



Publisher: Soil Science Society of Iran

Journal of Soil Research
(Soil and Water Sci.)

<https://srjournal.areeo.ir/>


Quantitative Relationships between Soil Organic Matter and Physicochemical Properties in a Semi-Arid Region

Morteza Yavari^a, Ali reza Vaezi^{a*} , and Mohammad Sadegh Askari^a 

^a Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Article Info

Article Type

Research Article

Received

April 13, 2026

Revised

June 14, 2026

Accepted

June 29, 2026

Published online

September 06, 2026

Keywords

Aggregate stability,
Bulk density,
Cation exchange capacity,
Discriminant analysis,
Soil management.

*Corresponding author's email

mortazayavari90@gmail.com

Extended Abstract

Background and Objectives: Soil organic matter is a critical component of productive soils. It influences a wide range of physical, chemical, and biological attributes and processes, including the formation and stabilization of soil aggregates, nutrient cycling, water retention, disease suppression, and cation exchange capacity. The relationships between soil organic matter (SOM) and soil physicochemical properties are profound and multifaceted. One of the main research gaps is the lack of comprehensive, integrated, and quantitative studies that simultaneously investigate the relationships between a wide range of soil physical and chemical properties and SOM under semi-arid climatic conditions. Most previous studies have focused on one or two properties and do not provide a holistic understanding of this complex system. Therefore, the primary objective of this study was to examine the relationships between SOM and selected soil physical and chemical properties, including particle size distribution, structural attributes, salinity, sodium content, and fertility.

Materials and Methods: This study was conducted in the semi-arid region of Zanjan. Sixty-eight sampling points were selected from different land uses using available soil maps to examine the relationships between SOM and various physical and chemical soil properties. Standard physical and chemical laboratory methods were used to measure particle size distribution, aggregate stability, bulk density, electrical conductivity, pH, organic matter content, and cation exchange capacity. Descriptive statistics, Pearson correlation, linear regression, analysis of variance (ANOVA), and discriminant analysis were employed to analyze the relationships between SOM and soil properties, and variables showing significant correlations with SOM were further analyzed using ANOVA and discriminant analysis to investigate differences among SOM classes (<1%, 1–2%, 2–3%, and >3%). All statistical analyses, data visualizations, and mean comparison procedures were carried out using Microsoft Excel (2016) and Python (version 3.x).

Results: The results showed that cation exchange capacity ($R^2 = 0.31$, $p < 0.01$), bulk density ($R^2 = 0.28$, $p < 0.01$), wet aggregate mean weight diameter (MWDwet) ($R^2 = 0.25$, $p < 0.01$), wet aggregate geometric mean diameter (GMDwet) ($R^2 = 0.24$, $p < 0.01$), and dry aggregate geometric mean diameter (GMDdry) ($R^2 = 0.22$, $p < 0.01$) exhibited stronger relationships with SOM than the other soil properties examined. One-way ANOVA performed for four SOM classes (<1%, 1–2%, 2–3%, and >3%) revealed substantial differences among the groups in terms of soil structural properties and cation exchange capacity. Specifically, significant differences in GMDwet were observed between the <1% SOM group and the 2–3% and >3% SOM groups, as well as between the 1–2% and >3% SOM groups. For MWDwet, significant differences were detected between the <1% SOM group and the 2–3% and >3% SOM groups, and between the 1–2% SOM group and the 2–3% and >3% SOM groups ($p < 0.000001$, $F = 12.23$, and $p < 0.000001$, $F =$

12.17, respectively). Furthermore, discriminant analysis indicated that soil physical properties were more strongly associated with SOM than soil chemical properties.

Conclusion: This study demonstrated that SOM is one of the key factors influencing soil quality, exerting significant effects on both soil physical and chemical properties. The results of correlation, linear regression, and one-way analyses of variance indicated that CEC increased with increasing SOM content. Among all measured soil properties, CEC exhibited the strongest relationship with SOM and showed a significant increase across higher SOM levels. Strong relationships were also observed between SOM and soil physical properties. In particular, increasing SOM was associated with significant improvements in soil aggregate stability, total porosity, and soil moisture content, while bulk density decreased significantly. Furthermore, discriminant analysis revealed that the influence of SOM was more strongly reflected in soil physical properties than in chemical properties. In both stages of the discriminant analysis, structural soil attributes exhibited the highest discriminant coefficients among the SOM groups (<1%, 1–2%, 2–3%, and >3%), highlighting the close association between SOM and soil structural characteristics. Following structural attributes, cation exchange capacity ranked as the second most important discriminating variable.

Cite this article: Yavari, M., Vaezi, A.R., Askari, M.S., 2026. Quantitative Relationships between Soil Organic Matter and Physicochemical Properties in a Semi-Arid Region. Research Article, *Journal of Soil Research*, 40 (2), pp 127-146.



DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372526.816>

Publisher: Soil Science Society of Iran



نشریه پژوهش‌های خاک

(علوم خاک و آب)

<https://srjournal.areeo.ir/>



روابط کمی بین ماده آلی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در یک منطقه نیمه‌خشک

مرتضی یآوری^۱، علی‌رضا واعظی^{۱*} و محمدصادق عسکری^۱

^۱ گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵

واژه‌های کلیدی

پایداری خاک‌دانه‌ها،

تحلیل تشخیص،

جرم مخصوص ظاهری،

ظرفیت تبادل کاتیونی،

مدیریت خاک.

* ایمیل نویسنده مسئول

mortazayavari90@gmail.com

ماده آلی خاک می‌تواند نقش کلیدی در بهبود ساختمان خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی داشته باشد. این پژوهش به منظور بررسی ارتباط ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با محتوای ماده آلی خاک در استان زنجان انجام شد. بدین منظور ۶۸ نقطه براساس نقشه‌های مطالعات خاک‌شناسی و تنوع بافتی انتخاب گردید. ویژگی‌های مختلف فیزیکی (رس، سیلت، شن، سنگریزه، جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل، میانگین هندسی و وزنی خاک‌دانه‌ها در حالت تر و خشک و رطوبت اولیه) و شیمیایی (ظرفیت تبادل کاتیونی، کرنات کلسیم، واکنش خاک و قابلیت هدایت الکتریکی) در خاک‌ها اندازه‌گیری شد. تحلیل داده‌ها با روش‌های همبستگی پیرسون، رگرسیون خطی، تحلیل واریانس و تشخیصی انجام شد. نتایج نشان داد ظرفیت تبادل کاتیونی ($R^2 = 0.31, p < 0.01$)، جرم مخصوص ظاهری ($R^2 = 0.28, p < 0.01$)، میانگین وزنی ($R^2 = 0.25, p < 0.01$) و هندسی قطر خاک‌دانه‌های پایدار در آب ($R^2 = 0.24, p < 0.01$) و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها با الک خشک ($R^2 = 0.22, p < 0.01$)، نسبت به سایر ویژگی‌های خاک، با محتوای ماده آلی همبستگی بیشتری داشتند. تحلیل واریانس برای چهار گروه از مقدار ماده آلی خاک ($1 < 2-3$ و $4 >$ درصد) نیز نشان داد که میان گروه‌ها تفاوت‌های اساسی از نظر ویژگی‌های ساختمانی و ظرفیت تبادل کاتیونی وجود داشت. همچنین بکارگیری تحلیل تشخیص نشان داد که وابستگی ویژگی‌های فیزیکی به ماده آلی بیشتر از ویژگی‌های شیمیایی بود. به‌طور کلی، میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها و ظرفیت تبادل کاتیونی به‌ترتیب بیشترین ارتباط را با ماده آلی خاک نشان دادند.

استناد: یآوری، م.، واعظی، ع.ر.، عسکری، م. ص.، ۱۴۰۵. روابط کمی بین ماده آلی خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در یک منطقه نیمه‌خشک.

مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۲) ۴۰، ص ۱۲۷-۱۴۶.

DOI: <https://doi.org/10.22092/IJSR.2026.372526.816>



مقدمه

ماده آلی خاک^۱ (SOM) به‌عنوان پیچیده‌ترین جزء خاک، مجموعه‌ای ناهمگن از ترکیبات آلی است که عمدتاً از تبدیل و انباشت میکروبی بقایای گیاهی و جانوری حاصل می‌شود و ترکیباتی با ساختار پیچیده و پایدار را شامل می‌شود (Naveen, 2025, Dou et al., 2025). این ماده عمدتاً از کربن تشکیل شده و به‌طور معمول کمتر از ۱۰ درصد از وزن خاک‌های معدنی را شامل می‌شود، اما تأثیر آن بر حاصلخیزی و عملکرد زیست‌بوم‌های خاکی بسیار فراتر از این سهم وزنی ناچیز است (Weil & Brady, 2016). ماده آلی خود به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود: بقایای گیاهی و جانوری نسبتاً تازه و هوموس که محصول نهایی تجزیه بوده و نسبتاً پایدار است (Stevenson, 1994). اهمیت ماده آلی خاک تنها به نقش آن در حاصلخیزی خاک محدود نمی‌شود، بلکه این ماده به‌عنوان بزرگترین مخزن کربن در کره زمین، نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم چرخه جهانی کربن و کاهش غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر از طریق فرآیند ترسیب کربن ایفا می‌کند (Lal, 2004). از دست رفتن این مخزن عظیم کربن نه تنها منجر به تخریب خاک می‌شود، بلکه می‌تواند به تشدید پدیده تغییر اقلیم جهانی بینجامد (Smith, 2016). در این میان مدیریت خاک با هدف افزایش محتوای ماده آلی شامل روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی، مدیریت بقایای کشاورزی، اقدامات اصلاحی خاک، مدیریت حاصلخیزی و چرخه مواد غذایی در خاک، می‌تواند در بهبود کیفیت خاک بسیار مؤثر باشد (Bronick & Lal., 2005).

ماده آلی خاک در مناطق نیمه‌خشک به‌واسطه اثر آن روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک حائز اهمیت است. تغییرات کوچک و افزایش جزئی در سطح ماده آلی می‌تواند تأثیرات بسیار بزرگی بر روی نگهداری آب، پایداری ساختمان خاک و در نهایت عملکرد محصولات و پایداری زیست‌بوم داشته باشد (Baveye et al., 2020). شواهد تجربی نشان می‌دهد که در خاک‌های با ماده آلی بسیار اندک نیز (زیر ۰/۵ درصد)، رابطه بین محتوای ماده آلی و شاخص‌های کیفی خاک می‌تواند معنی‌دار باشد، به‌گونه‌ای که حتی افزایش‌های جزئی می‌تواند اثرهای قابل ملاحظه‌ای را به دنبال داشته باشد (Le Guyader et al., 2024; Liu et al., 2024). از منظر ویژگی‌های فیزیکی، ماده آلی خاک از طریق مکانیسم‌های چندگانه‌ای مانند عمل به‌عنوان عامل اتصال، ایجاد شبکه هیف قارچی و تولید ترکیبات سیمانی میکروبی، ذرات اولیه را به یکدیگر متصل کرده و منجر به تشکیل و تثبیت خاک‌دانه‌ها می‌شود و کارایی این فرآیند به شدت به کیفیت بیوشیمیایی ماده آلی و برهم‌کنش آن با کانی‌های خاک و

جوامع میکروبی بستگی دارد (Guhra et al., 2022; Yudina & Kuzyakov, 2023; Wu et al., 2024; Hamza et al., 2025). پایداری خاک‌دانه‌ها، سنگ بنای یک ساختمان خوب خاک محسوب شده و به‌طور مستقیم بر تهویه، نفوذپذیری و مقاومت خاک در برابر فرسایش آبی و بادی تأثیر می‌گذارد (Bronick & Lal, 2005). همچنین از جنبه شیمیایی، ماده آلی منبع اصلی تأمین عناصر غذایی ضروری و ریزمغذی‌ها برای گیاهان است که عمدتاً از طریق فرآیند معدنی‌شدن توسط جمعیت میکروبی خاک آزاد می‌شوند (Janzen, 2006). افزون بر این، به‌دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار (مانند کربوکسیل و فنولیک) که بار منفی ایجاد می‌کنند، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک را به میزان چشمگیری افزایش داده و از آبشویی عناصر غذایی با ارزش مانند پتاسیم، کلسیم و منیزیم جلوگیری می‌کند (Sparks, 2003).

