



(OPEN ACCESS)

The effect of different contents of vermiculite and zeolite and the type of exchangeable cations on soil organic carbon retention

Fatemeh Rakhsh^{*1}, Ahmad Golchin², Ali Beheshti Ale Agha³

1. Corresponding Author, Ph.D., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: rakhsh.fatemeh@alumni.znu.ac.ir
2. Professor, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: agolchin2011@yahoo.com
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: beheshtiali97@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Soil clay minerals strongly affect the dynamics of soil organic matter by slowing down its decomposition and increasing its retention in soils. By forming stable complexes with organic matter and deactivating extracellular enzymes, clays protect soil organic matter against microbial degradation. As an abiotic factor, clay content influences both the rate of microbial decomposition and the amount of soil organic matter. The effects of soil texture on soil organic matter dynamics have been investigated in many studies; however, few studies specifically address the role of clay mineral type, and the effects of exchangeable cations on soil organic carbon retention remain largely unknown. This study was therefore conducted to better understand the effects of the type and amount of vermiculite and zeolite, and of the type of exchangeable cation, on the retention of soil organic carbon. Materials and Methods: For this purpose, a factorial experiment was carried out in a completely randomized design with three replications. The experimental factors included two clay types (vermiculite and zeolite), four clay contents (0, 15, 30, and 45%), and three exchangeable cations (Na, Ca, and Al). Artificial soils were prepared by mixing sand with different proportions of clay. To obtain clays with a uniform exchangeable cation, vermiculite and zeolite were separately treated with 1 M solutions of NaCl, CaCl ₂ , and AlCl ₃ . Fifty-gram soil samples differing in clay type, clay content, and exchangeable cation were prepared separately. After sterilization of the artificial soils, 5% (w/w) sterilized alfalfa residues were added to all samples. Before incubation, the samples were inoculated with an extract obtained from a natural soil. Following the addition of the soil extract and air-drying, the water content of the samples was adjusted with distilled water to 60% of field capacity, and the soils were incubated in the dark at 25 °C for 180 days. In the artificial soils, organic carbon mineralization, microbial biomass carbon, and soil carbohydrate concentrations were measured. Results: The results showed that clay type and content and the type of exchangeable cation had significant effects ($P < 0.01$) on organic carbon mineralization, microbial biomass carbon, and soil carbohydrate
Article history: Received: 03.06.2024 Revised: 07.19.2024 Accepted: 07.21.2024	
Keywords: Aluminum, Clay, Mineralization, Organic matter, Sodium	

concentrations. Organic carbon mineralization was higher in pure sand than in soils containing 15, 30, or 45% clay. In soils containing vermiculite, organic carbon mineralization was higher than in soils containing zeolite. Microbial biomass carbon was also higher in vermiculite-containing soils than in those containing zeolite. The highest percentage of mineralized carbon and the highest microbial biomass carbon were observed in soils with Ca as the exchangeable cation, whereas the highest carbohydrate concentrations were measured in soils with Al as the exchangeable cation.

Conclusion: The results of this study indicate that organic matter and microbial biomass become less decomposable through interactions with clays in soil, and that even low clay contents are able to reduce organic matter decomposition and CO₂ emission from soils. Furthermore, exchangeable cations influence soil organic carbon dynamics by affecting microbial biomass, controlling the size and activity of microbial populations, and altering the physicochemical properties of their growth environment.

Cite this article: Rakhsh, Fatemeh, Golchin, Ahmad, Beheshti Ale Agha, Ali. 2025. The effect of different contents of vermiculite and zeolite and the type of exchangeable cations on soil organic carbon retention. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (3), 75-95.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22268.2139

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر مقادیر مختلف ورمی کولیت و زئولیت و نوع کاتیون‌های تبادلی بر نگهداشت کربن آلی خاک

فاطمه رخس^{1*}، احمد گلچین²، علی بهشتی آل آقا³

1. نویسنده مسئول، دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: rakhsh.fatemeh@alumni.znu.ac.ir

2. استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: agolchin2011@yahoo.com

3. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: beheshtiali97@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی تاریخ دریافت: 1402/12/16 تاریخ ویرایش: 1403/04/29 تاریخ پذیرش: 1403/04/31 واژه‌های کلیدی: آلومینیوم، رس، سدیم، ماده آلی، معدنی شدن	سابقه و هدف: رس‌ها تأثیر زیادی بر دینامیک ماده آلی در خاک دارند و با کاهش سرعت تجزیه مواد آلی باعث افزایش نگهداشت آن در خاک می‌شوند. رس‌ها، با تشکیل کمپلکس‌های پایدار با ماده آلی و غیرفعال کردن آنزیم‌های خارج یاخته‌ای، از مواد آلی در برابر تخریب میکروبی محافظت می‌کنند. به عنوان یک عامل غیرزیستی، مقدار رس بر سرعت تجزیه میکروبی و مقدار مواد آلی خاک تأثیر می‌گذارد. اثرات بافت خاک بر دینامیک مواد آلی خاک در پژوهش‌های بسیاری بررسی شده است. با این حال، تحقیقاتی که تأثیر نوع رس را نشان دهد کم است و اثرات کاتیون‌های تبادلی بر نگهداشت کربن آلی خاک ناشناخته است. این پژوهش با هدف درک بهتر تأثیر نوع و مقدار ورمی کولیت و زئولیت و نوع کاتیون تبادلی بر نگهداشت کربن آلی انجام شد. مواد و روش‌ها: برای این منظور یک آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل دو نوع رس (ورمی کولیت و زئولیت)، چهار سطح رس (صفر، 15، 30 و 45 درصد) و سه نوع کاتیون تبادلی (سدیم، کلسیم و آلومینیوم) بود. برای انجام آزمایش، از مخلوط‌های شن و رس (خاک مصنوعی) استفاده گردید. برای تهیه رس‌هایی با کاتیون تبادلی یکسان، ورمی کولیت و زئولیت با محلول‌های یک مولار از نمک‌های NaCl، CaCl₂ و AlCl₃ به طور جداگانه تیمار شدند. پیش از انکوباسیون نمونه‌ها و پس از افزودن بقایای یونجه استریل به خاک‌های مصنوعی استریل، نمونه‌ها با استفاده از عصاره استخراج شده از یک خاک طبیعی مایه‌زنی شدند. نمونه‌های 50 گرمی با توجه به مقدار و نوع رس و نوع کاتیون تبادلی، به صورت جداگانه تهیه شدند. سپس به تمامی نمونه‌ها به میزان 5 درصد وزنی بقایای گیاهی یونجه اضافه شد. پس از افزودن عصاره خاک و هوا خشک کردن

نمونه‌ها، دوباره رطوبت نمونه‌ها با استفاده از آب مقطر به ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه رسید و به مدت ۱۸۰ روز و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در تاریکی انکوباسیون شدند. در خاک‌های مصنوعی تهیه شده، معدنی شدن کربن آلی، مقدار زیست‌توده میکروبی و غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک اندازه‌گیری شدند.

یافته‌ها: نتایج آزمایش نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار ($P < 0.01$) نوع و مقدار رس خاک و نوع کاتیون تبدلی بر معدنی شدن کربن آلی، مقدار زیست‌توده میکروبی و غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک بودند. معدنی شدن کربن آلی در شن خالص بیش‌تر از خاک‌های با ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد رس بود. در خاک‌های با ورمی‌کولیت معدنی شدن کربن آلی بیش‌تر از خاک‌هایی با زئولیت بود. مقدار کربن زیست‌توده میکروبی نیز در خاک‌هایی با ورمی‌کولیت بیش‌تر از خاک‌هایی با زئولیت بود. بیش‌ترین درصد کربن معدنی شده و مقدار کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های با کاتیون تبدلی کلسیم و بیش‌ترین غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک‌های با کاتیون تبدلی آلومینیوم اندازه‌گیری شدند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که ماده آلی و زیست‌توده میکروبی از طریق برهمکنش با رس‌ها در خاک غیرقابل تجزیه شده و مقادیر کم‌رس، قادر به کاهش تجزیه ماده آلی و انتشار دی‌اکسید کربن از خاک‌ها می‌باشد. هم‌چنین کاتیون‌های تبدلی با تأثیر بر زیست‌توده میکروبی و کنترل اندازه و فعالیت ریزجانداران و تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محیط رشد آن‌ها بر دینامیک کربن آلی تأثیرگذار هستند.

استناد: رخس، فاطمه، گلچین، احمد، بهشتی آل آقا، علی (۱۴۰۴). تأثیر مقادیر مختلف ورمی‌کولیت و زئولیت و نوع کاتیون‌های تبدلی بر نگهداشت کربن آلی خاک. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۵ (۳)، ۷۵-۹۵.

