

The effect of soil amendments with inoculation of root symbiotic fungi on the growth of *Eucalyptus* seedlings and soil phosphatase enzyme activity

Maryam Kamalpour¹, Roya Zalaghi^{*2}

1. M.Sc. Graduate of Soil Biology and Biotechnology, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: kamalpourmaryam4@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof. of Soil Biology and Biotechnology, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: r.zalaghi@scu.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 12.09.2024

Revised: 12.30.2024

Accepted: 12.30.2024

Keywords:

Acid and alkaline phosphatases, Apatite, Phosphorus-solubilizing symbiotic fungus, Triple superphosphate, Zeolite

ABSTRACT

Background and Objectives: *Eucalyptus*, a vital industrial and economic plant utilized for wood and fiber production, is commonly cultivated in the southern regions of the country. Rapid growth of *Eucalyptus* seedlings over a condensed timeframe holds significant economic advantages for producers. Therefore, employing soil amendments and root symbiotic fungi is crucial to foster optimal growth of *Eucalyptus* seedlings. Despite the essential role of phosphorus in plant nutrition, its significance in *Eucalyptus* cultivation has often been overlooked. Numerous studies have highlighted the positive impact of triple superphosphate or direct use of apatite powder in enhancing phosphorus availability to plants across various species. Additionally, soil amendments like zeolite, renowned for enhancing soil properties, and biofertilizers such as root symbiotic fungi, play pivotal roles in influencing soil absorbable phosphorus levels and plant phosphorus uptake. However, limited attention has been given to this aspect concerning *Eucalyptus*, particularly in Iran. Hence, this study aimed to explore the effects of zeolite, apatite, triple superphosphate, and root symbiotic fungi inoculation on the growth and phosphorus uptake of *Eucalyptus* seedlings, alongside certain soil biological properties.

Materials and Methods: *Eucalyptus* seedlings, specifically of the *Eucalyptus camaldulensis* species, were selected for this study. Upon removal of attached soil from the roots, the seedlings were weighed and transplanted into new pots with the designated treatments. The experimental treatments comprised modifiers (control, triple superphosphate at 150 kg ha⁻¹, 5% apatite by weight, and 3% zeolite by weight) and inoculation with symbiotic fungi (no inoculation (control), *Glomus etunicatum*, and *Serendipita indica*) in a factorial experiment designed in a completely randomized setup with three replications, under greenhouse conditions. After a six-month period, the plants were harvested, and the growth rate of seedlings, plant phosphorus uptake, and selected soil properties were assessed. Parameters such as plant chlorophyll content, soil Olsen phosphorus levels, acid and alkaline phosphatase enzyme activities (using paranitrophenyl phosphate substrate), as well as microbial biomass carbon and microbial biomass phosphorus were analyzed.

Results: The findings indicated that the application of modifiers led to an average increase in plant growth (1.5% and 1.14% increases in shoot and root weight, respectively, compared to the control), while symbiotic fungi application also boosted plant growth (1.2% and 4.5% increase in shoot

and root weight, respectively, compared to the control). Combining modifiers with symbiotic fungi resulted in enhanced leaf chlorophyll content (an average increase of 7.5% compared to the control), plant shoot phosphorus absorption (46.2%), microbial biomass carbon (13.9%), microbial biomass phosphorus (15.7%), and soil Olsen phosphorus (6.3%). Acid and alkaline phosphatase enzyme activities decreased with apatite and triple superphosphate application (averaging a 3.24% and 1.73% reduction for acid and alkaline phosphatase, respectively), but increased significantly with zeolite application (3.78% and 1.99% increase, respectively). Symbiotic fungi utilization enhanced phosphatase enzyme activity, improved plant growth parameters, and enhanced soil biological properties; however, no significant differences were observed between the two fungi for most parameters.

