



Comparison and Accuracy Assessment of Different Hydrometer Reading Methods for Determining Soil Primary Particle Percentage in Predominant Soils of Iran

Roya Toluee¹, Karim Shahbazi², Mohammad Hossein Mohammadi³,
Meisam Rezaei⁴

1. Corresponding Author, Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: roya.toluee@gmail.com
2. Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: shahbazikarim@yahoo.com
3. Department of Soil Sciences and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran; E-mail: mhmohmad@ut.ac.ir
4. Soil and Water Research Institute (SWRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran; E-mail: Meisam.rezaei1@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 3, 2026

Revised: July. 8, 2026

Accepted: Aug. 10, 2026

Published online: Oct. 23, 2026

Keywords:

**Primary soil particles,
Hydrometer method,
Soil texture class,
Complete reading.**

ABSTRACT

Soil texture is one of the most fundamental and frequently measured properties in soil science laboratories, used to determine the percentage of primary soil particles. Given the varied methods and timing protocols employed for texture analysis in laboratories across the country without prior comparison or validation, this study aimed to compare common methods for determining texture in predominant Iranian soils with the complete reading method, and to evaluate the accuracy of the primary particle results obtained from these methods against a reference. Eighty-nine soil samples from a wide range of relative primary particle percentage, were selected. Soil texture was determined using the hydrometer method with different reading times. Results indicated that the accuracy of the 40-second and 8-hour reading method, followed by the four-reading method, was higher for determining clay and silt fractions compared to other methods. These methods correctly identified the soil texture class in 90% and 89% of samples, respectively. Based on analysis of variance and Duncan's test, there was no significant difference (at the 99% probability level, $P < 0.01$) between the clay, silt, and sand values obtained from the complete reading, four-reading, 40-second and 8-hour, and 40-second and 7-hour methods. Therefore, to save time and laboratory costs, any of the four-reading, 40-second and 8-hour, or 40-second and 7-hour methods can be adopted as alternatives to the complete reading method, depending on the study's objectives and number of samples.

Cite this article: Toluee, R., Shahbazi, K., Mohammadi, M. H., & Rezaei, M. (2026). Comparison and Accuracy Assessment of Different Hydrometer Reading Methods for Determining Soil Primary Particle Percentage in Predominant Soils of Iran, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (8), 1825-1844. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410475.670094>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410475.670094>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil texture, defined by the percentage of sand, silt, and clay, is one of the most fundamental and frequently measured properties in soil science laboratories. The hydrometer method, based on Stokes' law, is widely used for texture analysis due to its simplicity and low cost. However, in Iran, various hydrometer reading protocols—including two-reading, four-reading, and complete reading methods—are used interchangeably without prior validation against a reference method. Two-reading methods (e.g., 40 sec & 2 hours) are common because they are fast and simple, but their accuracy has been questioned. The complete reading method (multiple readings over 48 hours) is accurate but time-consuming and expensive.

Objective

This study aimed to: (1) compare common hydrometer reading methods with the complete reading method as a reference, (2) evaluate the accuracy of different methods for determining sand, silt, and clay percentages in predominant Iranian soils, (3) identify the most suitable method considering time, cost, and accuracy, and (4) determine the actual settling time for the sand-silt and silt-clay boundaries based on the USDA system.

Materials and Methods

Eighty-nine soil samples were collected from 13 provinces of Iran (Zanjan, Qazvin, Alborz, Tehran, Qom, Arak, Isfahan, Khorramabad, Fars, Khuzestan, Kerman, Mazandaran, and Golestan). Samples were selected to cover a wide range of soil textures (sandy, loamy, silty, and clayey) representative of predominant Iranian soils. After air-drying and passing through a 2-mm sieve, 40 g of soil was dispersed with sodium hexametaphosphate. The hydrometer (ASTM 152H) was used to measure suspension density at multiple times: 30, 40, 60, 120, 300, 600, 900, 1800, 3600, 5400, 7200, 21600, 23400, 25200, 28800, 86400, and 172800 seconds. Using these readings, six different methods were compared: (a) complete reading method (reference, using semi-logarithmic interpolation), (b) four-reading method (30 & 60 sec for sand; 1.5 & 24 h for clay), (c) two-reading method (40 sec & 8 h), (d) two-reading method (40 sec & 7 h), (e) two-reading method (40 sec & 6.5 h), and (f) two-reading method (40 sec & 2 h – Bouyoucos method). Sand content was also verified by wet sieving through a 53- μ m sieve. Statistical analysis included ANOVA and Duncan's test (SPSS26), and accuracy was assessed using MAE, MBE, RMSE, and NRMSE.

Results and Discussion

The accuracy of the 40-second and 8-hour method was the highest among simplified methods, correctly identifying soil texture class in 90% of samples, followed by the four-reading method (89% accuracy). In contrast, the conventional 40-second and 2-hour method (Bouyoucos) had the lowest accuracy (only 36% agreement with the complete reading method). Clay content was overestimated by all simplified methods compared to the complete reading method, while silt content was underestimated except by the 40-sec & 8-h method. The mean absolute error (MAE) for clay was 1.99% for the 40-sec & 8-h method, 2.06% for the four-reading method, but 12.11% for the 40-sec & 2-h method. The NRMSE for clay was 8.35%, 8.94%, and 36.66%, respectively. ANOVA and Duncan's test showed no significant difference ($P < 0.01$) between the complete reading, four-reading, 40-sec & 8-h, and 40-sec & 7-h methods for clay, silt, and sand values. However, the 40-sec & 6.5-h and 40-sec & 2-h methods showed significant differences ($P < 0.01$) from the reference. The actual settling time for the sand-silt boundary (0.05 mm) averaged 49 seconds (range 30–69 sec) and for the silt-clay boundary (0.002 mm) averaged 11 hours (range 8.5–12.5 h), depending on soil texture. Finer-textured soils required shorter reading times, approaching 40 sec and 8 h.

Conclusions

The simplified 40-second and 8-hour hydrometer method, followed by the four-reading method, provides high accuracy (90% and 89% textural class agreement, respectively) and is statistically comparable to the complete reading method. These methods save considerable time (reducing from 48 hours to 8 or 24 hours) and laboratory costs without significant loss of accuracy. The conventional 40-second and 2-hour method (Bouyoucos) is not recommended for studies requiring precise texture data, as it causes substantial overestimation of clay and shifts texture classes toward heavier textures. Depending on the study objectives and sample number, the 40-second & 8-hour or four-reading methods are reliable alternatives to the complete reading method for determining soil texture in Iranian soils.

Funding

The study was funded by the Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran.

Authorship contribution

Roya Toluee: Conceptualization, methodology, software, formal analysis, investigation, resources, data curation, writing—original draft preparation, writing—review and editing, original idea of study, supervision.

Karim Shahbazi: Conceptualization, methodology, investigation, writing—review and editing, original idea of study, supervision, project administration.

Mohammad Hossein Mohammadi: Conceptualization, methodology, investigation, writing—review and editing, supervision.

Meisam Rezaei: Conceptualization, investigation, writing—review and editing.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

There is no use of any type of artificial intelligence-based technology in this paper.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran. This support was instrumental in facilitating the successful completion of the present research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no competing interests.

مقایسه و صحت‌سنجی روش‌های مختلف قرائت بافت خاک جهت اندازه‌گیری درصد ذرات اولیه خاک‌های غالب کشور

رویا طلوعی^۱ | کریم شهبازی^۲ | محمد حسین محمدی^۳ | میثم رضایی^۴

۱. نویسنده مسئول، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور (SWRI)، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران. رایانامه:

roya.toluee@gmail.com

۲. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور (SWRI)، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران. رایانامه:

shahbazikarim@yahoo.com

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mhmohmad@ut.ac.ir

۴. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور (SWRI)، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، کرج، ایران. رایانامه:

meisam.rezaei1@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

بافت خاک که با درصد ذرات اولیه (شن، سیلت و رس) تعیین می‌شود، یکی از ابتدایی‌ترین و پرکاربردترین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه‌های خاکشناسی است. در ایران، روش‌های مختلف هیدرومتری با زمان‌های متفاوت، بدون مقایسه و صحت‌سنجی آن‌ها در آزمایشگاه‌ها برای تعیین بافت خاک‌های کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مطالعه با هدف مقایسه روش‌های رایج تعیین بافت خاک‌های غالب کشور با روش قرائت کامل انجام و دقت نتایج ذرات اولیه خاک بدست آمده از این روش‌ها در مقایسه با روش مرجع بررسی شد. ۸۹ نمونه خاک در طیف وسیعی از درصد نسبی اندازه ذرات اولیه خاک انتخاب و بافت آن به روش هیدرومتری در زمان‌های مختلف قرائت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد دقت روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و سپس روش چهار قرائت در تعیین بخش رس و سیلت نسبت به سایر روش‌ها بالاتر بود و به ترتیب در ۹۰ و ۸۹ درصد خاک‌ها، کلاس بافت خاک را به درستی نشان دادند. روش ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت کم‌ترین دقت را داشت (۳۶ درصد تطابق با روش قرائت کامل). با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس و آزمون دانکن، بین مقادیر رس، سیلت و شن بدست آمده از روش‌های قرائت کامل، چهار قرائت، قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0.01$) وجود نداشت و می‌توان به خاطر صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایشگاهی، هر یک از روش‌های چهار قرائت، قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت را بسته به هدف مطالعه و گستره نمونه‌برداری جایگزین روش قرائت کامل کرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۱۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۸/۱

واژه‌های کلیدی:

ذرات اولیه خاک،

روش هیدرومتری،

کلاس بافت خاک،

قرائت کامل

استناد: طلوعی، رویا، شهبازی، کریم، محمدی، محمد حسین و رضایی، میثم (۲۰۲۶)، مقایسه و صحت‌سنجی روش‌های مختلف قرائت بافت خاک جهت اندازه‌گیری درصد ذرات اولیه خاک‌های غالب کشور، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۸)، ۱۸۴۴-۱۸۲۵.



