

Comparison of Some Methods for Measuring Primary Soil Particle Size Distribution and Introducing Appropriate Times for the Four-Reading Method for Determining Soil Texture

MORTAZA YAVARI¹, MOHAMMAD Hossein MOHAMMADI^{1*}, KARIM SHAHBAZI²

1. Department of Soil Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(Received: Sep. 15, 2020- Revised: Oct. 28, 2020- Accepted: Nov. 14, 2020)

ABSTRACT

Different methods are used for determination of the primary particle size distribution (PSD) in Iranian soils laboratories, which in many situations makes it difficult to compare results and their precision. This research was conducted to achieve an easy and inexpensive strategy with acceptable accuracy. First, 112 soil samples from 16 different provinces of Iran with a wide range of soils were taken from different climates and land uses. Soil PSD was measured by hydrometer with and without cement removal. The results showed that the common reading method of 40 seconds and 2 hours (Bouyoucos, 1962) measures the clay fraction with an average absolute error of 9.5% as compared to the complete record method. This error was more than 10% in 40.5% of the proposed soils and more than 5% in 94.2% of the soils. The deviation of this method from the actual value is increased as the soil becomes finer. Two four-reading methods with the classification of International Soil Science Association (ISSS) including: a) 2 and 10 minute readings (to measure silt fraction) and 6 and 8 hours (to measure clay fraction), and b) readings of 2 and 10 minutes (to measure silt fraction) and 6 and 24 hours (to measure clay fraction) were suggested to determine the soil texture. The two later methods show the soil texture correctly in 97.1 and 94.2% of the soils, respectively. The error of these two methods for determination of clay fraction is less than $\pm 1\%$ in more than 90 and 81% of the proposed soils, respectively.

Key words: Particle Size Distribution, Soil Texture, Densitometry, Hydrometer.

مقایسه برخی روش‌های اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و ارائه زمان‌های مناسب برای روش چهار قرائت تعیین بافت خاک

مرتضی یآوری^۱، محمدحسین محمدی^{۱*}، کریم شهبازی^۲

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۸/۲۴)

چکیده

برای تعیین توزیع اندازه ذرات اولیه (PSD) در آزمایشگاه‌های خاکشناسی ایران، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که این امر در بسیاری از شرایط امکان مقایسه نتایج و نیز دقت آنها را دشوار می‌کند. پژوهش حاضر برای رسیدن به یک راهکار مشخص که در عین سادگی و ارزان بودن، دقت قابل قبولی نیز داشته باشد، انجام شد. ابتدا با توجه به برخی ویژگی‌های خاک از جمله درصد مواد سیمان‌کننده، ۱۱۲ نمونه خاک از ۱۶ استان مختلف کشور از کاربری‌ها و اقلیم‌های مختلف تهیه شد. PSD خاک با روش هیدرومتر با و بدون حذف مواد سیمان‌کننده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، روش رایج قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (Bouyoucos, 1962)، بخش رس را با میانگین خطای مطلق (۱۰۰g/g) ۹/۵ درصد نسبت به روش قرائت کامل اندازه‌گیری می‌کند و در ۴۰/۵ درصد از خاک‌های مورد بررسی بیش از ۱۰ درصد و در ۹۴/۲ درصد از خاک‌ها بیش از ۵ درصد بیشتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌کند و با ریزبافت شدن خاک میزان انحراف این روش از مقدار واقعی، افزایش می‌یابد. برای رفع مشکل، دو روش چهار قرائتی با طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISSS) شامل: الف) قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه (برای تعیین مرز شن و سیلت) و ۶ و ۸ ساعت (برای تعیین مقدار رس) و ب) قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه (برای تعیین مرز شن و سیلت) و ۶ و ۲۴ ساعت (برای تعیین مقدار رس)، پیشنهاد شد. روش پیشنهادی قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۸ ساعت و روش پیشنهادی قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۲۴ ساعت به ترتیب در ۹۷/۱ و ۹۴/۲ درصد خاک‌ها، کلاس بافت را به درستی نشان می‌دهد و به ترتیب در بیش از ۹۰ و ۸۱ درصد موارد، خطای آنها در تعیین مقدار رس خاک کمتر از ± 1 درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه ذرات، بافت خاک، چگالی سنجی، هیدرومتر.

مقدمه

خاک مانند منحنی مشخصه آب خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع، آب قابل استفاده برای گیاه، نفوذپذیری خاک نسبت به آب، هوا و ریشه گیاه استفاده می‌شود (Arya and Paris, 1984; Cosby et al., 1984; Fredlund et al., 2000). علاوه بر آن، فرسایش‌پذیری، رژیم حرارتی، تخلخل و سایر ویژگی‌های مؤثر بر رشد گیاه و تولید محصول تحت تأثیر PSD قرار می‌گیرند (De Oro et al., 2019). به‌طور کلی دو نوع توزیع اندازه ذرات در خاک شامل توزیع اندازه ذرات اولیه (PSD) و توزیع ذرات ثانویه (SPSD) از یکدیگر قابل تفکیک است (Shirazi et al., 2001; Skaggs et al., 2001). از عوامل مؤثر بر توزیع اندازه ذرات، هم‌آوری ذرات اولیه خاک توسط مواد آلی، اکسیدهای آهن و کربنات‌ها است که منجر به ایجاد ذرات ثانویه می‌شوند (Barthès et al., 2008). کاربری اراضی نیز نقش مهمی را در پایداری

توزیع اندازه ذرات (PSD) یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک است (Skaggs et al., 2001). تعیین توزیع اندازه ذرات اولیه خاک (PSD) نشان می‌دهد که از هر ذره‌ی اولیه با اندازه‌ی مشخص چه مقدار در خاک وجود دارد. با توجه به اینکه تعدادی از خصوصیات یا رفتارهای خاک نظیر، ظرفیت نگهداری رطوبت، ظرفیت تبادل کاتیونی، مواد آلی و رفتار خاک در مقابل شخم و دیگر عملیات خاک‌ورزی مستقیماً به PSD بستگی دارد، این ویژگی دارای اهمیت زیادی است (Cosby et al., 1984). توزیع اندازه ذرات خاک در پیش‌بینی روابط آب و خاک (Jensen et al., 2015; Poelplau et al., 2015)، انتقال املاح (Karup et al., 2016) و جرم مخصوص ظاهری و حقیقی (Schjønning et al., 2017)، کاربرد دارد و نیز به‌طور گسترده‌ای در برآورد خصوصیات هیدرولیکی

اندازه‌گیری بخش شن خاک همبستگی زیادی با روش‌های Day, (1965) و Bouyoucos, (1962) دارد. حضور ذرات بزرگتر از ۸۰ میکرون، سبب تلاطم سوسپانسیون و ایجاد حرکات رو به پایین، رو به بالا و همچنین حرکات چرخشی در محلول خاک می‌شود و در نهایت فرض سقوط آزادانه ذرات خاک در قانون استوکس نقض می‌شود (Gee and Or, 2002). روش هیدرومتر که معمولاً با انجام قرائت کامل توام است، ممکن است در همه شرایط امکان‌پذیر و حتی ضروری نباشد. به همین دلیل در منابع و دستورالعمل‌های مختلف تجزیه خاک، زمان‌های قرائت با روش هیدرومتر به روش‌های مختلفی، از جمله: الف) دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (Bouyoucos, 1962)، ب) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (USDI, 1982)^۱، ج) روش چهار قرائت (Day, 1965) (۳۰ ثانیه و ۶۰ ثانیه برای تعیین بخش شن و ۱/۵ ساعت و ۲۴ ساعت برای تعیین بخش رس) و د) روش چهار قرائت اصلاح شده (Gee, 1979) and Bauder, پیشنهاد شده است. با تعیین چند قرائت محدود و قابل اطمینان، می‌توان با صرف نظر نمودن از انجام قرائت کامل با چهار قرائت، صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و هزینه‌های تجزیه خاک به عمل آورد. در کشور ما روش‌ها و زمان‌های مختلف و متنوعی برای تعیین بافت خاکهای کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد که این زمان‌ها و روش‌ها مورد ارزیابی، مقایسه و صحت‌سنجی قرار نگرفته‌اند. بنابراین، هدف این پژوهش تعیین زمان‌های قرائت قابل اطمینان به روش چهار قرائت با روش هیدرومتر و مقایسه برخی روش‌های رایج تعیین بافت خاک‌های غالب کشور ایران است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش ۱۱۲ نمونه خاک از ۱۶ استان کشور (خراسان رضوی، خراسان شمالی، سیستان و بلوچستان، فارس، خوزستان، لرستان، اراک، قم، تهران، البرز، قزوین، زنجان، تبریز، گلستان، گیلان و اردبیل)، از افق‌های سطحی و تحتانی و خاک‌های زراعی و غیرزراعی با طیف وسیعی از تغییرات مواد سیمانی (کربنات کلسیم، ماده آلی و اکسیدهای آهن) و همچنین رس، سیلت و شن، همراه با ثبت مختصات جغرافیایی جمع‌آوری شد. شکل (۱) پراکنش نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. برخی از آماره‌های ویژگی‌های خاک‌ها توسط Yavari et al. (2020) ارائه شده است. نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انجام شد، تا با توجه به ویژگی‌های مناطق نمونه‌برداری، از جمله اقلیم، پوشش گیاهی و نوع کاربری، طیف گسترده‌ای از درصد نسبی ذرات اولیه

