

Research Article

Investigation of Changes in Fractal Dimension and Accuracy of Fractal Models of Soil Particle Size Distribution in the Imamzadeh Ebrahim Sub-Watershed, Guilan

E Ebrahimi¹, H Asadi^{*2}, H Bayat³

Received: July 25, 2020

Accepted March 14, 2021

Revised: March 6, 2021

Published online: March 20, 2024

1-Former PhD student, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Iran

2-Assoc. Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, University of Tehran, Iran.

3-Assoc. Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Iran.

*Corresponding Author, Email: Ho.asadi@ut.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Particle size distribution stands out as a crucial physical attribute of soil, shaped by a myriad of intricate processes encompassing geological, physical, chemical, and biological factors. Over the past few decades, the significance of particle size distribution in soil has prompted the development of various fractal equations aimed at providing more accurate descriptions. Recognizing the significance of particle size distribution in soil erosion, it is crucial to scrutinize its variations and the associated equations. Furthermore, to date, there has been no comprehensive study evaluating the accuracy of different fractal models across various land uses. This study aims to investigate variations in fractal dimensions calculated using different equations within the Imamzadeh Ebrahim sub-watershed located in the Guilan province.

Methodology

To conduct this research, 93 soil samples were gathered from various locations within the basin, each exhibiting distinct land uses, erosion levels, and vegetation types. The areas under study encompass forests (8 samples), good pastures (11 samples), degraded pastures (23 samples), tea gardens (5 samples), paddy fields (7 samples), gully (21 samples), eroded sections on the river wall (4 samples) and sediments deposited in pits and sedimentation points at the outlet of the sub-watershed (14 samples). Subsequently, the particle size distribution in these samples was meticulously measured. Hydrometer readings were captured at intervals of 30 seconds, 1, 3, 10, 30, 60, 90, 120, 300, 600, 1440, and 2880 minutes. After obtaining hydrometer readings, the contents of the cylinder were discharged onto a 53 μm sieve to isolate sand particles from clay and silt. Subsequently, particles within specified diameter ranges very fine sand (0.05 to 0.1 mm), fine sand (0.1 to 0.25 mm), medium sand (0.25 to 0.5 mm), coarse sand (0.5 to 1 mm), and very coarse sand (1 to 2 mm) were separated. Furthermore, the number of points on the particle size distribution curve within the diameter range smaller than 0.05 mm was determined at 12 different locations. The data obtained were then subjected to fitting with three fractal models Bird, Perrier-Bird and Tyler-Wheatcraft.



Findings

The outcomes indicated that the Bird, Perrier-Bird model exhibited a lower root mean square error (RMSE) in comparison to the Tyler-Wheatcraft model (RMSE values for the Perrier-Bird and Bird models were 3.8, while the Tyler-Wheatcraft model registered 3.29). Bird's model yielded a smaller fractal dimension value (2.73) than the other two models, namely Perrier-Bird (2.94) and Tyler-Wheatcraft (2.95). The study further revealed that different soils exhibited varying accuracies when subjected to fractal models. The results, illustrating the average RMSE changes among the three models examined in various samples, are provided. Notably, the Tyler-Whitcroft model exhibited the lowest RMSE value in pasture lands. Furthermore, the findings indicate that the Tyler-Whitcroft model did not exhibit significant differences in forest, paddy, and tea garden applications, displaying lower accuracy in these three scenarios compared to other locations. Additionally, the results from the Bird and Perrier-Bird model revealed that the lowest RMSE value was observed in eroded soils on the river wall and in pastures. Moreover, the results highlighted a positive non-linear correlation between the fractal dimension of all three models and clay content, along with a negative linear relationship with sand content. The fractal dimensions of Bird and Perrier-Bird, with correlation coefficients of 0.936 and 0.631, respectively, exhibit a significantly inverse relationship with sand at the 1% level. Additionally, Bird's fractal dimension demonstrates an inverse and significant relationship with sand components, ranging from very fine sand to coarse sand. The α coefficient of the Perrier-Bird equation exhibits an inverse relationship with sand ($r = -0.494$) and its components. However, this coefficient demonstrates a significant positive correlation with clay ($r = 0.443$) and silt ($r = 0.448$).

Conclusion

In summary, the findings underscored that particle size distribution, and consequently, the fractal dimension, is contingent on soil type, land cover, and land use. Two-parameter models were identified as more precise in depicting soil particle size distribution due to their increased flexibility. Notably, the performance of Bird and Perrier-Bird models closely paralleled each other and surpassed the accuracy of the Tyler-Wheatcraft model. The research highlighted the variability in accuracy when applying these fractal models to different soil types. Notably, the Tyler-Whitcroft model demonstrated the lowest RMSE in pasture lands, with no significant differences observed in forest, paddy, and tea garden applications. However, its accuracy was comparatively lower in these three scenarios compared to other locations. This superiority can be attributed to the two-parameter nature of Bird and Perrier-Bird models. Furthermore, the study revealed that Bird and Perrier-Bird models performed exceptionally well in eroded soils on the river wall and in pastures, as evidenced by the lowest RMSE values.

Keywords: Bird, Degraded rangelands, Forest lands, Soil texture, Tyler and Wheatcraft.

مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات بعد فراکتالی و دقت مدل‌های فراکتالی توزیع اندازه ذرات در زیرحوضه امامزاده

ابراهیم کیلان

عیسی ابراهیمی^۱، حسین اسدی^{۲*}، حسین بیات^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۶

۱-دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲-دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳-دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ho.asadi@ut.ac.ir

چکیده

توزیع اندازه ذرات یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک است که معادلات مختلف فراکتالی برای توصیف بهتر آنها در دهه‌های اخیر ارایه شده است. هدف از انجام این مطالعه بررسی تغییرات ابعاد فراکتالی محاسبه شده با معادلات مختلف در زیرحوضه امام زاده ابراهیم واقع در استان گیلان بود. برای انجام این پژوهش تعداد ۹۳ نمونه خاک از مناطق مختلف حوضه با کاربری، فرسایش و نوع پوشش گیاهی گوناگون جمع‌آوری شد. توزیع اندازه ذرات در نمونه‌ها اندازه-گیری شد. سه مدل فراکتالی بیرد، پریر-بیرد و تیلور-ویتکرفت بر اطلاعات برازش داده شد. نتایج نشان داد که مدل بیرد، پریر-بیرد نسبت به مدل تیلور-ویتکرفت دارای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتری بودند (RMSE برای مدل بیرد-پریر و مدل بیرد برابر ۸/۳ و برای مدل تیلور-ویتکرفت برابر با ۲۹/۳ است). مقدار بعد فراکتالی به دست آمده از مدل بیرد (۲/۷۳) نسبت به دو مدل دیگر یعنی مدل پریر-بیرد (۲/۹۴) و تیلور-ویتکرفت (۲/۹۵) کوچک‌تر بود. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که مدل‌های فراکتالی در خاک‌های مختلف دارای دقت متفاوتی هستند. همچنین نتایج نشان داد که بعد فراکتالی هر سه مدل مورد مطالعه با رس دارای رابطه غیر خطی مثبت و با شن دارای رابطه خطی منفی هستند. به طور کلی نتایج نشان داد توزیع اندازه ذرات و در نتیجه بعد فراکتالی تابعی از نوع خاک، پوشش و کاربری اراضی است و مدل‌های دو پارامتری به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، دارای دقت بیشتری برای توصیف توزیع اندازه ذرات خاک هستند.

واژه‌های کلیدی: اراضی جنگلی، بافت خاک، بیرد، تیلور-ویتکرفت، مراتع تخریب شده

مقدمه

فرسایش خاک بیانگر تخریب اکوسیستم و هدر رفت خاک است و به عنوان یک مشکل جهانی شناسایی شده است (یو و همکاران ۲۰۲۰، راکلوت و همکاران ۲۰۱۸). یکی از عوامل مهم موثر در رخداد فرسایش خاک، توزیع اندازه ذرات آن است (وانگ و همکاران ۲۰۱۵، کویجیانو و همکاران ۲۰۲۰). توزیع اندازه ذرات یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که تحت تاثیر چندین فرایند پیچیده از جمله فرایندهای زمین شناسی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی می‌باشد (بتلی و همکاران ۱۹۹۹). توزیع اندازه ذرات خاک را می‌توان با استفاده از معادلات مختلف به صورت ریاضی بیان نمود (تیلور-ویتکرفت ۱۹۹۲، بیرد و همکاران ۲۰۰۰).

