

Effect of lime and wood ash on pH amendment and soil biological characteristics of two acid soils

Anahita Ramezani¹, Mohammad Bagher Farhangi^{*2}, Nasrin Ghorbanzadeh³,
Maryam Khalili Rad⁴

1. M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
E-mail: anahitaramezani1995@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
E-mail: m.farhangi@guilan.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
E-mail: nghorbanzadeh@guilan.ac.ir
4. Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
E-mail: m_khalilirad@guilan.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:

Received: 08.31.2022
Revised: 03.11.2024
Accepted: 04.10.2023

Keywords:

Microbial biomass carbon,
Microbial carbon ratio,
Organic carbon,
Soil conditioner

ABSTRACT

Background and Objectives: Given the increasing area of acid soils in Guilan province and the need to identify sustainable resources for soil acidity reclamation in the long term, the effect of wood ash and calcium carbonate on the amendment of two acid soils was investigated in this study. As the soil's biological characteristics are also important in the long-term soil amendment, the biological indicators of the soil were also evaluated after adding calcium carbonate and wood ash.

Materials and Methods: Two acidic soil samples with an initial pH of 5.2 (soil 1) and 4.3 (soil 2) were taken from the Fuman region, Guilan province. Based on the calculated lime requirement according to the pH of soils, 4.32 and 7.94 g calcium carbonate, and 7.23 and 13.24 g wood ash were added to soil 1, and soil 2, respectively. The added materials were mixed thoroughly to attain a 650 g soil-conditioner mixture. Soils without conditioners were also considered as controls. Incubation of the mixtures was done for six months at optimal water conditions (70% field capacity), and laboratory temperature (25 °C). Soil pH, EC, organic carbon (OC) content, microbial basal respiration (MBR), and soil microbial biomass carbon (MBC) were measured. Microbial carbon ratio (C_{mic}) was calculated at 0, 2, 4, 7, 14, 28, 42, 56, 86, 116, 146, and 176 days of incubation. A factorial-split experiment in a completely randomized design format with three replications was done. The combination of soil type in two levels (soil 1 and soil 2), and conditioners in three levels (calcium carbonate, wood ash and control) was regarded as the main plot and sampling time in 12 levels was regarded as a sub-plot. Data analysis was done in the SAS 9.1 software package, and mean comparisons were by Tukey's test ($P < 0.05$).

Results: After six months of incubation, pH was significantly higher in calcium carbonate treatment compared to the wood ash treatment ($P < 0.05$) in both soil 1, and 2 and reached 7 and 7.2, respectively. However, pH in wood ash treatment was also increased to 5.7 and 6.3 in soil 1 and soil 2, respectively. During the incubation period, the pH trend was increasing in wood ash treatment, while it was almost constant after three months of

incubation. The effect of calcium carbonate on EC was slightly more than that of wood ash. The average soil OC content in wood ash treatment was higher than that in calcium carbonate treatment. In the control and calcium carbonate treatments, the trend of OC changes was generally decreasing, while it was increasing in the wood ash treatment. In wood ash treatment soil OC content was increased from 1.4 and 1.7 to 2.06 g 100g⁻¹. The trend of MBR changes was almost the same in all treatments. During 6 months of incubation, the fluctuation of C_{mic} was the highest in the control treatment while it was the lowest in the wood ash treatment. Although the effect of conditioners was also dependent on the initial soil chemical characteristics, the pH changes were almost the same in both soils. They reached 6.9 at the end of the incubation period.

Conclusion: Although calcium carbonate application increased pH in a shorter period compared to wood ash, the chemical properties of soil, including organic carbon content and electrical conductivity, as well as soil biological properties, were enhanced in wood ash treatment. Therefore, in improving the pH of acidic soils, the effect of wood ash appeared gradually, and at the same time, it improved the soil's biological characteristics. Thus, it can be more compatible with the growth of perennial plants in acid soils.

Cite this article: Ramezani, Anahita, Farhangi, Mohammad Bagher, Ghorbanzadeh, Nasrin, Khalili Rad, Maryam. 2024. Effect of lime and wood ash on pH amendment and soil biological characteristics of two acid soils. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 14 (2), 1-24.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20561.2074

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر آهک و خاکستر چوب بر اصلاح pH و ویژگی‌های زیستی دو خاک اسیدی

آناهیتا رمضانی^۱، محمدباقر فرهنگی^{۲*}، نسرين قربانزاده^۳، مریم خلیلی‌راد^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: anahitaramezani1995@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: m.farhangi@guilan.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: nghorbanzadeh@guilan.ac.ir

۴. استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: m_khalilirad@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: باتوجه به افزایش سطح خاک‌های اسیدی در استان گیلان و نیاز به یافتن منابعی که اصلاح اسیدیته را در درازمدت ایجاد کنند، در این پژوهش تأثیر خاکستر چوب و آهک بر اصلاح دو خاک اسیدی بررسی شد. از آن‌جا که در اصلاح درازمدت اسیدیته خاک ویژگی‌های زیستی نیز اهمیت دارند، شاخص‌های زیستی خاک‌ها نیز پس از افزودن آهک و خاکستر چوب مطالعه شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱	
واژه‌های کلیدی: اصلاح‌کننده خاک، سهم کربن میکروبی، کربن آلی، کربن زیست‌توده میکروبی	مواد و روش‌ها: دو نمونه خاک اسیدی با pH اولیه ۵/۲ (خاک ۱) و ۴/۳ (خاک ۲) از منطقه فومن در استان گیلان نمونه‌برداری شد. بر اساس نیاز آهکی محاسبه شده خاک‌ها و pH کلسیم کربنات و خاکستر چوب، به ترتیب مقدار ۴/۳۲ و ۷/۹۴ گرم کلسیم کربنات و ۷/۲۳ و ۱۳/۲۴ گرم خاکستر چوب به خاک ۱ و خاک ۲ افزوده شد و مخلوط گردید تا وزن نهایی ۶۵۰ گرم شود. خاک‌های بدون اصلاح‌کننده نیز به عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. انکوباسیون خاک‌ها به مدت ۶ ماه در رطوبت بهینه حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی و دمای آزمایشگاه (حدود ۲۵ درجه سلسیوس) انجام شد. pH، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، محتوای کربن آلی (OC)، تنفس پایه میکروبی (MBR)، کربن زیست‌توده میکروبی خاک (MBC) و سهم کربن میکروبی (C _{mic}) در زمان‌های صفر، ۲، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶، ۸۶، ۱۱۶، ۱۴۶ و ۱۷۶ روز اندازه‌گیری شد. آزمایش به صورت فاکتوریل-اسپلیت در زمان در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. به این صورت که ترکیبی از فاکتورهای خاک در دو سطح (خاک ۱ و ۲) و اصلاح‌کننده در سه سطح (بدون اصلاح‌کننده، کلسیم کربنات و خاکستر چوب) به عنوان کرت اصلی و زمان نمونه‌برداری در ۱۲ سطح به عنوان کرت فرعی در نظر گرفته شد. داده‌ها در نرم‌افزار SAS 9.1 آنالیز شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی (P<۰/۰۵) انجام شد.

یافته‌ها: پس از شش ماه انکوباسیون، pH هر دو خاک ۱ و ۲ در تیمار کلسیم کربنات به طور معنی‌داری بیش از تیمار خاکستر چوب بود و به ترتیب به ۷ و ۷/۲ رسید ($P < 0.05$). اما خاکستر چوب نیز pH را به ترتیب در دو خاک ۱ و ۲ به ۵/۷ و ۶/۳ افزایش داد ($P < 0.05$). روند تغییرات pH نشان داد که در دوره انکوباسیون، pH در تیمار خاکستر چوب همچنان افزایشی بود در حالی که در تیمار کلسیم کربنات از ماه سوم انکوباسیون تقریباً ثابت شد. تأثیر کلسیم کربنات بر EC اندکی بیش‌تر از خاکستر چوب بود. میانگین محتوای OC خاک در تیمار خاکستر چوب بیش‌تر از کلسیم کربنات بود. در تیمار شاهد و کلسیم کربنات روند تغییرات OC به‌طور کلی کاهشی بود در حالی که در تیمار خاکستر چوب افزایشی بود. در تیمار خاکستر چوب محتوای OC خاک‌ها از $1/4$ و $1/7$ $g\ 100g^{-1}$ به $2/06$ $g\ 100g^{-1}$ افزایش یافت. روند تغییرات MBR در هر سه تیمار تقریباً یکسان بود. در طول ۶ ماه انکوباسیون نوسان C_{mic} در تیمار شاهد از همه بیش‌تر و در تیمار خاکستر چوب از همه کم‌تر بود. تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی اولیه خاک‌ها نیز وابسته بود. اما در هر دو خاک روند تغییرات pH تقریباً مانند هم بود و در پایان دوره انکوباسیون به ۶/۹ رسید.

نتیجه‌گیری: کلسیم کربنات در مقایسه با خاکستر چوب در زمان کوتاه‌تری pH را افزایش داد اما ویژگی‌های شیمیایی مانند کربن آلی و قابلیت هدایت الکتریکی خاک و همچنین ویژگی‌های زیستی در تیمار خاکستر چوب وضعیت بهتری داشتند. بنابراین، می‌توان گفت خاکستر چوب با اصلاح تدریجی pH خاک‌های اسیدی و هم‌زمان بهبود ویژگی‌های زیستی، می‌تواند با رشد گیاهان چندساله در خاک‌های اسیدی سازگارتر باشد.

استناد: رضانی، آناهیتا، فرهنگ، محمدباقر، قربان‌زاده، نسرین، خلیلی‌راد، مریم (۱۴۰۳). تأثیر آهک و خاکستر چوب بر اصلاح pH و ویژگی‌های زیستی دو خاک اسیدی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۴ (۲)، ۱-۲۴.

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20561.2074



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

اسیدی شدن خاک یکی از بزرگ‌ترین مشکلات زیست‌محیطی ناشی از کشاورزی در سراسر جهان است و ۹۰ درصد خاک‌های کشاورزی دارای درجه‌ای از اسیدی شدن هستند (۱). بیش‌تر خاک‌های اسیدی جهان که قابلیت کشت و کار دارند (حدود ۶۰ درصد) در مناطق گرمسیری مرطوب قرار گرفته‌اند که بیش‌تر در قاره آمریکا (حدود ۴۱ درصد) و آسیا (حدود ۲۶ درصد) پراکنده‌اند (۲). از نظر پوشش گیاهی حدود ۶۷ درصد خاک‌های اسیدی دنیا زیر پوشش جنگل‌ها هستند، ۱۸ درصد زیر پوشش مراتع قرار دارند و ۴/۵ درصد آن‌ها کاربری کشاورزی دارند (۲). خاک‌های اسیدی ایران بیش‌تر در استان گیلان هستند و برآورد می‌شود حدود نیمی (۴۸ درصد) از خاک‌های قابل کشت این استان اسیدی (pH کم‌تر از ۷) باشند (۳). در دهه‌های گذشته، اسیدی شدن خاک با فعالیت‌های انسانی، مانند انتشار بی‌رویه گازهای اسیدی، استفاده بیش از اندازه از کودهای نترات آمونیوم و آبیاری با آب رودخانه دارای زهاب معادن اسیدی بسیار شتاب گرفته است.

