahin *et al.*,)

کاتیونی و لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و رس و ارتباط رگرسیونی ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و D_s تفاوت معنی‌دار و قابل توجهی را نشان نداد. درحالی‌که مقدار NRMSE در ارتباط رگرسیونی بین ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و D_T در مقایسه با ارتباط رگرسیونی ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و رس و همچنین ارتباط رگرسیونی ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و D_s به‌میزان ۱۸/۶ درصد کمتر بود. نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان‌دهنده این است که بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت پتانسیل و قابلیت بیشتری نسبت به مقادیر رس و بعد فرکتالیته‌ی سپاسخواه و تافته در برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی دارد. دلیل آن می‌تواند به‌کارگیری بخشی از توزیع اندازه ذرات اولیه خاک در محاسبه بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت باشد. در محاسبه بعد فرکتالیته‌ی سپاسخواه و تافته تنها از سه ذره شن، سیلت و رس استفاده می‌شود که همین موضوع می‌تواند وجود خطای ۱۸/۶ درصدی را در برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت به بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت به‌عنوان متغیر مستقل دوم ورودی به مدل توجیه کند. هرچند نوع رس، مقدار رس و ماده آلی خاک تأثیر بسیار زیادی روی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارند، اما نتایج این پژوهش نشان داد چنانچه معیاری از توزیع اندازه ذرات اولیه خاک مانند بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت به‌جای مقدار رس به‌عنوان ورودی در مدل‌های تخمینی ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده شوند دقت مدل افزایش یافته و میزان خطا کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است، هنگامی‌که از D_T به‌عنوان متغیر مستقل دوم برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده می‌شود، نقاط مورد آزمون به خط ۱:۱ نزدیک‌تر بوده و دارای پراکندگی کمتری در مقایسه با دو مدل پیشنهادی دیگر می‌باشند. ذرات ریزی که اندکی از قطر ۰/۰۰۲ میلی‌متر بزرگتر هستند و در محاسبه مقدار رس خاک شرکت نمی‌کنند، دارای بار منفی قابل توجهی هستند و با توجه به اینکه مقدار همین ذرات در محاسبه بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت دخالت داده شد، بنابراین استفاده از مقادیر بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت (D_T) ممکن است به‌همین دلیل سبب دقت بیشتر مدل استفاده شده در مقایسه با دو مدل دیگر باشد. Esmaeelnejad *et al.* (2014) نیز در خاک‌های مناطق جنوبی استان گیلان یک رابطه‌ی مثبت و معنی‌دار بین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی با مقدار بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت گزارش کردند. همچنین Ersahin *et al.* (2006) در خاک‌های با مواد مادری، توپوگرافی و پوشش گیاهی مختلف، ارتباط بین ظرفیت تبادل کاتیونی و بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت یک رابطه‌ی مثبت و درجه دو بیان کردند. Mozaffari and Moosavi (2020) نیز گزارش کردند که در خاک‌های آهکی مناطق گرم و

(Mozaffari and Moosavi, 2020) و ارتباط معکوس با مقدار شن Fooladmand, 2008(a); Fooladmand, 2008(b); Memarian) Fard and Beigi Harchagani, 2009; Esmaeelnejad *et al.*, 2017; Karimi *et al.*, 2014) انجام شده است. ظرفیت تبادل کاتیونی عمدتاً به توزیع اندازه ذرات اولیه خاک، ماده آلی و نوع کانی‌ها و رس‌های موجود در خاک وابسته است. از آنجاکه در این پژوهش ارتباط بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی با ماده آلی، مقادیر ذرات اولیه (شن، رس و سیلت) و فاکتور توزیع اندازه ذرات خاک (ابعاد فرکتالیته‌ی معنی‌دار است و رابطه رگرسیونی خطی و غیرخطی با دقت نسبتاً مناسبی بین آن‌ها وجود دارد، بنابراین با ثابت نگاه داشتن مقادیر لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی به‌عنوان یک متغیر مستقل، از روش رگرسیون چند متغیره گام به گام برای تعیین اینکه آیا تفاوت قابل توجهی از نظر دقت معادلات رگرسیونی زمانی‌که مقادیر ذرات اولیه (شن، رس و سیلت) یا فاکتور توزیع اندازه ذرات خاک (ابعاد فرکتالیته‌ی معنی‌دار است) به‌عنوان متغیر مستقل دوم وارد روابط رگرسیونی می‌شوند، به‌وجود می‌آید یا خیر، استفاده شد.