<http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410475.670094>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.410475.670094>

مقدمه

توزیع اندازه ذرات خاک (PSD)^۱ یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم و ذاتی خاک است و نشان می‌دهد که از هر ذره‌ی اولیه با اندازه‌ی مشخص چه مقدار در خاک وجود دارد (Skaggs et al., 2001). این مشخصه در تعیین یا برآورد بسیاری از ویژگی‌های خاک مانند بافت، منحنی رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع، آب قابل‌استفاده برای گیاه، نفوذپذیری خاک نسبت به آب، هوا و ریشه گیاه، فرسایش‌پذیری، رژیم حرارتی، تخلخل طراحی سیستم‌های آبیاری، مدیریت خاک و آب و دیگر ویژگی‌های مؤثر بر رشد گیاه و تولید محصول به کار برده می‌شود (Shein, 2009). روش‌های اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات شامل الک کردن، روش‌های هیدرومتری، پیپت، اشعه ایکس و تکنیک پراکنش اشعه لیزر است (Gee & Or, 2002). ذرات خاک کوچکتر از دو میلی‌متر که عموماً آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی روی آن انجام می‌شود در سه گروه اصلی شن (Sand)، سیلت (Silt) و رس (Clay) تقسیم می‌شوند. سیستم‌های مختلفی برای گروه‌بندی اندازه ذرات تعریف شده است؛ که شامل: سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA)^۲، کمیته مطالعات خاکشناسی کانادا (CSSC)^۳، انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISSS)^۴، انجمن مواد و آزمایش آمریکا (ASTM)^۵ است (Gee & Or, 2002). در گروه‌بندی USDA دامنه اندازه‌های شن ۵۰ - ۲۰۰۰ میکرون، سیلت ۲ - ۵۰ میکرون و رس کوچکتر از ۲ میکرون است (Lal & Shukla, 2004). بافت خاک که یکی از ویژگی‌های مهم و ثابت خاک است، عبارت است از فراوانی نسبی ذرات شن، رس و سیلت در بخش معدنی نمونه خاک (بای‌وردی، ۱۳۹۳). اساس کلاس بافت خاک بر ترکیب مختلفی از شن، سیلت و رس استوار است و بر اساس مثلث بافت خاک در سیستم USDA، خاک دارای ۱۲ کلاس بافتی است. یکی از روش‌های پرکاربرد در اندازه‌گیری بافت خاک، روش هیدرومتری است. اساس این روش، اندازه‌گیری چگالی سوسپانسیون خاک و آب است که به تدریج بر اثر ته‌نشینی ذرات در طول زمان، کاهش پیدا کرده و هیدرومتر بیشتر در مایع فرو می‌رود. این روش بر پایه قانون استوکس استوار است. عمق مؤثر نفوذ در این روش ثابت نیست و با گذشت زمان افزایش پیدا می‌کند.

در بسیاری از موارد تعیین بافت خاک، بین روش پیپت (به عنوان روش مرجع) و هیدرومتر اختلاف اندکی وجود دارد. برخی پژوهشگران تشابه ۹۸ درصدی بین روش هیدرومتر و پیپت (Liu et al., 1966) و برخی دیگر تشابه ۹۷ درصدی (Kaddah, 1974) مشاهده کردند. اختلاف روش پیپت و هیدرومتر اغلب در نتیجه آماده‌سازی متفاوت نمونه‌ها است. همچنین برخی پژوهشگران منبع عمده خطا را در قرائت هیدرومتر می‌دانند. خطایی در حدود ± 1 گرم بر لیتر در قرائت هیدرومتر منجر به خطایی در حدود ۲ درصد در اندازه ذرات رس می‌شود (Gee & Bauder, 1979).

در منابع و دستورالعمل‌های مختلف تجزیه خاک، زمان‌های قرائت با روش هیدرومتر به روش‌های مختلفی، از جمله: الف) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (روش بایکاس) (Bouyoucos, 1962)، ب) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت (آریا و میرخانی، ۱۳۸۴)، ج) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت (Scheldrick, 1993)، د) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (USDI, 1982)، ه) روش چهار قرائت ۳۰ و ۶۰ ثانیه برای تعیین بخش شن و ۱/۵ و ۲۴ ساعت برای تعیین بخش رس (Day, 1965)، و) روش چهار قرائت اصلاح شده (Gee & Bauder, 1979)، ز) روش قرائت کامل (روش دقیق و کامل) (Klute, 1986) پیشنهاد شده است. روش‌های مذکور از سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) برای طبقه‌بندی اندازه ذرات خاک استفاده کرده است. (یاوری و همکاران، ۱۳۹۹)، برای ارائه زمان مناسب در روش چهار قرائت تعیین بافت خاک بر اساس طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی علوم خاک (ISSS)، روش چهار قرائت در زمان‌های ۲، ۱۰ دقیقه، ۶ و ۲۴ ساعت را پیشنهاد کردند. آن‌ها نشان دادند که این روش در ۹۴/۲ درصد خاک‌ها، کلاس بافت را به درستی نشان می‌دهد و در بیش از ۸۱ درصد موارد، خطای آن در تعیین مقدار رس خاک کمتر از ± 1 درصد است.

روش‌های دو قرائت به دلیل سادگی، به صورت متداول در برخی از آزمایشگاه‌های خاکشناسی کشور مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگر هدف از تعیین توزیع اندازه ذرات، ارزیابی اولیه یا بررسی کلی بافت خاک در یک منطقه خاص باشد روش‌های دو قرائت می‌توانند استفاده شوند ولی برای بدست آوردن توزیع اندازه دقیق ذرات خاک، کشاورزی دقیق و مدیریت ویژه- مکان بایستی با احتیاط استفاده شوند؛ چون این روش‌ها می‌توانند خطای قابل ملاحظه‌ای به خصوص در روش دو قرائت بایکاس (Bouyoucos, 1962) داشته باشند (Owji et al.,)

1 Particle Size Distribution

2 United States Department of Agriculture

3 Canada Soil Survey Committee

4 International Soil Science Society

5 American Society For Testing and Materials



2014). برای تعیین مقدار کمی و دقیق توزیع اندازه ذرات اولیه خاک (مواردی مانند مطالعات مربوط به رده‌بندی خاک‌ها، تعیین ویژگی‌ها و طبقه‌بندی مکانیکی خاک، تعیین درجه فعالیت رس‌ها، استفاده از داده‌های توزیع اندازه ذرات به عنوان داده‌های ورودی مدل‌های برآوردکننده و غیره) توصیه می‌شود بجای روش دو قرائته از روش چهار قرائته یا قرائت کامل استفاده شود (شه‌بازی و همکاران، ۱۴۰۳). روش قرائت کامل توزیع دقیق اندازه ذرات را به نمایش می‌گذارد؛ از این رو دارای دقت بالایی است و به عنوان روش مرجع استفاده می‌شود. با این حال، این روش مستلزم صرف وقت و امکانات می‌باشد و ممکن است انجام آن در همه شرایط امکان‌پذیر و حتی ضروری نباشد (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۸۳). به همین دلیل با تعیین چند قرائت محدود و قابل اطمینان و با در نظر گرفتن دقت روش، می‌توان با صرف نظر از انجام قرائت کامل، صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و هزینه‌های تجزیه خاک به عمل آورد. در صورتی که زمان‌های قرائت به صورت مناسبی انتخاب شوند روش چهار قرائته در مقایسه با روش دو قرائته زمان بیشتری می‌گیرد ولی دقت آن تقریباً نزدیک به روش قرائت کامل است. همچنین محاسبات این روش نسبت به روش قرائت کامل کمتر است ولی فقط درصد رس و سیلت و شن را نشان می‌دهد و اندازه‌گیری توزیع کامل با این روش ممکن نیست.

در مقایسه بافت و کلاس بافت خاک تعیین شده به روش هیدرومتری با تعداد قرائت‌های مختلف، (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۸۳)، نشان داد کلاس بافت به دست آمده از روش چهار قرائته در خاک‌های مورد مطالعه در مقایسه با روش قرائت کامل، ۹۰ درصد همخوانی نشان داد. در حالی که (Owji et al., 2014)، روش دو قرائته ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت را دقیق‌ترین روش برای تعیین کلاس بافت خاک از بین روش‌های مختلف عنوان کرد. از سوی دیگر (Mozaffari et al., 2024)، بیشترین همبستگی بین رس به دست آمده از روش استاندارد هیدرومتر را با رس حاصل از زمان قرائت ۶ ساعت بدست آورد.

در آزمایشگاه‌های خاک‌شناسی ایران، روش‌ها و زمان‌های مختلفی برای تعیین بافت خاک‌های کشور بدون مقایسه و ارزیابی و صحت‌سنجی آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین این پژوهش با هدف (۱) مقایسه روش‌های رایج تعیین بافت خاک‌های غالب کشور، (۲) بررسی دقت نتایج اندازه ذرات خاک بدست آمده از روش‌های مختلف در مقایسه با روش قرائت کامل، (۳) تعیین مناسب‌ترین روش با در نظر گرفتن مسئله زمان، هزینه و دقت اندازه‌گیری و (۴) تعیین زمان واقعی سقوط ذرات در مرز بین شن و سیلت (۰/۰۵ میلی‌متر) و مرز بین رس و سیلت (۰/۰۲ میلی‌متر) بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ۸۹ نمونه خاک از ۱۳ استان کشور (زنجان، قزوین، البرز، تهران، قم، اراک، اصفهان، خرم‌آباد، فارس، خوزستان، کرمان، مازندران و گلستان) جمع‌آوری شد. نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند تا دربردارنده طیف وسیعی از درصد نسبی اندازه ذرات اولیه خاک (شن، سیلت و رس) و نماینده بافت خاک‌های غالب کشور باشد.

بعد از انتقال نمونه خاک‌ها به آزمایشگاه، هوا خشک کردن، کوبیدن و گذراندن از الک دو میلی‌متری، ۴۰ گرم خاک هواخشک در بشر ۶۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد. ۳۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول سدیم هگزامتافسفات (۵۰ گرم در لیتر) به آن اضافه گردید و اجازه داده شد تا به مدت یک شب به همان حالت بماند. سپس محتویات بشر با دستگاه همزن الکتریکی (با موتور ۱۰۰۰۰rpm) به مدت پنج دقیقه هم زده شد. سوسپانسیون به یک استوانه یک لیتری انتقال داده شد و با آب مقطر به حجم یک لیتر رسانده شد. پس از برقراری تعادل بین دمای سوسپانسیون با دمای محیط، دمای سوسپانسیون (به منظور تصحیح دمایی) یادداشت شد و سپس سوسپانسیون با همزن دستی به مدت ۳۰ ثانیه کاملاً به هم زده شد و غلظت آن در زمان‌های ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۸۰۰، ۳۶۰۰، ۵۴۰۰، ۷۲۰۰، ۲۱۶۰۰، ۲۳۴۰۰، ۲۵۲۰۰، ۲۸۸۰۰، ۸۶۴۰۰ و ۱۷۲۸۰۰ ثانیه با هیدرومتر بایکاس (ASTM 152H) قرائت شد. در تمام زمان‌های قرائت، غلظت نمونه شاهد (به منظور تصحیح غلظت نمک) ثبت شد. برای تهیه محلول شاهد، ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول سدیم هگزامتافسفات (۵۰ گرم در لیتر) با آب مقطر در استوانه به حجم یک لیتر رسانده شد و پس از برقراری تعادل بین دمای شاهد با دمای محیط قرائت‌ها انجام گرفت. لازم به ذکر است بعد از اتمام قرائت‌ها، برای جداسازی ذرات شن، استوانه حاوی سوسپانسیون خاک به طور کامل داخل الک ۵۳ میکرومتری (الک مش ۲۷۰) ریخته و با آب‌فشان به آرامی شستشو داده شد تا زمانی که آب خروجی از الک زلال شود. ذرات شن به درون ظروف آلومینیومی که جرم مشخص دارند منتقل و در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک و توزین شد.

