Research Article

Agricultural Engineering., 46(2) (2023) 121-139 ISSN (P): 2588-526X

DOI: 10.22055/AGEN.2023.43410.1662 ISSN (E): 2588-5944

# Using compost and triple superphosphate fertilizer to promote soil microbial and enzymatic properties and maize (*Zea mays*) growth in loess soil

E. Sadeghi[1], R. Ghorbani Nasrabadi[2,*], S.A.R. Movahedi Naeini[3], M Baranimotlagh[4], M. Khoshhal Sarmast[5] and M.R. Pahlevan-Rad[6]

1. Former Ph.D. Student, Department of Soil Science Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
2,3,4. Associate Professor., Department of Soil Science Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
5. Associate Professor, Department of Horticultural Science, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran
6. Assiatant Professor, Soil and Water Research Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

Received: 9 April2023 Accepted: 11 June 2023 *Corresponding Author: rgnasr@yahoo.com

**Abstract**

**Introduction:** Plant growth and crop productivity may be adversely affected under unfavorable environmental conditions, such as a lack of organic matter in the soil. To counteract the negative impacts of these challenges, a unique strategy is required. The paucity of organic inputs, which is common in conventional agricultural production, can lead to soil degradation, erosion, and loss of soil organic matter, which are unfortunate consequences. Soil organic amendments have been shown to have beneficial effects on crop production and a wide range of soil properties in agricultural systems. However, the limited availability of phosphorus (P) in soil can significantly restrict crop growth and productivity, particularly in maize crops. Adequate P supply has been found to enhance early maturity, crop quality, and yield. However, the prolonged use of chemical fertilizers such as NPK has been found to have adverse effects on soil fertility and crop quality. As a result, the combined application of organic and chemical fertilizers has been proposed as an effective approach compared to the single application of organic or chemical fertilizer alone. Therefore, this study aimed to assess the potential benefits of using compost and Triple Super Phosphate fertilizer (TSP) application on the chemical and biological properties of soil, as well as the properties of forage maize (cv. SC704), in loess soil.

**Materials and Methods:** A factorial experiment was conducted using a completely randomized design with three replications. A total of 36 samples were prepared in two separate cultivated and incubated experiments. A pot experiment was conducted to investigate the effects of simple and enriched compost, containing urea and *Streptomyces*, and varying amounts of TSP fertilizer (0, 10, 40, and 100 mg/kg), on soil properties and maize plant growth. In addition, an incubation

© 2023 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

experiment was conducted to measure the effects of the same treatments on soil microbial biomass and activity. The biomass of maize plants was measured at the time of harvesting (80 days after planting). Some parameters such as available phosphorus, substrate-induced respiration, microbial biomass carbon, and some enzymes activity (acid phosphatase, alkaline phosphatase, catalase and urease) were measured in soil.

**Results and Discussion:** The findings of this study indicated that the application of compost and TSP fertilizer had significant effects on plant biomass. Specifically, compost application led to an increase in microbial biomass carbon and enzymes activity (acid phosphatase, alkaline phosphatase, catalase and urease) in the soil, ultimately promoting plant growth. Moreover, the combined application of compost and TSP fertilizer increased the availability of phosphorus, substrate-induced respiration, and microbial biomass carbon in the soil. Based on the findings, the combined application of TSP and compost resulted in further increases in substrate-induced respiration (63-168%), microbial biomass carbon (72-167%), available phosphorus (29-103%), and enzyme activity (acid phosphatase (4-21), alkaline phosphatase (14-34%), catalase (13-32%), and urease(54-159%)) compared to the application of each amendment alone. This suggests that the addition of both TSP and compost promotes the availability of easily accessible nutrients for microbial growth and soil enzymes (acid phosphatase, alkaline phosphatase, catalase and urease) activity. The highest amount of available phosphorus, microbial biomass carbon, substrate-induced respiration, catalase activity and urease activity in cultivated soil (23%, 270%, 93%, 68%, 1.8%, respectively) and incubated soil (18%, 243%, 90%, 53%, 1.2%, respectively) were observed in C2P3 treatment. The results also indicated that the enriched compost+TSP treatment led to the highest substrate-induced respiration and microbial biomass carbon, followed by simple compost+TSP, enriched compost, simple compost, TSP fertilizer, respectively. The increase in enzyme activity ($P<0.01$, $r=0.90$), and available phosphorus ($P<0.01$, $r=0.60$) in the soil positively influenced plant growth. Specifically, the simultaneous application of compost and TSP had a greater effect on maize plant biomass. The highest root biomass (2.80 g), stem biomass (10.4 g), and leaf biomass (2.27 g) were observed in the enriched compost and 100 mg $kg^{-1}$ TSP treatment, which differed significantly from the other treatments.

**Conclusion:** The results of this study demonstrated that the addition of compost and TSP to loess soils can promote microbial biomass carbon, substrate-induced respiration, enzyme activity (acid phosphatase, alkaline phosphatase, catalase, and urease), available phosphorus, and maize plant growth. Moreover, the use of compost can protect soil microbial and enzymatic activities in loess soils. Thus, the simultaneous application of enriched compost with TSP can reduce the use of chemical fertilizers and their negative environmental impacts.

***Keywords: Compost, loess, microbial biomass carbon, substrate-induced respiration***

مقاله پژوهشی

# کاربرد کمپوست و کود سوپر فسفات تریپل برای بهبود فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک و رشد ذرت در خاک لسی

الهام صادقی[۱]، رضا قربانی نصرآبادی[۲*]، سید علیرضا موحدی نائینی[۳]، مجتبی بارانی[۴]، مصطفی خوشحال سرمست[۵] و محمدرضا پهلوان راد[۶]

۱-دانش آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۲- ۳، ۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۵- دانشیار گروه علوم باغبانی ، تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۶- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج، گرگان، ایران

**تاریخچه مقاله**

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

***کلمات کلیدی:***

***کمپوست،***

***لس،***

***کربن زیست‌توده میکروبی،***

***تنفس ناشی از بستره***

* عهده دار مکاتبات

Email: rgnasr@yahoo.com

**چکیده**

**کاربرد همزمان کمپوست غنی‌شده با کودهای شیمیایی منجر به افزایش فعالیت میکروبی خاک و قابلیت دسترسی عناصر غذایی می گردد. بنابراین آزمایشی با هدف تعیین اثر کمپوست و سوپرفسفات تریپل (TSP)[1] بر فسفر قابل استفاده، ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک و رشد گیاه ذرت به اجرا درآمد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملا تصادفی در سه تکرار و در مجموع ۳۶ نمونه در خاک کشت شده و گرماگذاری شده اجرا گردید. تیمارها در هر دو خاک کشت شده و گرماگذاری شده شامل سه سطح کمپوست (C0 فاقد کمپوست، C1 ۲ درصد وزنی وزنی کمپوست ساده و C2 ۲ درصد وزنی وزنی کمپوست غنی شده)، چهار سطح کود TSP (۰، ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بودند. یافته‌های به دست آمده از این پژوهش نشان داد که استفاده از کمپوست یا TSP به تنهایی و نیز کاربرد همزمان آنها ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در خاک ( فسفر قابل دسترس، کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس ناشی از بستره، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی، اوره‌آز و کاتالاز) را بهبود بخشیده و رشد گیاه را افزایش داد. تیمار C2P3 بیشترین مقدار فسفر قابل دسترس، کربن زیست-توده میکروبی، تنفس ناشی از بستره، کاتالاز و اوره‌آز را در خاک کشت شده (به ترتیب ۲۳، ۲۷۰، ۹۳، ۶۸ و ۱/۸ درصد) و گرماگذاری شده (به ترتیب ۱۸، ۲۴۳، ۹۰، ۵۳ و ۱/۲ درصد) به همراه داشت. افزودن کمپوست و TSP به خاک لسی مورد مطالعه با ماده آلی کم منجر به بهبود تنش تغذیه‌ای، فعالیت‌های میکروبی، آنزیمی خاک و افزایش رشد گیاه گردد.**

1- Triple superphosphate (TSP)

**مقدمه**

ذرت به دلیل سازگاری با شرایط مختلف، یکی از بیش‌ترین محصولات کشت شده در سراسر جهان است (۱۲). فسفر از عناصر ضروری برای گیاهان بوده و کمبود فسفر و تثبیت آن در خاک‌های قلیایی-آهکی (۵) عامل کاهش تولید جهانی ذرت به دلیل نیاز بالای این گیاه به فسفر است (۵). تثبیت کود فسفاته در خاک یکی از موانع به دست آوردن حداکثر عملکرد محصول است (۵). استفاده از کودهای معدنی در ترکیب با مواد آلی می‌تواند کارایی کودهای معدنی را افزایش داده و هزینه‌ها را کاهش دهد (۹). نتایج تبسم و همکاران[1] (۲۴) به وضوح نشان می‌دهد که استفاده تلفیقی از کودهای معدنی فسفر و پتاسیم به همراه کمپوست و اسیدهای آلی می‌تواند یک استراتژی موثر برای افزایش عرضه فسفر و پتاسیم و افزایش ویژگی‌های کمی و کیفی ذرت باشد. کمپوست منبع سرشار از عناصر غذایی بوده (۴) و مزایای کشاورزی و زیست محیطی کمپوست با غنی‌سازی آن با ریزجانداران مفید خاک افزایش می‌یابد (۳). چن و همکاران[2] (۶) اثرات متقابل قارچ میکوریز آربوسکولار[3] و باکتری‌های خاک بر رشد ذرت را مورد بررسی قرار داده و بیان داشتند که باکتری‌های خاک به طور مستقیم رشد ذرت و به طور غیرمستقیم زیست‌توده ذرت را با افزایش سطوح کلونیزاسیون[4] میکوریز، افزایش می‌دهند. کمپوست غنی‌شده با ریزجانداران مفید به دلیل غلظت کافی از عناصر پرمصرف و کم مصرف، می‌تواند به عنوان یک کود آلی مورد استفاده قرار گیرد (۳). سانتوس و همکاران[5] (۲۱) نشان دادند که کمپوست‌های مختلف با داشتن ترکیبات شیمیایی متفاوت، بر معدنی شدن کربن و نیتروژن در خاک موثر می‌باشند.