برای بررسی میزان دستیابی به هدف‌های ذکر شده، نتایج خلاصه شده آماره‌های دقت و خطای روابط رگرسیونی چند متغیره ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و رس، ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و بعد فرکتالیته‌ی سپاسخواه و تافته (D_s) و ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت (D_T) در جدول (۳) خلاصه شده است. همچنین پراکنش نقاط اطراف خط ۱:۱ برای هر ارتباط رگرسیونی در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مقادیر آماره‌های R^2 ، $R^2(T)$ ، t ، NRMSE (درصد) و NS برای رابطه رگرسیونی چند متغیره بین ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و رس به‌ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۴، ۱۷/۲ و ۰/۹۲؛ بین ظرفیت تبادل کاتیونی با لگاریتم (در پایه ۱۰) ماده آلی و بعد فرکتالیته‌ی سپاسخواه و تافته به‌ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۵، ۱۷/۲ و ۰/۹۲ و بین ظرفیت تبادل کاتیونی با ماده آلی و بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت به‌ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۸۷، ۱۴/۰ و ۰/۹۳ بودند. با توجه به تقسیم‌بندی NRMSE هر ۳ رابطه رگرسیونی ذکر شده در کلاس خوب و مناسب قرار می‌گیرند و ضریب نش-ساتکلیف آن‌ها به بیشترین دقت (عدد ۱) نزدیک است.

با توجه به مقادیر آماره‌های دقت و خطای محاسبه شده می‌توان چنین بیان کرد که چنانچه بعد فرکتالیته‌ی رس و ویت‌کرفت به‌عنوان متغیر مستقل دوم وارد رابطه رگرسیونی شود دقت مدل بیشتر و خطای مدل کمتر می‌شود. مقادیر آماره‌های دقت و خطای محاسبه شده برای رابطه رگرسیونی بین ظرفیت تبادل

بهرتر است از توزیع اندازه ذرات بعد فرکتالی تایلر و ویت کرفت محاسبه شود و این مقدار به عنوان یک متغیر مستقل در مدل های پیش بینی ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده شود. اما چنانچه توزیع اندازه ذرات اولیه خاک در بانک های اطلاعاتی وجود نداشته باشد، بهتر است با استفاده از روش پیشنهادی (Skaggs et al., 2001) و با استفاده از ذرات شن، سیلت و رس توزیع اندازه ذرات اولیه و سپس بعد فرکتالی تایلر و ویت کرفت محاسبه شود و به عنوان متغیر مستقل مورد استفاده قرار گیرد. البته ممکن است برخی روابط رگرسیونی در خاک های مناطق مختلف قابل کاربرد باشد، اما بایستی قبل از استفاده از آن روابط در آن مناطق، مورد آزمون قرار گیرند.