خاکدانه و توزیع اندازه ذرات ایفا می‌کند (Lebron et al., 2002). سیستم‌های مختلفی برای طبقه‌بندی اندازه ذرات تعریف شده است. ذرات خاک کوچکتر از ۲۰۰۰ میکرون عموماً در سه گروه اصلی شن، سیلت و رس تقسیم می‌شوند. از جمله سیستم‌های طبقه‌بندی: الف) سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) (ب) کمیته مطالعات خاکشناسی کانادا (CSSC) (ج) انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISSS) و د) انجمن مواد و آزمایش آمریکا (ASTM) را می‌توان نام برد (Gee and Or, 2002). روش‌های اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات اولیه شامل روش الک کردن، هیدرومتر، پی‌پت، اشعه ایکس و تکنیک پراکنش اشعه لیزر است (Gee and Or, 2002). هرچند مزایای مختلفی برای روش پراکنش اشعه لیزر شامل تجزیه و تحلیل سریع، تکرارپذیری زیاد و اندازه‌گیری مداوم برای طیف وسیعی از فرکشن‌ها ذکر می‌شود، اما، Yang et al. (2019) نشان دادند، روش پراکنش اشعه لیزر نسبت به روش پی‌پت، در بخش رس ۱۸/۹ درصد کم‌اندازه‌گیری و در بخش سیلت ۳/۲۵ درصد بیش‌اندازه‌گیری دارد. ذرات، با اندازه ۵۰ تا ۲۰۰۰ میکرون عموماً توسط الک جداسازی می‌شوند (Gee and Or, 2002) و برای جداسازی ذرات ریزتر می‌توان بر اساس قانون استوکس، از پی‌پت یا روش هیدرومتر استفاده کرد (Bouyoucos, 1962). روش پی‌پت یک راهکار نمونه‌برداری مستقیم است و با برداشت نمونه‌های کوچک به‌وسیله پی‌پت از عمق معین سوسپانسیون، در زمان معین انجام می‌شود (Gee and Or, 2002). روش پی‌پت در مقایسه با روش‌های دیگر اندازه‌گیری PSD غالباً به‌عنوان روش مرجع معرفی می‌شود (Gee and Or, 2002). اگر دقت ابزار و اندازه‌گیری مناسب باشد، روش هیدرومتر و پی‌پت در تعیین توزیع اندازه ذرات خاک حدود ۹۸٪ همخوانی دارند (Liu et al., 1966). Kaddah, (1975) نشان داد که اختلاف روش پی‌پت و هیدرومتر در تعیین درصد نسبی بخش رس، در حدود ۳٪ است، در حالی که Walter et al., (1978) در بررسی خاک‌های یخچالی تطابق ۹۵ درصدی را گزارش کردند. اختلاف روش پی‌پت و هیدرومتر به نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها در دو روش نسبت داده می‌شود (Coates And Hulse, 1985). از این‌رو، مقایسه روش‌های پی‌پت و هیدرومتر نیازمند آماده‌سازی یکسان است (Gee and Or, 2002). Gee and Or, (2002) منبع عمده خطا را در نحوه قرائت هیدرومتر می‌دانند و معتقدند، خطایی در حدود ± 1 گرم بر لیتر در قرائت هیدرومتر، منجر به ۲ درصد خطا در اندازه‌گیری رس می‌شود. Gee and Bauder, (1979) نشان دادند روش الک در

برای انجام سایر آزمایش‌ها استفاده شد. مواد سیمانی خاک‌ها مطابق روش Gee and Bauder, (1979) حذف شد.

خاک (شن، سیلت و رس)، حاصل شود و نماینده تنوع خاک‌های کشور باشند. پس از جدا کردن ذرات بزرگتر از ۲ میلی‌متر، درصد سنگریزه هر نمونه خاک تعیین و ذرات کوچکتر از ۲ میلی‌متر نیز



شکل ۱- استان‌های مورد نمونه‌برداری برای تعیین توزیع اندازه ذرات اولیه خاک

سیمان‌کننده، ۹۱ نمونه برای حذف ماده آلی، ۶۱ نمونه برای حذف اکسید آهن و ۶۱ نمونه برای حذف توام اکسید آهن و ماده آلی انتخاب شد. از ۱۱۲ نمونه صرفاً ۶ نمونه کمتر از ۱۰ درصد آهک داشت و سایر نمونه‌ها بیش از ۱۰ درصد آهک داشتند و توزیع اندازه ذرات اولیه این ۶ نمونه نیز پس از حذف آهک اندازه‌گیری شد. با توجه به معیارهای انتخاب، در برخی از نمونه‌ها همه تیمارهای حذف مواد آلی اعمال گردید و در برخی از نمونه‌ها صرفاً یک یا دو تیمار اعمال شد. مجموع تعداد آزمایش اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات برابر با ۳۱۰ بود. پس از جدا کردن بخش شن نمونه‌ها با استفاده از الک ۲۷۰ مش، برای تعیین PSD از روش هیدرومتر با قرائت کامل (قرائت‌های ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۱۲۰۰، ۱۸۰۰، ۳۶۰۰، ۷۲۰۰، ۲۱۶۰۰، ۲۸۸۰۰، ۸۶۴۰۰ و ۱۷۲۸۰۰ ثانیه) به-عنوان روش مرجع استفاده شد. هم‌زمان با قرائت هیدرومتر، دمای تعلیق و نمونه شاهد نیز در فواصل زمانی منظم ثبت شد. بخش‌های مختلف شن نیز با استفاده از سری الک با ترتیب، ۱۰۰۰، ۵۰۰، ۲۵۰، ۱۰۶، ۵۳ میکرون جدا شد. محاسبات اندازه ذرات در روش قرائت کامل با استفاده از اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌های هندسی و فیزیکی هیدرومتر و سپس واسنجی رابطه "قرائت هیدرومتر-عمق نفوذ مؤثر" انجام گرفت (رابطه ۸). به این ترتیب که سرعت سقوط با استفاده از عمق مؤثر و زمان قرائت محاسبه و همراه با داده‌های گرانیوی تصحیح شده با دما و غلظت

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌ها شامل واکنش و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع (Thomas, 1996) و کربن آلی با روش خنثی‌سازی با فرو آمونیوم سولفات (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شد و با استفاده از ضریب وان‌بلمن (۱/۷۲۴) به درصد ماده آلی تبدیل شد. اکسید آهن با استفاده از روش انحلال با دی‌تیونات-سیترات سدیم (Holmgren, 1967)، کربنات کلسیم معادل با روش خنثی‌سازی و تیتراسیون (Page et al., 1982) و جرم مخصوص حقیقی خاک با روش پیکنومتر (Blake and Hartge, 1986) اندازه‌گیری شد. واکنش‌گرهای هیدروژن پر اکسید، دی‌تیونات-سیترات سدیم به-ترتیب برای حذف ماده آلی و اکسید آهن انتخاب شدند (Gee and Or, 2002). برای انجام روش هیدرومتر، با توجه به سه معیار اصلی انتخاب نمونه در این پژوهش: الف) درصد ماده آلی، ب) اکسید آهن، ج) آهک، که از جمله مواد سیمان‌کننده ذرات اولیه خاک هستند، نمونه‌ها مورد تفکیک قرار گرفتند. در این فرآیند میزان سنگریزه، کاربری، اقلیم، پوشش گیاهی و افق‌های خاک نیز برای احراز تنوع، مورد توجه قرار گرفت. و خاک‌هایی که از نظر معیارهای اصلی انتخاب و میزان سنگریزه، کاربری، اقلیم، پوشش گیاهی و افق‌های خاک مشابهت زیادی داشتند از نمونه‌های مورد آزمایش، کنار گذاشته شدند. در نهایت از ۱۱۲ نمونه جمع‌آوری شده، تیمارهای آزمایش برای اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات، شامل: ۹۱ نمونه برای شرایط بدون حذف مواد

پارامترهای فوق برای هیدرومتر ASTM 152H و سیلندر ته‌نشینی استاندارد پژوهش برابر: $L_2 = 13.8 \text{ cm}$, $L_1 = 10.4 \text{ cm}$ کل بخش درجه‌بندی شده هیدرومتر برابر $8/2$ سانتیمتر و اندازه هر درجه هیدرومتر برابر 0.164 سانتیمتر، $V_B \sim 67.0 \text{ cm}^3$ و A 27.8 cm^2 است. با جای‌گذاری مقادیر در رابطه ۷ و حل آن نهایتاً رابطه ۸ به‌دست می‌آید. شکل (۲) نمایی از هیدرومتر و مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد.

$$h = -0.164R + 17.3 \quad (\text{رابطه ۸})$$

R: قرائت تصحیح نشده هیدرومتر می‌باشد.



شکل ۲- نمایی از هیدرومتر شناور در آب درون استوانه بافت و برخی ویژگی‌های مهم در قرائت هیدرومتر

درصد سه ذره شن، سیلت و رس از روش میان‌یابی نیمه‌لگاریتمی (لگاریتم اندازه در مقابل فراوانی ذرات) و با استفاده از روش طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISS) به‌دست آمد. با توجه به اینکه تعیین زمان دقیق سقوط یک ذره با قطر مشخص در حین آزمایش و قبل از آن امکان‌پذیر نیست، برای تعیین مقدار یک ذره مشخص از زمان‌های اندازه‌گیری شده قبل (t_{up}) و بعد (t_{down}) از سقوط ذره استفاده گردید. از این‌رو با به-کارگیری رابطه (۴)، قطر ذرات سقوط‌کرده در زمان $(d_{up}) \times t_{up}$ و زمان $(d_{down}) \times t_{down}$ محاسبه شدند. رابطه (۹) برای محاسبه درصد دقیق ذرات رس و شن و بر اساس میان‌یابی نیمه‌لگاریتمی استفاده گردید.

$$P_x = P_{up} - \left(\frac{P_{up} - P_{down}}{\ln\left(\frac{d_{up}}{d_{down}}\right)} \right) \left(\ln\left(\frac{d_{up}}{d_x}\right) \right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

و جرم مخصوص حقیقی خاک در رابطه استوکس قرار داده شده و اندازه ذره محاسبه شد. بدین منظور، برای همه قرائت‌ها غلظت خاک در تعلیق، درصد نسبی ذرات کوچکتر از قطر d ، سرعت ته‌نشینی و قطر ذرات سقوط یافته در زمان t ، به ترتیب با استفاده از روابط ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌دست آمد. گرانیوی و چگالی محلول به‌ترتیب از روابط ۵ و ۶ محاسبه گردید.

$$C = R - R_L \quad (\text{رابطه ۱})$$

C: غلظت ناشی از حضور ذرات (g l^{-1}), R: قرائت تعلیق

R_L و (g l^{-1}): قرائت شاهد (g l^{-1}) است.

$$P = \left(\frac{C}{C_0} \right) \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

P: درصد نسبی ذرات کوچکتر از قطر مورد نظر (%) و

C_0 : جرم خاک معادل مورد استفاده در ۱ لیتر تعلیق (g l^{-1}) است.

سرعت سقوط ذرات (cm/sec) با استفاده از عمق مؤثر هیدرومتر h (cm) و زمان t (sec)، محاسبه گردید:

$$V = \frac{h}{t} \quad (\text{رابطه ۳})$$

قطر ذرات از رابطه ۴ به‌دست آمد:

$$d = \sqrt{\frac{18h\eta}{tg(\rho_s - \rho_f)}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

d: قطر ذرات سقوط یافته (cm), h: عمق مؤثر

هیدرومتر (cm), t: زمان (sec), g: شتاب گرانش (cm sec^{-2}), ρ_s :

جرم مخصوص حقیقی (g cm^{-3}) و ρ_f : جرم مخصوص مایع (g cm^{-3})

و η : گرانیوی ($\text{g cm}^{-1}\text{sec}^{-1}$) است که با استفاده از رابطه (۵)

محاسبه می‌شود:

$$\eta = \eta_0(1 + 4.25Cs) \quad (\text{رابطه ۵})$$

η : گرانیوی محلول در دمای T ($\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) و η_0 :

گرانیوی آب در دمای T ($\text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) است. رابطه ۶ برای

محاسبه چگالی محلول در دمای T (g cm^{-3}), ρ_f استفاده گردید:

$$\rho_f = \rho_0(1 + 0.630Cs) \quad (\text{رابطه ۶})$$

ρ_0 : چگالی آب در دمای T (g cm^{-3}), Cs: غلظت هگزا

متاسفات سدیم (g ml^{-1}).