اسیدی شدن خاک منجر به کاهش حاصل‌خیزی خاک، کاهش فعالیت جامعه میکروبی و در نتیجه کاهش عملکرد محصول می‌شود (۱، ۴). برای جلوگیری از اسیدی شدن خاک‌ها باید آن‌ها را با موادی که به خاک می‌افزایند اصلاح و بازسازی کرد. کاربرد هر اصلاح‌کننده در خاک وابسته به گنجایش تبادل کاتیونی (CEC^۱)، مقدار رطوبت، بافت خاک و اندازه ذرات اصلاح‌کننده است. اصلاح‌کننده‌های خاک اسیدی شامل کلسیم کربنات (CaCO₃) یا سنگ

آهک، خاکستر چوب، رسوبات قرمز^۲، مواد جامد زیستی تثبیت‌شده آهکی^۳، خاکستر زیست‌توده و بیوجار می‌باشند (۵). کاربرد آهک در بسیاری از نقاط جهان برای بهبود وضعیت اسیدی شدن خاک و افزایش عملکرد بسیاری از محصولات معمول است. برای افزایش pH خاک و به‌ویژه کاهش تثبیت فسفر به‌عنوان دومین عنصر غذایی پس از نیتروژن، کشاورزان تمایل دارند از مقادیر زیادی آهک برای اشباع یون‌های آلومینیوم و آهن استفاده کنند (۶). با این حال، این کار اقتصادی نبوده و با محیط زیست هم سازگار نیست. زیرا آهک بیش از اندازه ممکن است منجر به رسوب دوباره یون فسفر با کلسیم به‌عنوان کلسیم فسفات شود و هم‌چنین قابلیت دسترسی گیاه به سایر عناصر ریزمغذی را کاهش دهد. بنابراین، در حال حاضر، تمرکز پژوهش‌گران و کشاورزان به سمت استفاده از اصلاح‌کننده‌های ارگانیک مانند کودهای دامی، کمپوست‌ها، پسماندهای کشاورزی- صنعتی، بیوجار و زغال چوب معطوف شده است (۷، ۸).

خاکستر چوب که حاصل سوختن انواع مختلف چوب برای تولید انرژی است به‌عنوان یک محصول زائد در نظر گرفته می‌شود. به‌دلیل محتوای بالای اکسیدها و هیدروکسیدها، خاکستر چوب دارای ویژگی قلیایی است و اغلب به‌عنوان یک عامل افزایش‌دهنده pH در خاک‌های اسیدی استفاده می‌شود (۹، ۱۰). گزارش شده که pH خاکستر چوب بین ۸/۹ تا ۱۳/۵ است (۱۱). با افزودن خاکستر چوب به خاک، اسیدیته و یون آلومینیوم کاهش می‌یابد و اشباع بازی و فعالیت میکروبی خاک افزایش می‌یابد

2- Red Mud

3- Lime stabilized biosolids

1- Cation exchange capacity

آلی خاک تبدیل کنند. ضمن این‌که خاکستر چوب کربن هم به خاک اضافه می‌کند و می‌تواند از طریق تقویت رشد گیاهان بازگشت مواد آلی به خاک را افزایش دهد (۲۲). استفاده از خاکستر چوب در خاک شرایطی را ایجاد می‌کند که منجر به تجزیه اندوخته ماده آلی بومی خاک و خود خاکستر چوب می‌شود (۲۳).

باتوجه به افزایش سطح خاک‌های اسیدی در استان گیلان و نیاز به یافتن منابعی که اصلاح اسیدیته را در درازمدت ایجاد کند، در این پژوهش تأثیر خاکستر چوب و آهک در اصلاح دو خاک اسیدی بررسی شد. از آن‌جا که در اصلاح درازمدت، ویژگی‌های زیستی خاک مهم و مؤثر خواهند بود، شاخص‌های زیستی خاک‌ها نیز پس از افزودن آهک و خاکستر چوب مورد بررسی قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک: در این پژوهش از چند خاک اسیدی از منطقه فومن واقع در استان گیلان نمونه‌برداری شد. خاک‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. از آن‌جا که اسیدیته خاک وابسته به سطوح واکنش‌پذیر یعنی رس‌ها و مواد آلی است و اصلاح آن یک فرایند تبادل کاتیونی است (۵)، خاک‌هایی برای آزمایش انتخاب شدند که محتوای رس و ماده آلی نزدیک به هم و pH متفاوتی داشته باشند. بنابراین دو خاک (خاک ۱ و ۲) به ترتیب از موقعیت‌های جغرافیایی با طول و عرض $12^{\circ} 49'$ شرقی و $37^{\circ} 7'$ شمالی و $14^{\circ} 49'$ شرقی و $37^{\circ} 6'$ شمالی که زیرکشت باغ چای بودند، برای ادامه آزمایش انتخاب شدند. برخی از ویژگی‌های شیمیایی،

(۱۲). ساختار بسیار متخلخل زغال چوب در برابر تخریب زیستی انعطاف‌پذیر است و این باعث می‌شود تا در درازمدت به‌عنوان بستری برای ذخیره کربن در اکوسیستم‌ها عمل کند (۱۳). علاوه بر این، فراوانی منافذ در زغال چوب باعث حفظ هوا می‌شود و از این‌رو شرایط هوایی را در خاک ایجاد می‌کند. بنابراین، استفاده از آن می‌تواند ظرفیت نگهداری آب، محتوای رطوبت و در دسترس بودن مواد مغذی را افزایش دهد زیرا خاصیت آب‌دوست آن را قادر می‌سازد آب را حفظ کند (۱۴).

خاکستر زیست‌توده را می‌توان به عنوان جایگزین آهک برای بهبود خاک‌های اسیدی، تأمین مواد مغذی برای توسعه محصول و تحریک فعالیت میکروبی استفاده کرد (۱۵). هیدروکسیدها و کربنات‌های موجود در خاکستر دارای یک اثر خنثی‌کننده اسید هستند که باعث افزایش pH خاک می‌شوند (۱۶). پژوهش‌ها نشان داده است که خاکستر چوب باعث افزایش زیست‌توده میکروبی شده و ساختار عملکردی جوامع باکتریایی را در یک خاک اسیدی تغییر می‌دهد (۱۷، ۱۸). ضمن این‌که گزارش شده است در پی آهک‌زنی خاک نیز تجزیه مواد آلی افزایش می‌یابد که تا حدی به دلیل افزایش فعالیت میکروبی پس از کاهش اسیدیته خاک و تا حدودی نیز به دلیل حل شدن مواد آلی است (۱۹). سوون و ارشد (۲۰۰۵) نشان دادند که در خاک‌های اسیدی پس از آهک‌زنی کربن زیست‌توده افزایش یافت (۲۰).

خاکستر چوب با اصلاح pH و افزودن عناصر غذایی از جمله فسفر و پتاسیم به خاک از رشد ریزجانداران هتروتروف حمایت می‌کند (۲۱). این ریزجانداران می‌توانند سوبسترای آلی موجود در خاک را تجزیه کرده و بخشی از آن را به کربن

آماده‌سازی تیمارها و آزمایش انکوباسیون: برای آماده‌سازی مخلوط خاک با آهک و خاکستر چوب مقادیر موردنیاز اصلاح‌کننده‌ها بر اساس pH اولیه خاک (جدول ۲) و بر اساس نیاز آهکی محاسبه شد. برای خنثی‌سازی یون هیدروژن خاک‌ها بر اساس pH اولیه آن‌ها، مقدار $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ باز موردنیاز برای رسیدن pH به ۷ از برآورد شد (۵). از آن‌جا که هر مول کلسیم کربنات دو مول بار (یعنی دو یون H^+ را خنثی می‌کند)، وزن مولی آن ۱۰۰ گرم، درصد خلوص آن ۱۰۰ درصد و ضریب کارایی‌اش ۲ است، مقدار $\frac{4}{32}$ و $\frac{7}{94}$ گرم کلسیم کربنات (Merck, Darmstadt) به‌عنوان اصلاح‌کننده به مقدار مناسبی از خاک‌ها افزوده شد تا وزن مخلوط نهایی ۶۵۰ گرم (براساس وزن خشک) باشد. هر واحد خاکستر به‌طور میانگین برابر با $\frac{0}{6}$ واحد آهک (معادل آهک) در نظر گرفته شد (۵). بر همین اساس مقدار $\frac{7}{23}$ و $\frac{13}{24}$ گرم خاکستر چوب به‌ترتیب به ۶۵۰ گرم خاک ۱ و ۲ افزوده شد. نمونه‌های خاک بدون اصلاح‌کننده نیز به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. تیمارها در سه تکرار تهیه شدند و به‌مدت شش ماه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و در محدوده ۷۰ درصد رطوبت گنجایش زراعی انکوباسیون شدند. برای بررسی تغییرات ویژگی‌های شیمیایی و زیستی شامل pH، EC، OC، MBR، MBC و C_{mic} در زمان‌های، صفر، ۲، ۴، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶، ۸۶، ۱۱۶، ۱۴۶ و ۱۷۶ روز از مخلوط‌ها نمونه‌برداری انجام شد.

آنالیز آماری: آزمایش در قالب طرح فاکتوریل و به‌صورت کرت‌های خرد شده در زمان و در سه تکرار انجام شد. به این‌صورت که ترکیبی از فاکتورهای خاک در دو سطح (خاک ۱ و ۲) و اصلاح‌کننده در

فیزیکی و زیستی خاک شامل pH در نسبت ۲ به ۱ آب به خاک و کلسیم کلرید $\frac{0}{01}$ مولار، قابلیت هدایت الکتریکی (EC^1) در نسبت ۲ به ۱ آب به خاک (۲۴)، کربن آلی (OC^2) به روش اکسیداسیون تر (۲۵)، بافت خاک به روش هیدرومتری (۲۶)، تنفس پایه میکروبی (MBR^3) به روش تیتراسیون (۲۷) و کربن زیست‌توده میکروبی (MBC^4) به روش گازدهی- انکوباسیون (۲۸) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری MBR، ۲۰ گرم خاک در ظروف ویژه تنفس ریخته شد و در کنار NaOH (۰/۱ M) به‌مدت ۷ روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در تاریکی انکوبه شد. در این مدت CO_2 در نتیجه تنفس میکروبی از خاک بیرون آمده، با بخار آب در فضای ظرف تشکیل H_2CO_3 داده و بخشی از NaOH را خنثی می‌کند. سپس NaOH خنثی‌نشده با HCl (۰/۱ M) در حضور شناساگر فنل فتالین تیترا شد. برای حذف مزاحمت Na_2CO_3 دو میلی‌لیتر BaCl_2 (۰/۵ M) پیش از تیتراسیون به محیط افزوده شد. برای اندازه‌گیری MBC مقدار ۲۰ گرم خاک با مقداری کلروفورم در دستگاه دسیکاتور به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا گازدهی شود و یاخته‌های رویشی ریزجاندارن لیز شود. سپس به خاک گازدهی‌شده پنج میلی‌لیتر سوسپانسیون خاک گازدهی نشده افزوده شد و تنفس میکروبی به روش بالا اندازه‌گیری گردید. از شاخص‌های اکوفیزیولوژیک نیز سهم کربن میکروبی^۵ (C_{mic}) از تقسیم کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی خاک بر حسب $(\text{mg}C_{mic} \text{g}^{-1}C_{Org})$ محاسبه شد (۲۹).