هندس فراکتالی کاربردهای فراوان در بیش‌تر علوم دارد (بیات و ابراهیمی ۲۰۱۶). نظریه فراکتال از مهم‌ترین مباحث پیشنهاد شده برای مدل‌سازی ویژگی‌های ساختمان و توزیع اندازه ذرات خاک است (یونگ و همکاران ۲۰۰۱). آنالیز فراکتال یکی از ابزارهای مهم جهت بررسی تغییرات زمانی و مکانی متغیرها است (ژانگ و همکاران ۲۰۲۰، کوی و همکاران ۲۰۱۹). در دهه‌های اخیر از هندسه فراکتال و بعد فراکتال اشکال و ذرات در شناخت غیریکنواختی موجود در محیط‌های طبیعی استفاده شده است (کوتلو و همکاران ۲۰۰۸). بعد فراکتال اندازه ذرات خاک معیاری است از خاصیت فضاپرکنی یک توده پراکنده، ناصافی یک سطح و یا کج و معوج بودن یک خط و غالباً به فرآیندهای ایجاد کننده جسم فراکتالی مربوط است (آریا و پاریس ۱۹۸۱). بتلی و همکاران (۱۹۹۹) ابعاد فراکتالی ذرات ۱۴ نمونه از خاک‌های سوئیس و پنج نمونه از خاک‌های آمریکا را که گوناگونی گسترده‌ای از مواد مادری، وضعیت‌های هوازدگی و بافت را دارا بودند، با بهره‌گیری از مدل‌هایی بر پایه جرم محاسبه کردند که نتیجه آن به دست آوردن رابطه توانی میان جرم و اندازه ذرات خاک بود.

یافته‌های بسیاری از بررسی‌ها، بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک را، در کمی کردن رابطه میان توزیع اندازه ذرات با فرایندها و ویژگی‌های خاک، سودمند می‌دانند (آریا و پاریس ۱۹۸۱، هوانگ و همکاران ۲۰۰۲). اسدی و همکاران (۲۰۱۷) و وهاب زاده کبریا و همکاران (۲۰۱۶) بیان کردند که تغییر کاربری اراضی و در نهایت فرسایش سبب تغییر در خصوصیات خاک از جمله بافت خاک می‌شود. امامی (۲۰۱۶) بیان کرد که بعد فراکتالی تابع بافت خاک است. باقری فام و همکاران (۲۰۱۳) نیز بیان کردند که بافت خاک در کاربری اراضی مختلف دارای تغییرات معنی‌داری است. بنابراین تغییر در کاربری اراضی سبب تغییر در بعد فراکتالی می‌شود. ژیا و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که استفاده از بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک ابزاری مناسب برای توصیف تغییرات کاربری است. ببرنژاد زیارت و همکاران (۲۰۱۷) کارایی مدل‌های مختلف فراکتالی را در توصیف توزیع اندازه ذرات رسوب بررسی کردند. این پژوهشگران نشان دادند که ارتباط قوی بین ابعاد فراکتالی و درصد رس و شن وجود دارد. نتایج فیلگوئرا و همکاران (۲۰۰۶) نشان داد که بین ذرات رس و بعد فرکتال رابطه خطی و مثبت وجود دارد. همچنین ارساهین و همکاران (۲۰۰۶) و وانگ و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان کردند که با افزایش مقدار رس، بعد فرکتالی ذرات افزایش و با افزایش مقدار شن، کاهش می‌یابد.

استفاده از مدل‌های فراکتالی یک روش مناسب و ساده جهت بررسی و توصیف توزیع اندازه ذرات خاک است. با توجه به اهمیت توزیع اندازه ذرات در فرسایش خاک، بررسی تغییرات آن و معادلات مربوطه بسیار حایز اهمیت است. همچنین تا کنون مطالعه جامعی بر روی دقت مدل‌های مختلف فراکتالی در کاربری مختلف اراضی صورت نگرفته است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش (۱) بررسی کارایی مدل‌های مختلف فراکتالی در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک و

۲) تاثیر کاربری اراضی بر ضرایب و دقت این معادلات بود.

مواد و روش‌ها

زیرحوضه امامزاده ابراهیم در بخش جنوبی حوضه پسیخان واقع در استان گیلان قرار دارد. مساحت این بخش ۱۷۸/۶ کیلومتر مربع است و میانگین شیب آن معادل ۳۷/۶ درصد می‌باشد. منطقه‌ی مورد مطالعه به صورت کوهستانی بوده و میانگین ارتفاع آن از سطح دریا ۱۲۳۸ متر است. از نظر زمین شناسی این منطقه به دوران پالئوزوئیک و ژوراسیک بر می‌گردد و جنس سنگ‌های آن عمدتاً ماسه سنگ، شیل، سنگ آهک و بازالت است. برای انجام این پژوهش تعداد ۹۳ نمونه خاک از مناطق مختلف حوضه با کاربری، پوشش و وضعیت فرسایش متفاوت در زیرحوضه جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری به صورت مرکب از هر کاربری-منطقه از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر لایه سطحی به صورت دست خورده در بهار سال ۱۳۹۷ انجام شد. کاربری-های مورد مطالعه شامل جنگل (۸ نمونه)، مرتع با پوشش مناسب (۱۱ نمونه)، مرتع تخریب شده (۲۳ نمونه)، باغ چای (۵ نمونه)، شالیزار (۷ نمونه)، خندق-های موجود در منطقه (۲۱ نمونه)، مناطق فرسایش یافته در دیواره رودخانه (۴ نمونه) و رسوبات ته‌نشست شده در گودال‌ها و نقاط رسوب‌گذاری در محل خروجی زیرحوضه (۱۴ نمونه) است. تعداد نمونه در هر کاربری-منطقه بر اساس وسعت و تغییرپذیری تعیین گردید.

برای تعیین منحنی توزیع اندازه ذرات خاک (ذرات $< 2 \text{ mm}$) از روش هیدرومتری استفاده شد (گی و عور ۲۰۰۲). قرائت‌های هیدرومتر در زمان‌های ۳۰ ثانیه، ۱، ۳، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه صورت گرفت. پس از انجام قرائت‌های هیدرومتر برای تفکیک ذرات شن از رس و سیلت محتویات سیلندر روی الک $53 \mu\text{m}$ ریخته شد. سپس ذرات در دامنه‌های قطری: شن خیلی ریز ($0/05$ تا

$0/1 \text{ mm}$)، شن ریز ($0/1$ تا $0/25 \text{ mm}$)، شن متوسط ($0/25$ تا $0/5 \text{ mm}$)، شن درشت ($0/5$ تا 1 mm) و شن خیلی درشت (1 تا 2 mm) جداسازی شد و تعداد ۱۲ نقطه از منحنی توزیع اندازه ذرات در دامنه قطری کوچک‌تر از $0/05 \text{ mm}$ تعیین گردید (گی و عور ۲۰۰۲). ماده آلی به روش والکی و بلک (۱۹۳۴)، هدایت الکتریکی به روش رودس (۱۹۹۶) و اسیدیته خاک با استفاده از روش توماس (۱۹۹۶) اندازه‌گیری شد.

مدل‌های مختلفی برای محاسبه بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک ارایه شده است. در این مطالعه سه معادله تیلور-ویتکرافت (۱۹۹۲)، پریر-بیرد (۲۰۰۲) و بیرد و همکاران (۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. مدل تیلور-ویتکرافت (۱۹۹۲):

$$\frac{M < X}{M_T} = \left(\frac{X}{X_{\max}} \right)^{3-D} \quad [1]$$

در این رابطه $M < X$ بیانگر جرم تجمعی ذرات کوچک‌تر از X ، M_T جرم کل نمونه، X اندازه ذرات، $X_{\max}$ قطر بزرگ‌ترین ذره و D بعد فراکتالی است. مدل بیرد و همکاران (۲۰۰۰):

$$M(X \leq X_i) = CX_i^{3-D} \quad [2]$$

که در آن، $M(X \leq X_i)$ جرم تجمعی ذرات مساوی یا کوچک‌تر از X_i ، X_i حد بالایی اندازه ذرات خاک در هر کلاس، D بعد فراکتالی و C ثابت مقیاس مرکب است. مدل پریر-بیرد (۲۰۰۲):

$$M(X \leq X_i) = (\alpha^{D-3})(L^{D-3})(X^{3-D}) \quad [3]$$

که در آن، L بیانگر حد بالایی اندازه ذرات در هر کلاس، D بعد فراکتالی و α ضریب ثابت معادله است.