طبق تحقیقات استفاده از کمپوست غنی شده با کود معدنی بالاترین مقدار فعالیت آنزیمی و زیست‌توده میکروبی در خاک را به همراه داشت (۱۵). همچنین نتایج لی و همکاران[6] (۱۶) نشان داد که ترکیب کمپوست غنی‌شده با کودهای شیمیایی منجر به افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌شود و با فراهم کردن عناصر درشت مغذی و ریزمغذی رشد رویشی و عملکرد بالاتر گیاه را تضمین می‌کند. کاربرد ترکیبی کودهای معدنی، کمپوست و اسیدهای آلی به بهبود خواص فیزیکوشیمیایی خاک و در دسترس بودن مواد مغذی و افزایش رشد و بهره‌وری محصول کمک می‌کند (۲). باکتری‌های حل-کننده فسفات (PSB)[7] می توانند منجر به افزایش حلالیت فسفر نامحلول در خاک شوند (خان و همکاران[8]، ۱۴). طبق یافته‌های عمران و امان الله[9] (۱۳) بیش‌ترین عملکرد ذرت و افزایش جذب فسفر، در خاک تیمار شده با قارچ *تریکودرما*[10] همراه با مواد آلی و ۱۰۰ کیلوگرم فسفر در هکتار بود. کمپوست غنی شده با کود آلی، کود معدنی و ریزجانداران مفید منجر به افزایش خواص میکروبی و آنزیمی خاک گردید (۵). با این حال، اثرات همزمان کمپوست غنی شده (با اوره و *استرپتومایسس*[11]) و TSP بر ویژگی‌های شیمیایی، بیوشیمیایی و بیولوژیکی خاک-های لسی که حدود ۱۰ درصد از سطح زمین را پوشش می‌دهند و در شمال شرق ایران در سطح زیادی وجود دارند (۲۲)، هنوز مورد بررسی کامل قرار نگرفته است.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، بررسی کارایی دو منبع کود آلی (کمپوست ساده و غنی شده) وسطوح مختلف کود معدنی (TSP) بر رشد و عملکرد ذرت علوفه‌ای و پاسخ جامعه میکروبی و آنزیمی در شرایط گلخانه‌ای و انکوباسیونی (گرماگذاری) در خاک لسی بود.

1- Tabbasum *et al.*
2- Chen *et al.*
3- Arbuscular mycorrhiza
4- Colonization
5- Santos *et al.*
6- Li *et al.*
7- Phosphate-solubilizing bacteria (PSB)
8- Khan *et al.*
9-Imran and Amanullah
10- *Trichoderma*
11- Streptomyces

## مواد و روش‌ها

### نمونه برداری خاک و تهیه کمپوست

خاکی در شمال ایران در استان گلستان بین عرض جغرافیایی "۱/۱′۳۶°۳۷ و طول جغرافیایی "۳/۱۷′۲۶°۵۵ (میانگین بارندگی سالانه ۴۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سلسیوس) انتخاب شد. مواد اولیه منطقه مورد مطالعه عمدتاً از رسوبات لس تشکیل شده است. خاک مورد استفاده در این پژوهش به عنوان Typic Haploxerepts (Calcaric Cambisol) طبقه-بندی گردید (۱۰). خاک سطحی (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) برای مطالعات گلخانه‌ای و انکوباسیونی نمونه‌برداری شد. بافت خاک (روش هیدرومتر)، pH (در نسبت خاک به آب ۱:۵)، هدایت الکتریکی، EC (در نسبت خاک به آب ۱:۵)، $CaCO_3$ (روش تیتراسیون)، کربن آلی (روش والکلی بلک)، ظرفیت تبادل کاتیونی (آمونیم-استات، pH 7.0) و رطوبت اشباع (SP) با استفاده از روش‌های استاندارد (۱۹) اندازه‌گیری شدند (جدول ۱).

فرایند کمپوست‌سازی با ۸۰۰ گرم کاه گندم در جعبه های پلاستیکی در سه تکرار (جعبه‌ها دارای زهکشی مناسب و منافذ کافی برای هوادهی بودند) در یک اتاق تاریک در دمای ۲۵ تا ۳۰ درجه سلسیوس و میزان رطوبت ۶۰ درصد انجام شد.

برای تهیه کمپوست ساده از کاه گندم به تنهایی استفاده شد. برای تهیه کمپوست غنی‌شده از کاه گندم، اوره (۱۶/۱ گرم بر کیلوگرم) برای تصحیح نسبت C:N، و مایه‌زنی *استرپتومایسس* (با شماره دسترسی KJ152149، با جمعیت $10^7$ cfu/ml) (۱۱) به مقدار ۵ درصد (حجمی/وزنی) به کاه گندم استفاده شد. کمپوست‌سازی در یک دوره زمانی ۹۰ روزه انجام شد. خواص فیزیکی و شیمیایی کمپوست‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

### آزمایش انکوباسیونی

برای انجام آزمایش انکوباسیونی، ابتدا خاک در جارهای ۱ لیتری (جارهایی با ۱۰۰ گرم خاک برای تنفس میکروبی و جارهایی با ۶۰۰ گرم خاک برای اندازه‌گیری فعالیت بیولوژیکی و بیوشیمیایی) ریخته شد. ابتدا دو درصد وزنی کمپوست به آن‌ها افزوده و سپس با استفاده از کود TSP در چهار سطح فسفر (۰، ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی-گرم بر کیلوگرم) و تیمار بدون فسفر و کمپوست به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. محتوی جارها به طور کامل باهم مخلوط شدند. رطوبت خاک، کمپوست و TSP در حد ۷۰ درصد ظرفیت زراعی تنظیم شد و جارها به مدت ۲۰ روز در حالت پیش انکوباسیون قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها (۳۶ نمونه) در دمای ۲±۲۵ قرار گرفتند و آزمایش‌های لازم (فسفر قابل دسترس، کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس ناشی از بستره و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، اوره‌آز، فسفاتاز اسیدی و فسفاتاز قلیایی) انجام شد.

**جدول(۱) برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه**

**Table (1) Some physico-chemical properties of the studied soil**

| Properties ویژگی‌ها | Unite واحد | Value مقدار |
|---|---|---|
| pH | - | 8.1 |
| EC هدایت الکتریکی | dS $m^{-1}$ | 1.19 |
| Texture بافت | - | Silty Clay Loam لوم رسی سیلتی |
| Organic carbon کربن آلی | % | 0.74 |
| Calcium carbonate equivalent کربنات کلسیم معادل | % | 7.5 |
| Cation exchange capacity ظرفیت تبادل کاتیونی | Cmolc $Kg^{-1}$ | 48 |
| Saturated moisture رطوبت اشباع | % | 49.5 |

**جدول(۲) خواص فیزیکی و شیمیایی کمپوست‌های C1 (کمپوست غنی نشده) و C2 (کمپوست غنی شده با اوره و استرپتومایسس)**

**Table (2) Physical and chemical characteristics of composts C1 (unenriched compost) and C2 (compost enriched with urea and Streptomyces)**

| Properties ویژگی‌ها | pH | EC (dS/m) | MC (%) | Ash (%) | TP (g $kg^{-1}$) | TC (%) | TN (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1 | 7.9 | 1.5 | 79 | 32 | 6.32 | 32.4 | 1.75 |
| C2 | 8.1 | 2.1 | 72 | 30 | 7.94 | 33.2 | 2.16 |

MC (وزن خشک)، Ash (وزن خاکستر)، EC (رسانایی الکتریکی)، TC (کربن کل)، TN (نیتروژن کل) و TP (فسفر کل).

MC (dry weight), Ash (ash weight), EC (electrical conductivity), TC (total carbon), TN (total nitrogen) and TP (total phosphorus).