مطالعه ماده آلی خاک و درک اهمیت آن، تاریخچه‌ای طولانی و غنی دارد که نشان‌دهنده تکامل تفکر علمی در این حوزه است. در قرن نوزدهم، دانشمندانی مانند Von Liebig (1943) با کشف نقش عناصر غذایی در رشد گیاه، بستر اولیه برای درک اهمیت مواد آلی به‌عنوان منبع این عناصر را فراهم آوردند. در اوایل قرن بیستم، Jenny (1941) در تدوین معادله تشکیل خاک، موقعیت ماده آلی را به‌عنوان تابعی از عوامل اقلیم، موجودات زنده، توپوگرافی، ماده مادری و زمان تثبیت کرد و آن را به‌عنوان یک شاخص کلیدی در پیدایش خاک‌ها معرفی نمود. مدل مفهومی مشهور Tisdall and Oades (1982) در مورد تشکیل خاک‌دانه‌ها و نقش متفاوت هیف قارچ‌ها و مواد آلی نقطه عطفی در این زمینه بود. این مدل بعدها توسط Six et al. (2004) بازبینی و به‌روز شد و نقش ریزخاک‌دانه‌ها به‌عنوان هسته اولیه برای تشکیل خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر مورد تأکید قرار گرفت. مطالعات اخیر نیز به بررسی ارتباط ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی با ماده آلی پرداخته‌اند. در این راستا پژوهش Song et al. (2024) نشان داد که تنش شوری با محدود کردن فعالیت میکروبی، مکانیسم‌های سنتی ترسیب کربن را مختل می‌کند. یک مطالعه جامع دیگر در مناطق خشک جنوب شرق نیومکزیکو (Ben Ali, and Shukla, 2024) حاکی از این بود که ذخایر کربن آلی خاک به‌شدت به محتوای رس و سیلت وابسته است. پژوهش Lal (2020) نیز در این راستا نشان داد در خاک‌های با ماده آلی کمتر از ۱ تا ۲ درصد (بسته به بافت خاک)، ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌شدت به تغییرات اندک ماده آلی حساس هستند (Lal, 2020). همچنین، مطالعات آزمایشگاهی در اسپانیا (Villafuerte et al., 2024) بر روی اثر انواع مواد آلی بر

¹ Soil Organic Matter

ماده آلی دارند به صورت کمی شناسایی نموده و با استفاده از تحلیل‌های مختلف آماری رتبه‌بندی نماید. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای علمی برای تدوین راهکارهای مدیریتی بوم‌شناختی جهت حفظ و افزایش ماده آلی خاک به‌منظور ارتقای وضعیت هیدرولوژیکی منطقه، پایداری سیستم‌های تولید کشاورزی و بهبود امنیت غذایی در این مناطق حساس فراهم آورد.

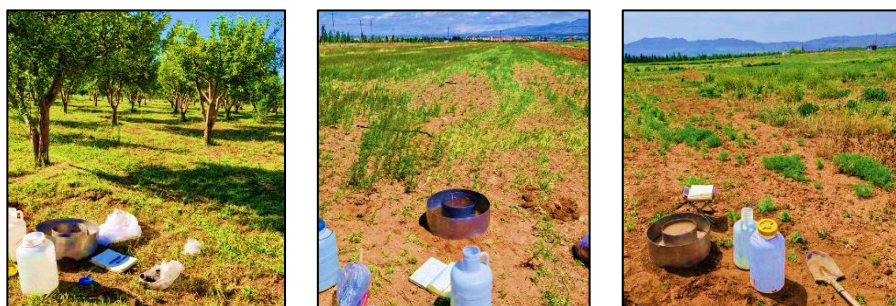
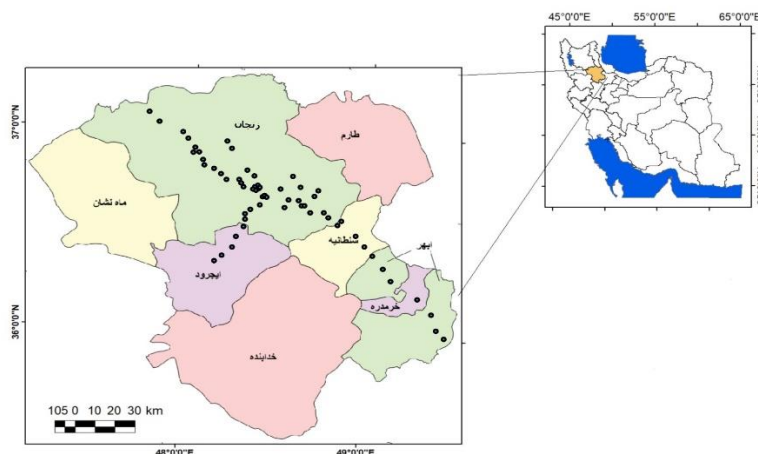
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه‌برداری

این مطالعه در منطقه نیمه‌خشک استان زنجان انجام شد. مطابق مطالعات پیشین (Shabani et al., 2020) و بر اساس سامانه رده‌بندی خاک‌های آمریکا (USDA)، خاک‌های منطقه شامل آلفی سول (در ارتفاعات جنگلی)، اینسپتی سول (در دشت‌ها)، اریدی سول (در مناطق خشک‌تر) است (Soil Survey Staff, 2014). برای بررسی ارتباط محتوای ماده آلی با مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، ۶۸ نقطه از این منطقه با استفاده از اطلاعات موجود از نقشه‌های خاک‌شناسی از کاربری‌های مختلف انتخاب شدند؛ به‌گونه‌ای که تنوع غالب خاک‌های منطقه را شامل شود و نمونه‌ها نمایانگر شرایط حاکم بر منطقه مورد پژوهش باشند (شکل ۱). با این حال، ممکن است ناهمگنی محتوای ماده آلی خاک وجود داشته باشد. بر این اساس مجموعاً ۴۵ نقطه در کاربری مرتع، ۱۳ نقطه زراعی (گندم، برنج و سیب زمینی)، ۸ نقطه باغی (سیب، زرد آلو، انگور و گردو) و ۲ نقطه جنگلی مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نمونه‌هایی از عمق صفر تا ۶۰ سانتیمتری به‌صورت دست‌خورده و صفر تا ۲۰ سانتیمتری به‌صورت دست‌نخورده تهیه و پس از آماده‌سازی اولیه به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های دست‌خورده برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. در مقابل، نمونه‌های دست‌نخورده به‌منظور اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری به‌کار گرفته شد و برای لایه سطحی خاک قابل تفسیر است.

ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی خاک در منطقه نیمه‌خشک نشان داد که حتی پس از کاربرد مواد آلی، افزایش هدایت الکتریکی (EC) به‌عنوان یک پیامد پایدار باقی می‌ماند و می‌تواند منافع حاصل از افزایش ماده آلی را خنثی کند.

مرور پژوهش‌های پیشین از جمله مطالعات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که اکثر مطالعات منحصر بر یک جنبه (مثلاً رابطه ماده آلی با پایداری خاک‌دانه‌ها) متمرکز شده‌اند (Jafari et al., 2016; Moradi et al., 2014; Shabani Rofchae et al., 2025; Zandi, 2022) یا صرفاً به ارزیابی اثر یک نوع ماده آلی خاص (ورمی‌کمپوست، بیوجار) بر چند ویژگی محدود پرداخته‌اند (Ahmadi et al., 2012; Karami et al., 2019; Khormali et al., 2017; Mohkami et al., 2024; Teymouri et al., 2023; Torajzadeh, 2024). از این‌رو مطالعات جامع، یکپارچه و کمی‌سازی شده که به‌طور همزمان روابط بین طیف وسیعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی را با ماده آلی در شرایط اقلیمی منطقه نیمه‌خشک مورد بررسی قرار داده و این ویژگی‌ها را با روش‌های مختلف آماری (شامل همبستگی پیرسون، رگرسیون خطی، تحلیل واریانس یک‌طرفه و تحلیل تشخیصی) رتبه‌بندی نماید کمتر صورت گرفته است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش بررسی ارتباط برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی؛ از جمله ویژگی‌های ساختمانی، توزیع اندازه ذرات، ظرفیت نگهداری آب، شوری و حاصلخیزی با محتوای ماده آلی خاک است. بر اساس مبانی نظری و پیشینه پژوهش، اثر ماده آلی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک وابسته به برخی شرایط است؛ با این حال در مناطق نیمه‌خشک به‌دلیل محدودیت ماده آلی و حساسیت بالای ساختمان خاک، نقش آن در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و به‌ویژه پایداری خاک‌دانه‌ها معمولاً برجسته‌تر گزارش شده است. همچنین می‌توان بیان نمود ظرفیت تبادل کاتیونی، پایداری خاک‌دانه‌ها، متوسط اندازه خاک‌دانه‌ها با محتوای ماده آلی همبستگی مثبت و جرم مخصوص ظاهری با محتوای ماده آلی همبستگی منفی داشته باشند. این پژوهش می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها را که بیشترین ارتباط را به محتوای



شکل ۱- مناطق مورد پژوهش و موقعیت نقاط نمونه‌برداری (استان زنجان، ۱۴۰۳).
Figure 1- Study areas and locations of sampling points (Zanzan Province, 2024).

$$P_{\text{clay}} = P_{[6h]} - \left(\frac{P_{[6h]} - P_{[24h]}}{\ln \left(\frac{d_{[6h]}}{d_{[24h]}} \right)} \right) \left(\ln \left(\frac{d_{[6h]}}{0.002} \right) \right) \quad \text{رابطه (۹)}$$

P_{Clay} : درصد رس خاک، $P[h_6]$ و $P[h_{24}]$: به ترتیب درصد ذرات اندازه‌گیری شده در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت، $d[h_6]$ و $d[h_{24}]$: به ترتیب قطر ذرات اندازه‌گیری شده متناظر با زمان ۶ و ۲۴ ساعت (میلی‌متر).