مدل‌های بالا بر داده‌های اندازه‌گیری شده توزیع اندازه ذرات خاک برازش شد و برای ارزیابی دقت برازش مدل‌ها از سه آماره مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، آکایک (AIC) و نکوئی برازش (R^2) زیر استفاده شد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (M_{\text{meas}} - M_{\text{fit}})^2}{\sum (M_{\text{meas}} - M_{\text{mean}})^2} \quad [4]$$

$$AIC = N \ln \left(\frac{\sum (M_{meas} - M_{fit})^2}{N} \right) + 2q \quad [5]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M_{meas} - M_{fit})^2}{N}} \quad [6]$$

M_{fit} و M_{mean} ، M_{meas} به ترتیب جرم تجمعی ذرات اندازه‌گیری، میانگین و برازشی و N تعداد نقاط اندازه‌گیری هستند و q در فرمول AIC بیانگر تعداد ضرایب مدل است.

برای برازش مدل‌ها از Solver Excel 2013 استفاده شد. تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی با نرم افزار SPSS 22 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح پنج درصد انجام شد. نمودارها نیز در نرم افزار Excel 2013 رسم شدند.

نتایج و بحث

در جدول ۱ ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه خاک‌های مورد مطالعه به تفکیک کاربری آمده است. خاک‌های مورد مطالعه از نظر شوری و قلیائیت فاقد مشکل هستند و سطح ماده آلی در این نمونه‌ها نسبتاً مناسب است. مقدار ماده آلی در نمونه‌های رسوب، خندق و حاشیه رودخانه به دلیل عمقی بودن (برداشت نمونه از لایه‌های پایین)، کم است. همچنین رسوبات عمدتاً از ذرات شن تشکیل شده‌اند و ذرات ریزتر به صورت معلق حرکت کرده و از حوضه خارج شده‌اند. در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس ضرایب سه معادله مورد بررسی و اجزای بافت خاک تحت تاثیر مناطق نمونه‌برداری آمده است. همانگونه که مشخص است تمام پارامترهای مورد بررسی تحت تاثیر منطقه نمونه-برداری قرار دارند و دارای تغییرات معنی‌داری هستند. برومند و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان دادند که اجزای بافت خاک تحت تاثیر کاربری اراضی خاک هستند.

در شکل ۱ نتایج مقایسه میانگین تغییرات رس، سیلت و شن تحت تاثیر مناطق نمونه‌برداری آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بیشترین درصد رس در اراضی تحت کشت چای معادل ۲۸/۱۶ درصد به دست آمده است. در اراضی تحت کشت چای کمترین درصد شن (۲۳/۳۴ درصد) نیز به دست آمده است و بافت خاک در این اراضی عمدتاً متوسط است. تفاوت در مقدار رس، سیلت و شن در اراضی مختلف را می‌توان به تفاوت در عوامل خاکسازي و همچنین شدت فرسایش رخ داده شده در آن کاربری نسبت داد. شیب یکی از مهم‌ترین عوامل در رخداد و شدت فرسایش خاک است. اراضی مورد مطالعه در این پژوهش دارای شیب‌های مختلفی هستند، از این رو حرکت ذرات تابع اندازه ذرات، شدت جریان و غیره می‌باشد. در همین راستا اسدی و همکاران (۲۰۱۷) بیان کردند که شیب زمین از عوامل تعیین کننده در تغییر بافت خاک است. تغییر در بافت خاک به دلیل رخداد فرسایش و حرکت ذرات خاک به سمت پایین است. بالاترین درصد شن نیز در نمونه رسوبات برابر با ۸۵ درصد به دست آمد، که علت آن انتقال ذرات رس و سیلت به صورت معلق منتقل شده‌اند. نتایج نشان داده است که سیلت نیز تحت تاثیر مناطق نمونه‌برداری قرار دارد و در رسوبات، کمترین مقدار آن معادل ۱۲ درصد به دست آمد. در همین راستا عجمی و همکاران (۲۰۱۰) و تاج‌خلیلی و همکاران (۲۰۱۱) نیز اختلاف معنی‌داری از نظر درصد سیلت بین کاربری‌های مختلف مشاهده نمودند. تورودو (۱۹۸۱) نیز به این نتیجه رسید که جزء رس خاک در اراضی زراعی به طور معنی‌داری بیش‌تر از اراضی مرتعی است. نتایج این پژوهش با نتایج به دست آمده توسط تورودو (۱۹۸۱) مطابقت دارد.

جدول ۱- ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه در نمونه‌های مناطق مختلف زیرحوضه امام‌زاده ابراهیم.

پارامتر	معیار	مرتع	مرتع تخریب شده	جنگل	شالیزار	باغ چای	حاشیه رودخانه	خندق	رسوب
	تعداد	۱۱	۲۳	۸	۷	۵	۴	۲۱	۱۴
رس (%)	کمترین	۲/۷	۲/۶	۱۴/۶	۷/۵	۲۰/۴	۱۱/۰	۶/۳	۰/۸
	میانگین	۱۰/۱	۱۳/۲	۱۸/۳	۱۲/۷	۲۸/۱	۱۵/۸	۲۴/۶	۲/۷
	بیشترین	۲۱/۱	۳۲/۶	۲۴/۴	۲۴/۹	۳۹/۳	۲۵/۰	۴۸/۵	۵/۱
سیلت (%)	کمترین	۱۷/۴	۱۷/۸	۳۸/۷	۳۳/۴	۲۹/۲	۳۰/۰	۳۰/۴	۵/۰
	میانگین	۳۰/۳	۳۴/۴	۵۶/۴	۴۸/۰	۴۸/۵	۳۴/۴	۴۰/۹	۱۲/۰
	بیشترین	۴۸/۷	۵۳/۷	۷۲/۱	۶۴/۷	۶۲/۹	۳۷/۷	۶۶/۱	۲۰/۱
شن (%)	کمترین	۳۳/۵	۱۸/۰	۸/۰	۲۳/۲	۱۳/۲	۴۴/۹	۲/۳	۷۸/۱
	میانگین	۵۹/۵	۵۲/۲	۲۵/۱	۳۹/۱	۲۳/۳	۴۹/۷	۳۴/۳	۸۵/۲
	بیشترین	۷۳/۹	۷۶/۷	۴۵/۸	۵۹/۰	۳۵/۶	۵۲/۹	۵۹/۲	۸۹/۹
ماده آلی (%)	کمترین	۲/۹۹	۱/۶۹	۲/۲۱	۱/۶۹	۲/۷۳	۰/۷۱	۱/۴۱	۰/۸۴
	میانگین	۳/۷۲	۲/۸۶	۳/۵۰	۲/۰۹	۳/۱۰	۱/۱۳	۱/۱۹	۱/۴۵
	بیشترین	۴/۴۲	۴/۰۳	۴/۱۶	۲/۶۰	۳/۳۸	۱/۶۹	۲/۶۰	۲/۳۴
EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	کمترین	۱۹۳	۱۸۸	۵۹	۱۵۹	۲۹۷	۱۶۴	۱۳۳	۲۰۱
	میانگین	۳۵۶	۳۴۴	۲۹۰	۳۰۷	۵۴۱	۲۱۷	۲۴۳	۲۳۱
	بیشترین	۹۰۳	۷۱۷	۵۰۱	۴۵۶	۷۸۵	۲۵۳	۳۸۷	۲۶۲
pH	کمترین	۷/۱۹	۶/۵۲	۶/۸۴	۷/۰۴	۶/۹۵	۷/۳۹	۶/۵۶	۷/۳۵
	میانگین	۷/۴۲	۷/۳۳	۷/۴۱	۷/۳۷	۷/۲۷	۷/۵۹	۷/۲۴	۷/۷۰
	بیشترین	۷/۶۶	۷/۹۷	۷/۸۵	۷/۶۵	۷/۷۷	۷/۹۱	۸/۰۳	۷/۹۷