## آزمایش گلدانی

به منظور ارزیابی تیمارهای آزمایشی بر واکنش گیاه ذرت و نیز تیمارهای آزمایشی عبارت بودند از: (۱) سه سطح کمپوست {C0 (بدون کمپوست)، C1 (کمپوست غنی نشده، ۲٪ w/w) و C2 (کمپوست غنی شده با اوره و *Streptomyces*، ۲٪ w/w)} (۲) چهار سطح فسفر (۰، ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و تیمار بدون فسفر و کمپوست به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. آزمایش گلدانی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. هر گلدان پلاستیکی (۱۵ سانتی‌متر × ۱۵ سانتی‌متر × ۱۰ سانتی‌متر، در مجموع ۳۶ گلدان) با ۵ کیلوگرم خاک یا مخلوطی از خاک، TSP و کمپوست پر شد و قبل از کاشت بذر، در ۶۰ تا ۷۰ درصد ظرفیت ظرفیت مزرعه، نگهداری شدند. دانه‌های کامل و بدون لکه *Zea mays* L. انتخاب و با ۱۰٪ $H_2O_2$ به مدت ۳۰ دقیقه ضد عفونی شدند، به مدت ۱۲ ساعت در $CaSO_4$ اشباع خیسانده شدند و سپس با آب مقطر شسته شدند. در هر گلدان ۱۰ بذر کاشته و پس از دو هفته تنک کردن انجام شد. سه گیاه در هر گلدان باقی ماند و یک سینی در ته هر گلدان قرار داده شد تا آبی که خارج شده بود جمع‌آوری شود. گیاهان به طور منظم آبیاری شدند ومبارزه با علف‌های هرز و نیز سایر برای اطمینان از رشد طبیعی حذف شدند.

قسمت‌های شاخساره و برگ هر گیاه پس از برداشت از هر گلدان و قسمت ریشه هر بوته از خاک جدا و تمیز شدند. وزن خشک تمام قسمت‌های گیاه پس از خشک کردن در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت تعیین شد.

## اثر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک

اندازه‌گیری ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک شامل کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)[1]، تنفس ناشی از بستره (SIR)[2] و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (CAT)[3] (۱۷)، فسفومونواستراز قلیایی (ALP)[4]، فسفومونواستراز اسیدی (ACP)[5] و اوره‌آز (URE)[6] طبق روش الف و نانیپیری[7] (۱) در هر دوآزمایش انکوباسیونی و گلدانی تعیین شدند.

## تحلیل آماری

روش آنالیز واریانس دو طرفه (ANOVA) برای تجزیه و تحلیل اهمیت تیمارها (کمپوست غنی شده، TSP) و اثر متقابل آن‌ها و پاسخ متغیرهای وابسته خاک مورد استفاده قرار گرفت. مدل خطی عمومی (GLM) برای همسویی و توزیع نرمال استفاده شد (کوزاک و پیفو، ۲۰۱۸). مقادیر میانگین با استفاده از آزمون تعقیبی فیشر (LSD) در $P<۰/۰۵$ از هم جدا شدند. از نرم افزار آماری SPSS برای تجزیه و تحلیل داده ها استفاده شد.

1- Microbial biomass carbon (MBC)
2- Substrate-induced respiration (SIR)
3- Catalase (CAT)
4- Alkaline phosphomonoesterase (ALP)
5- Acid phosphomonoesterase (ACP)
6- Urease (URE)
7 - Alef and Nannipieri

## نتایج و بحث

### فسفر قابل جذب در خاک کشت‌شده و گرماگذاری‌شده

طی این آزمایش اثرات اصلی و متقابل کمپوست و کود TSP بر غلظت فسفر قابل جذب خاک‌های گرماگذاری و کشت‌شده معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) بود (جدول ۳). کمپوست ساده مقدار فسفر قابل جذب خاک کشت-شده و گرماگذاری‌شده را به ترتیب ۲۰ و ۱۱ درصد در مقایسه با خاک شاهد افزایش داد (جدول ۴). کمپوست غنی شده ۳۰ و ۲۴ درصد غلظت فسفر قابل جذب خاک کشت‌شده و گرماگذاری‌شده را به ترتیب در مقایسه با شاهد (C0P0) افزایش داد (جدول ۴). کود TSP در سطوح مختلف (۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) منجر به افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب در خاک کشت‌شده (به ترتیب ۴۰، ۵۰ و ۹۰ درصد) و گرماگذاری‌شده (به ترتیب ۲۶، ۴۱ و ۷۲ درصد) در مقایسه با خاک تیمار نشده (بدون کود و کمپوست) گردید (جدول ۴). همچنین استفاده همزمان از کمپوست و کود TSP اثر بیشتری بر فسفر قابل جذب خاک کشت‌شده و گرماگذاری‌شده داشت و به ترتیب منجر به افزایش ۱۳۰-۴۰ و ۱۰۴-۲۹ درصدی مقدار فسفر قابل جذب شد (جدول ۴).

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که افزودن کمپوست و کود TSP منجر به افزایش قابلیت دسترسی فسفر خاک شده ومقدار افزایش، متناسب با نوع کمپوست و سطح کود مصرفی بود (جدول ۴). استفاده از کمپوست در خاک می‌تواند دسترسی به عناصر غذایی گیاه را افزایش دهد (۱۳). کمپوست، با مواد مغذی به راحتی قابل دسترس، فعالیت و زیست توده میکروبی خاک را افزایش می‌دهند (جدول ۵). در نهایت، این ریزجانداران مواد مغذی بیش-تری را برای گیاه فراهم می‌کنند (۸). کاربرد همزمان کود آلی (کمپوست و بیوچار) و کود شیمیایی می‌تواند فسفر قابل دسترس (۳/۳ برابر نسبت به شاهد)، تعداد باکتری (۴/۱ برابر نسبت به شاهد) و قارچ (۲/۱ برابر نسبت به شاهد) و تنفس (۲/۸ برابر نسبت به شاهد) ریزجانداران را افزایش دهد (۱۷ و ۲۰).

**جدول(۳) نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثرات اصلی کمپوست (C) و کود TSP (P) و برهمکنش آنها بر برخی ویژگی‌های زیستی خاک و زیست‌توده ریشه، ساقه، برگ ذرت در خاک کشت شده و گرماگذاری شده**

**Table(3) ANOVA results (mean square values) of the main effects of compost (C) and TSP fertilizer (P); and their interactions (C×P) on some soil biological properties and maize's root, stem and leaf biomass in cultivated soil and incubated soil.**

| Variables | | C | P | C×P | Error | C.V |
|---|---|---|---|---|---|---|
| زیست‌توده گیاهی | df | 2 | 3 | 6 | 24 | |
| Plant biomass | Root ریشه | $4.52^{***}$(1.00) | $0.17^{***}$(0.97) | $0.01^{***}$(0.65) | 0.001 | 1.55 |
| | Stem ساقه | $26.1^{***}$(1.00) | $2.32^{***}$(0.98) | $0.06^{***}$(0.67) | 0.007 | 1.00 |
| | Leaf برگ | $3.16^{***}$(0.99) | $0.13^{***}$(0.94) | $0.01^{**}$(0.48) | 0.001 | 2.05 |
| خاک گرماگذاری شده | | | | | | |
| Incubated soil | MBC کربن زیست‌توده میکروبی | $39526^{***}$(1.0) | $3266^{***}$(1.00) | $34.6^{***}$(0.83) | 1.72 | 0.76 |
| | SIR تنفس ناشی از بستره | $3260^{***}$(1.00) | $531^{***}$(1.00) | $11.3^{***}$(0.96) | 0.124 | 0.57 |
| | $P_{ava}$ فسفر قابل دسترس | $11.1^{***}$(0.98) | $80.0^{***}$(1.00) | $0.71^{***}$(0.91) | 0.018 | 1.01 |
| | URE اوره‌آز | $13.0^{***}$(1.00) | $1.48^{***}$(0.98) | $0.16^{***}$(0.98) | 0.001 | 1.90 |
| | ALP فسفاتاز قلیایی | $9.56^{***}$(0.97) | $4.22^{***}$(0.96) | $0.33^{***}$(0.78) | 0.023 | 1.50 |
| | ACP فسفاتاز اسیدی | $1.98^{***}$(0.75) | $0.11^{ns}$(0.23) | $0.01^{ns}$(0.02) | 0.044 | 5.14 |
| | CAT کاتالاز | $206^{***}$(0.97) | $41.0^{***}$(0.90) | $3.07^{***}$(0.60) | 0.512 | 1.35 |
| خاک کشت شده | | | | | | |
| Cultivated soil | MBC کربن زیست‌توده میکروبی | $41583^{***}$(1.0) | $3416^{***}$(1.00) | $35.5^{***}$(0.86) | 1.44 | 0.66 |
| | SIR تنفس ناشی از بستره | $3776^{***}$(1.00) | $527^{***}$(0.99) | $11.4^{***}$(0.96) | 0.131 | 0.54 |
| | $P_{ava}$ فسفر قابل دسترس | $19.0^{***}$(1.00) | $139^{***}$(1.00) | $1.62^{***}$(0.98) | 0.007 | 0.53 |
| | URE اوره‌آز | $15.5^{***}$(0.99) | $1.65^{***}$(0.98) | $0.16^{***}$(0.98) | 0.001 | 1.62 |
| | ALP فسفاتاز قلیایی | $46.8^{***}$(0.99) | $1.48^{***}$(0.88) | $0.21^{***}$(0.68) | 0.032 | 1.48 |
| | ACP فسفاتاز اسیدی | $18.7^{***}$(1.00) | $0.09^{***}$(0.91) | $0.01^{ns}$(0.12) | 0.001 | 0.61 |
| | CAT کاتالاز | $346^{***}$(0.98) | $40.0^{***}$(0.91) | $3.11^{***}$(0.61) | 0.500 | 1.22 |

$^{ns}$، $^{*}$، $^{**}$، $^{***}$ غیرمعنی‌دار و معنی‌دار به ترتیب در سطح ۵، ۱، ۰٫۱٪. C.V ضریب تغییرات