Conclusion: Triple superphosphate and apatite demonstrated comparable efficacy in *Eucalyptus* seedling growth. Therefore, when phosphorus supplementation is required, apatite, owing to its lower environmental impact and cost-effectiveness, is recommended. The combined use of zeolite and symbiotic fungi yielded the most favorable responses and is advised for enhancing *Eucalyptus* seedling growth and soil properties.

Cite this article: Kamalpour, Maryam, Zalaghi, Roya. 2024. The effect of soil amendments with inoculation of root symbiotic fungi on the growth of *Eucalyptus* seedlings and soil phosphatase enzyme activity. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (3), 97-116.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2025.23055.2084

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر برخی اصلاح‌کننده‌های خاک توأم با مایه‌زنی قارچ‌های همزیست ریشه بر رشد نهال‌های اکالیپتوس و فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک

مریم کمال‌پور^۱، رؤیا زلقی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: kamalpourmaryam4@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: r.zalaghi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: اکالیپتوس گیاهی صنعتی و اقتصادی که برای مصارفی مانند تولید چوب و فیبر کاربرد دارد و اغلب در جنوب کشور کشت می‌شود. رشد بیش‌تر نهال‌های اکالیپتوس در یک بازه زمانی مشخص، می‌تواند برای تولیدکنندگان صرفه اقتصادی داشته باشد. بنابراین ارائه راهکارهایی مانند استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک و قارچ‌های همزیست ریشه به‌منظور رشد بهتر نهال‌های اکالیپتوس بسیار مهم می‌باشد. فسفر از جمله عناصر تغذیه‌ای بسیار مهم می‌باشد که در کشت اکالیپتوس مورد بی‌توجهی قرار گرفته است. در بسیاری از پژوهش‌ها تأثیر مثبت کود سوپرفسفات‌تریپل و یا استفاده مستقیم از پودر آپاتیت در تأمین فسفر گیاه در اکثر گیاهان دیده شده است. هم‌چنین برخی اصلاح‌کننده‌های خاک مانند زئولیت به دلیل بهبود ویژگی‌های خاک و برخی کودهای زیستی مانند قارچ‌های همزیست ریشه بر میزان فسفر قابل جذب خاک و جذب فسفر به گیاه تأثیرگذارند. درباره اکالیپتوس و به‌ویژه در ایران کم‌تر به این موضوع پرداخته شده است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تأثیر زئولیت، آپاتیت، سوپر فسفات‌تریپل و مایه‌زنی با قارچ‌های همزیست ریشه بر رشد نهال‌های اکالیپتوس و جذب فسفر و نیز بر برخی ویژگی‌های بیولوژیک خاک انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰	
واژه‌های کلیدی: آپاتیت، زئولیت، سوپرفسفات‌تریپل، فسفاتاز اسیدی و قلیایی، قارچ همزیست حل‌کننده فسفر	
	مواد و روش‌ها: در این پژوهش نهال‌های اکالیپتوس، گونه <i>Eucalyptus camaldulensis</i> تهیه شده و پس از باز کردن گلدان خاک چسبیده به ریشه تا حد امکان زدوده شد و سپس نهال‌ها وزن شده و در گلدان جدید با اعمال تیمارها کشت شدند. تیمارها شامل اصلاح‌کننده‌ها (شاهد، سوپر فسفات‌تریپل ۱۵۰ کیلو در هکتار، آپاتیت پنج درصد وزنی و زئولیت سه درصد وزنی) و مایه‌زنی با قارچ همزیست (بدون مایه‌زنی (شاهد)، مایه‌زنی با <i>Glomus etunicatum</i>