- 1- Electrical conductivity
- 2- Organic carbon
- 3- Microbial basal respiration
- 4- Microbial biomass carbon
- 5- Microbial carbon ratio

فرعی در نظر گرفته شد. داده‌ها با نرم‌افزار SAS 9.1 آنالیز شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون توکی ($P < 0.05$) انجام شد.

سه سطح (بدون اصلاح‌کننده، کلسیم کربنات و خاکستر چوب) به‌عنوان کرت اصلی و زمان نمونه‌برداری در ۱۲ سطح (صفر، ۲، ۴، ۷، ۱۴، ۲۸، ۴۲، ۵۶، ۸۶، ۱۱۶، ۱۴۶ و ۱۷۶ روز) به‌عنوان کرت

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاکستر چوب استفاده شده.

Table 1. Some chemical properties of the used wood ash*.

خاکستر Ash	کلسیم Ca	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	کربن آلی OC	شوری Salinity	pH	ویژگی‌های خاکستر چوب Wood ash Properties
24.6	4.26	0.17	0.14	1.4	13.89	0.2	8.2	

* همه واحدها به‌جز pH بر حسب درصد هستند

* All units are expressed based on percentage

خاک ۱ بود. مقدار کربن آلی نیز در خاک ۱ و ۲ به‌ترتیب ۱/۴ و ۱/۷ بود. از آن‌جا که فرایند اصلاح اسیدیته خاک یک فرایند تبادل کاتیونی است، اجزای کلوئیدی خاک در این راستا مهم هستند (۵). بنابراین، تلاش شد در این پژوهش خاک‌هایی برای آزمایش انتخاب شوند که از نظر این دو ویژگی نزدیک به هم بوده و pH متفاوتی داشته باشند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک: در جدول ۲ ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد بررسی آورده شده است. با توجه به pH اندازه‌گیری شده، خاک ۱ و ۲ به‌ترتیب در گروه خاک‌های اسیدی بسیار شدید (pH بین ۴/۵ تا ۵) و به شدت اسیدی (pH بین ۳/۵ تا ۴/۴) طبقه‌بندی می‌شوند (۵). اگرچه بافت هر دو خاک لوم رسی بود اما درصد رس در خاک ۲، دو درصد و درصد سیلت هشت درصد بیش‌تر از

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی.

Table 2. Some physicochemical properties of the studied soils.

بافت Texture	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربن آلی OC	قابلیت هدایت الکتریکی EC	pH (in CaCl ₂)	pH	ویژگی‌های خاک Soil Properties
	----- g 100 g ⁻¹ -----				dS m ⁻¹	-	-	
لوم رسی Clay loam	37.8	35.2	27	1.4	0.1	5.2	5.2	خاک ۱ Soil 1
لوم رسی Clay loam	27.8	43.2	29	1.7	0.3	5.3	4.3	خاک ۲ Soil 2

برهم‌کنش آن‌ها به‌جز اصلاح‌کننده و خاک در اصلاح‌کننده بر OC معنی‌دار بود ($P < 0/05$). زمان مهم‌ترین فاکتور مؤثر بر شاخص‌های زیستی بود به‌طوری‌که تنفس پایه میکروبی تنها تحت‌تأثیر زمان و اصلاح‌کننده در زمان قرار گرفت. هم‌چنین از بین فاکتورها و برهم‌کنش آن‌ها تنها اثر زمان بر MBC ($P < 0/01$) و اثر اصلاح‌کننده، زمان و خاک در زمان بر C_{mic} معنی‌دار بود ($P < 0/05$).

آنالیز واریانس تأثیر تیمارها: در جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر خاک، اصلاح‌کننده، زمان و برهم‌کنش آن‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی شامل pH، pH در کلسیم کلرید، کربن آلی، قابلیت هدایت الکتریکی، تنفس پایه و کربن زیست‌توده میکروبی و هم‌چنین سهم کربن میکروبی (C_{mic}) ارائه شده است. اثر همه فاکتورها و برهم‌کنش آن‌ها بر pH و EC معنی‌دار بود ($P < 0/01$). البته برهم‌کنش خاک در زمان بر pH معنی‌دار نبود. اثر همه فاکتورها و

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر خاک، اصلاح‌کننده، زمان و برهم‌کنش آن‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک.

Table 3. Analysis of variance for soil chemical and biological characteristics affected by soil, conditioner, incubation time and their interactions.

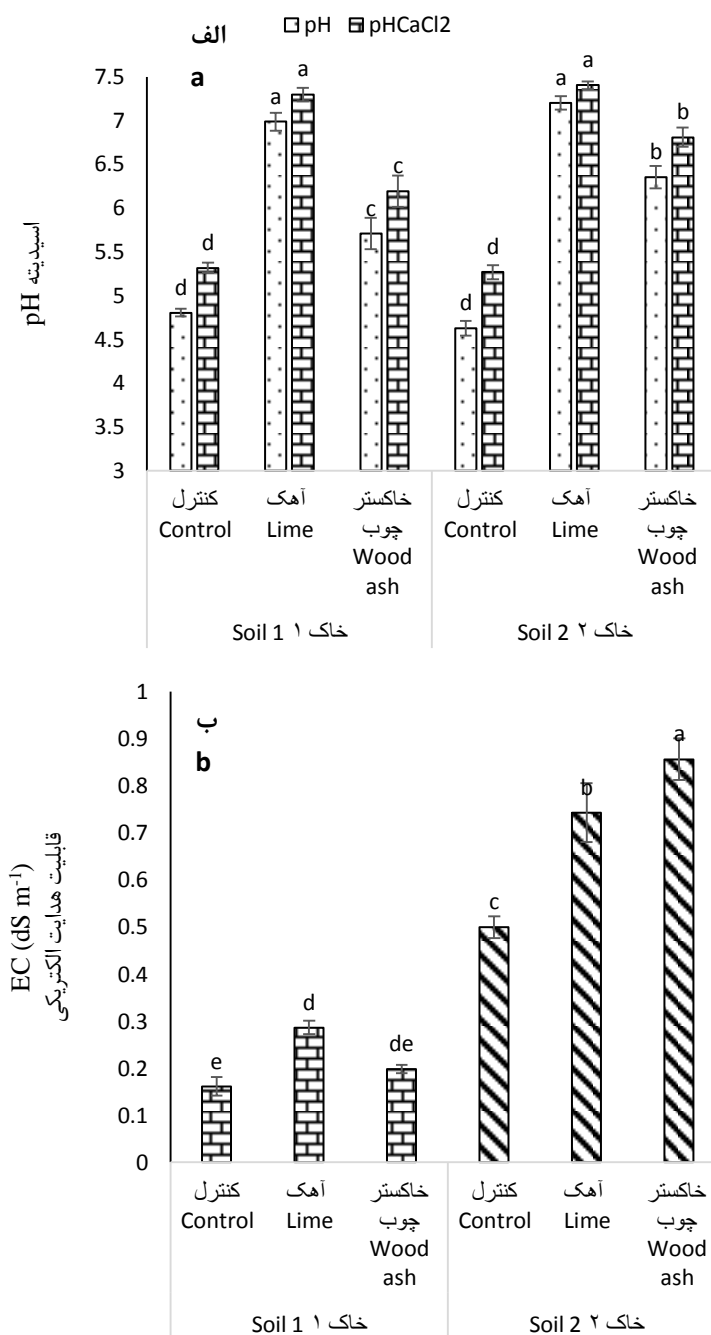
منابع تغییر Source of Variation	درجه آزادی Degree of Freedom	pH	pH (in $CaCl_2$)	قابلیت هدایت الکتریکی EC	کربن آلی OC	تنفس پایه میکروبی MBR	کربن زیست‌توده میکروبی MBC	سهم کربن میکروبی C_{mic}
خاک Soil (S)	1	2.81**	2.74**	12.69**	4.79**	0.001 ^{ns}	0.01 ^{ns}	924.23 ^{ns}
اصلاح‌کننده Conditioner (C)	2	102.14**	76.93**	0.87**	1.41 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1136.16*
S × C	2	3.07**	2.20**	0.47**	0.33 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.009 ^{ns}	370.91 ^{ns}
زمان Time (T)	11	4.40**	3.94**	0.20**	1.20**	0.08**	0.08**	514.64**
Repeat (S × C)	12	0.27**	0.10 ^{ns}	0.05**	0.37*	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	290.42 ^{ns}
S × T	11	0.14 ^{ns}	0.15*	0.19**	0.58**	0.005 ^{ns}	0.008 ^{ns}	235.21*
C × T	22	0.91**	0.73**	0.04**	0.55**	0.01*	0.01 ^{ns}	28.54 ^{ns}
S × C × T	22	0.29**	0.22**	0.02*	0.32*	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	192.13 ^{ns}
خطا Error	132	0.09	0.08	0.01	0.17	0.008	0.01	186.17

اعداد نشان‌دار شده با * و ** به ترتیب در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد معنی‌دار هستند و ^{ns} بیانگر معنی‌دار نبودن در سطح احتمال ۵ درصد است
Values marked by * and ** are significant at 5% and 1% probability levels, respectively, and ^{ns}, are not significant at 5% probability levels

نهال درختان مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌گیری شد که همه کودهای خاکستر (به‌جز خاکستر زغال‌سنگ) به‌طور معنی‌داری $pH_{2.5:1}$ خاک را از ۴/۴ در شاهد به ۴/۷ تا ۵/۹ افزایش دادند و خاکستر چوب بیش‌ترین تأثیر را نسبت به سایر انواع خاکستر داشت (۳۳).