$^{ns}$, $^{*}$, $^{**}$, $^{***}$ non-significant and significant at 5, 1, 0.1%, respectively. C.V. coefficient of variation

**جدول(٤) اثر کمپوست (C) و کود TSP (P) بر فسفر قابل جذب خاک ($P_{ava,}$ mg $kg^{-1}$) گرماگذاری‌شده و کشت‌شده. مقادیر میانگین (n=3) به همراه خطای معیار (SE) هستند.**

**Table (4) The effect of compost (C) and TSP fertilizer (P) on available phosphorus in incubated and cultivated soil. Values are mean (n=3) with standard error (SE) of the mean.**

| Compost treatments | TSP | | | |
|---|---|---|---|---|
| | P0 | P1 | P2 | P3 |
| گرماگذاری‌شده | | | | |
| Incubated | | | | |
| C0 | $9.16\pm0.76^{k}$ | $11.5\pm0.32^{hi}$ | $12.9\pm0.28^{f}$ | $15.8\pm0.32^{c}$ |
| C1 | $10.2\pm0.53^{j}$ | $11.8\pm0.43^{h}$ | $13.8\pm0.31^{e}$ | $16.9\pm0.29^{b}$ |
| C2 | $11.4+0.57^{i}$ | $12.2\pm0.41^{g}$ | $14.6\pm0.29^{d}$ | $18.7\pm0.32^{a}$ |
| کشت‌شده | | | | |
| Cultivated | | | | |
| C0 | $10\pm0.16^{j}$ | $14\pm0.20^{g}$ | $15\pm0.11^{f}$ | $19\pm0.16^{c}$ |
| C1 | $12\pm0.14^{i}$ | $14\pm0.17^{g}$ | $16\pm0.15^{e}$ | $21\pm0.09^{b}$ |
| C2 | $13\pm0.05^{h}$ | $15\pm0.16^{f}$ | $17\pm0.14^{d}$ | $23\pm0.11^{a}$ |

TSP(P0، ۰؛ P1، ۱۰؛ P2، ۴۰؛ P3 و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمپوست (کمپوست ساده، C1 و کمپوست غنی شده، C2). حروف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی داری بین تیمارها در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

TSP (P0, 0; P1, 10; P2, 40; P3 and 100 mg $kg^{-1}$) and compost (Simple compost, C1 and enriched compost, C2). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test.

## کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) خاک کشت‌شده و گرماگذاری‌شده

طی این آزمایش اثر اصلی کمپوست و کود TSP و برهمکنش دو جانبه کمپوست × کود TSP بر MBC خاک کشت‌شده و گرماگذاری‌شده معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) بود (جدول ۳).

در خاک تیمار نشده با کمپوست، سطح ۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم TSP به ترتیب افزایش ۱۶، ۳۵ و ۴۶ درصدی MBC خاک کشت‌شده را به همراه داشت (جدول ۵). همچنین سطوح مختلف کود TSP (۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به ترتیب باعث افزایش ۱۲، ۳۱ و ۴۴ درصدی MBC خاک گرماگذاری‌شده در مقایسه با خاک شاهد (C0P0) گردید (جدول ۵). این افزایش درسطوح بالاتر کود TSP بیشتر از سطوح پایین‌تر آن بود (جدول ۵). در خاک تیمار نشده با TSP، کمپوست ساده (C1) و غنی‌شده (C2) باعث افزایش ۷۱ و ۱۱۹ درصدی MBC در خاک کشت‌شده گردید (جدول ۵). کمپوست C1 و C2 افزایش ۶۶ و ۱۱۲ درصدی MBC را در خاک گرماگذاری‌شده در مقایسه با خاک شاهد (C0P0) به همراه داشت (جدول ۵). افزودن کمپوست و کود TSP به‌طور همزمان به خاک لسی مورد آزمایش در این پژوهش، باعث افزایش بیشتر MBC در خاک کشت‌شده (۷۷-۱۶۷ درصد) و گرماگذاری‌شده (۷۲-۱۵۵ درصد) در مقایسه با خاک تیمار نشده گردید (جدول ۵). نتایج نشان داد که بین کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس ناشی از بستره همبستگی مثبت و معنی‌دار (P<۰/۰۱، r=۰/۹۸) وجود داشت (جدول ۶). به بیان دیگر افزایش تنفس ناشی از بستره بر اثر کمپوست به دلیل افزایش زیست‌توده میکروبی است.

نتایج وانگ و همکاران[1] (۲۵) نشان داد که کمپوست با افزایش پایداری ساختار و مواد آلی خاک سبب افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک می‌شود. همچنین آنها نشان دادند که جمعیت باکتری‌ها و قارچ‌ها در تیمارهای کمپوست به طور قابل توجهی بیشتر از تیمارهای کود معدنی بود. زین-الدین و همکاران[2] (۲۷) بیان داشتند که کاربرد کود آلی همراه با ۳۰ درصد کود شیمیایی، تنوع زیستی میکروبی

1- Wang *et al.*
2- Zainuddin *et al.*

بیشتری را به همراه داشت. همچنین کود زیستی سازگار با محیط‌زیست همراه با مقدار کمی کود شیمیایی به رشد بهتر نخل روغنی، در دسترس بودن کافی مواد مغذی و حفظ ریزجانداران مفید در خاک کمک می‌کند (۲۷). طبق تحقیقات کومار و همکاران[1] (۱۵) کمپوست غنی شده با کود معدنی بالاترین مقدار فعالیت آنزیمی و زیست‌توده میکروبی در خاک را به همراه داشت (۱۵).

## تنفس ناشی از بستره خاک کشت‌شده و گرماگذاری‌شده

اثرات اصلی و متقابل کمپوست و کود TSP بر SIR خاک‌های گرماگذاری و کشت‌شده معنی‌دار ($P<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۳). کمپوست غنی‌شده (C2)، در مقایسه با کمپوست ساده (C1)، باعث افزایش بیشتر SIR در خاک کشت شده (۲۸ درصد) و گرماگذاری شده (۳۰ درصد) شد (جدول ۵). افزایش SIR در سطوح بالاتر TSP بسیار بیشتر از سطوح پایین‌تر مصرف کود TSP بود (جدول ۵). در مقایسه با تیمار شاهد (C0P0)، سطوح مختلف کود TSP (۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) SIR را در خاک کشت شده به ترتیب ۱۲، ۲۴، ۴۴ و در خاک گرماگذاری شده و ۱۶، ۲۹، ۶۰ درصد افزایش داد (جدول ۵). مطابق با نتایج، بیشترین مقادیرSIR (۹۳/۳ در خاک کشت‌شده و ۹۰/۵ در خاک گرماگذاری‌شده) و کمترین مقادیر (۴۰/۷ در خاک کشت‌شده و ۳۳/۸ در خاک گرماگذاری‌شده) به ترتیب در تیمارهای C2P3 و C0P0 بود (جدول ۵).

تجزیه و تحلیل همبستگی نشان داد که فعالیت میکروبی با فعالیت آنزیمی و فسفر قابل جذب در بین تیمارها همبستگی مثبت و معنی‌دار ($P<۰/۰۱$) داشت (جدول ۶). افزایش فعالیت آنزیم‌های مختلف در این تیمارها می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت میکروبی (جدول ۵) باشد.

فارس و آکابا[2] (۲۰) بیان داشتند که تنفس پایه در تیمارهای مورد استفاده در پژوهش آنها به ترتیب زیر کاهش یافت: کمپوست+بیوچار>فقط کمپوست>کود معدنی NPK + بیوچار> کود NPK معدنی> شاهد. یافته‌های آنها نشان داد که استفاده از کمپوست یا NPK به تنهایی ممکن است کیفیت خاک را بهبود بخشد، اما استفاده مشترک این کودها بسیار توصیه می‌شود.

1- Kumar *et al.*
2- Phares and Akaba

**جدول(۵) اثر کمپوست (C) و کود TSP (P) بر کربن زیست توده میکروبی (MBC) و تنفس ناشی از بستره (SIR). مقادیر میانگین (n=3) به همراه خطای معیار (SE) هستند.**