همزمان با خوانش هیدرومتر، دمای تعلیق و نمونه شاهد نیز در فواصل زمانی منظم ثبت شد. سرعت سقوط با استفاده از عمق مؤثر و زمان خوانش محاسبه و همراه با داده‌های گرانروی تصحیح شده با دما و غلظت و جرم مخصوص حقیقی خاک در رابطه استوکس قرار داده شده و اندازه ذره محاسبه شد. بدین‌منظور، برای همه خوانش‌ها 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 به دست آمد. همچنین گرانروی و چگالی محلول به ترتیب از روابط ۵ و ۶ محاسبه گردید.

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

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

در این پژوهش، به منظور بررسی ارتباط محتوای ماده آلی با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بدون تکرار روی نمونه‌های خاک انجام شد. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک با استفاده از روش ترکیبی هیدرومتری و الک انجام شد. بدین‌منظور بر اساس طبقه‌بندی USDA ذرات درشت‌تر از 0.075 میلی‌متر با استفاده از روش الک (270 مش) مطابق دستورالعمل‌های استاندارد (Gee & Bauder, 1986) تفکیک شدند. سهم ذرات ریزتر از 0.075 میلی‌متر شامل سیلت و رس نیز به روش هیدرومتری از روش میان‌یابی نیمه‌لگاریتمی (لگاریتم اندازه در مقابل فراوانی ذرات) براساس دستورالعمل معرفی‌شده توسط (Yavari et al, 2021) اندازه‌گیری شد. به‌طوری که قرائت‌های انجام‌شده در زمان‌های ۶ و ۲۴ ساعت برای تعیین درصد رس به کار رفت (رابطه ۹). این روش در بخش رس با میانگین خطای مطلق 0.37 درصد، خطای اندازه‌گیری بسیار اندکی نسبت به خوانش کامل هیدرومتری، برای خاک‌های ایران دارد (Yavari et al, 2021). درصد سیلت نیز از اختلاف بین مجموع درصد ذرات اولیه با مجموع درصد شن و رس محاسبه شد.

به‌منظور بررسی ویژگی‌های سنگریزه‌ای و تخلخل کل از دستورالعمل‌های استاندارد ارائه‌شده توسط Gee & Bauder (1986) استفاده شد. پایداری خاک‌دانه‌ها با الک تر و متوسط قطر خاک‌دانه‌ها با الک خشک بر اساس روش Kemper & Rosenau (1986) تعیین شد. بدین‌منظور میانگین وزنی ($MWD_{wet \text{ and dry}}$) و میانگین هندسی ($GMD_{wet \text{ and dry}}$) قطر خاک‌دانه‌ها در دو حالت تر (wet) و خشک (dry) محاسبه شدند. برای توصیف کامل‌تر پایداری خاک‌دانه‌ها، از شاخص‌های MWD و GMD به‌طور مکمل استفاده شد؛ به‌طوری که GMD نمایان‌گر سهم خاک‌دانه‌های درشت و پایدار و GMD منعکس‌کننده تغییرات خاک‌دانه‌های ریزتر و حساس به تخریب است (Kemper & Rosenau, 1986). برای محاسبه میانگین وزنی ($MWD_{wet \text{ and dry}}$) از روابط ۱۰ و ۱۱ و میانگین هندسی ($GMD_{wet \text{ and dry}}$) قطر خاک‌دانه‌ها از روابط ۱۰ و ۱۲ استفاده شد.

$$W_i = \frac{W_i(a+s) - W_i(s)}{\sum_{i=1}^n W_i(a+s) - \sum_{i=1}^n W_i(s)} \times 100 \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$MWD_{wet \text{ and dry}} = \sum_{i=1}^n W_i \times \bar{X}_i \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$GMD_{wet \text{ and dry}} = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \log \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

در این روابط، W_i : جرم خاک‌دانه‌های باقیمانده روی هر الک بر حسب گرم به جرم کل خاک‌دانه‌ها بر حسب گرم، W_i : $(a+s)$ جرم خاک باقیمانده روی هر الک (شامل خاک و شن) بر حسب گرم، $W_i(s)$: جرم شن روی هر الک بر حسب گرم و $\bar{X}_i$: میانگین قطر خاک‌دانه‌ها روی هر الک بر حسب میلی‌متر است. جرم مخصوص ظاهری نمونه‌های دست‌نخورده نیز با بهره‌گیری از سیلندر فلزی با قطر ۵ سانتی‌متر برای عمق صفر الی ۲۰ سانتی-متری به‌روش Culley (1993) اندازه‌گیری شد. از ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها قابلیت هدایت الکتریکی و واکنش خاک در گل اشباع (Thomas, 1996) با استفاده از pH متر دیجیتالی، محتوای کربن آلی (Walkley & Black, 1934) آلی براساس اکسیداسیون ماده آلی خاک توسط دی‌کرومات پتاسیم در محیط اسیدی (با استفاده از ضریب وان بملن ۱/۷۲۴ به درصد ماده آلی تبدیل گردید) و کربنات کلسیم معادل براساس روش خنثی‌سازی اسیدی (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شدند. ظرفیت تبادل کاتیونی نیز با روش آمونیوم استات (Sumner & Miller, 1996) تعیین و با توجه به‌میزان NH_4^+ جذب‌شده و وزن نمونه خاک با استفاده از (رابطه ۱۳) محاسبه شد:

$$CEC = \frac{\text{meq } NH_4^+}{\text{g soil}} \times 100 \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

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

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

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

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

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

در رابطه ۱، C : غلظت ناشی از حضور ذرات ($g \text{ l}^{-1}$)، R : خوانش هیدرومتری تعلیق ($g \text{ l}^{-1}$) و R_L : خوانش هیدرومتری شاهد ($g \text{ l}^{-1}$) است. در رابطه ۲، P : درصد نسبی ذرات کوچکتر از قطر مورد نظر (%) و C_0 : جرم خاک معادل مورد استفاده در یک لیتر تعلیق ($g \text{ l}^{-1}$) است. در رابطه ۳، V : سرعت سقوط ذرات (cm sec^{-1})، h : عمق مؤثر هیدرومتر (cm) و t : زمان (sec) است. در رابطه ۴، d : قطر ذرات سقوط‌یافته (cm)، h : عمق مؤثر هیدرومتر (cm)، t : زمان (sec)، شتاب گرانش (cm sec^{-2})، p_s : جرم مخصوص حقیقی ($g \text{ cm}^{-3}$)، p_f : جرم مخصوص مایع ($g \text{ cm}^{-3}$) و η : گرانیوی ($g \text{ cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$) است. در رابطه ۵، η_0 : گرانیوی محلول در دمای T ($10^{-3} \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)، η_0 : گرانیوی آب در دمای T ($10^{-3} \text{ Kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) و C_s : غلظت هگزا متافسفات سدیم ($g \text{ ml}^{-1}$) است. در رابطه ۶، p_f : چگالی مایع ($g \text{ cm}^{-3}$)، p_0 : چگالی آب در دمای T ($g \text{ cm}^{-3}$) و C_s : غلظت هگزا متافسفات سدیم ($g \text{ ml}^{-1}$) است.

عمق مؤثر هیدرومتر استاندارد (h) تابعی از خوانش هیدرومتر (R) و همچنین ابعاد هیدرومتر است (Kaddah, 1974). عمق مؤثر هیدرومتر استاندارد نیز از رابطه ۷ بدست می‌آید (Gee and Or, 2002):

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

L_1 : فاصله طول ساقه هیدرومتر از بالای حباب تا نشان خوانش هیدرومتر (cm)، L_2 : طول سراسر حباب هیدرومتر (cm)، V_B : حجم حباب هیدرومتر (cm^3) و A : سطح مقطع سیلندر ته‌نشینی (cm^2) است. پارامترهای فوق برای هیدرومتر ASTM 152H و سیلندر ته‌نشینی استاندارد پژوهش برابر: $L_1 = 10.4 \text{ cm}$ ، $L_2 = 13.8 \text{ cm}$ ، کل بخش درجه‌بندی شده هیدرومتر برابر $8/2$ سانتیمتر، اندازه هر درجه هیدرومتر برابر 0.164 سانتیمتر، $V_B \sim 67.0 \text{ cm}^3$ و $A \sim 27.8 \text{ cm}^2$ است. با جایگذاری مقادیر در رابطه ۷ و حل آن نهایتاً رابطه ۸ به‌دست می‌آید:

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

R : قرائت تصحیح نشده هیدرومتر است.

که در آن CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی به واحد میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم خاک (meq/100g) است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تحلیل داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، ترکیبی از آمار توصیفی و استنباطی مورد استفاده قرار گرفت: ۱) آمار توصیفی مانند میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، حداقل و حداکثر ویژگی برای کلیه متغیرها انجام شد، ۲) نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد و داده‌هایی که توزیع نرمال نداشتند با روش‌های تبدیل لگاریتمی و ریشه دوم نرمال شدند. همچنین داده‌های پرت بررسی و از تحلیل‌های بعدی حذف شدند ۳) به منظور بررسی رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها با محتوای ماده آلی، ضریب همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی محاسبه شد ۴) برای بررسی وابستگی طبقه‌بندی‌شده‌ی ماده آلی با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها که دارای همبستگی معنی‌دار با این ویژگی بودند؛ از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده شد. به‌طوری‌که ۶۸ نمونه مورد بررسی بر اساس ویژگی‌های خاک و با توجه به میانگین مقادیر این ویژگی‌ها، در قالب گروه‌های مقایسه‌ای طبقه‌بندی شده و سپس این گروه‌ها در هر ویژگی با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. بدین منظور ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها بر اساس مقادیر ماده آلی در سه سطح گروه‌بندی شدند. گروه اول با مقادیر ماده آلی کمتر از ۱ درصد، گروه دوم بین ۱ تا ۲ درصد ماده آلی و گروه سوم بیش از ۳ درصد ماده آلی طبقه‌بندی شدند. گروه‌های مقایسه‌ای به منظور کاهش پراکندگی داده‌ها، افزایش قدرت تفکیک آماری و امکان مقایسه معنی‌داری و وابستگی ویژگی‌های خاک به محتوای ماده آلی انجام شد. و ۵) در ادامه ویژگی‌هایی که همبستگی معنی‌داری با محتوای ماده آلی داشتند به عنوان ورودی برای تحلیل تشخیصی استفاده شدند. به‌طوری‌که ویژگی‌هایی که همبستگی بالایی با ماده آلی داشتند و از طرفی این ویژگی‌ها با هم همبستگی بالایی ($r < 0.7$) داشتند برای انجام تحلیل به منظور جلوگیری از هم‌پوشانی از تحلیل تشخیصی حذف شدند (Askari & Holden, 2015). در ابتدا آزمون Box's M برای بررسی برابری ماتریس‌های کوواریانس بین گروه‌ها انجام شد. تحلیل تشخیصی به صورت گام‌به‌گام و بر اساس روش Wilks' Lambda با استانداردسازی داده‌ها انجام گرفت؛ به گونه‌ای که در هر گام، متغیری وارد مدل می‌شود که بیشترین کاهش را در مقدار آماره Wilks' Lambda ایجاد کند و در نتیجه بیشترین توان تفکیک بین گروه‌ها را داشته باشد. آماره Wilks' Lambda معیاری برای سنجش میزان همپوشانی بین گروه‌ها بر