در شکل ۱ (ب) تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر EC آمده است. در هر دو خاک، EC تحت تأثیر آهک و خاکستر چوب به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش یافت ($P < 0/05$). بالاترین مقدار EC در خاک ۱ در تیمار آهک و در خاک ۲ در تیمار خاکستر چوب به‌دست آمد. باتوجه به مقدار EC تیمار شاهد در خاک‌ها، افزودن آهک سبب افزایش ۸۱ درصدی EC در خاک ۱ و افزودن خاکستر چوب سبب افزایش ۷۲ درصدی آن در خاک ۲ شد. درحالی‌که افزودن آهک و خاکستر چوب در خاک ۲ و ۱ به‌ترتیب سبب افزایش ۴۸ و ۵۵ درصدی EC شد (شکل ۲-ب). نتایج پژوهش ماستو و همکاران (۲۰۱۳) افزایش EC خاک پس از کاربرد خاکستر را نشان داد که با نتایج این پژوهش هم‌سو است (۲۱). کاربرد سنگ آهک (کلسیم کربنات) با اضافه کردن یون‌های کلسیم و کربنات سبب افزایش EC خاک می‌شود (۳۴) به‌طوری‌که از آن به‌عنوان سنجش تأثیر آهک‌دهی بر افزایش pH در نقشه‌برداری استفاده شده است (۳۵). در پژوهشی EC مخلوط‌های ۴ و ۷ درصد آهک-خاک بلافاصله پس از افزودن آهک، ۳/۳ تا ۳/۶ واحد افزایش یافت (۳۶).

تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر pH و EC: در شکل ۱ (الف) تأثیر اصلاح‌کننده‌ها بر pH آمده است. پس از شش ماه انکوباسیون، pH هر دو خاک تحت تأثیر آهک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ($P < 0/05$). اگرچه خاکستر چوب pH اولیه (اندازه‌گیری‌شده در آب مقطر) را در خاک ۱ از ۴/۸ به ۵/۷ و در خاک ۲ از ۴/۶ به ۶/۳ افزایش داد ولی تفاوت آن در مقایسه با اثر آهک معنی‌دار بود ($P < 0/05$). در مطالعه تأثیر سطوح مختلف آهک بر ویژگی‌های شیمیایی خاک در باغ چای دیده شد که واکنش آهک با خاک تقریباً در مدت یک ماه انجام می‌گیرد و افزایش آهک به خاک نسبت به بیوجار pH را بهتر و به‌طور مستقیم افزایش می‌دهد (۳۰). لولا و همکاران (۲۰۰۰) افزایش یک واحدی pH در لایه سطحی خاک را پس از پنج سال استفاده از دو تن در هکتار خاکستر چوب مشاهده کرد (۳۱). خاکستر چوب دارای مقدار قابل‌توجهی کلسیم است که می‌تواند جایگزین آهک برای افزایش pH خاک‌های اسیدی باشد و نسبت به سنگ آهک آسیاب شده سرعت واکنش‌پذیری بیش‌تری دارد. به‌طوری‌که گزارش شده است که برای اثرگذاری کامل آهک به شش ماه تا یک سال زمان نیاز است، درحالی‌که تأثیر خاکستر چوب در تغییر pH خاک سریع‌تر از سنگ آهک آسیاب شده است (۳۲). هم‌چنین در چندین پژوهش نشان داده شده است که کوددهی با خاکستر احتمالاً می‌تواند اسیدی شدن خاک را حتی در طولانی‌مدت کاهش دهد. در مطالعه هایتونن (۲۰۰۳) اثر بلندمدت (۸ سال) خاکستر چوب، زغال‌سنگ و پیت بر ویژگی‌های خاک و رشد



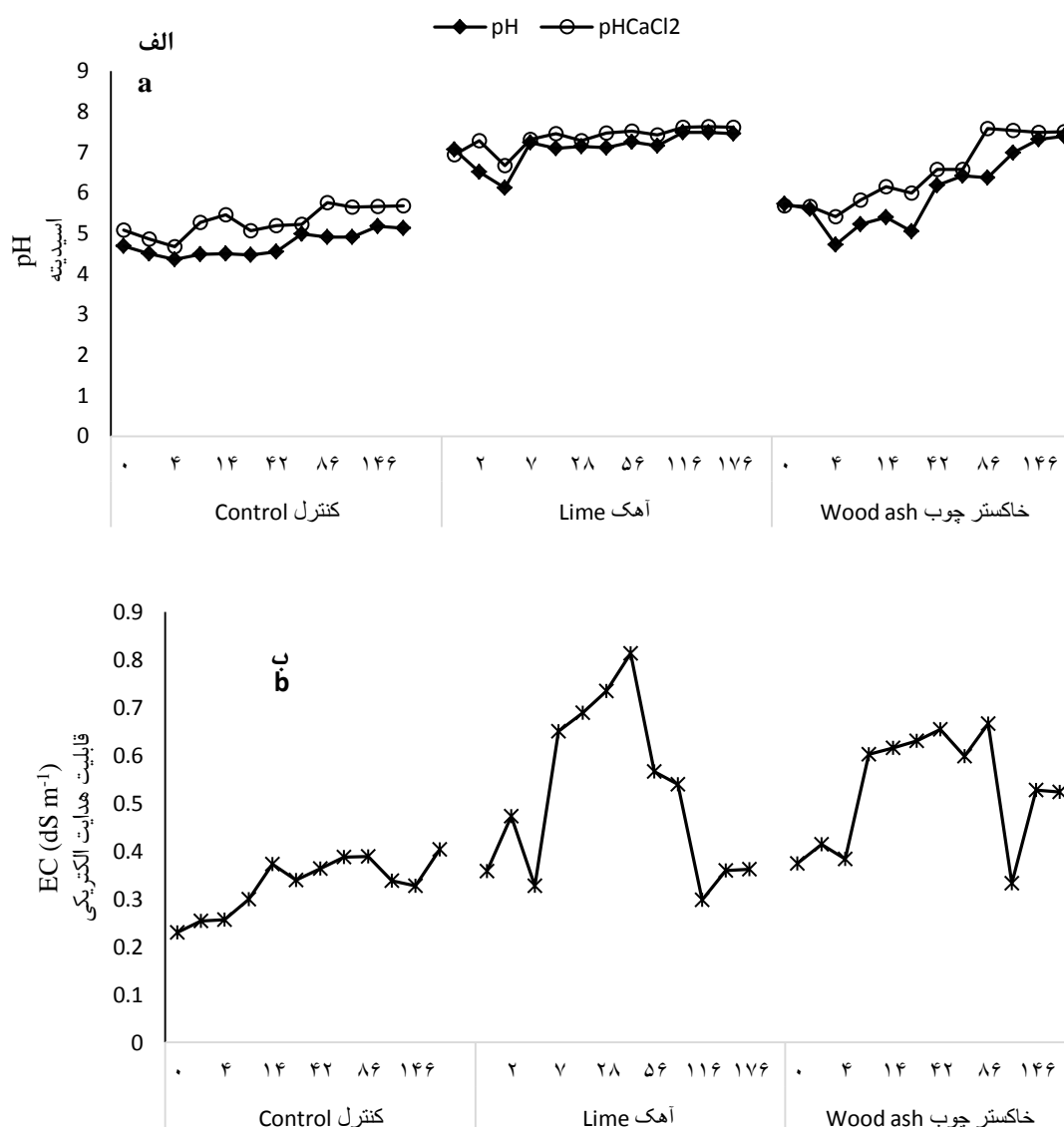
شکل ۱- مقایسه میانگین‌های اسیدیته (pH) (الف) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) (ب) خاک تحت تأثیر اصلاح کننده‌ها. در هر شکل و سری (الف) حروف همانند روی ستون‌ها نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری معنی‌دار است ($P < 0.05$). نوارها خطای استاندارد هستند.

Figure 1. Mean comparisons of soil pH (a) and electrical conductivity (EC) (b) under the effect of conditioners. The same letters on the columns in each figure and series (a) indicate statistically non-significant difference at $P < 0.05$. Bars are standard error ($n=3$).

نشان می‌دهد. در تیمار دارای آهک در مقایسه با شاهد، میانگین EC از هفته نخست انکوباسیون تا ماه سوم (روز ۸۶) زیاد شده و سپس دوباره کاهش پیدا کرده است. به طوری که در روز ۱۱۶ از زمان صفر هم کم‌تر شده است. دلیل این امر جذب بخش زیادی از کلسیم روی ذرات کلوئیدی خاک با توان جذب کاتیونی است (۵) که غلظت این نمک در محلول خاک را کاهش داده است. روند تقریباً یکسانی در تیمار خاکستر چوب نیز دیده شد با این تفاوت که در روز پایانی انکوباسیون میانگین EC خاک‌ها حدود ۰/۱۵ واحد بیش‌تر از روز صفر بود. با مقایسه تیمارها با شاهد نیز دیده شد که در روز پایانی میانگین خاک‌ها در تیمار دارای آهک کم‌تر از شاهد شد اما در تیمار خاکستر چوب ۰/۱۲ واحد بیش‌تر شد. خاکستر چوب از نظر ترکیب نمک‌ها پیچیده‌تر از آهک است که تنها دارای یون‌های کلسیم و کربنات دو ظرفیتی است، در حالی که در خاکستر چوب یون‌های با ظرفیت‌های گوناگون حضور دارند که در مقادیر به‌دست آمده EC دارای اهمیت هستند (جدول ۱). کرر و همکاران (۲۰۱۳) افزایش EC خاک در اثر کاربرد بیوجار چوب را گزارش کردند و دلیل این امر را وجود مقادیر متفاوت سدیم، پتاسیم، منیزیم و سایر فلزهای موجود در بیوجار دانستند (۳۸). در سوی دیگر، گزارش شده است که افزودن خاکستر به خاک گاهی اوقات سبب کاهش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌شود و دلیل این امر به هم چسبیدن ذرات است (۳۹).

تغییرات pH و EC در طول زمان انکوباسیون: در شکل ۲ تغییرات pH (الف) و EC (ب) تحت تأثیر اصلاح‌کننده‌ها در طول زمان انکوباسیون نشان داده شده است. مشاهده روند تغییرات میانگین pH در خاک‌ها به خوبی افزایش تدریجی آن در تیمار خاکستر چوب در مقایسه با آهک را نشان می‌دهد. ضمن اینکه در هر دو تیمار در مقایسه با شاهد افزایش pH مشخص است. در تیمار دارای آهک در مقایسه با شاهد، pH خاک به محض افزوده شدن آهک زیاد شده، سپس به دلیل افزایش تنفس میکروبی ناشی از تحریک جامعه میکروبی خاک با شرایط انکوباسیون و اصلاح‌کننده کاهش و در پایان هفته نخست انکوباسیون دوباره افزایش یافته و تا پایان در همان حدود مانده است. اما در تیمار خاکستر چوب افزایش pH در مقایسه با شاهد و تیمار دارای آهک کاملاً تدریجی بوده و از روز صفر تا پایان ماه ششم، به‌طور میانگین pH حدود دو واحد افزایش یافته است. به هر روی، با وجود این که pH در تیمار شاهد با گذشت زمان نوسان زیادی نداشت، اما بالاترین مقدار pH در تیمار آهک و خاکستر چوب به ترتیب در روز ۱۴۶ و ۱۷۶ ثبت شد. کاهش pH در روز چهارم که در هر سه تیمار از جمله شاهد دیده می‌شود احتمالاً به دلیل افزایش شدت تنفس میکروبی (شکل ۴) در پاسخ به بهبود شرایط خاک (رطوبت و دما) در فرآیند انکوباسیون می‌باشد (۳۷).