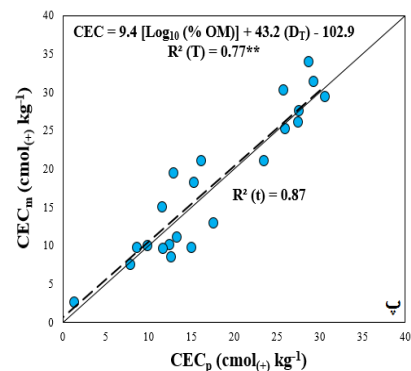
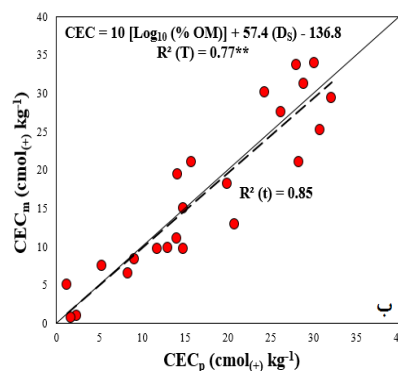
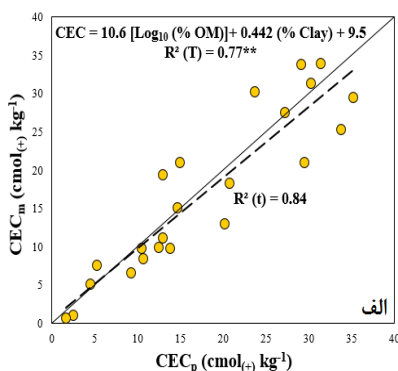
خشک جنوب ایران ارتباط خطی و مثبت با R^2 برابر با ۰/۶۲ و NRMSE کوچکتر از ۱۰ درصد بین مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی و بعد فرکتالی وجود دارد. همان گونه که پیش تر نیز اشاره شد، ظرفیت تبادل کاتیونی عمدتاً به توزیع اندازه ذرات اولیه خاک، ماده آلی و نوع کانی ها و رس های موجود در خاک وابسته است. به دلیل وجود نوع رس های مختلف در مناطق متفاوت نمی توان یک معادله رگرسیونی و تجربی را برای برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک های مختلف معرفی نمود. بنابراین پیشنهاد می شود. در مناطق مختلف روابط رگرسیونی مخصوص همان مناطق استخراج و مورد استفاده قرار گیرد. برای این مهم چنانچه در مناطق هدف، توزیع اندازه ذرات اولیه خاک وجود داشته باشد

جدول ۳- آماره های دقت و خطای بهترین روابط رگرسیونی یک و چند متغیره بین ظرفیت تبادل کاتیونی با ویژگی های خاکی مورد مطالعه

NS	NRMSE (%)	R^2 (t)	R^2 (T) ^{††}	روابط رگرسیونی [†]
۰/۸۷	۲۲/۴	۰/۷۵	۰/۶۲	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 14.9 [Log_{10} (\% OM)] + 18.5$
۰/۸۷	۲۲/۴	۰/۴۷	۰/۴۲	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 30.9 \exp.[-0.022 (\% Sand)]$
۰/۶۷	۳۵/۲	۰/۴۵	۰/۲۰	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = -0.0058 (\% Silt)^2 + 0.64 (\% Silt) + 1.51$
۰/۸۴	۲۴/۸	۰/۶۹	۰/۵۳	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 0.717 (\% Clay) + 2.98$
۰/۸۲	۲۵/۷	۰/۶۹	۰/۵۶	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 93 (D_s) - 233.7$
۰/۸۵	۲۲/۲	۰/۸۲	۰/۵۶	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 64 (D_T) - 162.4$
۰/۹۲	۱۷/۲	۰/۸۴	۰/۷۷	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 10.6 [Log_{10} (\% OM)] + 0.442 (\% Clay) + 9.5$
۰/۹۲	۱۷/۲	۰/۸۵	۰/۷۷	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 10 [Log_{10} (\% OM)] + 57.4 (D_s) - 136.8$
۰/۹۳	۱۴/۰	۰/۸۷	۰/۷۷	$CEC (cmol_{(+) } kg^{-1}) = 9.4 [Log_{10} (\% OM)] + 43.2 (D_T) - 102.9$

†: CEC, OM, Sand, Silt, Clay, D_T و D_s به ترتیب نشان دهنده مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه گیری شده، ماده آلی، شن، سیلت، رس، بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته و بعد فرکتالی تایلر و ویت کرفت هستند.