و مایه‌زنی با *Serendipita indica*) به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اعمال شده و گلدان‌ها در گلخانه نگهداری شد. پس از شش ماه، گیاهان برداشت شده و میزان افزایش رشد نهال‌ها و جذب فسفر به گیاه و نیز بر برخی ویژگی‌های خاک بررسی شد. کلروفیل گیاه، فسفر اولسن خاک، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی (با استفاده از سویسترای پارانیتروفیل فسفات) و نیز کربن و فسفر زی‌توده میکروبی اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که کاربرد اصلاح‌کننده‌ها به‌طور میانگین سبب بهبود رشد گیاه (۵/۱ و ۱۴/۱ درصد افزایش وزن به ترتیب اندام هوایی و ریشه نسبت به شاهد) و کاربرد قارچ‌های همزیست نیز سبب افزایش رشد گیاه (۲/۱ و ۵/۴ درصد افزایش وزن به ترتیب اندام هوایی و ریشه نسبت به شاهد) شده و کاربرد اصلاح‌کننده توأم با قارچ همزیست سبب افزایش کلروفیل برگ (میانگین ۵/۷ درصد افزایش نسبت به شاهد) و جذب بیش‌تر فسفر به اندام هوایی گیاه (۴۶/۲ درصد) شده و کربن زی‌توده (۱۳/۹ درصد)، فسفر زی‌توده خاک (۱۵/۷ درصد) و فسفر اولسن خاک (۶/۳ درصد) نیز بهبود معنی‌داری داشتند. فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی با کاربرد آپاتیت و سوپرفسفات تریپل (به‌طور میانگین ۳/۲۴ و ۱/۳۳ درصد به ترتیب برای فسفاتاز اسیدی و قلیایی) کاهش یافته اما با کاربرد زئولیت (۳/۷۸ و ۱/۹۹ درصد) افزایش چشمگیری داشت. کاربرد قارچ‌های همزیست باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و نیز بهبود پارامترهای رشدی گیاه و بهبود ویژگی‌های بیولوژیک خاک شد اما برای اکثر پارامترهای مورد بررسی میان دو قارچ تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری: استفاده از اصلاح‌کننده‌ها و کودهای زیستی (قارچ‌های همزیست) سبب افزایش رشد گیاه و بهبود ویژگی‌های خاک شد و برای زراعت اکالیپتوس قویاً توصیه می‌شود. از میان تیمارهای به‌کاربرده شده، کاربرد زئولیت به همراه تلقیح با قارچ‌های همزیست بهترین پاسخ را به همراه داشت و برای رشد بهتر نهال‌های اکالیپتوس و بهبود ویژگی‌های خاک توصیه می‌گردد. استفاده از سوپرفسفات تریپل و آپاتیت نتایج مشابه در رشد نهال‌های اکالیپتوس داشت، پس در صورت نیاز به فسفر توصیه می‌شود از آپاتیت استفاده شود که آلودگی زیست‌محیطی کم‌تر و قیمت ارزان‌تر دارد.

استناد: کمال‌پور، مریم، زلّقی، رؤیا (۱۴۰۳). تأثیر برخی اصلاح‌کننده‌های خاک توأم با مایه‌زنی قارچ‌های همزیست ریشه بر رشد نهال‌های اکالیپتوس و فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۱ (۳)، ۹۷-۱۱۶.

DOI: 10.22069/JWFST.2025.23055.2084



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

رشد جمعیت در دهه‌های اخیر باعث افزایش تقاضا برای فیبر و چوب شده است. از سوی دیگر، جنگل‌زدایی منجر به کاهش تعداد درختان روی کره زمین و همچنین افزایش خطرات گرمایش جهانی و سایر مشکلات می‌شود (۱)؛ بنابراین لازم است به‌جای جنگل‌زدایی، زراعت چوب گسترش یابد.

اکالیپتوس گیاهی سریع‌رشد و مقاوم به گرمای بالای هوا و شوری بالای خاک می‌باشد (۲) و با توجه به افزایش نیاز به چوب در مهر و موم‌های اخیر، زراعت اکالیپتوس به‌عنوان یک سرمایه‌گذاری سودآور در جنوب کشور رواج یافته است. از جمله رایج‌ترین گیاهانی می‌باشد که به‌عنوان جنگل مصنوعی برای تولید انبوه چوب، خمیر چوب، زغال چوب و هیزم در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری کاشته می‌شوند (۳). برخی گونه‌های اکالیپتوس مانند *E. camaldulensis*, *Eucalyptus grandis*, *E. stricklandii*, *E. brockwayii*, *E. sargentii* و *E. kruseana* در استان خوزستان که دارای اقلیم گرمسیری تا نیمه گرمسیری می‌باشد کشت می‌شوند.

