

The effect of different biochars on the concentration of organic carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activity of a sandy loam soil

Abstract

To investigate the effect of biochars on the concentration of organic carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activity, an experiment was conducted. Biochars were used at 10%. The experimental treatments CS, PMB, GSB and NSB. The samples were incubated for two months and sampling was done on days of 5, 10, 30 and 60. The results showed that the application of PMB and GSB caused a significant increase in organic carbon, available phosphorus and ammonium in the soil compared to CS. The highest nitrate was observed in GSB. The concentration of available phosphorus and nitrate increased with increasing incubation time, and organic carbon and ammonium decreased with increasing incubation time. The results showed that the use of PMB and GSB caused a significant increase in organic carbon, available phosphorus and ammonium in the biochar-amended soils. The highest nitrate concentration was observed in GSB. Available phosphorus and nitrate increased with increasing incubation time, and organic carbon and ammonium decreased with increasing incubation time. The concentration of invertase in PMB and GSB was significantly different from CS. The peak of invertase activity was observed in PMB at 5 days of incubation. Adding GSB to the soil increased the activity of urease by 1.7 times compared to CS. GMEa and TEI were higher in GSB compared to other treatments. Rch was as follows: GSB > PMB > NSB. In cluster analysis, GSB and PMB were placed in one cluster. The results showed that GSB and PMB had the greatest effect on the measured factors.

Key words: acid and alkaline phosphatase, enzyme change percentage (Rch), average enzyme activity (GMEa)

اثر بیوجارهای مختلف بر غلظت کربن آلی، نیتروژن، فسفر و فعالیت آنزیمی یک خاک لوم شنی

چکیده

به منظور بررسی اثر بیوجارهای مختلف بر غلظت کربن آلی، نیتروژن، فسفر و فعالیت آنزیمی، آزمایشی به صورت طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. از بیوجارها در ۱۰ درصد وزنی استفاده گردید. تیمارهای آزمایش شامل خاک شاهد (CS)، خاک + بیوجار کود مرعی (PMB)، خاک + بیوجار ضایعات انگور (GSB) و خاک + بیوجار پوسته قهوه‌ایی گردو (NSB) بود. نمونه‌ها به مدت دو ماه انکوباسیون و در زمان‌های ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روز نمونه‌برداری انجام و برخی ویژگی‌های شیمیایی و فعالیت‌های آنزیمی در خاک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کاربرد تیمار PMB و GSB موجب افزایش معنی‌دار غلظت کربن آلی، فسفر قابل جذب و آمونیوم در خاک در مقایسه با تیمار شاهد شد. بیشترین غلظت نترات در تیمار GSB مشاهده گردید. غلظت فسفر قابل جذب و نترات با افزایش زمان انکوباسیون افزایش و غلظت کربن آلی و آمونیوم با افزایش زمان انکوباسیون کاهش یافت. غلظت آنزیم اینورتاز در تیمار PMB و GSB با شاهد اختلاف معنی‌دار داشت. بیشترین فعالیت اینورتاز در تیمار PMB (76.8 $\mu\text{g. GE. g}^{-1}. 24\text{h}^{-1}$) پس از ۵ روز انکوباسیون مشاهده شد. افزودن تیمار GSB به خاک موجب افزایش ۱/۷ برابری فعالیت آنزیم اوره‌آز در مقایسه با تیمار شاهد شد. میانگین فعالیت آنزیم (GMEa) و شاخص کل فعالیت آنزیم (TEI) در تیمار GSB در مقایسه با سایر تیمارها بیشتر بود. درصد تغییرات آنزیم (Rch) با در نظر گرفتن تاثیر بیوجار، به صورت GSB > PMB > NSB بود. در تجزیه و تحلیل خوشه‌ای تیمار GSB و PMB در یک خوشه قرار گرفتند. در نتیجه تیمار GSB و PMB بیشترین تاثیر را بر فاکتورهای اندازه‌گیری شده داشتند.

کلمات کلیدی: فسفاتاز اسیدی و قلیایی، درصد تغییرات آنزیم (Rch)، میانگین فعالیت آنزیم (GMEa)

مقدمه

بیوجار، ماده‌ای غنی از کربن است که از فرآیند پیرولیز زیست‌توده، تحت شرایط اتمسفری، با اکسیژن کم یا فاقد اکسیژن به دست می‌آید. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد بیوجار از جمله تخلخل و مقاومت و پایداری آن، در سال‌های اخیر استفاده از بیوجار به عنوان اصلاح‌کننده خاک و به منظور تأمین عناصر غذایی خاک، به میزان چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است (Goloran et al., 2014). به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک، بیوجارها جهت افزایش ذخیره کربن (C) خاک، افزایش عملکرد محصول، بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و تسریع چرخه عناصر غذایی خاک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند (Xiao et al., 2018). بیوجارها متشکل از ترکیبات آلی و غیرآلی بوده که موجب تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با چرخه عناصر غذایی می‌شوند (McHenry, 2009). آنزیم‌های خاک نقش عمده‌ای در عملکرد بیوشیمیایی خاک دارند، بنابراین فعالیت آن‌ها بر تجزیه کربن خاک و چرخه عناصر غذایی (از جمله نیتروژن و فسفر) تأثیرگذار است (Zhu et al., 2017). بنابراین آنزیم‌های خاک را می‌توان به عنوان شاخص‌های ارزیابی تاثیر شیوه‌های مدیریت خاک و گیاه و استفاده از زمین بر اکوسیستم خاک مورد استفاده قرار داد (Holik et al., 2019). تاثیر بیوجار بر فعالیت آنزیمی متغیر بوده و به شدت به خواص بیوجار و خصوصیات خاک وابسته است (Garbuz et al., 2021). گزارش دادند که افزودن بیوجار حاصل از درخت بید (یک درصد وزنی) به یک خاک Andic Andisol و یک خاک Dystric Cambisol تحت چرا بعد از ۱۲ ماه باعث افزایش جوامع باکتریایی - قارچی و همچنین زیست توده ریشه گیاهان شد. در این مطالعه وزن مخصوص ظاهری و اسیدیته خاک کاهش و ذخایر نیتروژن، کربن آلی و فسفر قابل جذب افزایش یافت (Garbuz et al., 2020, 2021). در مطالعات دیگر، پژوهشگران فعالیت‌های آنزیمی خاک را با افزودن بیوجار کاه گندم تهیه شده در دماهای ۳۰۰، ۴۵۰ و ۷۰۰ درجه سلسیوس در شرایط گلخانه بررسی نموده و بیان کردند که بیوجار تهیه شده در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های درگیر در چرخه کربن و نیتروژن شده است (Jing et al., 2020). نیتروژن کل خاک، کربن زیست توده میکروبی و نیتروژن زیست توده میکروبی عوامل اصلی محرک تاثیرگذار بر فعالیت آنزیمی خاک هستند (Wang et al., 2015). همبستگی معنی داری بین فعالیت آنزیمی خاک با نیتروژن کل، کربن زیست توده میکروبی و نیتروژن زیست توده میکروبی گزارش شده است (Zheng et al., 2019). Zheng et al., (2019) دریافتند که مواد اولیه بیوجار، C/N و نیتروژن کل از عوامل اصلی تاثیرگذار بر فعالیت آنزیمی

هستند. افزودن بیوپچار به خاک ممکن است منجر به تغییر ساختار جامعه میکروبی (Dangi et al., 2020) شده و موجب تغییراتی در فعالیت آنزیم‌های درگیر در چرخه عناصر غذایی گردد (Foster et al., 2016). مطالعات نشان می‌دهد که افزودن بیوپچار فعالیت آنزیم‌های خاک را به دلیل تکثیر میکروبی افزایش می‌دهد و علاوه بر این باعث بی‌حرکتی و محافظت در تخریب و تغییر رنگ آنزیم‌ها می‌شود (Chen et al., 2020). گزارشات نشان داد که کاربرد بیوپچار مقدار آنزیم‌های مربوط به چرخه نیتروژن و فسفر را افزایش و آنزیم‌های مربوط به چرخه کربن را کاهش می‌دهد (Wu et al., 2020). اگرچه گزارش‌های دیگری عکس این نتایج را بیان نمودند (Song et al., 2016). هنوز به بررسی تاثیر بیوپچار بر فعالیت آنزیمی به‌خوبی پرداخته نشده است. مطالعات قبلی نشان داد که افزودن بیوپچار فعالیت بیولوژیکی خاک را تغییر می‌دهد (Lehmann et al., 2011). Haddad and Lemanowiz, (2021) نشان دادند که افزودن بیوپچار به خاک منجر به کاهش مهار آنزیم اوره‌آز توسط فلزات سنگین (کادمیم، سرب و نیکل) می‌شود. نتایج ارائه شده توسط Bailey et al., (2010) در ارتباط بین بیوپچار و فعالیت آنزیمی روند مشابهی را نشان نداد. علی‌رغم افزایش مطالعات در زمینه کاربرد بیوپچار، فرایند و مکانیسم تاثیر بلند مدت بیوپچار بر محیط زیست هنوز به اندازه کافی بررسی نشده است. خواص بیوپچار بسته به مواد اولیه آن متفاوت است و می‌توان انتظار داشت که تاثیر اصلاح بیوپچارهای مختلف روی خصوصیات خاک و فعالیت آنزیمی می‌تواند به‌طور گسترده‌ای متفاوت باشد. بنابراین، این مطالعه بسیار ضروری است زیرا با اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی خاک می‌توان درک صحیحی از ویژگی‌های شیمیایی، سطح حاصلخیزی، خصوصیات میکروبیولوژی و وضعیت آلودگی خاک داشت (Yang et al., 2017). لذا این پژوهش با هدف بررسی تاثیر بیوپچارهای تولید شده از مواد آلی مختلف بر میزان کربن، فسفر، نیتروژن و فعالیت آنزیمی یک خاک لوم شنی انجام شد.