DOI: 10.22069/ejsms.2025.22268.2139



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

ماده آلی خاک یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک محسوب می‌شود. برای بیش‌تر خاک‌ها مقدار آستانه کربن آلی حدود 2 درصد (برابر با $3/4$ درصد ماده آلی) در نظر گرفته شده است و پژوهش‌ها نشان می‌دهند که وجود مقادیر کم‌تر ماده آلی در خاک‌ها منجر به بی‌ثباتی ساختمان آن‌ها می‌شود. بسیاری از دانشمندان عقیده دارند که ماده آلی خاک، یک عنصر کلیدی در ارزیابی کیفیت خاک می‌باشد چون تأثیر زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد (1).

اضافه کردن ماده آلی به خاک در مدیریت‌های بلندمدت کشاورزی می‌تواند کربن آلی خاک را افزایش دهد و به میزان کم، منجر به تغییر اندازه ذخیره کربن خاک شود. افزایش کربن آلی به خاک از طریق افزایش بقایای گیاهی و یا از طریق کاهش هدررفت کربن آلی خاک طی فرایندهای معدنی شدن و تجزیه بقایای گیاهی صورت می‌گیرد (2).

ذرات ریز خاک (کوچک‌تر از 20 میکرومتر) نقش مهمی در پایداری کربن آلی در خاک ایفا می‌کنند که بیان‌کننده این حقیقت است که جز سیلت و رس خاک دارای مقدار کربن آلی بیش‌تری نسبت به جز شن خاک هستند (3 و 4) و کاهش کربن آلی در این اجزا پس از کشت کم‌تر از جزء شن خاک می‌باشد (5، 6، 7). مطالعات مختلف در زمینه ارتباط بین رس و مقدار کربن آلی خاک نشان می‌دهد که خاک‌های مختلف، ویژگی‌های متفاوتی در نگهداشت و تجزیه کربن آلی خاک دارند؛ بنابراین مقدار کربن آلی جذب شده بر روی جز سیلت و رس تحت تأثیر ویژگی‌های خاک قرار دارد (8، 9).

مطالعات نشان می‌دهند که بافت خاک بر خاکدانه‌سازی تأثیرگذار است (10). در حقیقت افزایش مقدار رس موجب افزایش خاکدانه‌سازی و

نیز پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. در نتیجه مقدار نگهداشت ماده آلی افزایش می‌یابد. خاکدانه‌سازی و به دام افتادن ماده آلی در داخل خاکدانه موجب عدم دسترسی ریزجانداران و آنزیم‌های برون یاخته‌ای به ماده آلی می‌گردد در نتیجه ماده آلی از تجزیه میکروبی حفظ می‌شود. در واقع بافت خاک (مقدار رس خاک) نقش مستقیم و غیرمستقیمی در حفاظت فیزیکی و شیمیایی از ماده آلی خاک دارد (10).

پیوند شیمیایی بین مولکول‌های ماده آلی و سطوح رس‌ها منجر به کاهش تجزیه ماده آلی و افزایش پایداری کمپلکس‌های آلی - معدنی، در مقابل تجزیه میکروبی می‌شود (11). تجزیه ماده آلی که با ذرات رس و سیلت پیوند برقرار کرده است کم‌تر از ماده آلی آزاد در خاک است. مطالعات مختلف نشان می‌دهند که ظرفیت تثبیت ماده آلی، در ارتباط با مقدار رس و سیلت خاک است که باعث افزایش سطح ویژه و واکنش‌پذیری خاک می‌شوند (12، 13).

افزایش مقدار رس، منجر به کاهش انتشار اکسیژن و کاهش تجزیه ماده آلی خاک می‌گردد (14). هم‌چنین تثبیت ماده آلی با افزایش سطح ویژه خاک، افزایش می‌یابد (11، 15). وجود مقدار کربن آلی بیش‌تر در خاک‌های رسی نسبت به خاک‌های شنی در مطالعات مختلفی نشان داده شده است (10، 16، 17) در نتیجه جذب کربن آلی با کانی‌شناسی، مقدار رس و به‌خصوص سطح ویژه آن در ارتباط است. هم‌چنین جذب مونوساکاریدها و پلی‌ساکاریدها بر روی رس‌ها تحت تأثیر نوع و مقدار رس، pH و کاتیون‌های تبدلی قرار دارد. نوع خاک تأثیر بالایی در سنتز قندها توسط ریزجانداران دارد که منعکس‌کننده تولیدات میکروبی و تفاوت در ویژگی‌های اکوفیزیولوژیکی خاک‌ها می‌باشد (18).

مطالعات مختلف، تأثیر بازدارندگی فیلوسیلیکات‌ها¹ بر تجزیه میکروبی ماده آلی را نشان داده‌اند. برخی نتایج کاهش سرعت تجزیه ماده آلی در خاک را تحت تأثیر فیلوسیلیکات‌ها می‌دانند ولی فیلوسیلیکات‌ها، بر مقدار ماده آلی محلول و جذب سطحی شده، تأثیری نداشتند (19) درحالی‌که برخی مطالعات نیز کاهش برگشت‌پذیری ماده آلی جذب سطحی شده بر روی رس‌ها به درون محلول خاک را، عامل اصلی تجزیه کمتر ماده آلی بیان کردند (20). مطالعات مختلف نشان دادند که ترکیبات آلی جذب شده بر روی رس‌ها تحت تأثیر تجزیه میکروبی قرار نمی‌گیرند (19، 21، 22). در اغلب مطالعات کاهش سرعت تجزیه ماده آلی با افزایش ظرفیت پیوندی در رس‌ها به ترتیب مونت‌موریلونیت < هکتوریت < ایلیت < کائولینیت می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهند پیوندهای قوی نقش مهمی در کنترل سرعت تجزیه ماده آلی در خاک دارند (19، 23).

پیوند شیمیایی بین مولکول‌های ماده آلی و سطوح رس‌ها منجر به کاهش تجزیه کربن آلی و افزایش پایداری کمپلکس‌های آلی - معدنی، در مقابل تجزیه میکروبی می‌شود (24)؛ زیرا مولکول‌های ماده آلی کوچک جذب شده بر روی سطح رس‌ها برای ریزجانداران غیرقابل استفاده بوده و ریزجانداران توانایی تجزیه این مولکول‌ها را ندارند.

پلی‌ساکاریدها از طریق پل‌های کاتیونی پیوند قوی با رس‌ها برقرار می‌کنند و در نتیجه از تجزیه میکروبی حفظ می‌گردند (25). به‌طور کلی، طول عمر و پایداری شیمیایی ماده آلی، به پیوندشدن ماده آلی با کاتیون‌های تبادلپذیری و ساختمانی به‌خصوص Ca^{2+} ، Fe^{3+} و Al^{3+} بستگی دارد (26). مطالعات نشان می‌دهد که مقدار ماده آلی خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری با ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارد (27). هم‌چنین کاتیون‌های

مختلف به‌ویژه کاتیون‌های دو ظرفیتی و سه‌ظرفیتی در اتصال رس‌ها به کربن آلی نقش مهمی دارند و بنابراین کربن آلی در خاک‌های رسی از تجزیه میکروبی حفظ می‌شود. کاتیون‌های تبدلی مانند آلومینیوم، کلسیم، منیزیم و آهن بین رس و مواد هومیکی ارتباط برقرار می‌کنند و انباشته شدن ترکیبات هومیکی را افزایش می‌دهند (28، 29).

ماده آلی با استفاده از کاتیون‌های فلزی موجود در خاک تشکیل کمپلکس‌های پایدار می‌دهد که این کمپلکس‌ها به‌دلیل مقاوم بودن در برابر تجزیه میکروبی و بزرگی مولکول، موجب پایداری ماده آلی در خاک می‌شوند. ماده آلی خاک در حضور کاتیون Ca^{2+} نسبت به کاتیون Na^{+} کمپلکس‌های پایداری در شرایط مختلف pH تشکیل می‌دهد، درحالی‌که عدم حضور کاتیون‌ها موجب بی‌ثباتی ماده آلی خاک شده و به دلیل دافعه الکترواستاتیکی بین مولکول‌های ماده آلی، سرعت تجزیه بیش‌تر می‌شود (30).