عمق مؤثر هیدرومتر استاندارد (h) تابعی از قرائت

هیدرومتر (R) و همچنین ابعاد هیدرومتر است (Kaddah, 1974).

عمق مؤثر هیدرومتر استاندارد از رابطه ۷ بدست آمد (Gee and

Or, 2002):

$$h = L_1 + 1/2[L_2 \frac{V_B}{A}] \quad (\text{رابطه ۷})$$

L_1 : فاصله طول ساقه هیدرومتر از بالای حباب تا نشان قرائت

هیدرومتر (cm), L_2 : طول سراسر حباب هیدرومتر (cm), V_B :

حجم حباب هیدرومتر (cm^3), A: سطح مقطع سیلندر ته‌نشینی

(cm^2) است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

جدول (۱) دامنه تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. میانگین قابلیت هدایت الکتریکی و واکنش خاک در عصاره اشباع برای نمونه خاک‌ها به ترتیب (dS/m) ۴/۱۸ و ۷/۹۳ بود. نمونه خاک‌ها دارای طیف وسیعی از مواد سیمان‌کننده (ماده آلی، اکسید آهن و کربنات کلسیم معادل) و نیز شوری خاک بودند، که مؤید تنوع خاک‌های انتخاب شده است. در نمونه‌های جمع‌آوری شده چهار گروه، خاک‌های کمی آهکی (۰-۲٪)، آهکی متوسط (۱۰-۲۰٪)، شدیداً آهکی (۲۵-۱۰۰٪) و بی‌نهایت آهکی (>۲۵٪) وجود داشت (WRB, 2014). نمونه‌هایی که از شمال کشور تهیه شدند دارای ماده آلی نسبتاً زیادی بودند حداکثر میزان سنگریزه ۴۷/۷ درصد از استان زنجان تهیه شده بود. این نمونه از خاک زراعی با کشت قبلی گندم و عمق ۵۰-۰ سانتی‌متری تهیه شده بود. ۵ نمونه فاقد سنگریزه از استان‌های خوزستان (با کاربری جنگل و عموماً درختان اکالیپتوس و کهور پاکستانی)، گلستان، تهران، آذربایجان شرقی و گیلان (با کاربری زراعی و کشت برنج) جمع‌آوری شدند. حداکثر درصد اکسید آهن، ماده آلی و آهک به ترتیب از استان‌های قزوین با کاربری مرتع و پوشش علفی، گیلان با کاربری زراعی و کشت چای و لرستان با کاربری جنگل بود.

P: درصد ذرات، d: قطر ذرات (mm) و زیروندهای x، up و down به ترتیب نشان‌دهنده ذره مورد نظر (شن یا رس) ذره بزرگ‌تر و ذره کوچک‌تر از ذره مورد نظر است. مرز قطر ذرات برای تعیین بخش رس در دو سیستم طبقه‌بندی (USDA) و (ISSS) یکسان و برابر ۰/۰۰۲ میلی‌متر است. از قرائت ۲ ساعت برای تعیین بخش رس (۰/۰۰۲ میلی‌متر) در روش بایکاس استفاده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از روش قرائت کامل (ISSS) و همچنین حداقل و حداکثر زمان‌های لازم برای تعیین سه ذره اصلی خاک (رس، سیلت و شن)، دو روش چهار قرائته با استفاده از طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی علوم خاک (رس کوچکتر از ۰/۰۰۲ mm، سیلت: ۰/۰۰۲ - ۰/۰۰۲ mm، شن: ۰/۰۰۲ - ۲ mm) شامل: الف) ۲ و ۱۰ دقیقه (مرز شن و سیلت) و ۶ و ۸ ساعت (مرز سیلت و رس) و ب) ۲ و ۱۰ دقیقه (مرز شن و سیلت) و ۶ و ۲۴ ساعت (مرز سیلت و رس) به‌عنوان روش پیشنهادی، ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفت و مقدار تفاوت روش‌های پیشنهادی با روش مرجع (قرائت کامل) به‌دست آمد. میانگین خطا^۴، میانگین مطلق خطا^۵، میانگین نسبی خطا^۶، خطای جذر میانگین مربعات^۴، درصد میانگین مطلق خطا^۵، انحراف معیار^۶ و سایر آماره‌های توصیفی برای روش‌های مختلف تعیین توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به‌دست آمد. نتایج با روش قرائت کامل مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون آماری دانکن، مقایسه میانگین و ترسیم نمودار، با استفاده از نرم‌افزارهای (Excel (XLSTAT, 2016) و (3.6.3, R 2016) انجام شد.

جدول ۱- دامنه تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۹۱ نمونه

ویژگی							
pH _{SE}	EC _{SE} (dS/m)	PD(g/cm ³)	OC(g/Kg)	OM(100Kg/Kg)	FeO(100Kg/Kg)	RF(100Kg/Kg)	
۷/۹۳	۴/۱۸	۲/۶۵	۲۴/۳۹	۱/۹۸	۰/۸۳	۱۰/۴۶	میانگین
۸/۶۳	۷۶/۴۱	۲/۷۶	۴۸/۴	۱۱/۳۴	۳/۷۰	۴۷/۰۷	حداکثر
۵/۱۹	۰/۲۵	۲/۴۸	۱/۹۶	۰	۰/۱۵	۰	حداقل
۰/۴۷	۱۲/۱۹	۰/۰۷	۱۲/۴۰	۱/۷۹	۰/۵۶	۱۲/۱۰	انحراف معیار

RF: سنگریزه، FeO: اکسید آهن، OM: ماده آلی، OC: کربنات کلسیم، PD: جرم مخصوص حقیقی، EC_{SE}: قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع، pH_{SE}: واکنش خاک عصاره اشباع

خاک‌های مورد بررسی و وجود کلاس‌های بافتی سبک، متوسط و سنگین، حاکی از تنوع زیاد نمونه‌های جمع‌آوری شده دارد (جدول ۲). میانگین درصد ذرات بزرگتر از ۸۰ میکرون در خاک‌های مورد مطالعه (۱۰۰ Kg/Kg) ۲۷/۱ درصد و انحراف معیار

توزیع اندازه ذرات اولیه نمونه‌های مورد بررسی

برای تعیین زمان مناسب قرائت با روش هیدرومتری، جمع‌آوری نمونه خاک‌هایی با تنوع زیاد سه ذره اصلی (شن، سیلت و رس) از مهم‌ترین مراحل آزمایش است. نتایج توزیع اندازه ذرات اولیه

۴ The Rote Mean Square Error

۵ Mean Absolute Percentage Error

۶ Standard Deviation

۱ Mean Error

۲ Mean Absolute Error

۳ Mean Relative Error

در سه ذره اصلی بیش از ۹/۵ و در بخش شن بیش از ۱۸ بود.

جدول ۲- برخی آماره‌های توزیع اندازه ذرات ۹۱ نمونه خاک بر اساس آزمایش قرائت کامل.

SE	SD	حداکثر (۱۰۰ Kg/Kg)	حداقل (۱۰۰ Kg/Kg)	میانگین (۱۰۰ Kg/Kg)	ذره
۰/۶۴	۱۱/۲۴	۵۸/۲۴	۶/۶۰	۲۸/۲۵	رس (کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر)
۰/۵۴	۹/۵۴	۵۶/۵۷	۳/۴۳	۲۷/۲۷	سیلت (۰/۰۲ تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر)
۱/۰۳	۱۸/۰۹	۸۹/۶۷	۵/۴۰	۴۴/۴۸	شن (۲ تا ۰/۰۲ میلی‌متر)

SE: خطای استاندارد، SD: انحراف معیار

میکرونی را به‌عنوان تابعی از درصد ذرات شن و رس و سیلت در کلیه خاک‌ها نشان می‌دهد. در خاک‌هایی که حاوی شن زیاد یا رس کم هستند، زمان قرائت برای اندازه‌گیری ذرات ۲ و ۲۰ میکرومتری آن‌ها طولانی‌تر است (شکل ۴-الف و ب). و به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت زمان قرائت‌ها در خاک‌های ریزبافت کمتر از زمان قرائت‌های در خاک‌های درشت‌بافت است. و یا به-عبارت دیگر زمان دقیق قرائت‌های هیدرومتر کاملاً به بافت خاک وابسته است و عدد ثابتی برای همه خاک‌ها نمی‌باشد. رابطه بین دو زمان قرائت لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲ و ۲۰ میکرومتری در کلیه خاک‌ها و حالت‌های مختلف حذف مواد سیمانی و یا بدون آن (n=310) در شکل (۴-ج) نشان داده شده است. ضریب تبیین، مبین همبستگی قوی بین زمان‌های لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲ و ۲۰ میکرومتری است (شکل ۴-ج). این همبستگی نشان می‌دهد با استفاده از روشی تجربی و با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری زمان لازم برای سقوط ذرات ۲۰ میکرومتری، تا حدودی می‌توان زمان لازم برای سقوط ذرات ۲ میکرومتری را در خاک‌های مختلف برآورد نمود.