مواد و روش‌ها

تهیه خاک مورد آزمایش

جهت این پژوهش نمونه خاک لوم شنی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری از شهرستان ملایر، استان همدان در سال ۱۴۰۲ تهیه گردید. نمونه خاک به آزمایشگاه دانشکده کشاورزی، دانشگاه ملایر منتقل شد. بعد از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و برای اندازه‌گیری برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مطالعات بعدی نگهداری گردید.

اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در نمونه خاک، بافت به روش هیدرومتری (Gee and Boudier, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی و پ.ا.ج خاک در عصاره ۱:۵ خاک به آب مقطر (Rowell, 1994)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال، فسفر فراهم به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، آمونیوم (Tan, 2005)، نترات (Jones, 2001)، کربن آلی به روش اکسیداسیون با دی‌کرومات پتاسیم به روش والکی-بلک (Nelson, 1982) و فسفر کل در نسبت ۱:۳ اسیدپرکلریدریک: اسیدنیتریک (Pierzynski, 2000) سنجیده شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
رس ($g\ kg^{-1}$)	۷۲	نیتروژن - آمونیومی ($mg\ kg^{-1}$)	۳۱/۱
سیلت ($g\ kg^{-1}$)	۲۷۶	نیتروژن - نیتراتی ($mg\ kg^{-1}$)	۷۰/۷
شن ($g\ kg^{-1}$)	۶۵۲	فسفر قابل دسترس ($mg\ kg^{-1}$)	۱۰۲/۲
بافت خاک	لوم شنی	مواد آلی (%)	۰/۹۷
pH	۸/۰	نیتروژن کل (%)	۰/۰۸
هدایت الکتریکی ($dS\ m^{-1}$)	۰/۴۱	فسفر کل (%)	۰/۱۱

اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های شیمیایی بیوچار

غلظت فسفر کل به روش Pierzynski, (2000) و نیتروژن کل به روش کج‌لدال سنجیده شد. غلظت این دو عنصر در ترکیبات آلی مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. برخی ویژگی‌های شیمیایی ترکیبات آلی مورد استفاده

نوع بیوچار	نیتروژن کل	فسفر کل
		(g kg ⁻¹)
بیوچار ضایعات انگور (GSB)	۹/۸	۶۳/۷
بیوچار پوسته قهوه‌ای گردو (NSB)	۷/۷	۴/۷
بیوچار کود مرغی (PMB)	۱۱/۰	۲۶/۰

تهیه و آماده‌سازی تیمارها

تیمارهای مورد استفاده سه نوع بیوچار بود:

- ۱- بیوچار ضایعات انگور: این ضایعات از تاکستان‌های شهرستان ملایر، استان همدان تهیه گردید.
- ۲- بیوچار چوب گردو: چوب قهوه‌ای گردو از شهرستان تویسرکان، استان همدان تهیه شد.
- ۳- بیوچار کود مرغی: کود مرغی از شهرستان بیجار استان کردستان تهیه شد.

برای تهیه بیوچار مورد استفاده، مواد اولیه توسط تجزیه حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در محیطی با اکسیژن کم به مدت ۲ ساعت تبدیل به بیوچار شدند. بیوچارها کوبیده و از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شدند و به عنوان تیمار آزمایش نگه‌داری گردیدند. تیمارهای آزمایش شامل موارد زیر بود:

- ۱- خاک شاهد (CS)، ۲- خاک با بیوچار ضایعات انگور (GSB)، ۳- خاک با بیوچار پوسته قهوه‌ای گردو (NSB) و ۴- خاک با بیوچار کودمرغی (PMB)

مطالعات انکوباسیونی

برای انجام آزمایش نمونه خاک‌های ۲۰۰ گرمی با نسبت ۱۰ درصد از تیمار بیوچارهای مختلف در سه تکرار آماده گردید. از نمونه خاک شاهد نیز در سه تکرار استفاده شد. برای اجرای آزمایش از طرح کاملاً تصادفی استفاده گردید. نمونه‌ها حدود دو ماه در دمای ۲۵±۳ درجه سلسیوس نگه‌داری گردیده در مدت زمان انکوباسیون با افزودن آب مقطر و مخلوط نمودن نمونه‌ها، رطوبت در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی نگه‌داری شد. نمونه‌برداری از زمان‌های ۵، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روز صورت گرفت. نمونه‌ها به دو قسمت تقسیم شدند یک قسمت هواخشک شده و برای قرائت آمونیم، نترات، فسفر قابل جذب و کربن آلی نگه‌داری شدند. قسمت دیگر به صورت مرطوب در یک ظرف دربسته در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد یخچال نگه‌داری و فعالیت آنزیم اینورتاز، آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی و آنزیم اوره‌آز در آن‌ها سنجیده شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیمی

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم اینورتاز

در این روش با استفاده از ساکارز به عنوان بستره، نمونه‌های خاک به مدت سه ساعت در pH=5.5 و در دمای ۵۰ درجه سلسیوس نگه‌داری شدند. قندهای احیاکننده آزاد شده در طی انکوباسیون، موجب احیای پتاسیم هگزا سیانو فرات III شد. پتاسیم هگزا سیانو

فرات احیا شده با سولفات آمونیوم فریک در یک محلول اسیدی واکنش داده و کمپلکس فریک هگزاسیانو فرات (آبی) به وجود می‌آید که به روش رنگ سنجی اندازه‌گیری می‌گردد. این روش توسط Schinner et al., (2012) ارائه شده است.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی و فسفاتاز قلیایی

برای اندازه‌گیری فعالیت این آنزیم به یک گرم خاک، یک میلی‌لیتر محلول نیترو فنیل فسفات به عنوان بستره اضافه گردید. سپس چهار میلی‌لیتر محلول بافر (محلول بافر pH = 11 برای فسفاتازهای قلیایی و محلول بافر pH = 6 برای فسفاتازهای اسیدی) به آن اضافه شد. برای نمونه شاهد به یک گرم خاک حدود ۴ میلی‌لیتر محلول بافر اضافه گردید. پس هر دو نمونه تهیه شده به مدت یک ساعت در دمای ۳۷ درجه سلسیوس خوابانیده شدند. سپس به نمونه‌ها حدود ۱ میلی‌لیتر محلول کلرید کلسیم و ۴ میلی‌لیتر محلول هیدروکسید سدیم اضافه و سپس شدت رنگ تولید شده با اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۰۰ نانومتر قرائت گردید (Schinner et al., 2012).

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم اوره‌آز

فعالیت آنزیم اوره‌آز به روش Schinner et al., (2012) تعیین شد. بدین منظور به ۵ گرم خاک، ۹ میلی‌لیتر بافر تریس، یک میلی‌لیتر محلول اوره اضافه گردید. ترکیب به مدت ۲ ساعت در دمای ۳۷ درجه سلسیوس خوابانیده شد. سپس به آن‌ها ۳۵ میلی‌لیتر محلول کلرید پتاسیم اضافه گردید و به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. آن‌گاه ترکیب با کمک آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. ترکیب صاف و حدود ۲۰ میلی‌لیتر از عصاره به بالن تقطیر اضافه و به آن حدود ۰/۲ گرم اکسید منگنز اضافه گردید. مقدار نیتروژن آمونیومی حاصله بر روی اسید بوریک - شناساگر تقطیر و با کمک تیترا با اسید سولفوریک تعیین 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) (Paz-Ferreiro et al., 2012)

رابطه ۱)

$$GME_a = \sqrt[4]{Invertase * ACP * ALP * urease}$$

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

ب) شاخص کل فعالیت آنزیم (TEI) طبق رابطه ۲ بر اساس فرمول ارائه شده توسط Tan et al., (2014) تعیین شد.

