



The effect of using grape waste, brown walnut shell and poultry manure biochars on the enzymatic behavior of a clay loam soil

Khadijeh Rostami¹, Zahra Varasteh Khanlari^{*2}, Mahboubeh Zarabi³

1. M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran.
E-mail: khadijehrostami519@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran.
E-mail: zahra.varasteh@malayeru.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Malayer University, Malayer, Iran.
E-mail: mzarrabi@malayeru.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 01.06.2024

Revised: 05.17.2024

Accepted: 05.18.2024

Keywords:

Acid and alkaline phosphatase,
Enzyme resistance index (RS),
Geometric mean enzyme
activity (GMEa),
Invertase,
Urease

ABSTRACT

Background and Objectives: Enzyme activity evaluation is useful for determining soil microbial activity that are responsible for important reactions such as soil mineralization and homogenization of soil organic matter. Enzyme activity affects the physicochemical properties of soil and supports the growth of plants. Therefore, enzyme activity is a sensitive index to evaluate the effect of soil conditioners. Biochar is one of these organic modifiers whose use in soil can affect the enzymatic activity of soil. Therefore, the aim of this study is to investigate the effect of grape waste biochar, brown walnut shell and poultry manure on the enzymatic behavior of a clay loam soil.

Materials and Methods: In order to conduct this research, a completely randomized experiment was conducted in three replications. Biochars were used in 10 percent by weight. The experimental treatments included control soil (CS), soil + grape waste biochar (GSB), soil + brown walnut shell biochar (NSB) and soil + poultry manure biochar (PMB). The samples were kept for about two months at a temperature of 25 ± 3 degrees Celsius. During the incubation period, the humidity was maintained at 70% of the agricultural capacity by adding distilled water and mixing the samples. Soils were sampled after 5, 10, 30 and 60 days, and invertase, acid and alkaline phosphatase, and urease activities were measured in the samples.

Results: The results showed that adding biochar to the soil increased the activity of invertase enzyme, which was 23, 15 and 8% higher in PMB, GSB and NSB treatments than the control treatment. The highest activity of alkaline phosphatase enzyme was observed in the control treatment and the lowest in the PMB treatment, and the activity of this enzyme in the PMB treatment was about 39% lower than the control soil. The order of alkaline phosphatase activity in different treatments was as follows: $CS \geq GSB > NSB > PMB$. Acid phosphatase activity in treated soils was completely opposite to invertase enzyme activity. The lowest activity was observed in the PMB treatment, which was about 67% less than the control treatment. The order of activity of this enzyme in different treatments was as follows: $CS > NSB > GSB \geq PMB$. The activity of urease enzyme in different treatments was similar to that of invertase enzyme. The peak activity of this enzyme was observed in the PMB treatment,

which was about 71% more than the control treatment. Invertase enzyme activity in GSB and NSB treatment was 40% and 20% higher than the control treatment, respectively. On average, the geometric mean of enzyme activity increased during incubation in GSB treatment compared to the control. According to the enzyme resistance index, the lowest rate was related to PMB treatment and the highest rate was related to NSB treatment.

Conclusion: Considering that GSB treatment has an increasing effect on enzyme activity, especially carbon and nitrogen cycle enzymes. This organic modifier can be used as a supplementary source for supplying carbon and nitrogen elements to improve soil quality.

Cite this article: Rostami, Khadigeh, Varasteh Khanlari, Zahra, Zarabi, Mahboubeh. 2024. The effect of using grape waste, brown walnut shell and poultry manure biochars on the enzymatic behavior of a clay loam soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 14 (3), 99-119.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.22067.2132

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر استفاده از بیوجار پسماند انگور، پوسته قهوه‌ای گردو و کود مرغی بر رفتار آنزیمی یک خاک لوم رسی

خدیدجه رستمی^۱، زهرا وارسته خانلری^{۲*}، محبوبه ضرابی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: khadigehrostami519@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: zahra.varasteh@malayeru.ac.ir
۳. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: mzarrabi@malayeru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹</p>	<p>سابقه و هدف: ارزیابی فعالیت آنزیمی برای تعیین فعالیتهای میکروبی خاک که مسئول واکنش‌های مهم مانند معدنی شدن و هوموسی شدن مواد آلی خاک هستند، مفید است. فعالیت آنزیمی بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مؤثر بوده و از رشد گیاهان حمایت می‌کند. بنابراین فعالیت آنزیمی یک شاخص حساس برای ارزیابی تأثیر اصلاح‌کننده‌ها در خاک است. بیوجار یکی از این اصلاح‌کننده‌های آلی است که کاربرد آن در خاک می‌تواند بر فعالیت آنزیمی خاک تأثیرگذار باشد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر بیوجار پسماند انگور، پوسته قهوه‌ای گردو و کود مرغی بر رفتار آنزیمی یک خاک لوم رسی است.</p>
<p>واژه‌های کلیدی: اوره‌آز، اینورتاز، شاخص مقاومت آنزیم (Rs)، فسفاتاز اسیدی و قلیایی، میانگین هندسی فعالیت آنزیم (GME_n)</p>	<p>مواد و روش‌ها: به منظور انجام این پژوهش آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. از بیوجارها در ۱۰ درصد وزنی استفاده گردید. تیمارهای آزمایش شامل خاک شاهد (CS)، خاک + بیوجار پسماند انگور (GSB)، خاک + بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو (NSB) و خاک + بیوجار کود مرغی (PMB) بود. نمونه‌ها حدود دو ماه در دمای 25 ± 3 درجه سلسیوس نگهداری و در مدت زمان انکوباسیون با افزودن آب مقطر و مخلوط نمودن نمونه‌ها، رطوبت در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری شد. در زمان ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روز از خاک‌ها، نمونه‌برداری صورت گرفت و در نمونه‌ها فعالیت آنزیم اینورتاز، فسفاتاز اسیدی و قلیایی و اوره‌آز اندازه‌گیری شد.</p>
	<p>یافته‌ها: نتایج نشان داد که افزودن بیوجار به خاک سبب افزایش فعالیت آنزیم اینورتاز شد که این افزایش در تیمار PMB، GSB و NSB به ترتیب ۲۳، ۱۵ و ۸ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد</p>

بود. بیش‌ترین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمار شاهد و کم‌ترین در تیمار PMB مشاهده شد که فعالیت این آنزیم در تیمار PMB حدود ۳۹ درصد کم‌تر از خاک شاهد بود. ترتیب فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمارهای مختلف به این صورت بود: $CS \geq GSB > NSB > PMB$. فعالیت فسفاتاز اسیدی در خاک‌های تیمار شده کاملاً عکس فعالیت آنزیم اینورتاز بود. کم‌ترین فعالیت در تیمار PMB مشاهده شد که حدود ۶۷ درصد کم‌تر از تیمار شاهد بود. ترتیب فعالیت این آنزیم در تیمارهای مختلف از این الگو تبعیت کرد: $CS > NSB > GSB \geq PMB$. فعالیت آنزیم اوره‌آز در تیمارهای مختلف مشابه آنزیم اینورتاز بود. بیش‌ترین فعالیت این آنزیم در تیمار PMB مشاهده شد که حدود ۷۱ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود. فعالیت آنزیم اینورتاز در تیمار GSB و NSB به ترتیب ۴۰ و ۲۰ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود. به‌طور متوسط میانگین هندسی فعالیت آنزیم طی انکوباسیون در تیمار GSB نسبت به شاهد افزایش داشت. کم‌ترین شاخص مقاومت آنزیم، مربوط به تیمار PMB و بیش‌ترین مربوط به تیمار NSB بود.

نتیجه‌گیری: با توجه به این‌که تیمار GSB اثر افزایشی بر فعالیت آنزیمی به‌ویژه آنزیم‌های چرخه کربن و نیتروژن دارد. از این اصلاح‌کننده آلی به عنوان منبع مکمل برای تامین عناصر کربن و نیتروژن جهت بهبود کیفیت خاک می‌توان استفاده نمود.

استناد: رستمی، خدیجه، وارسته خانلری، زهرا، ضرابی، محبوبه (۱۴۰۳). تأثیر استفاده از بیوجار پسماند انگور، پوسته قهوه‌ای گردو و کودمرغی بر رفتار آنزیمی یک خاک لوم رسی. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۴ (۳)، ۹۹-۱۱۹.

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.22067.2132



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

مقدار مواد آلی خاک^۱ (SOM) و حاصلخیزی آن نقش کلیدی در توانایی خاک‌ها جهت تولید غذا و ارائه سایر خدمات اکوسیستم ایفا می‌کنند (۱). آنزیم‌های خاک بخش مهمی از فرایندهای خاک هستند که ارتباط بین بخش زنده و غیرزنده را جهت تبادل مواد غذایی و انرژی مهیا می‌کنند (۲). اندازه‌گیری حضور و فعالیت آنزیمی امکان تعیین فرایندهایی در خاک مانند تأثیر بر چرخه بیوشیمیایی عناصری مانند کربن، نیتروژن، فسفر و گوگرد (۳) و مواد غذایی خاک، که به نوبه خود به رشد گیاه (۴) و اصلاح و سم‌زدایی خاک کمک می‌کنند (۵) فراهم می‌سازد (۶). به‌عنوان یک محصول فعالیت بیولوژیکی، آنزیم‌ها ارتباط نزدیکی با فراوانی، ساختار اجتماعی و فعالیت ریزجانداران خاک دارند (۷). دینامیک مواد غذایی، خواص زیستی و فعالیت آنزیمی به شناسایی محرک‌های اصلی چرخه‌های بیوشیمیایی N، C و P خاک کمک می‌کند (۸ و ۹).