با استفاده از زمان قرائت‌های مذکور، بافت خاک به روش هیدرومتری با تعداد قرائت‌های متفاوت (الف) روش قرائت کامل (به عنوان روش مرجع برای مقایسه با سایر روش‌های اندازه‌گیری بافت خاک)، (ب) روش چهار قرائت ۳۰ و ۶۰ ثانیه برای تعیین بخش شن و ۱/۵ و

۲۴ ساعت برای تعیین بخش رس (Day, 1965)، ج) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (USDI, 1982)، د) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت (Scheldrick, 1993)، ه) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت (آریا و میرخانی، ۱۳۸۴)، و) روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (Bouyoucos, 1962) تعیین و سپس کلاس بافت هر نمونه خاک با استفاده از مثلث بافت خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) مشخص گردید.

اولین گام در قرائت هیدرومتر واسنجی آن برای محاسبه عمق موثر نفوذ هیدرومتر (عمقی که غلظت سوسپانسیون در آن قرائت می‌شود) است. عمق موثر هیدرومتر (h) تابعی از ابعاد هیدرومتر و مقدار قرائت هیدرومتر (R) است (Kaddah, 1974) و از رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$h = L_1 + 1/2 \left(L_2 - \frac{V_B}{A} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

L_1 : فاصله قرائت هیدرومتر تا بالای حباب هیدرومتر (محل اتصال ساقه به حباب) (cm)، L_2 : طول حباب هیدرومتر (cm)، V_B : حجم حباب (ثابت تغییرات حجم یک مایع در اثر فرو بردن حباب هیدرومتر در آن) (cm^3) و A : سطح مقطع استوانه سوسپانسیون است. V_B/A نسبت حجم حباب هیدرومتر به سطح مقطع استوانه است و در واقع برابر است با افزایش یا بالا آمدن سطح سوسپانسیون در استوانه در اثر وارد شدن هیدرومتر در داخل استوانه. این مقادیر برای هیدرومتر ASTM 152H و استوانه ته‌نشینی مورد پژوهش برابر با $L_1(0\text{cm}) = 2.3\text{cm}$ ، $L_1(50\text{cm}) = 10.2\text{cm}$ ، $L_2 = 14.2\text{cm}$ ، $V_B = 55.5\text{cm}^3$ و $A = 28.26\text{cm}^2$ بود. با جای گذاری ابعاد هیدرومتر در رابطه ۱ مقدار عمق موثر یکبار برای قرائت صفر (h_0) و بار دیگر برای قرائت ۵۰ (h_{50}) محاسبه شد. تفاضل h_0 و h_{50} برابر با طول درجه‌بندی صفر تا ۵۰ در ساقه هیدرومتر برابر با $7/9$ سانتی‌متر بوده و طول هر درجه قرائت از تقسیم این تفاضل بر 50 درجه قرائت مقدار $0/158$ سانتی‌متر بر درجه قرائت به دست آمد. در واقع با فرو رفتن هر واحد هیدرومتر در سوسپانسیون، به اندازه $0/158R$ از مقدار h_0 کم می‌شود (رابطه ۲):

$$h = 16.3 - 0.158 R \quad \text{رابطه ۲}$$

h : عمق موثر هیدرومتر (cm) در سوسپانسیون و R : قرائت تصحیح نشده هیدرومتر (g/cm^3) است.

با استفاده از عمق موثر و زمان قرائت، سرعت سقوط ذرات خاک با استفاده از رابطه ۳ محاسبه و به همراه مقادیر گرانیوی (η)، تصحیح شده با دما (T) و غلظت (C_s) (رابطه ۴)، جرم مخصوص حقیقی خاک (ρ_p) و جرم مخصوص سوسپانسیون (ρ_l) در دمای T (رابطه ۵) در معادله استوکس (رابطه ۶) قرار داده شد تا قطر ذره محاسبه شود.

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

V : سرعت سقوط ذرات (cm/sec) و t : زمان (sec) است.

$$\eta = \eta_0(1 + 4.25Cs) \quad \text{رابطه ۴}$$

η : گرانیوی سوسپانسیون در دمای T (cPoise) و C_s : غلظت سدیم هگزامتافسفات بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب در سوسپانسیون نهایی (۱ لیتری) در دمای ۲۰ درجه سلسیوس در استوانه شاهد است.

$$\rho_l = \rho_0(1 + 0.630Cs) \quad \text{رابطه ۵}$$

ρ_0 و ρ_l : به ترتیب جرم مخصوص سوسپانسیون و آب خالص در دمای T (g/cm^3) است.

$$d = \sqrt{\frac{18h\eta}{tg(\rho_s - \rho_l)}} \quad \text{رابطه ۶}$$

d : قطر ذره در حال سقوط (cm) و ρ_s : جرم مخصوص ذرات خاک (g/cm^3) و g : شتاب ثقل (981cm/sec^2) است.

برای محاسبه درصد ذرات کوچکتر از قطر موردنظر ($P < d$) در هر زمان قرائت، از نسبت غلظت اندازه‌گیری شده سوسپانسیون خاک (C) به مقدار خاک معادل مورد استفاده در یک لیتر سوسپانسیون (C_0) مطابق رابطه ۷ استفاده شد.

$$P = \left(\frac{C}{C_0} \right) * 100 \quad \text{رابطه ۷}$$



P: درصد ذرات کوچکتر از قطر موردنظر است.

مقدار غلظت اندازه‌گیری سوسپانسیون از اختلاف مقدار قرائت هیدرومتر برای سوسپانسیون خاک و شاهد در زمان t مطابق رابطه ۸

به دست آمد

$$C = R - R_B$$

رابطه ۸)

R و R_B : به ترتیب قرائت هیدرومتر برای سوسپانسیون خاک و قرائت هیدرومتر در آب حاوی سدیم هگزامتاسفات بدون خاک

(شاهد) در زمان t (g/l) است.

برای محاسبه درصد اندازه ذرات به روش قرائت کامل، پس از محاسبه دو عامل قطر ذرات خاک و درصد ذرات کوچکتر از قطر موردنظر در هر زمان، منحنی توزیع تجمعی اندازه ذرات خاک ترسیم شد. از روی منحنی ترسیم شده بین $P < d$ به صورت تجمعی (مقیاس خطی در محور قائم) و d متناظر با آن (مقیاس لگاریتمی در محور افقی)، درصد رس ($d < 0.002\text{mm}$)، درصد سیلت ($d > 0.05\text{mm}$) و درصد شن ($0.05\text{mm} < d < 2\text{mm}$) بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA تعیین شد. لازم به ذکر است در این روش محاسبه درصد ذرات با استفاده از روش میان‌یابی نیمه لگاریتمی (لگاریتم قطر ذره در مقابل فراوانی ذرات) انجام شد. با توجه به این‌که در منحنی توزیع تجمعی اندازه ذرات، تعیین زمان دقیق سقوط یک ذره با قطر مشخص در حین انجام آزمایش امکان‌پذیر نیست، از این‌رو با استفاده از زمان اندازه‌گیری قبل و بعد از سقوط ذره، قطر ذره مشخص با استفاده از رابطه ۶ محاسبه گردید.

برای محاسبه درصد اندازه ذرات در روش چهار قرائت، درصد ذرات در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ ثانیه ($P_{[30s]}$ و $P_{[60s]}$) و در زمان‌های

۱/۵ و ۲۴ ساعت ($P_{[1.5h]}$ و $P_{[24h]}$) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد. در این روش، مجموع درصد سیلت و رس خاک (P_{si+c}) و درصد رس (P_c)، به ترتیب از رابطه ۹ و ۱۰ بدست آمد:

$$P_{si+c} = P_{[30s]} - \left(\frac{P_{[30s]} - P_{[60s]}}{\ln\left(\frac{d_{[30s]}}{d_{[60s]}}\right)} \right) \left(\ln\left(\frac{d_{[30s]}}{0.05}\right) \right) \quad \text{رابطه ۹}$$

P_{si+c} : مجموع درصد سیلت و رس خاک، $P_{[30s]}$: درصد ذرات اندازه‌گیری شده در زمان ۳۰ ثانیه، $P_{[60s]}$: درصد ذرات اندازه‌گیری

شده در زمان ۶۰ ثانیه، $d_{[30s]}$: قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۳۰ ثانیه (mm)، $d_{[60s]}$: قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۶۰ ثانیه (mm) است.

$$P_c = P_{[1.5h]} - \left(\frac{P_{[1.5h]} - P_{[24h]}}{\ln\left(\frac{d_{[1.5h]}}{d_{[24h]}}\right)} \right) \left(\ln\left(\frac{d_{[1.5h]}}{0.002}\right) \right) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

P_c : درصد رس خاک، $P_{[1.5h]}$ و $P_{[24h]}$: به‌ترتیب درصد ذرات اندازه‌گیری شده در زمان‌های ۱/۵ و ۲۴ ساعت، $d_{[1.5h]}$ و $d_{[24h]}$:

به‌ترتیب قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۱/۵ و ۲۴ ساعت (mm) است. مقادیر d با استفاده از رابطه ۶ محاسبه شد.

نهایتاً درصد سیلت و درصد شن به ترتیب از روابط ۱۱ و ۱۲ به دست آمد:

$$P_{(si)} = P_{si+c} - P_c \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$P_{(s)} = 100 - P_{si+c} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

بر خلاف روش قرائت کامل و چهار قرائت، برای محاسبه درصد اندازه ذرات در روش دو قرائت، نیاز به اندازه‌گیری ابعاد هیدرومتر و واسنجی آن نیست. بنابراین درصد اندازه ذرات بر حسب قرائت‌های انجام یافته در دو زمان مشخص بعد از تصحیح غلظت نمونه شاهد و تصحیح دمایی (در صورت هم‌دما نبودن نمونه و شاهد) با استفاده از رابطه ۷ بدست آمد. از مجموع درصد سیلت و رس از محاسبه درصد اندازه‌گیری شده در زمان قرائت اول (۴۰ ثانیه) و درصد رس از محاسبه درصد اندازه‌گیری شده در زمان قرائت دوم بسته به روش انتخاب شده (۲، ۵/۶ یا ۷ یا ۸ ساعت) به دست آمد. و نهایتاً درصد سیلت و شن به ترتیب از روابط ۱۱ و ۱۲ محاسبه شد.

درصدهای شن، سیلت و رس حاصل از روش‌های مختلف (بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA) محاسبه شد. برای بررسی وجود اختلاف آماری بین مقادیر رس، سیلت و شن روش‌های مختلف اندازه‌گیری بافت خاک از روش تجزیه واریانس (ANOVA) و در صورت مشاهده تفاوت آماری بین روش‌ها در جدول تجزیه واریانس، برای مشخص شدن اینکه بین کدام روش‌ها اختلاف معنی‌دار وجود دارد از آزمون دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS26 استفاده شد. برای ارزیابی دقت نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف نسبت به روش قرائت

کامل (به عنوان روش مرجع)، از معیارهای آماری MAE، MBE، RMSE، NRMSE استفاده شد:

میانگین خطای مطلق (MAE) (رابطه ۱۳) از صفر تا مقادیر مثبت بزرگ متغیر است. مقدار صفر نشانگر تطبیق کامل مقادیر بدست آمده از روش‌های دو و چهار قرائته با روش قرائت کامل است. و هرچه از صفر افزایش یابد دال بر کاهش دقت روش است.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad \text{رابطه ۱۳}$$

میانگین انحراف خطا^۲ (MBE) (رابطه ۱۴) نشانگر میانگین خطا یا اریب است و در حالت ایده‌آل بایستی صفر باشد. مقادیر مثبت و منفی آن به ترتیب نشان‌دهنده بیش اندازه‌گیری یا کم اندازه‌گیری است (Pham, 2019).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE) (رابطه ۱۵) صحت نتایج را نشان می‌دهد. هرچه دارای مقادیر کمتر باشد صحت روش بیشتر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

لازم به ذکر است، معیارهایی مانند MAE، MBE یا RMSE متناسب با واحد اندازه‌گیری ویژگی است و برای مقایسه ویژگی‌های با واحدهای متفاوت مناسب نخواهد بود. از این رو با تقسیم RMSE بر مقادیر میانگین داده‌ها، معیار ارزیابی دقت، مستقل از واحدهای اندازه‌گیری و قابل مقایسه می‌شود. در این پژوهش چون واحدها یکسان است از این معیار نیز برای مقایسه استفاده شد.

ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۴ (NRMSE) (رابطه ۱۶) بیانگر میزان تطابق یا انحراف نتایج حاصل از روش‌های مختلف با درصدهای بدست آمده از روش قرائت کامل است. در واقع خطای انحراف را به صورت درصدی از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. محدوده این معیار ارزیابی نیز از صفر تا مقادیر مثبت بزرگ متغیر است. در بهترین تطابق مقدار NRMSE برابر صفر بوده و افزایش مقدار آن بیانگر افزایش انحراف یا دور شدن درصدهای اندازه‌گیری شده از روش دو و چهار قرائته نسبت به مقادیر حاصل از روش قرائت کامل است.

$$NRMSE = \frac{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \right) \times 100}{O'} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

در روابط مذکور، O: درصد اندازه ذرات خاک بدست آمده از روش‌های دو و چهار قرائته و S: درصد اندازه ذرات خاک بدست آمده از روش قرائت کامل، O' میانگین درصد اندازه ذرات خاک بدست آمده از روش‌های دو و چهار قرائته و n تعداد زوج ذرات اندازه‌گیری شده با روش دو و چهار قرائته - به روش قرائت کامل است.

به طور کلی در روش USDA، برای تعیین اندازه ذرات شن از زمان ۴۰ ثانیه در روش دو قرائته، بازه زمانی ۳۰ و ۶۰ ثانیه در روش چهار قرائته و از میان‌یابی نیمه لگاریتمی در روش قرائت کامل استفاده می‌گردد. از طرفی با توجه به این که در روش هیدرومتری، عمق موثر هیدرومتر ثابت نبوده و با ته‌نشینی تدریجی ذرات در طول زمان افزایش می‌یابد، زمان واقعی سقوط ذرات در خاک‌های مختلف به خصوص خاک‌های سبک (که در ابتدای زمان ته‌نشینی، ذرات بیشتری سقوط کرده و هیدرومتر بیشتر در سوسپانسیون فرو می‌رود) متفاوت از زمان‌های ارائه شده در روش‌های مرسوم اندازه‌گیری درصد ذرات خاک می‌باشد، که این موضوع به خودی خود منشا بیش اندازه‌گیری یا کم‌برآوردی در مقادیر اندازه ذرات می‌گردد. از این رو، با قرار دادن مقادیر عمق موثر و قطر ذرات در رابطه ۱۷، مقدار واقعی زمان قرائت (مرز بین شن و سیلت و مرز بین سیلت و رس) با استفاده از نرم‌افزار Excel 2016، جهت مقایسه با مقدار زمان ارائه شده در روش‌های دو

1 Mean absolute error

2 Mean bias error

3 Root mean square error

4 Normalized root mean square error



قرائنه محاسبه گردید:

(رابطه ۱۷)

$$t = \frac{18h\eta}{[d^2g(\rho_s - \rho_l)]}$$

نتایج و بحث

درصد اندازه ذرات اولیه خاک

آمار توصیفی درصد اندازه ذرات اولیه خاک حاصل از روش‌های مختلف قرائت بافت خاک با هیدرومتر (روش قرائت کامل، روش چهار قرائنه ۳۰ و ۶۰ ثانیه برای تعیین بخش شن و ۱/۵ و ۲۴ ساعت برای تعیین بخش رس، روش‌های دو قرائنه ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت، ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت، ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت) در

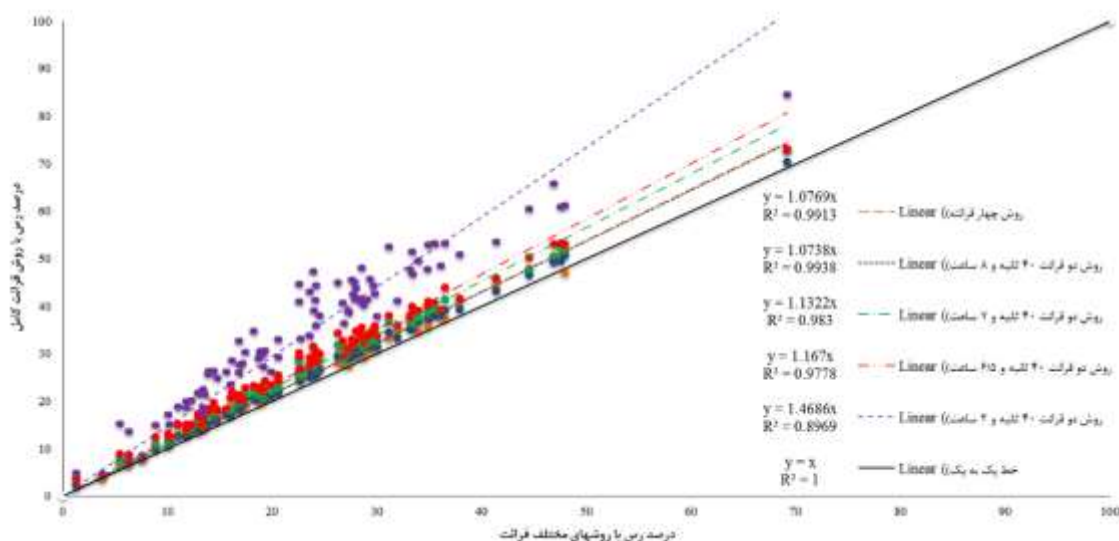
جدول ۱ نشان داده شد. شاخص‌های آماری درصد‌های اندازه‌گیری شده ذرات اولیه خاک، برای تمام روش‌ها به طور کامل ارائه شده است. نتایج نشان داد دامنه تغییرات شن نمونه‌های خاک در روش قرائت کامل و چهار قرائنه بین ۱ تا ۹۶/۴ درصد و در روش‌های دو قرائنه بین ۰/۲ تا ۹۵/۲ درصد بود. با وجود دامنه زیاد درصد شن در خاک‌های مورد مطالعه، مقادیر میانگین این ویژگی در روش قرائت کامل و چهار قرائنه ۳۱ درصد، و در روش‌های دو قرائنه ۲۸/۸ درصد بود. بر پایه ضریب تغییرات، درصد ذرات اولیه شن از غیریکنواختی بیشتری نسبت به درصد ذرات رس و سیلت برخوردار بود و نشان‌دهنده در نظر گرفتن طیف وسیعی از بافت‌های مختلف در نمونه‌های مورد آزمایش است. مقادیر میانگین رس اندازه‌گیری شده با ۶ روش مذکور)

جدول ۱) نشان داد کمترین مقدار میانگین رس مربوط به روش قرائت کامل (با میانگین ۲۳/۴ درصد) بوده و با کاهش تعداد قرائت‌ها و همچنین کاهش زمان قرائت دوم در روش‌های دو قرائنه، میانگین رس افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین مقدار آن مربوط به روش دو قرائنه ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت بود. شکل ۱، مقایسه مقدار رس اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف نسبت به روش قرائت کامل را نشان داد. نتایج حاکی از بیش اندازه‌گیری مقادیر رس در تمام روش‌ها نسبت به روش قرائت کامل بود. افزایش انحراف معیار مقادیر رس)

جدول ۱) در قرائت‌های محدود (چهار قرائنه و دو قرائنه) و همچنین در زمان‌های کم قرائت دوم در روش‌های دو قرائنه، نشان‌دهنده افزایش انحراف آن از روش قرائت کامل بود.

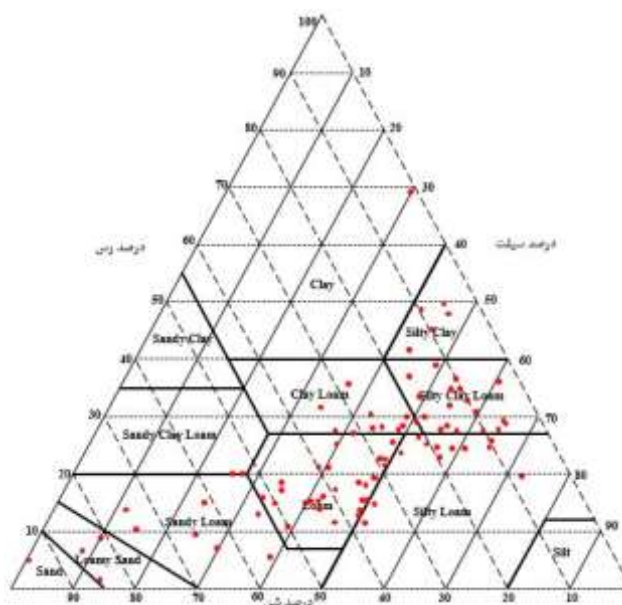
جدول ۱. شاخص‌های آماری محاسبه شده برای مقادیر رس، سیلت و شن با روش‌های مختلف قرائت بافت خاک

ویژگی	روش	حداقل	حداکثر	میانگین	میانه	انحراف معیار	ضریب تغییرات
رس (درصد)	روش قرائت کامل	۱/۳	۶۹/۳	۲۳/۴	۲۳/۶	۰/۸۴	۳/۶
	روش چهار قرائنه	۲/۲	۷۳/۳	۲۵/۴	۲۵/۷	۰/۸۷	۳/۴
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۸ ساعت)	۲/۴	۷۰/۵	۲۵/۴	۲۵/۶	۰/۸۶	۳/۴
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۷ ساعت)	۳/۷	۷۳/۱	۲۶/۹	۲۷/۸	۰/۸۹	۳/۳
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت)	۳/۷	۷۳/۲	۲۷/۸	۲۸/۶	۰/۹۱	۳/۳
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۲ ساعت)	۴/۵	۸۴/۸	۳۵/۵	۳۶/۴	۱/۰۹	۳/۱
سیلت (درصد)	روش قرائت کامل	۰/۰	۷۴/۱	۴۵/۸	۴۸/۱	۱/۰۵	۲/۳
	روش چهار قرائنه	۰/۰	۷۰/۵	۴۳/۵	۴۶/۲	۱/۰۷	۲/۵
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۸ ساعت)	۰/۳	۷۳/۴	۴۶/۰	۴۸/۳	۱/۰۱	۲/۲
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۷ ساعت)	۰/۵	۷۲/۱	۴۴/۴	۴۶/۸	۰/۹۹	۲/۲
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت)	۰/۵	۷۱/۷	۴۳/۵	۴۵/۶	۰/۹۸	۲/۷
	روش دو قرائنه (۴۰ ثانیه و ۲ ساعت)	۰/۳	۶۳/۹	۳۵/۹	۳۷/۵	۰/۸۳	۲/۳
شن (درصد)	روش قرائت کامل	۱/۰	۹۶/۴	۳۱/۰	۲۸/۵	۱/۵۸	۵/۰
	روش چهار قرائنه	۱/۰	۹۶/۴	۳۱/۳	۲۸/۵	۱/۶۴	۵/۲
	روش‌های دو قرائنه	۰/۲	۹۵/۲	۲۸/۸	۲۵/۸	۱/۵۵	۵/۴