رابطه ۲)

$$TEI = \sum \frac{X_i}{\bar{X}_i}$$

X_i : فعالیت آنزیم i در خاک

\bar{X}_i : میانگین فعالیت آنزیم i در همه نمونه‌ها

ج) درصد تغییرات آنزیم (Relative change- Rch) در ارتباط با خاک شاهد که طبق رابطه ۳ با توجه به فرمول ارائه شده توسط Chaer et al., (2009) محاسبه گردید.

$$Rch = \left(\frac{T}{C} - 1 \right) * 100$$

T: میانگین فعالیت آنزیم در خاک بعد از افزودن بیوجار
C: میانگین فعالیت آنزیم در نمونه شاهد

تجزیه و تحلیل داده‌ها

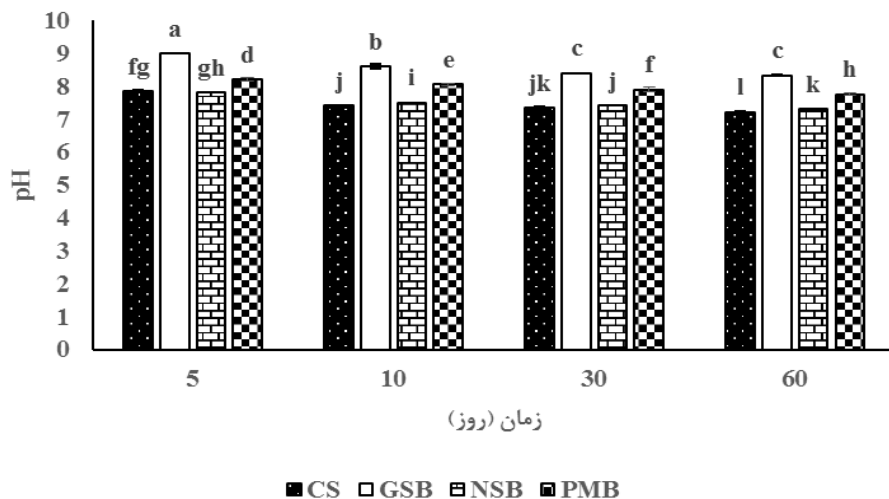
تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS 23.0 انجام شد. جهت مقایسه میانگین از آزمون دانکن با سطح احتمال ۹۹٪ در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تیمار در سه تکرار استفاده شد. سپس نمودارهای مربوطه با استفاده از نرم افزار Microsoft Office Excel 13.0 ترسیم شد. نتایج حاصل از برخی ویژگی‌های شیمیایی و فعالیت آنزیمی با استفاده از تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی^۱ (PCA) و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای^۲ (CA) مورد بررسی قرار گرفتند. آنالیزهای PCA و CA روش‌های چند متغیره آماری هستند که در تحقیقات محیطی به کار می‌روند و امکان تعیین گروه‌هایی با ویژگی‌های مشابه را می‌دهند. البته این روش‌ها معادل هم نیستند فقط مکمل یکدیگر می‌باشند. از روش PCA برای تجزیه به مولفه‌های اصلی به این دلیل استفاده شد که این روش به تخمین اولیه مقدار تغییرات هر یک از متغیرهای خاک که باید توسط مولفه‌ها توضیح داده شود، نیازی ندارد (ایوبی و همکاران، ۱۳۹۰). حداکثر تعداد مولفه‌های استخراج شده در هر مدل برابر با تعداد متغیرهایی است، که بررسی می‌شوند. در تجزیه به مولفه‌های اصلی، بیشترین ارزش ویژه^۳ متعلق به مولفه نخست (PC₁) می‌باشد و به تدریج با افزایش رده مولفه‌ها این مقدار کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است در این روش هر مولفه مستقل از مولفه‌های دیگر است (Yao et al., 2013). اما می‌توان جهت انتخاب تعداد مولفه‌های موثر، مولفه‌هایی را انتخاب کرد که مقدار ارزش ویژه آن‌ها از یک بیشتر باشد (Brejda et al., 2000). در نهایت نمرات حاصل از PCA به وسیله ANOVA مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

تأثیر کاربرد بیوجارهای مختلف بر pH و EC خاک

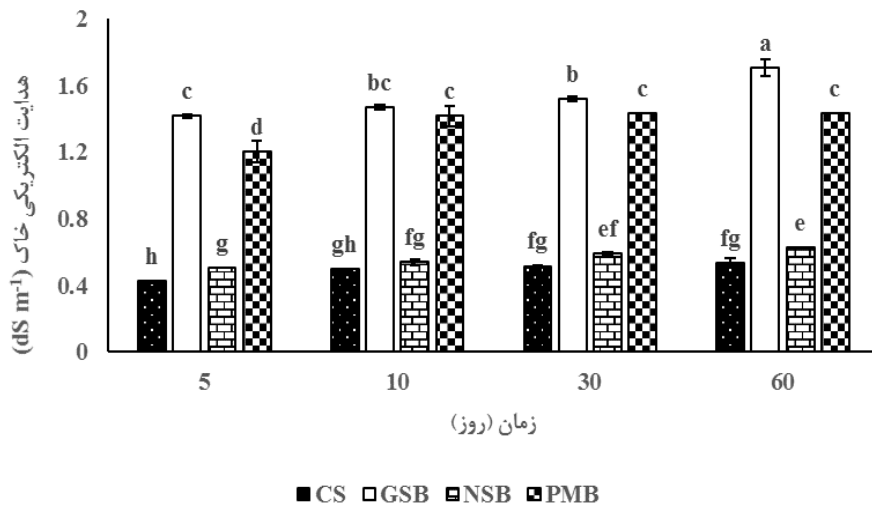
همان‌طور که از شکل ۱ مشخص است افزودن بیوجار موجب افزایش pH خاک شد. که این افزایش در مورد تیمار GSB و PMB در مقایسه با شاهد معنی‌دار بود. تیمار GSB نسبت به شاهد به‌طور میانگین در طی انکوباسیون حدود ۱۵ درصد و تیمار PMB حدود ۷ درصد pH را افزایش دادند (شکل ۱). دلیل افزایش pH بعد از افزودن بسیاری از بیوجارها افزایش نسبی فلزات قلیایی است (Kookana et al., 2011). نتایج مطالعات Cui et al., (2013) نشان داد که استفاده از سطوح ۱۰، ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار بیوجار باعث افزایش ۲ تا ۵ درصدی pH خاک گردید. مطیلجی و همکاران (۱۳۹۸) طی مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوجار به خاک موجب افزایش معنی‌دار pH خاک شد. pH در طول انکوباسیون در تمام تیمارها کاهش یافت (شکل ۱). کاظمی و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی رهاسازی عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم از بیوجارهای مختلف به نتایجی مشابه نتایج ما رسیدند.

1 - Principal Component Analysis
2 - Cluster Analysis
3 - Eigenvalue



شکل ۱. pH خاک تحت تیمارهای مختلف طی دوره انکوباسیون (CS, GSB, NSB, PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک با تیمار بیوجار ضایعات انگور، خاک با تیمار بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک با تیمار بیوجار کود مرغی است

افزودن بیوجار موجب افزایش هدایت الکتریکی خاک‌ها نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۲). تیمار GSB و PMB به ترتیب موجب افزایش ۳/۱ و ۲/۸ برابری هدایت الکتریکی خاک در طی انکوباسیون نسبت به خاک شاهد شدند (شکل ۲). افزایش هدایت الکتریکی در اثر کاربرد بیوجار احتمالاً به دلیل حضور نمک‌های محلول در بیوجار و بالاتر بودن هدایت الکتریکی بیوجار نسبت به خاک می‌باشد (Chantigny et al., 1999). Masto et al., (2013) طی مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوجار به خاک منجر به افزایش ۵۰ درصدی هدایت الکتریکی در خاک گردید.



شکل ۲. هدایت الکتریکی خاک تحت تیمارهای مختلف طی دوره انکوباسیون (CS, GSB, NSB, PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک با تیمار بیوجار ضایعات انگور، خاک با تیمار بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک با تیمار بیوجار کود مرغی است

اثر کاربرد بیوچارهای مختلف بر غلظت کربن آلی، فسفر قابل جذب، آمونیوم و نیترات خاک

تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر غلظت کربن آلی، فسفر قابل جذب، آمونیوم و نیترات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر کاربرد بیوچارهای مختلف در طی انکوباسیون بر غلظت کربن آلی، فسفر قابل جذب، آمونیوم و نیترات در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس تأثیر کاربرد بیوچارهای مختلف بر غلظت کربن آلی، فسفر قابل جذب، آمونیوم و نیترات

منابع تغییرات	درجه آزادی	کربن آلی	فسفر قابل جذب	آمونیوم	نیترات
میانگین مربعات					
زمان	۳	۰/۱۱ **	۳۰۶۹۴/۶۵ **	۴۳۴/۷۱ **	۹۲۵۷۷/۶۳ **
بیوچار	۳	۰/۳۰ **	۷۲۹۴۵/۱۶ **	۷۸۳/۲۸ **	۱۱۶۱۷/۵۹ **
زمان*بیوچار	۱۵	۰/۰۸ **	۲۱۲۲/۱۶ **	۲۴۸/۹۲ **	۷۳۳۳/۸۱ **
خطا	۳۲	۰/۰۰۴	۴۳/۵۷	۱۶/۳۳	۱۵/۸۶
ضریب تغییرات (%)		۵/۹۴	۳/۰۳	۱۴/۱۳	۲/۹۰

** و * NS به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪، تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