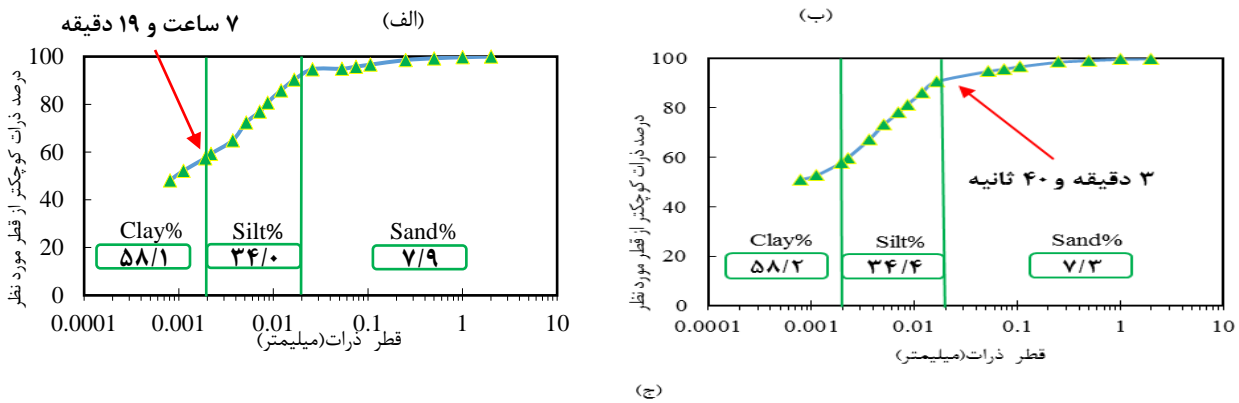
روش پیشنهادی چهار قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۸ ساعت

شکل (۵-الف و ب) مقادیر بخش رس، اندازه‌گیری شده با روش پیشنهادی چهار قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۸ ساعت (B) و مقایسه آن با روش قرائت کامل (A) را نشان می‌دهد. شکل (۵-الف)، بخش رس، روش پیشنهادی (B) را در مقابل روش قرائت کامل (A) نشان می‌دهد. کمترین پراکندگی داده‌ها از خط یک به یک (با رنگ مشکی) و خط برازش داده شده (با رنگ قرمز)، متعلق به بخش رس می‌باشد (شکل ۵-الف). مقدار انحراف این روش در اندازه‌گیری رس، در ۷۱/۶ درصد موارد، $\pm 0/5$ درصد و در ۹۰/۳ درصد موارد، ± 1 درصد است و به صورت میانگین در ۳۰/۳ درصد موارد، ۰/۴ درصد بیش‌اندازه‌گیری و در ۶۹/۷ درصد موارد، ۰/۵ درصد کم‌اندازه‌گیری دارد (شکل ۵-ب). شکل (۶-الف)، کلاس بافتی تعیین شده منتج از روش چهار قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و

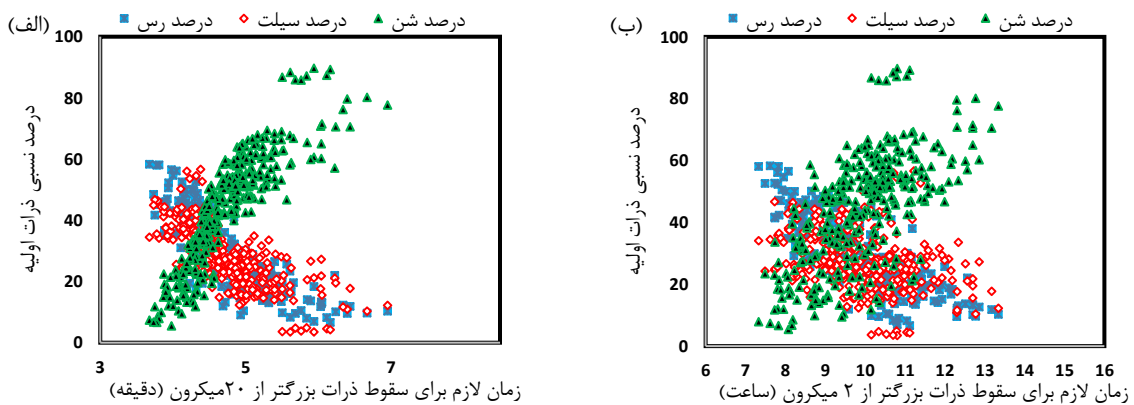
در دمای ثابت، زمان سقوط ذرات به اندازه آن‌ها و عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر (میانگین فاصله طی شده توسط ذرات) بستگی دارد. با تغییرات دمایی تعلیق، گرانروی تعلیق تغییر و در نتیجه سرعت سقوط ذرات نیز تغییر می‌یابد. از طرف دیگر مقدار عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر خود به مقادیر ذرات موجود در تعلیق وابسته است. بنابراین به‌طور کلی زمان لازم برای سقوط یک ذره از عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر، علاوه بر قطر ذره به فراوانی آن نیز بستگی دارد. به‌عبارت دیگر این زمان، در خاک‌های مختلف متفاوت است. شکل (۳-الف و ب)، توزیع اندازه ذرات دو خاکی که در آن ذرات رس به‌ترتیب در کم‌ترین و بیش‌ترین زمان از عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر عبور کرده‌اند را نشان می‌دهد. حداقل زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات رس در خاک‌های مورد بررسی ۷ ساعت و ۱۹ دقیقه در خاک ریزبافت (با حدود ۵۸٪ رس) (شکل ۳-الف): خاک عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری مزارع استان گیلان با کشت برنج، بدون درصد سنگریزه و ۲/۹ درصد کربنات کلسیم (معادل) و حداکثر آن، ۱۳ ساعت و ۲۰ دقیقه، متعلق به خاک نسبتاً درشت‌بافت (حدود ۷۸٪ شن و ۱۰٪ رس) (شکل ۳-ج): خاک عمق ۰ تا ۱۵ سانتی‌متری مزارع استان قزوین در شرایط آیش با کشت پیشین گندم، ۱۹/۶ درصد سنگریزه و ۲۱/۵ درصد کربنات کلسیم (معادل) بود. به‌عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت زمان سقوط ذرات سیلت از عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر در تمامی خاک‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۶ ساعت تا حداکثر ۲۴ ساعت قرار دارد. بنابراین در ادامه دو بازه یکی ۶ و ۸ ساعت و دیگری ۶ و ۲۴ ساعت برای برآورد مقدار رس مورد بررسی قرار می‌گیرند. حداقل زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲۰ میکرومتری ۳ دقیقه و ۴۰ ثانیه در خاک ریزبافت (حدود ۷٪ شن و ۳۴٪ سیلت) (شکل ۳-ب) و حداکثر آن، ۶ دقیقه و ۵۷ ثانیه، متعلق به همان خاک نسبتاً درشت‌بافت (شکل ۳-ج) بود. بنابراین ذرات شن در تمامی خاک‌های مورد بررسی در بازه زمانی ۲ تا ۱۰ دقیقه از عمق مؤثر نفوذ هیدرومتر عبور می‌کنند. شکل (۴-الف و ب)، زمان لازم برای سقوط ذرات ۲۰ و ۲

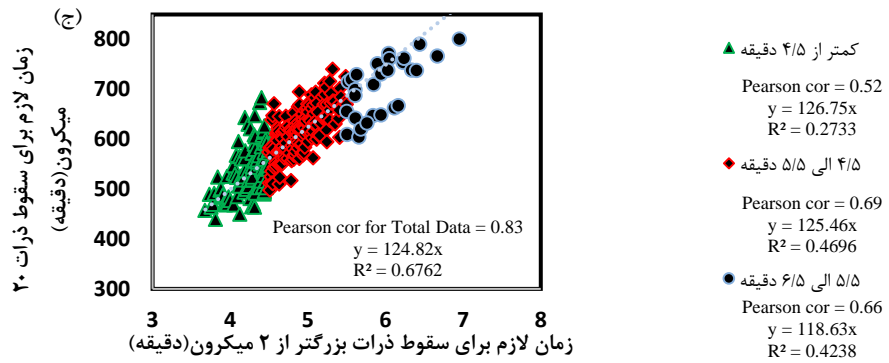
و ۶ و ۸ ساعت را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، بافت تعیین شده با استفاده از روش چهار قرائتی مذکور در ۹۷/۱ درصد مانند بافت تعیین شده با استفاده از روش قرائت کامل (روش مرجع هیدرومتری) است (شکل ۶-ب و ج). مقدار RMSE در بخش رس با ۰/۸۶ و در بخش شن ۰/۹۳ در بخش سیلت ۱/۱۹ است.

۸ ساعت و مقایسه آن با روش قرائت کامل را برای کلیه خاک‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. بجز دو کلاس بافتی لوم‌شنی و لوم‌رسی که تا حدود کمی انحراف بین دو روش مشاهده می‌گردد، در سایر کلاس‌های بافتی تطابق مناسبی بین دو روش وجود دارد. شکل (۶-ب و ج) به ترتیب، کلاس بافتی ۳۱۰ تیمار در مثلث بافت خاک با روش قرائت کامل و روش چهار قرائته ۲ و ۱۰ دقیقه

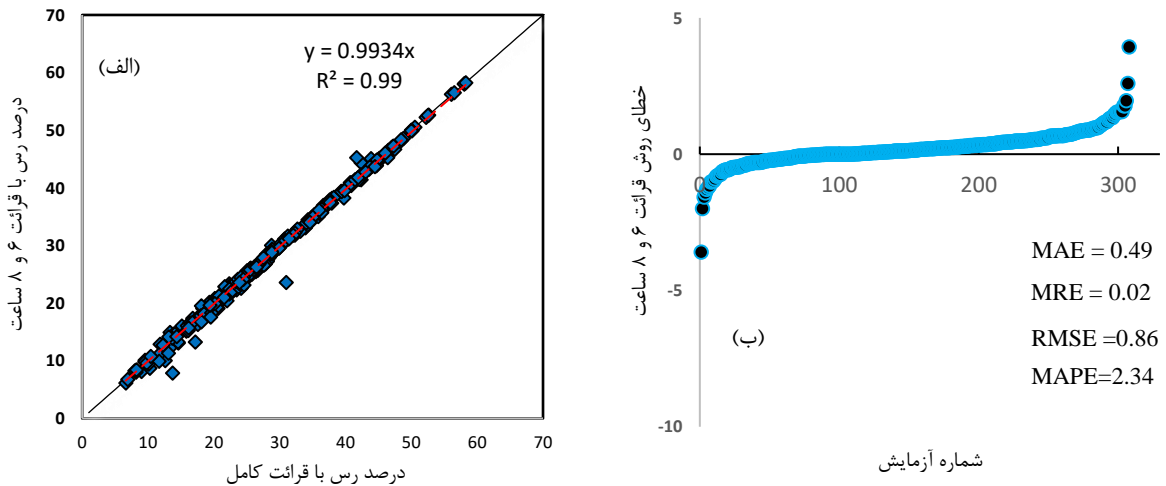


شکل ۳- توزیع اندازه ذرات نمونه خاک‌ها با حداقل و حداکثر زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲ و ۲۰ میکرومتری در روش هیدرومتری: (الف) کلاس بافت خاک رسی (حداقل زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲ میکرومتری)، (ب) کلاس بافت خاک رسی (حداقل زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲۰ میکرومتری) و (ج) کلاس بافت خاک لوم شنی (حداقل زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲ میکرومتری و حداکثر زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲۰ میکرومتری). زمان لازم برای رسیدن به قطر ۲ و ۲۰ میکرومتری روی شکل، ذکر شده است.