با توجه به این‌که اکالیپتوس گیاهی چندساله می‌باشد و تا رسیدن به مرحله برداشت چوب و برگشت سرمایه چندین سال زمان می‌خواهد، بنابراین در بسیاری از موارد در زمین‌های با حاصلخیزی پایین کشت می‌شود. بنابراین تقویت حاصلخیزی خاک با استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک و استفاده از کودهای زیستی (قارچ‌های همزیست ریشه)، می‌تواند سبب رشد بیش‌تر اکالیپتوس در بازه زمانی کم‌تر و منجر به برداشت بیش‌تر چوب شده و از این‌رو مقرون به‌صرفه می‌باشد. اصلاح‌کننده‌هایی مانند کود فسفره سوپرفسفات تریپل، آپاتیت و زئولیت را می‌توان برای بهبود رشد گیاه و بهبود شرایط خاک به‌کار برد (۴ و ۵). هم‌چنین

استفاده از قارچ‌های همزیست ریشه می‌تواند به جذب بیش‌تر فسفر و رشد بهتر گیاه کمک نماید.

استفاده از کود سوپر فسفات تریپل در مزارع اکالیپتوس بسیار معمول است (۵ و ۶). از آن‌جایی‌که استفاده از کودهای شیمیایی علاوه بر افزایش هزینه، سبب مشکلات زیست‌محیطی مانند آلودگی آب‌های سطحی (یوتریفیکیشن) و زیرزمینی و نیز تثبیت فسفر در خاک می‌شود (۷)، استفاده از اصلاح‌کننده‌های طبیعی مانند پودر زئولیت و آپاتیت به‌جای کودهای شیمیایی می‌تواند گزینه مناسبی باشد. با این حال استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک مانند زئولیت (۸) و آپاتیت (۹) در افزایش رشد اکالیپتوس بسیار کم و تنها در مهر و موم‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است.

آپاتیت با فرمول $Ca_5(PO_4)_3(OH, F)$ یک نوع فسفات کلسیم معدنی است که از برخی معادن استخراج می‌شود و معمولاً برای تولید کودهای فسفر استفاده می‌شود، اما می‌توان آن را مستقیماً به‌صورت پودر به‌عنوان کود در خاک به کار برد (۱۰). زئولیت نوعی کانی با اندازه کوچک، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و واکنش‌پذیری بالا بوده (۸) که می‌توان از آن در خاک به‌عنوان اصلاح‌کننده استفاده نمود.

قارچ‌های اندوفیت با ریشه بسیاری از گیاهان همزیستی ایجاد می‌کنند و به جذب عناصر به‌ویژه فسفر کمک می‌کنند. قارچ‌های میکوریزا آربسکولار همزیست اجباری بوده که با بیش از ۸۵ درصد گیاهان زراعی همزیستی برقرار کرده و به توسعه بهتر گیاه، جذب فسفر و ریزمغذی‌ها و نیز ایجاد مقاومت در گیاه در شرایط تنش‌های محیطی کمک می‌نمایند (۱۱). قارچ *Serendipita, indica* همزیست اختیاری بسیاری از گیاهان زراعی بوده که به علت تشابه بسیار زیاد با میکوریزا از نظر نحوه همزیستی با گیاه و کمک به جذب فسفر، به‌عنوان شبه میکوریزا نیز نام برده می‌شود (۱۲). استفاده از قارچ‌های همزیست ریشه در