**Table (5) The effect of compost (C) and TSP fertilizer (P) on microbial biomass carbon (MBC) and substrate-induced respiration (SIR). Values are mean (n=3) with standard error (SE) of the mean.**

| Compost treatment | TSP | | | |
|---|---|---|---|---|
| | P0 | P1 | P2 | P3 |
| | | | گرماگذاری‌شده Incubated | |
| MBC (mg $CO_2$-C $kg^{-1}$ soil) کربن زیست‌توده میکروبی | | | | |
| C0 | 95.1±2.86$^{v}$ | 107±2.21$^{t}$ | 125±2.15$^{r}$ | 137±2.02$^{q}$ |
| C1 | 150±2.75$^{o}$ | 164±2.18$^{n}$ | 180±2.13$^{l}$ | 187±1.97$^{k}$ |
| C2 | 202±2.83$^{i}$ | 212±2.09$^{g}$ | 228±2.51$^{e}$ | 243±2.85$^{c}$ |
| SIR (mg C $kg^{-1}$ soil $h^{-1}$) تنفس ناشی از بستره | | | | |
| C0 | 33.8±1.12$^{v}$ | 39.4±0.13$^{u}$ | 43.5±1.30$^{s}$ | 54.1±1.12$^{p}$ |
| C1 | 55.3±0.98$^{o}$ | 56.6±0.97$^{n}$ | 65.3±1.15$^{j}$ | 69.2±1.13$^{i}$ |
| C2 | 72.3±1.02$^{h}$ | 73.2±1.11$^{g}$ | 79.6±1.13$^{e}$ | 90.5±1.09$^{b}$ |
| | | | کشت‌شده Cultivated | |
| MBC (mg $CO_2$-C $kg^{-1}$ soil) کربن زیست‌توده میکروبی | | | | |
| C0 | 101±2.19$^{u}$ | 117±1.95$^{s}$ | 136±2.34$^{q}$ | 148±2.13$^{p}$ |
| C1 | 173±2.57$^{m}$ | 179±2.42$^{l}$ | 198±2.18$^{j}$ | 206±2.45$^{h}$ |
| C2 | 222±2.13$^{f}$ | 231±2.34$^{d}$ | 253±2.57$^{b}$ | 270±2.02$^{a}$ |
| SIR (mg C $kg^{-1}$ soil $h^{-1}$) تنفس ناشی از بستره | | | | |
| C0 | 40.7±1.15$^{t}$ | 45.4±1.03$^{r}$ | 50.4±1.06$^{q}$ | 58.8±1.12$^{m}$ |
| C1 | 62.0±1.13$^{l}$ | 63.1±1.05$^{k}$ | 72.7±1.12$^{gh}$ | 77.5±1.10$^{f}$ |
| C2 | 79.4±1.11$^{e}$ | 80.4±1.15$^{d}$ | 84.4±1.04$^{c}$ | 93.3±1.09$^{a}$ |

TSP (P0، ۰؛ P1، ۱۰؛ P2، ۴۰؛ P3 و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمپوست (کمپوست ساده، C1 و کمپوست غنی شده، C2). حروف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی داری بین تیمارها در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

TSP (P0, 0; P1, 10; P2, 40; P3 and 100 mg $kg^{-1}$) and compost (Simple compost, C1 and enriched compost, C2). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test.

## فعالیت آنزیمی خاک کشت‌شده و گرماگذاری‌شده

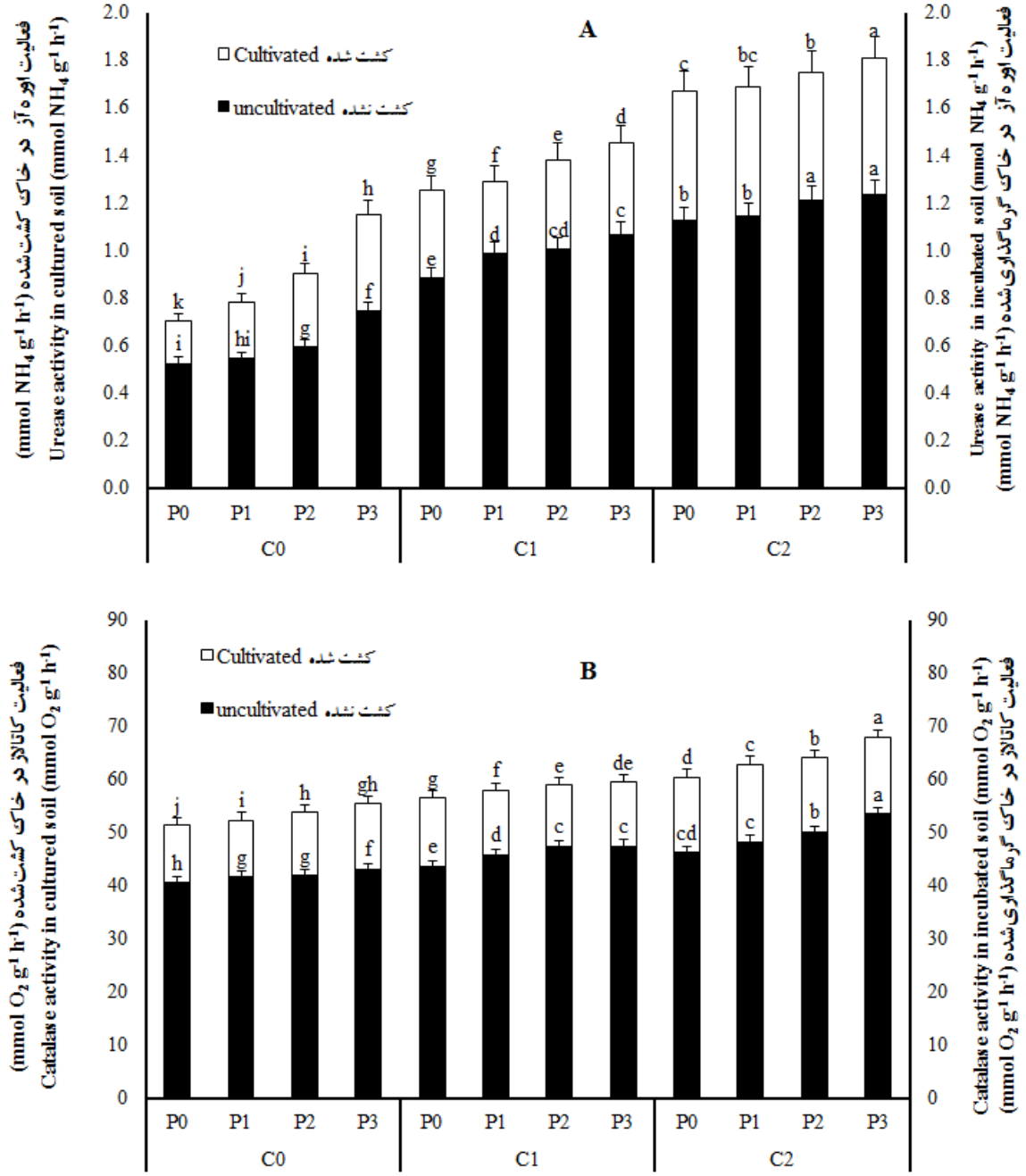
اثرات اصلی و اثرات دوجانبه کمپوست و کود TSP بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، اوره‌آز و فسفاتاز قلیایی خاک‌های گرماگذاری و کشت‌شده معنی‌دار (P<۰/۰۰۱) بود (جدول ۳).

در خاک تیمار نشده با کمپوست، استفاده از کود TSP در خاک کشت شده منجر به افزایش ۶۴-۱۱ درصدی آنزیم اوره‌آز و ۸-۲ درصدی کاتالاز شد. همچنین استفاده از این تیمار مقادیر فعالیت اوره‌آز و کاتالاز را خاک گرماگذاری‌شده به ترتیب و و در ۷۰-۴ و ۷-۳ درصد افزایش داد (شکل ۱). کاربردکود TSP در سطوح ۱۰ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی را در خاک کشت‌شده به ترتیب ۴-۲ و ۳-۲ درصد نسبت به خاک شاهد (C0P0) افزایش داد که این افزایش در برخی تیمارها معنی‌دار نبود (شکل ۲). در خاک گرماگذاری‌شده، استفاده از کود TSP در سطوح P1 و P2 به ترتیب افزایش ۹-۴ و ۵-۳ درصدی فسفاتاز قلیایی و اسیدی را نسبت به خاک شاهد C0P0) به همراه داشت (شکل ۲). کاربردکود TSP در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باعث کاهش آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی (۳ درصد) و اسیدی (۵ درصد) نسبت به خاک شاهد شد (شکل ۲). طبق نتایج با افزایش مقدار کود شیمیایی TSP در خاک

فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی کاهش یافت که مشابه با نتایج دفورست و مورهد[1] (۷) بود. آن‌ها نشان دادند که افزودن طولانی مدت کود فسفات به خاک، فعالیت فسفاتازهای خارج سلولی در تمام تیمارها (۲۳-۶۵٪) را کاهش داد (۷) که نشان‌دهنده کاهش سهم نسبی آنزیم با کاهش تقاضای فسفر است.