اهمیت رس‌ها و کاتیون‌های تبدلی در پایداری ماده آلی خاک در مطالعات مختلفی نشان داده شده است (31، 32) ولی مطالعه مستقیم تأثیر این عوامل بر سرعت تجزیه ماده آلی خاک محدود است. بهترین روش مطالعه تأثیر کانی‌شناسی خاک بر سرعت تجزیه ماده آلی استفاده از خاک‌های مصنوعی² و دست‌ساز است. مخلوط شن، رس و ماده آلی یا بقایای گیاهی برای این منظور مناسب می‌باشد. مواد معدنی بکار رفته اغلب شامل رس‌های فیلوسیلیکاته است و می‌توان شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مصنوعی را به‌دلخواه تنظیم کرد. در این خاک‌ها ارتباط بین ماده آلی، نوع رس و ریزجانداران به‌خوبی قابل بررسی می‌باشند (33، 34، 35). هم‌چنین آزمایش‌های انکوباسیون با استفاده از ترکیبات شناخته شده می‌توانند به تعیین فاکتورهای مؤثر بر سرعت تجزیه

ماده آلی در خاک کمک کنند. در نتیجه این مطالعه با هدف بررسی تأثیر مقدار مختلف ورمی کولیت و زئولیت و کاتیون‌های تبادل کلسیم، سدیم و آلومینیوم بر نگهداشت کربن آلی خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی: برای مطالعه تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر تجزیه کربن آلی، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورهای آزمایشی عبارتند از: نوع رس (ورمی کولیت و زئولیت)، سطوح مختلف رس (صفر، 15، 30 و 45 درصد وزنی) و نوع کاتیون تبدلی (Na^+ ، Ca^{2+} و Al^{3+}). آزمایش شامل 24 تیمار و با لحاظ کردن سه تکرار در مجموع 72 واحد آزمایشی وجود داشت. زئولیت مورد استفاده در این آزمایش از نوع کلینوپتیلولیت¹ ($(Na,K)_6(Al_6Si_{30}O_{72})20H_2O$) بود. ورمی کولیت (CAS 1318-00-9) و زئولیت (CAS 1318-02-1) مورد استفاده در این مطالعه از شرکت سیگما

آمریکا تهیه شدند. طیف‌گیری از ورمی کولیت و زئولیت نیز با استفاده از دستگاه پراش X-Ray (BRUKER D8 ADVANCE) انجام شد (شکل 1). ویژگی‌های رس‌ها از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات آمونیوم در pH=7 (36) سطح ویژه کل رس‌ها به روش اشباع با اتیلن گلیکول مونو اتیلن اتر (EGME) (37) و روش BET در دمای ثابت 77 درجه کلون با دستگاه BELSORP MINI II (رس‌های اشباع شده از آلومینوم، به هم چسبیده و اندازه‌گیری سطح ویژه کل در این نمونه‌ها با مشکل مواجه می‌شود و عدد واقعی از سطح ویژه کل تعیین نمی‌گردد، به همین دلیل سطح ویژه برای رس‌های اشباع شده از سدیم و کلسیم اندازه‌گیری گردید)، چگالی بار سطح با تقسیم کردن ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها بر سطح ویژه به دست آمده از روش EGME (38) و نیز pH (Jenway 3510) و EC (Jenway 4510) رس‌ها در نسبت 1:5 با آب مقطر (39) اندازه‌گیری شدند (جدول 1).

جدول 1- ویژگی‌های رس‌های اشباع شده با کاتیون‌های مورد مطالعه در آزمایش.

Table 1. Characteristics of the clays saturated with cations studied in the experiment.

Table 1. Characteristics of the clay minerals obtained from natural sources in the environment												
EC (1:5) (μS/cm)			pH (1:5)			چگالی بار سطح Surface charge density (mmol _c /m ²)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (mmol _c /kg)	سطح ویژه				رس Clay
								SSA (m ² /g)				
								BET		EGME		
Al	Ca	Na	Al	Ca	Na	Na-Clay		Ca	Na	Ca	Na	
28	37	25	5	6.80	5.40	1.23 × 10 ⁻³	1050	46.76	49	742	850	ورمی کولیت Vermiculite
31	39	26	4.80	6.40	5.50	2.54 × 10 ⁻³	2540	85.50	115.01	852	991	زئولیت Zeolite

SSA: Specific Surface Area

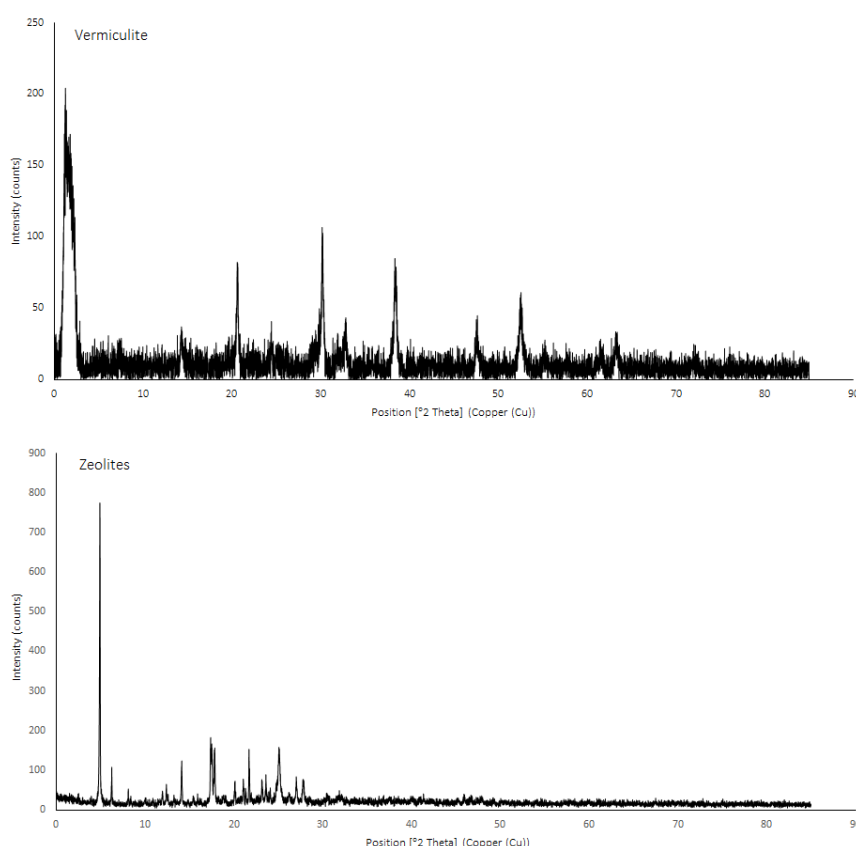
CEC: Cation Exchange Capacity

EC: Soil Electrical Conductivity

EGME: Ethylene Glycol Monomethyl Ether

BET: Brunauer-Emmett-Teller

Surface charge density = CEC/ Total surface area (38)



شکل 1- پراش نگار ورمی کولیت و زئولیت با استفاده از دستگاه پراش X-Ray.
Figure 1. Spectrum of vermiculite and zeolite using X-Ray diffract meter.

ابتدا رس‌ها با استفاده از محلول یک مولار NaCl برای پراکندگی کامل ذرات اشباع شدند. رس‌ها برای حذف املاح اضافی موجود با آب مقطر تا کاهش EC محلول خروجی (کم‌تر از $100 \mu\text{S}/\text{cm}$) شسته و رس‌های شسته شده با استفاده از دستگاه پروب التراسوند¹ (Hielscher UP 200H) با دامنه 60 و دور 0/5، به مدت 10 دقیقه به آرامی پراکنده گردید. برای جداسازی جز رس کوچک‌تر از دو میکرومتر از روش ته‌نشینی استفاده شد (41). برای خشک کردن کامل رس‌ها از دستگاه Freeze Dryer (Büchi, L 200) استفاده گردید. رس‌های خشک شده در ظرف‌های پلی‌اتیلنی و در دمای محیط تا اعمال تیمارها نگهداری شدند. برای تهیه رس‌هایی با کاتیون تبدیلی یکسان²، ورمی‌کولیت و زئولیت با محلول‌های یک مولار از

تهیه و آماده‌سازی مواد آزمایشی: برای انجام آزمایش انکوباسیون از مخلوط‌های شن و رس یا خاک دست‌ساز (مصنوعی) استفاده گردید. برای حذف املاح محلول و ذرات رس از شن، ابتدا شن به‌طور کامل با آب مقطر شسته و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و ذرات باقی‌مانده بر روی الک 0/05 میلی‌متر برای شستشو با اسید کلریدریک استفاده گردید (40). برای حذف کربن و یا کربنات‌های احتمالی موجود، شن طی دو مرحله، به مدت چهار ساعت در دمای 550 درجه سلسیوس در کوره حرارت داده شده و سپس با محلول HCl دو مولار تا حذف کامل کربنات‌ها (عدم جوشش با اسید)، شسته شد. سپس شن دوباره با آب مقطر شسته شده و در دمای 105 درجه سلسیوس در آون خشک شد (39).