جدول ۴ اثر کاربرد بیوچارهای مختلف در طی انکوباسیون را بر غلظت کربن آلی، فسفر قابل جذب، آمونیوم و نیترات خاک را نشان می‌دهد. طبق نتایج این پژوهش کاربرد بیوچار موجب افزایش کربن آلی خاک در مقایسه با تیمار شاهد گردید. (جدول ۴)، که افزایش در تیمار PMB و GSB در مقایسه با تیمار شاهد در تمام دوره انکوباسیون معنی‌دار بود. تیمار PMB و GSB به ترتیب موجب افزایش ۱/۴ و ۱/۲ برابری کربن آلی خاک در طی انکوباسیون در مقایسه با تیمار شاهد شد (Qambrani et al., 2017) بیان نمودند که افزودن بیوچار به خاک موجب افزایش ذخیره کربن به دلیل پایداری کربن آن می‌شود. غلظت کربن آلی در تمام تیمارها و خاک شاهد در طی انکوباسیون کاهش یافت. این کاهش چیزی حدود ۲۰ درصد بود. (Sajal and Abul Kashem (2014) بیشترین میزان کربن آلی را در ابتدای انکوباسیون مشاهده نمودند. آن‌ها دلیل این امر را در دسترس قرار گرفتن و تجزیه اجزای با پایداری کمتر در اصلاح‌کننده‌های آلی دانستند که با گذشت زمان از مقدار آن‌ها کاسته می‌شود. فسفر قابل جذب با افزودن بیوچار به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴). افزودن تیمار PMB، GSB و NSB به طور میانگین به ترتیب ۱۱۰، ۲۸ و ۱۳ درصد فسفر قابل جذب را در مقایسه با شاهد در طی دوره انکوباسیون افزایش دادند. بیشترین غلظت فسفر در تمام تیمارها در ۶۰ روز بعد از انکوباسیون مشاهده گردید. (Yao et al., 2021) و (Kong et al., 2021) در مطالعات خود نشان دادند که افزودن بیوچار می‌تواند به طور قابل توجهی در دسترس بودن فسفر خاک را افزایش دهد. بیشترین مقدار آمونیوم در تیمار GSB و PMB مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری را از خود نشان دادند. ولی بین تیمار NSB با شاهد اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید (جدول ۴). بیشترین میزان نیترات در تیمار GSB مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری از خود نشان داد. نیترات در تمام تیمارها با افزایش زمان انکوباسیون افزایش یافت. میزان افزایش به طور متوسط ۱۲۹ درصد بود. بیشترین افزایش به طور متوسط ۱۶۳ درصد در تیمار GSB در مقایسه با ابتدای انکوباسیون دیده شد. افزایش نیترات با کاهش آمونیوم همبستگی معنی‌دار داشت که تأییدکننده پدیده نیتریفیکاسیون می‌باشد.

جدول ۴. غلظت کربن آلی، فسفر قابل جذب، آمونیوم و نیترات در مراحل مختلف انکوباسیون (CS, GSB, NSB و PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک با تیمار بیوجار ضایعات انگور، خاک با تیمار بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک با تیمار بیوجار کود مرغی (است)

زمان انکوباسیون	تیمار	کربن آلی	فسفر قابل جذب	آمونیم	نیترات
۵ روز	CS	۱/۰±۰۲/۰۳def	۱۰۲/۰±۵۰/۲۹ k	۳۰/۳۵±۰/۶۱cd	۷۱/۲±۴۲/۰۱k
	GSB	۱/۱۷±۰/۰۱bc	۱۴۰/۰±۰/۵۸ i	۴۴/۳۵±۰/۰۳a	۹۶/۴۷±۲/۳۸i
	NSB	۱/۰۷±۰/۰۶cde	۱۱۷/۴±۰/۰۴ j	۲۶/۹۰±۰/۱۱de	۶۰/۳۵±۱/۴۷l
	PMB	۱/۳۶±۰/۰۱a	۲۲۷/۳±۵۰/۱۷ e	۴۱/۶۵±۲/۸۶ab	۷۹/۰۲±۲/۰۹j
۱۰ روز	CS	۰/۹۷±۰/۰۱efg	۱۴۵/۲±۵۰/۶۰ i	۲۴/۶۵±۲/۷۴def	۱۳۰/۲۰±۲/۴۲fg
	GSB	۱/۱۲±۰/۰۳cd	۲۰۳/۷±۵۰/۵۳ f	۴۰/۰±۵۳/۸۴ab	۱۷۲/۹۷±۰/۸۵c
	NSB	۱/۰۲±۰/۰۳def	۱۶۶/۶±۵۰/۰۶ h	۲۲/۷۵±۱/۸۲efg	۱۱۹/۵۰±۲/۴۰h
	PMB	۱/۳۱±۰/۰۳a	۳۴۹/۱±۰/۷۳ c	۳۷/۳۵±۰/۰۳abc	۱۳۲/۸۲±۲/۸۸f
۳۰ روز	CS	۰/۹۲±۰/۰۳fg	۱۸۹/۳±۵۰/۱۷ g	۱۹/۵۰±۱/۱۵efg	۱۴۵/۳۵±۲/۶۰e
	GSB	۱/۰۷±۰/۰۶cde	۲۲۷/۵±۰/۷۷ e	۳۵/۶۰±۰/۸۱bc	۲۰۷/۴۵±۴/۶۲b
	NSB	۰/۹۷±۰/۰۶efg	۲۰۴/۴±۵۰/۹۱ f	۱۷/۰±۰/۳۵g	۱۲۴/۸۲±۲/۷۶gh
	PMB	۱/۲۷±۰/۰۶ab	۳۶۲/۲±۰/۸۹ b	۲۶/۱۰±۲/۷۱def	۱۵۰/۴۲±۲/۰۶e
۶۰ روز	CS	۰/۰±۷۳/۰۸h	۱۹۱/۱±۰/۱۵ g	۱۸/۷۰±۰/۴۶fg	۱۵۱/۱۵±۰/۱۷e
	GSB	۰/۰±۹۷/۰۱efg	۲۳۹/۳±۵۰/۱۷ d	۳۱/۶۵±۰/۳۲cd	۲۵۴/۰۷±۰/۵۳a
	NSB	۰/۰±۸۸/۰۱g	۲۲۸/۱±۰/۷۳ e	۱۵/۴۵±۱/۰۱g	۱۴۴/۱۵±۰/۳۳e
	PMB	۱/۱۷±۰/۰۱bc	۳۸۶/۳±۰/۴۶ a	۲۵/۴۵±۶/۴۹def	۱۵۹/۶۰±۰/۷۵d

*** و ns به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪، تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

تاثیر کاربرد بیوجارهای مختلف بر فعالیت آنزیم‌های مرتبط با چرخه کربن، فسفر و نیتروژن

طبق جدول ۵ نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کاربرد بیوجارهای مختلف تاثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم‌های اینورتاز، فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی و اوره‌آز در سطح احتمال یک درصد داشت.

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس تاثیر کاربرد بیوجارهای مختلف بر فعالیت آنزیم اینورتاز، فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی و اوره‌آز

منابع تغییرات	درجه آزادی	اینورتاز	فسفاتاز قلیایی	فسفاتاز اسیدی	اوره‌آز
زمان	۳	۶۰۶/۵۱ **	۳۶۵۰/۱/۹۳ **	۱۸۷۳۴/۵۷ **	۲۱۷۹/۴۹ **
بیوجار	۳	۱۲۹۴/۱۱ **	۹۸۰۵۸/۸۹ **	۳۲۵۵۳/۶۹ **	۲۲۳۴۸/۰۱ **
زمان*بیوجار	۱۵	۳۸۵/۶۱ **	۲۷۱۸۲/۱۱ **	۱۰۷۴۵/۵۶ **	۴۹۲۰/۴۲ **
خطا	۳۲	۵/۸۵	۷۸/۷۳	۱۲۷/۹۱	۳۱۸/۱۰
ضریب تغییرات (%)		۴/۴۷	۲/۳۱	۹/۴۱	۱۱/۷۳

*** و ns به ترتیب تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪، تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

تغییرات دینامیکی در آنزیم اینورتاز به واسطه استفاده از بیوجارهای مختلف در طول دوره انکوباسیون در جدول ۶ نشان داده شده است. فعالیت اینورتاز در طی انکوباسیون در تیمار بیوجار نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری را از خود نشان داد. فعالیت اینورتاز در تیمار PMB، GSB و NSB در مقایسه با تیمار CS به ترتیب ۵۲، ۲۴ و ۷ درصد بیشتر بود. فعالیت آنزیم اینورتاز در تیمار PMB در تمام

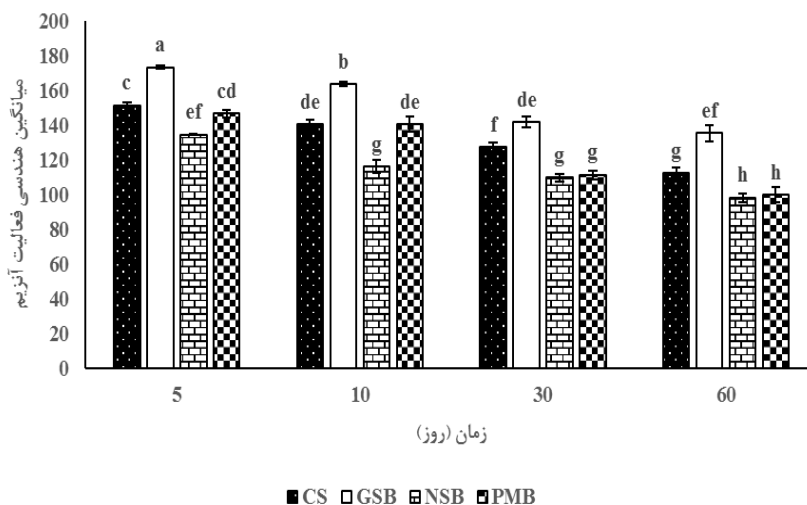
مراحل بیشتر از سایر تیمارها بود، که با تغییرات 'SOC' مطابقت داشت (جدول ۶). اوج فعالیت اینورتاز خاک در ۵ روز اول انکوباسیون در تیمار GSB رخ داد ($76.8 \mu\text{g.GE.g}^{-1}.24\text{h}^{-1}$). در تمام تیمارها فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی بیشتر از فسفاتاز اسیدی بود (جدول ۶). بیشترین فعالیت فسفاتاز قلیایی در خاک شاهد و کمترین فعالیت در تیمار PMB مشاهده گردید. فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمارها به این صورت بود: $\text{CS} > \text{NSB} > \text{GSB} > \text{PMB}$. بیشترین فعالیت فسفاتاز اسیدی در طی انکوباسیون در خاک شاهد مشاهده گردید که به طور متوسط ۱۳۰ درصد بیشتر از فعالیت تیمار PMB در طی انکوباسیون بود. از نظر فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی بین تیمار NSB و PMB اختلاف معنی داری مشاهده نگردید. فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی در طول دوره انکوباسیون کاهش یافت. از آنجایی که در طی دوره انکوباسیون غلظت فسفر قابل جذب افزایش یافته در نتیجه نیاز به ترشح آنزیم فسفاتازها کاهش پیدا کرده است. فعالیت اوره‌آز در تیمار GSB و PMB در مقایسه با CS و NSB در تمام دوره انکوباسیون به طور معنی داری بیشتر بود. کمترین فعالیت این آنزیم در تیمار NSB مشاهده شد ولی با شاهد اختلاف معنی داری نداشت. اوج فعالیت اوره‌آز در تیمار GSB در ۶۰ روز بعد از انکوباسیون مشاهده شد (جدول ۶). Zhang et al., (2017) در یک آزمایش مزرعه‌ای با کاربرد بیوجار حاصل از کاه گندم به یک خاک لوم رسی سیلتی گزارش دادند که افزودن بیوجار به طور معنی داری موجب افزایش کربن، کربن و فسفر زیست توده و فعالیت آنزیم اوره‌آز شده است.