اساس متغیرهای وارد شده به مدل است و مقادیر کوچک‌تر Wilks' Lambda نشان‌دهنده تفکیک بهتر کلاس‌ها و قدرت بالاتر مدل تشخیصی است (Johnson and Wichern, 2007). در فرآیند گام‌به‌گام، هدف اصلی انتخاب ترکیبی از ویژگی‌هاست که مقدار Wilks' Lambda را به حداقل برساند. برای بررسی معنی‌داری آماری از آزمون Chi-square استفاده شد. هرچه مقدار Chi-square بزرگ‌تر باشد، احتمال تصادفی بودن اختلاف کمتر است. تحلیل داده، ترسیم نمودار و مقایسه میانگین، با استفاده از نرم‌افزارهای (Excel (2016 و زبان برنامه‌نویسی Python (x.3، انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

نتایج آمار توصیفی نشان داد که اجزای بافت خاک دامنه تغییرات قابل توجهی داشتند (جدول ۱). میانگین مربوط به شن ۴۳/۱۵ درصد با ضریب تغییرات ۳۵/۰۴ درصد بود، درحالی‌که سیلت ۳۱/۸۷ درصد و رس ۲۴/۹۸ درصد تغییرپذیری کمتری نسبت به شن نشان دادند (ضریب تغییرات به ترتیب ۲۸/۹۱ و ۳۳/۶۹ درصد). مقادیر سنگریزه کل (TRF) نیز با میانگین‌های ۲۸/۳۳ درصد و ضریب تغییرات نسبتاً بالا (۴۰ درصد) بیانگر ناهمگنی بین نمونه‌ها بودند. میانگین جرم مخصوص ظاهری (۱/۰۹ گرم بر سانتیمتر مکعب) و تخلخل کل (۵۵/۹۵ درصد) نیز تغییرات کمی داشتند (ضریب تغییرات کمتر از ۱۱ درصد). میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در شرایط خشک ۰/۹۴ میلی‌متر و مرطوب ۰/۷۱ میلی‌متر بود. میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها نیز در شرایط خشک (۱/۷۹ میلی‌متر) نسبت به شرایط مرطوب (۰/۸۲ میلی‌متر) بزرگ‌تر بود. در این شاخص‌ها، ضریب تغییرات میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در شرایط مرطوب به طور قابل توجهی بالاتر بود (۴۶/۴۸ درصد). رطوبت اولیه خاک (θ_i) در دامنه ۴/۳۷ تا ۲۴/۷۱ درصد تغییر داشت که بیشترین میزان رطوبت اولیه متعلق به خاکی با درصد ماده آلی ۲/۷۶ درصد و بافت Clay Loam بود. میانگین رطوبت اولیه نیز برابر با ۱۱/۳۷ درصد اندازه‌گیری شد. در این میان ویژگی‌های شیمیایی نسبت به ویژگی‌های فیزیکی خاک تنوع بیشتری داشتند (جدول ۱). قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در دامنه ۰/۴۰ تا ۶/۱۵ دسی‌زیمنس بر متر قرار گرفت و با ضریب تغییرات بالا (۷۹/۸۶ درصد) نشان‌دهنده تنوع این ویژگی بود. pH نسبتاً یکنواخت و در محدوده نزدیک خنثی تا قلیایی ضعیف (میانگین ۷/۹۳) بود. مقدار کربنات کلسیم (CaCO_3) در نمونه‌های مورد بررسی دامنه‌ای بین ۰ تا ۴۷/۵۰ درصد داشته و مقدار میانگین آن ۱۷/۶۵ درصد است که جزو خاک‌های شدیداً آهکی محسوب می‌شوند. مقدار ماده آلی (OM) با میانگین ۱/۲۷

هندسی خاک‌دانه‌ها در حالت تر، قابلیت هدایت الکتریکی، واکنش خاک، کربنات کلسیم و ماده آلی توزیع نرمال نداشتند. این ویژگی‌ها پس از حذف داده‌های پرت (از میان ۶۸ نمونه مورد بررسی ۶۲ نمونه انتخاب شدند) با استفاده از روش‌های تبدیل لگاریتمی و ریشه دوم نرمال شدند.

درصد و ضریب تغییرات ۸۰/۱۶ درصد بیانگر کیفیت متفاوت خاک‌ها در نقاط مختلف مورد بررسی است. میانگین ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) نیز برابر با ۲۰/۳۴ میلی‌اکی‌والان در ۱۰۰ گرم بود؛ هرچند میانگین مقادیر این ویژگی برای منطقه مطالعاتی با اقلیم نیمه‌خشک نیاز به بررسی کانی شناسی رس دارد. از میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تخرخل‌کل، میانگین وزنی و

جدول ۱- آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه.

Table 1- Descriptive statistics of the physicochemical properties of the soils in the study area.

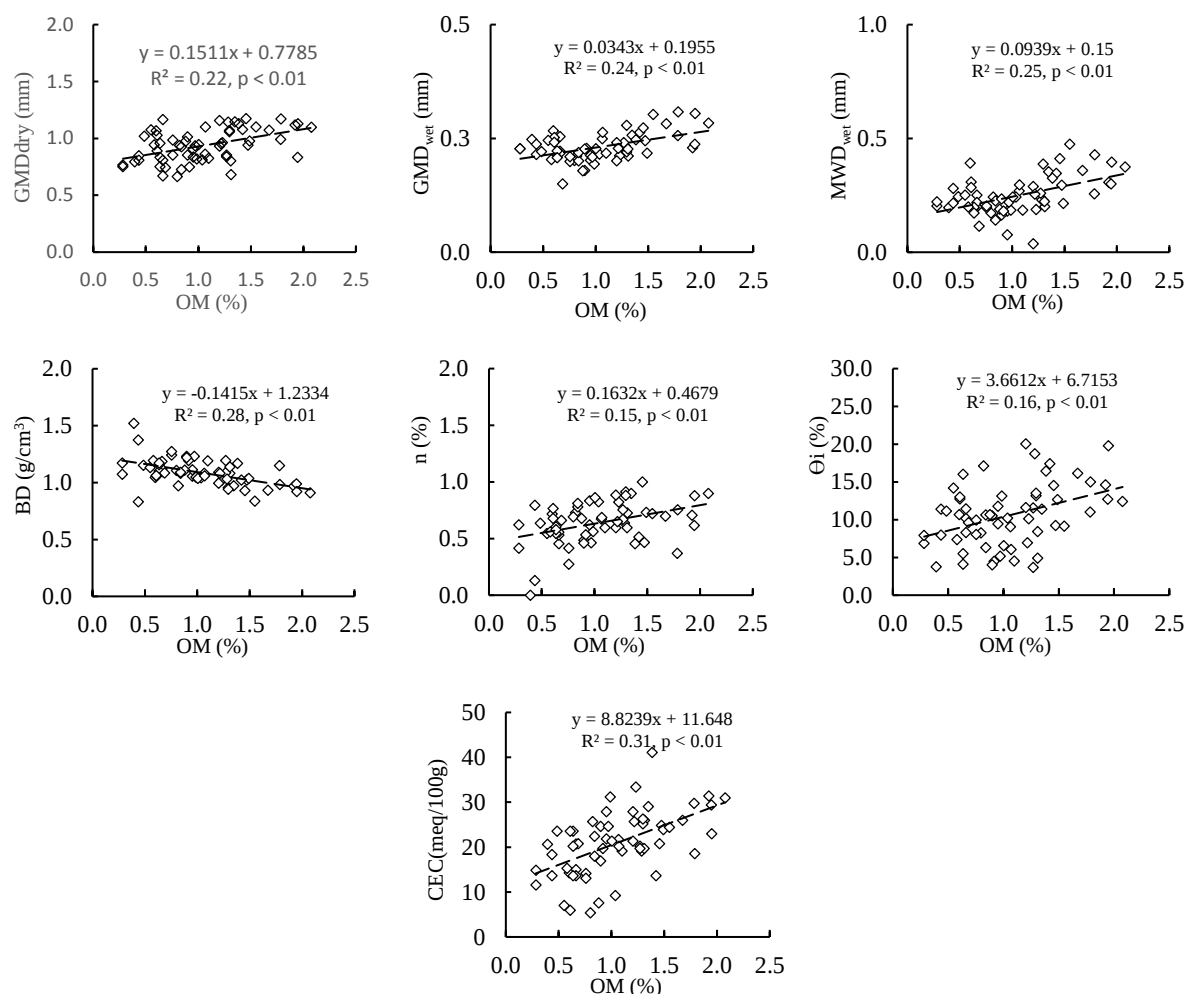
P (Shapiro-Wilk)	CV	SD	Mean	Max	Min	Variable
0.37	35.04	15.12	43.15	82.75	5.90	Sand (%)
0.08	28.91	9.21	31.87	51.28	6.44	Silt (%)
0.65	33.69	8.42	24.98	45.14	6.43	Clay (%)
0.06	40.49	11.47	28.33	61.29	5.09	TRF (%)
0.06	11.08	0.12	1.09	1.52	0.83	BD (g/cm ³)
0.04	10.01	5.60	55.95	66.68	36.65	n (%)
0.08	15.84	0.15	0.94	1.25	0.67	GMD _{dry} (mm)
0.67	26.87	0.48	1.79	2.90	0.67	MWD _{dry} (mm)
0.01	18.27	0.13	0.71	1.09	0.41	GMD _{wet} (mm)
0.00	46.48	0.38	0.82	1.98	0.09	MWD _{wet} (mm)
0.07	40.75	4.37	10.73	25.15	3.66	Θ _i (%)
0.00	79.86	1.21	1.51	6.15	0.40	EC (dS/m)
0.01	4.53	0.36	7.93	8.51	6.96	pH
0.02	52.52	9.27	17.65	47.50	0.00	CaCO ₃ (%)
0.00	80.16	1.01	1.27	4.32	0.01	OM (%)
0.68	35.06	7.13	20.34	41.10	5.37	CEC (meq/100g)

TRF: Total Rock Fragment, G: Gravel, BD: Bulk Density, n: Total Porosity, GMD_{dry}: Geometric Mean Diameter dry, MWD_{dry}: Mean Weight Diameter dry, GMD_{wet}: Geometric Mean Diameter wet, MWD_{wet}: Mean Weight Diameter wet, Θ_i: Initial Soil Moisture, EC: Electrical Conductivity, OM: Organic Matter, CEC: Cation Exchange Capacity.