میانگین روند تغییرات EC (شکل ۲-ب) خاک‌ها به خوبی چگونگی افزایش آن را در تیمارهای مختلف



شکل ۲- روند تغییرات زمانی اسیدیتته (pH) (الف) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) (ب) خاک تحت تأثیر اصلاح کننده‌ها.
Figure 2. Temporal variation of soil pH (a) and electrical conductivity (EC) (b) under the influence of conditioners.

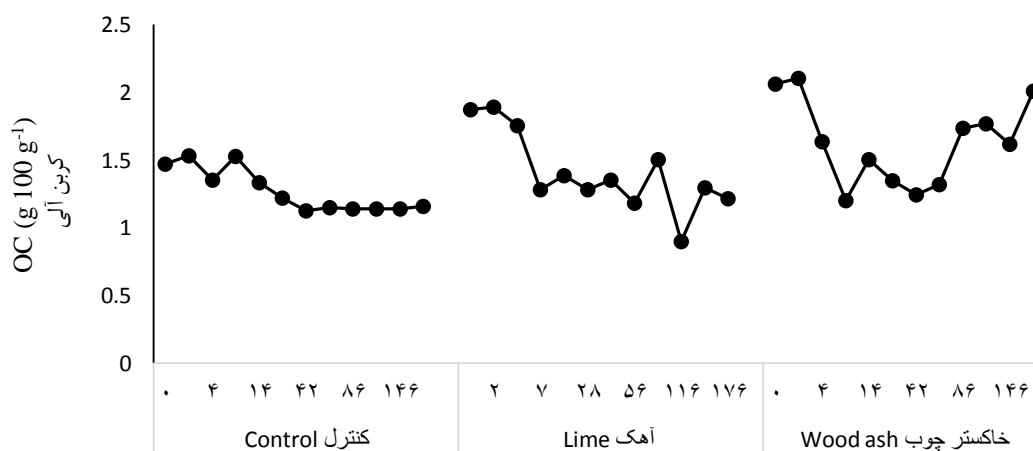
داشت و پس از آن کاهش پیدا کرد و پس از روز ۴۲ تقریباً ثابت شد. در دیگر تیمارها نیز در هفته نخست انکوباسیون افت شدید در کربن آلی ثبت شد که به نظر به دلیل تحریک جامعه میکروبی ناشی از شرایط انکوباسیون و افزایش شدت تنفس است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تیمار خاکستر چوب، میانگین OC خاک‌ها را از ۱/۴ و ۱/۷ g 100g⁻¹ (جدول ۲) به ۲/۰۶ g 100g⁻¹ افزایش داد، بخشی از این افزایش

تغییرات OC در طول زمان انکوباسیون: در شکل ۳ روند تغییرات OC تحت تأثیر اصلاح کننده‌ها در طول زمان انکوباسیون نشان داده شده است. میانگین OC خاک در تیمار دارای خاکستر چوب بیش‌تر از آهک و آن‌هم بیش‌تر از شاهد بود. در تیمار شاهد و آهک روند تغییرات OC در طول زمان به‌طور کلی کاهش بود در حالی‌که در تیمار خاکستر چوب افزایش بود. در تیمار شاهد روند افزایش OC تا روز هفت ادامه

هتروتروف حمایت می‌کند (۲۱). این ریزجانداران می‌توانند سویسترای آلی موجود در خاک را تجزیه کرده و بخشی از آن را به کربن آلی خاک تبدیل کنند. با این حال، برخی پژوهش‌ها (به‌عنوان مثال، ۴۲ و ۴۳) هیچ تأثیری از خاکستر چوب بر کربن و نیتروژن خاک را گزارش نکرده‌اند. در سوی دیگر، یک متآنالیز اخیر که به بررسی آتش‌سوزی و تأثیر خاکستر چوب بر ویژگی‌های خاک پرداخته، کاهش غلظت کربن و نیتروژن خاک معدنی به دنبال استفاده از خاکستر چوب را گزارش کرده است (۴۴). مور و همکاران (۲۰۱۲) کاهش کربن آلی خاک را ۱۵ سال پس از یک‌بار استفاده از آهک مشاهده کردند، اما با استفاده کردن از خاکستر چوب این عملکرد برعکس بود و سبب افزایش کربن آلی در خاک شد (۴۵).

می‌تواند به‌خاطر کربن آلی در خاکستر چوب باشد که در روزهای نخست و پس از افزودن خاکستر چوب به خاک خود را نشان داده است و بخشی دیگر به دلیل کربنی بودن ماده استفاده شده باشد که به تدریج توسط ریزجانداران خاک پس از بهبود شرایط اسیدی (شکل ۱-الف) به کربن زیست‌توده تبدیل شده و به شکل ماده آلی خاک اندازه‌گیری شده است (۴۰، ۴۱).

کاربرد خاکستر چوب مستقیماً کربن به خاک اضافه می‌کند و هم‌چنین می‌تواند از طریق تقویت رشد گیاهان بازگشت مواد آلی به خاک را افزایش دهد (۲۲). استفاده از خاکستر چوب در خاک شرایطی را ایجاد می‌کند که منجر به تجزیه اندوخته ماده آلی بومی خاک و خود خاکستر چوب می‌شود (۲۳). دلیل عمده این امر اصلاح pH و عناصر غذایی از جمله فسفر و پتاسیم است که از رشد ریزجانداران



شکل ۳- روند تغییرات زمانی کربن آلی (OC) خاک تحت تأثیر اصلاح‌کننده‌ها.

Figure 3. Temporal variation of soil organic carbon (OC) under the influence of conditioners.

در تشکیل خاکدانه‌های درشت (< 6 mm) و حفاظت فیزیکی کربن درون این خاکدانه‌ها در برابر تجزیه نسبت داده‌اند. بریدیس و همکاران (۲۰۱۲) دریافتند که آهک‌زنی، کربن آلی خاک را در لایه

مونوز و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که پس از ۱۳ سال آهک‌زنی سالانه محتوای کربن آلی خاک در مقایسه با خاک بدون آهک‌زنی، ۵ تا ۸ درصد افزایش یافت (۴۶). این پژوهش‌گران دلیل افزایش کربن آلی خاک را به تأثیر یون کلسیم (ناشی از آهک)

هفته نخست انکوباسیون افزایش چشم‌گیری در تنفس دیده می‌شود که بیش‌تر ناشی از بهبود شرایط فیزیکی (دما، تهویه، رطوبت) زیستگاه برای تحریک جامعه هتروتروف‌های خاک است (۳۷). این امر با مقایسه تیمارها با شاهد آشکار می‌شود. البته بهبود شرایط شیمیایی یا همان اصلاح pH (شکل ۱- الف) نیز در افزایش MBR تیمار دارای آهک بی‌تأثیر نیست. به‌طوری‌که دیده می‌شود در این تیمار در ۴۸ ساعت نخست انکوباسیون، مقدار MBR ($\text{mg CO}_2 \text{ day}^{-1} \text{ g}^{-1}$) ۰/۴ بالاتر از شاهد و تیمار خاکستر چوب بود. پس از افزایش قابل‌توجه در هفته نخست، شدت تنفس در تیمار آهک و شاهد تا روز ۴۲ و در تیمار خاکستر چوب تا روز ۲۸ روند کاهشی داشت. اختلاف شدت تنفس از روز ۷ تا ۴۲ در تیمارهای آهک و خاکستر چوب به‌ترتیب نزدیک به ۵۹ و ۶۹ درصد بود درحالی‌که در تیمار شاهد این تفاوت (روز ۴ با ۴۲ انکوباسیون) تنها ۴۵ درصد به‌دست آمد. بنابراین، باتوجه به این‌که در تیمار خاکستر چوب از پایان ماه نخست انکوباسیون دوباره شدت تنفس افزایش یافته و تا ماه سوم هم‌چنان در مقایسه با تیمار دارای آهک و شاهد بالاتر بوده است، می‌توان گفت که محتوای کربن آلی خاکستر چوب (جدول ۱) به‌عنوان سوبسترای کربن‌دار با گذشت زمان وارد مسیر تنفس میکروبی شده و در بالا بودن شدت تنفس در این محدوده زمانی (۲۸ تا ۸۶ روز) نقش ایفا کرده است.

تنفس پایه خاک بیشتر برای ارزیابی حاصل‌خیزی استفاده می‌شود و قابلیت دسترسی ریزجانداران خاک به مواد آلی را منعکس می‌کند (۵۱). امبا و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که با به‌کاربردن خاکستر چوب، تنفس و سایر فعالیت‌های متابولیکی جامعه میکروبی خاک افزایش می‌یابد (۴۰). فریتز و همکاران (۲۰۰۰) در یک آزمایش دو ماهه که در آن پنج تن در هکتار خاکستر چوب استفاده شد، دریافتند که تنفس پایه

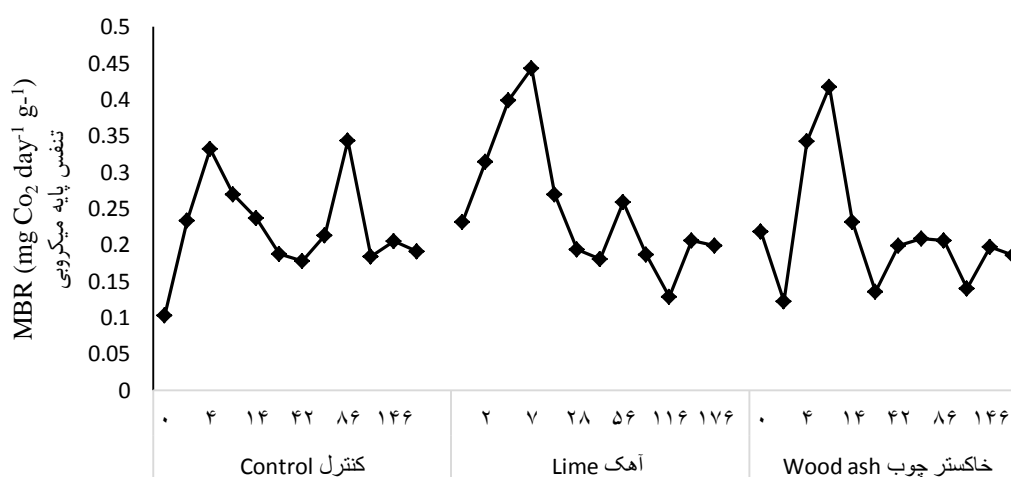
سطحی به‌ویژه در عمق صفر تا ۲/۵ سانتی‌متری پس از ۱۵ سال کشت مداوم افزایش داد که دلیل آن بهبود شرایط حاصلخیزی خاک با آهک‌دهی (افزایش pH) بود (۴۷). بررسی‌ها نشان داده‌اند که وقتی آهک‌دهی pH خاک را بالا می‌برد، فعالیت زیست‌توده میکروبی افزایش می‌یابد (۴۸). این امر به تجزیه ماده آلی خاک منجر شده و ذخایر کربن در خاک را کاهش می‌دهد. با این‌حال، این اثر تنها در کوتاه‌مدت دوام می‌آورد و آهک‌دهی ممکن است در درازمدت کربن آلی خاک را افزایش دهد (۴۹). انباشت طولانی‌مدت کربن (در خاک‌های زیرکشت) به بهره‌وری بیش‌تر زیست‌توده در هر منطقه مربوط می‌شود و در نتیجه بهبود ویژگی‌های حاصلخیزی خاک مانند pH، عرضه کلسیم و منیزیم و کنترل آلومینیوم تبادل‌ی رخ می‌دهد (۴۷).