1- Ultrasound
2- Homoionic clays

50 گرم (5 درصد وزنی) خاک دست‌ساز استفاده شد. بقایای یونجه در دمای 55 درجه سلسیوس به مدت 72 ساعت خشک شده و پس از پودر شدن از الک یک میلی‌متری عبور داده شدند. بقایای یونجه در سه مرحله و هر بار به مدت دو ساعت برای حذف کامل فلور میکروبی در دمای 120 درجه سلسیوس و فشار یک اتمسفر در اتوکلاو مرطوب قرار گرفته و استریل شدند (43، 44). محتوای کربن آلی با دستگاه CHNS (Elementar, Vario EL III) و پس از هضم مرطوب نمونه گیاهی، نیتروژن، فسفر و پتاسیم کل موجود در بقایای گیاهی اندازه‌گیری گردید (39) (جدول 2).

نمک‌های NaCl ، CaCl_2 و AlCl_3 به‌طور جداگانه تیمار شدند. سپس محلول حاوی ورمی‌کولیت و زئولیت جداگانه به داخل لوله دیالیز منتقل شده و در آب مقطر قرار گرفت و آب مقطر روزی سه بار تعویض شد تا یون کلر موجود در رس‌ها به‌طور کامل خارج گردد (28). برای بررسی نبود کلر در آب مقطری که لوله دیالیز در آن قرار داشت، از نیترات نقره یک مولار استفاده شد (42). پس از اطمینان از خروج کامل یون کلر از رس‌ها، نمونه‌ها به‌طور جداگانه با دستگاه Freeze Dryer خشک و ذخیره شدند (28).

آزمایش انکوباسیون: برای بررسی اثرات تیمارها بر تجزیه ماده آلی، از بقایای یونجه به مقدار 2/5 گرم در

جدول 2- ویژگی‌های بقایای یونجه مورد استفاده در آزمایش انکوباسیون.

Table 2. Characteristics of alfalfa residues used in the incubation experiment.

پتاسیم Potassium (%)	فسفر Phosphorus (%)	نسبت کربن به نیتروژن (C/N)	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	کربن آلی Organic carbon (%)
2.34	0.30	13	3.7	48.21

نمونه به مدت دو ساعت هم زده شد. سپس محلول رویی این سوسپانسیون برای اطمینان از حذف کامل رس‌ها، به مدت 12 دقیقه با دور 1000، سانتریفیوژ گردید. پس از حذف کامل رس‌ها، محلول رویی به یک لوله فالکون جدید منتقل و دوباره به مدت 30 دقیقه با دور 4000 سانتریفیوژ و محلول به دست آمده با نسبت 1:10 به نمونه‌های خاک‌های مصنوعی افزوده شد (35). در خاک مورد استفاده برای تهیه عصاره خاک، pH گل اشباع (39)، EC عصاره گل اشباع (39)، محتوای کربن آلی (45) و نیتروژن کل به روش کلدال (46) اندازه‌گیری شدند (جدول 3).

نمونه‌های تهیه شده از خاک‌های مصنوعی استریل (مطابق روش استریل بقایای یونجه) بودند به همین دلیل پیش از انکوباسیون نمونه‌ها و پس از اضافه کردن بقایای یونجه استریل به خاک‌های مصنوعی استریل، نمونه‌ها با استفاده از عصاره استخراج شده از یک خاک طبیعی مایه‌زنی شدند. برای استخراج عصاره خاک، یک نمونه مرکب از افق شخم یک خاک طبیعی و از عمق صفر تا 20 سانتی‌متری که زیر کشت گیاه یونجه بود، تهیه گردید. برای تهیه عصاره خاک 10 گرم خاک در 90 میلی‌لیتر آب مقطر استریل (سوسپانسیون 1:9 خاک به آب مقطر) ریخته شد و

جدول 3- ویژگی‌های خاک مورد استفاده در تهیه عصاره خاک.

Table 3. Characteristics of the soil used in for the inoculum preparation.

نیترژن کل Total nitrogen (%)	کربن آلی Organic carbon (%)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH
0.03	0.5	864	7

موجود در نمونه‌ها پس از گذشت 180 روز از شروع انکوباسیون نمونه‌ها، با دو روش عصاره‌گیری با آب داغ 85 درجه سلسیوس و اسید سولفوریک رقیق 0/5 مولار و به روش فنل - دی‌سولفونیک اسید اندازه‌گیری شدند. جهت ایجاد رنگ نارنجی متمایل به قرمز در نمونه‌ها، به دو میلی‌لیتر از عصاره خاک، 0/05 میلی‌لیتر محلول فنل 80 درصد وزنی و پنج میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ اضافه گردید و شدت جذب نوری نمونه‌ها در طول موج 490 نانومتر با دستگاه اسپکتروفوتومتر (UV/VIS Perkin Elmer- lambda 25) خوانده شد و محتوای کربوهیدرات نمونه‌ها برحسب میلی‌گرم بر گرم خاک خشک گزارش گردید (51، 52).

آنالیز آماری: پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های ذکر شده در تمامی نمونه‌ها و پیش از تجزیه واریانس، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف¹ و همگنی واریانس تیمارها با استفاده از آزمون لون² به کمک نرم‌افزار SPSS 25 (SPSS Inc., Chicago, USA) در سطح 5 درصد مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. تجزیه واریانس داده‌ها به کمک نرم‌افزار (SAS Institute Inc., 1990) به SAS 9.4 صورت گرفت و مقایسه میانگین داده‌ها به کمک آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال 5 و 1 درصد انجام شدند. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Microsoft Office 13.0 ترسیم گردیدند.

مخلوط‌های شن و رس یا خاک دست‌ساز 50 گرمی با توجه به مقدار و نوع رس و نوع کاتیون تبادل، به‌صورت جداگانه تهیه شدند. سپس به تمامی نمونه‌ها به میزان پنج درصد وزنی بقایای گیاهی یونجه استریل اضافه گردید. پس از افزودن عصاره خاک و هوا خشک کردن نمونه‌ها، دوباره رطوبت نمونه‌ها با استفاده از آب مقطر استریل به 60 درصد ظرفیت مزرعه رسید و به مدت 180 روز و در دمای 25 درجه سلسیوس در تاریکی خوابانیده شدند. ظرفیت نگهداری آب در نمونه خاک‌های مصنوعی و شن خالص توسط دستگاه صفحات فشاری (ELE 532-120) و در سه تکرار تعیین گردید (47).
اندازه‌گیری کربن معدنی‌شده، کربن زیست‌توده میکروبی و میزان کربوهیدرات در خاک: میزان کربن معدنی‌شده و یا تنفس میکروبی خاک به کمک اندازه‌گیری مقدار دی‌اکسیدکربن حاصل از تنفس میکروبی و از طریق تیتراسیون برگشتی با سود باقی‌مانده با اسید کلریدریک تعیین شد (48). مقدار کربن زیست‌توده میکروبی پس از گذشت 180 روز از شروع انکوباسیون نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید. کربن زیست‌توده میکروبی، از طریق گازدهی با کلروفرم و عصاره‌گیری خاک با سولفات پتاسیم 0/5 مولار تعیین شد. مقدار کربن آلی موجود در عصاره‌ها از طریق اکسایش با سولفوکرومیک اسید اندازه‌گیری شد (48). راندمان تجزیه کربن زیست‌توده میکروبی (KEC) در روش اکسایش با سولفوکرومیک اسید 0/38 در نظر گرفته شد (49، 50). هم‌چنین میزان کربوهیدرات

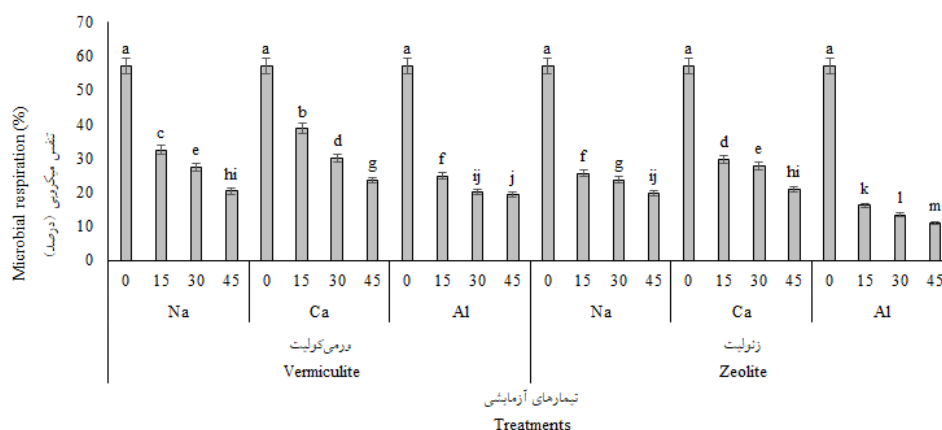
1- Kolmogorov-Smirnov test

2- Levene's Test

نتایج و بحث

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر تنفس میکروبی خاک: تجزیه واریانس نشان داد اثرات ساده و اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر تنفس میکروبی خاک در سطح احتمال یک درصد معنی دار شدند

(جدول 4). بیشترین مقدار تنفس میکروبی در شن خالص (57/22 درصد) و کمترین مقدار آن در خاک‌هایی با 45 درصد زئولیت اشباع شده با کاتیون آلومینیوم (10/99 درصد) اندازه‌گیری شد (شکل 2).