وزنی ($p < 0.05$, $r = 0.30$, $R^2 = 0.1$) قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک، تخرخل کل ($p < 0.01$, $r = 0.39$, $R^2 = 0.15$) و رطوبت اولیه ($p < 0.01$, $r = 0.40$, $R^2 = 0.16$) نیز با محتوای ماده آلی همبستگی مثبت معنی‌دار داشتند. از اجزای بافت خاک بخش رس و شن نیز همبستگی ضعیف‌تری نشان دادند ($p < 0.05$). در این میان از ویژگی‌های شیمیایی نیز بالاترین همبستگی میان ظرفیت تبادل کاتیونی ($p < 0.01$, $r = 0.55$, $R^2 = 0.31$) با محتوای ماده آلی مشاهده شد. همچنین قابلیت هدایت الکتریکی ($p < 0.01$, $r = 0.30$, $R^2 = 0.09$) نیز رابطه مثبت و معنی‌داری با محتوای ماده آلی نشان داد. در این میان واکنش خاک و کربنات کلسیم رابطه معنی‌داری با محتوای ماده آلی نداشت.

ارتباط ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با ماده آلی

تجزیه و تحلیل داده‌ها ارتباط ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با محتوای ماده آلی را آشکار ساخت. شکل (۲) رگرسیون خطی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی را با محتوای ماده آلی نشان می‌دهد. به‌طور خاص جرم مخصوص ظاهری ($p < 0.01$, $r = -0.53$, $R^2 = 0.28$) همبستگی منفی با محتوای ماده آلی نشان داد. میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت تر (به‌ترتیب $r = 0.51$, $R^2 = 0.25$ و $r = 0.49$, $R^2 = 0.24$) همبستگی مثبت معنی‌دار با محتوای ماده آلی نشان دادند ($p < 0.01$). همچنین متوسط قطر خاک‌دانه‌ها در شاخص میانگین هندسی ($p < 0.01$, $r = 0.47$, $R^2 = 0.22$) و



شکل ۲- ارتباط برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با محتوای ماده آلی.

Figure 2- Relationships between some physicochemical properties and organic matter content

BD: Bulk Density, n: Total Porosity, GMD_{dry}: Geometric Mean Diameter dry, MWD_{dry}: Mean Weight Diameter dry, GMD_{wet}: Geometric Mean Diameter wet, MWD_{wet}: Mean Weight Diameter wet, Θ_i: Initial Soil Moisture, EC: Electrical Conductivity, OM: Organic Matter, CEC: Cation Exchange Capacity.

ساختمان خاک، افزایش تخلخل و خاصیت هیدروفیلی مواد آلی، منجر به افزایش ظرفیت نگهداری آب و رطوبت خاک شود (Feifel et al., 2024). همچنین خاک‌های با شن بیشتر معمولاً دارای محتوای ماده آلی کمتری هستند. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش محتوای شن در خاک، می‌تواند منجر به کاهش محتوای ماده آلی شود (Hassani et al., 2024). برخلاف خاک‌های شنی، خاک‌های رسی دارای ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی بالاتری هستند. افزایش محتوای رس در خاک، می‌تواند به افزایش محتوای ماده آلی منجر شود که این امر به دلیل توانایی بالای ذرات رسی در جذب و حفظ مواد آلی است (Schweizer et al., 2021).

ویژگی‌های شیمیایی نیز ارتباط تنگاتنگی با ماده آلی دارد. مطالعات متعدد نیز نشان داده‌اند که ماده آلی با داشتن بار منفی، می‌تواند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش دهد. نتایج

نتایج پژوهش حاضر با مطالعات مختلف انجام شده همخوانی دارد. Robinson و Tanveera et al. (2015) (2022) نشان داده‌اند که در خاک‌هایی که محتوای ماده آلی بیشتری دارند به‌طور قابل‌توجهی جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش و تخلخل آن افزایش می‌یابد؛ که این اثر ناشی از بهبود ساختمان خاک و ایجاد پیوندهای آلی میان ذرات است. از طرفی در پژوهشی Yang et al., (2023) افزودن ماده آلی به خاک در قالب کود دامی را دلیل افزایش MWD و GMD خاک‌دانه‌ها عنوان کردند. همچنین اثر مدیریت اراضی روی MWD و GMD خاک‌دانه‌ها توسط Mikha et al., (2020) مورد بررسی قرار گرفت؛ نتایج این پژوهش نیز نشان داد، خاک‌هایی که از محتوای ماده آلی بیشتری برخوردارند خاک‌دانه‌های پایدارتری دارند و MWD و GMD آنها بیشتر است؛ که نشان‌دهنده بهبود ساختمان خاک است. در این میان ماده آلی می‌تواند با بهبود

کربنات‌هایی مانند کربنات کلسیم عوامل مهم تعیین‌کننده pH خاک هستند (Vaezi, 2022).

تحلیل تشخیص ارتباط ویژگی‌های خاک با ماده آلی

با توجه به نتایج همبستگی از میان ۱۵ ویژگی مورد بررسی ۱۱ ویژگی دارای همبستگی معنی‌دار با محتوای ماده آلی بودند. پس از بررسی همبستگی این ۱۱ ویژگی با هم و حذف ویژگی‌هایی که بیش از ۰/۷ همبستگی داشتند، ۷ ویژگی مستقل برای جلوگیری از اثر هم‌خطی انتخاب شدند. این ویژگی‌ها برای انجام تحلیل تشخیصی وارد مدل شدند. نتایج تحلیل تشخیصی نشان داد که پیش‌فرض برابری ماتریس‌های کوواریانس بین گروه‌ها برقرار بوده و بنابراین استفاده از تحلیل تشخیصی برای داده‌های مورد پژوهش معتبر است؛ به‌طوری‌که آزمون Box's M مقدار ۱۲/۲۷ را با سطح معنی‌داری ۰/۲۸۹ نشان داد. بر اساس جدول ۲، نتایج تحلیل تشخیصی نشان داد که برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها توان تفکیک بالایی در گروه‌های مختلف ماده آلی خاک‌های منطقه مورد پژوهش داشتند (گروه اول: کمتر از ۱ درصد، گروه دوم: بین ۱ تا ۲ درصد و گروه سوم: بیش از ۳ درصد ماده آلی). در این میان تابع اول در تحلیل تشخیصی بیشترین نقش را در تفکیک گروه‌های مقایسه‌ای ایفا کرد. تابع تشخیصی اول با مقدار ویژه ۰/۸۹ قادر است ۹۱/۲ درصد از کل واریانس داده‌ها را تبیین کند که نشان‌دهنده نقش غالب این تابع در تفکیک گروه‌هاست. مقدار کم Wilks' Lambda (۰/۴۹) همراه با مقدار بالای χ^2 (۴۱/۸۸) و سطح معنی‌داری بالا ($P < 0.0001$) بیانگر قدرت تفکیک بسیار قوی و معنی‌دار این تابع است. علاوه بر این، مقادیر مرکز گروه‌ها^۲ نشان داد که تابع اول توانسته است گروه‌ها را به‌خوبی از یکدیگر تفکیک کند؛ به‌گونه‌ای که گروه‌های ۳ و ۴ فاصله بیشتری از گروه ۱ داشتند و این امر بیانگر تفاوت قابل‌توجه گروه‌ها از نظر پایداری خاک‌دانه و ظرفیت تبادل کاتیونی است. درمقابل، تابع دوم معنی‌داری نبود. نتایج حاصل از تحلیل تشخیصی نشان داد که بالاترین مقدار ضریب تفکیک در تابع اول مربوط به MWD_{wet} (۰/۸۶) بود و این ویژگی توانایی بیشتری در تفکیک سطوح مختلف ماده آلی خاک نشان داد. پس از آن CEC با ضریب تفکیک ۰/۵۷ قرار گرفت. در مرحله دوم تحلیل تشخیصی، پس از حذف ویژگی میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت تر (MWD_{wet}) که در مرحله اول بیشترین قابلیت تفکیک را داشت؛ مجدداً تحلیل تشخیصی به روش گام‌به‌گام برای تفکیک چهار گروه ماده آلی بر اساس سایر ویژگی‌های خاک انجام شد. نتایج حاکی از این بود که تابع اول در تحلیل تشخیصی مرحله دوم

پژوهش‌های Brady and Weil, (2017) و Weil and Brady, (2022) نیز نشان داده است که بین ماده آلی خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد و خاک‌های غنی از ماده آلی معمولاً از ظرفیت بیشتری برای حفظ عناصر غذایی برخوردار هستند. همچنین پژوهش Kaiser, (2008) نیز نشان داد که CEC خاک به‌میزان و ترکیب ماده آلی و محتوای رس بستگی دارد و ماده آلی می‌تواند نقش مهمی در میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک ایفا کند. (Solly, 2020) هم ابراز داشت که در خاک‌های جنگلی سوئیس، ماده آلی خاک در لایه‌های سطحی منجر به افزایش ۳۵ تا ۵۰ درصدی CEC مؤثر می‌شود. ترکیب OM با کلئیدها نیز باعث افزایش سطح فعال و ظرفیت تبادل کاتیونی می‌شود (Lal, 2020; Weil & Brady, 2016). در مقابل پژوهش، Six et al., (2002) نشان دادند که حفاظت فیزیکی ماده آلی درون خاک‌دانه‌ها، اگرچه برای ترسیب کربن مفید است، اما ممکن است دسترسی گروه‌های عاملی آلی را برای تبادل کاتیونی محدود سازد و در نتیجه رابطه مستقیم بین محتوای کل ماده آلی و CEC مؤثر را تضعیف نماید. از طرفی مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ماده آلی می‌تواند تأثیر مثبتی بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک داشته باشد. در این راستا، Alam et al. (2020) نیز گزارش کردند که در خاک‌های کشور قطر، EC با محتوای ماده آلی رابطه معنی‌داری داشتند. همچنین، Kim et al. (2024) نشان دادند که ماده آلی می‌تواند با آزادسازی مواد مغذی و جذب یون‌ها، EC خاک را افزایش دهد. از آنجایی که مواد آلی حاوی گروه‌های کربوکسیل و فنول هستند؛ می‌توانند کاتیون‌ها را جذب نمایند و همزمان با تجزیه مواد آلی، یون‌های محلول آزاد شده و EC خاک را افزایش دهند (Weil & Brady, 2016). در مقابل برخی پژوهش‌ها گزارش کرده‌اند که افزایش ماده آلی لزوماً به افزایش EC منجر نمی‌شود و حتی می‌تواند با بهبود ساختمان خاک و افزایش آبشویی املاح، به کاهش شوری موضعی کمک کند (Diacono & Montemurro, 2015). همچنین Clark et al., (2007) در پژوهشی گزارش کردند که در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک، ارتباط معنی‌داری بین کربن آلی و EC مشاهده نشد. در خاک‌های مورد بررسی واکنش خاک تحت تأثیر ماده آلی نبود. این موضوع می‌تواند به دلیل سهم اندک ماده آلی در خاک‌ها نسبت به سایر عوامل تعیین‌کننده pH (رس و کربنات‌ها) باشد. در واقع باوجود آنکه ترکیبات هوموسی مانند اسید هیومیک و اسید فولویک در کاهش pH خاک نقش ایفا می‌کنند اما وجود رس نسبتاً زیاد و طبیعتاً کاتیون‌های تبدالی بالا از یک سو و فراوانی زیاد

توانست ۹۴/۵ درصد از واریانس را تبیین کند. مقدار ویژه این تابع برابر ۰/۹۹ بود. همچنین نتایج آزمون Wilks' Lambda نشان داد که تابع اول تشخیصی معنی‌دار است ($Wilks' Lambda = 0.48, Chi-square = 43.11, df = 6, p < 0.0001$). در این تابع، ویژگی‌های GMD_{wet} و CEC به ترتیب با ضرایب ۰/۸۷ و ۰/۶۲ بیشترین سهم را در تفکیک گروه‌ها داشتند. تابع دوم در این مرحله نیز معنی‌دار نبود.