افزودن اصلاح‌کننده‌ها بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و همچنین بر تنوع و ساختار ریزجانداران خاک مؤثر هستند که آن‌ها نیز به نوبه خود بر تنظیم و حذف فعالیت آنزیمی خاک تأثیرگذار می‌باشند (۱۰ و ۱۱). بیوپچارها از طریق تغییر در جرم مخصوص خاک، نگه‌داری آب، pH خاک، نگه‌داری و قابلیت دسترسی مواد غذایی خاک و همچنین تامین کربن فراهم به‌ویژه وقتی بیوپچار در دمای پایین پیرولیز تهیه می‌شود بر جوامع میکروبی خاک مؤثر هستند (۱۲ و ۱۳). تأثیر اصلاح با بیوپچار می‌تواند بر اساس اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی خاک مورد ارزیابی قرار بگیرد. زیرا فعالیت‌های آنزیمی به دلیل حساسیت بالا و واکنش سریع آن‌ها به تغییرات محیطی ابزاری مؤثر برای ارزیابی کیفیت خاک

محسوب می‌شوند (۱۴). تأثیر بیوپچار بر فعالیت آنزیمی متغیر بوده و به شدت به ویژگی‌های بیوپچار و خاک وابسته است (۱۵). افزودن بیوپچار در اغلب موارد موجب افزایش در فعالیت آنزیمی شده است (۱۶).

وانگ و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که کاربرد کم بیوپچار تهیه شده از پسماندهای ذرت (۰/۵ درصد وزنی) فعالیت آنزیم‌های درگیر در چرخه کربن را افزایش داد درحالی‌که کاربرد نسبتاً زیاد (بیش از ۰/۵ درصد) تأثیر منفی روی فعالیت این آنزیم‌ها داشت. این پژوهش‌گران هم‌چنین نشان دادند که با کاربرد بیش‌تر بیوپچار فعالیت آنزیم‌های درگیر در چرخه N افزایش یافت (۱۷). یک متا آنالیز بر داده‌های جمع‌آوری شده روی فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک خاک تحت تأثیر بیوپچارهای تولیدشده از زیست‌توده‌های مختلف (کود دامی، بقایای گیاهی و لجن فاضلاب) انجام گرفت. نتایج نشان داد که اصلاح خاک با بیوپچار به‌طور معنی‌داری موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های چرخه کربن شد در حالی‌که فعالیت آنزیم‌های چرخه نیتروژن و فسفر را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (۱۸). اگرچه گزارش‌های دیگری عکس این نتایج را بیان نمودند (۱۹). هم‌چنین چندین مطالعه اثرات افزودن بیوپچار بر فعالیت آنزیمی خاک‌ها را ارزیابی کردند، ولی گزارش آن‌ها متناقض بوده است. زیرا برخی افزایش (۲۰)، برخی بدون تغییر (۲۱) و برخی کاهش (۲۲) فعالیت آنزیمی در خاک‌های اصلاح شده با بیوپچار را گزارش کرده‌اند به‌دلیل نتایج متفاوت، مطالعه تأثیر بیوپچار بر فعالیت آنزیمی خاک نیاز به پژوهش‌های بیش‌تری دارد. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها به‌صورت منفرد تحت تأثیر فاکتورهای محیطی دخیل در عملکرد اکوسیستم خاک می‌باشد. ولی با این‌حال اندازه‌گیری تنها یک پارامتر خاک کافی نیست به دلیل این‌که خاک چندین عملکرد را انجام

خاک، یک خاک لوم رسی از شهرستان کبودرآهنگ، استان همدان تهیه گردید. نمونه خاک به آزمایشگاه منتقل و پس از هواخشک شدن، کوبیده و از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مانند pH و هدایت الکتریکی (۲۴)، نترات (۲۵)، آمونیوم (۲۶)، نیتروژن کل (۲۷)، کربن آلی (۲۸)، فسفر قابل دسترس (۲۹) و فسفر کل در نسبت ۱:۳ اسیدپرکلریدریک: اسیدنیتریک (۳۰) اندازه‌گیری گردید، که در جدول ۱ ارائه شده است.

می‌دهد (۲۳). مقادیر ضرایب GMEa و Rs به عنوان پارامترهای بدون بعد به منظور مقایسه فعالیت کل آنزیم‌های اندازه‌گیری شده و مقاومت آن‌ها در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این مطالعه تأثیر کاربرد بیوجارهای تولید شده از پسماند انگور، پوسته قهوه‌ای گردو و کودمرغی بر فعالیت آنزیمی یک خاک لوم رسی بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تهیه نمونه خاک: به منظور بررسی تأثیر بیوجارهای مختلف بر برخی فعالیت‌های آنزیمی

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Some chemical characteristics of the studied soil.

فسفر کل Total P	کربن آلی Organic C	نیتروژن کل Total N	pH	EC	فسفر قابل دسترس Available Phosphorus	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
(%)				(dS m ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)		
0.08	0.68	0.06	7.8	0.46	31.50	23.72	50.12

کود مرغی برای تهیه بیوجار هواخشک شد. سایر مواد اولیه ابتدا در آزمایشگاه به خوبی با آب مقطر شسته و سپس در دمای آزمایشگاه خشک شدند. سپس برای تهیه بیوجار این مواد اولیه به یک شرکت دانش بنیان در استان خوزستان، شهرستان اهواز فرستاده شدند. مواد اولیه توسط تجزیه حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در محیطی با اکسیژن کم به مدت ۲ ساعت تبدیل به بیوجار شدند. بیوجارها خرد و از الک ۰/۵ میلی متری عبور داده شدند. تیمارهای آزمایش شامل خاک شاهد (CS)، خاک + بیوجار کودمرغی (PMB)، خاک + بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو (NSB) و خاک + بیوجار پسماند انگور (GSB) بود. برخی ویژگی‌های شیمیایی بیوجارهای مورد بررسی مانند نیتروژن کل (۲۷)، فسفر کل (۳۰)،

تهیه و آماده‌سازی تیمارها: تیمارهای مورد استفاده سه نوع بیوجار بود:

۱- بیوجار کودمرغی: کودمرغی مورد استفاده برای تهیه این نوع بیوجار از شهرستان بیجار، استان کردستان تهیه شد (عمده کودمرغی تولیدی از شهرستان بیجار به استان همدان جهت استفاده در سیب‌زمینی‌کاری‌ها فرستاده می‌شود).

۲- بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو: چوب قهوه‌ای گردو از شهرستان تویسرکان تهیه شد.

۳- بیوجار پسماند انگور: که این پسماند از تاکستان‌های شهرستان ملایر تهیه گردید. پسماند انگور استفاده شده پسماند صنایع فرآوری انگور بوده و در واقع بقایای خوشه انگور بعد از تبدیل به کشمش است.

تصادفی انجام شد. بعد از مخلوط کردن نمونه‌ها، رطوبت آن‌ها به ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه رسانده شد (۳۲). نمونه‌ها دو ماه در دمای 25 ± 3 درجه سلسیوس نگهداری و در مدت زمان انکوباسیون با افزودن آب مقطر و مخلوط نمودن نمونه‌ها، رطوبت در حد ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. نمونه‌برداری در زمان‌های ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روز صورت گرفت. نمونه‌ها به صورت مرطوب در ظرف دربسته داخل یخچال در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری و فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اینورتاز و فسفاتاز قلیایی و اسیدی به روش شرح داده شده توسط اسچاینر و همکاران (۳۳) اندازه‌گیری گردید.

برخی از شاخص‌های کیفی خاک با استفاده از فعالیت مطلق آنزیم محاسبه گردید. این شاخص‌ها عبارت بودند از:

الف) میانگین هندسی فعالیت آنزیم (GME_a) (۲۲).

$$GME_a = \sqrt[4]{Invertase * ACP * ALP * urease} \quad (1)$$

ب) شاخص مقاومت (R_S) بر اساس فعالیت آنزیم بر مبنای روش اوروین و واردل (۳۴) تعیین شد:

$$R_S = 1 - \left[\frac{2|D_0|}{C_0 + |D_0|} \right] \quad (2)$$

نتایج و بحث

اثر کاربرد بیوجارهای مختلف بر غلظت کربن آلی و فسفر قابل دسترس و pH خاک: طبق جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کاربرد بیوجارهای مختلف در طی انکوباسیون تأثیر معنی‌داری بر محتوای کربن آلی، فسفر قابل دسترس و pH خاک در سطح احتمال یک درصد داشت.

pH و قابلیت هدایت الکتریکی (۳۱) در ترکیب‌ها اندازه‌گیری شد. هم‌چنین مقدار کربن با استفاده از دستگاه کربن آنالایزر تعیین گردید. غلظت کربن کل $82/58$ ، $71/30$ و $62/13$ درصد، نیتروژن کل $1/1$ ، $0/98$ و $0/77$ درصد و فسفر کل $2/6$ ، $6/37$ و $0/74$ درصد به ترتیب در بیوجار کود مرغی، بیوجار پسماند انگور و بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو بود. مقادیر pH در بیوجارهای کود مرغی، پسماند انگور و پوسته قهوه‌ای گردو به ترتیب $11/1$ ، $9/7$ ، $7/5$ و قابلیت هدایت الکتریکی در بیوجارهای کود مرغی، پسماند انگور و پوسته قهوه‌ای گردو به ترتیب $6/10$ ، $5/95$ و $1/52$ دسی‌زیمنس بر متر بود.