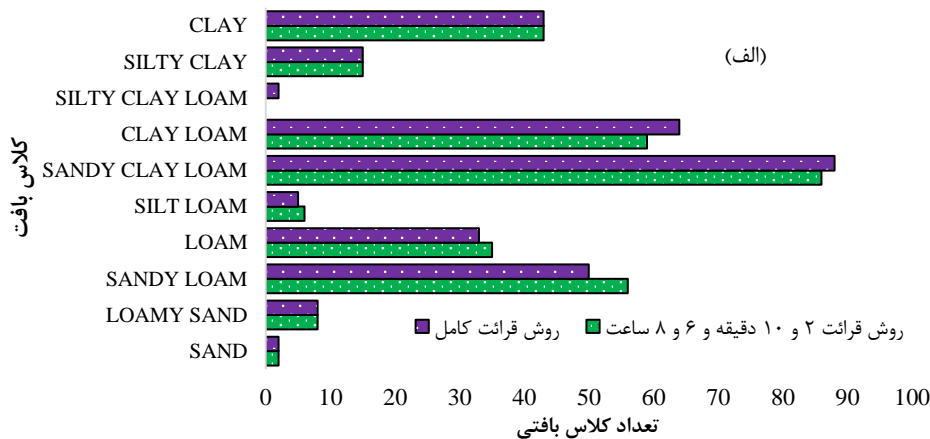


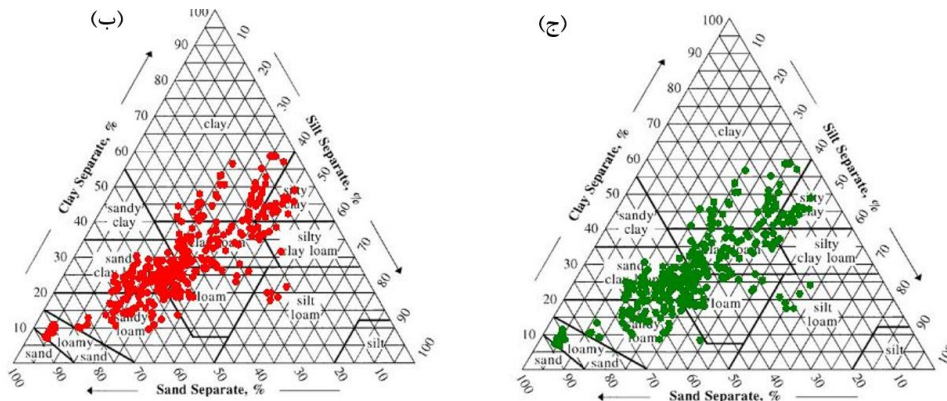


شکل ۴- زمان لازم برای سقوط ذرات شن و سیلت خاک در سیستم بین‌المللی طبقه‌بندی ذرات: (الف) زمان لازم برای سقوط همه ذرات بزرگتر از ۲۰ میکرومتر در برابر درصد نسبی ذرات رس، سیلت و شن نمونه، (ب) زمان لازم برای سقوط همه ذرات بزرگتر از ۲ میکرومتر در برابر درصد نسبی ذرات رس، سیلت و شن نمونه (ج) رابطه بین زمان لازم برای سقوط ذرات ۲ میکرومتر و زمان لازم برای سقوط ذرات ۲۰ میکرومتر در ۳۱۰ تعلیق مورد بررسی.



شکل ۵- مقایسه بخش رس (الف)، اندازه‌گیری شده روش چهار قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۸ ساعت (ب) با روش قرائت کامل (A) و مقدار خطای اندازه‌گیری (تفاضل مقدار رس (ب)، در روش پیشنهادی و روش قرائت کامل). (ترتیب شماره)، آزمایش‌های PSD بر اساس مقدار خطا مرتب شده است. MAE: میانگین مطلق خطا، MRE: میانگین نسبی خطا، RMSE: خطای جذر میانگین مربعات و MAPE: درصد میانگین مطلق خطا است.

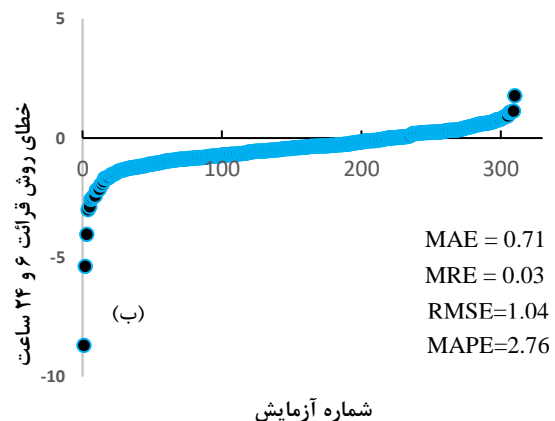
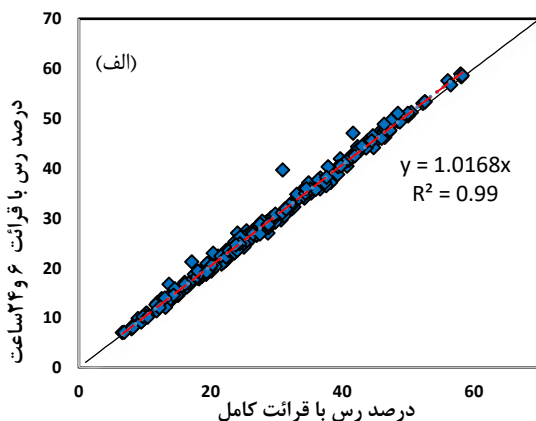




شکل ۶- کلاس بافتی تعیین شده منتج از روش چهار قرائته ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۸ ساعت و مقایسه آن با روش قرائت کامل بر مبنای طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISSS)

و ۶ و ۲۴ ساعت و مقایسه آن با روش قرائت کامل را برای کلیه خاک‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. به جز سه کلاس بافتی لوم، لومرسی‌شنی و رسی که تا حدود کمی انحراف بین دو روش مشاهده می‌گردد، در سایر کلاسهای بافتی تطابق مناسبی بین دو روش وجود دارد. شکل (۸- ب و ج) به ترتیب، کلاس بافتی ۳۱۰ تیمار در مثلث بافت خاک با روش قرائت کامل و روش چهار قرائته ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، بافت تعیین شده با استفاده از روش چهار قرائتی مذکور در ۹۴/۲ درصد، مانند بافت تعیین شده با استفاده از روش قرائت کامل (روش مرجع هیدرومتری)، است (شکل ۸- ب و ج). مقدار RMSE روش قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۲۴ ساعت (C)، در بخش رس بزرگتر از روش قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۸ ساعت (B) بود.

روش پیشنهادی چهار قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۲۴ ساعت شکل (۷- الف و ب)، مقادیر بخش رس اندازه‌گیری شده با روش پیشنهادی چهار قرائته ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۲۴ ساعت (C) و مقایسه آن با روش قرائت کامل (A) را نشان می‌دهد. شکل (۷- الف) بخش رس روش پیشنهادی (C) را در مقابل روش قرائت کامل (A) نشان می‌دهد. کمترین پراکندگی داده‌ها از خط یک به یک (با رنگ مشکی) و خط برازش داده شده (با رنگ قرمز)، متعلق به بخش رس می‌باشد (شکل ۷- الف). مقدار انحراف این روش در اندازه‌گیری رس، در ۵۰/۶ درصد موارد، $\pm 0/5$ درصد و در ۸۱/۳ درصد موارد، ± 1 درصد است و به‌صورت میانگین در ۷۰/۳ درصد موارد، ۰/۸ درصد بیش‌اندازه‌گیری و در ۲۹/۷ درصد موارد، ۰/۴ درصد کم‌اندازه‌گیری وجود دارد (شکل ۷- ب). شکل (۸- الف)، کلاس بافتی تعیین شده منتج از روش چهار قرائته ۲ و ۱۰ دقیقه



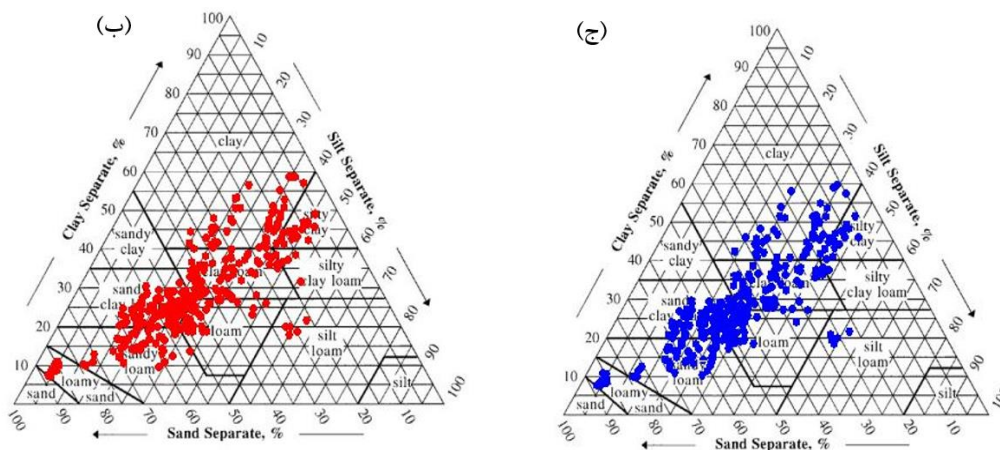
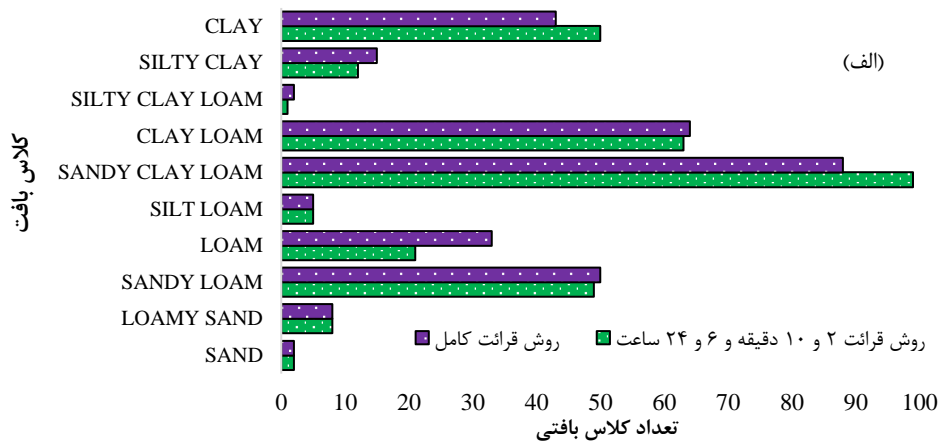
شکل ۷- مقایسه بخش رس (الف) اندازه‌گیری شده روش چهار قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۲۴ ساعت (C) با روش قرائت کامل (A) و مقدار خطای اندازه‌گیری (تفاضل مقدار رس (ب) در روش پیشنهادی و روش قرائت کامل). (ترتیب شماره) آزمایش‌های PSD بر اساس مقدار خطا مرتب شده است. MAE: میانگین مطلق خطا، MRE: میانگین نسبی خطا، RMSE: خطای جذر میانگین مربعات و MAPE: درصد میانگین مطلق خطا است.