شکل ۱. مقایسه درصد رس اندازه‌گیری شده روش قرائت کامل با سایر روش‌های قرائت بافت خاک

بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA، خاک‌های مورد مطالعه در ۹ کلاس بافتی (شنی، شن لومی، لوم شنی، لوم، لوم سیلتی، لوم رسی، لوم رسی سیلتی، رس سیلتی و رسی) قرار گرفتند (شکل ۲). درصد اندازه ذرات اولیه بدست آمده از روش قرائت کامل نشان داد از بین ۸۹ خاک مورد مطالعه، بیشتر خاک‌ها دارای بافت لومی (۲۹ درصد خاک‌ها)، ۲۳ درصد خاک‌ها دارای کلاس بافتی لوم رسی سیلتی، ۱۸ درصد خاک‌ها دارای کلاس بافتی لوم سیلتی، ۸ درصد خاک‌ها دارای بافت لوم رسی، ۸ درصد خاک‌ها دارای بافت لوم شنی، ۵ درصد خاک‌ها دارای بافت سنگین رسی و رس سیلتی و ۴ درصد خاک‌ها دارای بافت سبک شنی و شن لومی بودند.



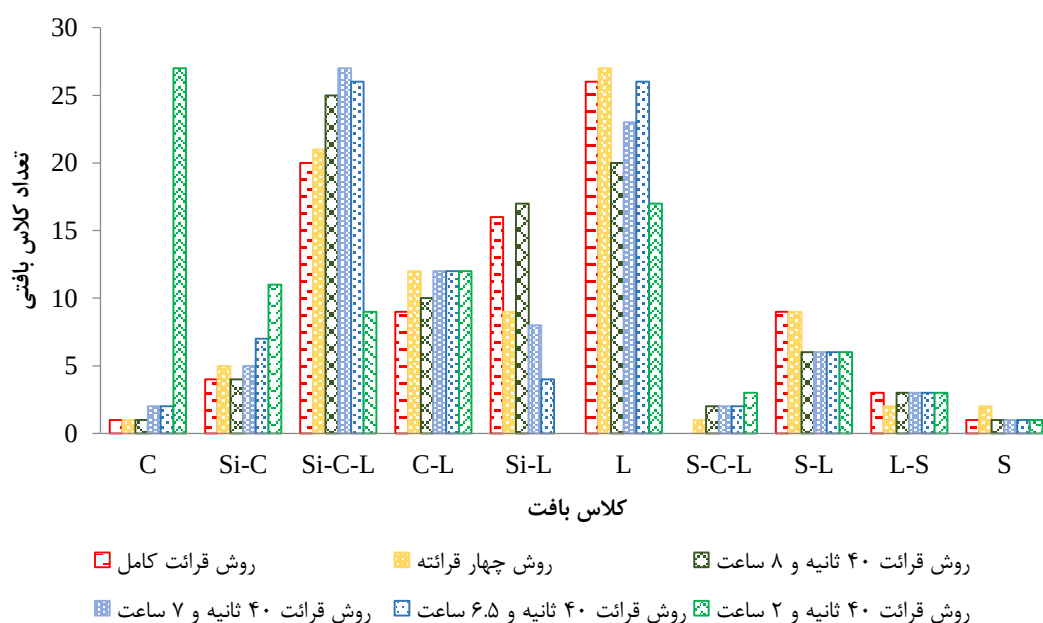
USDA (شکل ۲). Silty Clay Loam: لوم رسی؛ Clay Loam: رس؛ Clay: رس؛ Silty Loam: لوم سیلتی؛ Silty Clay Loam: لوم رسی سیلتی؛ Silty Clay: لوم رسی سیلتی؛ Sandy Clay: رس شنی؛ Sandy Clay Loam: رس شنی؛ Loamy Sand: شن لومی؛ Sand: شن؛ Sandy Loam: لوم شنی؛ Loam: لوم؛

در مقایسه روش قرائت کامل با روش چهار قرائت، روش مرجع تعداد کلاس بافتی لوم سیلتی بیشتری را در مقایسه با روش چهار قرائت گزارش داد (شکل ۳). به جز این کلاس بافتی، در سایر کلاس‌ها انحراف کمی بین دو روش مشاهده شد. در مجموع از بین ۸۹ کلاس بافتی، ۱۰ تفاوت در تشخیص کلاس‌های بافتی بین دو روش مشاهده شد که نشان از تطابق ۸۹ درصدی بافت‌های بدست آمده از دو روش مذکور بود. نکته قابل توجه در بررسی تعداد کلاس‌های منتج از روش قرائت کامل و روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت، دقت بالایی

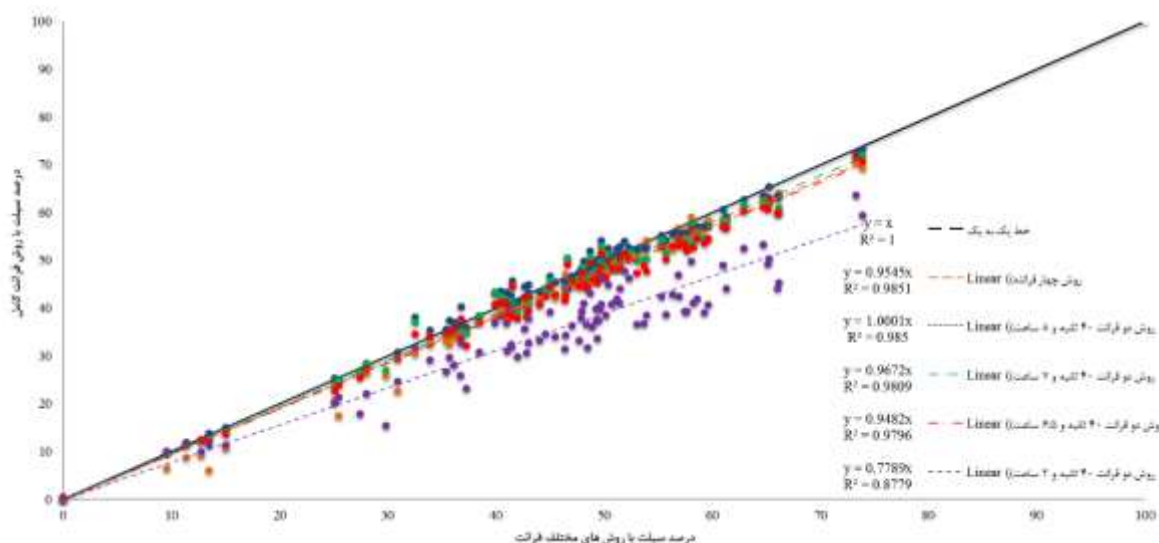
این روش نسبت به تمام روش‌های دو قرائته و چهار قرائته در مقایسه با روش مرجع بود. از بین ۸۹ کلاس بافتی، ۹ تفاوت در تشخیص کلاس‌های بافتی بین دو روش مشاهده شد که نشان از تطابق ۹۰ درصدی بافت‌های بدست آمده از دو روش یاد شده بود. روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت، تعداد کلاس بافتی لوم رسی سیلتی بیشتر و لوم کمتری را در مقایسه با روش مرجع نشان داد. سایر کلاس‌ها یا بدون انحراف یا با انحراف کمتر نسبت به روش مرجع بدست آمد (شکل ۳). در مقایسه روش‌های قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت با روش قرائت کامل، روش مرجع تعداد کلاس بافتی لوم رسی سیلتی کمتر (به ترتیب ۷ و ۶ کلاس کمتر) و لوم سیلتی بسیار بیشتری (به ترتیب ۸ و ۱۲ کلاس بیشتر) را در مقایسه با دو روش مذکور گزارش داد (شکل ۳). در اندازه‌گیری بافت ۸۹ خاک مختلف با روش‌های قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت، به ترتیب ۱۸ و ۲۲ مورد تفاوت در تشخیص کلاس‌های بافتی در مقایسه با روش قرائت کامل مشاهده شد که نشان از مطابقت ۸۰ و ۷۵ درصدی بافت‌های بدست آمده از دو روش مذکور بود. در حالی که روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت با ۵۷ مورد اختلاف با روش مرجع (تطابق ۳۶ درصدی کلاس بافت خاک با روش مرجع) کمترین دقت را در تعیین درصد اندازه ذرات اولیه خاک و کلاس‌های بافتی داشت. روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت، تعداد کلاس بافتی رسی و رس سیلتی بیشتر (به ترتیب ۲۶ و ۷ کلاس بیشتر) و لوم رسی سیلتی کمتری (۹ کلاس کمتر) را در مقایسه با روش مرجع گزارش داد (شکل ۳). هم‌چنین در این روش کلاس بافت لوم سیلتی مشاهده نشد در حالی که روش مرجع، ۱۶ کلاس بافتی را لوم سیلتی تشخیص داده بود. سایر کلاس‌ها انحراف کمی بین دو روش وجود داشت.

مطابقت ۹۰، ۸۰، ۷۵ و ۳۶ درصدی کلاس‌های بدست آمده از روش‌های قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت، ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت، ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (به ترتیب) با روش مرجع نشان داد، هر چه اختلاف زمان قرائت دوم در روش‌های دو قرائته (مرز تعیین‌کننده بخش رس و سیلت) با زمان واقعی قرائت بخش رس بیشتر شود، بخشی از سیلت موجود در سوسپانسیون، جزء رس خاک به حساب آمده و باعث ایجاد بیش برآوردی در تعیین مقدار رس (شکل ۱) و کم اندازه‌گیری در تعیین مقدار سیلت (شکل ۴) می‌گردد که این عامل باعث می‌شود درصد اندازه ذرات اولیه خاک و متعاقباً کلاس‌های بافتی بدست آمده نسبت به روش مرجع اختلاف بیشتری داشته و بافت به دست آمده و به سمت کلاس‌های سنگین‌تر سوق پیدا کند. این تفاوت در روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت نسبت به روش مرجع از تمام روش‌ها بیشتر بود.

در روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت، بیش برآوردی مقدار رس و کم برآوردی مقدار سیلت خاک‌ها عامل عدم تشخیص کلاس بافت لوم سیلتی و کاهش تعداد کلاس‌های لوم رسی سیلتی، و نیز افزایش کلاس‌های رسی و رس سیلتی بود. لازم به ذکر است در تمام روش‌های قرائت بافت خاک، کلاس بافت لوم رسی شنی تعیین شد. در صورتی که در روش مرجع چنین کلاس بافتی وجود نداشت.