شکل ۲ نتایج مقایسه میانگین بعد فراکتالی و آماره‌های دقت در کل اطلاعات آمده است. هماگونه که مشاهده می‌شود مدل بیرد (معادل ۲/۷۳) نسبت به دو مدل دیگر پریر-بیرد (۲/۹۴) و تیلور-ویتکرفت (۲/۹۵) دارای مقدار بعد فراکتالی کمتری است. تفاوت در مقدار بعد فراکتالی در مدل‌های مختلف ناشی از تفاوت در شکل ریاضی و ضرایب مدل است. جره و همکاران (۲۰۱۳) مقدار بعد فراکتالی را برای مدل پریر-بیرد و بیرد به ترتیب برابر با ۲/۷۸ و ۲/۷۶ به دست آوردند، که با نتایج به دست آمده در این پژوهش همخوانی دارد. محمدیان خراسانی و همکاران (۲۰۱۸) مقدار بعد فراکتالی مدل تیلور-ویتکرفت را از ۲/۴۰۸ تا ۲/۶۵۱ به دست آوردند. نتایج مقایسه میانگین RMSE نشان داد که مدل بیرد با پریر-بیرد دارای اختلاف معنی‌داری

نیست، اما این دو مدل نسبت به مدل تیلور-ویتکرفت دارای دقت بهتری هستند. بیرنژاد زیارت و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که مدل بیرد نسبت به مدل تیلور-ویتکرفت دارای RMSE کمتری است. روند تغییرات ضریب تبیین نیز همانند RMSE است و دو مدل بیرد و پریر-بیرد دارای اختلاف معنی‌داری نیستند. اما از نظر مقایسه ضریب تبیین مدل تیلور-ویتکرفت دارای نتایج بهتری نسبت به دو مدل دیگر است. بیگی هرچگانی و بنی طالبی (۲۰۱۵) دامنه تغییرات ضریب تبیین را برای معادلات مختلف بین ۰/۶۷ تا ۰/۹۵ به دست آوردند که در مقایسه با نتایج این پژوهش دارای پراکندگی بیشتری در ضریب تبیین است.

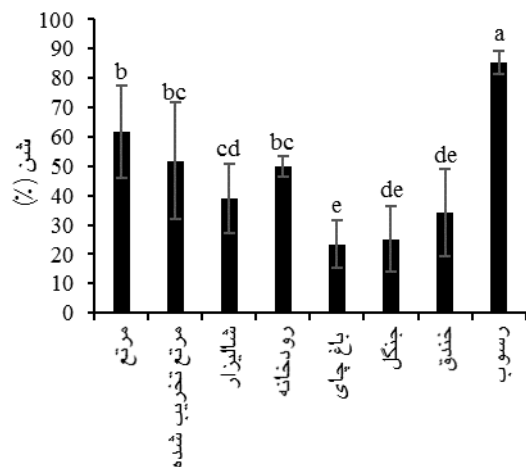
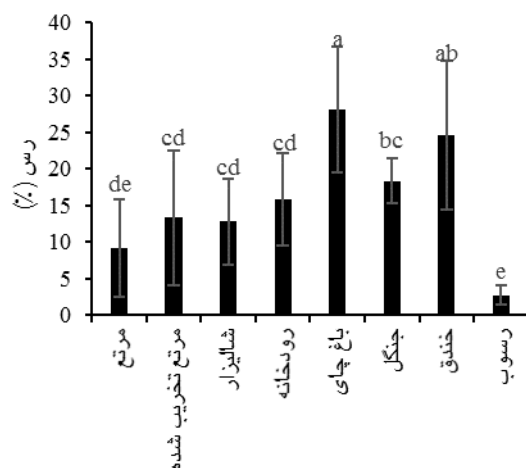
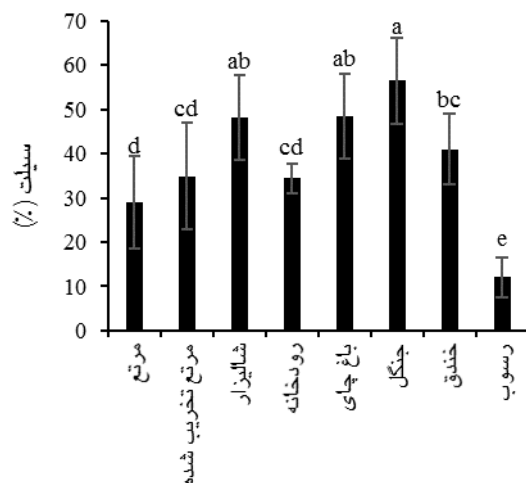
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر کاربری اراضی بر ضرایب معادلات و اجزای بافت خاک.

پارامتر	df	MS
رس	۷	۷۷۹/۷۱**
شن	۷	۴۷۲۲/۲۷**
سیلت	۷	۲۰۲۱/۲۲**
بعد فراکتالی تیلور-ویتکرفت	۷	۰/۰۷**
بعد فراکتالی بیرد	۷	۰/۱۴**
بعد فراکتالی پریر-بیرد	۷	۰/۰۲**
α پریر-بیرد	۷	۰/۳۲**
C بیرد	۷	۳۲۶/۴۳**

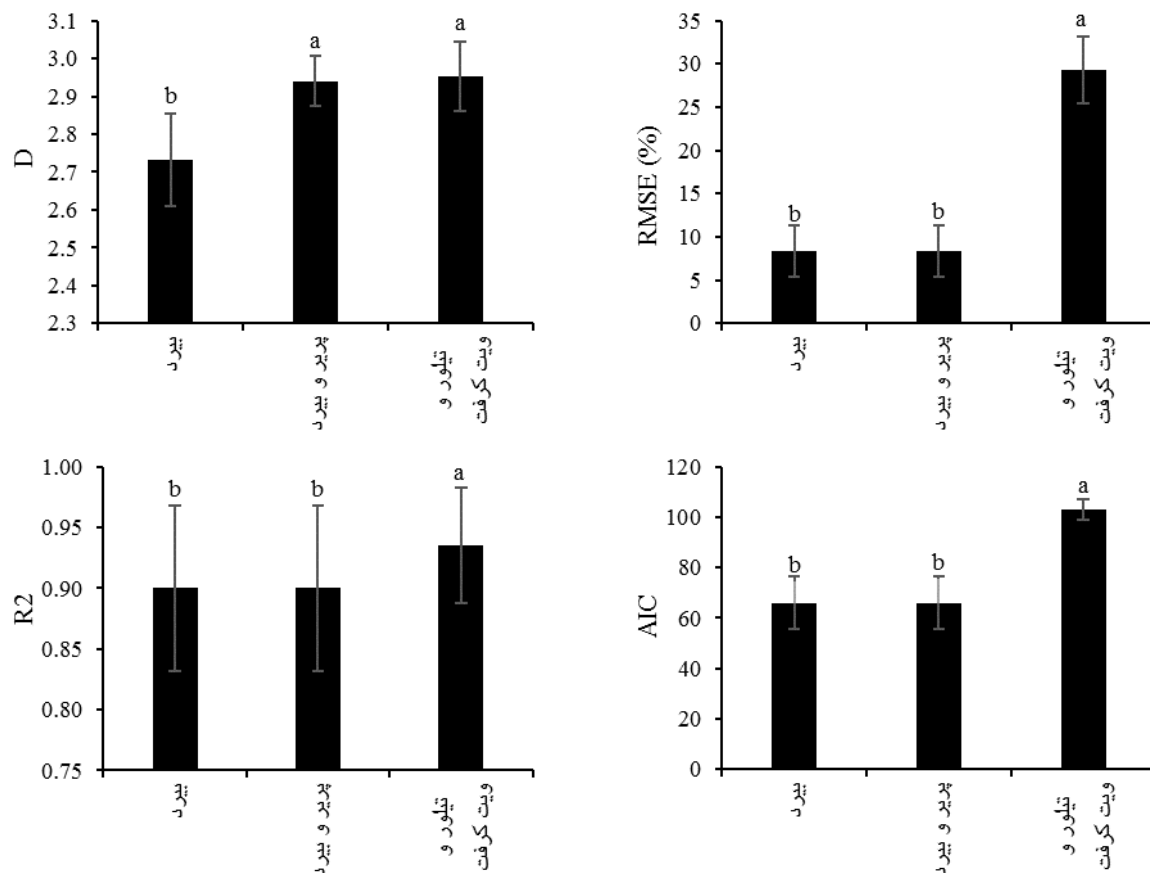
df: درجه آزادی، MS: میانگین مربعات، ** بیانگر وجود اختلاف

معنی‌دار در سطح یک درصد

نتایج نشان می‌دهد که دو مدل بیرد و پریر-بیرد در مقایسه با مدل تیلور-ویتکرفت دارای AIC کمتری هستند. هرچه مقدار AIC کمتر باشد نشان دهنده دقت بالاتر مدل است. علت برتری این دو مدل را می‌توان به تعداد بیشتر پارامترهای آن‌ها نسبت داد. در همین راستا هوانگ و همکاران (۲۰۰۲) بیان کردند که افزایش تعداد پارامتر در مدل‌های توزیع اندازه ذرات خاک باعث افزایش کارایی مدل می‌شود. همچنین بوچان (۱۹۸۹) بیان کرد که افزایش تعداد پارامتر مدل باعث افزایش انعطاف‌پذیری و در نتیجه افزایش دقت مدل می‌شود.