تعیین بخش رس استفاده می‌شود. شکل (۹)، مقایسه مقادیر رس اندازه‌گیری شده با دو روش قرائت ۲ ساعت بایکاس (D) و قرائت

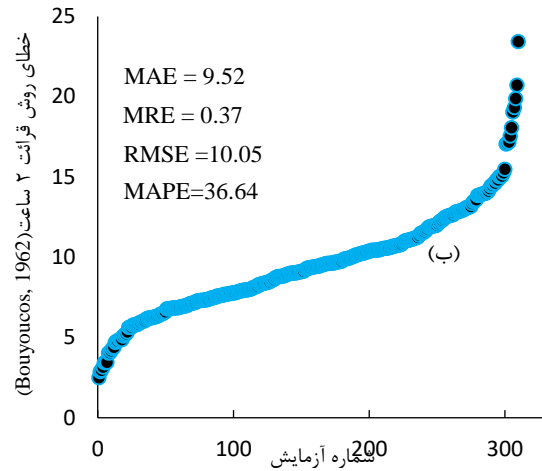
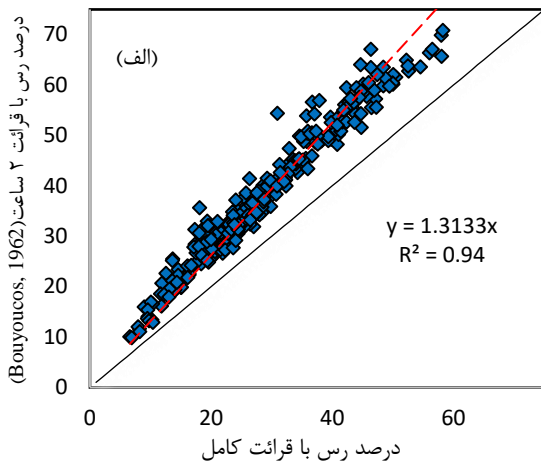
تعیین بخش رس با روش قرائت ۲ ساعت در روش بایکاس (Bouyoucos, 1962)، از قرائت ۲ ساعت برای

قابل ملاحظه‌ای از بخش سیلت به حالت معلق در تعلیق وجود داشته باشد. اگر قرائت ۲ ساعت به عنوان مرز زمانی، برای تعیین بخش سیلت و رس در نظر گرفته شود، بخشی از سیلت که معلق در تعلیق است جزء بخش رس خاک تلقی شده و موجب بیش‌اندازه‌گیری بخش رس و در نهایت کم‌اندازه‌گیری بخش سیلت می‌شود. RMSE روش بایکاس ۱۰/۰۵ بوده و مبین خطای زیاد اندازه‌گیری با این روش است. در بین روش‌های مختلف اندازه‌گیری، بیش‌ترین فاصله داده‌ها از خط یک به یک (با رنگ مشکی مشخص شده است) و پراکندگی داده‌ها از خط برازش شده (با رنگ قرمز مشخص شده است)، در روش بایکاس مشاهده شد (شکل ۹، الف). R^2 روش بایکاس در بخش رس برابر با ۰/۹۴ بود.

کامل (A) را نشان می‌دهد. در روش قرائت ۲ ساعت (D)، مقدار رس به‌طور مطلق ۹/۵ درصد بیشتر از روش قرائت کامل (A) است (شکل ۹-ب). انحراف معیار مقدار رس در روش D برابر ۱۳/۳ و حداقل و حداکثر مقدار رس نیز به‌ترتیب ۹/۸ و ۷۰/۸ می‌باشد. حداقل میانگین خطا بر حسب درصد رس، ۲/۵ و حداکثر ۲۳/۴ است (شکل ۹-ب). انحراف روش بایکاس در تعیین درصد رس در ۴۰/۵٪ خاکها بیش از ۱۰ و در ۹۴/۲٪ خاکها بیش از ۵ است. با ریزتر شدن بافت خاک خطای روش D بیشتر می‌شود (شکل ۹-۹). به‌طور کلی روش بایکاس منجر به بیش‌اندازه‌گیری بخش رس و کم‌اندازه‌گیری بخش سیلت می‌شود و این نتیجه با مشاهدات (Beretta et al., 2014) و Karkanis et al. (1991) همخوانی دارد. در زمان قرائت ۲ ساعت ممکن است بخش



شکل ۸- کلاس بافتی تعیین شده منتج از روش چهار قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۲۴ ساعت و مقایسه آن با روش قرائت کامل بر مبنای طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISSS)

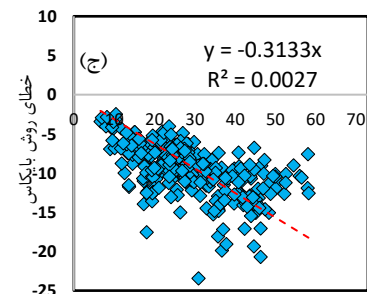
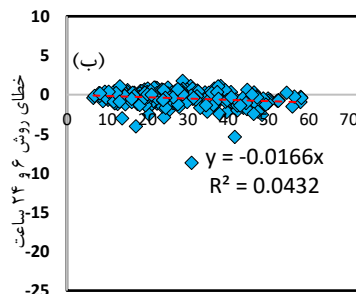
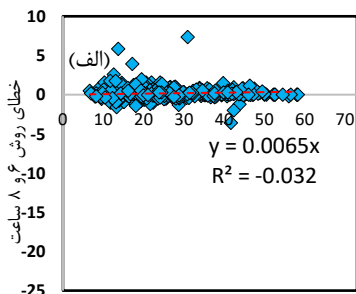


شکل ۹- مقایسه بخش رس (الف) اندازه‌گیری شده روش قرائت ۲ ساعت بایکاس (D) با روش قرائت کامل (A) و مقدار خطای اندازه‌گیری (تفاضل مقدار رس (ب) در روش بایکاس و روش قرائت کامل). (ترتیب شماره) آزمایش‌های PSD بر اساس مقدار خطا مرتب شده است. MAE: میانگین مطلق خطا، MRE: میانگین نسبی خطا، RMSE: خطای جذر میانگین مربعات و MAPE: درصد میانگین مطلق خطا است.

خاک‌های درشت بافت است و با افزایش درصد رس خاک، انحراف روش بایکاس افزایش می‌یابد به‌طوری‌که R^2 در حدود ۰/۹ است (شکل ۱۰- ج)، این درحالی است که دو روش پیشنهادی با افزایش یا کاهش بخش رس خاک روند کاملاً مشخصی در انحراف از روش مرجع مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۰- الف و ب).

مقایسه کلی روش‌های اندازه‌گیری

شکل (۱۰- الف - ج)، به ترتیب میزان اختلاف روش پیشنهادی ۶ و ۸ ساعت، ۶ و ۲۴ ساعت و بایکاس با روش قرائت کامل را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که محور عمودی اختلاف درصد رس سه روش با روش قرائت کامل و محور افقی درصد رس با روش قرائت کامل است. در خاک‌های ریزبافت خطای روش بایکاس بیشتر از



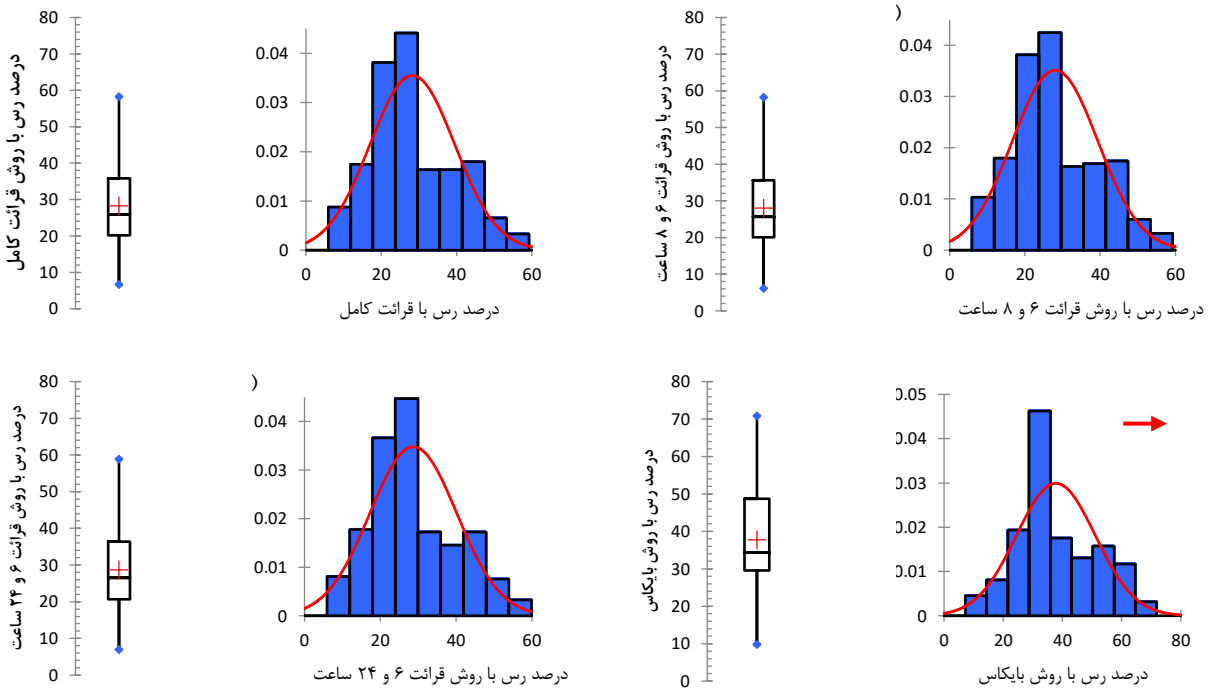
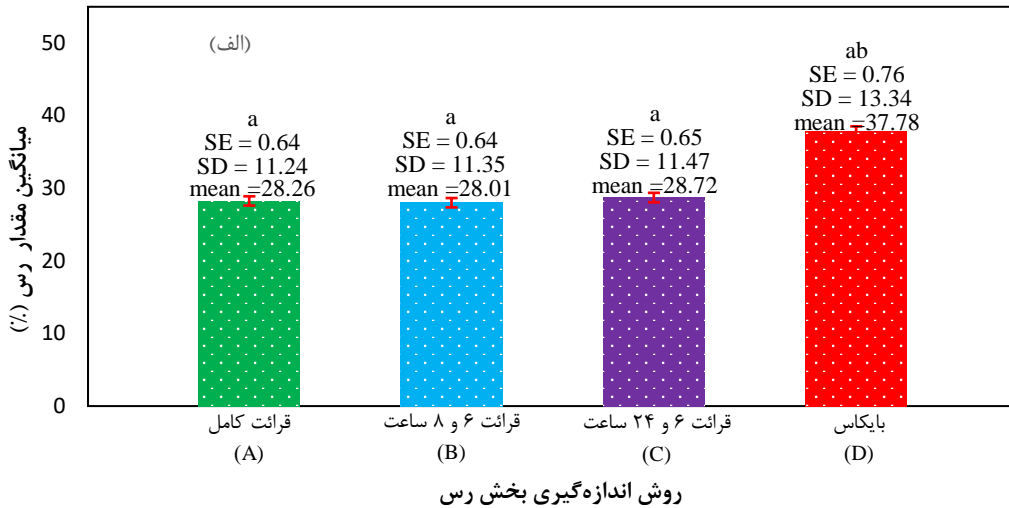
شکل ۱۰- مقایسه خطای تعیین مقدار رس با استفاده از روش‌های پیشنهادی ۶ و ۸ ساعت، ۶ و ۲۴ ساعت و بایکاس با روش قرائت کامل.