شکل 2- اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر تنفس میکروبی خاک.

Figure 2. Interaction effect of type and amount of clay and type of exchangeable cation on soil microbial respiration.

جدول 4- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر تنفس میکروبی، کربن زیست‌توده میکروبی و غلظت کربوهیدرات‌ها.

Table 4. The results of variance analysis of the effect of type and content of clay and type of exchangeable cation on microbial respiration, microbial biomass carbon and carbohydrate concentration.

میانگین مربعات				df	منابع تغییرات Sources of variation
کربوهیدرات اسید رقیق Carbohydrate (diluted acid)	کربوهیدرات آب داغ Carbohydrate (hot water)	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon	تنفس میکروبی Microbial respiration		
0.04**	0.27**	24.37**	42926.45**	1	نوع رس Clay type
44.23**	38.28*	961.27*	775466.22**	3	مقدار رس Clay content
16.82**	15.80**	1301.07**	61525.56**	2	نوع کاتیون تبدلی Type of exchangeable cation
0.03**	0.06**	3.10*	7356.57**	3	نوع رس × مقدار رس Clay type × Clay content
0.31**	0.07**	2.24**	2330.07*	2	نوع رس × نوع کاتیون تبدلی Clay type × cation
2.23**	2.16*	148.93**	8665.97**	6	مقدار رس × نوع کاتیون تبدلی Clay content × cation
0.09**	0.03**	1.13**	841.55**	6	نوع رس × مقدار رس × نوع کاتیون تبدلی Clay type × Clay content × cation
0.003	0.004	0.11	27.93	48	خطا Error
3.41	2.17	3.60	3.37	-	ضریب تغییرات (%) CV (%)

** و * به ترتیب در سطح 1٪ و 5٪ معنی دار و ^{ns} اختلاف معنی دار نیست

** and * significant at 1% and 5% and ^{ns} not significant respectively

نتایج پژوهش با مطالعات صورت گرفته، هماهنگی داشت (53، 54). رس‌ها می‌توانند بر نگهداشت، پایداری (55، 56) و ترکیب بیوشیمیایی ماده آلی (35) تأثیرگذار باشند. به علاوه پایداری ترکیبات میکروبی نیز در سطح رس‌ها تغییر می‌کند (57، 58). تفاوت در میزان و کیفیت شیمیایی ماده آلی موجود در سطح رس‌ها به دلیل سطح ویژه متفاوت رس‌ها است (59). رس‌های مختلف سطح ویژه متفاوتی دارند بنابراین نوع رس، می‌تواند در حفظ و نگهداشت کربن آلی تأثیر داشته باشد. خاک‌های دارای رس‌هایی با سطح ویژه بالا، نسبت به خاک‌هایی دارای رس‌هایی با سطح ویژه پایین، کربن آلی بیشتری داشتند و آن را در مقابل تجزیه میکروبی بهتر حفظ کردند (60، 61). احتمالاً سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر زئولیت در مقایسه با ورمی‌کولیت (جدول 1) عامل اصلی کاهش معدنی شدن و هدررفت کربن آلی خاک در حضور زئولیت می‌باشد (شکل 2)؛ زیرا سطح ویژه بالاتر و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر منجر به برقراری پیوندهای قوی بین رس‌ها و کربن آلی خاک شده و بنابراین پایداری کربن آلی در خاک افزایش می‌یابد (53، 62). تأثیر زئولیت طبیعی نوع کلینوپتیولیت بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و تغییر شکل ماده آلی به ترکیبات هوموسی در مطالعه‌ای نشان داده شد (63). زئولیت طبیعی با کنترل یون‌های تبدلی گروه‌های عاملی اسیدی، واکنش‌پذیری ماده آلی را تغییر می‌دهد (64). زئولیت توانایی بالایی در پیوند با ماده آلی و کاتیون‌های مختلف دارد. پیوند زئولیت با کاتیون‌های تبدلی موجب بهبود ساختمان خاک و افزایش نگهداشت کربن آلی خاک می‌شود (65).

تفاوت در معدنی شدن کربن آلی بین شن خالص و خاک‌هایی با 15 درصد رس نسبت به خاک‌هایی با 30 و 45 درصد واضح‌تر بود. این امر نشان می‌دهد که مقدار 15 رس نیز، سطح ویژه کافی برای جذب و نگهداشت ماده آلی و کاهش معدنی شدن آن، فراهم

می‌کنند (شکل 2). در حقیقت افزایش مقدار رس موجب افزایش خاکدانه‌سازی و نیز پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. در نتیجه مقدار نگهداشت ماده آلی بیش‌تر می‌شود. خاکدانه‌سازی و محبوس شدن ماده آلی در داخل خاکدانه موجب عدم دسترسی ریزجانداران و آنزیم‌های برون یاخته‌ای به ماده آلی می‌گردد در نتیجه ماده آلی از تجزیه میکروبی حفظ می‌شود. در واقع بافت خاک (مقدار رس خاک) نقش مستقیم و غیرمستقیمی در حفاظت فیزیکی و شیمیایی از ماده آلی خاک دارد (10). نتایج مشابهی برای خاک‌های شنی و رسی در مطالعات مختلف گزارش شده است (60، 61).

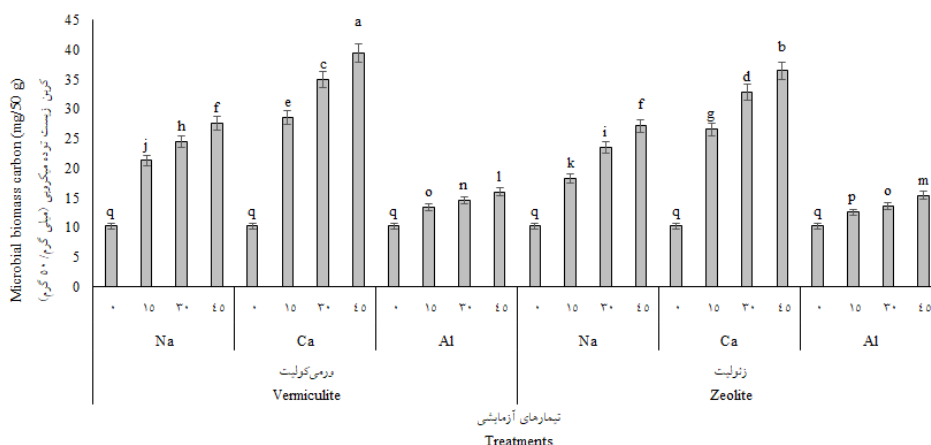
کاتیون‌های تبدلی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر گذاشته و معدنی شدن کربن آلی در خاک را کنترل می‌کنند. کاتیون تبدلی سدیم باعث پراکنده کردن ذرات خاک و ایجاد شرایط فیزیکی نامطلوب می‌گردد (61، 67) در نتیجه به دلیل از دست دادن شرایط هوازی و رطوبتی مناسب، تجزیه بقایای گیاهی در خاک‌های سدیمی آهسته‌تر از خاک‌های کلسیمی بود (شکل 2). هم‌چنین کلسیم تبدلی با بهبود شرایط رطوبتی و هوادهی برای ریزجانداران خاک موجب رشد و افزایش فعالیت میکروبی شده (67، 68) و معدنی شدن کربن آلی در خاک افزایش یافت (شکل 2). با افزایش مقدار زئولیت به 45 درصد، تأثیر کاتیون تبدلی سدیم بر معدنی شدن کربن آلی مشابه با کاتیون تبدلی کلسیم بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار pH برای رس‌های کلسیمی و آلومینیوم اندازه‌گیری شدند و pH رس‌های سدیمی مقدار حد واسطی داشت (جدول 1). معدنی شدن آهسته‌تر کربن آلی در خاک‌های آلومینیومی در مقایسه با خاک‌های کلسیمی و سدیمی (شکل 2) احتمالاً به دلیل کاهش pH، سمیت آلومینیوم برای ریزجانداران و تشکیل کمپلکس‌های پایدار ماده آلی - آلومینیوم در برابر تجزیه میکروبی است (69).