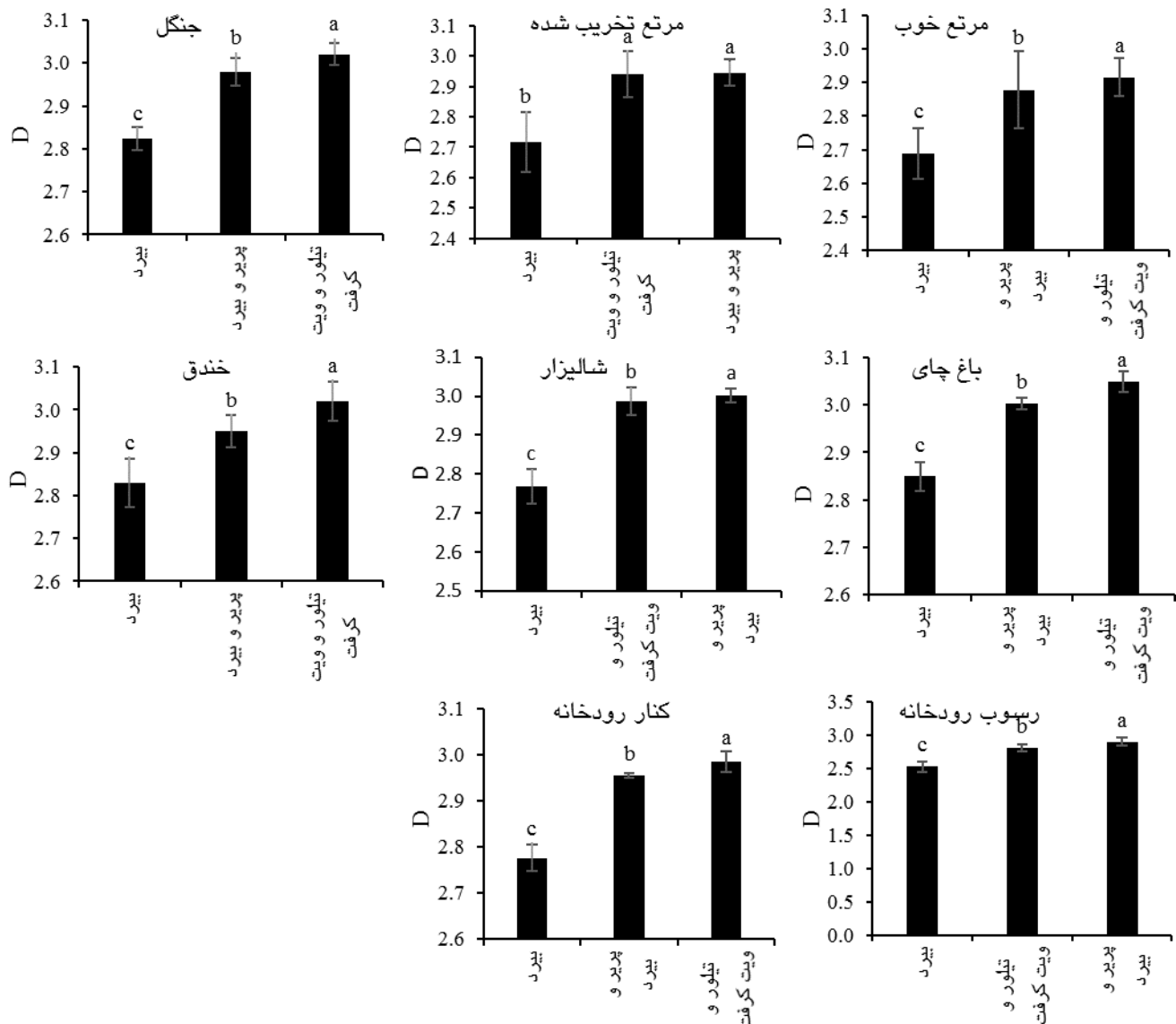
شکل ۱- مقایسه میانگین رس، سیلت و شن در مناطق مختلف زیرحوضه امامزاده ابراهیم.



شکل ۲- مقایسه میانگین بعد فراکتالی بین سه مدل و آماره‌های خطای برآورد توزیع اندازه ذرات خاک.

نشان می‌دهد که تغییر در توپوگرافی، پوشش، کاربری و شدت فرسایش، سبب تغییر در بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات خاک می‌شود. در همین راستا ژیاو و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که بعد فراکتالی به دست آمده از توزیع اندازه ذرات خاک تحت تاثیر کاربری اراضی است. ببرنژاد زیارت و همکاران (۲۰۱۷) مقدار بعد فراکتالی بیرد و تیلور-ویتکرفت را برای ذرات رسوب به ترتیب برابر با $2/80$ و $2/83$ به دست آوردند و نشان دادند که بعد فراکتالی بیرد مقدار جزی کوچکتر از بعد فراکتالی تیلور-ویتکرفت است که با نتایج به دست آمده در این پژوهش مطابقت دارد.

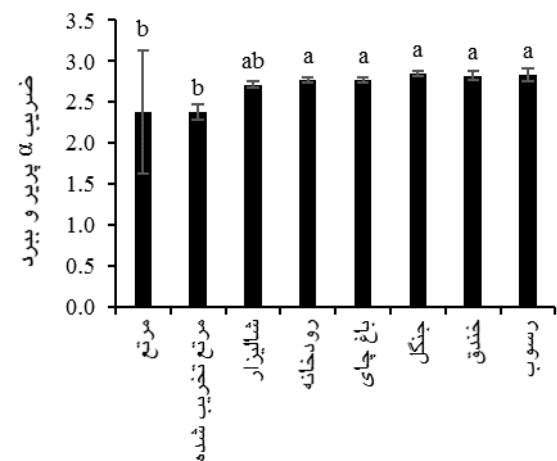
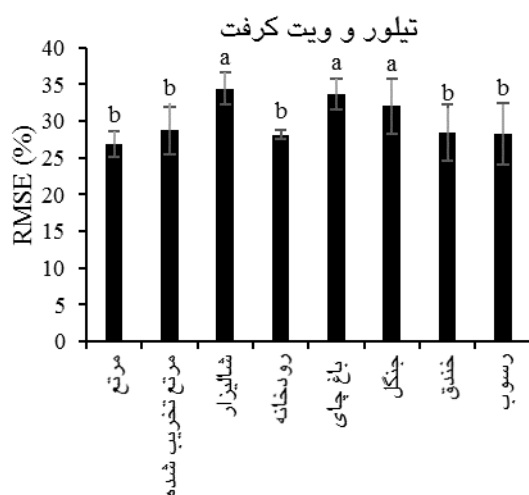
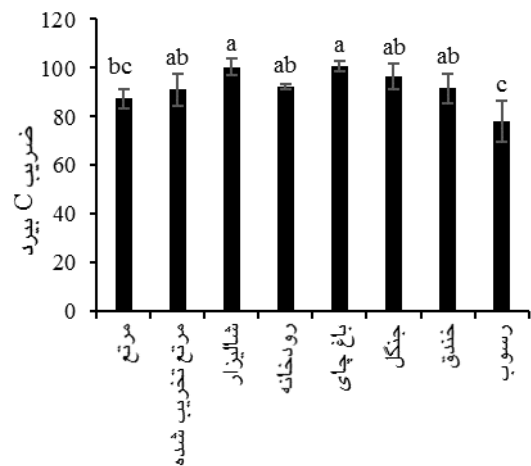
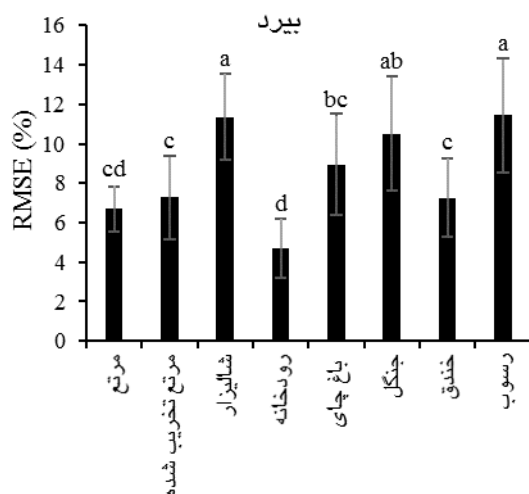
در شکل ۳ نتایج مقایسه میانگین تغییرات بعد فراکتالی سه مدل مورد بررسی در هر نمونه به تفکیک آمده است. همانند شکل ۲، بعد فراکتالی مدل بیرد در تمام نقاط نمونه‌برداری نسبت به دو مدل دیگر به‌طور معنی‌داری کوچکتر است. علت پایین بودن بعد فراکتالی در مدل بیرد را می‌توان به شکل ریاضی مدل و همچنین به بالا بودن ضریب C در این مدل نسبت داد. نتایج نشان داده است که به جز مرتع تخریب شده، در سایر نقاط مورد بررسی بین مدل تیلور-ویتکرفت و مدل پریر-بیرد اختلاف معنی‌داری وجود دارد و به طور کلی بعد فراکتالی به دست آمده از مدل تیلور-ویتکرفت بزرگتر از مدل پریر-بیرد است. نتایج به دست آمده