نشان داد، روش بایکاس (D) بیش‌ترین تغییرات را نسبت به روش قرائت کامل (A) دارد (شکل ۱۱- ه). اختلاف معنی‌داری بین میانگین بخش سیلت اندازه‌گیری شده با دو روش پیشنهادی (B و C)، با سیلت اندازه‌گیری شده با روش قرائت کامل مشاهده نشد ($\alpha=0.05$). خطای استاندارد بخش سیلت روش B برابر ۰/۵۴ بود و اختلاف آن نسبت به روش قرائت کامل ناچیز بود (شکل ۱۲، الف). همچنین انحراف معیار و میانگین روش B نسبت به روش قرائت کامل به ترتیب ۰/۰۳ کمتر و ۰/۱۱ بیشتر بود. خطای استاندارد، انحراف معیار و میانگین روش C نیز نسبت به روش قرائت کامل به ترتیب دارای اختلاف ۰/۰۲، -۰/۴۷ و -۰/۶ بود

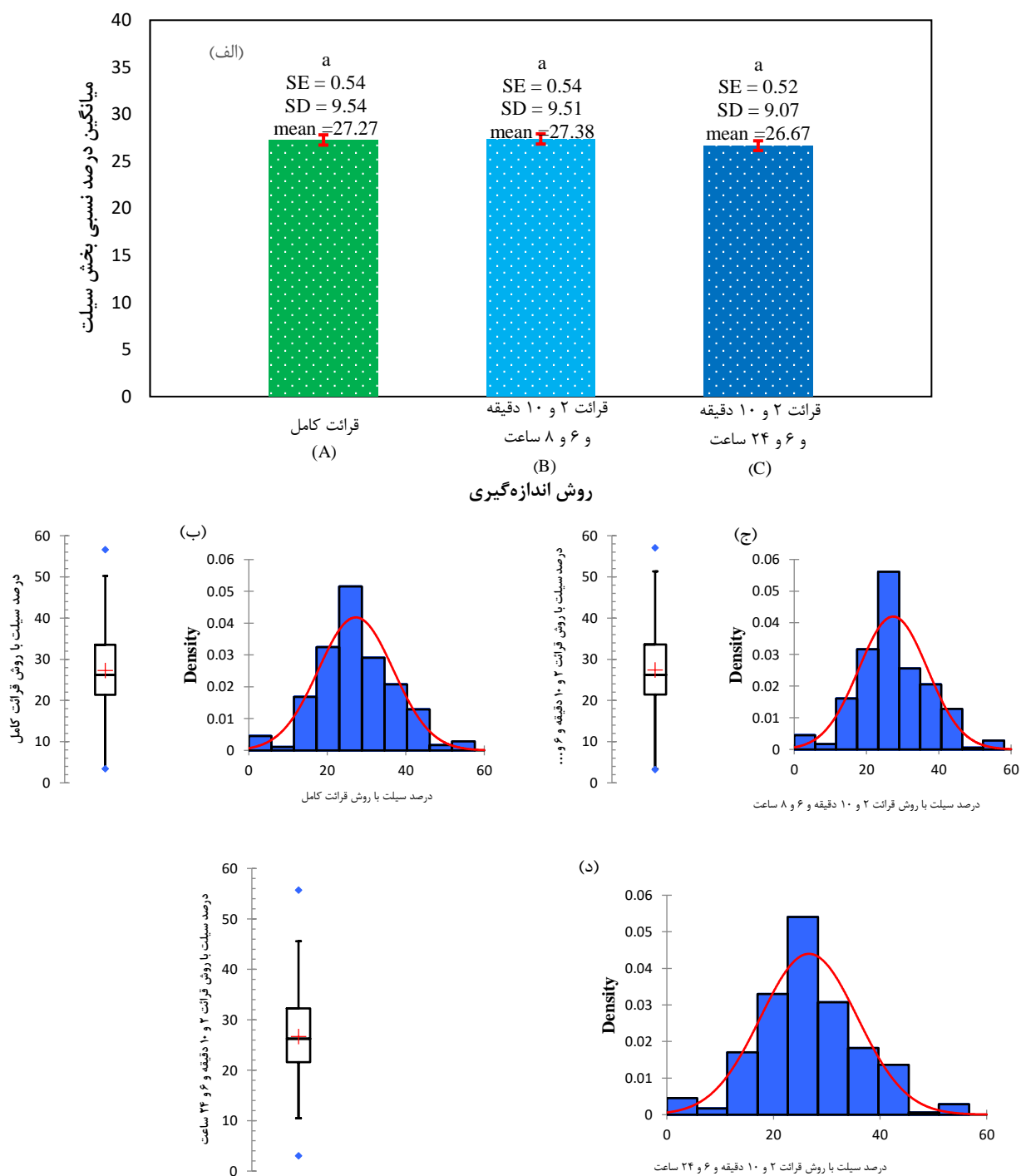
مقادیر میانگین رس و سیلت اندازه‌گیری شده با چهار روش A، B، C و D و مقایسه آماری آن‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، نشان داده شده است. روش بایکاس (D) با میانگین رس ۳۷/۷۸ درصد اختلاف معنی‌داری نسبت به قرائت کامل داشت ($\alpha=0.05$). خطای استاندارد (SE)، انحراف معیار (SD) و میانگین بخش رس در دو روش پیشنهادی (B و C) بسیار نزدیک به روش قرائت کامل (A) بود و از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری ($\alpha=0.05$)، بین آن‌ها مشاهده نگردید. برخی آماره‌های توصیفی بخش رس در شکل (۱۱- الف) ارائه شده است. چگالی توزیع نرمال و نمودار جعبه‌ای روش‌های مختلف در بخش رس

و (C)، خطای استاندارد روش B و C هر دو برابر ۱/۰۲ بود (شکل ۱۳-الف) و اختلاف این دو روش با روش قرائت کامل ۰/۰۱- بوده و نتایج آزمون آماری (آزمون دانکن) تفاوت معنی‌داری نشان نداد ($\alpha=0.05$).

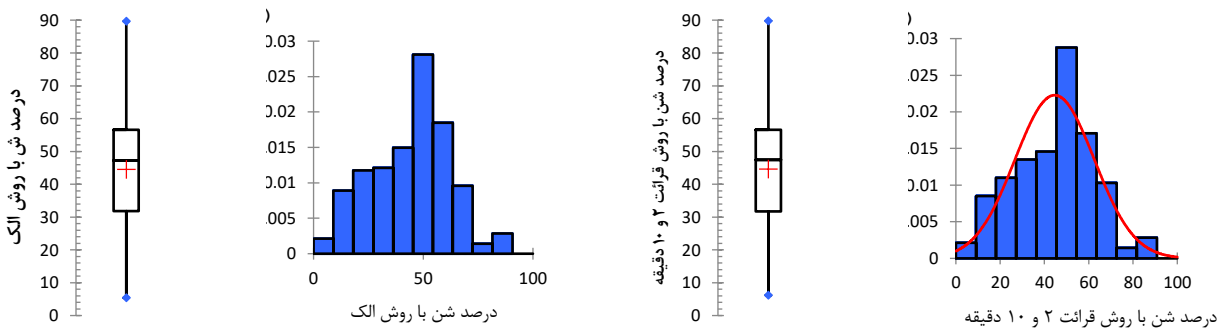
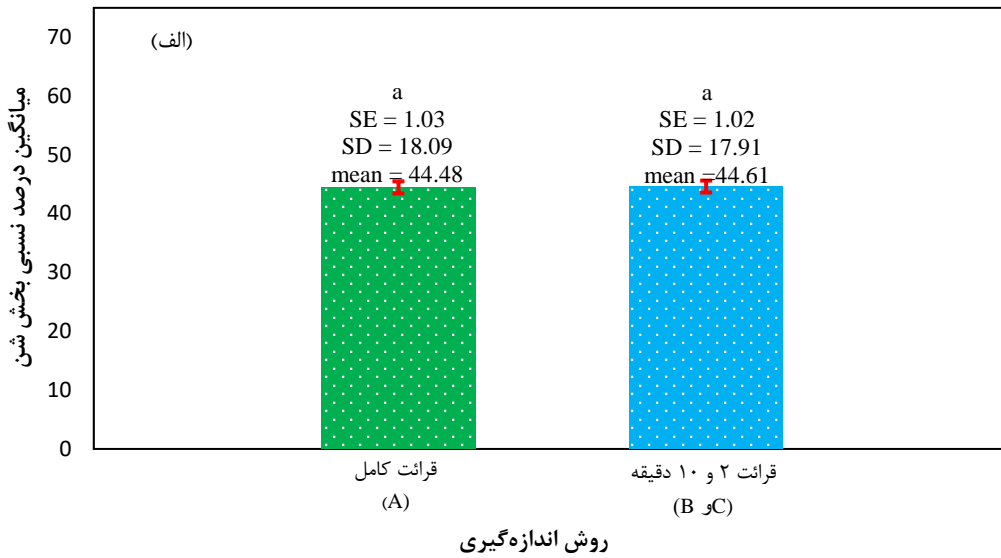
(شکل ۱۲، الف) و اختلاف معنی‌داری ($\alpha=0.05$)، با روش قرائت کامل نداشت. چگالی توزیع نرمال و نمودار جعبه‌ای دو بخش سیلت و شن با سه روش A، B و C در شکل (۱۲-ب، ج و د) و (۱۳-ب و ج) نشان داده شده است. برای بخش شن، با توجه به یکسان بودن روش قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه دو روش پیشنهادی (B)



شکل ۱۱- مقایسه میانگین، نمودار جعبه‌ای (الف) و هیستوگرام همراه با برازش منحنی چگالی احتمال برای بخش رس اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف (ب-ه) (در نمودار جعبه‌ای میانگین، میانه، ماکزیمم و مینیمم مؤثر و واقعی مشخص شده است). گروه‌های دارای حروف مشابه (a و b) در یک گروه قرار گرفته و از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.