انکوباسیون خاک: برای انجام آزمایش نمونه خاک‌های ۲۰۰ گرمی با نسبت ۱۰ درصد از تیمار بیوجارهای مختلف در سه تکرار آماده گردید. نمونه خاک بدون بیوجار نیز به‌عنوان تیمار شاهد در سه تکرار استفاده شد و آزمایش در قالب طرح کاملاً

در این رابطه (Invertase): اینورتاز، (ACP): فسفاتاز اسیدی، (ALP): فسفاتاز قلیایی و (Urease): اوره‌آز

که در آن، $D_0 = C_0 - P_0$ ، فعالیت آنزیم در خاک شاهد، P_0 : فعالیت آنزیم در خاک بعد از اضافه کردن بیوجار، مقدار R_S از -1 تا $+1$ است.

آنالیز داده‌ها: اطلاعات به دست آمده از آزمایش با کمک نرم‌افزار SPSS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی^۱ استفاده گردید. نمودارهای مربوطه با استفاده از نرم‌افزار Microsoft office Excel 13.0 ترسیم گردید.

1- Tukey

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر محتوای کربن آلی، فسفر قابل دسترس و pH خاک.

Table 2. Variance analysis of the effect of different biochars on organic carbon content, available phosphorus and soil pH.

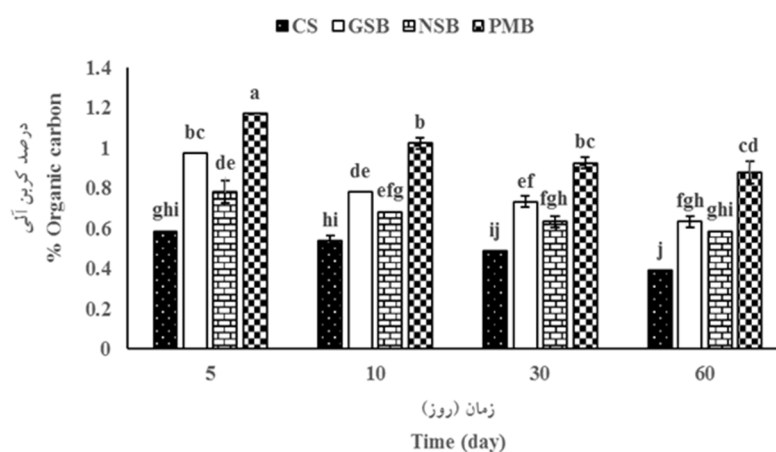
pH	فسفر قابل دسترس Available P	کربن آلی Organic Carbon	درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variation
میانگین مربعات Main of square				
0.58**	4559.05**	0.14**	3	زمان Time
1.33**	78946.9**	0.52**	3	بیوچار Biochar
0.02**	896.1**	0.004**	9	زمان*بیوچار T*B
0.003**	44.1**	0.002**	32	خطا Error
2.28	6.92	6.07		ضریب تغییرات CV%

** معنی دار در سطح احتمال ۱٪

** Significant at 0.01 probability level

مزرعه‌ای شش ساله تأیید کرد که کاربرد بیوچار حاصل از تراشه‌های چوب راش و کاج (۹ تا ۸۰ مگا گرم بر هکتار) خاکدانه‌سازی، محتوای کربن آلی و pH خاک را افزایش داد و موجب افزایش ذخیره کربن آلی در مخازن کربن آلی ذره‌ای (POM) شد (۳۵).

شکل ۱ اثر متقابل کاربرد بیوچارهای مختلف در طی انکوباسیون بر غلظت کربن آلی را نشان می‌دهد. کاربرد بیوچار موجب افزایش کربن آلی خاک در مقایسه با تیمار شاهد گردید. تیمار PMB و GSB به ترتیب موجب افزایش ۱۰۰ و ۵۶ درصدی کربن آلی خاک در مقایسه با تیمار شاهد گردیدند. یک آزمایش

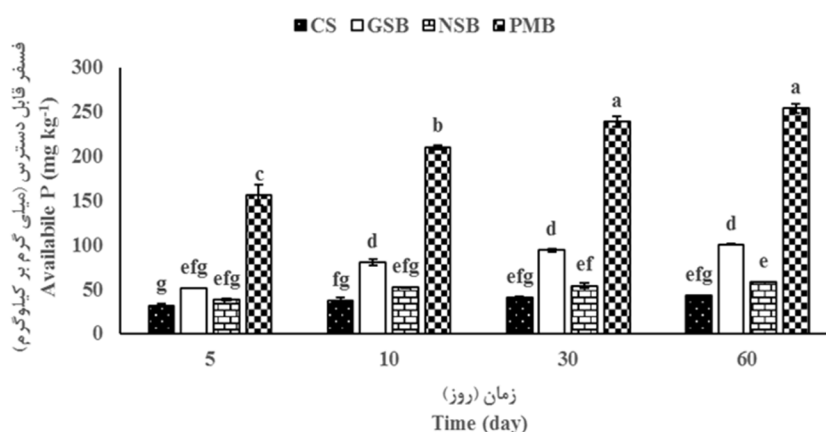


شکل ۱- محتوای کربن آلی خاک در تیمارهای مختلف در طول ۶۰ روز انکوباسیون (CS, GSB, NSB, PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک تیمار شده با بیوچار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوچار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک تیمار شده با بیوچار کود مرغی).

Figure 1. Soil organic carbon content under different treatments during 60 days of incubation (CS, GSB, NSB and PMB, control soil, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

بیش از یک فصل زراعی، باشند. هم‌چنین گاربز و همکاران (۲۰۲۱) بیان نمودند که فسفر بالای خاک بعد از افزودن بیوچار می‌تواند به دلیل افزایش مواد آلی خاک (SOM) باشد (۱۵). استفاده از بیوچار موجب غنی‌سازی در لیگاندهای آلی شده که آن منجر به کلاته‌کردن Al^{3+} و Fe^{3+} در خاک‌های اسیدی شده که می‌توانستند فسفر را رسوب دهند (۳۶). با توجه به این موضوع این لیگاندهای آلی در خاک‌های قلیایی موجب کلاته شدن کلسیم شده و از رسوب فسفر به صورت فسفات‌های کلسیم جلوگیری می‌کنند. در طی انکوباسیون مقدار فسفر قابل‌دسترس در همه تیمارهای حاوی بیوچار افزایش یافت. بیش‌ترین غلظت فسفر در تمام تیمارها در ۶۰ روز بعد از انکوباسیون مشاهده گردید (شکل ۲).

شکل ۲ تغییرات فسفر قابل‌دسترس خاک در تیمارهای مختلف بیوچار در طی انکوباسیون را نشان می‌دهد. میزان فسفر قابل‌دسترس با افزودن بیوچار افزایش یافت. افزودن تیمار PMB، GSB و NSB به‌طور میانگین به ترتیب ۶۵، ۱۱۴ و ۳۲ درصد فسفر قابل‌دسترس را در مقایسه با شاهد در طی دوره انکوباسیون افزایش دادند. یکی از دلایل افزایش فسفر قابل‌دسترس بعد از افزودن بیوچارها می‌تواند وجود فسفر زیاد در این ترکیبات باشد به‌طوری‌که PMB اضافه شده به خاک در طی انکوباسیون ۵۸ درصد، NSB ۵ درصد و GSB ۰/۷ درصد از فسفر کل خود را به‌صورت قابل‌دسترس به محیط اضافه نمودند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که NSB و GSB قادر به افزایش فسفر قابل‌دسترس خاک، شاید برای مدتی

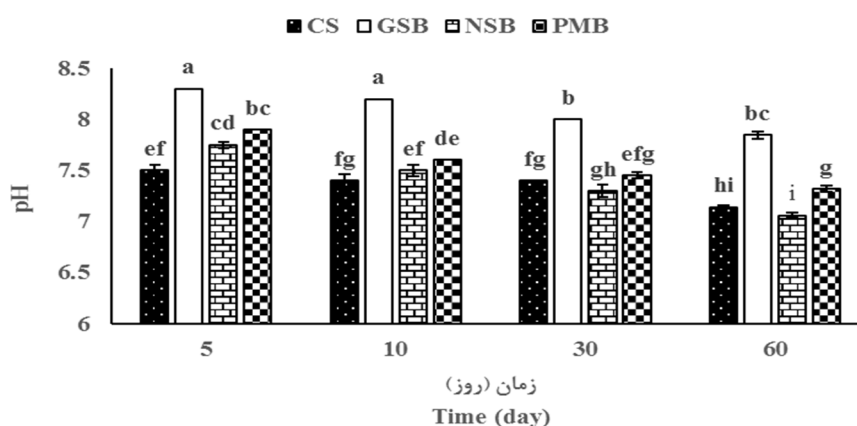


شکل ۲- غلظت فسفر قابل‌دسترس خاک در تیمارهای مختلف در طول ۶۰ روز انکوباسیون (CS، GSB، NSB و PMB به ترتیب خاک شاهد، خاک تیمار شده با بیوچار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوچار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک تیمار شده با بیوچار کودمرغی).

