

The effect of sewage sludge application on soil phosphatase activity and nutrients uptake by maize plant inoculated with symbiotic fungi

Seyedeh Soror Hoseini¹, Roya Zalaghi^{*2}, Naeimeh Enayatizamir³,
Mohammad Feizian⁴

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: s.hoseini6768@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: r.zalaghi@scu.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: n.enayatizamir@scu.ac.ir
4. Associate Prof., Dept. of Soil Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: feizian.m@lu.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 12.21.2022

Revised: 09.27.2023

Accepted: 09.30.2023

Keywords:

Biological properties of soil,
Micro-nutrients,
Mycorrhizal fungi,
Phosphorus,
Refined sewage sludge

ABSTRACT

Background and Objectives: Due to the low amount of rainfall and vegetation and the low use of organic fertilizers, Iran's soils have a low amount of organic matter, which affects the quantity and quality of agricultural products. Sewage sludge is an organic waste that is used as fertilizer in agriculture in some areas and can both improve the physical and chemical properties of the soil and increase the concentration of macro- and micro-nutrients that are essential for plant growth. Maize, *Zea mays*, is a tropical and subtropical four-carbon plant that is one of the most important grains in the world and has high nutritional requirements. Plant inoculation with symbiotic microorganisms, especially roots symbiotic fungi, could increase the ability of plants to absorb water and nutrients better, fight against environmental stresses, and improve plant growth and health. Therefore, in the present study, the effects of sewage sludge application adjusted by inoculation with root endophytic fungi in maize cultivation on the uptake of some micronutrients and phosphorus was investigated.

Materials and Methods: A surface soil sample (0 to 30 cm) was prepared from the agricultural farm of Lorestan University. A factorial experiment in the form of a completely randomized design including soil microbial inoculation at three levels (no inoculation, inoculation with *Rhizophagos intraradices*, and inoculation with *Serendipita indica*) and sewage sludge (zero and 2 percent; w/w) was performed in three replicates under greenhouse conditions. Maize seeds were grown in 4 kg pots, and after three months, the concentration of phosphorus, copper, zinc, iron and manganese elements in the shoot and root of the plant were measured. Also, some microbial characteristics (respiration, microbial carbon biomass, and acid and alkaline phosphatase activity) were measured in the soil.

Results: The results showed the positive effect of both applications of sewage sludge and microbial inoculation on the concentration of elements in the plant. Biological parameters significantly increased ($P < 0.05$) with the application of 2% sewage sludge: soil respiration (33%), microbial carbon biomass (38%), acid phosphatase (35%), and alkaline phosphatase (6.5%). Also, fungal inoculation significantly increased the concentration

of phosphorus and micro-nutrients in the roots and shoots of the plant. There were no significant differences between the applications of the two symbiotic fungi; the only exception was the Zn concentration of root that was higher in treatments inoculated with *R. intraradices* than in treatments inoculated with *S. indica*. There was a positive correlation between available phosphorus with soil organic matter, plant biomass, and acid and alkaline phosphatase activity.

Conclusion: The results showed the positive effect of using purified sewage sludge at the level of two percent and inoculation of root endophytic fungi in the uptake of phosphorus and micronutrients by the plant, improving plant growth characteristics and improving soil biological characteristics such as microbial carbon biomass and phosphatase enzyme activity. Inoculation with both symbiosis fungi was similar, but regarding this point, the reproduction of *S. indica* is simpler, so it is recommended as a plant-promoting fungus that could reduce the application of P fertilizers and help the plant to uptake more P from soil. In this research, refined sewage sludge was used in low content (2%), so it is essential to pay attention to the application of unrefined or higher amounts of sewage sludge that may result in microbial contamination or future problems.

Cite this article: Hoseini, Seyedeh Soror, Zalaghi, Roya, Enayatizamir, Naeimeh, Feizian, Mohammad. 2024. The effect of sewage sludge application on soil phosphatase activity and nutrients uptake by maize plant inoculated with symbiotic fungi. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13 (4), 97-114.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20898.2086

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر فعالیت فسفاتاز خاک و برداشت عناصر توسط گیاه ذرت مایه‌زنی شده با قارچ‌های همزیست

سیده سرور حسینی^۱، رویا زلقی^{۲*}، نعیمه عنایتی ضمیر^۳، محمد فیضیان^۴

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: hoseini6768@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: r.zalaghi@scu.ac.ir

۳. دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: n.enayatzamir@scu.ac.ir

۴. دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: feizian.m@lu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	سابقه و هدف: به دلیل کم بودن میزان بارش و پوشش گیاهی و نیز استفاده کم از کودهای آلی، خاک‌های ایران دارای مقدار ماده آلی پایینی بوده که کمیت و کیفیت تولیدات کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لجن فاضلاب پسماندی آلی است که در برخی مناطق به عنوان کود در کشاورزی استفاده می‌شود و می‌تواند سبب بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شود و هم‌چنین باعث افزایش غلظت عناصر غذایی ضروری پرمصرف و کم‌مصرف موردنیاز برای رشد گیاه می‌شود. ذرت با نام علمی <i>Zea mays</i> گیاهی C4 و گرمسیری و نیمه گرمسیری است که یکی از مهم‌ترین غلات دنیا بوده و نیاز غذایی بالایی نیز دارد. تلقیح گیاه با ریزجانداران همزیست به‌ویژه قارچ‌های همزیست ریشه، توانایی گیاهان را برای جذب بهتر آب و مواد غذایی و مبارزه با تنش‌های محیطی افزایش داده و باعث بهبود رشد و سلامت گیاه می‌شود. از این رو در مطالعه حاضر تأثیر قارچ‌های همزیست ریشه در کشت ذرت بر جذب برخی عناصر ریزمغذی و فسفر با افزودن لجن فاضلاب تصفیه شده بررسی شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰	
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸	
واژه‌های کلیدی:	
عناصر ریزمغذی، فسفر، قارچ میکوریز، لجن تصفیه شده، ویژگی‌های زیستی خاک	
	مواد و روش‌ها: یک نمونه خاک سطحی از مزرعه کشاورزی دانشگاه لرستان تهیه شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل (۱) تلقیح میکروبی خاک در سه سطح (بدون مایه‌زنی، مایه‌زنی با <i>Rhizophagos intraradices</i> و مایه‌زنی با <i>Serendipita indica</i>) و (۲) لجن فاضلاب (صفر و دو درصد وزنی) در سه تکرار تحت شرایط گلخانه‌ای اجرا گردید. بذر ذرت در گلدان‌های ۴ کیلوگرمی کشت شد و بعد از ۳ ماه، مقدار غلظت عناصر فسفر، مس، روی، آهن و منگنز در اندام هوایی و ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. هم‌چنین برخی ویژگی‌های میکروبی (تنفس پایه و کربن زیتوده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی) در خاک اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزودن لجن و مایه‌زنی قارچی بر غلظت عناصر در گیاه بود. پارامترهای بیولوژیک خاک با افزودن ۲ درصد لجن به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به خاک بدون لجن افزایش یافتند: تنفس خاک (۳۳ درصد)، کربن زیتوده میکروبی (۳۸ درصد) و فعالیت فسفاتاز اسیدی (۳۵ درصد) و قلیایی (۶/۵ درصد). همچنین تلقیح قارچی به‌طور معنی‌داری موجب افزایش غلظت فسفر و عناصر ریزمغذی در ریشه و اندام هوایی گیاه شد. میان دو قارچ تفاوت معنی‌داری دیده نشد تنها در مورد غلظت روی در ریشه، گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ *R. intraradices* نسبت به *S. indica* غلظت بالاتری را نشان دادند. همبستگی مثبتی بین فسفر قابل دسترس با ماده آلی خاک، زیتوده گیاه و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی وجود داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از لجن فاضلاب تصفیه شده در سطح دو درصد و نیز مایه‌زنی قارچ‌های همزیست ریشه در جذب فسفر و عناصر ریزمغذی به گیاه و بهبود ویژگی‌های رشدی گیاه و نیز بهبود ویژگی‌های بیولوژیک خاک مانند کربن زیتوده میکروبی و فعالیت آنزیم فسفاتاز شد. هر دو قارچ عملکرد مشابه و خوبی داشتند ولی با توجه به این‌که تکثیر *S. indica* راحت‌تر می‌باشد توصیه می‌شود از این قارچ به عنوان محرک رشد گیاه و کمک‌کننده به جذب فسفر بهره‌گیری شود و مصرف کود فسفره کم شود. در این پژوهش از لجن تصفیه شده فاضلاب در مقدار کم (۲ درصد) استفاده شده و باید دقت نمود که استفاده از لجن تصفیه نشده و مقادیر بالاتر لجن ممکن است خطر آلودگی میکروبی و مشکلات مربوط به خود را داشته باشد.