††: R^2 (T), R^2 (t), NRMSE و NS به ترتیب نشان دهنده ضریب تبیین داده های آموزش، ضریب تبیین داده های آزمون، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده مربوط به داده های آزمون و ضریب نش- ساتکلایف مربوط به داده های آزمون هستند.



شکل ۷- پراکنش مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه گیری و برآورد شده حول خط ۱:۱ برای ارتباط رگرسیونی مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با (الف) لگاریتم (در پایه ۱۰) درصد ماده آلی ($Log_{10} [OM (\%)]$) و رس (Clay)، (ب) لگاریتم (در پایه ۱۰) درصد ماده آلی و بعد فرکتالی سپاسخواه و تافته (D_s) و (پ) لگاریتم (در پایه ۱۰) درصد ماده آلی و بعد فرکتالی تایلر و ویت کرفت (D_T). CEC_p و CEC_m به ترتیب نشان دهنده مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی اندازه گیری شده و برآورد شده هستند.

نتیجه‌گیری

به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۸۷، ۰/۱۴ و ۰/۹۳ بودند که با توجه به تقسیم بندی NRMSE در کلاس خوب و مناسب قرار گرفت. هر چند نوع رس، مقدار رس و ماده آلی خاک تأثیر بسیار زیادی بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارند، اما نتایج این پژوهش نشان داد چنانچه معیاری از توزیع اندازه ذرات اولیه خاک مانند بعد فرکتالی تایلر و ویت‌کرفت به جای مقدار رس به‌عنوان ورودی در مدل‌های تخمینی ظرفیت تبادل کاتیونی استفاده شوند دقت مدل افزایش یافته و میزان خطا کاهش می‌یابد.

سپاس‌گزاری

نویسندگان از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شیراز به سبب حمایت‌های مادی و معنوی برای انجام این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Alfaro Soto, M.A., Chang, H.K. and van Genuchten M.Th. (2017). Fractal-based models for the unsaturated soil hydraulic functions. *Geoderma*, 306, 144-151.
- Bannayan, M. and Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research*, 111, 290-302.
- Bariklo, A., Alamdari, P. and Nikbakht, J. (2018). Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for estimation of soil cation exchange capacity in Tabriz plain. *Applied Soil Research*, 8(1), 174-186. (In Farsi)
- Deng, Y., Cai, C., Xia, D., Ding, S. and Chen, J. (2017). Fractal features of soil particle size distribution under different land-use patterns in the alluvial fans of collapsing gullies in the hilly granitic region of southern China. *PLOS One*, 12(3), 1-21.
- Ersahin, S., Gunal, H., Kutlu, T., Yetgin, B. and Coban, S. (2006). Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution. *Geoderma*, 136(3), 588-597.
- Esmaelnejad, L., Seyedmohammadi, J., Shabanpour, M. and Ramezanzpour H. (2014). Prediction of specific surface area and cation exchange capacity using fractal dimension of soil particle size distribution. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4), 463-474. (In Farsi)
- Feng, Y., Cui, N., Gong, D., Zhang, Q. and Zhao, L. (2017). Evaluation of random forests and generalized regression neural networks for daily reference evapotranspiration modelling. *Agricultural Water Management*, 193, 163-173.
- Fooladmand, H. R. (2008a). Estimation of cation exchange capacity from some soil physico-chemical properties. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(1), 11-18. (In Farsi)
- Fooladmand, H. R. (2008b). Estimating cation exchange capacity using soil textural data and soil organic matter content: A case study for the south of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 54(4), 381-386.
- Fooladmand, H. R., Sepaskhah, A. R. (2006). Improved estimation of the soil particle-size distribution from textural data. *Biosystems Engineering*, 94, 133-138.
- Foroughifar, H., Jafarzadah, A. A., Torabi Gelsefidi, H., Aliasgharzadah, N., Toomanian, N. and Davatgar, N. (2010). Spatial variations of surface soil physical and chemical properties on different landforms of Tabriz plain. *Water and Soil Science*, 21(3), 1-21. (In Farsi)
- Ghanbarian, B. and Daigle, H. (2015). Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis. *Geoderma*, 245-246, 224-232.
- Ghanbarian-Alavijeh, B. and Millán, H. (2009). The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point. *Geoderma*, 151(3), 224-232.
- Huang, G. and Zhang, R. (2005). Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 127, 52-61.
- Hunt, A. G., Ghanbarian, B. and Saville, K. C. (2013). Unsaturated hydraulic conductivity modeling for porous media with two fractal regimes. *Geoderma*, 207, 268-278.
- Hwang, S. I. and Hong, S. P. (2006). Estimating relative hydraulic conductivity from lognormally distributed particle-size data. *Geoderma*, 133,