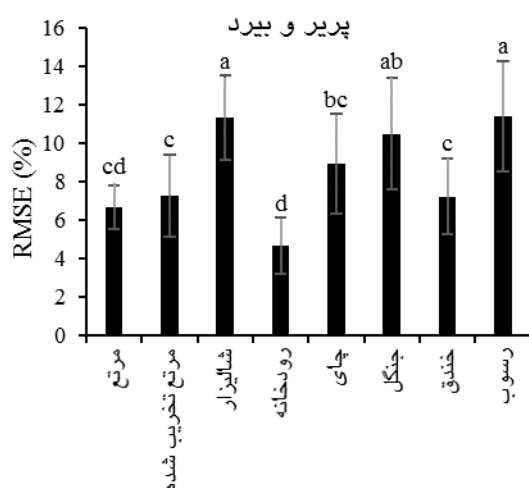
شکل ۳- مقایسه میانگین بعد فراکتالی بین سه مدل در نمونه‌های خاک مختلف.

مرتع تخریب شده با سایر نمونه‌ها این اختلاف معنی‌دار است. ضرایب C در مدل بیرد و ضریب α در مدل پریر-بیرد فاقد مفهوم فیزیکی هستند. تغییر در این ضرایب به علت ساختار مدل ارائه شده است که سبب برآزش بهتر و دقیقتر مدل می‌شود. بیات و همکاران (۲۰۱۳) مقدار ضریب α را معادل ۰/۷۸۲ و ۰/۸۰۲ (در دو بخش آموزش و آزمون جهت مدل‌سازی) به دست آوردند.

در شکل ۴ نتایج مقایسه میانگین تغییرات ضرایب C در مدل بیرد و ضریب α در مدل پریر-بیرد در مناطق مورد مطالعه آمده است. نتایج نشان داده است که این ضرایب در نمونه‌های مناطق مختلف، متفاوت هستند. کمترین و بیشترین مقدار ضریب C به ترتیب در رسوبات و نمونه باغ چای به دست آمده است. نتایج مقایسه میانگین تغییرات ضریب α در مدل پریر-بیرد نشان داده است که تغییرات این ضریب در غالب مناطق معنی‌دار نیست اما در نمونه‌های مرتع و



شکل ۴- مقایسه میانگین ضرایب C در مدل بیرد و ضریب α در مدل پریر-بیرد در کاربری‌های مختلف.



شکل ۵- مقایسه میانگین RMSE در تخمین توزیع اندازه ذرات مناطق مختلف با سه مدل فراکتالی.

در جدول ۳ نتایج همبستگی پیرسون بین اجزای شن و بافت با ضرایب معادلات فراکتالی آمده است. نتایج نشان داده است که هر سه بعد فراکتالی مورد

در شکل ۵ نتایج مقایسه میانگین تغییرات RMSE سه مدل مورد مطالعه در نمونه‌های مختلف آمده است. همانگونه که مشخص است مدل تیلور-ویتکرفت در اراضی با کاربری مرتع دارای کمترین مقدار RMSE بود. نتایج نشان داده است که مدل تیلور-ویتکرفت در کاربری‌های جنگل، شالیزار و باغ چای دارای اختلاف معنی‌داری نبود، و در این سه کاربری نسبت به سایر نقاط دقت کمتری داشت. نتایج مدل بیرد و پریر-بیرد نیز نشان داد که کمترین مقدار RMSE در خاک‌های فرسایش یافته در دیواره رودخانه و مرتع به دست آمد.

بررسی با شن رابطه معکوس و با رس رابطه مستقیم دارند. بعد فراکتالی تیلور-ویتکرفت با شن رابطه معکوس دارد اما این رابطه معنی‌دار نیست. بعد فراکتالی بیرد و پریر-بیرد به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۹۳۶ و ۰/۶۳۱ در سطح یک درصد دارای رابطه معنی‌دار معکوسی با شن هستند. بعد فراکتالی بیرد نیز با اجزای شن از شن خیلی ریز تا شن درشت دارای رابطه معکوس و معنی‌دار است. همچنین نتایج نشان داده است که بعد فراکتالی پریر-بیرد با رس و سیلت همبستگی مستقیم و معنی‌داری در سطح یک درصد دارد. ضریب α معادله پریر-بیرد با شن ($r = -0/494$) و اجزای آن دارای رابطه معکوسی است اما این ضریب با رس ($r = 0/443$) و سیلت ($r = 0/448$)

دارای یک همبستگی مثبت معنی‌دار است. زهاو و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند که بین بعد فراکتالی با رس و شن همبستگی قوی وجود دارد. همچنین بیات و همکاران (۲۰۰۸) نیز نتایج مشابهی در زمینه همبستگی بعد فراکتالی با رس و شن گزارش کردند. احمدی و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که بعد فراکتالی مدل بیرد دارای همبستگی مثبتی با رس و سیلت بود، اما با شن این همبستگی منفی است. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج احمدی و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد. میلان و همکاران (۲۰۰۳) نیز نشان دادند که یک رابطه خطی قوی بین بعد فراکتالی و درصد رس وجود دارد.

جدول ۳- همبستگی بین متغیرهای مورد بررسی در کل داده‌ها.

C	α	D _{P.B}	D _B	D _{T.W}	Silt	Clay	Sand	VCS	CS	MS	FS	VFS	
													VF
													S
											۱	۰/۴۲۳**	FS
										۱	۰/۴۳۳**	۰/۰۸۰	MS
									۱	۰/۵۳۸**	۰/۰۶۷	۰/۲۱۹*	CS
								۱	۰/۵۶۰**	۰/۰۰۰	۰/۲۴۲*	۰/۲۷۳**	VC
							۱	۰/۱۷۷	۰/۵۵۱**	۰/۷۲۳**	۰/۶۸۴**	۰/۴۴۰**	Sand
						۱	۰/۸۰۰**	۰/۰۳۴	۰/۳۸۷**	۰/۶۱۱**	۰/۵۵۱**	۰/۴۲۶**	Clay
					۱	۰/۶۲۷**	۰/۸۳۷**	۰/۱۴۹	۰/۴۷۲**	۰/۵۹۸**	۰/۵۷۶**	۰/۲۱۵*	Silt
				۱	۰/۴۵۹**	۰/۳۸۵**	۰/۰۶۲	۰/۰۹۷	۰/۰۳۳	۰/۱۰۴	۰/۰۴۹	۰/۱۱۷	D _{T.W}
			۱	۰/۹۹۶**	۰/۸۲۹**	۰/۸۶۷**	۰/۹۳۶**	۰/۱۰۰	۰/۶۲۳**	۰/۸۱۶**	۰/۶۳۱**	۰/۳۱۲**	D _B
		۱	۰/۶۳۵**	۰/۶۶۵**	۰/۶۳۲**	۰/۴۸۰**	۰/۶۳۱**	۰/۵۴۵**	۰/۷۰۳**	۰/۵۳۷**	۰/۱۹۴	۰/۰۴۱	D _{P.B}
	۱	۰/۸۴۳**	۰/۴۹۷**	۰/۵۰۴**	۰/۴۴۸**	۰/۴۴۳**	۰/۴۹۴**	۰/۱۳۳	۰/۳۲۱**	۰/۴۰۱**	۰/۲۲۶*	۰/۱۸۵	α
۱	۰/۴۰۹**	۰/۸۱۱**	۰/۷۵۹**	۰/۷۹۶**	۰/۷۶۱**	۰/۵۶۹**	۰/۷۵۵**	۰/۶۶۰**	۰/۸۷۱**	۰/۶۴۸**	۰/۲۹۲**	۰/۰۹۱	C