استناد: حسینی، سیده سرور، زلفی، رویا، عنایتی ضمیر، نعیمه، فیضیان، محمد (۱۴۰۲). تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر فعالیت فسفاتاز خاک و برداشت عناصر توسط گیاه ذرت مایه‌زنی شده با قارچ‌های همزیست. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۳ (۴)، ۹۷-۱۱۴.

DOI: 10.22069/EJSMS.2024.20898.2086



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

امروزه ذرت با نام علمی *Zea mays* بعد از گندم و برنج مهم‌ترین ماده غذایی دنیا محسوب می‌شود. گیاهی C4 و گرمسیری تا نیمه گرمسیری است که در مناطق معتدل نیز عملکرد خوبی دارد (۱). ذرت سهم بزرگی در تغذیه انسان، دام و طیور در ایران ایفا می‌کند (مصرف ۹ میلیون تن ذرت دانه‌ای در سال)؛ در حالی که بخش بزرگ ذرت مصرفی وارداتی بوده و سهم تولید داخلی بسیار کوچک (۱/۲ میلیون تن در سال) می‌باشد (۲). بهبود تغذیه گیاه و افزایش تولید در واحد سطح می‌تواند به افزایش تولید داخلی منجر شود. بدین منظور از راهکارهای متفاوتی می‌توان استفاده کرد که از جمله آن‌ها استفاده از لجن فاضلاب و نیز استفاده از ریزجانداران همزیست ریشه به منظور بهبود جذب عناصر غذایی توسط گیاه می‌باشند.

لجن فاضلاب پسمانده‌ای آلی است که هم می‌تواند سبب بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شود و هم باعث افزایش غلظت عناصر غذایی ضروری پر مصرف و کم مصرف مورد نیاز برای رشد گیاه می‌شود (۳). لجن فاضلاب، مواد جامدی است که در روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب از طریق جداسازی مواد جامد از مایع، ترسیب شیمیایی و فعل و انفعالات بیولوژیکی در تصفیه خانه‌های فاضلاب به دست می‌آید و در حقیقت نوعی ضایعات مهم در فرآیند تصفیه است (۴). لجن بر حسب نوع فاضلاب ممکن است حاوی مواد آلی (مانند هیدروکربن‌ها، پروتئین‌ها و چربی‌ها)، فلزات سنگین و عوامل کودی باشد (۵ و ۶). امروزه از این ماده در خاک‌های کشاورزی به عنوان یک کود آلی سرشار از کربن آلی و عناصر غذایی مختلف مثل فسفر استفاده می‌شود (۷). لجن فاضلاب علاوه بر این که بر خواص شیمیایی خاک مانند pH، مواد آلی، هدایت الکتریکی و غلظت عناصر غذایی خاک اثر می‌گذارد، موجب بهبود

و پایداری ساختمان خاک و افزایش نفوذپذیری خاک نیز می‌گردد (۸).

برخی باکتری‌ها و قارچ‌ها می‌توانند با گیاهان همزیستی ایجاد نموده و با مکانیسم‌های گوناگون سبب رشد بهتر گیاه شوند و این گونه همزیستی هم برای ریزجاندار و هم برای گیاه سودمند می‌باشد. قارچ‌هایی مانند *Rhizophagos intraradices* (میکوریز) و *Serendipita indica* (اندوفیت) با ریشه اکثر گیاهان زراعی همزیستی مسالمت‌آمیزی داشته و تلقیح گیاه با این ریزجانداران همزیست، توانایی آن‌ها را برای جذب بهتر آب و مواد غذایی و مبارزه با تنش‌های محیطی افزایش داده و باعث بهبود رشد و سلامت گیاه می‌شود (۹). در این همزیستی گیاه کربن را در اختیار قارچ قرار داده و قارچ با دسترسی به فضای بیش‌تری از خاک در جذب عناصر، به‌ویژه فسفر، به گیاه کمک می‌کند. این قارچ‌ها هم‌چنین می‌توانند سبب بهبود جذب پتاسیم، منیزیم، مس و روی در خاک‌های فقیر می‌شود (۱۰).

استفاده از لجن تصفیه شده فاضلاب در کنار قارچ‌های همزیست ریشه می‌تواند به بهبود تغذیه ذرت و افزایش عملکرد آن در واحد سطح کمک کرده و در حین حال از مصرف کودهای شیمیایی بکاهد. هم‌چنین سبب مصرف لجن فاضلاب به شکل مفید می‌شود. بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر لجن فاضلاب و تلقیح قارچ‌های میکوریز و اندوفیت بر رشد گیاه ذرت در یک دوره سه ماهه و جذب فسفر و عناصر ریزمغذی (مس، منگنز، آهن و روی) توسط ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آماده‌سازی خاک: نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری از مزرعه کشاورزی دانشگاه لرستان جمع‌آوری و به آزمایشگاه انتقال داده و از الک

استفاده از لام هموسیتمتر قطعات هیف و اسپور شمارش شده و معادل 10^3 عدد برای هر گلدان هنگام کشت بر روی ریشه بذور جوانه‌دار شده استفاده شد. در مجموع ۱۸ گلدان تهیه شد و تعداد ۱۰ عدد بذور جوانه‌دار ذرت در عمق ۲ سانتی‌متری خاک گلدان‌ها کشت شد و بعد از یک هفته تعداد گیاهچه‌ها به چهار عدد کاهش یافت. گلدان‌ها به صورت تصادفی از اسفند ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰ در گلخانه دانشگاه لرستان با دمای ۱۸ الی ۲۵ درجه سلسیوس چیده شدند. آبیاری گلدان‌ها تا ۷۵ درصد ظرفیت زراعی (به صورت وزنی) بسته به نیاز گیاه انجام شد.

برداشت گیاه و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک و

گیاه: گیاهان ۱۲ هفته پس از کشت، برداشت شدند. اندام هوایی و ریشه جداسازی و سپس به ترتیب با آب شهری و آب مقطر شسته و در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت خشک و توزین شد. اندام هوایی و ریشه هر گلدان جداگانه پودر شده و پس از هضم به روش اکسیداسیون تر (با اسید کلریدریک و اسید نیتریک) توسط دستگاه ICP-OES (مدل Perkin Elmer's 8300) عناصر مس، روی، آهن و منگنز در عصاره‌ها اندازه‌گیری شد (۱۱). فسفر گیاه نیز در عصاره حاصل از هضم خشک در حضور نترات منیزیم به روش کالریمتری (رنگ زرد و انادات مولیبدات) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۱۴). نمونه‌برداری از خاک گلدان‌ها انجام شد و پس از همگن کردن بخشی از خاک تازه برای اندازه‌گیری آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی، تنفس پایه میکروبی و کرین زیتوده میکروبی در یخچال با دمای چهار درجه سلسیوس نگهداری شد. بقیه خاک گلدان‌ها نیز به منظور اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های شیمیایی هوا خشک و الک شد. اندازه‌گیری فسفر در دسترس خاک به روش اولسن و مواد آلی خاک به روش والکی و بلک اندازه‌گیری شدند (۱۱). فعالیت آنزیم فسفاتاز به روش طباطبایی و برمنر

۲ میلی‌متری عبور داده شد. لجن تصفیه شده نیز از تصفیه خانه غرب اهواز تهیه و هوا خشک شد، سپس از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. کود اوره به میزان ۰/۲۲ گرم در هر گلدان چهار کیلوگرمی (معادل ۲۰۰ کیلو در هکتار؛ بر اساس آزمون خاک) و لجن تصفیه شده (در دو سطح صفر و دو درصد وزنی) به خاک اضافه شدند.