Figure 2. Available phosphorus concentration of soil under different treatments during 60 days of incubation (CS, GSB, NSB and PMB, control soil, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

در تمام تیمارها کاهش یافت (شکل ۳). کاظمی و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی رهاسازی عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم از بیوچارهای مختلف نتایج مشابهی را گزارش کردند (۳۸).

افزودن تیمار GSB موجب افزایش معنی‌دار pH خاک در مقایسه با شاهد شد (شکل ۳). این افزایش چیزی حدود ۰/۸ واحد بود. دلیل اصلی افزایش pH خاک بعد از کاربرد بیوچار وجود کربنات‌های عناصر قلیایی در آن می‌باشد (۳۷). در طول انکوباسیون



شکل ۳- pH خاک در تیمارهای مختلف در طول ۶۰ روز انکوباسیون (CS، GSB، NSB، PMB به ترتیب خاک شاهد، خاک تیمار شده با بیوچار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوچار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک تیمار شده با بیوچار کودمرغی).

Figure 3. Soil pH under different treatments during 60 days of incubation (CS, GSB, NSB and PMB, control soil, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

اثر کاربرد بیوچارهای مختلف در طی انکوباسیون بر فعالیت آنزیم‌های اینورتاز، فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی و اوره‌آز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

اثر کاربرد بیوچارهای مختلف بر فعالیت آنزیم‌های مرتبط با چرخه کربن، فسفر و نیتروژن: تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر فعالیت آنزیم‌های اینورتاز، فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی و اوره‌آز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر فعالیت آنزیم اینورتاز، فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی و اوره‌آز.

Table 3. Analysis of variance of the effect of different biochars on the activity of invertase, acid phosphatase, alkaline phosphatase and urease enzymes.

اوره‌آز Urease	فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	اینورتاز Invertase	درجه آزادی df	منابع تغییرات source of variation
میانگین مربعات Main of square					
12571.09**	1692.66**	23552.85**	302.67**	3	زمان Time
33543.94**	9474.66**	52047.50**	176.67**	3	بیوچار Biochar
9432.50**	40.82**	1311.79**	97.16**	9	زمان*بیوچار T*B
71.78	241.52	657.07	7.11	32	خطا Error
3.69	25.48	8.09	9.12		ضریب تغییرات CV%

** معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

** Significant at 0.01 probability level

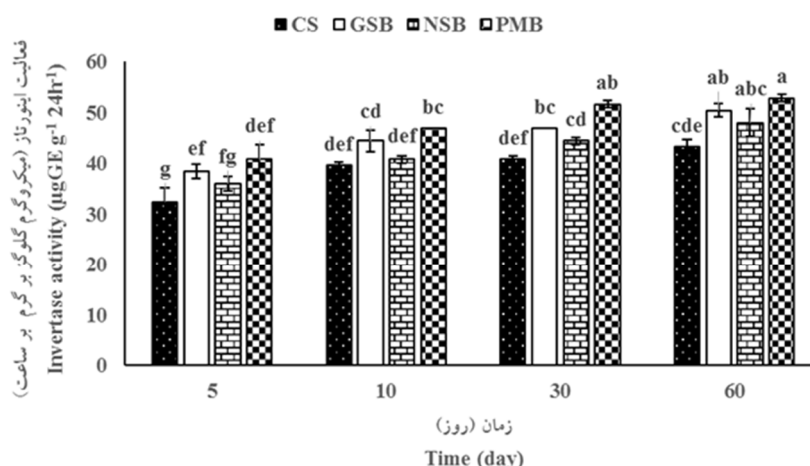
بیوپچار موجب افزایش فعالیت میکروبی می‌شود (۴۴). یکی از دلایل این افزایش، سطح ویژه زیاد بیوپچار است (۴۵) که جایگاه‌های میکروبی مطلوبی را برای جوامع میکروبی ارائه می‌دهد (۴۶).

خادم و رئیسی (۲۰۱۷) فعالیت جامعه میکروبی در خاک‌های شنی و رسی که بیوپچار ذرت دریافت نموده‌اند را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و افزایش قابل توجهی زیست‌توده میکروبی را در هر دو نوع خاک مشاهده نمودند و نتایج بهتری را در خاک‌های شنی به دست آوردند. پژوهش‌گران این افزایش را به در دسترس بودن بیش‌تر مواد آلی و کربن ناپایدار نسبت دادند. محتوای مواد آلی بالا بعد از کاربرد بیوپچار در مقایسه با شاهد و همبستگی معنی‌دار بین محتوای مواد آلی و زیست‌توده میکروبی ($r=0.47$ ، $n=72$ ، $P<0.001$)، نقش بیوپچار در کمک به افزایش زیست‌توده میکروبی خاک را تایید می‌کند (۳۲). بیوپچار یک اصلاح‌کننده آلی غنی از کربن است که کربن آلی ناپایدار برای استفاده و رشد میکروبی مهیا می‌کند (۴۷ و ۴۸). عامل دیگری که ممکن است در ارتباط با افزودن بیوپچار در فعالیت آنزیم‌ها دخیل باشد، تغییر pH خاک پس از دریافت اصلاح‌کننده است (شکل ۳)، زیرا تغییر pH یکی از عواملی است که عملکرد آنزیم‌ها را تغییر می‌دهد. لو و گو (۲۰۱۶) با تأیید تغییر فعالیت بتاگلوکوزیداز با استفاده از بیوپچار تولید شده از بقایای بامبو، نشان دادند که این امر ممکن است به دلیل تغییرات در ویژگی‌های خاک، pH، مواد فنلی محلول و در دسترس بودن مواد مغذی رخ داده باشد، که احتمالاً منجر به تغییراتی در جامعه میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی شده است (۴۹). نی و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که افزودن بیوپچار باگاس نیشکر در دوزهای ۱/۵، ۲/۲۵ و ۳ تن در هکتار فعالیت آنزیم اینورتاز را در خاک‌های تیمار شده در مقایسه با شاهد به ترتیب ۱/۲، ۱/۵ و ۱/۷

آنزیم اینورتاز مسئول آزادسازی کربن مورد نیاز برای رشد و افزایش فعالیت ریزجانداران خاک و آنزیم‌های تولید شده توسط آن‌ها در خاک می‌باشد (۳۹). شکل ۴ فعالیت آنزیم اینورتاز در طول دوره انکوباسیون در تیمارهای مختلف را نشان می‌دهد. کاربرد تیمارهای PMB و GSB موجب افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم اینورتاز نسبت به شاهد شدند. فعالیت آنزیم اینورتاز با افزایش زمان انکوباسیون افزایش یافت. این امر احتمالاً به دلیل کاهش pH در طی زمان انکوباسیون است (شکل ۳). اوج فعالیت اینورتاز ۶۰ روز بعد از انکوباسیون در تیمار PMB مشاهده شد ($0.52/8 \mu\text{gGE g}^{-1} 24\text{h}^{-1}$). وانگ و همکاران (۲۰۱۱) افزایش فعالیت آنزیم اینورتاز را با زمان گزارش کردند (۴۰). هوانگ و همکاران (۲۰۱۷) کاهش فعالیت آنزیم اینورتاز را با افزایش بیوپچار گزارش نمودند آن‌ها احتمال این امر را افزایش pH به دلیل مصرف بیوپچار دانستند (۴۱). نورمندی‌پور و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تأثیر کلس برنج و بیوپچار حاصل از آن بر فعالیت برخی از آنزیم‌ها در یک خاک شنی به این نتیجه رسیدند که روند فعالیت آنزیم اینورتاز تا هشت ماه افزایشی و پس از آن با اختلاف کمی نسبت به ماه هشتم انکوباسیون، کاهش شد (۴۲). در این پژوهش، تیمار PMB فعالیت اینورتاز خاک را بیش‌تر از تیمارهای GSB و NSB افزایش داد، که با تغییرات کربن آلی خاک سازگار است (شکل ۱). بنابراین، به نظر می‌رسد که فعالیت اینورتاز با افزایش مواد آلی خاک به سبب افزودن بیوپچار افزایش می‌یابد. فوستر و همکاران (۲۰۱۶) یافته‌های مشابهی را برای آنزیم‌های چرخه کربن گزارش کردند که به تجمع و تثبیت هم‌مکان^۱ سوبسترای کربن و آنزیم در سطح بیوپچار مربوط می‌شود (۴۳). پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که کاربرد نسبت‌های بالای

برابر افزایش داد (۵۰). وجیودزکی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی پاسخ آنزیمی خاک تحت تیمار با انواع بیوپچارها، شامل خاک شاهد (S)، خاک + بیوپچار کمپوست (S+MS)، خاک + بیوپچار لجن فاضلاب (S + MSS)، خاک + بیوپچار چوب کاج (S + PS) و خاک + بیوپچار چمن (S + SS) و

خاک + بیوپچار برگ بلوط (S + OL) با نسبت ۱ به ۱۰ به این نتیجه رسیدند که فعالیت آنزیم کاتالاز، فسفاتاز اسیدی و قلیایی با افزودن تیمار S + MSS نسبت به شاهد در تمام زمانها افزایش معنی دار از خود نشان داد. بیشترین فعالیت هر سه آنزیم ۳۰ روز بعد از انکوباسیون مشاهده گردید (۵۱).