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر کربن زیست‌توده میکروبی خاک: با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات

با افزایش مقدار رس، مقدار کربن زیست توده میکروبی افزایش یافت. گزارش شده است با افزایش مقدار رس، زیست توده میکروبی و در نتیجه معدنی شدن ماده آلی افزایش یافت (71). تفاوت در مقدار کربن زیست توده میکروبی بین شن خالص و خاک هایی با 15 درصد رس، بیش تر از تفاوت بین خاک هایی با 15، 30 و 45 درصد بود. این نتیجه نشان می دهد مقدار اندکی رس نیز می تواند سطح ویژه کافی برای نگهداشت زیست توده میکروبی و کاهش تجزیه ماده آلی در خاک فراهم کند. مطالعات نشان داد که حلالیت ماده آلی با افزایش pH، افزایش یافته و بنابراین دسترسی ریزجانداران به ماده آلی و در نتیجه معدنی شدن ماده آلی بیش تر شد (71). این نتایج با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت داشت (شکل 3). احتمالاً، تأثیر کاتیون های تبدلی بر محیط خاک و تغییر شرایط فیزیکوشیمیایی خاک منجر به بهبود شرایط رشد ریزجانداران شده و در نتیجه معدنی شدن کربن آلی تحت تأثیر قرار گرفته است.

ساده و اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر کربن زیست توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول 4). بیش ترین مقدار کربن زیست توده میکروبی در خاک هایی با 45 درصد ورمی کولیت اشیاع شده با کلسیم به میزان 39/39 میلی گرم بر 50 گرم خاک و کم ترین مقدار این صفت در شن خالص به دست آمد (شکل 3).

معدنی شدن کربن آلی تحت تأثیر مقدار زیست توده میکروبی خاک قرار داشت. در خاک های دارای ورمی کولیت، با افزایش مقدار کربن زیست توده میکروبی، معدنی شدن کربن آلی افزایش یافت. احتمالاً معدنی شدن و نگهداشت کربن آلی در خاک توسط اندازه و فعالیت جمعیت میکروبی در خاک کنترل می شود (شکل 3). جمعیت میکروبی می تواند واکنش های متفاوتی به زئولیت افزوده شده به خاک داشته باشند. نتایج مطالعه ای نشان داد، افزایش 5 درصد زئولیت به خاک هم کیفیت و هم کمیت جامعه میکروبی را تغییر می دهد و جمعیت باکتری های خاک نسبت به قارچ ها بیش تر کاهش می یابد (70).



شکل 3- اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر کربن زیست توده میکروبی خاک.

Figure 3. Interaction effect of type and amount of clay and type of exchangeable cation on soil microbial biomass carbon.

اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر غلظت کربوهیدرات عصاره گیری شده با آب داغ و اسید رقیق در سطح احتمال یک درصد معنی دار

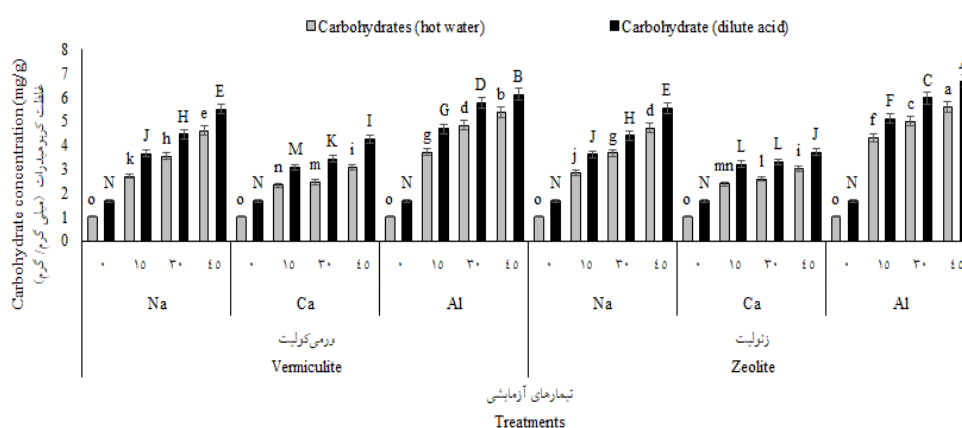
تأثیر تیمارهای آزمایشی بر غلظت کربوهیدرات عصاره گیری شده با آب داغ و اسید رقیق: با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس داده ها اثرات ساده و

خالص و 15 درصد رس بیش‌تر از تفاوت بین غلظت کربوهیدرات‌ها در 15، 30 و 45 درصد رس بود. احتمالاً حتی مقادیر کم رس نیز ظرفیت کافی، برای جذب و نگهداشت کربوهیدرات‌ها در خاک فراهم می‌کند (شکل 4). هم‌چنین خاک‌هایی با محتوای رس بیش‌تر با افزایش جذب و غیرفعال کردن آنزیم‌های تجزیه‌کننده، بر نگهداشت ماده آلی در خاک مؤثر هستند. وجود کربوهیدرات بیش‌تر در جز رس نسبت به جز شن در مطالعات مختلفی گزارش شده است (76، 77).

کم‌ترین و بیش‌ترین pH به ترتیب در رس‌های آلومینیومی و کلسیمی اندازه‌گیری گردید و رس‌های سدیمی تأثیر حد واسطی بر pH داشتند (جدول 1). احتمالاً تأثیر سوء اسیدیته و سمیت آلومینیوم بر رشد و فعالیت ریزجانداران و هم‌چنین تشکیل کمپلکس‌های پایدار ماده آلی - آلومینیوم دلیل افزایش مقدار کربوهیدرات عصاره‌گیری‌شده با آب داغ و اسید رقیق در رس‌های اشباع شده با آلومینیوم بود. در مطالعات قبلی تأثیر سوء اسیدیته و سمیت آلومینیوم را بر رشد و فعالیت ریزجانداران و معدنی شدن ماده آلی گزارش شده است (61، 78، 79).

شدند (جدول 1). بیش‌ترین غلظت کربوهیدرات عصاره‌گیری‌شده با آب داغ و اسید رقیق در خاک‌هایی با 45 درصد زئولیت اشباع شده با آلومینیوم به ترتیب به میزان 5/58 و 6/69 میلی‌گرم بر گرم خاک و کم‌ترین مقدار کربوهیدرات‌ها در شن خالص اندازه‌گیری شدند (شکل 4).

با توجه به سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر زئولیت نسبت به ورمی‌کولیت (جدول 1)، احتمالاً این ویژگی‌های زئولیت، در جذب و نگهداشت کربوهیدرات‌ها در خاک نقش داشته است. جذب منوساکاریدها و پلی‌ساکاریدها توسط رس‌ها در مطالعات متعددی نشان داده شده است و گزارش شده که با افزایش مقدار رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه خاک‌ها، جذب پلی‌ساکاریدها افزایش می‌یابد (72، 73، 74). نتایج مطالعات نشان داد که پلی‌ساکاریدها با رس‌ها و ترکیبات هومیکی کمپلکس تشکیل می‌دهند و با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها، کمپلکس‌های رس - پلی‌ساکارید بیش‌تری در خاک تشکیل می‌گردد (75). با توجه به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها تفاوت بین غلظت کربوهیدرات عصاره‌گیری‌شده با آب داغ و اسید رقیق در شن



شکل 4- اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدالی بر غلظت کربوهیدرات عصاره‌گیری‌شده با آب داغ و اسید رقیق.

Figure 4. Interaction effect of type and amount of clay and type of exchangeable cation on carbohydrate concentration extracted with hot water and dilute acid.

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر تأثیر مقادیر مختلف ورمی کولیت و ژئولیت و تأثیر کاتیون‌های تبادلی سدیم، کلسیم و آلومینیوم را بر نگهداشت کربن بقایای گیاهی یونجه مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که معدنی شدن کربن بقایای گیاهی یونجه، مقدار کربن زیست‌توده میکروبی و غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع رس قرار داشته و با افزایش سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها معدنی شدن کربن آلی کاهش ولی غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد مقدار کمی رس قادر به ایجاد سطح ویژه کافی برای نگهداشت ماده آلی در خاک می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که نوع کاتیون تبادلی تأثیر معنی‌داری بر سرعت معدنی‌شدن کربن آلی و مقدار کربن زیست‌توده میکروبی خاک داشت. خاک‌هایی با کاتیون تبادلی

کلسیم سرعت معدنی شدن بالاتر و مقدار زیست‌توده میکروبی بیش‌تری در مقایسه با خاک‌های سدیمی و آلومینیومی داشتند. تأثیر فیزیکی و شیمیایی کاتیون‌های سدیم و آلومینیوم در خاک موجب کاهش معدنی‌شدن ماده آلی و مقدار زیست‌توده میکروبی خاک‌ها شدند. غلظت کربوهیدرات‌ها در خاک‌هایی با کاتیون تبادلی آلومینیوم نسبت به خاک‌هایی با کاتیون‌های تبادلی کلسیم و سدیم بیش‌تر بود که به دلیل پایین بودن pH، سمیت آلومینیوم برای ریزجانداران و تشکیل کمپلکس‌های پایدار آلومینیوم- ماده آلی، می‌باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، شرایط واقعی‌تر و نزدیک به خاک‌های طبیعی برای بررسی اثرات متقابل عوامل مختلف در نگهداشت کربن آلی، در نمونه خاک‌های مصنوعی ایجاد شود.