جدول ۶. فعالیت آنزیم اینورتاز، فسفاتاز قلیایی، فسفاتاز اسیدی و اوره‌آز در مراحل مختلف انکوباسیون (CS، GSB، NSB، PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک با تیمار بیوجار ضایعات انگور، خاک با تیمار بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک با تیمار بیوجار کود مرغی است)

زمان انکوباسیون	تیمار	اینورتاز	فسفاتاز قلیایی	فسفاتاز اسیدی	اوره‌آز
۵ روز	CS	$51.0 \pm 6.0 / 69e$	$529.7 \pm 16.7 / 4a$	$237.2 \pm 91.9 / 4a$	$105.0 \pm 5.0 / 5e$
	GSB	$62.4 \pm 1.3 / 8bc$	$394.2 \pm 8.0 / 8e$	$204.3 \pm 57.4 / 8b$	$179.37 \pm 2.9 / 2bc$
	NSB	$56.4 \pm 0.6 / 69d$	$504.3 \pm 8.0 / 19b$	$114.1 \pm 98.9 / 5e$	$100.62 \pm 8.6 / 3e$
	PMB	$76.8 \pm 1.3 / 8a$	$344.3 \pm 92.0 / 2f$	$108.2 \pm 0.6 / 27e$	$161.87 \pm 14.0 / 0cd$
۱۰ روز	CS	$46.2 \pm 8.0 / 8fg$	$502.5 \pm 76.6 / 6b$	$202.1 \pm 16.1 / 6b$	$107.92 \pm 2.5 / 2e$
	GSB	$58.8 \pm 0.6 / 69cd$	$355.3 \pm 6.0 / 56f$	$180.4 \pm 68.9 / 2c$	$191.04 \pm 6.3 / 6abc$
	NSB	$51.6 \pm 0.6 / 69e$	$480.0 \pm 8.0 / 04c$	$69.12 \pm 38.3 / 7f$	$109.37 \pm 13.1 / 8e$
	PMB	$73.2 \pm 0.6 / 69a$	$302.2 \pm 84.7 / 5h$	$102.12 \pm 28.9 / 1e$	$175.00 \pm 18.3 / 1bc$
۳۰ روز	CS	$43.2 \pm 1.3 / 8gh$	$470.1 \pm 68.4 / 1c$	$144.86 \pm 2.4 / 8d$	$120.75 \pm 2.5 / 2e$
	GSB	$51.6 \pm 3.3 / 46e$	$330.4 \pm 20.7 / 3g$	$120.4 \pm 0.5 / 51e$	$205.33 \pm 6.6 / 8ab$
	NSB	$44.4 \pm 0.6 / 69g$	$418.9 \pm 72.8 / 4d$	$65.5 \pm 88.1 / 0f$	$119.87 \pm 1.0 / 44e$
	PMB	$66.0 \pm 0.6 / 69b$	$249.1 \pm 88.2 / 2j$	$50.3 \pm 7.0 / 72fg$	$186.67 \pm 12.5 / 2abc$
۶۰ روز	CS	$37.2 \pm 0.6 / 69i$	$400.6 \pm 88.3 / 7e$	$114.2 \pm 56.4 / 2e$	$132.71 \pm 2.5 / 2de$
	GSB	$49.2 \pm 2.0 / 8ef$	$287.8 \pm 88.7 / 1i$	$111.1 \pm 0.6 / 66 / 87e$	$215.83 \pm 7.5 / 8a$
	NSB	$39.6 \pm 0.6 / 69hi$	$357.4 \pm 64.9 / 2f$	$52.0 \pm 98.6 / 6fg$	$125.42 \pm 12.5 / 2e$
	PMB	$56.4 \pm 0.6 / 69d$	$220.4 \pm 48.5 / 7k$	$41.3 \pm 22.7 / 7g$	$195.42 \pm 17.3 / 1ab$

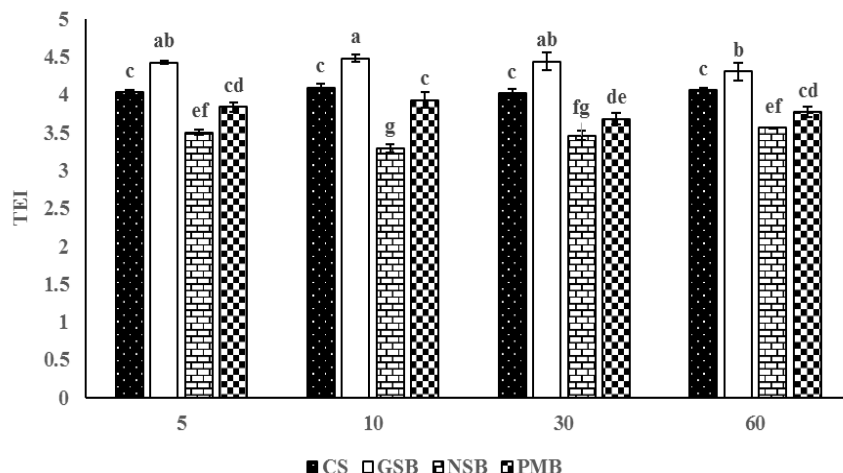
** و *^{ns} به ترتیب تفاوت معنی دار در سطح ۱٪، تفاوت معنی دار در سطح ۵٪ و عدم وجود اختلاف معنی دار

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها به صورت منفرد تحت تاثیر فاکتورهای محیطی دخیل در عملکرد اکوسیستم خاک می‌باشد. ولی با این حال اندازه‌گیری تنها یک پارامتر خاک کافی نیست به دلیل اینکه خاک چندین عملکرد را انجام می‌دهد (Picariello et al., 2021). مقادیر ضرایب GME_a و TEI به عنوان پارامترهای بدون بعد به منظور مقایسه فعالیت کل آنزیم‌های اندازه‌گیری شده در خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر GME_a در تیمارها از ۹۸/۳ تا ۱۷۳/۴ متغیر بود (شکل ۳). بالاترین مقدار معنی‌دار GME_a در تیمار GSB در تمام دوره‌های انکوباسیون مشاهده گردید. بر اساس نظر Paz-Ferreiro et al., (2012) و Lemanowicz et al., (2020) مقادیر بالاتر نشان‌دهنده کیفیت بهتر خاک است. کمترین مقدار GME_a در تیمار NSB مشاهده گردید (شکل ۳).



شکل ۳. میانگین هندسی فعالیت آنزیم در طول دوره انکوباسیون (CS, GSB, NSB, PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک با تیمار بیوجار ضایعات انگور، خاک با تیمار بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک با تیمار بیوجار کود مرغی است)

شاخص کل فعالیت آنزیم (TEI) یک مقایسه ساده بین فعالیت ترکیبی آنزیم و کیفیت هر نمونه خاک را مهیا می‌کند (Mierzwa-Hersztek et al., 2019). مقادیر این شاخص از ۳/۳ تا ۴/۳ متغیر بود (شکل ۴). این مقدار در تمام دوره انکوباسیون در تیمار GSB از سایر تیمارها بیشتر بود. Wojewodzki et al., (2023) با بررسی تاثیر کاربرد بیوجارهای مختلف حاصل از زیست توده گیاهی بر فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز، کاتالاز، فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی و پروتئاز بیان نمودند که این شاخص از ۱/۲۶ تا ۱/۹۵ متغیر بوده و بیشترین مقدار در تیمار خاک با بیوجار برگ افرا دیده شد. Tan et al., (2014) با بررسی شاخص فعالیت آنزیمی در زمین‌های کشاورزی به این نتیجه رسیدند که مقادیر شاخص TEI در کل نمونه‌های خاک، باغ و زمین‌های زراعی به ترتیب از ۱/۸۷ تا ۷/۴۳، ۲/۷ تا ۷/۴ و ۱/۸ تا ۷/۴ با میانگین ۵/۰۷، ۴/۹ و ۵/۰۷ متغیر بود. با توجه به محدودیت‌های ویژگی‌های بیولوژیکی خاک به صورت تک، توسعه و استفاده از شاخص‌های چندپارامتری مانند TEI برای ارائه و ادغام اطلاعات بیشتر در مورد کیفیت خاک توصیه می‌شود (Tan et al., 2014).