ویژگی‌های شیمیایی خاک و لجن طبق روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و در جدول ۱ آورده شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری، pH خاک و لجن با pH متر، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک و لجن با هدایت‌سنج، درصد ماده آلی با تیتراسیون معکوس به روش والکلی‌بلک، نیتروژن کل به روش کجلدال، کربنات کلسیم معادل به روش خشتی کردن با اسید و تیتراسیون، فسفر قابل جذب با عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم اندازه‌گیری شدند (۱۱).

آماده‌سازی قارچ و کشت گلدان‌ها: قارچ‌های

همزیست ریشه از دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شدند. تلقیح میکروبی خاک در سه سطح شامل بدون مایه‌زنی، مایه‌زنی با قارچ میکوریز گونه *Rhizophagos intraradices* (که در گذشته با نام *Glomus intraradices* معرفی شده است (۱۲) و مایه‌زنی با قارچ شبه میکوریز *Serendipita indica Piriformospora indica* (که در گذشته با نام معرفی شده است) انجام شد. بذور ذرت جوانه‌دار شده و برای تیمارهای میکوریز از ۳۰ عدد اسپور قارچ به ازای هر گلدان بر روی ریشه ۵ سانتی‌متری ذرت استفاده شد (۱۳). اسپورها با استفاده از محلول ساکارز و سانترفیوژ از خاک جدا شده و در آب مقطر غوطه‌ور شدند. با ریختن این مخلوط روی ریشه، اسپورها خود به خود به ریشه گیاه می‌چسبند. قارچ *S. indica* در محیط PDA به مدت ده روز رشد کرده و سپس هیف‌ها و اسپورها با آب مقطر استریل شسته شد. پس از غوطه‌ور شدن در آب مقطر با

تنفس پایه به کربن زیتوده میکروبی محاسبه گردید (۱۷).

تجزیه و تحلیل آماری: تجزیه و تحلیل آماری داده‌های به دست آمده به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به وسیله برنامه نرم‌افزاری SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد انجام و نمودارها با برنامه Excel رسم گردید.

(۱۹۹۶) با کاربرد بافر جهانی با pH 6.5 برای فسفاتاز اسیدی و با pH 11 برای فسفاتاز قلیایی و انکوباسیون یک ساعته در حضور سوسترای پارانیتروفنل فسفات و سپس قرائت با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۱۵). تنفس پایه میکروبی با انکوباسیون خاک در مجاورت NaOH و تیتراسیون با HCl (۱۶) و کربن زیتوده میکروبی به روش تدخین و استخراج (۱۷) اندازه‌گیری شدند. ضریب متابولیک نیز از نسبت

جدول ۱- برخی فیزیکی و شیمیایی و غلظت برخی عناصر در خاک و لجن تصفیه شده.

Table 1. Some physical and chemical characteristics and concentration of some elements in soil and refined sludge.

ویژگی	واحد	خاک	لجن	خاک حاوی دو درصد لجن
properties	Unit	Soil	Sludge	Treated soil with 2 % sludge
بافت خاک	-	Sandy Loam	-	Sandy Loam
Soil texture	-			
pH	-	7.85	6.71	7.73
EC (عصاره اشباع)	dS m ⁻¹	0.58	3.6	0.81
Saturated extract				
کربن آلی	%	0.47	9.21	0.89
Organic carbon				
کربنات کلسیم معادل	%	11	5.5	10.8
Equivalent calcium carbonate				
نیترژن کل	%	0.07	2.95	0.12
Total N				
فسفر کل	mg kg ⁻¹	415	4959	508
Total P				
فسفر قابل جذب (اولسن)	mg kg ⁻¹	7.1	-	8.4
Olsen P				
روی	mg kg ⁻¹	196	1472	230
Zn				
مس	mg kg ⁻¹	82	843	102
Cu				
آهن	mg kg ⁻¹	25451	29775	26573
Fe				
منگنز	mg kg ⁻¹	987	1271	1032
Mn				

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک و لجن: همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود خاک مورد مطالعه با بافت سبک دارای pH ۷/۸۵ در عصاره اشباع و لجن فاضلاب

دارای pH ۶/۷۱ در عصاره یک به دو (لجن به آب) است. همچنین جدول ۱ غلظت روی، مس، آهن، منگنز و سرب را در خاک اولیه، لجن به‌کار برده شده و ترکیب خاک و لجن نشان می‌دهد. لجن به‌کار برده

مشاهده می‌شود افزودن لجن بر روی همه پارامترها (به‌جز ضریب متابولیک) تأثیر معنی‌دار داشته است. مایه‌زنی با قارچ‌های همزیست ریشه نیز بر اکثر پارامترها تأثیر معنی‌دار داشته است.

شده از نظر عناصر ریزمغذی غنی بود و مشاهده می‌شود که افزودن ۲ درصد لجن در افزایش روی، مس و منگنز خاک تأثیرگذار بوده است. در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر صفات اندازه‌گیری شده آمده است. همان‌گونه که

جدول ۲- نتایج آنالیز واریانس کاربرد لجن و قارچ بر میانگین مربعات برخی ویژگی‌های خاک و گیاه.

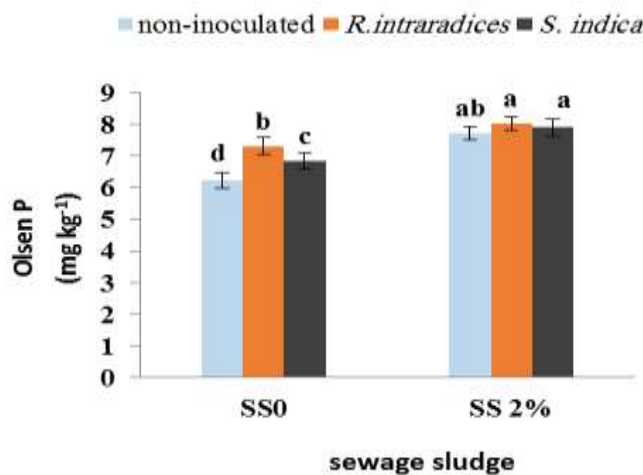
Table 2. ANOVA for the effects of treatments on mean square of measured parameters.

خطا Error	لجن*قارچ Sludge*fungi	قارچ fungi	لجن Sludge	پارامتر parameter
12	2	2	1	df
0.63	0.13	11.15***	177.47***	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of shoot
0.13	0.93**	3.79***	21.26***	وزن خشک ریشه Dry weight of root
0.06	0.002	0.21	2.07***	فسفر اندام هوایی P con. of shoot
85.36	6.53	622.89**	8120.90***	فسفر ریشه P con. of root
0.80	0.52	5.82**	526.93***	روی اندام هوایی Zn con. of shoot
0.89	0.076	5.85**	2158.03***	روی ریشه Zn con. of root
0.05	0.21*	0.30*	56.64***	مس اندام هوایی Cu con. of shoot
0.06	0.07	1.05***	176.34***	مس ریشه Cu con. of root
2.44	1.26	5.13	6237.33***	منگنز اندام هوایی Mn con. of shoot
1.36	0.59	6.30*	10579.31***	منگنز ریشه Mn con. of root
1.32	2.42	11.61**	1634.20***	آهن اندام هوایی Fe con. of shoot
3.23	0.04	12.50*	9071.60***	آهن ریشه Fe con. of root
65.53	45.68	1553.23***	58767.35***	فسفاتاز اسیدی خاک Soil acid phosphatase
45.99	13.50	524.97**	3427.92***	فسفاتاز قلیایی خاک Soil alkaline phosphatase
0.001	0.001	0.009**	2.52***	ماده آلی خاک Soil organic matter
0.001	0.001	0.003*	0.03***	تنفس پایه خاک Basal respiration of soil
2	8.76	359.32**	6670.12***	کربن زیتوده میکروبی خاک Microbial biomass carbon of soil
0.006	0.004	0.001	0.003	ضریب متابولیک خاک Metabolic quotient of soil
0.06	0.23*	0.69**	5.39***	فسفر اولسن خاک Olsen P of soil

آنزیم‌های فسفاتاز) به افزایش فسفر قابل جذب گیاه کمک می‌کند. در پژوهشی دیگر پژوهش‌گران مشاهده نمودند که فسفاتازهای اسیدی ترشح شده از هیف‌های خارج سلولی *Rhizophagus clarus* موجب افزایش فسفر قابل جذب گیاه شد (۱۹). به دلیل بالابودن مقدار فسفر لجن؛ با افزودن لجن به خاک مقدار فسفر کل خاک ۲۲ درصد افزایش یافته است (جدول ۱). هم‌چنین افزودن لجن می‌تواند به افزایش فرم قابل جذب فسفر در خاک کمک می‌کند. در پژوهشی تأثیر کمپوست لجن فاضلاب شهری در سطوح ۱، ۲ و ۴ درصد وزنی بر توزیع اجزاء فسفر در یک خاک آهکی بررسی شد و نتایج نشان‌دهنده افزایش فسفر قابل دسترس در خاک بود (۲۰).