- 421-430.
- Jafarzadeh, A. A., Pal, M., Servati, M., Fazeli Fard, M. H. and Ghorbani, M. A. (2016). Comparative analysis of support vector machine and artificial neural network models for soil cation exchange capacity prediction. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13, 87-96.
- Karimi, S. A., Davari, M. and Babaeian, E. (2017). Deriving and assessing spectrotransfer function and pedotransfer function in predicting soil cation exchange capacity. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(4), 641-654.
- Keller, A., von Steiger, B., van der Zee, S. T. and Schulin, R. (2001). A stochastic empirical model for regional heavy-metal balances in agroecosystems. *Journal of Environmental Quality*, 30, 1976-1989.
- Kravchenko, A. and Zhang, R. (1998). Estimating the soil water retention from particle-size distribution: A fractal approach. *Soil Science*, 163(3), 171-179.
- Mahallati, S. Z., Pazira, E., Abbasi, F. and Babazadeh, H. (2018). Estimation of Soil Water Retention Curve Using Fractal Dimension. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 22(2), 173-178.
- Mehrabanian, M., Taghizadeh Mehrjardi, R. and Dehghani, F. (2010). Assessing the efficiency of pedotransfer functions for estimating CEC in some calcareous and gypsiferous soils of Yazd province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(1), 113-127. (In Farsi)
- Memarian Fard, M. and Beigi Harchagani, H. (2009). Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions models for prediction of soil cation exchange capacity in Chaharmahal- Bakhtiari province. *Journal of Water and Soil*, 23(4), 90-99. (In Farsi)
- Mohammadi, J. (2010). *Pedometrics, volume 13 (Fractal Theory)*. Pelk publishers, 383 p. (In Farsi)
- Momtaz, H. R., Jafarzadeh, A. A., Torabi, H., Oustan, S., Samadi, A., Davatgar, N. and Gilkes, R. J. (2009). An assessment of the variation in soil properties within and between landform in the Amol region, Iran. *Geoderma*, 149(1), 10-18.
- Moosavi, A. A. and Sepaskhah, A. R. (2012a). Spatial variability of physico-chemical properties and hydraulic characteristics of a gravelly calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(6), 631-656.
- Moosavi, A. A. and Sepaskhah, A. R. (2012b). Artificial neural networks for predicting unsaturated soil hydraulic characteristics at different applied tensions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58, 125-153.
- Moosavi, A. A. and Sepaskhah, A. R. (2013). Sorptive number prediction of highly calcareous soils at different applied tensions using regression models. *Plant Knowledge Journal*, 2(2), 62-68.
- Mousavi, F., Abdi, E., Ghalandarzadeh, A., Bahrami, H. A., Majnounian, B. and Mirzaei, S. (2018). Estimate of soil cation exchange capacity using reflectance spectrometry. *Journal of Forest Research and Development*, 4(3), 347-361. (In Farsi)
- Mozaffari, H. and Moosavi, A. A. (2020). Estimating cation exchange capacity of calcareous soils using the fractal dimension of particles. In: *Proceedings of 6th National Conference on Strategic Research in Chemistry and Chemical Engineering*, 1 Jan., Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, pp. 1-6. (In Farsi)
- Mozaffari, H., Moosavi, A. A. and Sepaskhah, A. R. (2019). Effect of land use on of some physical and chemical properties of a calcareous soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 33(4), 525-541. (In Farsi)
- Omidifar, M. and Moosavi, A. A. (2015). Prediction of some hydraulic properties of calcareous soils of bajgah region fars province using regression pedotransfer functions. *Iranian Journal of Soil Research*, 29(1), 83-92. (In Farsi)