بر اساس نتایج این پژوهش به نظر می‌رسد اثر ماده آلی خاک بیشتر از اینکه روی ویژگی‌های شیمیایی نمود پیدا کند؛ بر ویژگی‌های فیزیکی و به خصوص ویژگی‌های ساختمانی خاک مؤثرتر است. به طوری که ویژگی‌های فیزیکی بیشترین ضریب تفکیک را به خود اختصاص دادند (جدول ۲). در این راستا از میان ویژگی‌های فیزیکی شناسه‌های مرتبط با ساختمان خاک و از میان

ویژگی‌های شیمیایی شناسه مرتبط با حاصلخیزی خاک‌ها، بیشترین توان تفکیک در گروه‌های مقایسه‌ای را داشته‌اند و نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ ماده آلی با این ویژگی‌ها است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین هم‌راستا هستند؛ (Murphy 2015) نشان داد که افزایش ماده آلی موجب بهبود ساختمان خاک، افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها و تخلخل می‌شود و نقش مهمی در کیفیت فیزیکی خاک ایفا می‌کند. همچنین، Ramos et al., (2018) گزارش کردند که ماده آلی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد و در نگهداری عناصر غذایی مؤثر است. به طور کلی، این نتایج تأکید می‌کنند که ماده آلی خاک نقش کلیدی در بهبود همزمان ویژگی‌های فیزیکی و حاصلخیزی خاک دارد و افزایش آن می‌تواند به عنوان راهبردی مؤثر در مدیریت پایدار و ارتقای کیفیت خاک‌ها مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۲- نتایج تحلیل تشخیصی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک برای سطوح مختلف ماده آلی.

Table 2- Results of discriminant analysis of soil physicochemical properties across different levels of soil organic matter.

P - Value	Chi - square	Wilks' Lambda	واریانس تبیینی درصد (%) (Variance%)	مقدار ویژه (Eigenvalue)	تابع (function)	تحلیل تشخیصی (function)
0.0001	41.88	0.49	91.2	0.89	1	مرحله اول
0.0001	43.11	0.48	94.5	0.99	1	مرحله دوم
ضریب تفکیک Discriminant (Coefficient)						
				ویژگی‌های خاک (Soil Properties)	تابع (function)	تحلیل تشخیصی (function)
0.86				MWD_{wet}	1	مرحله اول
0.57				CEC		
0.87				GMD_{wet}	1	مرحله دوم
0.62				CEC		

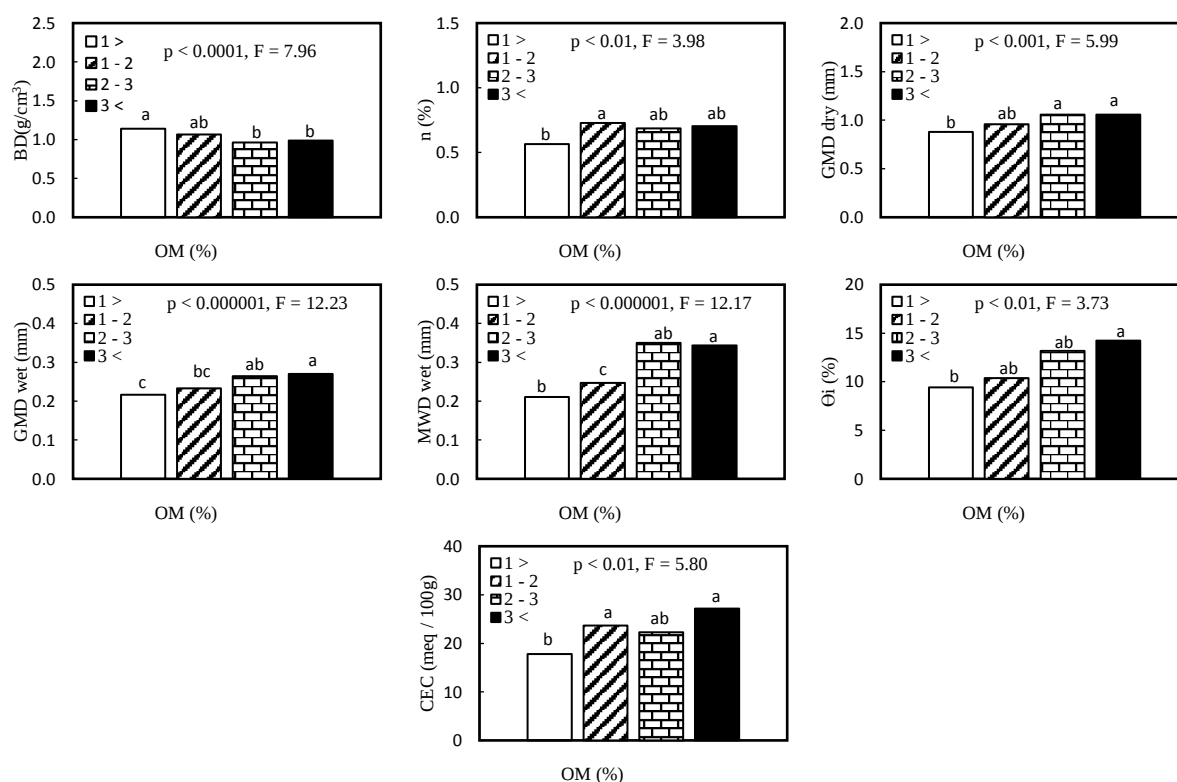
MWD_{wet} : Mean Weight Diameter wet, GMD_{wet} : Geometric Mean Diameter wet, CEC: Cation Exchange Capacity.

نتایج تحلیل واریانس یک‌طرفه نیز نشان داد که ماده آلی خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرپذیری بسیاری از ویژگی‌های مورد بررسی دارد. در میان ویژگی‌های شیمیایی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) اختلاف معنی‌داری بین گروه‌های با ماده آلی کمتر از ۱ درصد با گروه‌های ۱ تا ۲ و بیش از ۳ درصد نشان داد ($p < 0.001, F = 5.80$) که بیانگر افزایش توان تبادل کاتیونی همزمان با افزایش محتوای ماده آلی خاک است. در مقابل، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و کربنات کلسیم ($CaCO_3$) تحت تأثیر سطوح مختلف ماده آلی قرار نگرفت و اختلاف معنی‌داری بین گروه‌ها مشاهده نشد. در بخش ویژگی‌های فیزیکی خاک، دو ویژگی ساختمان خاک شامل میانگین هندسی (GMD_{wet}) و وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD_{wet}) در حالت تر بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات ماده آلی نشان دادند. به طوری که در میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها بین گروه کمتر از ۱ درصد ماده آلی با گروه‌های ۲ تا ۳ و بیش از ۳ درصد و گروه ۱ تا ۲ درصد با گروه بیش از ۳ درصد و در میانگین وزنی قطر

خاک‌دانه‌ها بین گروه کمتر از ۱ درصد ماده آلی با گروه‌های ۲ تا ۳ و بیش از ۳ درصد، گروه ۱ تا ۲ درصد با گروه‌های ۲ تا ۳ درصد و بیش از ۳ درصد اختلاف معنی‌دار مشاهده شد (به ترتیب $p < 0.000001, F = 12.17$ و $0.000001, F = 12.23$). پس از آن جرم مخصوص ظاهری (BD) در رتبه بعدی قرار گرفت؛ به طوری که بین گروه کمتر از ۱ درصد ماده آلی با گروه‌های ۲ تا ۳ درصد و بیش از ۳ درصد ماده آلی اختلاف معنی‌دار وجود داشت ($p < 0.0001, F = 7.96$). این نتیجه بیانگر کاهش قابل توجه جرم مخصوص ظاهری با افزایش ماده آلی خاک است. میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک (GMD_{dry}) نیز بین گروه کمتر از ۱ درصد با گروه‌های ۲ تا ۳ و بیش از ۳ درصد ماده آلی اختلاف معنی‌دار داشت ($p < 0.001, F = 5.99$). با این وجود اثر ماده آلی بر شاخص‌های ساختمانی در حالت تر بارزتر بود. همچنین تخلخل کل (n) تنها بین گروه‌های کمتر از ۱ درصد و ۱ تا ۲ درصد ماده آلی اختلاف معنی‌دار داشت ($p < 0.01$). $F=3.98$). رطوبت اولیه خاک (θ_i) نیز بین گروه کمتر از ۱ درصد

ماده آلی در بهبود پایداری ساختمانی خاک به‌ویژه در شرایط تر است. همچنین افزایش ماده آلی خاک، به‌ویژه در سطوح بالاتر از ۲ درصد، تأثیر چشمگیری بر بهبود ویژگی‌های ساختمانی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد، درحالی‌که برخی شاخص‌ها نظیر قابلیت هدایت الکتریکی و پایداری خاک‌دانه‌ها در حالت خشک، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات ماده آلی از خود نشان می‌دهند.

با گروه بیش از ۳ درصد ماده آلی اختلاف معنی‌دار نشان داد ($p < 0.01$, $F = 3.73$) که حاکی از افزایش ظرفیت نگهداشت رطوبت در خاک‌های غنی‌تر از ماده آلی است. دراین‌میان، ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات اولیه و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک (MWD_{dry}) تحت تأثیر سطوح مختلف ماده آلی قرار نگرفت و اختلاف معنی‌داری بین گروه‌ها مشاهده نشد. به‌طورکلی، نتایج این مطالعه بیانگر نقش کلیدی



شکل ۳- تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با محتوای ماده آلی حروف متفاوت بالای ستون‌ها بیانگر اختلاف معنی‌دار بین میانگین‌ها است.

Figure 3- Variations of Soil physicochemical Properties on Organic matter Content Different letters above the bars indicate significant differences among means.

BD: Bulk Density, n: Total Porosity, GMD_{dry}: Geometric Mean Diameter dry, GMD_{wet}: Geometric Mean Diameter wet, MWD_{wet}: Mean Weight Diameter wet, Θ_i: Initial Soil Moisture, OM: Organic Matter, CEC: Cation Exchange Capacity.

ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی در بین سه ویژگی اول وابسته به ماده آلی، اهمیت این ویژگی را بیشتر نمایان می‌کند. نتایج آماری به‌وضوح ارتباط مثبت و مستقیم ماده آلی بر پایداری خاک‌دانه‌ها را تأیید می‌کند (Six et al., 2004). در مطالعه‌ای (Xin et al., 2015) ابراز داشتند محتوای ماده آلی با GMD و MWD خاک‌دانه‌ها ارتباط مثبت و معنی‌داری دارد. همچنین به‌عنوان یک ویژگی شیمیایی در رتبه سوم وابستگی به محتوای ماده آلی قرار گرفت. این نتایج با گزارش‌های پیشین مبنی بر تأثیر مثبت ماده آلی بر CEC و همچنین اثر آن بر پایداری کلوئیدها و ویژگی‌های شیمیایی خاک سازگار است (Six et al., 2002). این نتایج تأکید می‌کنند که افزایش ماده آلی به بهبود ظرفیت تبادل

رتبه‌بندی ارتباط ویژگی‌های خاک با محتوای ماده آلی

با بررسی نتایج تحلیل‌های آماری مشخص شد از میان ۱۶ ویژگی مورد بررسی ۱۱ ویژگی همبستگی معنی‌دار، ۷ ویژگی اختلاف معنی‌دار میان گروه‌های ماده آلی و ۳ ویژگی تفکیک‌پذیری معنی‌دار در مرحله اول و دوم تحلیل تشخیصی در توابع نشان دادند (جدول ۳). دراین‌میان ویژگی‌های فیزیکی و به‌ویژه شاخص‌های ساختمانی بیشترین رابطه را با محتوای ماده آلی داشتند. در دو تحلیل تشخیصی و تجزیه واریانس حائز رتبه اول و در تحلیل همبستگی حائز رتبه سوم شده بود. پس از آن GMD_{wet} و CEC قرار گرفتند. قرار گرفتن دو ویژگی ساختمانی مربوط به خاک‌دانه‌های پایدار در آب، از میان

کاتیونی خاک کمک می‌کند که از نظر حاصلخیزی اهمیت ویژه‌ای دارد (Lal, 2020). مطالعه‌ای توسط Ramos, (2018) نشان داد که در لایه سطحی خاک، با افزایش ماده آلی، CEC افزایش یافته و در صورت حذف ماده آلی CEC کاهش می‌یابد. در این میان مدیریت مناسب مراتع با جلوگیری از چرای بی‌رویه و استفاده از خاک‌ورزی حفاظتی در اراضی زراعی و باغی می‌تواند منجر به تقویت ماده آلی و بهبود ساختمان خاک شود (Blanco-Canqui & Lal, 2008; Vaezi, 2021) از طرفی تغییر کاربری

غیراصولی زمین نیز می‌تواند با کاهش ذخیره ماده آلی علاوه بر تقلیل ظرفیت تبادل کاتیونی و عناصر غذایی (Pulido et al., 2017)، منجر به هدر رفت شدید آب و خاک شود (Vaezi, 2021). به‌طور کلی، این رتبه‌بندی نشان می‌دهد که ترکیب چندین روش آماری می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به اهمیت نسبی ماده آلی در عملکرد ویژگی‌های مختلف خاک در ارتباط با کارکردهای آن ارائه دهد.

جدول ۳- رتبه‌بندی میزان وابستگی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها به محتوای ماده آلی.

Table 3- Ranking the degree of dependency of soil physicochemical properties on organic matter content.

رتبه کلی (Total Rank)	نوع تحلیل آماری			ویژگی‌های خاک (Soil Properties)
	رتبه تحلیل تشخیص (Discriminant Analyses)	رتبه تجزیه واریانس یک‌طرفه (ANOVA)	رتبه همبستگی (Corolation)	
4	ns	3	2	BD (g/cm ³)
7	ns	7	7	n (%)
5	ns	4	5	GMD _{dry} (mm)
8	ns	ns	8	MWD _{dry} (mm)
2	2	2	4	GMD _{wet} (mm)
1	1	1	3	MWD _{wet} (mm)
6	ns	6	6	Θ _i (%)
11	ns	ns	11	Sand (%)
10	ns	ns	10	Clay (%)
9	ns	ns	9	EC (dS/m)
3	3	5	1	CEC (meq/100g)

BD: Bulk Density, n: Total Porosity, GMD_{dry}: Geometric Mean Diameter dry, MWD_{dry}: Mean Weight Diameter dry, GMD_{wet}: Geometric Mean Diameter wet, MWD_{wet}: Mean Weight Diameter wet, Θ_i: Initial Soil Moisture, EC: Electrical Conductivity, CEC: Cation Exchange Capacity.

ns: not significant

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش نشان داد که ماده آلی یکی از عوامل کلیدی در بهبود کیفیت خاک است که به‌طور همزمان بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به‌طور معنی‌داری اثرگذار است. در این راستا نتایج همبستگی، رگرسیون خطی و تجزیه واریانس یک‌طرفه حاکی از افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در ارتباط با محتوای ماده آلی خاک بود. در میان ویژگی‌های فیزیکی نیز ارتباط تنگاتنگی با ماده آلی مشاهده شد. در این راستا با افزایش ماده آلی، پایداری خاک‌دانه‌ها، تخلخل کل و رطوبت خاک افزایش و جرم مخصوص ظاهری کاهش معنی‌داری داشتند. در این میان نتایج تحلیل تشخیصی نشان داد اثر ماده آلی بیش از آنکه در ویژگی‌های شیمیایی نمود یابد، در ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌طور معنی‌داری نمایان می‌شود. به‌گونه‌ای که در هر دو مرحله انجام تحلیل تشخیصی ویژگی‌های ساختمانی بالاترین ضرایب تفکیک را در گروه‌های مقایسه‌ای ماده آلی (سطح یک کمتر از ۱ درصد، سطح دو بین ۱ تا ۲ درصد و سطح سه بیش از ۳ درصد ماده آلی) به خود اختصاص دادند که بیانگر ارتباط نزدیک ماده آلی خاک با این ویژگی‌ها است. به‌طور کلی نتایج تحلیل‌های مختلف آماری نشان داد از میان ویژگی‌های مختلف فیزیکی و

شیمیایی، سه ویژگی میانگین وزنی و هندسی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت تر و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشترین ارتباط را با ماده آلی داشتند و به‌ترتیب حائز رتبه‌های اول تا سوم شدند. با این حال از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به ماهیت مقطعی مطالعه و عدم اندازه‌گیری برخی متغیرهای مؤثر مانند کربن آلی محلول و کانی‌شناسی رس اشاره کرد. با این وجود نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای علمی برای تدوین راهکارهای مدیریتی بوم‌شناختی به‌منظور ارتقای کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک مورد پژوهش فراهم آورد.

پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک پس از عبور از آستانه حدود ۲ درصد ماده آلی تغییرات چشمگیری از خود نشان دادند؛ بنابراین در مناطق مورد مطالعه، افزایش ماده آلی خاک در سطوح بیش از ۲ درصد می‌تواند به‌عنوان یک هدف مدیریتی در راستای بهبود کیفیت خاک مدنظر قرار گیرد. با توجه به پیشینه پژوهش برای تحقق این هدف، به‌کارگیری راهکارهایی نظیر مصرف کودهای آلی (کود دامی پوسیده و کمپوست)، بازگرداندن بقایای گیاهی به

خاک، توسعه کشت‌های پوششی، کاهش شدت خاک‌ورزی و اجرای سامانه‌های خاک‌ورزی می‌تواند در افزایش و مدیریت محتوای ماده آلی اثرگذار باشد. همچنین در اراضی مرتعی، مدیریت چرای دام و جلوگیری از چرای مفرط می‌تواند در افزایش ذخیره ماده آلی خاک مؤثر باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی تغییرات زمانی و فصلی ماده آلی خاک و اثر آن بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، بررسی اثر برخی ویژگی‌های بالقوه مؤثر بر ویژگی‌های خاک از جمله کربن آلی محلول و کانی‌شناسی رس نیز می‌تواند لحاظ شوند.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری و حمایت‌های گروه علوم و مهندسی خاک و به‌ویژه آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه زنجان و همچنین از داوران محترم این مقاله که با نظرات و پیشنهادهای خود در ارتقای علمی آن تلاش می‌کنند، صمیمانه قدردانی نمایند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد.