شکل ۴- فعالیت آنزیم اینورتاز در تیمارهای مختلف در طول ۶۰ روز انکوباسیون (CS, GSB, NSB, PMB به ترتیب خاک شاهد، خاک تیمار شده با بیوپچار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوپچار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک تیمار شده با بیوپچار کود مرغی).

Figure 4. Activity of invertase enzyme under different treatments during 60 days of incubation (CS, GSB, NSB and PMB, control soil, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

در تمام تیمارها فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی بیش‌تر از فسفاتاز اسیدی بود (شکل ۵ الف و ب). بیشترین فعالیت فسفاتاز قلیایی در خاک شاهد و تیمار GSB و کمترین فعالیت در تیمار PMB مشاهده گردید (شکل ۵ الف). فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمار شاهد و GSB به‌طور میانگین ۱/۶ برابر فعالیت آنزیم فسفاتاز در تیمار PMB بود. یک آزمایش گلخانه‌ای نشان داد که فعالیت فسفومونواستراز اسیدی در خاک‌های سرخ^۱ و فسفومونواستراز قلیایی در خاک‌های فلوآکریک^۲ به میزان قابل توجهی توسط

فسفاتازها از مهم‌ترین آنزیم‌های خاک هستند که ترکیبات آلی فسفردار را به فسفر معدنی و مناسب برای تغذیه گیاه تبدیل می‌کنند. فعالیت فسفاتازها وابسته به تغییر ترکیبات حاوی فسفر و مواد آلی در خاک است (۵۲) و فعالیت آنها می‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی قابلیت دسترسی فسفر برای گیاهان و ریزجانداران خاک باشد. هم‌چنین فسفاتازها آنزیم‌هایی هستند که واکنش سریع به تنش‌های محیطی ناشی از فاکتورهای طبیعی و مصنوعی به‌ویژه تغییر در pH خاک را نشان می‌دهند (۵۱).

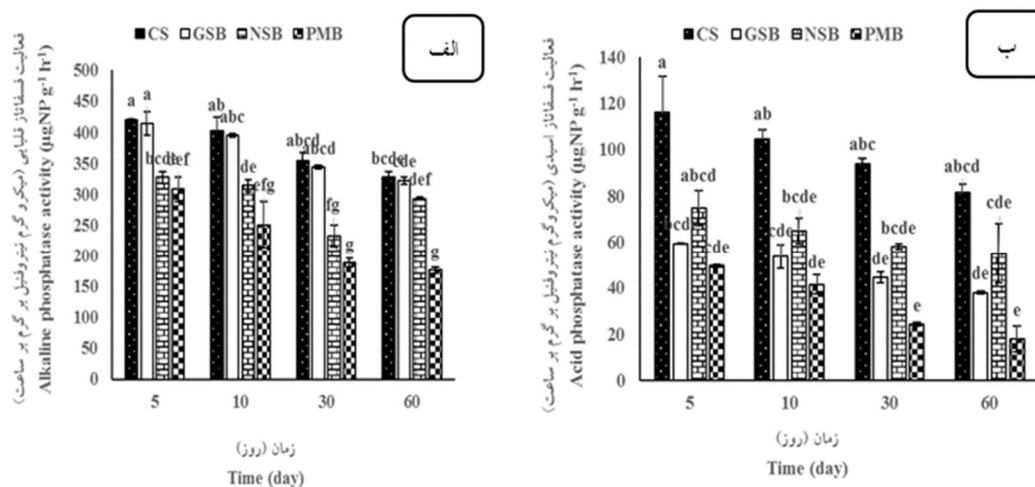
1- Red soils
2- Fluvo-aquic

(۵۱). فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی در طول دوره انکوباسیون کاهش یافت (شکل ۵ الف و ب). از آنجا که در طی دوره انکوباسیون غلظت فسفر قابل جذب افزایش یافت. به مراتب نیاز به ترشح آنزیم فسفاتازها کاهش پیدا کرد. فعالیت زیاد فسفاتازها به دلیل تولید آنها توسط گیاه و میکروارگانیسمها و یا به دلیل تقاضای زیاد برای فسفر است (۵۴). پیوتروسکا-دوگوس و ویلزوسکی (۲۰۱۴) با بررسی تأثیر میزان فسفر بر فعالیت آنزیم فسفاتازها بیان نمودند که ارتباط بین میزان فسفر قابل دسترس و فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک پیچیده است و می توان ارتباط مثبت، منفی و حتی عدم ارتباط بین این خصوصیات را مشاهده نمود (۵۵).

افزایش بیوجار به خاک کاهش یافتند (۵۳). فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمارها از این الگو پیروی کرد:

$$CS \geq GSB > NSB > PMB$$

بیشترین فعالیت فسفاتاز اسیدی در طی انکوباسیون در خاک شاهد مشاهده گردید که به طور متوسط ۱/۶ تا ۳ برابر بیش تر از زمانی بود که بیوجار به خاک اضافه شده بود. بین تیمارهای بیوجار با یکدیگر اختلاف معنی داری مشاهده نشد (شکل ۵ ب). وجود زوکی و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی پاسخ آنزیمی خاک تحت تیمار با انواع مختلف بیوجار به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوجار به خاک موجب کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در خاک شد



شکل ۵- فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی (الف) و فسفاتاز اسیدی (ب) در تیمارهای مختلف در طول ۶۰ روز انکوباسیون انکوباسیون (CS, GSB, NSB, PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک تیمار شده با بیوجار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوجار پوسته قهوه ای گردو و خاک تیمار شده با بیوجار کود مرغی).

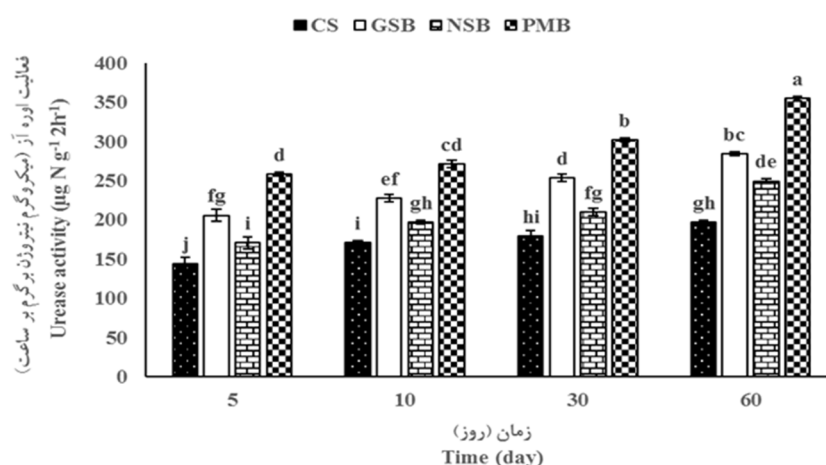
Figure 5. Activity of alkaline phosphatase enzyme (A) and acid phosphatase enzyme (B) under different treatments during 60 days of incubation (CS, GSB, NSB and PMB, control soil, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

فعالیت مربوط به تیمار PMB ($354/7 \mu\text{gN g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$) بود (شکل ۶). کمترین فعالیت این آنزیم در تیمار شاهد مشاهده شد. لیائو و همکاران (۲۰۲۲) با مطالعه

فعالیت اوره آز در تمام تیمارها در طول دوره انکوباسیون افزایش یافت. بیشترین فعالیت اوره آز در ۶۰ روز بعد از انکوباسیون رخ داد. که بیشترین

مختلف بهبود فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، فسفاتاز قلیایی و آریل سولفاتاز را در اثر کاربرد بیوجار گزارش داده‌اند (۵۷ و ۱۲). ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) با کاربرد بیوجار کاه گندم به یک خاک لوم رسی سیلتی به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوجار به خاک موجب افزایش معنی‌دار کربن و فسفر زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم اوره‌آز شده است (۵۸). از آن‌جا که کاربرد بیوجار معدنی شدن N را تسریع می‌کند، فعالیت آنزیم‌های چرخه نیتروژن افزایش می‌یابد (۵۹).