فسفر قابل دسترس خاک: با افزودن لجن و مایه‌زنی با هر دو قارچ همزیست ریشه مقدار فسفر قابل دسترس خاک افزایش یافت (شکل ۱). لجن فاضلاب به دلیل مقدار فسفر بالایی که دارد می‌تواند سبب افزایش فسفر قابل دسترس خاک شود. حجازی مهریزی و همکاران (۱۳۹۱)، گزارش کردند که استفاده از لجن فاضلاب سبب افزایش شکل‌های مختلف فسفر از جمله شکل قابل جذب آن می‌شود و مقدار فسفر جذب شده به گیاه گندم را افزایش می‌دهد (۱۸). در پژوهش حاضر فسفر اولسن خاک اولیه پایین می‌باشد (جدول ۱).

ترشحات ریشه گیاهان تحت کمبود فسفر، موجب ایجاد همزیستی با قارچ‌های همزیست شده و این همزیستی با مکانیسم‌های گوناگون (مانند ترشح



شکل ۱- مقایسه میانگین فسفر قابل دسترس خاک در تیمارهای مختلف لجن و قارچ. اختصارها: SS0 بدون لجن و SS2% سطح دو درصد لجن. هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

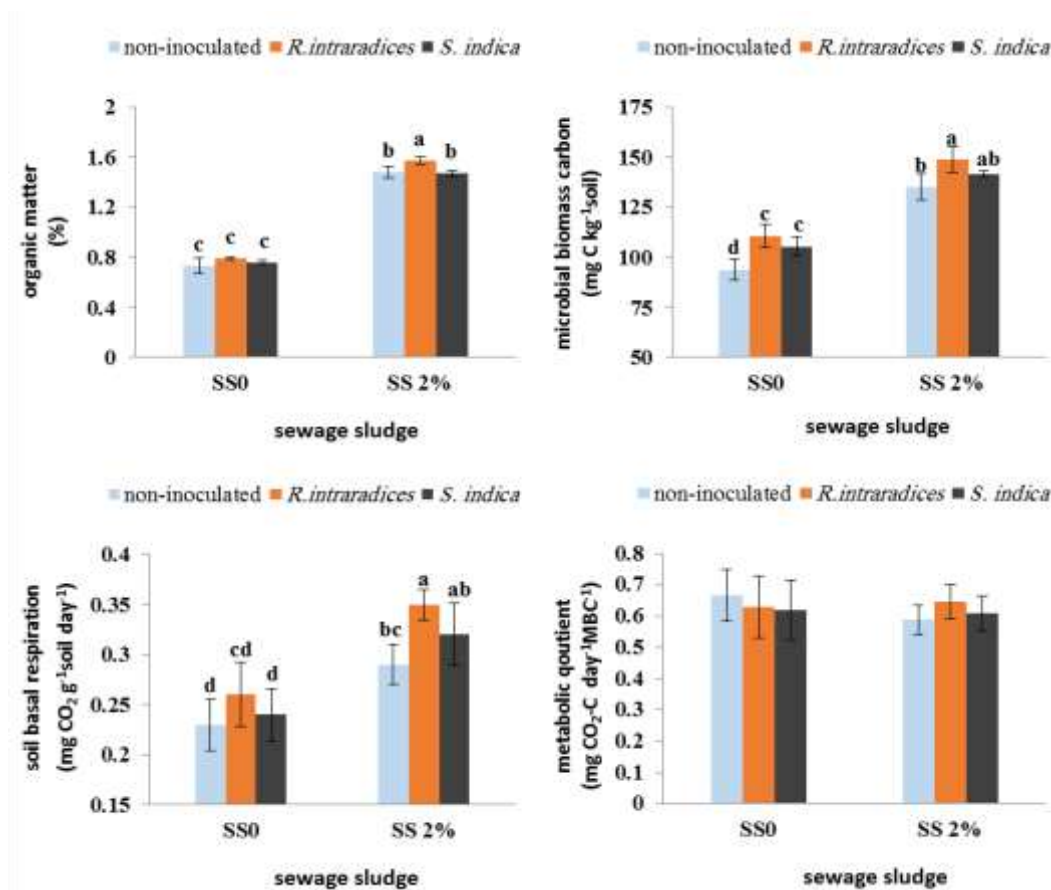
Figure 1. Average comparison of Olsen phosphorus in different sewage sludge and fungus treatments. Abbreviations: SS0 without sludge and SS2% level of two percent sludge. Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

معنی‌داری نداشته است (شکل ۲). استفاده از لجن به دلیل افزایش کربن و مواد غذایی در دسترس می‌تواند باعث تحریک فعالیت میکروبی خاک و افزایش تنفس و کربن زیتوده میکروبی شود (۲۱).

ویژگی‌های بیولوژیک خاک: افزودن لجن فاضلاب به خاک سبب افزایش معنی‌دار ماده آلی (۹۷ درصد)، تنفس پایه خاک (۳۳ درصد) و کربن زیتوده میکروبی خاک (۳۸ درصد) شده ولی ضریب متابولیک تغییرات

تلقیح خاک و گیاه با این قارچ‌ها می‌تواند در ترسیب کربن در خاک مؤثر باشد (۲۲).

همچنین استفاده از قارچ‌های همزیست ریشه به‌ویژه *R. intraradices* سبب افزایش معنی‌دار ماده آلی، تنفس و کربن زیتوده میکروبی خاک شده است.



شکل ۲- مقایسه میانگین ماده آلی خاک، کربن زیتوده میکروبی، تنفس پایه خاک و ضریب متابولیک خاک در تیمارهای مختلف لجن و قارچ. اختصارها: SS0 بدون لجن و SS2% سطح دو درصد لجن. هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

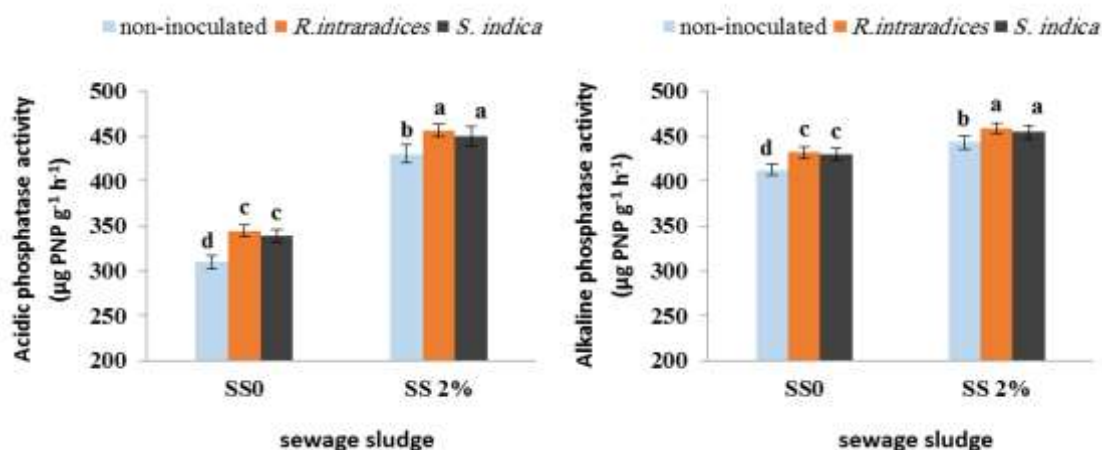
Figure 2. Average comparison of organic matter, microbial biomass carbon, basal respiration, and metabolic quotient in soil of different sewage sludge and fungus treatments. Abbreviations: SS0 without sludge and SS2% level of two percent sludge. Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