منابع

1. Loveland, P., & Webb, J. (2003). Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil and Tillage Research*, 70(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00139-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00139-3)
2. Saidy, A. R., Smernik, R. J., Baldock, J. A., Kaiser, K., & Sanderman, J. (2013). The sorption of organic carbon onto differing clay minerals in the presence and absence of hydrous iron oxide. *Geoderma*, 209, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.026>
3. Homann, P. S., Kapchinske, J. S., & Boyce, A. (2007). Relations of mineral-soil C and N to climate and texture: regional differences within the conterminous USA. *Biogeochemistry*, 85(3), 303-316. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9139-6>
4. Lorenz, K., Lal, R., & Shipitalo, M. J. (2008). Chemical stabilization of organic carbon pools in particle size fractions in no-till and meadow soils. *Biology and Fertility of Soils*, 44(8), 1043-1051. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0300-8>
5. Kalbitz, K., Schwesig, D., Rethemeyer, J., & Matzner, E. (2005). Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(7), 1319-1331. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.11.028>
6. Ludwig, B., Helfrich, M., & Flessa, H. (2005). Modelling the long-term stabilization of carbon from maize in a silty soil. *Plant and Soil*, 278(1-2), 315-325.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11104-005-8808-2> <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8808-2>.
7. Jolivet, C., Arrouays, D., Leveque, J., Andreux, F., & Chenu, C. (2003). Organic carbon dynamics in soil particle-size separates of sandy Spodosols when forest is cleared for maize cropping. *European Journal of Soil Science*, 54(2), 257-268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00541.x> <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00541.x>.
 8. Angst, G., Messinger, J., Greiner, M., Häusler, W., Hertel, D., Kirfel, K., Kögel-Knabner, I., Leuschner, C., Rethemeyer, J., & Mueller, C. W. (2018). Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds. *Soil Biology and Biochemistry*, 122, 19-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.026> <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.026>.
 9. Saidy, A. R. (2013). Effect of coating phyllosilicate clays with hydrous oxides on organic carbon stabilisation University of Adelaide.
 10. Hamarashid, N. H., Othman, M. A., & Hussain, M. A. H. (2010). Effects of soil texture on chemical compositions, microbial populations and carbon mineralization in soil. *Egyptian Journal of Experimental Biology (Botany)* 6(1), 59-64.
 11. Kahle, M., Kleber, M., & Jahn, R. (2004). Retention of dissolved organic matter by phyllosilicate and soil clay fractions in relation to mineral properties. *Organic Geochemistry*, 35(3), 269-276. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2003.11.008> <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2003.11.008>.
 12. Murphy, B. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties-a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605-635. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR14246> <https://doi.org/10.1071/SR14246>.
 13. Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützw, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., & Garcia-Franco, N. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026> <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>.
 14. Umar, S. (2010). Effect of clay on plant residue decomposition.
 15. Kaiser, K., & Guggenberger, G. (2003). Mineral surfaces and soil organic matter. *European Journal of Soil Science*, 54(2), 219-236. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00544.x> <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00544.x>.
 16. Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in agronomy*, 158, 217-310. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.004> <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.004>.
 17. Tahir, S., & Marschner, P. (2017). Clay addition to sandy soil-influence of clay type and size on nutrient availability in sandy soils amended with residues differing in C/N ratio. *Pedosphere*, 27(2), 293-305. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60317-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60317-5) [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60317-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60317-5).
 18. Vranova, V., Rejsek, K., & Formanek, P. (2013). Aliphatic, cyclic, and aromatic organic acids, vitamins, and carbohydrates in soil: a review. *The Scientific World Journal*, 2013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155%2F2013%2F524239> <https://doi.org/10.1155%2F2013%2F524239>.
 19. Chen, H., He, X., Rong, X., Chen, W., Cai, P., Liang, W., Li, S., & Huang, Q. (2009). Adsorption and biodegradation of carbaryl on montmorillonite, kaolinite and goethite. *Applied Clay Science*, 46(1), 102-108. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apclay.2009.06.004> <https://doi.org/10.1016/j.apclay.2009.06.004>.

- doi.org/ 10.1016/ j.clay.2009.07.006
https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.07.006.
20. Gmach, M. R., Cherubin, M. R., Kaiser, K., & Cerri, C. E. P. (2019). Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review. *Scientia Agricola*, 77, e20180164. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0164> <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0164>.
21. Besse-Hoggan, P., Alekseeva, T., Sancelme, M., Delort, A. M., & Forano, C. (2009). Atrazine biodegradation modulated by clays and clay/humic acid complexes. *Environmental Pollution*, 157(10), 2837-2844. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.005> <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.005>.
22. Chevallier, T., Muchaonyerwa, P., & Chenu, C. (2003). Microbial utilisation of two proteins adsorbed to a vertisol clay fraction: toxin from *Bacillus thuringiensis* subsp. *tenebrionis* and bovine serum albumin. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(9), 1211-1218. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00182-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00182-2) [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00182-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00182-2).
23. Cai, P., He, X., Xue, A., Chen, H., Huang, Q., Yu, J., Rong, X., & Liang, W. (2011). Bioavailability of methyl parathion adsorbed on clay minerals and iron oxide. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-3), 1032-1036. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.010> <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.10.010>.
24. Kaiser, K., & Guggenberger, G. (2007). Sorptive stabilization of organic matter by microporous goethite: sorption into small pores vs. surface complexation. *European Journal of Soil Science*, 58(1), 45-59. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00799.x> <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00799.x>.
25. Fomina, M., & Skorochod, I. (2020). Microbial interaction with clay minerals and its environmental and biotechnological implications. *Minerals*, 10(10), 861. <https://doi.org/10.3390/min10100861> <https://doi.org/10.3390/min10100861>.
26. Ve, N. B., Olk, D., & Cassman, K. G. (2004). Characterization of humic acid fractions improves estimates of nitrogen mineralization kinetics for lowland rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1266-1277. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1266> <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1266>.
27. Wang, Q. K., & Wang, S. L. (2007). Soil organic matter under different forest types in Southern China. *Geoderma*, 142(3-4), 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.09.006> <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.09.006>.
28. Rakhsh, F., Golchin, A., Al Agha, A. B., & Alamdari, P. (2017). Effects of exchangeable cations, mineralogy and clay content on the mineralization of plant residue carbon. *Geoderma*, 307, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.010> <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.010>.
29. Rakhsh, F., & Golchin, A. (2018). Carbohydrate concentrations and enzyme activities as influenced by exchangeable cations, mineralogy and clay content. *Applied Clay Science*, 163, 214-226. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.07.031> <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.07.031>.
30. Galicia-Andrés, E., Escalona, Y., Oostenbrink, C., Tunega, D., & Gerzabek, M. H. (2021). Soil organic matter stabilization at molecular scale: The role of metal cations and hydrogen bonds. *Geoderma*, 401, 115237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115237> <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115237>.
31. Denef, K., Six, J., Merckx, R., & Paustian, K. (2004). Carbon sequestration

- in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1935-1944. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1935>
32. Kaiser, K., Eusterhues, K., Rumpel, C., Guggenberger, G., & Kögel-Knabner, I. (2002). Stabilization of organic matter by soil minerals-investigations of density and particle-size fractions from two acid forest soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4), 451-459. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:4%3C451::AID-JPLN451%3E3.0.CO;2-B](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4%3C451::AID-JPLN451%3E3.0.CO;2-B)
33. Babin, D., Ding, G. C., Pronk, G. J., Heister, K., Kögel-Knabner, I., & Smalla, K. (2013). Metal oxides, clay minerals and charcoal determine the composition of microbial communities in matured artificial soils and their response to phenanthrene. *FEMS Microbiology Ecology*, 86(1), 3-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1574-6941.12058>
34. Guenet, B., Leloup, J., Hartmann, C., Barot, S., & Abbadie, L. (2011). A new protocol for an artificial soil to analyse soil microbiological processes. *Applied Soil Ecology*, 48(2), 243-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.002>
35. Pronk, G. J., Heister, K., & Kögel-Knabner, I. (2013). Is turnover and development of organic matter controlled by mineral composition? *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 235-244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.006>
36. Rhoades, J. D. (1982). Cation Exchange Capacity. In *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy.
37. Macht, F., Eusterhues, K., Pronk, G. J., & Totsche, K. U. (2011). Specific surface area of clay minerals: Comparison between atomic force microscopy measurements and bulk-gas (N₂) and-liquid (EGME) adsorption methods. *Applied Clay Science*, 53(1), 20-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.04.006>
38. Chorom, M., & Rengasamy, P. (1995). Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, 46(4), 657-665. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01362.x>
39. Rayment, G. E., & Lyons, D. J. (2011). *Soil Chemical Methods* (Vol. 3). CSIRO Publishing.
40. Ulery, A. L., & Drees, L. R. (2008). *Methods of Soil Analysis: Mineralogical Methods* (Vol. 5). Soil Science Society of America. <https://books.google.com/books?id=Lqh6mYoKjdQC>.
41. Jackson, M. L. (2005). *Soil Chemical Analysis, Advanced Course*. UW-Madison Libraries Parallel Press.
42. Yoder, L. (1919). Adaptation of the Mohr Volumetric Method to General Determinations of Chlorine. *Industrial and Engineering Chemistry*, 11(8), 755-755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ie50116a013>
43. Vogel, C., Babin, D., Pronk, G. J., Heister, K., Smalla, K., & Kögel-Knabner, I. (2014). Establishment of macro-aggregates and organic matter turnover by microbial communities in long-term incubated artificial soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 79, 57-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.012>