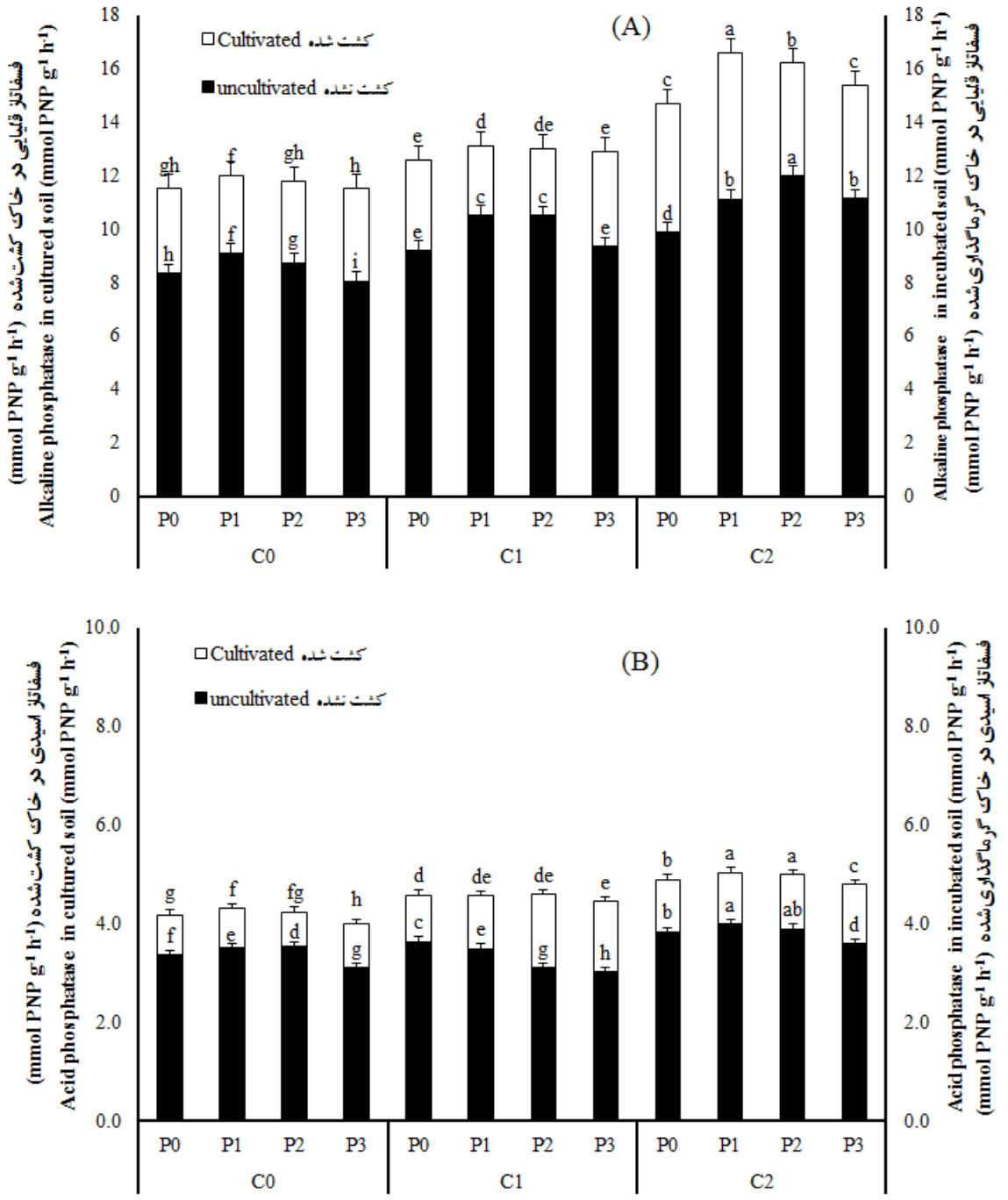
همچنین در خاک تیمار نشده با کود TSP، استفاده از کمپوست ساده و غنی شده در خاک کشت‌شده، مقادیر آنزیم‌های اوره‌آز، کاتالاز، فسفاتاز قلیایی و فسفاتاز اسیدی به ترتیب ۱۳۸-۷۹، ۱۸-۱۰، ۲۹-۹ و ۱۷-۹ نسبت به خاک تیمار نشده (C0P0) افزایش یافت (شکل ۱ و ۲). همچنین کمپوست ساده و غنی شده فعالیت آنزیم‌ها (آنزیم-های اوره‌آز، کاتالاز، فسفاتاز قلیایی و فسفاتاز اسیدی) را در خاک گرماگذاری‌شده افزایش (به ترتیب ۱۱۴-۶۹، ۱۴-۸، ۱۹-۱۰ و ۱۴-۸ درصد) داد. اثر افزایش فعالیت آنزیمی در خاک‌های تیمار شده با کمپوست غنی‌شده بیشتر از کمپوست ساده بود که احتمالا به دلیل مواد غذایی (اوره) و جمعیت بیشتر ریزجانداران در کمپوست غنی شده (با اوره و *استرپتومایسس*) بود. در این رابطه عمرا و همکاران (۱۸) نشان داد که کاربرد ترکیبی کمپوست و PGPR[2] باعث افزایش فعالیت آنزیمی و بهبود جذب عناصر غذایی گیاهی شد. برای مدیریت موثر کمپوست تولید شده از کاه زراعی، کاربرد ترکیبی تلقیح اکتینومیست و افزودن اوره به عنوان منبع نیتروژن می‌تواند برای تنظیم فعالیت آنزیمی و تجزیه لیگنوسلولز پیشنهاد شود (۲۶). در این پژوهش، تیمار همزمان خاک با کمپوست و TSP باعث فعالیت بیش‌تر آنزیم‌های خاک (فسفاتاز اسیدی ۲۱-۴، فسفاتاز قلیایی ۳۴-۱۴، اوره‌آز ۱۵۹-۵۴ و کاتالاز ۳۲-۱۳ درصد) شد (شکل ۱ و ۲). بیش‌ترین و کم-ترین فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و اوره‌آز به ترتیب در تیمار C2P3 و C0P0 مشاهده شد (شکل ۱) که مطابق با نتایج سوزا و همکاران[3] (۲۳) بود. آن‌ها دادند که در خاک تیمار شده با کمپوست‌های غنی-شده مانند فسفوکمپوست، فعالیت آنزیم خاک (دهیدروژناز $\mu g\ TPF\ g^{-1}\ 24\ hr^{-1}$ ۴۶/۳، آلکالین فسفاتاز $\mu\ g\ p\text{-nitrophenol}\ g^{-1}\ 24\ hr^{-1}$ ۱۶۳/۱، آریل سولفاتاز $\mu\ g\ p\text{-nitrophenol}\ g^{-1}\ 24\ hr^{-1}$ ۴۶/۶ و اوره‌آز $mg\ NH_4\text{-}N\ g^{-1}\ 24\ hr^{-1}$ ۵۶/۷) به طور قابل توجهی بیشتر از سایر تیمارها بود (۲۳). کمپوست غنی شده با کود آلی، کود معدنی و ریزجانداران مفید منجر به افزایش ویژگی‌های میکروبی و آنزیمی خاک گردید(۵). این نتایج نشان داد که بین زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد ($P<0/01$، جدول ۶). که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (۵؛ ۱۸ و ۱۴). خان و همکاران[4] (۱۴) نشان دادند که کمپوست غنی‌شده (سنگ فسفات + کود مرغ + *سودوموناس*) باعث شد تا مواد آلی ۰/۶۱ تا ۰/۷۰ درصد افزایش یافته و نیتروژن خاک از ۰/۰۴ به ۰/۰۹ درصد، فسفر قابل دسترس از ۲/۰۷ به ۳/۴۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و پتاسیم از ۱۰۰/۳ به ۱۲۹/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش پیدا نماید. همچنین pH خاک از ۷/۷۴ به ۷/۶۸ کاهش یافت.

1- Deforest and Moorhead
2- Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)
3-Souza *et al.*
4-Khan *et al.*




**شکل(۱) اثر کمپوست (C) و کود TSP (P) بر فعالیت اوره‌آز (A) و کاتالاز (B). TSP (P0، ۰؛ P1، ۱۰؛ P2، ۴۰؛ P3 و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمپوست (کمپوست ساده، C1 و کمپوست غنی‌شده، C2). خطوط عمودی به عنوان خطای استاندارد نشان داده شده است. حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌داری با آزمون LSD هستند (p <۰/۰۵).**

**Figure (1) The effect of compost (C) and TSP fertilizer (P) on urease (A) and catalase (B) activity. TSP (P0, 0; P1, 10; P2, 40; P3 and 100 mg $kg^{-1}$) and compost (Simple compost, C1 and enriched compost, C2). The vertical lines are standard error. Different letters represent significant differences by LSD test ($p \leq 0.05$).**




**شکل(۲) اثر کمپوست (C) و کود TSP (P) بر فسفاتازاسیدی (A) و فسفاتاز قلیایی (B). TSP (P0، ۰؛ P1، ۱۰؛ P2، ٤۰؛ P3 و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمپوست (کمپوست ساده، C1 و کمپوست غنی‌شده، C2). خطوط عمودی به عنوان خطای استاندارد نشان داده شده است. حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌داری با آزمون LSD هستند (p <۰/۰۵).**

**Figure (2) The effect of compost (C) and TSP fertilizer (P) acid phosphatase (A) and alkaline phosphatase (B) activity. TSP (P0, 0; P1, 10; P2, 40; P3 and 100 mg $kg^{-1}$) and compost (Simple compost, C1 and enriched compost, C2). The vertical lines are standard error. Different letters represent significant differences by LSD test ($p \leq 0.05$).**

**جدول (٦) ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین خواص خاک کشت شده (c) و گرماگذاری شده (i) و زیست‌توده ذرت به طور میانگین بین تیمارها در طول زمان گرماگذاری (n=۷۲).**