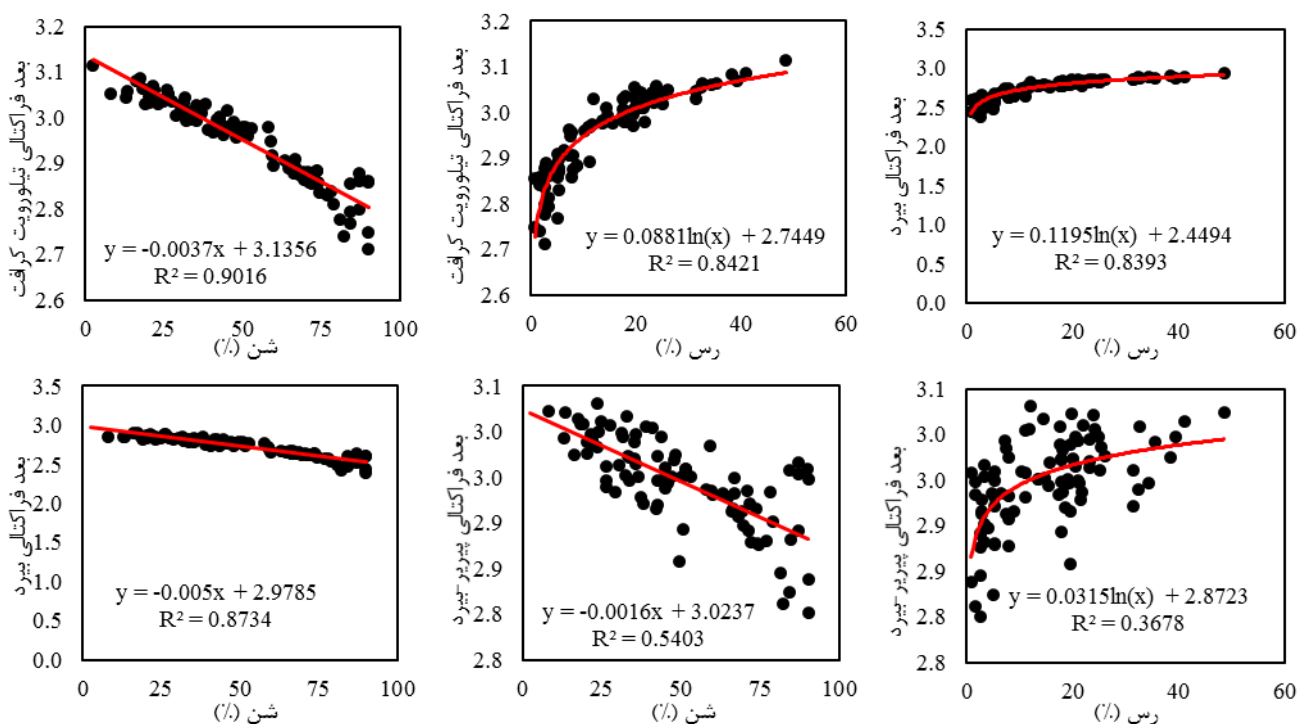
** و * همبستگی در سطح یک و پنج درصد؛ VFS، شن خیلی ریز؛ FS، شن ریز؛ MS، شن متوسط؛ CS، شن درشت؛ VCS، شن خیلی درشت؛ D_{T.W}، بعد فراکتالی تیلور و ویت کرفت؛ D_B، بعد فراکتالی بیرد؛ D_{P.B}، بعد فراکتالی پریر-بیرد. α ضریب معادله پریر-بیرد و C ضریب معادله بیرد

مدل بیرد با مقدار رس رابطه مثبت و مقدار شن رابطه معکوسی وجود دارد که با نتایج به دست آمده از این پژوهش مطابقت دارد. محمدیان خراسانی و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که بعد فراکتالی تیلور-ویتکرفت با

ضریب C معادله بیرد نیز با شن و اجزای شن (به استثنای شن خیلی ریز) دارای رابطه معکوس و با رس و سیلت همبستگی مثبت معنی‌داری دارد. بیرنژاد زیارت و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که بین ضریب C

شن، سیلت و رس همبستگی معنی‌داری دارد. سو و همکاران (۲۰۰۴) رابطه رگرسیون خطی میان بعد فراکتالی توزیع اندازه خاک و پارامترهای دیگر مانند مقدار شن، سیلت و رس خاک را بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند که رابطه منفی معنی‌داری بین بعد فراکتالی و مقدار شن به دست آمد و رابطه بعد فراکتالی با سیلت و رس مثبت و معنی‌دار بود. میلان و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی ماهیت فراکتالی خاک‌های با بافت‌های گوناگون نشان دادند که بعد فراکتالی برای توزیع اندازه ذرات، به گونه معنی‌داری با مقادیر رس همبستگی خطی مثبت و با شن همبستگی منفی دارد.

در شکل ۶ نتایج روابط رگرسیونی بین بعد فراکتالی سه مدل مورد مطالعه و رس و شن آمده است. مشاهده می‌شود که ابعاد فراکتالی مدل‌های تیلور-ویتکرفت، بیرد و پریر-بیرد با رس دارای یک رابطه غیر خطی هستند. همانگونه که مشاهده می‌شود ضریب تبیین بین بعد فراکتالی پریر-بیرد با رس پایین است. نتایج نشان داده است که ارتباط بین ابعاد فراکتالی با شن به صورت خطی است. بعد فراکتالی تیلور-ویتکرفت دارای بالاترین ضریب تبیین ۰/۹۰ با شن است.



شکل ۶- روابط رگرسیونی شن و رس با بعد فراکتالی مدل‌های مختلف.

محمدیان خراسانی و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که بعد فراکتالی تیلور-ویتکرفت با رس رابطه مستقیم و با شن رابطه معکوسی دارد که با نتایج به دست آمده از این پژوهش مطابقت دارد. ضریب تبیین به دست آمده توسط محمدیان خراسانی و همکاران (۲۰۱۸) برای رس و شن با بعد فراکتالی

تیلور-ویتکرفت به ترتیب برابر با ۰/۸۶ و ۰/۶۴ است. ببرنژاد زیارت و همکاران (۲۰۱۷) ضریب تبیین بین پارامتر رس و بعد فراکتالی به دست آمده از معادله سیگموییدی را معادل ۰/۶۸ به دست آوردند که در مقایسه با نتایج مدل تیلور ویت-کرفت و بیرد پایین تر است اما در مقایسه با ضریب

تیین در معادله پریر-بیرد دارای دقت بالاتری بوده است. همچنین این پژوهشگران رابطه بین شن و بعد فراکتالی به دست آمده از معادله سیگموییدی را ۰/۸۸ به دست آوردند. نتایج نشان داد که رابطه بین بعد فراکتالی با رس غیر خطی و رابطه بین شن و بعد فراکتالی خطی است. سو و همکاران (۲۰۰۴) نیز بیان کردند که ارتباط بین بعد فراکتال و درصد رس، سیلت و شن خطی می‌باشد. زهاو و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که هر دو تابع خطی و سیگموییدی می‌تواند برای توصیف ارتباط بین بعد فراکتال و درصد شن، رس و سیلت مناسب باشند. اما آنها بیان کردند که توابع سیگموییدی با دقت بالاتری رابطه بین ابعاد فراکتال و ویژگی‌های بافت خاک را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که بعد فراکتالی تابعی از نوع خاک، پوشش، کاربری و