References

- Ahmad Abadi, Z., Ghajar Sepanlou, M., Rahimi Alashti., S. 2012 'Effect of vermicompost application on some physical and chemical properties of a clay loam soil', *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 16(60), pp. 195-206. 20.1001.1.24763594.1390.15.58.13.7. (In Persian)
- Alam, S.I., Hammoda, H., Khan, F., Al Enazi, R. and Goktepe, I., 2020. Electrical conductivity, pH, organic matter and texture of selected soils around the Qatar university campus. *Research in Agriculture Livestock and Fisheries*, 7(3), pp.403-409. 10.3329/ralf.v7i3.51359.
- Anon. 2024 'Organic materials quality to control soil aggregation: a meta-analysis', *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, pp. 1857-1870. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01815-9>.
- Askari, M.S., & Holden, N.M. 2014. *Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management*. *Geoderma*, 230, pp. 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.019>.
- Azimzadeh, Y., Najafi, N. 2017 'Effect of biochar on physical, chemical and biological properties of soil', *Land Management Journal*, 5(2), pp. 121-134. 10.22092/LMJ.2017.109488.(In Persian)
- Baveye, P.C., Schnee, L.S., Boivin, P., Laba, M. and Radulovich, R., 2020. Soil organic matter research and climate change: merely re-storing carbon versus restoring soil functions. *Frontiers in Environmental Science*, 8, p.579904. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904>.
- Ben Ali, A. and Shukla, M. 2024 'Assessment of soil organic and inorganic carbon stocks in arid and semi-arid rangelands of southeastern New Mexico', *Ecological Indicators*, 166, p. 112398. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112398>.
- Blanco-Canqui, H., and Lal, R. 2008. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 72(3), 693-701. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0233>.
- Brady, N.C. and Weil, R.R., 2017. *The Nature and Properties of Soils*. 15th ed. Harlow: Pearson.
- Brady, N.C., Weil, R.R. and Weil, R.R., 2008. *The nature and properties of soils* (Vol. 13, pp. 662-710). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bronick, C.J. and Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), pp.3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>.
- Celestina, C., Hunt J.R., Sale, P.W.G., Franks, A.E., 2019. Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review. *Soil and Tillage Research*, 186, pp.135-145. 10.1016/j.still.2018.10.002
- Clara, L., Fatma, R., Viridiana, A. and Liesl, W., 2017. *Soil organic carbon: the hidden potential*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 978-92-5-109681-9
- Clark, J. S. et al. 2007. Controls on soil salinity in semi-arid regions. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), pp. 1120-1128.
- Culley, J.L.B. 1993. Density and compressibility. *Soil sampling and methods of analysis*. Pp: 529-539.
- Diacono, M., & Montemurro, F. 2015. Effectiveness of organic wastes as fertilizers and amendments in salt-affected soils. *Agriculture*, 5(2), pp. 221-230. <https://doi.org/10.3390/agriculture5020221>.
- Dou, S., Zhang, Y., Shan, J., Wu, M., Ma, R., Guan, S. and Jia, Z. 2025 'Soil organic matter revisited: why humic substances still matter?', *Pedosphere*, 36(1), pp. 6-11. ISSN 1002-0160/CN 32-1315/P.
- Fageria, N.K., 2012. Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. *Communications in soil science and plant analysis*, 43(16), pp.2063-2113. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>.
- Feifel, M., Durner, W., Hohenbrink, T.L. and Peters, A., 2024. Effects of improved water retention by increased soil organic matter on the water balance of arable soils: A numerical analysis. *Vadose Zone Journal*, 23(1), p.e20302. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20302>.
- Franzluebbers, A.J., 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage research*, 66(2), pp.197-205.10.1016/S0167-1987(02)00027-2.
- 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), pp. 1004-1007.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300050038x>Digital Object Identifier (DOI).
22. Gee, G.W., and Or, D. 2002. 2.4 Particle-size analysis. *Methods of Soil Analysis*. Part, 4(598), pp. 255-293.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>.
23. Guhra, T., Stolze, K. and Totsche, K.U. 2022 'Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates', *Soil Biology and Biochemistry*, 164, p. 108483.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108483>.
24. Hamza, A., Karčauskienė, D., Mockevičienė, I., Repšienė, R., Tahir, M.A., Manzoor, M.Z., Kousar, S., Lodhi, S.S., Rasool, N. and Ullah, I., 2025. Soil Aggregate Dynamics and Stability: Natural and Anthropogenic Drivers. *Agriculture*, 15(23), p.2500.
[10.3390/agriculture15232500](https://doi.org/10.3390/agriculture15232500).
25. Hassani, A., Smith, P. and Shokri, N., 2024. Negative correlation between soil salinity and soil organic carbon variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(18), p.e2317332121.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2317332121>.
26. Helling, C.S., Chesters, G. and Corey, R.B., 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Science Society of America Journal*, 28(4), pp.517-520.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800040020x>.
27. Jafari, S., Golchin, A. and Ghorbani, S. 2016 'Investigating the effect of physical components of organic matter, dispersible clay content on aggregate stability in some lands of Khuzestan province', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(3), pp. 485-495.(In Persian)
28. Janzen, H.H., 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it?. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(3), pp.419-424.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.008>.
29. Jenny, H., 1994. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Courier Corporation.
30. Johnson, R. A. and Wichern, D.W. 2007 *Applied Multivariate Statistical Analysis*. 6th edn. Upper Saddle River, NJ: Pearson.
31. 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), pp. 102-108.
32. Kaiser, M., Ellerbrock, R.H. and Gerke, H.H., 2008. Cation exchange capacity and composition of soluble soil organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), pp.1278-1285.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0340>Digital Object Identifier (DOI).
33. Karami, S., Yasrebi, J., Safarzadeh Shirazi, S., Ronaghi, A. and Ghasemi-Fasaei, R. 2019 'Comparison of the effects of some organic compounds and their biochar on some soil properties', *Soil Research Journal (Formerly: Soil and Water Research Institute)*, 33(2), pp. 267-282.
[10.22092/IJSR.2019.124963.426](https://doi.org/10.22092/IJSR.2019.124963.426).(In Persian)
34. Kemper, W.D. and Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, pp.425-442.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>.
35. Kim, H.N. and Park, J.H., 2024. Monitoring of soil EC for the prediction of soil nutrient regime under different soil water and organic matter contents. *Applied Biological Chemistry*, 67(1), p.1.
<https://doi.org/10.1186/s13765-023-00849-4>
36. King, A.E., Ali, G.A., Gillespie, A.W. and Wagner-Riddle, C., 2020. Soil organic matter as catalyst of crop resource capture. *Frontiers in Environmental Science*, 8, p.50.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00050>
37. Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *science*, 304(5677), pp.1623-1627.
38. Lal, R., 2020. Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), pp.3265-3277.
<https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
39. Lal, R., Lorenz, K., Huttli, K., Schneider, R.F. and von Braun, B.U. 2013. Ecosystem services and carbon sequestration in the biosphere. Springer, the Netherland.
40. Lehmann, J. and Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), pp.60-68.
<https://doi.org/10.1038/nature16069>.
41. Mikha, M.M., Jin, V.L., Johnson, J.M., Lehman, R.M., Karlen, D.L. and Jabro, J.D., 2021. Land management effects on

- wet aggregate stability and carbon content. *Soil Science Society of America Journal*, 85(6), pp.2149-2168. <https://doi.org/10.1002/saj2.20333>.
42. Mohkami, A., Yazdanpanah, N. and Saeidnejad, A. 2024 'The effect of vermicompost and biochar application on morphophysiological characteristics of quinoa under drought stress conditions', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(4), pp. 623-640.
 43. Moradi, F., Khalilmoghadam, B., Jafari, S. and Ghorbani Dashtaki, S. 2014 'Aggregate stability indices and the most effective soil properties affecting them (case study: Sugarcane agro-industries in Khuzestan province)', *Water and Watershed Management Research (Formerly: Journal of Watershed Management Research)*, 5(9), pp. 43-55. 10.22092/WMEJ.2015.106913.(In Persian)
 44. Murphy, B.W., 2015. Impact of soil organic matter on soil properties—a review with emphasis on Australian soils. *Soil research*, 53(6), pp.605-635. <https://doi.org/10.1071/SR14246>.
 45. Naveen, M. 2025 'The role of organic matter in soil for improving crop productivity and soil health', *Journal of Experimental Agriculture International*, 47(2), pp. 367-375.
 46. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. 1982. Methods of Soil Analysis, part 2. Chemical and Microbiological Properties, 2. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>.
 47. Pulido, M., Schnabel, S., Contador, J.F.L., Lozano - Parra, J. and Gomez – Gutierrez, A. 2017. Selecting indicators for assessing soil quality and degradation in rangelands of extremadura (SW Spain). *Ecological Indicators*, 74, pp.49-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.016>.
 48. Ramos, F.T., Dores, E.F.D.C., Weber, O.L.D.S., Beber, D.C., Campelo Jr, J.H. and Maia, J.C.D.S., 2018. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(9), pp.3595-3602. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>.
 49. Rengasamy, P., 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, 37(7), pp.613-620. <https://doi.org/10.1071/FP09249>.
 50. Saxton, K.E. and Rawls, W.J., 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), pp.1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>.
 51. Schnitzer, M., 1991. Soil organic matter—the next 75 years. *Soil science*, 151(1), pp.41-58.
 52. Schweizer, S.A., Mueller, C.W., Höschen, C., Ivanov, P. and Kögel-Knabner, I., 2021. The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arabletoposequence. *Biogeochemistry*, 156(3), pp.401-420. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00850-3>.
 53. Shabani Rofchae, A., Shabanpour, M. and Abrishamkesh, S. 2025 'Aggregate stability and organic carbon distribution in two land uses of pasture and olive orchard: a case study, Rostamabad, Iran', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(2), pp. 235-252. 10.22059/ijswr.2025.393060.669921.(In Persian)
 54. Shabani, H., Delavar, M.A., Safari, Y., Alamdari, P. 2020. 'Spatial Variability of Some Soil Characteristics in Lands of Zanzan University', *Applied Soil Research*, 7(4), pp. 164-178. <https://sid.ir/paper/397005/en>.(In Persian)
 55. Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. and Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and tillage research*, 79(1), pp.7-31. 10.1016/j.still.2004.03.008.
 56. Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), pp. 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.
 57. Six, J., Paustian, K., Elliott, E.T. and Combrink, C., 2000. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), pp.681-689. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x>.
 58. Smith, P., 2016. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global change biology*, 22(3), pp.1315-1324. <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>.
 59. Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy (12th ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service.
 60. Solly, E.F., Weber, V., Zimmermann, S., Walther, L., Hagedorn, F. and Schmidt,

- M.W., 2020. A critical evaluation of the relationship between the effective cation exchange capacity and soil organic carbon content in Swiss forest soils. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, p.98. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00098>.
61. Song, J., Zhang, H., Razavi, B., Chang, F., Yu, R., Zhang, X., Wang, J., Zhou, J., Li, Y. and Kuzyakov, Y., 2024. Bacterial necromass as the main source of organic matter in saline soils. *Journal of Environmental Management*, 371, p.123130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123130>.
62. Sparks, D.L. 2003. Environmental soil chemistry academic press. California. USA.
63. Staff, U.S.L., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture handbook*, 60, pp.83-100.
64. Stevenson, F.J. 1994. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons.
65. Sumner, M.E. and Miller, W.P., 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, pp.1201-1229. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c40>.
66. Teymouri, S., et al. 2023 'Investigation of biochar effect on physical and chemical properties of calcareous soil', *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13(2), pp. 89-104.
67. Thomas, G. W., & Sparks, D. L. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part 3-Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison, WI, 961-1009.
68. Tisdall, J.M. and OADES, J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, 33(2), pp.141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>.
69. Torajzadeh, M. 2024 'Investigating the effect of biochar on the physical and chemical properties of saline soil', *Journal of Water and Soil (Formerly: Agricultural Science and Technology)*, 38(1), pp. 45-58.
70. Vaezi, A., 2021. Soil and water system (2st ed.). Organization into Soil Press, pp.241-263.(In Persian)
71. Vaezi, A., 2022. Soil, water and plant growth (1st ed.). Academic Publishing Center, pp.1-26.(In Persian)
72. Vaezi, A., Behtari, M. and Foroumadi, M., 2019. Time variations of rainfall infiltration into the soil under the influence of soil initial moisture. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(3), pp.575-587. 20.1001.1.20087942.1398.13.3.2.2.(In Persian)
73. Villafuerte, A.B., Soria, R., Rodríguez-Berbel, N., Zema, D.A., Lucas-Borja, M.E., Ortega, R. and Miralles, I., 2024. Short-term evaluation of soil physical, chemical and biochemical properties in an abandoned cropland treated with different soil organic amendments under semiarid conditions. *Journal of Environmental Management*, 349, p.119372. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119372>.
74. von Liebig, J.F., 1843. Chemistry in its application to agriculture and physiology. JM Campbell.
75. 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), pp.29-38. 10.1097/00010694-193401000-00003.
76. Weil, R.R. and Brady, N.C., 2022. *The Nature and Properties of Soils*. 16th ed. Harlow: Pearson. 10.3390/pr10040639.
77. Wu, S., Fu, W., Rillig, M.C., Chen, B., Zhu, Y.G. and Huang, L., 2024. Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi—an updated conceptual framework. *New Phytologist*, 242(4), pp.1417-1425. <https://doi.org/10.1111/nph.19178>.
78. Xin, S.H.U., ZHANG, J.B. and ZHANG, X.F., 2015. Changes in soil organic carbon and aggregate stability after conversion to conservation tillage for seven years in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(6), pp.1202-1211. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60862-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60862-5).
79. Yang, C., Sainju, U.M., Li, C., Fu, X., Zhao, F. and Wang, J., 2023. Long-term chemical and organic fertilization differently affect soil aggregates and associated carbon and nitrogen in the loess plateau of China. *Agronomy*, 13(6), p.1466. 10.3390/agronomy13061466.
80. Yavari, M., Mohammadi, M.H. and 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), pp.2999-3015. 10.22059/ijswr.2020.310061.668738 (In Persian)

81. Yudina, A. and Kuzyakov, Y. 2023 'Dual nature of soil structure: the unity of aggregates and pores', *Geoderma*, 434, p. 116478.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478>.
82. Zandi, L. 2022 'An introduction to the relative importance of processes protecting organic matter and aggregate stability', *Iranian Journal of Dryland Agriculture*, 8(2), pp. 17-32.(In Persian)