- Ostovari, Y. and Beigi Harchegani, H. (2013). Pedotransfer functions for estimating soil volumetric moisture content based on soil fractal dimension. *Journal of Water and Soil*, 27(3), 630-641. (In Farsi)
- Rasoulzadeh, A., Razavi, S. and Neyshaboori M. R. (2012). Evaluating the accuracy of methods of estimating saturated hydraulic conductivity in different soils. *Journal of Water Research in Agriculture*, 26(3), 303-316. (In Farsi)
- Razali, N. M. and Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21-33.
- Rezaei Abajelu, E. and Zeinalzadeh, K. (2017). Two and three-phases fractal models application in soil saturated hydraulic conductivity estimation. *Journal of Water and Soil*, 30(6), 1905-1917.
- Sadeghi, M., Izadi, A. and Ghahraman, B. (2011). Estimating unsaturated hydraulic conductivity based on fractal geometry. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(1), 43-49. (In Farsi)
- Saidian, M., Godinez, L. J. and Prasad, M. (2016). Effect of clay and organic matter on nitrogen adsorption specific surface area and cation exchange capacity in shales (mudrocks). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, 1095-1106.
- Sedaghat, A., Bayat, H. and Safari Sinegani, A. A. (2016). Estimation of soil saturated hydraulic conductivity by artificial neural networks ensemble in smectitic soils. *Eurasian Soil Science*, 49(3), 347-357.
- Sepaskhah, A. R., Tabar zad, A. and Fooladmand, H. R. (2010). Physical and empirical models for estimation of specific surface area of soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(3), 325-335.
- 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.
- Seyedmohammadi, J., Esmaelnejad, L. and Ramezanpour, H. (2016). Determination of a suitable model for prediction of soil cation exchange capacity. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(156), 1-12.
- Shirazi, M. A. and Boersma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 142-147.
- Skaggs, T. H., Arya, L. M., Shouse, P. J. and Mohanty, B. P. (2001). Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1038-1044.
- Taghizadeh Mehrjardi, R., Mahmoodi, S. H., Heidari, A. and Akbarzadeh, A. (2009). Prediction of cation exchange capacity using artificial neural network and multivariate regression in Khezrabad region. *Journal of Research in Agricultural Science*, 5(1), 1-11. (In Farsi)
- Tang, L., Zeng, G. M., Nourbakhsh, F. and Shen, G. L. (2009). Artificial neural network approach for predicting cation exchange capacity in soil based on physico-chemical properties. *Environmental Engineering Science*, 26, 137-146.
- Tyler, S. W. and Wheatcraft, S. W. (1992). Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 362-369.
- Ulusoy, Y., Tekin, Y., Tumsavas, Z. and Mouazen, A. M. (2016). Prediction of soil cation exchange capacity using visible and near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 52, 72-93.
- Wilding, L. P. (1985). Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In *Soil Spatial Variability. Workshop* (pp. 166-194).
- Xu, Y. (2004). Calculation of unsaturated hydraulic conductivity using a fractal model for the pore-size distribution. *Computers and Geotechnics*, 31(7), 549-557.
- Xu, Y. and Dong, P. (2004). Fractal approach to hydraulic properties in unsaturated porous media. *Chaos, Solitons & Fractals*, 19(2), 327-337.
- Yilmaz, I. (2006). Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, 85, 295-301.
- Zhou, A., Fan, Y., Cheng, W. and Zhang, J. (2019). A Fractal Model to Interpret Porosity Dependent Hydraulic Properties for Unsaturated Soils. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-13.