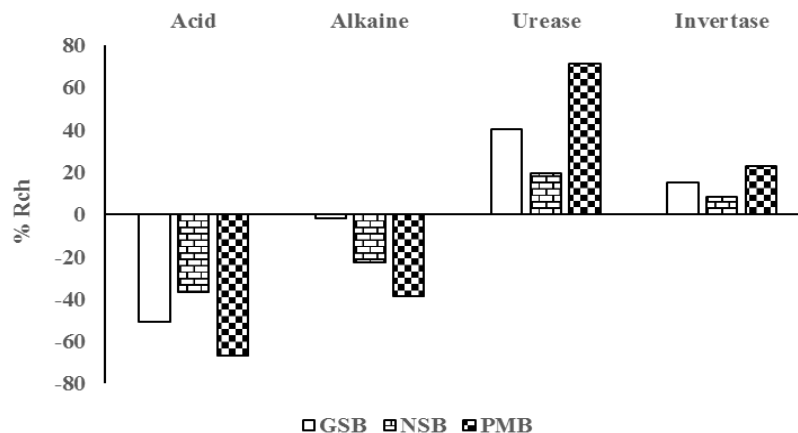
شکل ۴. شاخص کل فعالیت آنزیم (TEI) در طول دوره انکوباسیون (CS, GSB, NSB, PMB) به ترتیب خاک شاهد، خاک با تیمار بیوجار ضایعات انگور، خاک با تیمار بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک با تیمار بیوجار کود مرغی است)

درصد تغییرات در فعالیت آنزیمی (Rch) تاثیر مستقیم فاکتورهای تجربی (مه‌ار یا فعال‌سازی) را روی فعالیت آنزیمی خاک نشان می‌دهد (Lemanowicz et al., 2021). اینورتاز تنها آنزیمی بود که بعد از کاربرد هر سه نوع بیوجار تحریک شد (شکل ۵). این شاخص برای اینورتاز از ۷/۴ درصد در تیمار NSB تا ۵۲/۳ درصد در تیمار PMB متغیر بود. بعد از کاربرد بیوجار GSB و PMB هم مقدار Rch برای آنزیم اوره‌آز مثبت بود یعنی افزودن این بیوجارها موجب تحریک آنزیم اوره‌آز شده بود (شکل ۵). مقدار منفی Rch برای فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی بعد از کاربرد هر سه بیوجار ثبت شد (۱۱/۹ تا -۵۶/۸ برای فسفاتاز اسیدی و -۷/۴ تا -۴۱/۲ برای فسفاتاز قلیایی). (Wojewodzki et al., 2023) با بررسی تاثیر کاربرد بیوجار حاصل از ضایعات مختلف زیست توده گیاهی (بیوجار کمپوست یک ماهه، بیوجار پوسته درخت کاج، بیوجار سوزنی برگان، بیوجار کاج مخروطی و بیوجار برگ افرا) به منظور بهبود حاصلخیزی خاک و فعالیت آنزیمی و افزایش ترسیب کربن به این نتیجه رسیدند که پروتئاز تنها آنزیمی بود که توسط بیوجارها تحریک شد. مقدار Rch برای پروتئاز از ۰/۵ درصد (برای تیمار خاک+بیوجار پوست درخت کاج) تا ۵۷/۸۴ درصد (برای تیمار خاک + بیوجار کمپوست یک ماهه) متغیر بود. مقادیر Rch منفی برای آنزیم فسفاتاز اسیدی بعد از کاربرد تمام بیوجارها ثبت شد (۴/۴۹ تا -۳۷/۴۹ درصد). (Lemanowicz et al., 2021) با بررسی تاثیر خاک‌های شور (لايه S1-S8) بر برخی خصوصیات شیمیایی و فعالیت تعدادی آنزیم به این نتیجه رسیدند که مقدار Rch برای آنزیم کاتالاز در لایه‌های S1, S2, S3, S4 و S5 نسبت به شاهد افزایش و در S6, S7 و S8 نسبت به شاهد کاهش یافت، که این کاهش از ۲/۸۸ تا ۶۳/۹۴ درصد متغیر بود. مقادیر Rch برای فسفاتاز اسیدی در تمام لایه‌ها منفی بود. استفاده از بیوجار GSB موجب افزایش بیشتر در فعالیت آنزیم اینورتاز (Rch=24.2 %) و اوره‌آز (Rch=69.7 %) شد. مقدار شاخص Rch برای آنزیم‌های آزمایش شده به شرح زیر بود:

فسفاتاز اسیدی > فسفاتاز قلیایی > اوره‌آز > اینورتاز

با در نظر گرفتن تاثیر بیوجار مقدار شاخص Rch به صورت زیر بود:

GSB > PMB > NSB



شکل ۵. درصد تغییرات آنزیم (Rch) در طول دوره انکوباسیون (GSB)، NSB و PMB به ترتیب خاک با تیمار بیوجار ضایعات انگور، خاک با تیمار بیوجار پوسته قهوه‌ای گردو و خاک با تیمار بیوجار کود مرغی است)

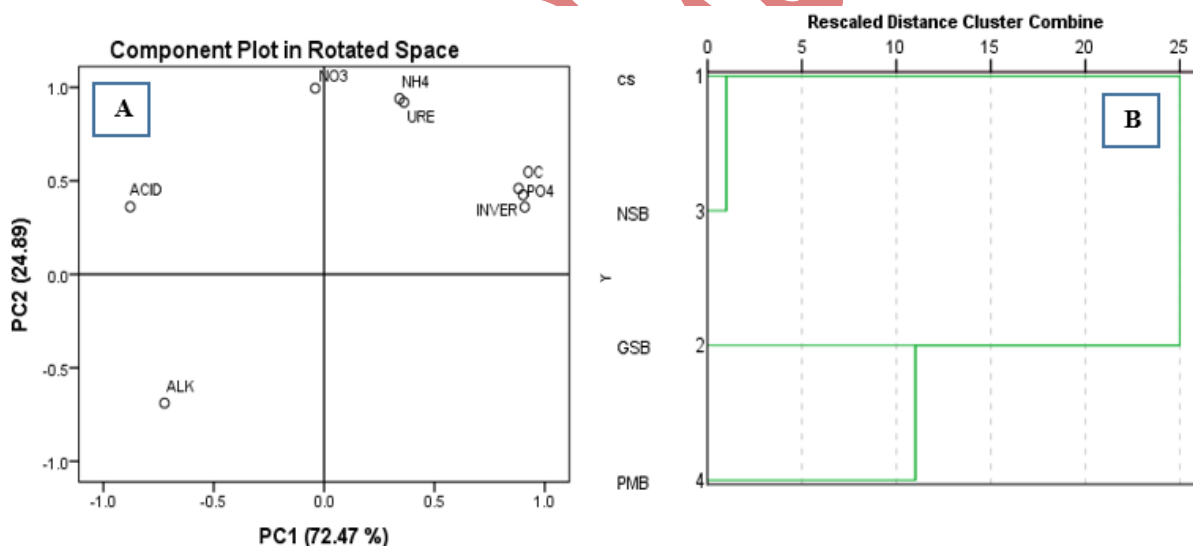
برای تبیین تمایز پارامترهای خاک مورد مطالعه تکنیک تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. PCA امکان بررسی علت و معلولی بین پارامترها را فراهم می‌کند. نتایج تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۷ و پراکنش این پارامترها بر روی محور PCA در شکل ۶ (A) نمایش داده شده است. آنالیز PCA چند متغیره، دو جزء را شناسایی کرد که حدود ۹۷/۵۶ درصد کل واریانس را به خود اختصاص داده بودند. که حدود ۷۲/۶۷ درصد توسط مولفه اول (PC_1) و ۲۴/۸۹ درصد توسط مولفه دوم (PC_2) توضیح داده شد (جدول ۷ و شکل ۶A). PC_1 عمدتاً به‌طور مثبت با کربن آلی (۰/۹۵)، اینورتاز (۰/۹۴)، فسفات (۰/۹۰)، اروه‌آز (۰/۹۰) و آمونیوم (۰/۹۰) مرتبط بود (جدول ۷). مقادیر مثبت به این معناست که هر چه شدت این ویژگی بیشتر باشد سهم آن در PC_1 مهم‌تر است. تحقیقات Liu et al., (2003) تعیین کرد که یک فاکتور می‌تواند به عنوان یک عامل قوی در نظر گرفته شود وقتی مقدار آن از ۰/۷۵ تجاوز کند. دومین مولفه (PC_2) به‌طور مثبت با فعالیت فسفاتاز اسیدی (۰/۶۷) و نیترات (۰/۷۴) در ارتباط بود (جدول ۷). PC_1 ارتباط منفی و معنی‌دار با فسفاتاز قلیایی (۰/۹۹) داشت (جدول ۷).