۶/۵ درصد افزایش یافت. همبستگی مثبت و معنی‌داری بین فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی با میزان فسفر قابل دسترس خاک (به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۱) به‌دست آمد که تأثیر فعالیت آنزیم‌ها را بر افزایش دسترسی فسفر نشان می‌دهد. در دیگر مطالعات نیز همبستگی مثبتی بین فسفر اندازه‌گیری

فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک: فعالیت فسفاتازهای اسیدی و قلیایی تحت‌تأثیر کاربرد لجن و تلقیح قارچ‌های همزیست ریشه قرار گرفت و میزان فعالیت هر دو آنزیم افزایش نشان داد (شکل ۳). در این پژوهش با کاربرد لجن فاضلاب، فعالیت فسفاتاز اسیدی ۳۴/۵ درصد و فعالیت فسفاتاز قلیایی

قابل جذب نقش دارند (۲۳). در پژوهشی دیگر کاربرد کمپوست زباله شهری در خاک آهکی سبب فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی در کشت گندم شد که در پی آن جذب فسفر توسط گیاه افزایش یافت (۲۴).

شده به روش اولسن و فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز در خاک گزارش شده است (۲۳). آنزیم فسفاتاز نقش مهمی در چرخه فسفر بازی می‌کند و در هیدرولیز ترکیبات فسفر آلی به فرم‌های معدنی نقش دارد. این آنزیم‌ها در شکستن گروه فسفاتی در مواد آلی و تبدیل فرم‌های غیرقابل دسترس فسفر آلی به فرم‌های



شکل ۳- مقایسه میانگین فسفاتاز اسیدی و قلیایی در تیمارهای مختلف لجن و قارچ. اختصارها شامل SS0 بدون لجن و SS2% سطح دو درصد لجن می‌باشد. هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۰.۰۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 3. Average comparison of acidic and alkaline phosphatase activity in soil of different sewage sludge and fungus treatments. Abbreviations include SS0 without sludge and SS2% level of two percent sludge. Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

همبستگی مثبت و معنی‌داری ($P < 0.0001$) بین فعالیت دو آنزیم و میزان مواد آلی خاک (به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۸۵ برای فسفاتاز اسیدی و قلیایی) و نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار ($P < 0.0001$) بین فعالیت آنزیم‌ها و کربن زیتوده میکروبی (به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۸۸ برای فسفاتاز اسیدی و قلیایی) به‌دست آمد که بیانگر تأثیر کاربرد لجن فاضلاب و تأثیر میکروارگانیسم‌ها بر فعالیت آنزیمی خاک می‌باشد.

افزودن لجن به خاک سبب افزایش شدید فسفاتاز اسیدی شده در حالی که فسفاتاز قلیایی تغییرات شدیدی نداشت. این موضوع می‌تواند به دلیل کاهش pH خاک در پی افزودن لجن باشد (جدول ۱). هر

افزودن لجن فاضلاب تأثیر قابل توجهی در افزایش مواد آلی خاک دارد که باعث افزایش دسترسی گیاه به عناصر و افزایش رشد گیاه شده و میزان ترشحات ریشه‌ای (حاوی آنزیم‌ها) با کاربرد لجن فاضلاب افزایش می‌یابد. از طرفی کاربرد لجن حاوی مواد آلی باعث افزایش جمعیت میکروارگانیسم‌ها، کربن زیتوده میکروبی، تنفس خاک و تحریک میکروارگانیسم‌های تولیدکننده آنزیم می‌شود (۲۵). در دیگر پژوهش‌ها کاربرد لجن فاضلاب در سطح ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار باعث افزایش میزان کربن زیتوده میکروبی و فعالیت فسفاتاز قلیایی در خاک شده است (۲۵).

ریشه و تعداد برگ‌های جدید گیاه زیتون معنی‌دار بوده است (۸).

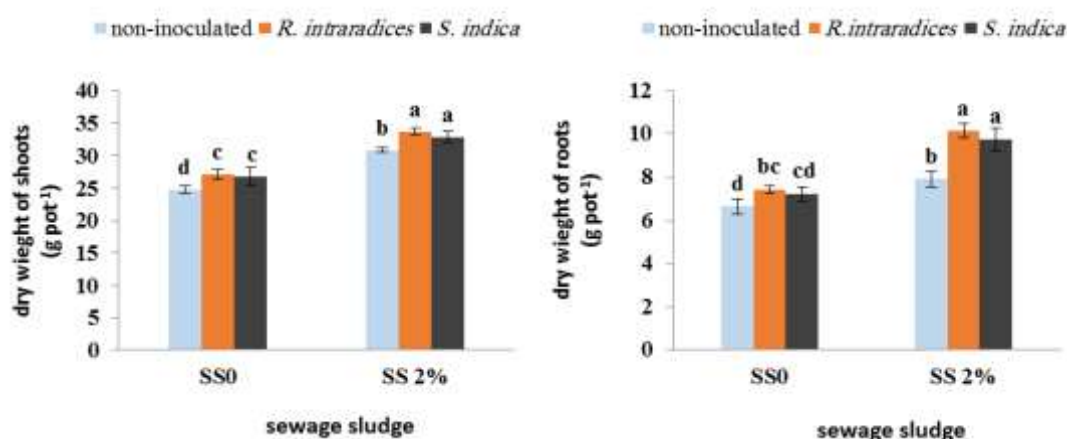
لجن، موجب افزایش فسفر در دسترس خاک (شکل ۱) و بهبود ویژگی‌های بیولوژیکی خاک همانند تنفس، کربن زیتوده میکروبی و آنزیم فسفاتاز (شکل‌های ۲ و ۳) شده است. بهبود ویژگی‌های بیولوژیک خاک باعث بهبود سلامت و کیفیت خاک، بهبود دسترسی به عناصر غذایی و تولید بیش‌تر آنزیم‌های رشد توسط گیاه و میکروارگانیسم‌های خاک شده که در نهایت سبب افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌شود (۲۸). کمپوست لجن فاضلاب شهری از نظر مواد آلی، نیتروژن و مواد هیومیکی غنی است (۲۹). در دیگر پژوهش‌ها نیز افزایش رشد کاهو و گوجه‌فرنگی با کاربرد ۵۰ تن در هکتار کمپوست لجن فاضلاب شهری و کاهش رشد با افزایش میزان کاربرد به ۱۰۰ تن در هکتار گزارش شده است (۲۹).

کاربرد لجن سبب جذب بهینه پتاسیم، فسفر، منیزیم، کلسیم، آهن، روی و مس در برگ‌های این گیاهان شد. مواد آلی نقش مهمی در کیفیت خاک دارد و موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود (۳۰). اگرچه مواد هیومیکی موجود در کمپوست می‌تواند به عنوان عامل کلات‌کننده فلزات سنگین عمل کرده و بر حلالیت آن‌ها تأثیر بگذارد؛ اما این تأثیر بستگی به میزان pH و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارد (۳۱). از طرفی گاهی اوقات غلظت نمک‌ها در کمپوست لجن فاضلاب شهری بالا بوده و می‌تواند اثر منفی بر بافت خاک و رشد گیاه داشته باشد (۳۲).

چند این کاهش pH تنها در حد ۰/۱۲ بوده است اما می‌تواند منجر به افزایش شدید فعالیت فسفاتاز اسیدی شود و بخشی از فسفاتاز قلیایی تولید شده را خنثی نماید. اکوستا و طباطبایی (۲۰۰۰) با اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های مختلف در pH‌های گوناگون؛ همبستگی مثبت فسفاتاز قلیایی با pH و همبستگی منفی فسفاتاز اسیدی با pH خاک را گزارش دادند (۲۶).