شکل ۳. تعداد کلاس‌های بافتی بدست آمده از روش‌های مختلف قرائت بافت خاک



شکل ۴. مقایسه درصد سیلت اندازه‌گیری شده روش قرائت کامل با سایر روش‌های قرائت بافت خاک

ارزیابی دقت روش‌های مختلف قرائت بافت خاک

در جدول ۲، معیارهای آماری ارزیابی دقت اندازه‌گیری روش‌های مختلف قرائت بافت خاک در مقایسه با روش قرائت کامل نشان داده شد. کمترین مقدار میانگین خطای مطلق (MAE) رس مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۱/۹۹ درصد) سپس روش چهار قرائت (۲/۰۶ درصد) و بیشترین مقدار آن مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (۱۲/۱۱ درصد) بود. این معیار نشان داد روش‌های قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و چهار قرائت، مقدار رس را با میانگین خطای مطلق ۱/۹۹ و ۲/۰۶ درصد نسبت به روش قرائت کامل اندازه‌گیری می‌کند. بررسی دقیق‌تر نتایج نشان داد که بیشترین خطای مطلق رس در هر دو روش اخیر، ۴ درصد بود (جدول ۲). در حالی که بررسی نتایج میانگین خطای مطلق رس برای روش‌های دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت، ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت نشان داد که به ترتیب در ۹، ۳۵ و ۹۳ درصد خاک‌های مورد مطالعه، بیش از ۵ درصد، مقدار رس را بیشتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌کند. (یاوری و همکاران، ۱۳۹۹)، نشان دادند روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت بخش رس را با میانگین خطای مطلق ۹/۵ درصد نسبت به روش قرائت کامل اندازه‌گیری می‌کند در ۹۴/۲ درصد از خاک‌ها بیش از ۵ درصد بیشتر از مقدار واقعی اندازه‌گیری می‌کند و با ریز شدن بافت خاک، میزان انحراف این روش از مقدار واقعی افزایش می‌یابد. همچنین کمترین مقدار میانگین خطای مطلق سیلت مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۱/۱۹ درصد) نسبت به روش چهار قرائت بافت خاک حاکی از دقت روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت نسبت به روش چهار قرائت در تعیین بخش رس و سیلت بود. مقادیر منفی این معیار نشان از کم برآوردی مقدار سیلت در تمام روش‌های تعیین بافت خاک (به غیر از روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت که نتایج تقریباً مطابق با مقادیر سیلت بدست آمده از روش قرائت کامل داشت) در مقایسه با روش قرائت کامل بود (شکل ۴).

مقایسه معیارهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بین روش‌های مختلف در مقایسه با روش قرائت کامل، نتایج مشابه با دو معیار MAE و MBE داشت. کمترین مقدار RMSE رس مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۲/۱۱ درصد) سپس روش چهار قرائت (۲/۲۷ درصد) و بیشترین مقدار آن مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (۱۲/۹۹ درصد) بود که مبین خطای زیاد اندازه‌گیری با این روش است (جدول ۲). در واقع این معیار صحت بیشتر نتایج رس تعیین شده با روش‌های دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و چهار قرائت را نسبت به سایر روش‌ها در مقایسه با روش قرائت کامل نشان داد.

کمترین مقدار NRMSE رس مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۸/۳۵ درصد) سپس روش چهار قرائت (۸/۹۴ درصد) و بیشترین مقدار آن مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (۳۶/۶۶ درصد) بود که نشان از عدم اطمینان نتایج اندازه‌گیری شده با این روش است (جدول ۲). در واقع نتایج رس بدست آمده از روش‌های دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و چهار قرائت نسبت به سایر روش‌ها مطابقت بیشتری با نتایج رس بدست آمده از روش قرائت کامل نشان داد.

در مجموع با توجه به معیارهای ارزیابی دقت اندازه‌گیری روش‌های مختلف قرائت بافت خاک در مقایسه با روش قرائت کامل، دقت روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و سپس روش چهار قرائت در تعیین بخش رس و سیلت نسبت به سایر روش‌های دو قرائت بالاتر بوده،



نیز کمترین دقت و بیشترین انحراف از مقادیر رس و سیلت حاصل از روش قرائت کامل را روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت داشت (جدول ۲).

جدول ۲. معیارهای ارزیابی دقت اندازه‌گیری روش‌های مختلف قرائت بافت خاک در مقایسه با روش قرائت کامل

ویژگی	روش	*MAE	*MBE	*RMSE	**NRMSE
رس (درصد)	روش چهار قرائته	۲/۰۶	۲/۰۴	۲/۲۷	۸/۹۴
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۸ ساعت)	۱/۹۹	۱/۹۹	۲/۱۱	۸/۳۵
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۷ ساعت)	۳/۵۲	۳/۵۲	۳/۷۵	۱۳/۹۸
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت)	۴/۴۲	۴/۴۲	۴/۶۸	۱۶/۸۷
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۲ ساعت)	۱۲/۱۱	۱۲/۱۱	۱۲/۹۹	۳۶/۶۶
سیلت (درصد)	روش چهار قرائته	۲/۴۰	-۲/۳۶	۲/۷۹	۶/۴۲
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۸ ساعت)	۱/۱۹	۰/۱۶	۱/۶۴	۳/۵۷
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۷ ساعت)	۱/۹۸	-۱/۳۷	۲/۴۰	۵/۴۱
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت)	۲/۶۱	-۲/۲۸	۳/۱۰	۷/۱۳
	روش دو قرائته (۴۰ ثانیه و ۲ ساعت)	۹/۹۸	-۹/۹۶	۱۱/۲۵	۳۱/۴۵
شن (درصد)	روش چهار قرائته	۰/۷۱	۰/۳۲	۱/۴۴	۴/۶۱
	روش‌های دو قرائته	۲/۱۵	-۲/۱۵	۲/۴۸	۸/۶۰

MAE: میانگین خطای مطلق، MBE: میانگین انحراف خطا، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، NRMSE: ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده.

*: واحد مقادیر MAE، MBE و RMSE متناسب با واحد ویژگی اندازه‌گیری شده (درصد)

** NRMSE بدون واحد

آماره MAE برای شن نشان داد روش چهار قرائته و روش‌های دو قرائته، مقدار شن را با میانگین خطای مطلق به ترتیب ۰/۷۱ و ۲/۱۵ درصد نسبت به روش قرائت کامل اندازه‌گیری می‌کند (جدول ۲). نتایج MBE نیز کم اندازه‌گیری روش‌های دو قرائته (۲/۱۵-) نسبت به روش چهار قرائته (۰/۳۲) در مقایسه با روش مرجع نشان داد. از طرفی مقادیر RMSE و NRMSE به ترتیب صحت و تطابق بیشتر نتایج شن تعیین شده با روش چهار قرائته نسبت به روش‌های دو قرائته در مقایسه با روش قرائت کامل را نشان داد. به طور کلی در روش USDA، برای تعیین اندازه ذرات شن از زمان ۴۰ ثانیه در روش دو قرائته، بازه زمانی ۳۰ و ۶۰ ثانیه در روش چهار قرائته و از میان‌بایی نیمه لگاریتمی در روش قرائت کامل استفاده می‌گردد. با توجه به این که در روش هیدرومتری، عمق موثر هیدرومتر ثابت نبوده و با ته‌نشینی تدریجی ذرات در طول زمان افزایش می‌یابد، زمان واقعی سقوط ذرات در خاک‌های مختلف به خصوص خاک‌های سبک (که در ابتدای زمان ته‌نشینی، ذرات بیشتری سقوط کرده و هیدرومتر بیشتر در سوسپانسیون فرو می‌رود) متفاوت از زمان‌های ارائه شده در روش‌های دو قرائته مرسوم می‌باشد، که این موضوع به خودی خود منشا خطای زیادی در اندازه‌گیری مقادیر ذرات می‌گردد. طبق معادله ۱۷، زمان سقوط اندازه ذرات خاک به عمق موثر، قطر اندازه ذرات و دمای سوسپانسیون وابسته است. اندازه‌گیری مقدار واقعی زمان قرائت جهت تعیین مرز بین شن و سیلت خاک، نیاز به معلوم بودن عمق موثر نفوذ هیدرومتر دارد. در روش‌های چهار قرائته و قرائت کامل، تغییرات عمق موثر در محاسبات لحاظ می‌گردد در حالی که در روش‌های دو قرائته چنین نیست. عدد ۴۰ ثانیه برای قرائت اول در روش‌های دو قرائته فقط زمانی بدست می‌آید که در رابطه ۱۷، عمق موثر برابر ۱۰ سانتی‌متر و دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد لحاظ گردد. این فرض زمانی صحیح است که قرائت اول در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، ۳۸ گرم بر لیتر باشد. در حالی که غلظت ذرات در سوسپانسیون و دمای آن در خاک‌های مختلف متفاوت است. زمان واقعی سقوط ذرات در مرز شن و سیلت و مرز رس و سیلت بر اساس سیستم طبقه‌بندی USDA محاسبه و نتایج در جدول ۳ نشان داده شد.

در خاک‌های سبک مورد مطالعه (خاک‌های شنی، شن لومی و لوم شنی) زمان قرائت اول (مرز شن و سیلت) در دامنه ۵۶ تا ۶۹ ثانیه با میانگین ۶۳ ثانیه و زمان قرائت دوم (مرز رس و سیلت) در دامنه ۱۱ تا ۱۲/۵ ساعت با میانگین ۱۲ ساعت بدست آمد (جدول ۳). این در حالی است که در خاک‌های سنگین مورد مطالعه (خاک‌های رسی، رس سیلتی و لوم رسی سیلتی) زمان قرائت اول (مرز شن و سیلت) در دامنه ۳۹ تا ۴۵ ثانیه با میانگین ۴۲ ثانیه و زمان قرائت دوم (مرز رس و سیلت) در دامنه ۸/۵ تا ۱۱ ساعت با میانگین ۱۰/۵ ساعت قرار دارد. بیشترین زمان لازم برای قرائت اول (۶۹ ثانیه) در یک خاک شن لومی و برای قرائت دوم (۱۲/۵ ساعت) در یک خاک شنی به دست می‌آید. این در حالی است که کمترین زمان لازم برای قرائت اول در یک خاک رسی و لوم رسی سیلتی (۳۹ ثانیه) و برای قرائت دوم در یک خاک رسی (۸/۵ ساعت) حاصل می‌شود. در واقع نتایج نشان داد زمان قرائت‌های اول و دوم در خاک‌های سنگین کمتر از خاک‌های

سبک بافت است. لازم به یادآوری است میانگین زمان قرائت اول و دوم برای تمام خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب ۴۹ ثانیه (با دامنه ۶۹-۳۰ ثانیه) و ۱۱ ساعت (با دامنه ۱۲/۵-۸/۵ ساعت) است. نتایج نشان داد که هر چه دانه‌بندی خاک ریزتر باشد زمان قرائت در خوانش اول به ۴۰ ثانیه و در خوانش دوم به ۸ ساعت نزدیکتر می‌شود. (یاوری و همکاران، ۱۳۹۹)، حداقل زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات رس در خاک‌های مورد بررسی را ۷ ساعت و ۱۹ دقیقه در خاک ریز بافت (با حدود ۵۸ درصد رس) و حداکثر آن را ۱۳ ساعت و ۲۰ دقیقه متعلق به خاک نسبتاً درشت بافت (حدود ۷۸ درصد شن و ۱۰ درصد رس) گزارش کردند. ایشان همچنین حداقل زمان لازم برای اندازه‌گیری ذرات ۲۰ میکرومتری را ۳ دقیقه و ۴۰ ثانیه در خاک ریز بافت (حدود ۷ درصد شن و ۳۴ درصد سیلت) و حداکثر آن را ۶ دقیقه و ۵۷ ثانیه متعلق به همان خاک نسبتاً درشت به دست آوردند.