اصلاح‌کننده- کود زیستی بر رشد نهال‌های اکالیپتوس در یک دوره ۶ ماهه طراحی شد. در این پژوهش علاوه بر بررسی رشد گیاه و جذب فسفر توسط گیاه، به ویژگی‌های خاک مانند فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و کربن و فسفر زی‌توده نیز پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

گیاهچه‌های اکالیپتوس، گونه *E. camaldulensis* به‌صورت نهال‌های همگن در گلدان‌های حاوی ۲ کیلوگرم خاک از شرکت راه سبز نگین واقع در شهرستان شوشتر تهیه شد. پس از باز کردن گلدان، خاک چسبیده به ریشه جدا شد. سپس گیاهچه‌ها وزن شده و به گلدان‌های ۴ کیلوگرمی با خاک جدید و با اعمال تیمارها انتقال یافت. نهال‌های با وزن بسیار نزدیک به هم انتخاب شد و وزن اولیه هر نهال یادداشت گردید. خاک Clay Loam از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزارع کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز برای پر کردن گلدان‌ها استفاده شد. مشخصات خاک شامل بافت خاک به روش هیدرومتر، ماده آلی با تیتراسیون برگشتی به روش و الکلی بلک، pH و EC در عصاره گل اشباع، فسفر قابل‌دسترس به روش اولسن با عصاره‌گیری با بیکربنات سدیم، فسفر کل به روش هضم تر و رنگ سنجی و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (جدول ۱) (۲۵). تیمارها شامل استفاده از اصلاح‌کننده (شاهد)، سوپر فسفات تریپل ۱۵۰ کیلو در هکتار، آپاتیت ۵ درصد وزنی و زئولیت ۳ درصد وزنی) و مایه‌زنی با قارچ همزیست (بدون مایه‌زنی، مایه‌زنی با *Glomus etunicatum* و مایه‌زنی با *S. indica*) بودند.

مقدار مورد نیاز کود فسفره، آپاتیت و زئولیت به‌ازای هر کیلوگرم خاک محاسبه و توزین شد و هر تیمار جداگانه با خاک مخلوط شد و خاک‌های تیمار شده با این اصلاح‌کننده‌ها برای پر کردن گلدان

بسیاری از پژوهش‌ها و برای بسیاری از گیاهان گزارش شده است. بسیاری از پژوهش‌ها تأثیر مثبت کاربرد میکوریز را در افزایش جذب فسفر و بهبود جذب آب و رشد بهتر گیاه را گزارش داده‌اند (۱۳). میکوریز، همزیستی قارچ با گیاه، رابطه مهمی می‌باشد که ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را بهبود می‌بخشد (۱۴). افزایش جذب فسفر به گیاه به‌واسطه میکوریز به مکانیسم‌های مختلفی از جمله تولید آنزیم‌های فسفاتاز و تولید اسیدهای آلی نسبت داده شده است (۱۵). ثابت شده است که استفاده از میکوریز سبب حل شدن بهتر فسفات‌های خاک شده و به‌عنوان روشی کم‌هزینه و مؤثر توصیه می‌شود (۱۶).

با این‌که پژوهش‌های انجام‌شده، بر روی اکثر گیاهان، در زمینه کود فسفره و میکوریز زیاد می‌باشد، ولی پژوهش‌ها بر روی گیاه اکالیپتوس، تأثیر کود، اصلاح‌کننده و تأثیر تلقیح با قارچ‌های همزیست بر رشد آن بسیار کم می‌باشد، بنابراین لزوم انجام پژوهشی در این زمینه کاملاً مشهود می‌باشد. به‌ویژه در ایران پژوهش‌ها بر روی اکالیپتوس انگشت‌شمار بوده و تنها به پژوهش سردابی و همکاران (۲۰۱۱) می‌توان اشاره نمود که به بررسی برخی عناصر غذایی از جمله فسفر در برگ اکالیپتوس‌های رشد کرده در خاک‌های مختلف پرداختند. البته در پژوهش ایشان هیچ‌گونه کودی مصرف نشد و اکالیپتوس به شکل رشد طبیعی در برخی درختکاری‌های موجود بررسی شد، با این‌حال همبستگی مثبتی بین فسفر برگ و فسفر خاک مشاهده شد (۱۷).