تأثیر بیوجار بر فعالیت آنزیمی خاک تحت‌تأثیر دماهای مختلف پیرولیز، به این نتیجه رسیدند افزودن بیوجارهای تولید شده در دمای کم‌تر از ۵۰۰ درجه سلسیوس به خاک سبب افزایش فعالیت تقریباً تمام گروه‌های آنزیمی درگیر در چرخه کربن، نیتروژن و فسفر شد. درحالی‌که افزودن بیوجارهای تولید شده در دمای بالای ۵۰۰ درجه سلسیوس به خاک اثر معنی‌داری بر افزایش این آنزیم‌ها نداشت. البته این پژوهش‌گران بیان نمودند که pH، بافت، محتوای کربن‌آلی و مقدار کاربرد بیوجار از فاکتورهای مؤثر بر فعالیت آنزیمی خاک هستند (۵۶). پژوهش‌های



شکل ۶- فعالیت آنزیم اوره‌آز در تیمارهای مختلف در طول ۶۰ روز انکوباسیون (CS، GSB، NSB، PMB به ترتیب خاک شاهد، خاک تیمار شده با بیوجار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک تیمار شده با بیوجار کود مرغی).

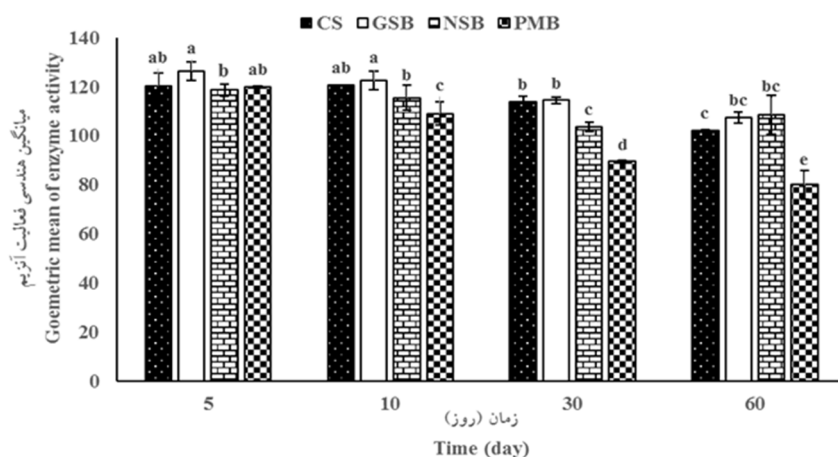
Figure 6. Activity of urease enzyme under different treatments during 60 days of incubation (CS, GSB, NSB and PMB, control soil, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

در مقایسه با خاک شاهد در مدت زمان انکوباسیون مشاهده شد (شکل ۷). برای سایر تیمارها در مقایسه با شاهد یک کاهش حدود ۳ درصد (NSB) و ۱۳ درصد (PMB) مشاهده گردید. کم‌ترین مقدار GME_a بعد از ۶۰ روز انکوباسیون (میانگین ۲۱/۳ در همه تیمارها) مشاهده شد. مطالعات پاز-فیری و همکاران (۲۰۱۴) تنوع کم‌تری در مقدار GME_a در

میانگین هندسی فعالیت آنزیم (GME_a): فرایندهای خاک بر اساس ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی آن‌ها تعیین می‌شود. تغییرات ویژگی‌های خاک را می‌توان با استفاده از شاخص کیفیت خاک ارائه نمود. یکی از این شاخص‌ها میانگین هندسی فعالیت آنزیم یا GME_a (۶۰) است. به‌طور متوسط برای تیمار GSB یک افزایش ۲/۵ درصدی در GME_a

این شاخص برای نشان دادن بهبود معدنی شدن مواد آلی و حاصلخیزی خاک مناسب است (۶۱). گوش و کومارمایتی (۲۰۲۱) با مطالعه آزمایشگاهی تأثیر بیوجار علف هرز مهاجم بر فعالیت آنزیمی و تنفس خاک معدن به این نتیجه رسیدند که میانگین هندسی فعالیت آنزیم از ۱/۸۷ در خاک شاهد به ۴/۵۱ در خاک تیمار شده با ۲ درصد بیوجار و ۳/۲۵ در خاک تیمار شده با ۳ درصد بیوجار رسید (۶۲).

مقایسه با تغییرپذیری هر آنزیم به تنهایی را نشان می‌دهد (۴۸). بنابراین GME_a یک شاخص مناسب‌تری جهت ارزیابی کیفیت خاک نسبت به فعالیت هر آنزیم به صورت جداگانه در خاک به نظر می‌رسد. بر اساس نتایج جینگ و همکاران (۲۰۲۰) شاخص GME_a یک کمیت مناسبی برای تخمین تأثیر بیوجار بر فعالیت آنزیمی است. پژوهش‌گران مشاهده نمودند که افزودن بیوجار حاصل از کاه برنج مقدار GME_a را افزایش داد. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که



شکل ۷- میانگین هندسی فعالیت آنزیم (GME_a) در خاک در تیمارهای متفاوت در طول ۶۰ روز انکوباسیون (CS, GSB, NSB و PMB به ترتیب خاک شاهد، خاک تیمار شده با بیوجار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک تیمار شده با بیوجار کود مرغی).

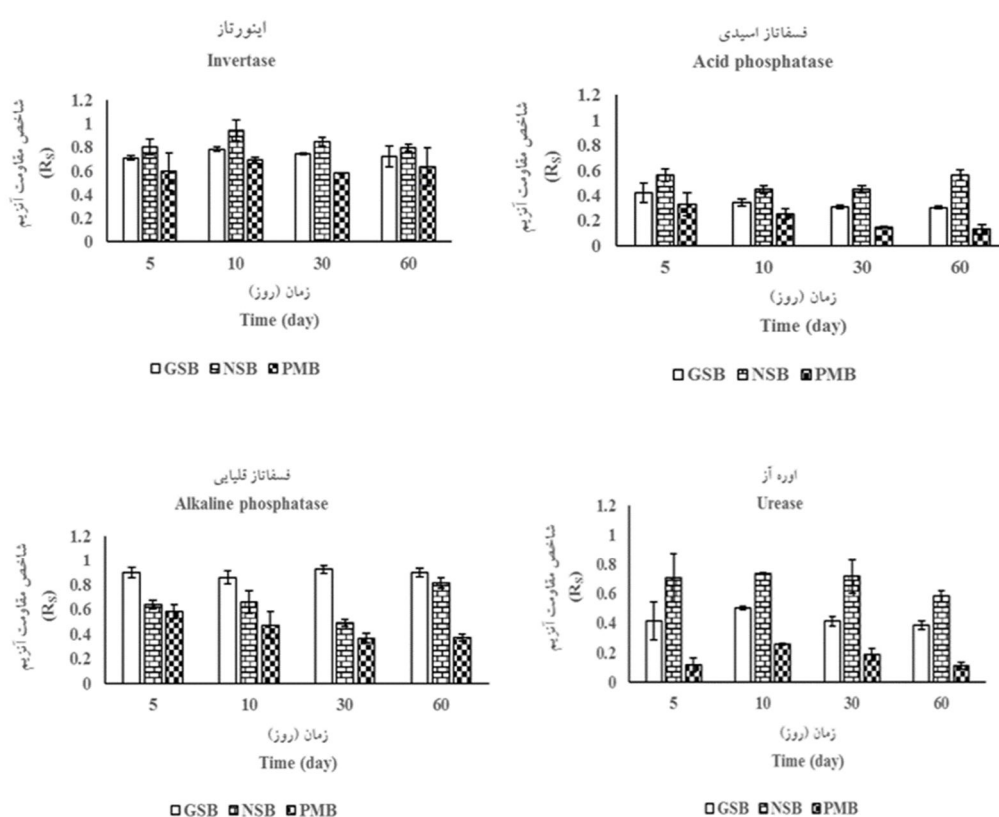
Figure 7. The geometric mean of enzyme activity (GME_a) in soil under different treatments during 60 days of incubation (CS, GSB, NSB and PMB, control soil, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

میکروبی) را به یک اختلال نشان داده و قادر به تعیین تفاوت در پایداری بین خاک‌های متفاوت می‌باشد (۳۴). مقادیر R_s ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد که حساسیت آنزیم‌ها به اضافه کردن بیوجار در طی دوره انکوباسیون متغیر است. بالاترین مقدار R_s در تیمار NSB مشاهده گردید (اوره‌آز متوسط $R_s=0/68$ ، اینورتاز متوسط $R_s=0/85$ ، فسفاتاز اسیدی متوسط $R_s=0/50$). بیش‌ترین مقاومت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمار GSB (میانگین $R_s=0/89$) مشاهده گردید.

شاخص مقاومت (R_s): پایداری (مقاومت و انعطاف‌پذیری در برابر یک اختلال) سیستم خاک عامل کلیدی است که بر ویژگی‌ها و فرایندهای اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. برای مقایسه پایداری سیستم‌های مختلف، ضروری است شاخص‌هایی داشته باشیم که یک معیار کمی نسبی از هر دو مقاومت و انعطاف‌پذیری یک متغیر پاسخ در تمام حالت ممکن را ارائه دهد. این شاخص به‌طور دقیق پاسخ خصوصیات خاک (به‌عنوان مثال زیست‌توده

تیمار PMB مشاهده شد. یعنی فعالیت آنزیمی خاک با افزودن این بیوچار نسبت به سایر بیوچارها بیش تر افزایش یافته است. (فسفاتاز قلیایی $R_s=0/45$ ، فسفاتاز اسیدی متوسط $R_s=0/22$ ، اینورتاز متوسط $R_s=0/62$ و اوره آز $R=0/17$). صرف نظر از نوع بیوچار استفاده شده بیشترین مقاومت فسفاتاز قلیایی و فسفاتاز اسیدی در ۵ روز بعد از انکوباسیون، اوره آز و اینورتاز ۱۰ روز بعد از انکوباسیون دیده شد.