منابع مورد استفاده

- Ahmadi A, Neyshabouri MR and Asadi H, 2010. Relationship between fractal dimension of particle size distribution and some physical properties of soils. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 20(4):73-81. (In Persian with English abstract).
- Ajmi M, Khormali F and Ayobi S, 2010. Application of neural network for prediction of Earthen Dam Peak Breach outflow, and Breach Time. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 39(1):10-30. (In Persian with English abstract).
- Arya LM and Paris JF, 1981. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal* 45:1023-1030.
- Asadi H, Khoshrang H and Ebrahimi E, 2017. Effect of tillage direction and slope position on some physical and chemical properties and aggregate stability of soil. *Iranian Journal Soil and Water Research* 48(1):217-230. (In Persian with English abstract).
- Babrnejad Ziarat H, Zolfaghari AA, Yazdani MR, Hashemi AA and Kiyaniyan MK, 2017. Evaluation of fractal models in describing particle size distribution of sediment (Case of study: Fooladmahale of Semnan). *Journal of Watershed Management Research* 8(15):61-72. (In Persian with English abstract).
- Bagherifam S, Karimi AR, Lakzian A and Izanloo E, 2013. Effects of land use management on soil organic carbon, particle size distribution and aggregate stability along hillslope in semi-arid areas of northern Khorasan. *Journal of Water and Soil Conservation* 20(4):51-73. (In Persian with English abstract).
- Bayat H and Ebrahimi E, 2016. Effects of various input levels and different soil water retention curve models on water content estimation using different statistical methods. *Hydrology Research* 47(2):312-332.
- Bayat H, 2008. Establishment of transfer functions to predict the retention curve through artificial neural networks using fractal parameters and principal component analysis. Ph.D thesis, University of Tabriz, Iran, 180 p. (in Persian with English abstract).
- Bayat H, Javanshir S, Davatgar N and Neyshabouri MR, 2013. The effect of parameters of particle and aggregate size distribution on the point estimation of soil water retention curve. *Journal of Water and Soil Conservation* 20(4):27-49. (In Persian with English abstract).

شدت فرسایش است. عملکرد دو مدل بیرد و پریر-بیرد تقریباً مشابه هم بود و دارای دقت بهتری نسبت به مدل تیلور-ویتکرفت هستند. علت این موضوع را می‌توان به دو پارامتری بودن مدل‌های بیرد و پریر-بیرد نسبت داد. مدل تیلور و ویتکرفت دارای یک پارامتر است و انعطاف‌پذیری کمتری نسبت به دو مدل دیگر دارد. سه مدل مورد بررسی در این مطالعه (تیلور-ویتکرفت، بیرد و پریر-بیرد) در کاربری‌های متفاوت دارای عملکرد یکسانی نیستند. مدل بیرد در نمونه رسوب، مدل تیلور-ویتکرفت در مرتع خوب و مدل پریر-بیرد در نیز در نمونه رسوب دارای عملکرد بهتری بودند. علت برآزش بهتر مدل‌های را در نمونه رسوب را به یک دست بودن ذرات نسبت داد. چراکه توزیع اندازه ذرات در رسوبات عمدتاً شامل شن بود. همچنین نتایج نشان داد که فرسایش و تخریب مراتع به دلیل اثر بر میزان رسی، سیلت و شن سبب کاهش بعد فراکتالی شده است.

- Beigi Harchegani H and Banitalebi G, 2015. Comparison of methods of determining texture fractal dimension: A case study of the soils of Taqanak, Shahrekord. *Journal of Hydrology and Soil Science* 18(70):327-339. (In Persian with English abstract).
- Bird NRA, Perrier E and Rieu M, 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of Soil Science* 51:55-63.
- Bittelli M, Campbell GS and Flury M, 1999. Characterization of particle-size. *Geoderma* 63:782-788.
- Boroumand M, Ghajar Sepanlu M and Bahmanyar MA, 2014. The effect of land use change on some of the physical and chemical properties of soil (Case study: Semeskande area of Sari). *Journal of Watershed Management Research* 5(9): 78-94. (in Persian with English abstract).
- Buchan GD, 1989. Applicability of the simple lognormal model to particle-size distribution in soils. *Soil Science* 147:155-161.
- Cui Y, Lia J, Chen A, Wu J, Luo Q, Rafay L, He J, Liu Y, Wang D, Lin Y and Chengzhen WCh, 2019. Fractal dimensions of trapped sediment particle size distribution can reveal sediment retention ability of common plants in a dry-hot valley. *Catena* 180:252-262.
- Filgueira RR, Fournier LL, Cerisola CI, Gelati P and Garcia MG, 2006. Particle-size distribution in soils: A critical study of the fractal model validation. *Geoderma* 134:327-334
- Gee GW and Or D, 2002. Particle-size and analysis. In: Warren AD. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Pp. 255-295. Madison. WI, USA: Soil Science Society of America.
- Hwang SI, Lee KP, Lee DS and Powers SE, 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal* 66:1143-1150.
- Jorreh M, Bayat H, Safari Sanjani AA and Davatghar N, 2013. Estimation of soil penetration resistance using fractal parameters of particle and aggregate size distributions. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 23(2):13-27. (in Persian with English abstract)
- Kravchenko A and Zhang R, 1998. Estimating the soil water retention from particle-size distributions: A fractal approach. *Soil Science* 163:171-179.
- Kutlu T, Ersahin S and Yetgin B, 2008. Relations between solid fractal dimension and some physical properties of soils formed over alluvial and colluvial deposits. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 6:445-449.
- Millan H, Gonzalez-Posada M, Aguilar M, Dominguez J and Cespedes L, 2003. On the fractal scaling of soil data particle-size distributions. *Geoderma* 117:117-128.
- Mohammadian Khorasani S, Homaee M and Pazira E, 2018. Evaluating the efficiency of fractal models in estimating soil hydraulic parameters and the relationship between moisture curvature fractal dimensions with these parameters. *Journal of Soil and Water Resources Conservation* 7(4):15-24. (In Persian with English abstract).
- Perrier EMA and Bird NRA, 2002. Modelling soil fragmentation: The pore solid fractal approach. *Soil and Tillage Research* 64(1-2):91-99.
- Quijano L, Kuhn NJ and Navas A, 2020. Effects of interrill erosion on the distribution of soil organic and inorganic carbon in different sized particles of Mediterranean Calcisols. *Soil and Tillage Research* 196:104461.
- Raclot D, Le Bissonnais Y, Annabi M, Sabir M and Smetanova A, 2018. Main Issues for Preserving Mediterranean Soil Resources from Water Erosion under Global Change. *Land Degradation & Development* 29(3):789-799.
- Roades JD, 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. Pp. 417-436. In: *Method of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*, Madison, Wisconsin.
- Su YZ, Zhao HL, Zhao WZ and Zhang TH, 2004. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma* 122:43-49.
- Taj Khalili N, Saedi S and Baybardi A, 2011. Evaluation of some soil properties from forest to pasture and agricultural lands in Arasbaran protected area. 12th Congress of Soil Sciences. September 21-23. Tabriz. Iran. (In Persian)
- Thomas GW, 1996. Soil pH and soil acidity. Pp. 475-490. In: Sparks DL (ed) *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*. SSSA book series, vol 5. Soil Science Society of America Journal, Madison, Wisconsin,

- Turudu OA, 1981. Investigation of some physical and chemical properties of spruce forest, beech forest and meadow and maize farmland soils located same aspects in Trabzon-Hamsikoy province. Kardeniz Technical University Forestry Faculty Publication Number-13, Kardeniz Technical University Press, Trabzon.
- Tyler SW and Wheatcraft SW, 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal* 56:362-369.
- Vahabzadeh Kebria G, Reiahi MR and Roshun SH, 2016. Investigation of land use change on physicochemical characteristics and soil erosion in Kaftargar basin of Behshahr. *Journal of Environmental Erosion Research* 6(2):75-88. (In Persian with English abstract).
- Walkey A and Black IA, 1934. An Examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37:29-38
- Wang L and Shi ZH, 2015. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes. *Soil Science Society of America Journal* 79:917-929
- Wang Y, Zhang XC, Zhang JL and Li SJ, 2009. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the loess plateau. *Pedosphere*. 19:486-495
- Xiao L, Sha X, GuoBin L and Chao Z, 2014. Fractal features of soil profiles under different land use patterns on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land* 6:550-560.
- Young IM, Crawford JW and Rappoldt C, 2001. New method and models for characterizing structural heterogeneity of soil. *Soil and Tillage Research* 61:33-45.
- Yue L, Juying J, Bingzhe T, Binting C and Hang L, 2020. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China. *Journal of Hydrology* 584: 124694.
- Zhang Y, Zhong X, Lin J, Zhao D, Jiang F, Wang MK, Ge H and Huang Y, 2020. Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China. *Geomorphology* 351:106956.
- Zhao P, Shao M and Horton R, 2011. Performance of soil particle-size distribution Models for describing deposited soils adjacent to constructed dams in the China Loess Plateau. *Acta Geophysica* 59:124-138.
- Zhao P, Shao M and Zhuang J, 2009. Fractal features of particle size redistributions of deposited soils on the dam farmlands. *Soil Science* 174:403-407.