قارچ‌های همزیست مورد استفاده در پژوهش حاضر از قارچ‌های تولیدکننده آنزیم فسفاتاز محسوب می‌شوند که با استفاده از آن‌ها فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک افزایش یافته است. میان دو قارچ تفاوت معنی‌داری از نظر تولید آنزیم‌های فسفاتاز دیده نشد. قارچ *S. indica* می‌تواند با بسیاری از گیاهان همزیستی برقرار کند و با ترشح فسفاتاز به حل فسفات و جذب آن توسط گیاه کمک کند (۲۲). افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز در تیمارهای به‌کار برده شده می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت و تنوع میکروبی و افزایش ترشحات ریشه گیاه باشد (۲۷). آنزیم فسفاتاز اسیدی توسط گیاهان و میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شود؛ درحالی که تولید فسفاتاز قلیایی به میکروارگانیسم‌ها نسبت داده شده است (۲۷).

وزن خشک گیاه: اثر متقابل تیمارها بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه در شکل ۴ نشان می‌دهد که کاربرد لجن و مایه‌زنی قارچ سبب افزایش وزن خشک گیاه شده است. کاربرد لجن به‌علت وجود عناصر تغذیه‌ای و ماده آلی بالا (جدول‌های ۱ و ۲) سبب افزایش رشد گیاه شده است. در مطالعات قبلی بر روی دیگر گیاهان نیز تأثیر لجن فاضلاب شهری تصفیه شده بر بهبود رشد گیاه زیتون، وزن خشک



شکل ۴- مقایسه میانگین وزن خشک اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای لجن و قارچ. اختصارها: SS0 بدون لجن و SS2% سطح دو درصد لجن. هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 4. Average comparison of dry weight of shoot and root of corn in different sewage sludge and fungus treatments. Abbreviations include SS0 without sludge and SS2% level of two percent sludge. Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

تولید مواد فتوسنتزی و در نتیجه افزایش زیست‌توده شود (۳۴ و ۳۵).

در جدول ۳ غلظت عناصر فسفر، روی، مس، آهن و منگنز در اندام هوایی و ریشه ذرت مشاهده می‌شود. با کاربرد لجن غلظت همه این عناصر در گیاه افزایش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر لجن فاضلاب بر غلظت عناصر در گیاه است.

غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در این پژوهش در اندام‌های گیاه به حد سمیت نرسیده و با کاربرد لجن رشد گیاه بهبود یافته است. به دلیل رقابت بین لیگاندهای آلی موجود در کمپوست لجن فاضلاب و فسفات برای قرار گرفتن در سطوح اکسیدهای فلزات و همچنین تشکیل کمپلکس فسفوهیومیک، حلالیت فسفر در خاک افزایش می‌یابد (۳۶). افزایش غلظت قابل دسترس منگنز، مس، روی و آهن در نتیجه کاربرد کمپوست لجن فاضلاب شهری در خاک گزارش شده است (۳۷).

کاربرد قارچ‌های همزیست سبب افزایش جذب عناصر ذکر شده به ویژه در حضور لجن شدند. قارچ‌های همزیست گیاه با تحریک فعالیت آنزیم

فسفر و عناصر ریزمغذی: همبستگی مثبت و معنی‌دار بین فسفر قابل دسترس خاک و غلظت فسفر در اندام هوایی و ریشه گیاه (به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۷۹) و همچنین همبستگی مثبت و معنی‌دار میان فسفر اولسن خاک با وزن خشک اندام هوایی و ریشه (به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۷۸) نشان‌دهنده تأثیر در دسترس بودن فسفر بر جذب آن توسط گیاه و وزن خشک گیاه می‌باشد.

قارچ‌های همزیست با افزایش فسفر قابل دسترس خاک (شکل ۱) و افزایش غلظت فسفر در گیاه (جدول ۳) رشد گیاه را بهبود داده‌اند. قارچ میکوریز آربوسکولار جذب عناصر غذایی را توسط گیاه با افزایش در دسترس بودن و همچنین انتقال مواد مغذی مختلف بهبود می‌بخشد (۳۳) و به تبادل مواد معدنی و ترکیبات فسفر کمک می‌کند و موجب افزایش غلظت فسفر در ریشه و ساقه گیاهان می‌شود. کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ میکوریز آربوسکولار باعث تحریک جذب مواد مغذی در گیاهان می‌شود. بدیهی است که تلقیح با قارچ‌های همزیست ریشه گیاه می‌تواند غلظت مواد مغذی مختلف و ریزمغذی‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد و منجر به افزایش

فسفاتاز در انحلال منابع فسفات مؤثر است، هم‌چنین اسیدهای آلی در ریزوسفر گیاه در حضور قارچ افزایش می‌یابد (۳۸). قارچ *S. indica* قادر به کلونیزه کردن ریشه گیاه و بهبود رشد گیاه در خاک‌های با غلظت پایین فسفر است (۳۸). این قارچ می‌تواند رشد و میزان زیتوده گیاهی را افزایش داده و با افزایش فرم‌های در دسترس فسفر، جذب فسفر به گیاه را افزایش دهد (۳۸).

قارچ *S. indica* موجب افزایش جذب فسفر و مواد معدنی و افزایش مقاومت گیاهان زراعی در شرایط نامساعد محیطی می‌شود (۳۹). استفاده از این قارچ موجب بهبود جذب نیتروژن و فسفر به ترتیب از طریق افزایش فعالیت آنزیم نترات رداکتاز و ناقلین فسفات در گیاه کنجد شد (۴۰).

افزایش غلظت کلروفیل، جذب عناصری هم‌چون آهن، پتاسیم و فسفر توسط گیاه مرزنجوش مایه‌زنی شده با قارچ *S. indica* گزارش شده است. یکی از دلایل افزایش غلظت کلروفیل در گیاهان تلقیح شده با قارچ، جذب بیش‌تر عناصر غذایی دخیل در ساختار کلروفیل برگ است (۴۱). قارچ به دلیل تحریک تشکیل ریشه‌های عرضی، تحریک رشد طولی و انشعابات فرعی ریشه و به دنبال آن افزایش سطح ریشه از طریق تولید هورمون‌های ایندول استیک اسید موجب افزایش جذب عناصر غذایی مانند فسفر توسط گیاه می‌شود؛ هم‌چنین با تولید آنزیم فسفاتاز باعث افزایش انتقال فسفات از ریزوسفر به ریشه گیاهان می‌شود (۳۸). استفاده از لجن فاضلاب با توجه به دارا بودن عناصر موجب افزایش غلظت عناصر اندازه‌گیری شده در گیاه شد (جدول ۳).

کاربرد قارچ‌های همزیست به همراه لجن فاضلاب غلظت عناصر را در گیاه نسبت به شاهد افزایش داد. بین دو قارچ در جذب عناصر تفاوت معنی‌داری دیده نشد، تنها مورد استثنا فسفر ریشه می‌باشد که مقدار بیش‌تری نسبت به *S. indica* جذب نموده است. ماچوتی و همکاران (۲۰۰۶)، در طی آزمایش خود روی یک گیاه علفی در زیمباوه، با کاربرد لجن فاضلاب افزایش معنی‌دار عناصر غذایی مس، بور، مولیبدن، منگنز را برگ‌های گیاه نسبت به شاهد گزارش کردند (۴۲). افزایش جذب مس، منگنز، روی و در مطالعه ساین و همکاران (۲۰۱۹) با کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب و همراهی قارچ‌های گلوموس موسه و گلوموس ایتترادیسز گزارش شده است (۴۳). با این‌حال در برخی گزارش‌ها کاهش غلظت منگنز در گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ میکوریز نسبت به گیاهان مایه‌زنی نشده گزارش شده است (۴۴). دلیل این تناقضات می‌تواند سطح غلظت عناصر سنگین در خاک باشد. در مورد عناصر سنگین تغذیه‌ای، به نظر می‌رسد قارچ جذب این عناصر در گیاه را تا حدی که سبب ایجاد سمیت نشود افزایش می‌دهد که نشان از نقش بسیار مهم و تنظیم‌کننده قارچ دارد. به شکلی که قارچ در غلظت‌های پایین عنصر؛ با افزایش جذب عنصر به بهبود تغذیه گیاه کمک کرده و در حین حال در غلظت‌های بالای عنصر؛ از انتقال بیش از حد عنصر به گیاه و مسمومیت گیاه جلوگیری می‌نماید.