از آنجایی‌که گیاه اکالیپتوس گیاهی تجاری می‌باشد، پژوهش‌ها در این زمینه بسیار کاربردی می‌باشد، بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تأثیرگذاری احتمالی کاربرد اصلاح‌کننده‌های خاک (کود فسفره، آپاتیت و زئولیت) در کنار کودهای زیستی (مایه‌زنی با قارچ‌های همزیست ریشه) و پیدا کردن بهترین ترکیب

هر گلدان ۴ کیلوگرمی، ۳ میلی‌لیتر از سوسپانسیون (حاوی ۱۰۴ اسپور در هر میلی‌لیتر) در کنار ریشه گیاه در زمان کشت استفاده شد.

گیاهچه‌ها در گلدان‌های جدید به مدت ۶ ماه در گلخانه از آبان ۱۴۰۱ تا آخر فروردین ۱۴۰۲ با درجه حرارت ۱۵ تا ۲۹ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۶۳ تا ۸۱ درصد نگهداری شد و در این مدت آبیاری هر هفته یک‌بار تا حدود هفتاد درصد ظرفیت زراعی انجام شد به صورتی که آبی از گلدان‌ها خارج نشود و در صورت خارج شدن آب از ته گلدان و جمع شدن آن در زیرگلدانی، چند ساعت بعد مجدداً به گلدان برگردانده شد. کود اوره معادل ۲۰۰ کیلو در هکتار تقسیط شده و نوبت اول همراه با جابجایی گلدان و نوبت دوم ۴۰ روز پس از جابجایی همراه با آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد.

در روز ۶۰ پس از شروع آزمایش، کلروفیل برگ با دستگاه قابل‌حمل اندازه‌گیری شد (SPAD 502-Plus Chlorophyll Meter) (۱۸). برای هر نهال ۶ قرائت انجام شد و میانگین گرفته شد.

استفاده شد. برای تیمارهای دارای کود فسفر از سوپر فسفات تریپل با ۴۶ درصد P_2O_5 (معادل حدود ۲۰ درصد فسفر) استفاده شد. آپاتیت از معدن آسفوردی یزد تهیه شد و زئولیت (Clinoptilolite zeolite) از شرکت سمنا پودر ننگین تهیه شد. ترکیب عنصری آپاتیت و زئولیت توسط طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) در دانشگاه شهید چمران اهواز اندازه‌گیری و در جدول ۲ آمده است.

مایه تلقیح *G. etunicatum* شامل خاک، ریشه‌های خردشده ذرت کلنیزه شده با قارچ و هیف و اسپور قارچ از شرکت زیست فناور توران، شاهرود تهیه شد و به میزان ۱۵۰ گرم در هر گلدان به صورت لایه‌ای در کنار ریشه قرار گرفت. قارچ اندوفیت *S. indica* از دانشگاه بوعلی سینا همدان تهیه شد و در محیط PDA و سپس PDB کشت شد و تا ده روز برای تشکیل یک سوسپانسیون با میسیلیوم‌های متراکم در شیکر-انکوباسیون با دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. سپس میسیلیوم‌ها با آب مقطر استریل شسته شده و در آب مقطر استریل شناور شده و برای

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک گلدان‌ها.

Table 1. Physical and chemical properties of soil of pots.

اندازه Quantity	واحد Unit	ویژگی Properties
Clay loam	-	بافت Texture
1.1	%	ماده آلی Organic matter
7.75	-	پی‌هاش pH
7	dS m ⁻¹	شوری EC
9	mg kg ⁻¹	فسفر قابل‌دسترس Olsen P
302	mg kg ⁻¹	فسفر کل Total P
42	%	کربنات کلسیم معادل CaCO ₃ equivalent

جدول ۲- ترکیب عنصری آپاتیت و زئولیت استفاده شده.