مدیریت نیز بر تغییر کربن آلی خاک پس از آهک‌زنی تأثیر می‌گذارد و تا حد زیادی به تنفس ریزجانداران خاک بستگی دارد. در این‌باره هاتی و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که کربن آلی در یک خاک اسیدی زیرکشت در طول ۳۰ سال آهک‌زنی حفظ شد (۴۹). در سوی دیگر، واپندروف (۲۰۱۵) گزارش کرد که استفاده از آهک همراه با بقایای ریشه در انکوباسیون ۵۱ روزه، به‌طور میانگین کربن آلی خاک را ۲۰ درصد کاهش داد که احتمالاً به دلیل ایجاد پیوندهای کووالانسی بین کاتیون‌های Ca^{2+} رس و ماده آلی هوموسی شده است. اگرچه کاهش قابل‌توجه ۱۷ درصدی در زیست‌توده میکروبی در خاک‌های اصلاح‌شده با آهک در مقایسه با خاک‌های شاهد نیز ممکن است به این اثر کاهشی کمک کرده باشد (۵۰).

تغییرات MBR در طول زمان انکوباسیون: در شکل ۴ روند تغییرات MBR تحت‌تأثیر اصلاح‌کننده‌ها در طول زمان انکوباسیون نشان داده شده است. روندها در هر سه تیمار تقریباً یکسان هستند به‌طوری‌که در

نتیجه دو فرآیند موازی یعنی فرآیند شیمیایی، در نتیجه واکنش هیدرولیز CaCO_3 در خاک و فرآیند زیستی مانند تنفس ناشی از افزایش فعالیت میکروبی در خاک به دلیل بهبود شرایط شیمیایی خاک است (۵۳).

۱/۵ برابر افزایش یافت (۴۱). به طور مشابه، نیل و همکاران (۱۹۹۷) افزایش قابل توجهی در تنفس پایه خاک ناشی از آهک زنی در مراحل اولیه آزمایش (تا ۴۰ روز) و کاهش فعالیت میکروبی پس از آن را نشان دادند که با یافته‌های این پژوهش هم‌سو است (۵۲). انتشار سریع CO_2 از خاک پس از آهک‌زنی



شکل ۴- روند تغییرات زمانی تنفس پایه میکروبی (MBR) خاک تحت تأثیر اصلاح‌کننده‌ها.

Figure 4. Temporal variation of soil microbial basal respiration (MBR) under the influence of conditioners.

مقدار ماده آلی خاک پس از افزودن بقایای تازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. موسکاتلی و همکاران (۲۰۰۷) بیان کردند که تغییرات سهم کربن میکروبی تحت تأثیر زمان و کربن زیست‌توده خاک می‌باشد (۵۴). به طور میانگین نسبت C_{mic} در تیمار شاهد بیش‌ترین و در تیمار خاکستر چوب کم‌ترین بود که تأیید می‌کند در تیمار خاکستر چوب کربن به خاک افزوده شده و C_{mic} کاهش یافته است.

تغییرات C_{mic} در طول زمان انکوباسیون: در شکل ۵ روند تغییرات C_{mic} تحت تأثیر اصلاح‌کننده در طول زمان انکوباسیون نشان داده شده است. در طول ۶ ماه انکوباسیون سهم کربن میکروبی در هر سه تیمار نوسان داشت به طوری که این نوسان در تیمار شاهد از همه بیش‌تر و در تیمار خاکستر چوب از همه کم‌تر بود که نشان‌دهنده ناپایداری شرایط در خاک شاهد است. سهم کربن میکروبی یک شاخص حساس به تغییرات ماده آلی است و برای دنبال کردن وضعیت



شکل ۵- روند تغییرات زمانی کربن میکروبی (C_{mic}) خاک تحت تأثیر اصلاح کننده‌ها.

Figure 5. Temporal variation of soil microbial carbon (C_{mic}) under the influence of conditioners.

را از طریق وارد کردن (تلفیق) کربن آلی خاک به زیست توده میکروبی افزایش دهد، حتی اگر محتوای کل کربن آلی خاک تغییر نکرده باشد. گرینگ و همکاران (۲۰۰۰) پس از به کار بردن تیمار خاکستر چوب به مقدار ۴/۸ تن در هکتار، افزایش جزئی در C_{mic} در لایه آلی مشاهده کردند اما در خاک سطحی معدنی افزایشی دیده نشد که این پژوهش با یافته‌های ما هم‌سو است (۱۸).

تغییرات pH و EC خاک‌ها در طول زمان

انکوباسیون: در شکل ۶ تغییرات pH (CaCl₂) (الف) و EC (ب) خاک‌ها در طول زمان انکوباسیون نشان داده شده است. در هر دو خاک میانگین pH (CaCl₂) تحت تأثیر خاک‌ها پس از نوسان جزئی افزایش پیدا کرد و از روز ۸۶ به بعد ثابت شد. روند تغییرات کلی pH در هر دو خاک تقریباً مانند هم بود و به‌طور میانگین به ۶/۹ رسید. با این حال افزایش pH خاک‌ها تحت تأثیر pH اولیه بود. به طوری که در خاک ۱ که pH پایین‌تر بود روند تغییرات pH تا ماه دوم کندتر از خاک ۲ بود. نتایج ما با یافته‌ها ژو و همکاران (۲۰۱۰) هم‌سو نبود. آن‌ها با افزودن ۱/۶، ۳/۲ و ۶/۴ گرم کلسیم کربنات به یک کیلوگرم

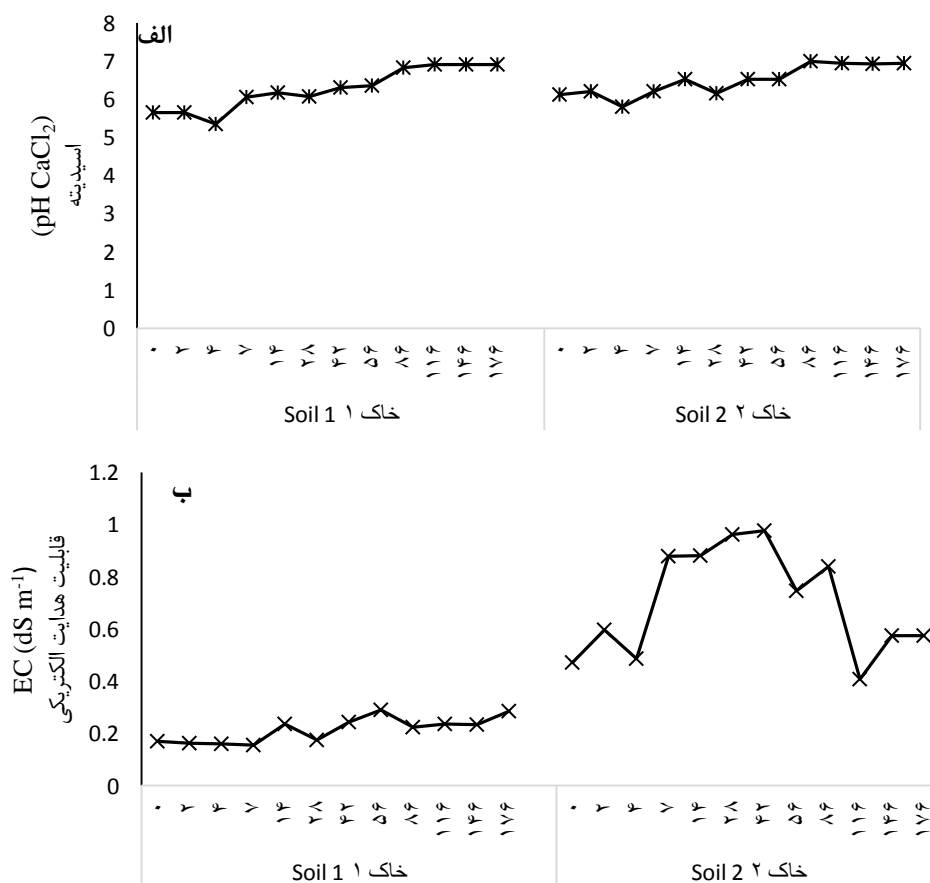
برخی پژوهش‌گران بیان کردند افزایش مقدار C_{mic} ارتباط مستقیم با کیفیت سوبسترای افزوده شده به خاک دارد و نشان دادند با افزایش نسبت C_{mic}، محتوای مواد آلی در خاک کاهش می‌یابد (۵۵). افزایش نسبت C_{mic} در خاک‌های آهکی نشان می‌دهد که آهک‌زنی سبب تبدیل بخش نسبتاً زیادی از کربن آلی خاک به زیست توده میکروبی شده است (۵۶). پیشنهاد شده است که هرچه مقدار بیش‌تری از کربن سوبسترا به زیست توده میکروبی (یعنی پیکر قارچ‌ها و باکتری‌ها) وارد شود، کربن آلی در خاک بیش‌تر حفاظت خواهد شد. چراکه به‌نظر قارچ‌ها بخش بیش‌تری از کربن سوبسترا را در مقایسه با باکتری‌ها وارد پیکر خود کرده (کارایی مصرف کربن بالا دارند) و چون دیواره قارچی سخت‌تجزیه‌پذیرتر^۱ از دیواره باکتریایی است، بنابراین کربن وارد شده به پیکر آنها زمان بازگشت^۲ طولانی‌تری دارد. ضمن این‌که قارچ‌ها در تعامل با رس‌ها و محلول خاک می‌توانند خاکدانه‌های پایدارتری ساخته و کربن آلی را بیش‌تر حفظ نمایند (۵۷). در یک آزمایش ۵ ساله آهک‌زنی دیده شد که این کار ممکن است محتوای کربن لَبایل^۳

1- More recalcitrant
2- Turnover time
3- Labile C

خاک در روز پایانی انکوباسیون نسبت به روز صفر تنها ۰/۱ واحد افزایش یافت. مقدار EC خاک ۲ نسبت به خاک ۱ از آغاز تا پایان دوره انکوباسیون بیش تر بود. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شده است مقدار شن در خاک ۱ بیش تر از خاک ۲ و مقدار رس در خاک ۲ بیش تر از خاک ۱ است. نتیجه به دست آمده در این پژوهش با یافته های گریسو و همکاران (۲۰۰۵) هم سو است که بیان کرد EC به شدت با اندازه ذرات و بافت خاک ارتباط دارد (۵۹).