همانطور که بیان شد مقادیر این شاخص بین ۱+ و ۱- است. مقادیر بالاتر شاخص R_s نشان می‌دهد که بیوچار اثر جزئی (حداکثر مقاومت) بر فعالیت آنزیم‌های خاک داشته و فعالیت این آنزیم‌ها با افزودن بیوچار تغییر چندانی نکرده است و مقادیر کم تر شاخص نشان می‌دهد که بیوچار تأثیر زیادی (حداقل مقاومت) بر فعالیت آنزیم‌های خاک را دارد و فعالیت آن‌ها را افزایش داده است (۳۴). کمترین مقدار R_s در



شکل ۸- مقاومت آنزیم‌ها (R_s) در طول ۶۰ روز انکوباسیون در تیمارهای متفاوت (GSB، NSB و PMB) به ترتیب خاک تیمار شده با بیوچار پسماند انگور، خاک تیمار شده با بیوچار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک تیمار شده با بیوچار کود مرغی).

Figure 8. The resistance of enzymes (R_s) during 60 days of incubation under different treatments (GSB, NSB and PMB, soil treated with grape waste biochar, soil treated with walnut brown husk biochar, and soil treated with poultry manure biochar, respectively).

موجب افزایش ۱/۲ برابری فعالیت آنزیم اینورتاز و ۱/۵ برابری فعالیت آنزیم اوره آز در مقایسه با شاهد شدند. بالاترین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در خاک شاهد مشاهده شد که با تیمار GSB اختلاف

نتیجه‌گیری کلی

افزودن بیوچار موجب افزایش فعالیت آنزیم اینورتاز و اوره آز در خاک در مقایسه با شاهد شد. به طوری که تیمار PMB و GSB به طور متوسط

ارزش زراعی بلندمدت داشته باشد. بنابراین با توجه به در دسترس بودن مقادیر فراوان از پسماند انگور در این استان و امکانات تهیه بیوجار می‌توان از آن به‌عنوان یک ماده‌آلی پایدار در خاک استفاده نمود.

معنی‌داری نداشت. بالاترین میانگین هندسی فعالیت آنزیم در تیمار GSB مشاهده شد. شاخص مقاومت آنزیم در تیمار PMB و GSB کم‌ترین مقدار بود. با توجه به نتایجی که ارائه شد تیمار GSB می‌تواند

منابع

- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services-A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.009.
- Sinsabaugh, R. L., Lauber, C. L., Weintraub, M. N., Ahmed, B., Allison, S. D., Crenshaw, C., Contosta, A. R., Cusack, D., Frey, S., Gallo, M. E., Gartner, T. B., Hobbie, S. E., Holland, K., Keeler, B. L., Powers, J. S., Stursova, M., Takacs-Vesbach, C., Waldrop, M. P., Wallenstein, M. D., Zak, D. R., & Zeglin, L. H. (2008). Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*, 11, 1252-1264. doi:10.1111/j.14610248.2008.01245.x.
- Futa, B., Oleszczuk, P., Andruszczak, S., Kwiecińska-Poppe, E., & Kraska, P. (2020). Effect of natural aging of biochar on soil enzymatic activity and physicochemical properties in long-term field experiment. *Agronomy*, 10, 449. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030449>.
- Shi, W. (2011). Agricultural and ecological significance of soil enzymes: soil carbon sequestration and nutrient cycling. In 'Soil enzymology'. (Eds G Shukla, A Varma) pp. 43-60. (Springer: Berlin, Heidelberg) doi:10.1007/978-3-642-14225-3_3.
- Jog, R., Nareshkumar, G., & Rajkumar, S. (2012). Plant growth promoting potential and soil enzyme production of the most abundant *Streptomyces* spp. from wheat rhizosphere. *Journal of Applied Microbiology*, 113, 1154-1164. doi:10.1111/j.1365-2672.2012.05417.x.
- Rao, M. A., Scelza, R., Scotti, R., & Gianfreda, L. (2010). Role of enzymes in the remediation of polluted environments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10, 333-353. doi:10.4067/S0718-95162010000100008.
- Caldwell, B. A. (2005). Enzyme activities as a component of soil biodiversity: a review. *Pedobiologia*, 49, 637-644. doi:10.1016/j.pedobi.2005.06.003.
- Harrison, M. D. (2016). Nutrient dynamics. In 'Encyclopedia of estuaries'. (Ed. MJ Kennish) pp. 462-463. (Springer: Dordrecht, Netherlands) doi:10.1007/978-94-017-8801-4-75.
- Macdonald, C. A., Delgado-Baquerizo, M., Reay, D. S., Hicks, L. C., & Singh, B. K. (2018). Soil nutrients and soil carbon storage: modulators and mechanisms. In 'Soil carbon storage'. (Ed. BK Singh) pp. 167-205. (Academic Press) doi:10.1016/B978-0-12-812766-7.00006-8.
- Pérez-Piqueres, A., Edel-Hermann, V., Alabouvette, C., & Steinberg, C. (2006). Response of soil microbial communities to compost amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 460-470. doi:10.1016/j.soilbio.2005.05.025.
- Cleveland, C. C., Nemergut, D. R., Schmidt, S. K., & Townsend, A. R. (2007). Increases in soil respiration following labile carbon additions linked to rapid shifts in soil microbial community composition. *Biogeochemistry*, 82, 229-240. doi:10.1007/s10533-006-9065-z.
- Masto, R. E., Kumar, S., Rout, T. K., Sarkar, P., George, J., & Ram, L. C. (2013). Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. *Catena*, 111, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.025>.
- De Tender, C. A., Debode, J., Vandecasteele, B., D'Hose, T., Cremelie, P., Haegeman, A., Ruttink, T., Dawyndt, P., & Maes, M. (2016). Biological, physicochemical and plant

- health responses in lettuce and strawberry in soil or peat amended with biochar. *Applied Soil Ecology*, 107, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.001>.
14. Sherene, T. (2017). Role of soil enzymes in nutrient transformation: A review. *Bio Bulletin*, 3, 109-131. (Published by Research Trend, Website: www.biobulletin.com)
 15. Garbuz, S., Mackay, A., Camps-Arbestain, M., DeVantier, B., & Minor, M. (2021). Biochar amendment improves soil physico-chemical properties and alters root biomass and the soil food web in grazed pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 319, 107517. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107517>.
 16. Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., Klimkowicz-Pawlas, A., Chmiel, M. J., Dziedzic, K., & Taras, H. (2019). Assessment of soil quality after biochar application based on enzymatic activity and microbial composition. *International Agrophysics*, 33, 331-336. doi: <https://doi.org/10.31545/intagr/110807>.
 17. Wang, X., Song, D., Liang, G., Zhang, Q., Ai, C., & Zhou, W. (2015). Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and microbial community composition in a fluvo-aquic soil. *Applied Soil Ecology*, 96, 265-272. doi: [10.1016/j.apsoil.2015.08.018](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.018).
 18. Zhang, L., Xiang, Y., Jing, Y., & Zhang, R. (2019). Biochar amendment effects on the activities of soil carbon, nitrogen, and phosphorus hydrolytic enzymes: a meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(22), 22990-23001. doi: [10.1007/s11356-019-05604-1](https://doi.org/10.1007/s11356-019-05604-1). Epub 2019 Jun 10.
 19. Song, D., Xi, X., Huang, S., Liang, G., Sun, J., Zhou, W., & Wang, X. (2016). Short-term responses of soil respiration and C-cycle enzyme activities to additions of biochar and urea in a calcareous soil. *PLOS ONE*, 11 (9), e0161694. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0161694>.
 20. Awad, Y. M., Blagodatskaya, E., Ok, Y. S., & Kuzyakov, Y. (2013). Effects of polyacrylamide, biopolymer and biochar on the decomposition of ¹⁴C-labelled maize residues and on their stabilization in soil aggregates. *European Journal of Soil Science*, 64 (4), 488-499. <https://doi.org/10.1111/ejss.12034>.
 21. Elzobair, K. A., Stromberger, M. E., Ippolito, J. A., & Lentz, R. D. (2016). Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. *Chemosphere*, 142, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.044>.
 22. Paz-Ferreiro, J., Gasco, G., Gutiérrez, B., & Méndez, A. (2012). Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(5), 511-517. doi: [10.1007/s00374-011-0644-3](https://doi.org/10.1007/s00374-011-0644-3).
 23. Picariello, E., Baldantoni, D., Muniategui-Lorenzo, S., Concha-Graña, E., & De Nicola, F. (2021). A synthetic quality index to evaluate the functional stability of soil microbial communities after perturbations. *Ecological Indicators*, 128, 107844. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107844>.
 24. Rowell, D. L. (1994). Soil science: Methods & Applications. Addison Wesley Longman Singapore Publishers (Pte) Ltd., England, UK. 350 p. <https://doi.org/10.4324/9781315844855>.
 25. Jones, B. J. R. (2001). Laboratory guide for conducting soil test and plant analysis. New York: Crc. P. 384. <https://doi.org/10.1201/9781420025293>.
 26. Tan, K. H. (2005). Soil Sampling, Preparation, and Analysis. CRC Press. 672p. <https://doi.org/10.1201/9781482274769>.
 27. Waling, I., Vark, W. V., Houba, V. J. G., & Van der Lee, J. J. (1986). Soil and plant analysis, a series of syllabi. Part 7. Plant analysis procedures. Wageningen Agriculture University, Netherland.