**Table (6) Pearson correlation coefficients (r) between cultivated (c) and incubated (i) soil properties and maize growth and biomass across treatments averaged over incubation time (n=72).**

| Properties ویژگی‌ها | Root | Stem | Leaf | $P_{ava}i$ | $P_{ava}c$ | MBCi | MBCc | SIRi | SIRc | UREi | UREc | CATi | CATc | ALPi | ALPc | ACPi | ACPc |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Root | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stem | $0.99^{**}$ | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Leaf | $0.96^{**}$ | $0.92^{**}$ | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | |
| $P_{ava}i$ | - | - | - | 1.00 | | | | | | | | | | | | | |
| $P_{ava}c$ | $0.60^{**}$ | $0.68^{**}$ | $0.60^{**}$ | $0.99^{*}$ | 1.00 | | | | | | | | | | | | |
| MBCi | - | - | - | $0.59^{**}$ | $0.57^{**}$ | 1.00 | | | | | | | | | | | |
| MBCc | $0.99^{**}$ | $0.99^{**}$ | $0.94^{**}$ | $0.57^{**}$ | $0.55^{**}$ | $1.00^{**}$ | 1.00 | | | | | | | | | | |
| SIRi | - | - | - | $0.68^{**}$ | $0.67^{**}$ | $0.98^{**}$ | $0.98^{**}$ | 1.00 | | | | | | | | | |
| SIRc | $0.97^{**}$ | $0.98^{**}$ | $0.94^{**}$ | $0.66^{**}$ | $0.65^{**}$ | $0.99^{**}$ | $0.99^{**}$ | $1.00^{**}$ | 1.00 | | | | | | | | |
| UREi | - | - | - | $0.60^{**}$ | $0.59^{**}$ | $0.97^{**}$ | $0.95^{**}$ | $0.96^{**}$ | $0.97^{**}$ | 1.00 | | | | | | | |
| UREc | $0.95^{**}$ | $0.96^{**}$ | $0.93^{**}$ | $0.59^{**}$ | $0.58^{**}$ | $0.97^{**}$ | $0.91^{**}$ | $0.96^{**}$ | $0.91^{**}$ | $1.00^{**}$ | 1.00 | | | | | | |
| CATi | - | - | - | $0.70^{*}$ | $0.69^{**}$ | $0.95^{**}$ | $0.96^{**}$ | $0.98^{**}$ | $0.97^{**}$ | $0.94^{**}$ | $0.93^{**}$ | 1.00 | | | | | |
| CATc | $0.96^{**}$ | $0.97^{**}$ | $0.94^{**}$ | $0.63^{ns}$ | $0.60^{**}$ | $0.94^{**}$ | $0.98^{**}$ | $0.97^{**}$ | $0.98^{**}$ | $0.93^{**}$ | $0.87^{**}$ | $0.99^{**}$ | 1.00 | | | | |
| ALPi | - | - | - | $-0.3^{ns}$ | $-0.2^{**}$ | $0.50^{**}$ | $0.50^{**}$ | $0.37^{*}$ | $0.39^{*}$ | $0.39^{**}$ | $0.40^{*}$ | $0.32^{*}$ | $0.42^{*}$ | 1.00 | | | |
| ALPc | $0.92^{**}$ | $0.89^{**}$ | $0.82^{**}$ | $0.18^{ns}$ | $0.20^{ns}$ | $0.88^{**}$ | $0.88^{**}$ | $0.80^{**}$ | $0.82^{**}$ | $0.84^{**}$ | $0.84^{**}$ | $0.76^{**}$ | $0.83^{**}$ | $0.80^{**}$ | 1.00 | | |
| ACPi | - | - | - | $0.39^{*}$ | $0.37^{*}$ | $0.87^{**}$ | $0.85^{**}$ | $0.85^{**}$ | $0.85^{**}$ | $0.83^{**}$ | $0.85^{**}$ | $0.88^{**}$ | $0.38^{*}$ | $0.37^{*}$ | $0.74^{**}$ | 1.00 | |
| ACPc | $0.96^{**}$ | $0.93^{**}$ | $0.90^{**}$ | $0.26^{ns}$ | $0.26^{ns}$ | $0.93^{**}$ | $0.94^{**}$ | $0.88^{**}$ | $0.89^{**}$ | $0.90^{**}$ | $0.90^{**}$ | $0.84^{**}$ | $0.72^{**}$ | $0.69^{**}$ | $0.97^{**}$ | $0.81^{**}$ | 1.00 |

$^{ns}$، $^{*}$، $^{**}$ غیرمعنی‌دار و معنی‌دار به ترتیب در سطح ۵ و ۱٪. Root ، زیست‌توده ریشه؛ Stem، زیست‌توده ساقه؛ Leaf، زیست‌توده برگ؛ $P_{ava}$، فسفر قابل جذب؛ MBC، کربن زیست‌توده میکروبی؛ SIR، تنفس ناشی از بستره. URE، فعالیت اوره‌آز. CAT، فعالیت کاتالاز؛ ALP، فعالیت فسفاتاز قلیایی؛ ACP، فعالیت اسید فسفاتاز.

$^{ns}$, $^{*}$, $^{**}$ non-significant and significant at 5, 1%, respectively. Root, root biomass; Stem, stem biomass; Leaf, leaf biomass; $P_{ava}$, available phosphorus; MBC, microbial biomass carbon; SIR, substrate-induced respiration; URE, urease activity; CAT, catalase activity; ALP, alkaline phosphatase activity; ACP, acid phosphatase activity.

## زیست‌توده گیاه ذرت

طی این آزمایش اثر اصلی کمپوست و کود TSP و برهمکنش دو جانبه کمپوست × TSP بر زیست‌توده گیاه ذرت معنی‌دار ($p<۰/۰۰۱$) بود (جدول ۳). کمپوست غنی شده (C2)، در مقایسه با کمپوست ساده (C1)، باعث افزایش بیشتر زیست‌توده ریشه (۳۷ درصد)، زیست‌توده ساقه (۱۶ درصد) و زیست‌توده برگ (۵۷ درصد) شد (جدول ۷). افزایش رشد گیاه و زیست‌توده در سطوح بالاتر TSP بسیار بیش‌تر بود (جدول ۷). در مقایسه با تیمار شاهد (C0P0)، سطوح مختلف کود TSP (۱۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) زیست‌توده ریشه، ساقه و برگ را به ترتیب ۱۴-۲۵، ۱۱-۱۹ و ۱۶-۳۲ درصد افزایش داد (جدول ۷). تیمار C2P3 باعث افزایش معنی‌دار زیست‌توده ریشه (۱۲۹ درصد)، زیست-توده ساقه (۷۷ درصد)، زیست‌توده برگ (۱۵۳ درصد) در مقایسه با شاهد (C0P0) شد (جدول ۷). مطابق با نتایج، بیشترین و کمترین زیست‌توده گیاهی به ترتیب در تیمارهای C2P3 و C0P0 بود (جدول ۷).

تجزیه و تحلیل همبستگی نشان داد که رشد گیاه ذرت با تنفس میکروبی ($r=۰/۹۴$ ،$P<۰/۰۱$) و فسفر قابل جذب ($r=۰/۵۰$ ،$P<۰/۰۱$ ) همبستگی مثبت داشت (جدول ۶). افزایش رشد گیاه در این تیمارها می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت میکروبی (جدول ۵) و آنزیمی (شکل ۱ و ۲) باشد که منجر به افزایش عناصر غذایی (جدول ۴) برای رشد ذرت در خاک مورد بررسی شده است. کمپوست با افزایش عناصر غذایی باعث افزایش جمعیت ریزجانداران خاک و رشد و عملکرد گیاه می‌شود (۸). دسترسی بیشتر به عناصر غذایی با استفاده همزمان از کودهای آلی و معدنی منجر به افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه و در نهایت منجر به تولید بیشتر ماده خشک و افزایش عملکرد محصول می‌شود (۱۳). استفاده همزمان از کمپوست و کود شیمیایی با بهبود ویژگی-های فیزیکی و شیمیایی خاک منجر به افزایش بیشتر رشد و عملکرد محصول شد (۲۰).

**جدول(۷) اثر کمپوست (C) و کود TSP (P) بر زیست‌توده ریشه، ساقه و برگ. مقادیر میانگین (n=3) به همراه خطای معیار (SE) هستند.**

**Table (7) The effect of compost (C) and TSP fertilizer (P) on root biomass, stem biomass and leaf biomass. Values are mean (n=3) with standard error (SE) of the mean.**

| کمپوست Compost | TSP (mg kg$^{-1}$) P0 | P1 | P2 | P3 |
|---|---|---|---|---|
| Root biomass (g) زیست‌توده ریشه (g) | | | | |
| C0 | 1.24±0.01$^{l}$ | 1.41±0.01$^{k}$ | 1.46±0.01$^{j}$ | 1.55±0.08$^{i}$ |
| C1 | 1.85±0.01$^{h}$ | 2.02±0.01$^{g}$ | 2.12±0.01$^{f}$ | 2.24±0.01$^{e}$ |
| C2 | 2.53±0.01$^{d}$ | 2.55±0.01$^{c}$ | 2.70±0.01$^{b}$ | 2.80±0.01$^{a}$ |
| Stem biomass (g) زیست‌توده ساقه (g) | | | | |
| C0 | 6.11±0.16$^{l}$ | 6.80±0.01$^{k}$ | 7.05±0.07$^{j}$ | 7.30±0.10$^{i}$ |
| C1 | 7.92±0.08$^{h}$ | 8.62±0.04$^{g}$ | 8.82±0.07$^{f}$ | 9.10±0.01$^{e}$ |
| C2 | 9.20±0.07$^{d}$ | 9.42±0.06$^{c}$ | 9.93±0.03$^{b}$ | 10.4±0.13$^{a}$ |
| Leaf biomass (g) زیست‌توده برگ (g) | | | | |
| C0 | 0.94±0.01$^{l}$ | 1.09±0.04$^{k}$ | 1.20±0.01$^{j}$ | 1.24±0.01$^{i}$ |
| C1 | 1.27±0.01$^{h}$ | 1.33±0.01$^{g}$ | 1.39±0.02$^{f}$ | 1.56±0.10$^{e}$ |
| C2 | 1.99±0.01$^{d}$ | 2.06±0.01$^{c}$ | 2.13±0.01$^{b}$ | 2.27±0.01$^{a}$ |

TSP (P0، ۰؛ P1، ۱۰؛ P2، ۴۰؛ P3 و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمپوست (کمپوست ساده، C1 و کمپوست غنی شده، C2). حروف مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی داری بین تیمارها در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

TSP (P0, 0; P1, 10; P2, 40; P3 and 100 mg kg$^{-1}$) and compost (Simple compost, C1 and enriched compost, C2). Similar letters indicate no significant differences among treatments at 5% level according to the LSD test.