خاک باغ چای با دامنه pH بین ۳/۹۶ تا ۵/۲ مشاهده کردند که pH در بالاترین نرخ کاربرد کلسیم کربنات به ۶/۲ تا ۷/۷۷ رسید و وابسته به pH اولیه خاک بود (۵۸).

پس از ۶ ماه انکوباسیون مقدار EC در خاک ۱ افزایش یافت و این روند از روز ۸۶ به بعد تقریباً ثابت شد. در خاک ۲ افزایش مقدار EC در روزهای اول بسیار کم بود و از روز ۷ به طور چشم گیری افزایش یافت و در روز ۴۲ تقریباً در مقایسه با روز صفر دو برابر شد و پس از آن دوباره به مقدار اولیه (روز صفر) نزدیک شد. در کل مقدار EC در هر دو



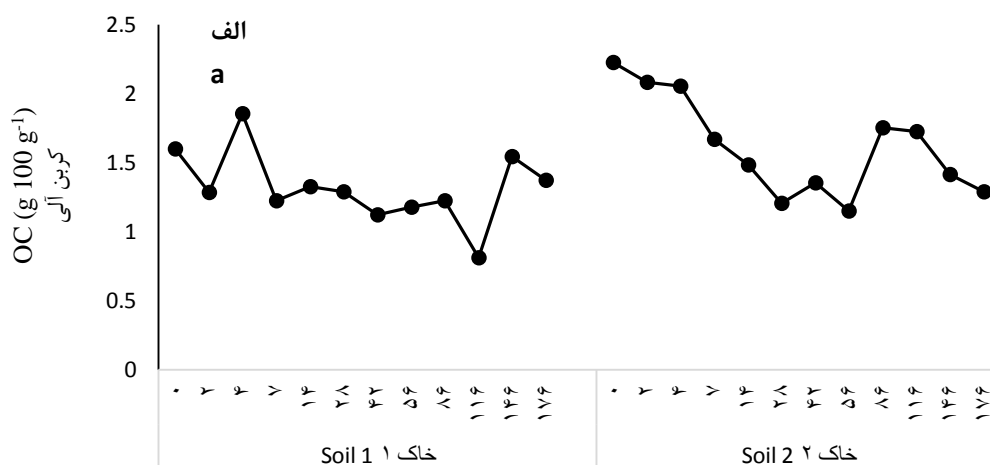
شکل ۶- روند تغییرات زمانی pH (CaCl₂) (الف) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) (ب) در خاک ها.

Figure 6. Temporal variation of pH (CaCl₂) (a) and electrical conductivity (EC) (b) in the soils.

رس) خاک آهکی نسبت به خاک بدون آهک دارای مقدار کربن آلی بیش‌تری بودند (۶۱).

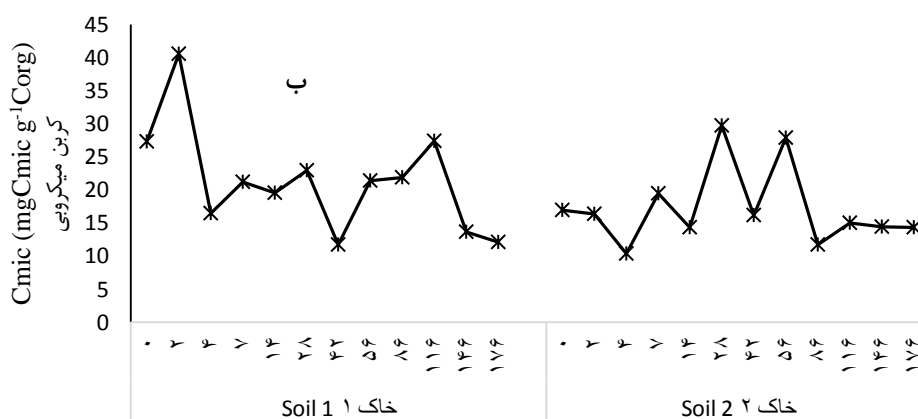
نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی خاک (C_{mic}) شاخص مناسبی برای توزیع کربن فعال خاک بین بخش زنده و غیرزنده است. در خاک ۱ روند تغییرات C_{mic} همانند روند تغییرات OC (شکل ۷-الف) بود. بنابراین، به‌نظر می‌رسد در این خاک این شاخص بیش‌تر وابسته به کربن آلی باشد اما در خاک ۲ در دو هفته نخست آنکوباسیون تغییرات C_{mic} تابعی از OC نبود. در هر دو خاک در ماه پنجم شش سهم کربن میکروبی خاک کاهش یافت. به‌نظر می‌رسد علت این کاهش، تجزیه نسبی مواد آسان تجزیه‌شونده و باقی ماندن مواد سخت تجزیه‌شونده در آن است. پاسکوال و همکاران (۱۹۹۷) بیان کردند کاهش سهم کربن میکروبی در روزهای اول، بیانگر کاهش در کربن زیست‌توده میکروبی است که می‌تواند به دست‌کاری خاک در زمان انجام پژوهش در آزمایشگاه (دما و رطوبت) نسبت داده شود (۶۲).

تغییرات OC و C_{mic} خاک‌ها در طول زمان آنکوباسیون: در شکل ۷ تغییرات OC (الف) و C_{mic} (ب) خاک‌ها در طول زمان آنکوباسیون نشان داده شده است. در هر دو خاک میانگین کربن آلی در طول زمان کاهش پیدا کرد و این کاهش در خاک ۲ شدیدتر بود که به‌نظر می‌رسد دلیل آن مقدار اولیه بالاتر کربن آلی در خاک ۲ باشد. به هر حال، پس از ۶ ماه آنکوباسیون به‌طور میانگین مقدار کربن آلی در خاک ۲ کم‌تر از خاک ۱ بود. از آن‌جا که خاک‌ها در آزمایشگاه و در شرایط بهینه بررسی شده‌اند و تحت تأثیر اصلاح‌کننده کربن‌دار (خاکستر چوب) قرار گرفته‌اند به نظر می‌رسد قضاوت درباره سطح کربن آلی به زمان بیش‌تری نیاز داشته باشد. اما شرایط فیزیکوشیمیایی اولیه خاک‌ها مانند pH بالاتر (۶۰) و وضعیت خاکدانه‌ها (۵۷) بر تنوع ریزجانداران تجزیه‌کننده ساکن در خاک مؤثر است که می‌تواند کربن بیش‌تری را تجزیه کنند (۴۹). در بررسی مقدار کربن آلی خاک‌ها دیده شد که بخش‌های ریز (شن ریز، سیلت و



شکل ۷- روند تغییرات زمانی کربن آلی (OC) (الف) و کربن میکروبی (C_{mic}) (ب) در خاک‌ها.

Figure 7. Temporal variation of soil organic carbon (OC) (a) and soil microbial carbon (C_{mic}) (b) in the soils.



ادامه شکل ۷-

Continue Figure 7.

به استفاده از خاکستر چوب شد. خاکستر چوب نسبت به آهک اثر بهتری بر ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله کربن آلی داشت و طبق انتظار باعث بالا رفتن مقدار کربن آلی خاک شد. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد که استفاده از خاکستر چوب برای اصلاح pH خاک‌های اسیدی مفید باشد. به طوری که اثر آن در کوتاه‌مدت و درازمدت پدیدار می‌شود و هم‌زمان می‌تواند ویژگی‌های زیستی و کربن آلی خاک را نیز بهبود ببخشد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تأثیر تیمار آهک و خاکستر چوب بر ویژگی‌های زیستی دو خاک اسیدی با بافت لوم رسی در مدت زمان شش ماه انکوباسیون بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن آهک و خاکستر چوب سبب افزایش مقدار pH در خاک شد و بر ویژگی‌های زیستی خاک تأثیر چشم‌گیری داشت. به طوری که استفاده از آهک و خاکستر چوب در خاک اسیدی سبب افزایش چشم‌گیر تنفس پایه خاک نسبت به شاهد در مدت زمان یک هفته شد. استفاده از آهک سبب افزایش چشم‌گیر در سهم کربن میکروبی نسبت

منابع

- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W., Vitousek, P. M., & Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327, 1008-1010. DOI: 10.1126/science.1182570.
- Von Uexkull, H. R., & Mutert, E. (1995). Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant & Soil*, 171, 1-15. <https://doi.org/10.1007/BF00009558>.
- Shahbazi, K., & Besharati, H. (2013). Overview of Agricultural Soil Fertility Status of Iran. *Land Management Journal*, 1 (1), 1-15. doi: 10.22092/lmj.2013.100072. [In Persian]
- Huang, Y. M., Kang, R. H., Mulder, J., Zhang, T., & Duan, L. (2015). Nitrogen saturation, soil acidification, and ecological effects in a subtropical pine forest on acid soil in southwest China. *Journal of Geophysical Research*, 120, 2457-2472. <https://doi.org/10.1002/2015JG003048>.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017) The Nature and Properties of Soils. 15th Edition, Pearson, New York. 1086p. ISBN: 978-0-13-325448-8.

6. Ch'ng, H. Y., Sanusi, S., & Othman, S. B. (2020). Effect of Christmas Island rock phosphate and rice straw compost application on soil phosphorus availability and maize (*Zea mays* L.) growth in a tropical acid soil of Kelantan, Malaysia. *Open Agriculture*, 5, 150-158. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0015>.
7. Bang-Andreasen, T., Nielsen, J. T., Voriskova, J., Heise, J., Rønn, R., Kjølner, R., & Jacobsen, C. S. (2017). Wood ash induced pH changes strongly affect soil bacterial numbers and community composition. *Frontiers in Microbiology*, 8, 271559. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01400>.
8. Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use & Management*, 27, 205-212. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>.
9. Heviankova, S., Bestova, I., & Kyncl, M. (2014). The application of wood ash as a reagent in acid mine drainage treatment. *Minerals Engineering*, 56, 109-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.032>.
10. Neina, D., & Dowuona, G. N. N. (2013). Short-term effects of human urine fertilizer and wood ash on soil pH and electrical conductivity. *Journal of Agriculture & Rural Development in the Tropics & Subtropics*, 114 (2), 89-100. [urn:nbn:de:hebis:34-2013081343323](http://nbn:de:hebis:34-2013081343323).
11. Demeyer, A., Voundi Nkana, J., & Verloo, M. (2001). Characteristics of wood ash influence on soil properties and nutrient uptake: An overview. *Bioresource Technology*, 77, 287-295. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00043-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00043-2).
12. Nweke, I. A., Mbah, C. N., Oweremadu, E. O., Dambaba, N., Orji, E. C., Ekesiobi, A. I., & Nnabuiife, E. L. C. (2017). Soil pH, available P of an Ultisol and castor performance as influenced by contrasting tillage methods and wood ash. *African Journal of Agriculture Research*, 12, 606-616. <http://www.academicjournals.org/AJAR>.
13. DeLuca, T. H., & Aplet, G. H. (2008). Charcoal and carbon storage in forest soils of the Rocky Mountain. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 6 (1), 18-24. <https://doi.org/10.1890/070070>.
14. Scheepers, G. P., & du Toit, B. (2016). Potential use of wood ash in South African forestry: a review. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 78 (4), 255-266. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1230716>.
15. Fernandez-Delgado Juarez, M., Fabiani, G., Mazzier, T., Schonegger, D., Pietramellara, G., Gomez-Brandon, M., & Insam, H. (2020). Reclamation of acid soils with biomass ashes from pyrolytic wood liquefaction. *Waste & Biomass Valorization*, 11 (9), 5067-5078. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00789-5>.
16. Ludwig, B., Rumpf, S., Mindrup, M., Meiwes, K. J., & Khanna, P. K. (2002). Effects of lime and wood ash on soil-solution chemistry, soil chemistry and nutritional status of a pine stand in Northern Germany. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17, 225-237. <https://doi.org/10.1080/028275802753742891>.
17. Lupwayi, N. Z., Arshad, M. A., Azooz, R. H., & Soon, Y. K. (2009). Soil microbial response to wood ash or lime applied to annual crops and perennial grass in an acid soil of northwestern Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 89, 169-177. <https://doi.org/10.4141/CJSS08007>.
18. Gering, C., Heil, B., & Lamersdorf, N. P. (2000). Wood ash application in a Norway spruce forest at Solling, Central Germany. Proceedings of International Conference on Forest Ecosystem Restoration, Vienna. pp: 322-324.
19. Paradelo, R., Virto, I., & Chenu, C. (2015). Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.005>.
20. Soon, Y. K., & Arshad, M. A. (2005). Tillage and liming effects on crop and