جدول ۷. نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در ۶۰ روز بعد از انکوباسیون

اشتراک	مؤلفه‌ها		متغیرها
	PC_2	PC_1	
-۰/۸۹	-۰/۳۵	-۰/۹۹	فسفاتاز قلیایی (ALK)
-۰/۸۹	-۰/۴۲	۰/۹۵	کربن آلی (OC)
-۰/۸۹	-۰/۳۲	۰/۹۴	اینورتاز (INVER)
-۰/۷۵	-۰/۳۷	۰/۹۰	فسفات (PO4)
-۰/۸۸	-۰/۴۱	۰/۹۰	اوره‌آز (URE)
۰/۹۰	-۰/۴۴	۰/۹۰	آمونیم (NH4)
-۰/۶۵	-۰/۶۷	-۰/۳۸	فسفاتاز اسیدی (ACID)
-۰/۷۹	-۰/۷۴	۰/۶۶	نیترات (NO3)
-	۱/۹۹	۵/۸۱	مقادیر ویژه Eigenvalue
-	۲۴/۸۹	۷۲/۶۷	واریانس % Variance
-	۹۷/۵۶	۷۲/۶۷	واریانس تجمعی % Cumulative Variance

استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در این مطالعه نشان داد که دو عامل تقریباً بیش از ۸۰ درصد واریانس را در مقادیر کربن آلی، آمونیوم، فسفاتاز قلیایی، اینورتاز و اوره‌آز و بیش از ۷۰ درصد واریانس را در مقادیر فسفات و نیترات توجیه کرد. این پارامترها بیشترین برآورد اشتراکی بودن را نشان می‌دهند و فسفاتاز اسیدی کم‌ترین اهمیت نسبی در بین تخمین مقادیر اشتراک را نشان داد (جدول ۷).

تجزیه و تحلیل خوشه‌ای شباهت بین تیمارهای مختلف بعد از ۶۰ روز انکوباسیون را نشان می‌دهد. هر چه فاصله‌ی اقلیدسی بین دو تیمار کمتر باشد نشان‌دهنده آن است که دو تیمار به یکدیگر شبیه‌تر هستند. از نمودار دو خوشه اصلی جدا شد (شکل B۶). اولین خوشه شامل تیمار CS و NSB و دومین خوشه شامل تیمار GSB و PMB بود. در اولین خوشه (تیمار شاهد و تیمار NSB) مقادیر فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی بیشتر از خوشه دوم (تیمار GSB و PMB) و در خوشه دوم مقادیر آمونیوم، نیترات، فسفات، کربن آلی و فعالیت آنزیم اوره‌آز و اینورتاز بیشتر از خوشه اول بود. (Wojewodzki et al., 2022) در مطالعه خود بر روی پاسخ فعالیت آنزیمی خاک تحت تاثیر انواع مختلف بیوجار از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای استفاده نمودند در این تجزیه و تحلیل دو خوشه اصلی متمایز شد که خوشه اول شامل تیمار شاهد و تیمار خاک+بیوجار کمپوست و خوشه دوم شامل تیمار خاک+بیوجار چوب چنار، خاک+بیوجار چوب کاج و خاک+بیوجار برگ بلوط بود. که تیمار خاک+بیوجار چوب چنار و خاک+بیوجار چوب کاج نزدیک‌ترین شباهت را با یکدیگر داشتند. تیمار خاک+بیوجار لجن فاضلاب بیشترین فاصله اقلیدسی را با اولین و دومین تیمار داشت. این تیمار دارای بالاترین میزان نیتروژن کل، فسفر کل، آنزیم دهیدروژناز، کاتالاز، فسفاتاز قلیایی و فسفاتاز اسیدی بود.



شکل ۶. مولفه‌های اصلی (A) و گراف خوشه‌ای (B) ویژگی‌های مختلف شیمیایی و فعالیت آنزیمی در خاک‌های تیمار شده با بیوجارهای مختلف ۶۰ روز بعد از انکوباسیون

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن بیوجار به خاک موجب افزایش کربن آلی، فسفر قابل جذب، آمونیوم و نیترات در خاک در مقایسه با شاهد شد. که این افزایش در تیمار PMB و GSB در مقایسه با شاهد معنی‌دار بود. به طوری که افزودن بیوجار PMB و GSB به ترتیب موجب افزایش ۴۰ و ۱۸ درصدی کربن آلی خاک، ۱۱۰ و ۲۸ درصدی فسفر قابل جذب خاک و ۴۰ و ۶۲ درصدی آمونیوم در مقایسه با شاهد شد. همچنین افزودن تیمار PMB موجب افزایش ۱/۵ برابری فعالیت آنزیم اوره‌آز و اینورتاز در خاک در مقایسه با شاهد گردید. افزودن بیوجار GSB به ترتیب موجب افزایش ۱/۷ و ۱/۲ برابری فعالیت آنزیم اوره‌آز و اینورتاز در خاک در مقایسه با شاهد شد. بالاترین مقدار میانگین فعالیت آنزیم، شاخص کل فعالیت آنزیم و شاخص درصد تغییرات آنزیم در تیمار GSB مشاهده گردید. با توجه

به نتایجی که ارائه شد تیمار GSB می‌تواند ارزش زراعی بلند مدت داشته باشد. بنابراین با در دسترس بودن مقادیر فراوان از ضایعات انگور در این استان و امکانات تهیه بیوپچار، می‌توان از رهاشدن بدون استفاده این ضایعات در طبیعت جلوگیری کرد و هم با توجه به وضعیت اقلیمی ایران و کمبود شدید مواد آلی، می‌توان استفاده از بیوپچار را به عنوان یک ماده آلی پایدار در خاک توصیه نمود.

منابع

ایوبی، شمس اله، خرمالی، فرهاد، ساهراوات، کی. ال و رودریگز دلیما، ای. اس. (۱۳۹۰). ارزیابی تغییر کاربری اراضی بر شاخص‌های کیفیت خاک در خاک لسی در استان گلستان، ایران. *مجله علوم و فنون کشاورزی*. ۱۳ (۵): ۷۴۲-۷۲۷.

کاظمی، علیرضا، وارسته خانلری، زهرا و ضرابی، محبوبه. (۱۴۰۲). بررسی رهاسازی عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم از بیوپچارهای مختلف و ارتباط آن‌ها با شیمی سطح بیوپچار. *تحقیقات آب و خاک*. ۵۴ (۹): ۱۲۹۹-۱۲۸۶.

مطیلجی، ساحره، لندی، احمد و زلّقی، روی. (۱۳۹۸). اثر فیلتریکیک، بیوپچار و باکتری‌های محرک رشد به عنوان کود های آلی و زیستی بر برخی شاخص های کیفی خاک و رشد گندم. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*. ۹ (۱): ۱۶۳-۱۵۱.

References

Ayoubi, S., Khormali, F., Sahrawat, K.L. and Rodrigues de Lima, A.C. (2011). Assessing Impacts of Land Use Change on Soil Quality Indicators in a Loessial Soil in Golestan Province, Iran. *Journal of Agriculture Science and Technology*. 13 (5): 727-742. (In Persian)

Bailey, V.L., Fansler, S.J., Smith, J.L. and Bolton, H. (2010). Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization. *Soil Biology and Biochemistry*. 43(2), 296-301.

Brejda, J.I., Moorman, T.B., Karlen, D.L. and Dao, T.H. (2000). Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators. I. Central and Southern High Plains. *Soil Science Society of America Journal*. 64, 2115-2124.

Chaer, G., Fernandes, M., Myrold, D. and Bottomley, P. (2009). Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils. *Microbial Ecology*. 58, 414-424.

Chantigny, M.H., Angers, D.A., Prévost, D., Simard, R.R. and Chalifour, F.P. (1999). Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*. 31: 4. 543-550.

Chen, S., Qi, G., Ma, G. and Zhao, X. (2020). Biochar amendment controlled bacterial wilt through changing soil chemical properties and microbial community. *Microbiological research*. 231, 1-9.

Cui, L., Yan, J., Yang, Y., Li, L., Quan, G., Ding, C., Chen, T., Fu, Q. and Chang, A. (2013). Biochar for heavy metals in soil. *Bioresources*. 8: 5536-5548.

Dangi, S., Gao, S., Duan, Y. and Wang, D. (2020). Soil microbial community structure affected by biochar and fertilizer sources. *Applied Soil Ecology*. 150, 103452.

Foster, E.J., Hansen, N., Wallenstein, M. and 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.