جدول ۳. زمان قرائت واقعی سقوط ذرات در مرز شن و سیلت (۰/۰۵ میلی‌متر) و مرز رس و سیلت (۰/۰۰۲ میلی‌متر) بر اساس سیستم USDA در خاک‌های مورد مطالعه

کلاس بافت خاک	دامنه زمان قرائت (ثانیه) (min-max)	میانگین زمان قرائت (ثانیه) mean	دامنه زمان قرائت (ساعت) (min-max)	میانگین زمان قرائت (ساعت) mean
شنی، شن لومی و لوم	(۵۶-۶۹)	۶۳	(۱۱/۵-۱۲)	۱۲
لومی	(۴۷-۵۵)	۵۰	(۱۱-۱۲)	۱۱/۵
لوم رسی	(۴۵-۵۰)	۴۷/۵	(۵-۱۱/۱۰)	۱۰/۸
لوم سیلتی	(۴۱-۵۱)	۴۵/۵	(۷/۵-۱۱)	۱۱/۳
رسی، رس سیلتی و لوم رسی سیلتی	(۳۹-۴۵)	۴۲	(۵-۸/۱۱)	۱۰/۵

مقایسه میانگین روش‌های اندازه‌گیری درصد اندازه ذرات اولیه

با توجه به جدول نتایج واریانس (جدول ۴)، بین میانگین مقادیر رس و سیلت اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف اختلاف معنی‌داری ($P < 0.01$) وجود دارد. این امر نشان‌دهنده آن است که حداقل بین دو روش از روش‌های اندازه‌گیری اختلاف معنی‌دار وجود دارد. نتایج مقایسه میانگین مقدار رس حاصل از روش قرائت کامل و روش‌های دو و چهار قرائت با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0.01$) بین برخی روش‌ها وجود داشت (شکل ۵-الف). میانگین رس در روش قرائت کامل (۲۳/۴ درصد)، روش چهار قرائت، دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۲۵/۴ درصد) و روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت (۲۶/۹ درصد) و روش‌های دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت به ترتیب (۲۷/۸ و ۳۵/۵ درصد) بود. نتایج نشان داد بین روش‌های قرائت کامل، چهار قرائت و دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0.01$) وجود نداشت. هر چند در سطح احتمال ۹۵ درصد ($P < 0.05$) بین روش قرائت کامل با روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت اختلاف معنی‌دار شد. بین روش قرائت کامل با روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت اختلاف معنی‌داری در سطوح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0.01$) و ۹۵ درصد ($P < 0.05$) وجود داشت.

آزمون دانکن (شکل ۵-ب) نشان می‌دهد تفاوت معنی‌داری بین سیلت اندازه‌گیری شده با روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت با بقیه روش‌ها در سطح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0.01$) وجود دارد. میانگین سیلت در روش قرائت کامل (۴۵/۸ درصد)، روش چهار قرائت (۴۳/۵ درصد)، روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۴۶ درصد)، روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت (۴۴/۴ درصد) و روش‌های دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت به ترتیب (۴۳/۵ و ۳۵/۹ درصد) بود. نتایج نشان داد بین روش‌های قرائت کامل، چهار قرائت و دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت، ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت و ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0.01$) وجود نداشت.

جدول نتایج واریانس (جدول ۴)، نشان داد بین میانگین مقادیر شن اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف اختلاف معنی‌داری ($P < 0.01$) وجود ندارد. (Gee & Or, 2002)، اظهار کردند که بهتر است نتایج شن حاصل از روش هیدرومتری با روش الک مقایسه شود و حتی

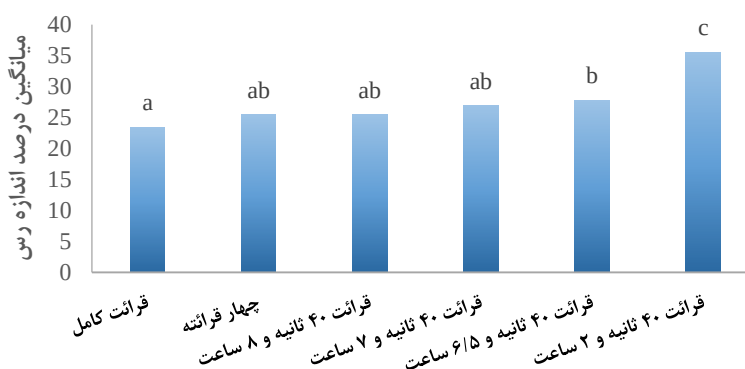


عنوان کردند روش الک نتایج بهتری به دست می‌دهد. از این‌رو در این مطالعه مقدار شن بدست آمده از روش الک با مقادیر شن حاصل از روش‌های قرائت کامل، چهار قرائته و دو قرائته مقایسه شد. تمام روش‌ها R^2 نزدیک به یک داشتند. البته در بین روش‌های مختلف اندازه‌گیری، بیشترین فاصله داده‌ها از خط یک به یک (رنگ مشکی) و پراکندگی داده‌ها از خط برازش (رنگ قرمز) در روش چهار قرائته مشخص شد (شکل ۶).

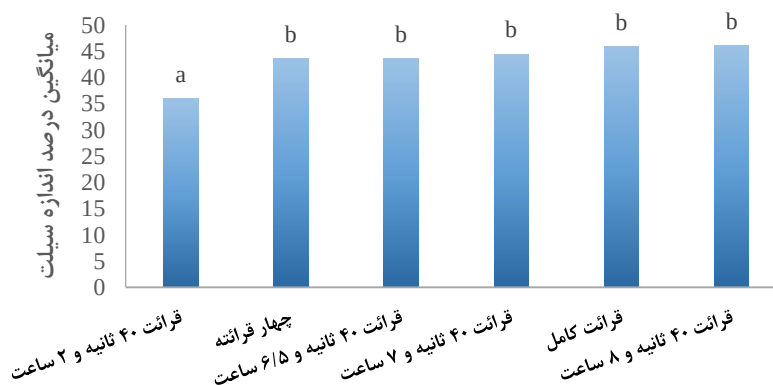
جدول ۴. جدول تجزیه واریانس مقایسه مقادیر رس، سیلت و شن با روش‌های مختلف قرائت بافت خاک

ویژگی	منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
رس	روش‌های قرائت	۵	۳۲۱۵/۷۵**
	خطا	۱۰۶۲	۱۴۸/۷۸
	کل	۱۰۶۷	۱۶۳/۱۵
سیلت	روش‌های قرائت	۵	۳۴۸۱/۷۶**
	خطا	۱۰۶۲	۱۷۴/۷۶
	کل	۱۰۶۷	۱۸۵/۵۷
شن	روش‌های قرائت	۵	۳۷۴/۳۰
	خطا	۱۰۶۲	۴۳۹/۵۷
	کل	۱۰۶۷	۴۳۸/۷۹

** معنی‌داری در سطح احتمال ۹۹ درصد ($p < 0.01$)

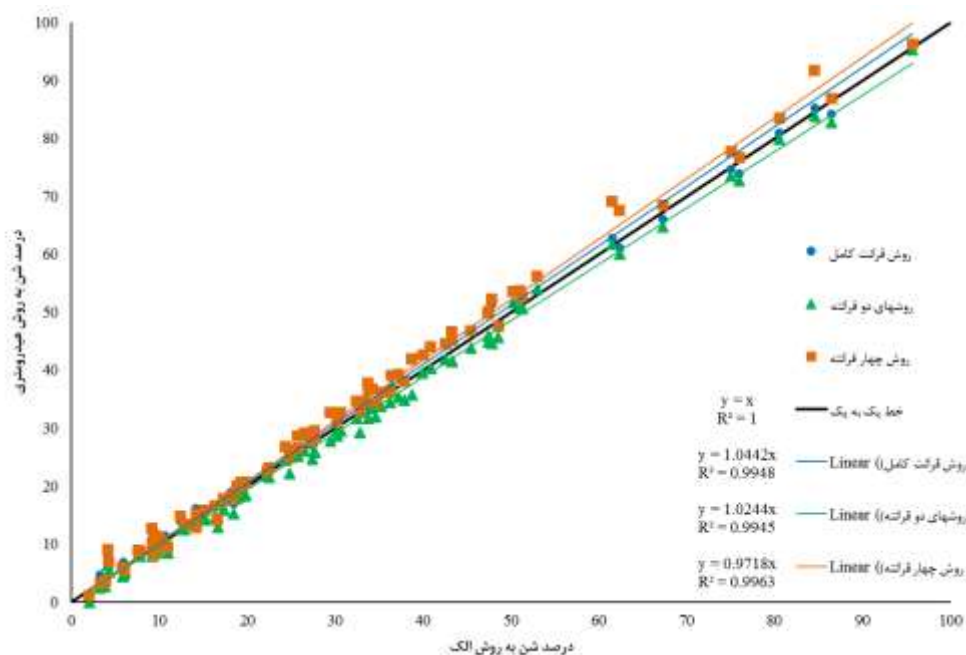


(الف)



(ب)

شکل ۵. مقایسه میانگین درصد اندازه ذرات بین روش‌های مختلف قرائت بافت خاک، رس (الف) و سیلت (ب)



شکل ۶. مقایسه درصد شن اندازه‌گیری شده به روش الک با مقادیر حاصله از قرائت کامل، چهار قرائت و دو قرائت

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۴) و آزمون دانکن (شکل ۵)، برای خاک‌های اندازه‌گیری شده بین مقادیر رس، سیلت و شن بدست آمده از روش‌های قرائت کامل، چهار قرائت، قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و می‌توان به خاطر صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های آزمایشگاهی، هر یک از روش‌های چهار قرائت، قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت را بسته به هدف مطالعه و گستره نمونه‌برداری (تعداد نمونه کم یا زیاد) جایگزین روش قرائت کامل کرد. قطعاً زمانی که تعداد نمونه‌ها زیاد باشد، از بین سه روش یاد شده در بالا، روش‌های با تعداد قرائت کم انتخاب صحیح‌تری می‌باشد. نکته حائز اهمیت در بررسی مقایسات میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رس و سیلت حاصل از روش‌های مختلف (شکل ۵) و معیارهای ارزیابی دقت این روش‌ها (جدول ۲)، میانگین مقادیر رس و سیلت در روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت با اختلاف کمی نسبت به روش چهار قرائت به میانگین نتایج حاصل از قرائت کامل نزدیک‌تر و دقت روش بیشتر است. پس با اطمینان می‌توان روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت را به جای روش چهار قرائت استفاده کرد. نهایتاً روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت با دقت قابل قبولی بسته به اهمیت و مقیاس مطالعه می‌تواند به جای این دو روش در تعیین اندازه ذرات اولیه خاک استفاده شود. تعداد کلاس‌های بافتی حاصل از روش‌های مختلف قرائت بافت نسبت به روش قرائت کامل (شکل ۳) نیز موید این مطلب بود. کمترین تفاوت در تعداد کلاس‌های بافتی به ترتیب مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۱۰ درصد)، چهار قرائت (۱۱ درصد) و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت (۲۰ درصد) بود.