28. Nelson, R. E. (1982). Carbonate and gypsum. In: Page, A. L., Miller, R. H., and Keeney, D. R. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (2nd Ed). Agronomy monograph, No.9. *American society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA*. Pp, 181-196.
29. Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In: Miller, A.L., Methods of soil analysis, part 2. Chemical and mineralogical properties (2nd Ed). Agronomy series NO.9. *Soil Science Society of American Journal, USA*. pp. 403-430.
30. Pierzynski, G. M. (2000). Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters. Southern Cooperative Series Bulletin No. 396. 98p. http://www.soil.ncsu.edu/sera17/publications/sera17-2/pm_cover.htm.
31. Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (2017). Biochar: a guide to analytical methods. CSIRO Publishing. 320p.
32. Khadem, A., & Raiesi, F. (2017). Responses of microbial performance and community to maize biochar in calcareous sandy and clayey soils. *Applied Soil Ecology*, 114, 16-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.02.018>.
33. Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., & Margesin, R. (2012). Methods in soil biology: Springer Science & business media. 418 p. DOI: 10.1007/978-3-642-60966-4.
34. Orwin, K. H., & Wardle, D. A. (2004). New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 1907-1912. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.036>.
35. Cooper, J., Greenberg, I., Ludwig, B., Hippich, L., Fischer, D., Glaser, B., & Kaiser, M. (2020). Effect of biochar and compost on soil properties and organic matter in aggregate size fractions under field conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106882. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106882>.
36. Gao, S., DeLuca, T. H., & Cleveland, C. C. (2019). Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: a meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 654, 463-472. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.124.
37. Song, W., & Guo, M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018>.
38. Kazemi, A. R., Varasteh Khanlari, Z., & Zarabi, M. (2023). Investigating the release of nitrogen, phosphorus and potassium from biochar of grape waste, straw and wheat stubble and walnut shell. *Iranian Journal of Soil and Water research*, 54(9), 1286-1299. [In Persian] doi:<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.362309.669535>.
39. Antonious, G. F. (2018). Biochar and Animal Manure Impact on Soil, Crop Yield and Quality. In *Agricultural Waste and Residues*, IntechOpen. 45-67. doi: 10.5772/intechopen.77008.
40. Wang, M., Markert, B., Shen, W., Chen, W., Peng, C., & Ouyang, Z. (2011). Microbial biomass carbon and enzyme activities of urban soils in Beijing. *Environmental Science and Pollution Research*, 18 (6), 958-967. doi: 10.1007/s11356-011-0445-0.
41. Huang, D., Liu, L., Zeng, G., Xu, P., Huang, C., Deng, L., Wang, R., & Wan, J. (2017). The effects of rice straw biochar on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy metal contaminated sediment. *Chemosphere*, 174, 545-553. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.130>.
42. Nourmandipour, F., Delavar, M. A., Lal, R., Joseph, S., & Siewert, C. (2020). Influence of Rice Husk Biomass and Its Biochar on Some Enzymatic Activities in a Calcareous Sandy. *Journal of soil and water research*, 51 (7), 1841-1855. [In Persian] doi: 10.22059/ijswr.2020.295313.668458)

43. Foster, E. J., Hansen, N., Wallenstein, M., & Cotrufo, M. F. (2016). Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 233, 404-414. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.029>.
44. Bera, T., Collins, H. P., Alva, A. K., Purakayastha, T. J., & Patra, A. K. (2016). Biochar and manure effluent effects on soil biochemical properties under maize production. *Applied Soil Ecology*, 107, 360-367. [http:// dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.011](http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.011).
45. Lima, J. R. S., Silva, W. M., Medeiros, E. V., Duda, G. P., Corrêa, M. M., Martins Filho, A. P., Clermont-Dauphin, C., Antonino, A. C. D., & Hammecker, C. (2018). Effect of biochar on physicochemical properties of a sandy soil and maize growth in a greenhouse experiment. *Geoderma*, 319, 14-23. [doi:10.1016/j.geoderma.2017.12.033](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.033).
46. Ge, X., Cao, Y., Zhou, B., Wang, X., Yang, Z., & Li, M. H. (2019). Biochar addition increases subsurface soil microbial biomass but has limited effects on soil CO₂ emissions in subtropical moso bamboo plantations. *Applied Soil Ecology*, 142, 155-165. [https:// doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.021](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.021).
47. Demisie, W., Liu, Z., & Zhang, M. (2014). Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil. *Catena*, 121, 214-221. [doi:10.1016/j.catena.2014.05.020](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.020).
48. Paz-Ferreiro, J., Fu, S., Méndez, A., & Gasc, G. (2014). Interactive effects of biochar and the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on plant productivity and soil enzyme activities. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 483-494. [doi:10.1007/s11368-013-0806-z](https://doi.org/10.1007/s11368-013-0806-z).
49. Luo, L., & Guo, J. D. (2016). Alteration of extracellular enzyme activity and microbial abundance by biochar addition: Implication for carbon sequestration in subtropical mangrove sediment. *Journal of environmental management*, 182, 29-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.040>.
50. Nie, C., Yang, X., Niazi, N. K., Xu, X., Wen, Y., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Xu, S., & Wang, H. (2018). Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: a field study. *Chemosphere*, 200, 274-282. [https:// doi.org/10.1016/j.chemosphere, 134](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.134).
51. Wojewodzki, P., Lemanowicz, J., Debska, B., & Haddad, S. A. (2022). Soil enzyme activity response under the amendment of different types of biochar. *Agronomy*, 12(3), 569. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030569>.
52. Behravan, H. R., Khorassani, R., Fotovat, A., Moezei, A. A., & Taghavi, M. (2020). The Effect of Humic Acid and Phosphorus Fertilizer on Phosphatase Enzymes, Active Carbon and Available Phosphorus in Sugarcane Rhizosphere. *Iranian Journal of soil and water research*, 5 (10), 2571-2581. [In Persian] [doi: 10.22059/IJSWR.2019.279387.668168](https://doi.org/10.22059/IJSWR.2019.279387.668168).
53. Zhai, L., Caiji, Z., Liu, J., Wang, H., Ren, T., Gai, X., Xi, B., & Liu, H. (2015). Short-term effects of maize residue biochar on phosphorus availability in two soils with different phosphorus sorption capacities. *Biology and Fertility of Soils*, 51, 113-122. [doi: 10.1007/s00374-014-0954-3](https://doi.org/10.1007/s00374-014-0954-3).
54. Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., Puglisi, E., Ceccanti, B., Masciandaro, G., & Marinari, S. A. R. A. (2012). Soil enzymology: classical and molecular approaches. *Biology and fertility of soils*, 48 (7), 743-762. [doi:10.1007/s00374-012-0723-0](https://doi.org/10.1007/s00374-012-0723-0).
55. Piotrowska-Długosz, A., & Wilczewski, E. (2014). Soil Phosphatase Activity and Phosphorus Content as Influenced by Catch Crops Cultivated as Green Manure. *Polish Journal Environmental Studies*, 23 (1), 157-165.
56. Liao, X., Kang, H., Haidar, G., Wang, W., & Malghani, S. (2022). The impact of biochar on the activities of soil nutrients acquisition enzymes is potentially controlled by the pyrolysis

- temperature: A meta-analysis. *Geoderma*, 411, 115692. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115692>.
57. Munir, M. A., Yousaf, B., Ali, M. U., Dan, C., Abbas, Q., Arif, M., & Yang, X. (2021). In situ synthesis of microplastics embedded sewage sludge co-pyrolyzed biochar: implications for the remediation of Cr and Pb availability and enzymatic activities from the contaminated soil. *Journal of Cleaner Production*, 302, 127005. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127005>.
58. Zhang, M., Cheng, G., Feng, H., Sun, B., Zhao, Y., Chen, H., & Zhang, A. (2017). Effects of straw and biochar amendments on aggregate stability, soil organic carbon, and enzyme activities in the Loess Plateau, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 10108-10120. doi:10.1007/s11356-017-8505-8.
59. Bailey, V. L., Fansler, S. J., Smith, J. L., & Bolton, H. (2011). Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 296-301. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.10.014>.
60. Hinojosa, M. B., Carreira, J. A., García-Ruiz, R., & Dick, R. P. (2004). Soil moisture pre-treatment effects on enzyme activities as indicators of heavy metal-contaminated and reclaimed soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(10), 1559-1568. doi:10.1016/j.soilbio.2004.07.003.
61. Jing, Y., Zhang, Y., Han, I., Wang, P., Mei, Q., & Huang, Y. (2020). Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil. *Scientific Reports*, 10, 8837. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65796-2>.
62. Ghosh, D., & Kumar Maiti, S. (2021). Effect of invasive weed biochar amendment on soil enzymatic activity and respiration of coal mine spoil: a laboratory experiment study. *Biochar*, 3, 519-533. doi:10.1007/s42773-021-00109-y.