ترشح سیدروفورها و کلاته کردن عناصر ریزمغذی از جمله مکانیسم‌های قارچ برای انتقال عناصر به گیاه می‌باشد (۴۵).

تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر فعالیت فسفاتاز ... / سیده سرور حسینی و همکاران

جدول ۳- غلظت (انحراف استاندارد) فسفر (mg g^{-1}) و عناصر ریزمغذی (mg g^{-1}) در اندام هوایی و ریشه ذرت.

Table 3. Phosphorus (mg g^{-1}) and microelements (mg kg^{-1}) concentrations (std deviation) in shoots and roots of maize.

با لجن Sewage sludge application			بدون لجن Non- sewage sludge application			عناصر Elements
مایه‌زنی با Inoculated with <i>S. indica</i>	مایه‌زنی با Inoculated with <i>R. intraradices</i>	بدون مایه‌زنی Non- inoculated	مایه‌زنی با Inoculated with <i>S. indica</i>	مایه‌زنی با Inoculated with <i>R. intraradices</i>	بدون مایه‌زنی Non- inoculated	
3.97 ^{ab} (0.32)	4.07 ^a (0.35)	3.73 ^{bc} (0.21)	3.27 ^{dc} (0.15)	3.43 ^c (0.15)	2.87 ^d (0.21)	فسفر P
31.64 ^a (0.53)	32.23 ^a (0.63)	30.71 ^a (1.40)	21.39 ^b (0.54)	21.45 ^b (0.86)	19.28 ^c (1.05)	روی Zn
11.98 ^a (0.41)	11.96 ^a (0.28)	11.26 ^b (0.14)	8.24 ^c (0.09)	8.17 ^c (0.16)	8.15 ^c (0.17)	مس Cu
105.37 ^a (1.38)	105.12 ^a (1.07)	101.75 ^b (1.60)	85.63 ^c (0.47)	85.28 ^c (0.86)	84.16 ^c (1.16)	آهن Fe
62.78 ^a (1.78)	61.93 ^a (1.62)	60.13 ^a (1.98)	25.01 ^b (1.66)	24.18 ^b (1.20)	23.96 ^b (0.84)	منگنز Mn
3.56 ^a (0.15)	3.67 ^a (0.16)	2.82 ^b (0.18)	2.93 ^b (0.25)	3.31 ^b (0.21)	2.20 ^c (0.26)	فسفر P
57.14 ^{ab} (0.75)	58.09 ^a (0.89)	56.11 ^b (0.88)	35.50 ^d (0.73)	36.03 ^c (1.20)	34.10 ^d (1.13)	روی Zn
23.18 ^a (0.21)	23.00 ^a (0.12)	22.22 ^b (0.08)	16.69 ^c (0.37)	16.78 ^c (0.40)	16.15 ^d (0.12)	مس Cu
147.75 ^a (2.18)	147.07 ^a (1.80)	145.11 ^a (1.96)	103.02 ^b (1.62)	102.15 ^b (0.97)	100.07 (2.00)	آهن Fe
82.49 ^a (1.56)	81.48 ^{ab} (1.28)	79.87 ^b (1.40)	33.34 ^c (0.65)	33.08 ^c (0.91)	31.96 ^c (0.94)	منگنز Mn

در هر ردیف خانه‌های با حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند

In each row cells with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test

به رشد و سلامت گیاه کمک می‌کنند. باید دقت نمود که این نتیجه با یک‌بار کاربرد لجن به‌دست آمده است و تأثیر افزایش بلندمدت لجن با توجه به امکان افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک و احتمال ایجاد سمیت، نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز (گرت شماره SCU.AS99.28572) و دانشگاه لرستان که این پژوهش را یاری نموده‌اند تشکر می‌نمایند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که با افزودن لجن فاضلاب به خاک به عنوان کود آلی، میزان عناصر غذایی و فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک افزایش یافت. کاربرد لجن هم‌چنین باعث افزایش ماده آلی خاک گردید و وزن خشک گیاه را افزایش داد. استفاده از قارچ‌های همزیست ریشه موجب افزایش تأثیر لجن بر غلظت عناصر و وزن خشک ریشه شد. به‌طورکلی میکروارگانیسم‌ها به‌دلیل تولید انواع مختلفی از مواد محرک رشد مانند برخی آنزیم‌ها سبب بهبود فراهمی عناصر غذایی، رشد و تغذیه گیاه شده و

منابع

1. Tajbakhsh, M., & Pourmirza, A. A. (2005). Cereal grain crops. *West Azarbaijan Academic Jihad Publications*, 315p. [In Persian]
2. <https://www.irna.ir/news/84904819>.
3. Baran, A., Cayci, G., Kutak, C., & Hartmann, R. (2001). The effect of grape mare as growing medium on growth of hypostases plant. *Bioresource Technology*, 78, 103-106. doi: **10.1016/s0960-8524(00)00171-1**.
4. Mirhosseini, G., Alavimoghaddam, M. R., & Maknon, R. (2007). Investigation of Application of Tehran Municipal WWTPs' Dried Sludge in Agriculture. *Environment sciences*, 4 (4), 47-56. [In Persian]. **Corpus ID: 140173955**.
5. Jamali, M. K., Kazi, T. G., Arain, M. B., Afridi, H. I., Memon, A. R., Jalbani, N., & Shah, A. (2008). Use of sewage sludge after liming as fertilizer to maize growth. *Pedosphere*, 18 (2), 203-213. doi: **10.1016/S1002-0160(08)60008-9**.
6. Jimenez-Cisneros, B. E., Maya-Rendon C., & Salgado-Velazquez, G. (2001). The elimination of helminth ova, faecal coliforms, salmonella and protorzoan cysts by various physicochemical processes in wastewater and sludge. *Water Science and Technology*, 43 (12), 179-182. **PMID: 11464750**.
7. Casado-vela, J., Selles, S., Dias-Crespo, C., Navarro-Pedreno, J., Mataix-Beneyto, J., & Grmez, I. (2007). Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (*capsicum annum var. annum*) grown under two exploitation regimes. *Waste Management*, 27, 1509-1518. doi: **10.1016/j.wasman.2006.07.016**.
8. Zare, M., Chorom, M., & Moallemi, N. (2015). Effect of Treated Urban Sewage Sludge on Soil Essential Nutrients, Soil Chemical Properties and Physiological Properties of Olive Tree. *Journal of agricultural engineering*, 37(2), 1-15. [In Persian]. https://agrieng.scu.ac.ir/article_10909.html?lang=en.
9. Boostani, H. R., Chorom, M., Moezzi, A. A., & Enayatizamir, N. (2014). Mechanisms of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and mycorrhizae fungi to enhancement of plant growth under salinity stress: a review. *Scientific Journal of Biological Sciences*, 3(11), 98-107. doi: **10.14196/sjbs.v3i11.1262**.
10. Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). mycorrhizal symbiosis, third ed. Academic press, London VK. 487p.
11. Gupta, P. K. (2004). Soil, Plant, Water and Fertilizer Analysis. *Agrobios (India)*, 438 p.
12. Schubler, A., & Walker, C. (2010). The Glomeromycota: A Species List with New Families and New Genera. Royal Botanic Garden Edinburgh, Kew, Botanische Staatssammlung Munich, and Oregon State University. 56p.
13. <https://invam.ku.edu/infectivity-assays>.
14. Cottenie, A. (1980). Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations. *FAO Soil's Bulletin*, 119p.
15. Tabatabai, M. A., & Bremner, J. M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1 (4), 301-307. doi: **10.1016/0038-0717(69)90012-1**.
16. Alef, K. (1995). Soil Respiration. 214-215. In: K. Alef, & P., Nannipieri (Eds.). *Methods in Soil Microbiology and Biochemistry*, Academic Press Inc. San Diego.
17. Brookes, P. C. (1995). The Use of Microbial Parameters in Monitoring Soil Pollution by Heavy Metals. *Biology and Fertility of Soils*, 19 (4), 269-279. doi: **10.1007/BF00336094**.
18. Hejazi Mehrizi, M., Shariatmadari, H., & Afyuni, M. (2013). Cumulative and Residual Effect of Sewage Sludge on Inorganic P Fractions and P Availability in a Calcareous Soil. *Journal of science and technology of agriculture and natural resources. Journal of water and soil science*, 17 (64), 33-42. [In Persian]. doi: **20.1001.1.24763594.1392.17.64.12.2**.
19. Tawaraya, K. (2022). Response of mycorrhizal symbiosis to phosphorus