## نتیجه‌گیری

تمام ویژگی‌های میکروبی و بیوشیمیایی (فسفر قابل جذب، کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس ناشی از بستره و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی، فسفاتاز قلیایی، کاتالاز و اوره‌آز) اندازه‌گیری شده به کاربرد کمپوست غنی‌شده پاسخ مثبت دادند. در تمامی تیمارها کمپوست غنی شده تأثیر مثبت بیش‌تری نسبت به کمپوست ساده بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده داشت. با این حال، اثرات کمپوست بر ویژگی‌های خاک با توجه به مقدار کود فسفرمصرفی، تفاوت قابل توجهی داشت. کمپوست باعث افزایش رشد ذرت و غلظت فسفر قابل جذب در خاک شد. همچنین زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های خاک کشت‌شده و گرماکذاری شده به طور معنی‌داری افزایش یافت. این افزایش در تیمار همزمان کمپوست و TSP، بیش از اثر آن‌ها به تنهایی بود. در بین تیمارها، تیمار C2P3 بهترین اثر را بر ویژگی‌های میکروبی (تنفس ناشی از بستره و کربن زیست‌توده میکروبی) و آنزیمی (اوره‌آز و کاتالاز) خاک داشت که منجر به بیش‌ترین زیست‌توده گیاهی شد. همچنین کاربرد کمپوست و کود TSP در خاک کشت-شده تاثیر بیش‌تری بر فعالیت و زیست‌توده میکروبی خاک نسبت به خاک گرماگذاری‌شده داشت. بنابراین، کاربرد ترکیبی کمپوست و کود TSP می‌تواند یک گزینه موثر و سازگار با محیط‌زیست برای بهبود رشد ذرت در خاک لسی مورد مطالعه در این تحقیق باشد.

## References

1. Alef, K., and Nannipieri, P. 1995. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press. 550p.

2. Ali, S., and Ahmed, H.R. 2016. Comparative effects of different soil conditioners on wheat growth and yield grown in saline-sodic soils. Sains Malay, 45:339-346.

3. Andrade, F., Fernandes, F., Júnior, A.O., Rondina, A.B.L., Hungria, M., and Nogueira, M.A. 2021. Enrichment of organic compost with beneficial microorganisms and yield performance of corn and wheat. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, 25: 332-339.

4. Andrade, F.C., Bosco, T.C., Michels, R.N., Brigano, C., and Santos, E.L. 2018. Treatment of organic solid waste generated at agricultural research corporation via composting under natural and controlled conditions. Acta Scientiarum Technology, 40: 29643.

5. Billah, M., Khan, M., Bano, A., Nisa, S., Hussain, A., Dawar, K., Munir, A., and Khan, N. 2020. Rock Phosphate-Enriched Compost in Combination with Rhizobacteria; A Cost-Effective Source for Better Soil Health and Wheat (*Triticum aestivum*) Productivity, Agronomy, 10:1390.

6. Chen, Q., Deng, X., Elzenga, J.T.M., and Elsas, J.D.V. 2022. Effect of soil bacteriomes on mycorrhizal colonization by *Rhizophagus irregularis*—interactive effects on maize (*Zea mays* L.) growth under salt stress. Biology and Fertility of Soils, 58: 515-525.

7. Deforest, J., and Moorhead, D. 2020. Effects of elevated pH and phosphorus fertilizer on soil C, N and P enzyme stoichiometry in an acidic mixed mesophytic deciduous forest. Soil Biology and Biochemistry, 150:107996.

8. Dinca, L., Grenni, P., Onet, C., and Onet, A. 2022. Fertilization and Soil Microbial Community: A Review. Applied Sciences, 12: 1198.

9. Essel, B., Abaidoo, R.C., Opoku, A., and Ewusi-Mensah, N. 2020. Economically optimal rate for nutrient application to maize in the semi-deciduous forest zone of Ghana. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 20: 1703-1713.

10. Farshadirad, A., Dordipour, E**.,** khormali, F, and kiani, F. 2011. Potassium forms in soil and its separates in some loess and loess-like soils of Golestan providence. Journal of Water and Soil Conservation, 18:1-16. (In Persian with English abstract)

11. Ghorbani-Nasrabadi, R., Greiner, R., Mayer-Miebach, E. and Menezes-Blackburn, D. 2023. Phosphate solubilizing and phytate degrading *Streptomyces* isolates stimulate the growth and P accumulation of maize (*Zea mays*) fertilized with different phosphorus sources. Geomicrobiology Journal, 40 (4) 325-336.

12. Hanif, N.Q., and Akhtar, N. 2020. Nutritional evaluation of maize plant fodder grown in spring and autumn season in Punjab, Pakistan. Journal of Bioresource Management, 7: 74-93.

13. Imran, and Amanullah. 2022. Phosphorus biofortification and uptake in maize enhanced with integrated phosphorus management. Phosphorus biofortification and uptake in maize enhanced with integrated phosphorus management, Phosphorus Sulfur Silicon Relat, 197: 766-776.

14. Khan, H., Akbar, W., Shah, Z., Rahim, H., Taj, A., and Alatalo, J. 2022. Coupling phosphate-solubilizing bacteria (PSB) with inorganic phosphorus fertilizer improves mungbean (*Vigna radiata*) phosphorus acquisition, nitrogen fixation, and yield in alkaline-calcareous soil. Heliyon, 8: 09081.

15. Kumar, B., Rani, R., Latha, P., Surekha, K., Prasad Babu, M.B.B., Sailaja N., and Babu V. 2016. Effect of mineral enriched compost on soil microbiological properties. Progressive Research – An International Journal, 11: 64-65.

16. Li, J., Mavrodi, D.V., and Dong, Y. 2020. Effect of rock dust-amended compost on the soil properties, soil microbial activity, and fruit production in an apple orchard from the Jiangsu province of China. Archives of Agronomy and Soil Science, 67: 1313-1326.

17. Liu, J., Xie, J., Chu, Y., Sun, Ch., Chen, Ch., and Wang, Q. 2008 Combined effect of cypermethrin and copper on catalase activity in soil. Journal of Soils and Sediments, 8:327-332.

18. Omara, A., Hafez, E., Osman, H., Rashwan, E., El-Said, M., Alharbi, K., El-Moneim, D., and Gowayed, S. 2022. Collaborative impact of compost and beneficial rhizobacteria on soil properties, physiological attributes, and productivity of wheat subjected to deficit irrigation in salt affected soil. Plants, 11: 877.

19. Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. 1982. Methods of Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. In Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. 1159p.

20. Phares, C.A., and Akaba, S. 2022. Co-application of compost or inorganic NPK fertilizer with biochar influenced soil quality, grain yield and net income of rice. Journal of Integrative Agriculture, 21: 3600-3610.

21. Santos, C., Fonseca, J., Coutinho, J., Trindade, H., and Jensen, L.S. 2021. Chemical properties of agro-waste compost affect greenhouse gas emission from soils through changed C and N mineralization. Biology and Fertility of Soils, 57: 781-792.

22. Sharifi Garmdareh, J., Khormali, F., Keh, M., Rolf, C., Shahriari, A., and Frechen, M. 2018. Grain size and mineralogy variations along the climatic gradient on the surface loess-derived soils in northern iran. Journal of Water and Soil, 32:723-736. (In Persian with English abstract)

23. Souza, A., Deshmukh, P.W., and Bhoyar, S.M. 2017. Effect of Enriched Composts on Rhizosphere Soil Enzymatic Activity of Soybean in Vertisols. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 6: 105-111.

24. Tabbasum, S., Akhtar, M., Sarwar, N., Tipu, M., Ikram, W., Ashraf, A., Ejaz, A., Murtaza, B., and Khan, M. 2020. Relative Effectiveness of Phosphorus and Potassium Along with Compost and Organic Acids on Maize Crop Grown in Calcareous Soil: a Multivariate Analysis. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21: 437-449.

25. Wang, D., Sayre, J.S., Fonte, S.J., Scow, K., Lin, J.Y., Schmidt, R., and Rodrigues, J.L.M. 2022. Compost amendment maintains soil structure and carbon storage by increasing available carbon and microbial biomass in agricultural soil – A six-year field study. Geoderma, 427: 116117.

26. Wei, Y., Wu, D., Wei, D., Zhao, Y., Wu, J., Xie, X., Zhang, R., and Wei, Z. 2019. Improved lignocellulose-degrading performance during straw composting from diverse sources with actinomycetes inoculation by regulating the key enzyme activities. Bioresource Technology, 271: 66-74.

27. Zainuddin, N., Keni, M.F., Syed Ibrahim, S. A., and Masri, M.M. 2022. Effect of integrated biofertilizers with chemical fertilizers on the oil palm growth and soil microbial diversity. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 39: 102237.