44. Vogel, C., Heister, K., Buegger, F., Tanuwidjaja, I., Haug, S., Schlöter, M., & Kögel-Knabner, I. (2015). Clay mineral composition modifies decomposition and sequestration of organic carbon and nitrogen in fine soil fractions. *Biology and Fertility of Soils*, 51(4), 427-442. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0987-7>
45. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
46. Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2 ed.). CRC Press. <https://books.google.com/books?id=UyAXmA EACAAJ>.
47. Klute, A. (1986). Water Retention: Laboratory Methods. In *Methods of Soil Analysis: part 1-Physical and Mineralogical Methods* (2 ed., pp. 635-662). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
48. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press.
49. Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
50. Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., & Margesin, R. (2012). *Methods in Soil Biology*. Springer Berlin Heidelberg. <https://books.google.com/books?id=RJXzCAAQBAJ>.
51. Martens, D. A., & Frankenberger, W. T. (1991). Determination of saccharides in biological materials by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection. *Journal of Chromatography A*, 546, 297-309. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)93027-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)93027-4)
52. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. T., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
53. von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European Journal of Soil Science*, 57(4), 426-445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
54. Sharmistha, P., & Marschner, P. (2016). Soil respiration, microbial biomass C and N availability in a sandy soil amended with clay and residue mixtures. *Pedosphere*, 26(5), 643-651. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60073-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60073-X)
55. Mikutta, R., Kleber, M., Torn, M. S., & Jahn, R. (2006). Stabilization of soil organic matter: association with minerals or chemical recalcitrance? *Biogeochemistry*, 77(1), 25-56. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-0712-6>
56. Kramer, M. G., Sanderman, J., Chadwick, O. A., Chorover, J., & Vitousek, P. M. (2012). Long-term carbon storage through retention of dissolved aromatic acids by reactive particles in soil. *Global Change Biology*, 18(8), 2594-2605. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02681.x>

57. Sollins, P., Kramer, M. G., Swanston, C., Lajtha, K., Filley, T., Aufdenkampe, A. K., Wagai, R., & Bowden, R. D. (2009). Sequential density fractionation across soils of contrasting mineralogy: evidence for both microbial-and mineral-controlled soil organic matter stabilization. *Biogeochemistry*, 96(1-3), 209-231. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9359-z> [https://doi.org/ 10.1007/s10533-009-9359-z](https://doi.org/10.1007/s10533-009-9359-z).
58. Schrumpf, M., Kaiser, K., Guggenberger, G., Persson, T., Kögel-Knabner, I., & Schulze, E. D. (2013). Storage and stability of organic carbon in soils as related to depth, occlusion within aggregates, and attachment to minerals. *Biogeosciences*, 10, 1675-1691. <https://doi.org/10.5194/bg-10-1675-2013> [https://doi.org/ 10.5194/bg-10-1675-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-1675-2013).
59. Saidy, A. R., Smernik, R. J., Baldock, J. A., Kaiser, K., Sanderman, J., & Macdonald, L. M. (2012). Effects of clay mineralogy and hydrous iron oxides on labile organic carbon stabilisation. *Geoderma*, 173, 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.030> <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.030>.
60. Schweizer, S. A., Mueller, C. W., Höschen, C., Ivanov, P., & Kögel-Knabner, I. (2021). The role of clay content and mineral surface area for soil organic carbon storage in an arable toposequence. *Biogeochemistry*, 156(3), 401-420. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00850-3> <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00850-3>.
61. Rakhsh, F., Golchin, A., Al Agha, A. B., & Nelson, P. N. (2020). Mineralization of organic carbon and formation of microbial biomass in soil: Effects of clay content and composition and the mechanisms involved. *Soil Biology and Biochemistry*, 151, 108036. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108036> <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108036>.
62. Wattel-Koekkoek, E. J. W., Van Genuchten, P. P. L., Buurman, P., & Van Lagen, B. (2001). Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. *Geoderma*, 99(1-2), 27-49. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00062-8) [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00062-8).
63. Doni, S., Gispert, M., Peruzzi, E., Macci, C., Mattii, G. B., Manzi, D., Masini, C. M., & Grazia, M. (2021). Impact of natural zeolite on chemical and biochemical properties of vineyard soils. *Soil Use and Management*, 37(4), 832-842. <https://doi.org/10.1111/sum.12665> <https://doi.org/10.1111/sum.12665>.
64. Filcheva, E., & Chakalov, K. (2002). Soil Fertility Management with Zeolite Amendments. I. Effect of Zeolite on Carbon Sequestration. In J. M. Kimble, R. Lal, & R. F. Follett (Eds.), *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil* (1 ed., pp. 223-228). Boca Raton, CRC Press.
65. Capasso, S., Salvestrini, S., Coppola, E., Buondonno, A., & Colella, C. (2005). Sorption of humic acid on zeolitic tuff: a preliminary investigation. *Applied Clay Science*, 28(1-4), 159-165. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.01.010> <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.01.010>.
66. Naylor, D., McClure, R., & Jansson, J. (2022). Trends in microbial community composition and function by soil depth. *Microorganisms*, 10(3), 540. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030540> <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030540>.
67. Golchin, A., Clarke, P., & Oades, J. (1996). The heterogeneous nature of microbial products as shown by solid-state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy. *Biogeochemistry*, 34, 71-97. <https://doi.org/10.1007/BF02180974> <https://doi.org/10.1007/BF02180974>.

68. Usharani, K., Roopashree, K., & Naik, D. (2019). Role of soil physical, chemical and biological properties for soil health improvement and sustainable agriculture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(5), 1256-1267.
69. Vance, G. F., Stevenson, F. J., & Sikora, F. J. (2020). Environmental chemistry of aluminum–organic complexes. In *The environmental chemistry of aluminum* (pp. 169-220). CRC Press.
70. Wu, X., Ren, L., Luo, L., Zhang, J., Zhang, L., & Huang, H. (2020). Bacterial and fungal community dynamics and shaping factors during agricultural waste composting with zeolite and biochar addition. *Sustainability*, 12(17), 7082. <https://doi.org/10.3390/su12177082>
71. Shahbaz, M., Kuzyakov, Y., & Heitkamp, F. (2017). Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: mechanisms and controls. *Geoderma*, 304, 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.019>
72. Theng, B. (2012). Polysaccharides. In *Developments in clay science* (Vol. 4, pp. 351-390). Elsevier.
73. Walshire, L. A., Zhang, H., Nick, Z. H., Breland, B. R., Runge, K. A., & Han, F. X. (2024). Modification of Surface Properties of Clay Minerals with Exopolysaccharides from *Rhizobium Tropici*. *ACS Earth and Space Chemistry*, 8(1), 137-147. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.3c00296>
74. Meimaroglou, N., & Mouzakis, C. (2019). Cation Exchange Capacity (CEC), texture, consistency and organic matter in soil assessment for earth construction: The case of earth mortars. *Construction and Building Materials*, 221, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.036>
75. Grandy, A. S., Strickland, M. S., Lauber, C. L., Bradford, M. A., & Fierer, N. (2009). The influence of microbial communities, management, and soil texture on soil organic matter chemistry. *Geoderma*, 150(3-4), 278-286. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.007>
76. Feng, W., Plante, A. F., & Six, J. (2013). Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry*, 112(1-3), 81-93. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9679-7>
77. Homaei, A. A., Sariri, R., Vianello, F., & Stevanato, R. (2013). Enzyme immobilization: an update. *Journal of Chemical Biology*, 6(4), 185-205. <https://doi.org/10.1007/s12154-013-0102-9>
78. Welty-Bernard, A. T. (2014). Al, Fe, and pH effects on soil microbial communities Northern Arizona University.
79. Rousk, J., Brookes, P. C., & Baath, E. (2009). Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(6), 1589-1596. <https://doi.org/10.1128/AEM.02775-08>