- and its application for sustainable crop production and remediation of environment. *Soil Science and Plant Nutrition*, 68 (2), 241-245. doi: 10.1080/00380768.2022.2032335.
20. Turrion, M. B., Bueis, T., Lafuente, F., Lopez, O., San Jose, E., Eleftheriadis, A., & Mulas, R. (2018). Effects on soil phosphorus dynamics of municipal solid waste compost addition to a burnt and unburnt forest soil. *Science of the total environment*, 642, 374-382. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.06.051.
 21. Fernandes, S. A. P., Bettiol, W., & Cerri, C. C. (2005). Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. *Applied Soil Ecology*, 30, 65-77. doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.03.008.
 22. Oelmuller, R., Sherameti, I., Tripathi, S., & Varma, A. (2009). *Piriformospora indica*, a cultivable root endophyte with multiple biotechnological applications. *Symbiosis*, 49, 1-17. doi:10.1007/s13199-009-0009-y.
 23. Margalef, O., Sardans, J., Fernandez-Martínez, M., Molowny-Horas, R., Janssens, I. A., Ciais, P., Goll, D., Richter, A., Obersteiner, M., Asensio, D., & Penuelas, J. (2017). Global patterns of phosphatase activity in natural soils. *Scientific Reports*, 7 (1), 1-13. doi: 10.1038/s41598-017-01418-8.
 24. Shahabifar, J., Panahpou, E., Moshiri, F., Gholami, A., & Mostashari, M. (2019). The Effect of Organic and Chemical Fertilizers on Phosphorus Uptake by Wheat (*Triticum*) and Soil Acidic and Alkaline Phosphatase Enzymes Activity. *Applied Soil Research*, 7 (3), 150-163. [In Persian]. doi: article_120747.html.
 25. Mbarki, S., Labidi, N., Talbi, O., Jdidi, N., Abdelly, C., & Pascual, J. A. (2010). Ameliorative effect of municipal solid waste compost on the biological quality of mediterranean salt lake soil. *Compost Science & Utilization*, 18 (4), 242-248. doi.org/10.1080/1065657X.2010.10736962.
 26. Acosta-Martinez, V., & Tabatabai, M. (2000). Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biology and Fertility Soils*, 31, 85-91. doi:10.1007/s003740050628.
 27. Spohn, M., & Kuzyakov, Y. (2013). Distribution of microbial-and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation—Coupling soil zymography with ¹⁴C imaging. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 106-113. doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.015.
 28. Sanjay, A., Sanjay, S., & Suri, B. (2017). Effect of soil biological properties on crop production. Soil Conservation Society of India. New Dehli. 256p.
 29. Giannakis, G. V., Kourgialas, N. N., Paranychianakis, N. V., Nikolaidis, N. P., & Kalogerakis, N. (2014). Effects of municipal solid waste compost on soil properties and vegetables growth. *Compost science & utilization*, 22 (3), 116-131. doi:10.1080/1065657X.2014.899938.
 30. de Araujo, A. S., de Melo, W. J., & Singh, R. P. (2010). Municipal solid waste compost amendment in agricultural soil: changes in soil microbial biomass. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 9, 41-49. doi.org/10.1007/s11157-009-9179-6.
 31. Lakhdar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N., & Abdelly, C. 2009. Effectiveness of compost use in salt-affected soil. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 29-37. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.05.132.
 32. Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, F., Luizão, J., Petersen, J., & Neves, E. G. (2006). Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1719-1730. doi.org/10.2136/sssaj2005.0383.
 33. Roupheal, Y., Franken, P., Schneider, C., Schwarz, D., Giovannetti, M., & Agnolucci, M. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi act as bio-stimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*. 196, 91-108. doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.002.

34. Chen, S., Zhao, H., Zou, C., Li, Y., Chen, Y., & Wang, Z. (2017). Combined Inoculation with multiple arbuscular mycorrhizal fungi improves growth, nutrient uptake and photosynthesis in cucumber seedlings. *Frontiers in Microbiology*, 8, 25-16. **doi: 10.3389/fmicb.2017.02516.**
35. Mitra, D., Navendra, U., Panneerselvam, U., Ansuman, S., Ganeshamurthy, A. N., & Divya, J. (2019). Role of mycorrhiza and its associated bacteria on plant growth promotion and nutrient management in sustainable agriculture. *International Journal of Life Sciences and Applied Sciences*, 1, 1-10. **https://www.academia.edu/38644027.**
36. Oburger, E., Jones, D. L., & Wenzel, W. W. (2011). Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. *Plant and Soil*, 341, 363-382. **doi.org/10.1007/s11104-010-0650-5.**
37. Roghanian, S., Hosseini, H. M., & Savaghebi, G. (2012). Effects of composted municipal waste and its leachate on some soil chemical properties and corn plant response. *International Journal of Agriculture: Research and Review*, 2, 801-814. **https://typeset.io/papers/effects-of-composted-municipal-waste-and-its-leachate-on-2og5znba4h.**
38. Wu, M., Wei, Q., Xu, L., Li, H., Oelmüller, R., & Zhang, W. (2018). *Piriformospora indica* enhances phosphorus absorption by stimulating acid phosphatase activities and organic acid accumulation in *Brassica napus*. *Plant and Soil*, 432 (1-2), 333-344. **doi.org/10.1007/s11104-018-3795-2.**
39. Mensah, R. A., Li, D., Liu, F., Tian, N., Sun, X., Hao, X., Lai, Z., & Cheng, C. (2020). Versatile *Piriformospora indica* and its potential applications in horticultural crops. *Horticultural Plant Journal*, 6 (2), 111-121. **doi.org/10.1016/j.hpj.2020.01.002.**
40. Khademian, R., Asghari, B., Sedaghati, B., & Yaghoobian, Y. (2019). Plant beneficial rhizospheric microorganisms (PBRMs) mitigate deleterious effects of salinity in sesame (*Sesamum indicum* L.): Physio-biochemical properties, fatty acids composition and secondary metabolites content. *Industrial Crops and Products*, 136, 129-139. **doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.002.**
41. Aslani, Z., Hedayati, A., Hassani, A., & Barin, M. (2022). Effects of inoculation with *Piriformospora indica* on some vegetative, physiological, and biochemical parameters and essential oil content of *Origanum vulgare* L. ssp. *Vulgare*. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 38 (2), 253-265. [In Persian]. **doi.org/10.22092/ijmapr.2022.357580.3128.**
42. Muchuweti, M., Birkett, J. W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M. D., & Lester, J. N. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112, 41-48. **doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.028.**
43. Sayın, F. E., Khalvati, M. A., & Erdinçler, A. (2019). Effects of Sewage Sludge Application and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (*G. mosseae* and *G. intraradices*) Interactions on the Heavy Metal. **Corpus ID: 202633262.**
44. Liu, A., Hamel, C., Hamilton, R. I., Ma, B. L., & Smith, D. L. (2000). Acquisition of Cu, Zn, Mn and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. *Mycorrhiza*, 9 (6), 331-336. **doi.org/10.1007/s005720050277.**
45. Achatz, B., von Rüden, S., Andrade, D., Neumann, E., Pons-Kuhnemann, J., Kogel, K. H., Franken, P., and Waller, F. (2010). Root colonization by *Piriformospora indica* enhances grain yield in barley under diverse nutrient regimes by accelerating plant development. *Plant and soil*, 333(1), 59-70. **doi.org/10.1007/s11104-010-0319-0.**