شکل ۱۲- مقایسه میانگین، نمودار جعبه‌ای (الف) و هیستوگرام همراه با برازش منحنی چگالی برای بخش سیلت اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف (ب) - (د) (در نمودار جعبه‌ای میانگین، میان، ماکزیمم و مینیمم مؤثر و واقعی مشخص شده است). گروه‌های دارای حروف مشابه (a و b) در یک گروه قرار گرفته و از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.



شکل ۱۳- مقایسه میانگین، نمودار جعبه‌ای (الف) و هیستوگرام همراه با برازش منحنی چگالی برای بخش شن اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف (ب-ج) در نمودار جعبه‌ای میانگین، میانه، ماکزیمم و مینیمم مؤثر و واقعی مشخص شده است. گروه‌های دارای حروف مشابه (a و b) از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

اندازه‌گیری شده در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت، $d[6h]$ و $d[24h]$ به ترتیب قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۶ و ۲۴ ساعت (میلیمتر).

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر برای تعیین زمان‌های قابل اطمینان قرائت هیدرومتری با توجه به تنوع خاک‌های ایران صورت پذیرفت. همچنین با استفاده از آزمون آماری دانکن و نیز شاخص‌های آماری مختلف (مانند میانگین مطلق خطا، میانگین نسبی خطا، خطای جذر- میانگین مربعات، درصد میانگین مطلق خطا، و انحراف معیار) تفاوت مقدار ذرات اولیه شن و رس و سیلت اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، روش Bouyoucos (1962) درصد رس را به مقدار $9/5(100g/g)$ بیش از مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌نماید. نتایج مبتنی بر شاخص‌های آماری و آزمون دانکن ($\alpha=0.05$) نشان داد روش قرائت ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۸ ساعت و روش قرائت ۲ و ۱۰

جمع‌بندی نتایج موید مناسب بودن روش چهار قرائتی ۲ و ۱۰ دقیقه و ۶ و ۲۴ ساعت در تعیین بافت خاک‌های ایران است. بنابراین درصد سیلت و شن خاکها از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود. (رابطه ۱۰)

$$P_{silt+clay} = P_{[2min]} - \left(\frac{P_{[2min]} - P_{[10min]}}{\ln\left(\frac{d_{[2min]}}{d_{[10min]}}\right)} \right) \ln\left(\frac{d_{[2min]}}{0.02}\right)$$

$P_{silt+clay}$: درصد مجموع سیلت و شن خاک $P[2min]$ و $P[10min]$: به ترتیب درصد ذرات اندازه‌گیری شده در زمان‌های ۲ و ۱۰ دقیقه،

$d[10min]$ و $d[2min]$: به ترتیب قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۱۰ و ۲ دقیقه (میلیمتر).

درصد رس خاکها از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

(رابطه ۱۱)

$$P_{clay} = P_{[6h]} - \left(\frac{P_{[6h]} - P_{[24h]}}{\ln\left(\frac{d_{[6h]}}{d_{[24h]}}\right)} \right) \ln\left(\frac{d_{[6h]}}{0.002}\right)$$

P_{clay} : درصد رس خاک، $P[6h]$ و $P[24h]$: به ترتیب درصد ذرات

۲۴ ساعت برای تعیین بافت خاک پیشنهاد می‌گردد. نتایج نشان داد مقدار خطای روش بایکاس و روش‌های مشابه مبتنی بر دو قرائت (مانند ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت)، به حدی است که در بسیاری از موارد می‌تواند به تعیین نادرست کلاس بافت خاک بیانجامد. هر چند عدم حذف مواد سیمانی منجر به تغییر درصد ذرات اولیه اندازه‌گیری شده می‌گردد، اما بر ارجحیت روش چهار قرائتی پیشنهادی بر روش بایکاس تاثیری ندارد.

سپاس‌گزاری

این تحقیق با حمایت مالی و با استفاده از امکانات و تجهیزات موسسه تحقیقات خاک و آب کشور انجام شده است و نتایج آن مستخرج از طرح تحقیقاتی با شماره ۱۳۹۴/۱۰/۱ می‌باشد که بدین وسیله از این موسسه قدردانی می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Arya, L. M., and Paris, J. F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data 1. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1023-1030
- Barthès, B. G., Kouakoua, E., Larré-Larrouy, M. C., Razafimbelo, T. M., de Luca, E. F., Azontonde, A. and Feller, C. L. (2008). Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, 143(1-2), 14-25.
- Blake, G. R., and Hartge, K. H. (1986). Bulk density 1. *Methods of soil analysis: part 1-physical and mineralogical methods*, pp.363-375.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
- Beretta, A. N., Silbermann, A. V., Paladino, L., Torres, D., Bassahun, D., Musselli, R., and García-Lamohte, A. (2014). Análisis de textura del suelo con hidrómetro: modificaciones al método de Bouyoucos. *Ciencia e Investigación Agraria*, 41(2), 263-271.
- Coates, G. F., and Hulse, C. A. (1985). A comparison of four methods of size analysis of fine-grained sediments. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 28(2), 369-380.
- Cosby, B. J., G. M. Hornberger, R. B. Clapp and T. R. Ginn, 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.*, 20(6): 682-690.
- Day, P. R. (1965). *Particle fractionation and particle-size analysis* (No. methods of soil an a, pp. 545-567). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- De Oro, L.A., Colazo, J.C., Avecilla, F., Buschiazzo, D.E. and Asensio, C., (2019). Relative soil water content as a factor for wind erodibility in soils with different texture and aggregation. *Aeolian Research*, 37, pp.25-31.
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., and Wilson, G. W. (2000). An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4), 817-827.
- Jensen, D. K., Tuller, M., de Jonge, L. W., Arthur, E., and Moldrup, P. (2015). A new two-stage approach to predicting the soil water characteristic from saturation to oven-dryness. *Journal of Hydrology*, 521, 498-507.
- Gee, G. W., And Bauder, J. W. (1979). Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters 1. *Soil Science Society of America Journal*, 43(5), 1004-1007.
- Gee, G. W., and Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of Soil Analysis. Part, 4*(598), 255-293.
- Holmgren, G. G. (1967). A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure 1. *Soil Science Society of America Journal*, 31(2), 210-211.
- Kaddah, M. T. (1975). The hydrometer method for particle-size analysis: 2. factors affecting the dispersive properties of glassy Na-polyphosphate in calcareous saline soil suspensions. *Soil Science*, 120(6), 412-420.
- Kaddah, M. T. (1974). The hydrometer method for detailed particle-size analysis: 1. Graphical interpretation of hydrometer readings and test of method. *Soil Science*, 118(2), 102-108.
- Karkanis, P. G., Au, K., and Schaalje, G. B. (1991). Comparison of four measurement schedules for

- determination of soil particle-size distribution by the hydrometer method. *Canadian Agricultural Engineering*, 33(2), 211-216.
- Karup, D., Moldrup, P., Paradelo, M., Katuwal, S., Norgaard, T., Greve, M. H., and de Jonge, L. W. (2016). Water and solute transport in agricultural soils predicted by volumetric clay and silt contents. *Journal of Contaminant Hydrology*, 192, 194-202.
- Lebron, I., Suarez, D. and Yoshida, T. (2002). Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Sci Soc Am J* 66: 92-98.
- Liu, T. K., Odell, R. T., Etter, W. C., and Thornburn, T. H. (1966). A Comparison of Clay Contents Determined by Hydrometer and Pipette Methods Using Reduced Major Axis Analysis 1. *Soil Science Society of America Journal*, 30(6), 665-669.
- Page, A. L., Miller, R. H., and Keeney, D. R. (1982). Methods of Soil Analysis, part 2. Chemical and Microbiological Properties, 2.
- Poeplau, C., Eriksson, J., and Kätterer, T. (2015). Estimating residual water content in air-dried soil from organic carbon and clay content. *Soil and Tillage Research*, 145, 181-183.
- Schjønning, P., McBride, R. A., Keller, T., and Obour, P. B. (2017). Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. *Geoderma*, 286, 83-87.
- Shirazi, M. A., Boersma, L., and Johnson, C. B. (2001). Particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 300-310.
- 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(4), 1038-1044.
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil asidity. p. 475-490. In: D.L. Sparks *et al.* (eds.). Method of Soil Analysis. Part 3. 3rd ed. Chemical and Microbiological Properties. ASA and SSSA, Madison, WI, USA.
- USDI. (1982). Particle-size analyses. Chapter 4 of land classification techniques and standards. Series 510. United States Department of the Interior. Washington, DC
- Walkley, A., and Black, I. A. (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(1), 29-38.
- Walter, N. F., Hallberg, G. R., and Fenton, T. E. (1978). Particle-size analysis by the Iowa State University soil survey laboratory. *Standard procedures for evaluation of quaternary materials in Iowa. Technical Information Series*, (8), 61-74.
- WRB, I.W.G. (2014). World reference base for soil resources 2014. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps, (106).
- Yang, Y., Wang, L., Wendroth, O., Liu, B., Cheng, C., Huang, T., and Shi, Y. (2019). Is the Laser Diffraction Method Reliable for Soil Particle Size Distribution Analysis?. *Soil Science Society of America Journal*, 83(2), 276-287.
- Yavari, M., Mohammadi, M.H., and Shahbazi, K. (2020) The effect of cement agents removal on soil texture measurement in Iran. *Iranian journal of water and soil rearech*. In Press. doi: 10.22059/ijswr.2020.280297.668188