- Garbuz, S., Camps-Arbestain, M., MacKay, A., DeVantier, B. and Minor, M. (2020). The interactions between biochar and earthworms, and their influence on soil properties and clover growth: a 6-month mesocosm experiment. *Applied Soil Ecology*. 147, 103402.
- Garbuz, S., Mackay, A., Camps-Arbestain, M., DeVantier, B. and 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.
- Gee, C.W. and Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis. In: A. Klute. (Ed), *Methods of soil analysis. Part, Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA*. pp. 383-411.
- Goloran, J.B., Philips, I.R., Xu, Z.H., Condon, L.M. and Chen, C.R. (2014). Effects of amendments and fertilization on plant growth, nitrogen and phosphorus availability in rehabilitated highly alkaline bauxite-processing residue sand. *Soil use manage*. 30, 198-208.
- Haddad, S.A. and Lemanowicz, J. (2021). Benefits of corn-cob biochar to the microbial and enzymatic activity of soybean plants grown in soils contaminated with heavy metals. *Energies*. 14, 5763.
- Holík, L., Hlisnikovský, L., Honzík, R., Trögl, J., Burdová, H. and Popelka, J. (2019). Soil microbial communities and enzyme activities after long-term application of inorganic and organic fertilizers at different depths of the soil profile. *Sustainability*. 11, 3251.
- Jing, Y., Zhang, Y., Han, I., Wang, P., Mei, Q. and 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>
- Jones, B. J. R. (2001). *Laboratory guide for conducting soil test and plant analysis*. New York: Crc. P. 384
- Kazemi, A.R., Varasteh Khanlari, Z. and 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)
- Kong, F., Ling, X., Iqbal, B., Zhou, Z. and Meng, Y. (2021). Soil phosphorus availability and cotton growth affected by biochar addition under two phosphorus fertilizer levels. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 69(1), 18-31.
- Kookana, R.S., Sarmah, A.K., Van Zwieten, L., Krull, E. and Singh, B. (2011). Biochar Application to Soil: Agronomic and Environmental Benefits and Unintended Consequences. *Advances in Agronomy Journal*. 112: 103-143.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C. and Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota-a review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43(9), 1812–1836.
- Lemanowicz, J., Gawlińska, K. and Siwik-Ziomek, A. (2021). Impact of technogenic saline soils on some chemical properties and on the activity of selected enzymes. *Energies*. 14, 4882.
- Lemanowicz, J., Haddad, S.A., Bartkowiak, A., Lamparski, R. and Wojewódzki, P. (2020). The role of an urban park's tree stand in shaping the enzymatic activity, glomalin content and physicochemical properties of soil. *Science of the Total Environment*. 1, 140446.

- Liu, C.W., Lin, K.H. and Kuo, Y.M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*. 313, 77–89.
- Masto, R.E., Kumar, S., Rout, T.K., Sarkar, P., George, J. and Ram, L.C. (2013). Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity. *Catena*. 111: 64-71.
- McHenry, M.P. (2009). Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 129 (1-3), 1-7.
- Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., Klimkowicz-Pawlas, A., Chmiel, M.J., Dziedzic, K. and Taras, H. (2019). Assessment of soil quality after biochar application based on enzymatic activity and microbial composition. *International Agrophysics*. 33, 331–336.
- Motileji, S., Landi, A. and Zalaghi, R. (2019). Effects of application of filter cake, biochar and PGPR bacteria as organic and bio-fertilizers on some soil quality indices and wheat growth. *Journal of Soil Management and Sustainable*. 9 (1): 151-163. (In Persian)
- Nelson, R.E. (1982). Carbonate and gypsum. In: page, A.L.; Miller, R.H.; and Keeney, D.R. Methods of soil analysis. Part2. Chemical and microbiological properties (2nd Ed). *Agronomy monograph*. No.9. ASA. PP: 181-196.
- Olsen, S.R. and 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. SSSAJ, USA*. pp. 403-430.
- Paz-Ferreiro, J., Gasco, G., Gutiérrez, B. and 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.
- Picariello, E., Baldantoni, D., Muniategui-Lorenzo, S., Concha-Graña, E. and De Nicola, F. (2021). A synthetic quality index to evaluate the functional stability of soil microbial communities after perturbations. *Ecological Indicators*. 128, 107844.
- Pierzynski, G. M. (2000). Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters.
- Qambrani, N.A., Rahman, M.M., Won, S., Shim, S. and Ra, C. (2017). Biochar properties and ecofriendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: a review. *Renewable and Sustainable Energy Review*. 79, 255-273.
- Rowell, D.L. (1994). *Soil Science: Methods and Applications*. Longman Group, London.
- Sajal, R. and Abul Kashem, M.D. (2014). Effects of organic manures in changes of some soil properties at different incubation periods. *Open Journal of Soil Science*. 4, 81-86.
- Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E. and Margesin, R. (2012). *Methods in soil biology: Springer Science & business media*.
- Song, D., Xi, X., Huang, S., Liang, G., Sun, J., Zhou, W. and 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.

Tan, K.H. (2005). *Soil Sampling, Preparation, and Analysis*. CRC Press.

Tan, X., Xie, B., Wang, J., He, W., Wang, X. and Wei, G. (2014). County-scale spatial distribution of soil enzyme activities and enzyme activity indices in agricultural land: Implications for soil quality assessment. *The Science World Journal*. 535768.

Xiao, X., Chen, B., Chen, Z., Zhu, L. and Schnoor, J. L. (2018). Insight into multiple and multi-level structures of biochars and their potential environmental applications: a critical review. *Environmental Science & Technology*. 52, 5027–5047.

Wang, X., Song, D., Liang, G., Zhang, Q., Ai, C. and 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.

Wojewodzki, P., Lemanowicz, J., Debska, B., Haddad, S.A. and Tobiasova, E. (2023). The Application of Biochar from Waste Biomass to Improve Soil Fertility and Soil Enzyme Activity and Increase Carbon Sequestration. *Energies*. 16, 380.

Wojewodzki, P., Lemanowicz, J., Debska, B. and Haddad. (2022). Soil Enzyme Activity Response under the Amendment of Different Types of Biochar. *Agronomy*. 12, 569.

Wu, S., Zhang, Y., Tan, Q., Sun, X., Wei, W. and Hu, C. (2020). Biochar is superior to lime in improving acidic soil properties and fruit quality of Satsuma mandarin. *Science of The Total Environment*. 714, 136722.

Yang, H., Du, T., Qiu, R., Chen, J., Wang, F., Li, Y., Wang, C., Ga, L. and Kang, S. (2017). Improved Water Use Efficiency and Fruit Quality of Greenhouse Crops under Regulated Deficit Irrigation in Northwest China. *Agric. Water Manage.* 179, 193–204. doi:10.1016/j.agwat.2016.05.029

Yao, R.J., Yang, J.S., Zhao, X.F., Li, X.M. and Liu, M.X. (2013). Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area *Soil and Tillage Research*. 128, 137–148.

Yao, T., Zhang, W., Gulaqa, A., Cui, Y., Zhou, Y., Weng, W., Wang, X., Liu, Q. and Jin, F. (2021). Effects of peanut shell biochar on soil nutrients, soil enzyme activity, and rice yield

Zhang, M., Cheng, G., Feng, H., Sun, B., Zhao, Y., Chen, H. and 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.

Zheng, Y., Han, X., Li, Y., Yang, J., Li, N. and An, N. (2019). Effects of Biochar and Straw Application on the Physicochemical and Biological Properties of Paddy Soils in Northeast China. *Scientific reports*. 9(1), 1–11.

Zhu, X., Chen, B., Zhu, L. and Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review. *Environmental Pollution*. 227, 98–115.

Background and purpose: Today, various modifiers are used to improve the physical and chemical properties of soil and increase its nutrients. Common amendments used in agriculture include fertilizers, animal waste, plant residues, gypsum, sulfur and biochar. In recent years, the use of biochars as a soil conditioner for agricultural lands has been suggested. The benefits of biochars include increasing crop yield, preserving nutrients, soil water holding capacity and carbon sequestration, minimizing nutrient runoff, reducing leaching losses, and improving the structure of the microbial community. Therefore, the purpose of this research was to investigate the effect of different biochars on the concentration of organic carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activity of a sandy loam soil.

Materials and methods: In order to investigate the effect of different biochars on the concentration of organic carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activity of a sandy loam soil, an experiment was conducted in a completely randomized design in three replications. Biochars were used at 10% (w/w). The experimental treatments included control soil (CS), soil + poultry manure biochar (PMB), soil + grape waste biochar (GSB) and soil + brown walnut shell biochar (NSB). The samples were incubated at 25 ± 3 °C for about two months. During the incubation period, soil moisture contents in treatments were kept constant (70% FC) by adding distilled water to the samples. Sampling was done on days 5, 10, 30 and 60 and the concentration of organic carbon, available phosphorus, ammonium and Nitrate and activity of invertase, acid and alkaline phosphatase and urease were measured. The percentage of enzyme changes (Rch) and the total enzyme activity index (TEI) were calculated and in order to create a data set from these parameters, the factor analysis method and the principal component analysis method were used.

Findings: The results showed that the use of PMB and GSB treatment caused a significant increase in the concentration of organic carbon, available phosphorus and ammonium in the soil compared to the CS treatment. The highest nitrate concentration was observed in GSB treatment. The concentration of available phosphorus and nitrate increased with increasing incubation time, and the concentration of organic carbon and ammonium decreased with increasing incubation time. The concentration of invertase enzyme in PMB and GSB treatment was significantly different from the control. The peak of invertase activity was observed in PMB treatment at 5 days of incubation ($76.8 \mu\text{g. GE. g}^{-1}. 24\text{h}^{-1}$). Adding GSB treatment to the soil increased the activity of urease enzyme by 1.7 times compared to the control treatment. Average enzyme activity (GMEa) and total enzyme activity index (TEI) were higher in GSB treatment compared to other treatments. Considering the effect of biochar, the percentage of enzyme changes (Rch) was as follows: GSB > PMB > NSB. Using principal component analysis (PCA) in this study showed that two factors accounted for more than 80% of the variance in organic carbon values, ammonium, alkaline phosphatase, invertase and urease and explained more than 70% of the variance in phosphate and nitrate values. These parameters show the highest estimate of commonality and acid phosphatase showed the least relative importance among the estimation of commonality values. In cluster analysis, GSB and PMB treatment were placed in one cluster.

Conclusion: The results showed that GSB and PMB treatment had the greatest effect on the measured factors.

Key words: acid and alkaline phosphatase, enzyme change percentage (Rch), average enzyme activity (GMEa)