- labile soil nitrogen in an acid soil. *Soil & Tillage Research*, 80, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.017>.
21. Masto, R. E., Ansari, M. A., George, J., Selvi, V. A., & Ram, L. C. (2013). Coapplication of biochar and lignite fly ash on soil nutrients and biological parameters at different crop growth stages of *Zea mays*. *Ecological Engineering*, 58, 314-322. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.011>.
 22. Joseph, R., Diochon, A., Morris, D., Venier, L., Emilson, C. E., Basiliko, N., ... & Hazlett, P. (2022). Limited effect of wood ash application on soil quality as indicated by a multisite assessment of soil organic matter attributes. *GCB Bioenergy*, 14 (5), 500-521. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12928>.
 23. Hansen, M., Saarsalmi, A., & Peltre, C. (2016). Changes in SOM composition and stability to microbial degradation over time in response to wood chip ash fertilisation. *Soil Biology & Biochemistry*, 99, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.05.012>.
 24. Sarkar, D. (2005). *Physical and Chemical Methods in Soil Analysis*. New Age International. 193p.
 25. 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, 29-38.
 26. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. p. 383-409. In: A. L. Page (Ed.). *Methods of soil Analysis*, Agron. No. 9, Part 1 Physical and Mineralogical Methods, American Society. Agronomy. Madison WI, USA.
 27. Anderson, T. H., & Domsch, A. K. (1993). The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 25, 393-395. DOI: [10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7).
 28. Jenkinson, D. S., & Ladd, J. N. (1981). Microbial biomass in soil: measurement and turnover. P. 415-471. In: E. A. Paul, (Ed.). *Soil biochemistry*. Vol. 9. CRC Press.
 29. Anderson, T. H., & Domsch, K. H. (1990). Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology & Biochemistry*, 22, 251-255. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90094-G](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90094-G).
 30. Ananthacumaraswamy, S., & Baker, R. M. (1991). Effect of increasing level of lime (CaCO₃) on soil chemical properties of acid soils. *Sri Lanka Journal of Tea Science*, 60 (1), 4-15.
 31. Levula, T., Saarsalmi, A., & Rantavaara, A. (2000). Effects of ash fertilization and prescribed burning on macronutrient, heavy metal, sulphur and ¹³⁷Cs concentrations in lingonberries (*Vaccinium vitis idaea*). *Forest Ecology & Management*, 126, 269-279. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00110-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00110-3).
 32. Saunders, O. (2018). *Guide to Using Wood Ash as an Agricultural Soil Amendment*. University of New Hampshire Cooperative. 5p.
 33. Hytonen, J. (2003). Effects of wood, peat and coal ash fertilization on Scots pine foliar nutrient concentrations and growth on afforested former agricultural peat soils. *Silva Fennica*, 37 (2), 219-234.
 34. Ameyu, T. (2019). A review on the potential effect of lime on soil properties and crop productivity improvements. *Journal of Environment & Earth Science*, 9 (2), 17-23. DOI: [10.7176/JEES](https://doi.org/10.7176/JEES).
 35. Sanches, G. M., Magalhães, P. S., Remacre, A. Z., & Franco, H. C. (2018). Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. *Soil and Tillage Research*, 175, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.010>.
 36. Rao, S. M., & Shivananda, P. (2005). Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. *Geotechnical & Geological Engineering*, 23, 79-85. <https://doi.org/10.1007/s10706-003-3157-5>.

37. Farhangi, M. B., Safari Sinigani, A. A., Mosaddeghi, M. R., Unc, A., & Khodakaramian, G. (2013). Impact of calcium carbonate and temperature on survival of *Escherichia coli* in soil. *Journal of Environmental Management*, 119, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.022>.
38. Karer, J., Wimmer, B., Zehetner, F., Kloss, S. & Soja, G. (2013). Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions. *Agricultural & food science*, 22, 390-403. <https://doi.org/10.23986/afsci.8155>.
39. Stoof, C. R., Wesseling, J. G., & Ritsema, C. J. (2010). Effects of fire and ash on soil water retention. *Geoderma*, 159, 276-285. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.002>.
40. Mbah, C. N., Nwite, J. N., Njoku, C., & Nweke, I. A. (2010). Response of maize (*Zea mays* L.) to different rates of wood-ash application in acid ultisol in Southeast Niger. *African Journal of Agricultural Research*, 5, 580-583. <http://www.academicjournals.org/AJAR>.
41. Fritze, H., Perkiomaki, J., Saarela, U., Katainen, R., Tikka, P., Yrjala, K., Karp, M., Haimi, J., & Romantschuk, M. (2000). Effect of Cd-containing wood ash on the microflora of coniferous forest humus. *FEMS Microbiology Ecology*, 32, 43-51. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2000.tb00697.x>.
42. Ventura, M., Panzacchi, P., Muzzi, E., Magnani, F., & Tonon, G. (2019). Carbon balance and soil carbon input in a poplar short rotation coppice plantation as affected by nitrogen and wood ash application. *New Forests*, 50(6), 969-990. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09709-w>.
43. Gömöryová, E., Tóthová, S., Pichler, V., Homolák, M., Kriššák, V., & Gömöry, D. (2016). Wood ash effect on chemical and microbio-logical properties of topsoil in a Norway spruce stand one year after the treatment. *Folia Oecologica*, 43, 156-163.
44. Hannam, K. D., Fleming, R. L., Venier, L., & Hazlett, P. W. (2019). Can bioenergy ash applications emulate the effects of wildfire on upland forest soil chemical properties? *Soil Science Society of America Journal*, 83, 201-217. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.10.0380>.
45. Moore, J. D., Ouimet, R., & Duchesne, L. (2012). Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application. *Forest Ecology Management*, 281, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.026>.
46. Munoz, C., Torres, P., Alvear, M., & Zagal, E. (2012). Physical protection of C and greenhouse gas emissions provided by soil macroaggregates from a Chilean cultivated volcanic soil. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 62 (8), 739-748. <https://doi.org/10.1080/09064710.2012.700317>.
47. Briedis, C., de Moraes Sa, J. C., Caires, E. F., de Fatima Navarro, J., Inagaki, T. M., Boer, A., de Oliveira Ferreira, A., Neto, C. Q., Canalli, L. B., & dos Santos, J. B. (2012). Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an Oxisol under long-term no-till. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 151-160. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0128>.
48. Ekenler, M., & Tabatabai, M. A. (2003). Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. *Biology & Fertility of Soils*, 39, 51-61. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0664-8>.
49. Hati, K. M., Swarup, A., Mishra, B., Manna, M., Wanjari, R., Mandal, K., & Misra, A. (2008). Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. *Geoderma*, 148, 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.015>.
50. Wachendorf, C. (2015). Effects of liming and mineral N on initial decomposition of soil organic matter and post harvest root residues of poplar. *Geoderma*, 260, 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.013>.

51. Spohna, M., & Chodak, M. (2015). Microbial respiration per unit biomass increases with carbon-to-nutrient ratios in forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 81, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.008>.
52. Neale, S. P., Shah, Z., & Adams, W. A. (1997). Changes in microbial biomass and nitrogen turnover in acidic organic soils following liming. *Soil Biology & Biochemistry*, 29, 1463-1474. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00040-0).
53. Fuentes, J. P., Bezdicek, D. F., Flury, M., Albrecht, S., & Smith, J. L. (2006). Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. *Soil & Tillage Research*, 88 (1-2), 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.05.001>.
54. Moscatelli, M., Di Tizio, A., Marinari, S., & Grego, S. (2007). Microbial indicators related to soil carbon in Mediterranean land use systems. *Soil & Tillage Research*, 97 (1), 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.007>.
55. Anderson, T. H. (2003). Microbial ecophysiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98 (1-3), 285-293. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00088-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4).
56. Anderson, T. H., & Domsch, K. (1989). Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 21, 471-479. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(89\)90117-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(89)90117-X).
57. Six, J., Frey, S., Thiet, R., & Batten, K. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70 (2), 555-569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>.
58. Xue, D., Huang, X., Yao, H., & Huang, C. (2010). Effect of lime application on microbial community in acidic tea orchard soils in comparison with those in wasteland and forest soils. *Journal of Environmental Sciences*, 22 (8), 1253-1260. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60246-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60246-1).
59. Grisso, R. D., Alley, M. M., Holshouser, D. L., & Thomason, W. E. (2005). Precision farming tools. soil electrical conductivity. Virginia Cooperative Extension, 6p. <http://hdl.handle.net/10919/51377>.
60. Leifeld, J., Bassin, S., Conen, F., Hajdas, I., Egli, M., & Fuher, J. (2013). Control of soil pH on turnover of belowground organic matter in subalpine grassland. *Biogeochemistry*, 112, 59-69. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9689-5>.
61. Tonon, G., Sohi, S., Francioso, O., Ferrari, E., Montecchio, D., Gioacchini, P., Ciavatta, C., Panzacchi, P., & Powlson, D. (2010). Effect of soil pH on the chemical composition of organic matter in physically separated soil fractions in two broadleaf woodland sites at Rothamsted, UK. *European Journal of Soil Science*, 61 (6), 970-979. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01310.x>.
62. Pascual, J. A., Garcia, C., Hernandez, T., & Ayuso, M. (1997). Changes in the microbial activity of an arid soil amended with urban organic wastes. *Biology and Fertility of Soils*, 24, 429-434. <https://doi.org/10.1007/s003740050268>.