(جعفرزاده و همکاران، ۱۳۸۳)، در مقایسه بافت و کلاس بافت خاک تعیین شده به روش هیدرومتری با تعداد قرائت‌های مختلف، نشان داد کلاس بافت خاک حاصله از روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت، ۴۰ ثانیه و ۶/۵ ساعت و روش چهار قرائت به ترتیب ۴۵/۵، ۵۴/۴ و ۹۰ درصد همخوانی با روش قرائت کامل نشان داد. این محققان روش بایکاس را دارای خطای قابل ملاحظه‌ای دانسته و عنوان کردند که این روش نمی‌تواند درصد واقعی ذرات رس را به دست دهد. در این تحقیق در نمونه خاک‌های رسی به دلیل درصد بالای رس، تقریباً تفاوتی در کلاس بافتی بین روش‌ها مشاهده نشد؛ ولی با حرکت به سمت بافت‌های سبک، تفاوت در کلاس بافت بین چهار شیوه قرائت بیشتر نمایان شد.

همچنین (Owji et al., 2014)، نشان دادند که تفاوت بین زمان‌های قرائت هیدرومتر تاثیر قابل توجهی در تعیین کلاس‌های بافت خاک درشت نداشت؛ ولی در تعیین کلاس‌های ریزبافت موثر بود. همچنین روش دو قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت، دقیق‌ترین پاسخ در ارتباط با تعیین کلاس‌های بافت خاک داشت. هرچند قرائت ۶/۵ ساعته هیدرومتر نیز توانست تا حد زیادی (به صورت متوسط بیش از ۸۰ درصد) به این هدف دست یابد. این محققان زمان قرائت ۲ ساعت را برای ارزیابی اولیه یا بررسی کلی بافت خاک در یک منطقه خاص مفید دانست. با این حال برای کشاورزی دقیق یا مدیریت ویژه- مکان توصیه نشد.



با توجه به هزینه بر و وقت گیر بودن روش استاندارد هیدرومتری، یک روش تک قرائته هیدرومتری برای تعیین بافت خاک ارائه شد (Mozaffari et al., 2024). این قرائت برای تعیین بخش رس استفاده شد. جهت اندازه گیری بخش شن، روش الک به کار برده شد. این محققان برای تعیین بهترین زمان قرائت بخش رس برای ۲۴۶ نمونه خاک ایران و ۶۱ خاک بلژیک، زمان های ۱، ۳، ۶ و ۲۴ ساعت را با روش هیدرومتری اندازه گیری و با مقدار رس بدست آمده از روش استاندارد هیدرومتر مقایسه کردند. بیشترین همبستگی بین رس به دست آمده از روش استاندارد هیدرومتر و رس حاصل از زمان قرائت ۶ ساعت بود.

به طور کلی بر اساس نتایج این مطالعه، با اطمینان می توان روش دو قرائته ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت را به جای روش چهار قرائته استفاده کرد. نهایتاً روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت با دقت قابل قبولی بسته به اهمیت و مقیاس مطالعه می تواند به جای این دو روش در تعیین اندازه ذرات اولیه خاک استفاده شود. تعداد کلاس های بافتی حاصل از روش های مختلف قرائت بافت نسبت به روش قرائت کامل (شکل ۳) نیز موید این مطلب بود. کمترین تفاوت در تعداد کلاس های بافتی به ترتیب مربوط به روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت (۱۰ درصد)، چهار قرائته (۱۱ درصد) و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت (۲۰ درصد) بود.

نتیجه گیری

با توجه به استفاده از روش ها و زمان های مختلف برای تعیین بافت خاک های کشور بدون مقایسه و صحت سنجی آن ها، این مطالعه نشان داد روش های ساده شده هیدرومتری ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و سپس روش چهار قرائته با داشتن دقت بالا (به ترتیب ۹۰ و ۸۹ درصد تطابق کلاس بافت خاک) و عدم تفاوت معنی داری آماری با روش استاندارد قرائت کامل، در تعیین بخش رس و سیلت نسبت به سایر روش های دو قرائته جایگزین قابل اعتماد و مقرون به صرفه ای برای تعیین بافت خاک های ایران هستند. بیش اندازه گیری مقدار رس در تمام روش های قرائت بافت خاک و کم اندازه گیری سیلت در تمام روش ها به غیر از روش قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت در مقایسه با روش قرائت کامل مشاهده شد. روش ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت نیز در بسیاری از کاربردهای با دقت قابل قبول می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در مقابل روش متداول ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت (روش بایکاس) کمترین دقت را داشته و خطای قابل ملاحظه ای ایجاد می کند. همچنین این روش منجر به بیش برآوردی مقادیر رس و سیلت و تعیین کلاس بافت سنگین تر می گردد. بنابراین استفاده از این روش در مطالعاتی که به داده های دقیق بافت نیاز دارند، توصیه نمی شود.

با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس و آزمون دانکن، بین مقادیر رس، سیلت و شن بدست آمده از روش های قرائت کامل، چهار قرائته، قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت در سطح احتمال ۹۹ درصد ($P < 0.01$) اختلاف معنی داری وجود نداشت و می توان به خاطر صرفه جویی در وقت و هزینه های آزمایشگاهی، هر یک از روش های چهار قرائته، قرائت ۴۰ ثانیه و ۸ ساعت و قرائت ۴۰ ثانیه و ۷ ساعت را بسته به هدف مطالعه و گستره نمونه برداری (تعداد نمونه کم یا زیاد) جایگزین روش قرائت کامل کرد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی موسسه تحقیقات خاک و آب کرج، ایران انجام شد.

مشارکت نویسندگان

رویا طلوعی: طراحی پژوهش، انجام آزمایش و گردآوری داده ها، انجام محاسبات و تجزیه و تحلیل آماری داده ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، نهایی سازی مقاله. کریم شهبازی: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش و مدیر پروژه، بررسی و کنترل نتایج، مطالعه و بازبینی مقاله، اصلاح، نهایی سازی مقاله.

محمدحسین محمدی: طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله، نهایی سازی مقاله.

میثم رضایی: طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله، نهایی سازی مقاله.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان از هیچ نوع فناوری مبنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش استفاده نکرده اند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود وظیفه می‌دانند از حمایت‌های مالی موسسه تحقیقات خاک و آب کرج، ایران، که در اجرای پژوهش حاضر نقش مهمی داشت، صمیمانه تشکر و قدردانی کنند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌هاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- آریا، پروین و میرخانی، رسول (۱۳۸۴). روش‌های اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک. نشریه فنی شماره ۴۷۹. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور. بای‌بوردی، محمد (۱۳۹۳). فیزیک خاک. ویرایش اول. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- جعفرزاده، علی‌اصغر؛ فرج‌زاده، داود و نیشابوری، محمد (۱۳۸۳). مقایسه بافت و کلاس بافت خاک تعیین شده به روش هیدرومتر با تعداد قرائت‌های مختلف. نهمین کنگره علوم خاک، تهران، ایران.
- شهبازی، کریم؛ مارزی، مصطفی؛ محمدی، محمدحسین؛ اسدی، حسین؛ فتحی گردیلانی، ارژنگ؛ هاشمی نسب زواره، کبری؛ طلوعی، رویا؛ بهشتی، مهدی؛ آویژگان، ایوب و چراغی، میثم (۱۴۰۳). روش‌های تجزیه خاک: نمونه‌برداری، روش‌های شیمیایی و فیزیکی. چاپ اول. کرج: موسسه تحقیقات خاک و آب کشور.
- یاوری، مرتضی؛ محمدی، محمدحسین و شهبازی، کریم (۱۳۹۹). مقایسه برخی روش‌های اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و ارائه زمان‌های مناسب برای روش چهار قرائت تعیین بافت خاک. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱ (۱۲)، ۳۰۱۵-۲۹۹۹.

REFERENCES

- Ariya, P., & Mirkhani, R. (2005). Methods of Soil Analysis [Technical Report]. *Soil and Water Research Institute*, No:479 . (in Persian).
- Baybordi, M. (2015). *Soil Physics*. Tehran:University of Tehran. (in Persian).
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465 .
- Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle-size analysis. In *Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. edited by Black, C. A. *Agronomy Monographs*. 9, 545-567 .
- Gee, G., & Bauder, J. (1979). Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 43(5), 1004-1007 .
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, 5, 255-293 .
- Jafarzadeh, A. A., Farajzadeh, D., & Neyshabouri, M. R. (2005). *Comparison of soil texture and texture class determined by hydrometer method with different readings*. The 9th Soil Science Congress of Iran-Tehran. (in Persian).
- Kaddah, M. (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.
- Klute, A. (1986). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods* .
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press .
- Liu, T., Odell, R., Etter, W., & Thornburn, T. (1966). A comparison of clay contents determined by hydrometer and pipette methods using reduced major axis analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 30(6), 665-669 .
- Mozaffari, H., Moosavi, A. A., Baghernejad, M., & Cornelis, W. (2024). Revisiting soil texture analysis: Introducing a rapid single-reading hydrometer approach. *Measurement*, 228, 114330 .



- Owji, A., Esfandiarpour Boroujeni, I., Kamali, A., Hosseinifard, S. J., & Bagheri Bodaghabadi, M. (2014). The effects of hydrometer reading times on the spatial variability of soil textures in southeast Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(4), 1491-1499 .
- Pham, H. (2019). A new criterion for model selection. *Mathematics*, 7(12), 1215 .
- Scheldrick, B. (1993). Particle size distribution. *Soil sampling and methods of analysis*, 499-512 .
- Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Fathi Gerdelidani, A., Hasheminasab Zavareh, K. S., . . . Cheraghi, M. (2024). *Methods of Soil Analysis: Sampling, Chemical and Physical Methods*. Soil and Water Research Institute . (in Persian).
- Shein, E. (2009). The particle-size distribution in soils: problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification. *Eurasian soil science*, 42(3), 284-291 .
- Skaggs, T., Arya, L., Shouse, P., & Mohanty, B. (2001). Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(4), 1038-1044 .
- USDI. (1982). Particle-size analyses. Chapter 4 of land classification techniques and standards. *United States Department of the Interior, Washington, DC* .
- Yavari, M., Mohammadi, M. H., & Shahbazi, K. (2021). Comparison of some methods for measuring primary soil particle size distribution and introducing appropriate times for the four-reading method for determining soil texture. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 2999-3015 . (in Persian).