Table 2. Elemental composition of applied apatite and zeolite.

آپاتیت Apatite	زئولیت Zeolite	ترکیب عنصری Elemental composition
3.5	61.5	SiO ₂
-	8.0	Al ₂ O ₃
50.1	2.4	CaO
-	14.1	K ₂ O
-	1.1	Na ₂ O
3.7	0.9	Fe ₂ O ₃
1.1	0.7	MgO
-	0.12	TiO ₂
37.2	-	P ₂ O ₅
0.5	-	SO ₃

مقدار فسفر قابل جذب خاک توسط روش اولسن (۱۹۵۴) با استفاده از ۰/۵ مولار NaHCO₃ (pH 8.5) اندازه‌گیری شد (۲۱).

فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی با استفاده از پارانیتروفنل فسفات به‌عنوان سوبسترا و بافر جهانی اصلاح شده (pH 6.5) برای اسید فسفاتاز و pH 11 برای آلکالین فسفاتاز) تعیین شد. انکوباسیون در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت و فیلتراسیون انجام شده و سپس عصاره‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر در ۴۱۰ نانومتر قرائت شدند (۲۲).

کربن زی‌توده میکروبی خاک (MBC) به روش گازدهی- استخراج (کلروفرم- سولفات پتاسیم) اندازه‌گیری شد (۲۳). ۱۰ گرم خاک مرطوب با کلروفرم بدون اتانول به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد گازدهی شده و سپس در هوای آزاد قرار گرفت تا کلروفرم از ذرات خاک متصاعد شود. برای هر خاک یک نمونه گازدهی شده و یک نمونه غیرگازدهی شده آماده شد و با ۵۰ میلی‌لیتر محلول

بعد از ۹۰ روز از شروع آزمایش، گیاهان برداشت شده، اندام هوایی و ریشه جداسازی شده، با آب مقطر شستشو شده، وزن تر اندازه‌گیری و سپس در ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ روز خشک شده و وزن خشک اندازه‌گیری شد. تفاوت وزن نهال‌های اولیه و نهال‌ها پس از شش ماه رشد تحت تیمارها محاسبه شد و نسبت به وزن کل حساب شده و در نهایت میزان افزایش وزن در شش ماه به‌صورت وزن خشک محاسبه و گزارش شد.

اجزاء گیاه با آسیاب برقی پودر شده و با روش اکسیداسیون تر (با اسید کلریدریک و اسید نیتریک) هضم شده (۱۹) و غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی به روش رنگ‌سنجی با استفاده از وانادات-مولیبیدن (۲۰) و قرائت توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد.

خاک گلدان‌ها هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و برخی خواص شیمیایی و بیولوژیکی آن اندازه‌گیری شد.

شامل شاهد، سوپر فسفات تریپل، آپاتیت و زئولیت و ۲- قارچ شامل تلقیح‌نشده (شاهد)، تلقیح با *G. etunicatum* و تلقیح با *S. indica* در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار طراحی شد. نرمال بودن داده‌ها با آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد و تجزیه و تحلیل واریانس دوطرفه با استفاده از SAS (9.1) انجام شد. آزمون چنددامنه‌ای دانکن برای آزمایش معنی‌داری تفاوت بین تیمارها در سطح ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس تأثیر کاربرد اصلاح‌کننده‌ها و تلقیح با قارچ‌های همزیست ریشه بر میانگین مربعات ویژگی‌های خاک و گیاه آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثرات اصلی کاربرد اصلاح‌کننده‌ها و تلقیح با قارچ‌های در مورد بسیاری از ویژگی‌ها معنی‌دار شده است. اثرات متقابل نیز در مورد برخی پارامترها معنی‌دار شده است اما برای مقایسه بهتر میانگین‌ها، همه پارامترها به صورت اثرات متقابل بررسی می‌شوند.

pH خاک تغییرات معنی‌داری تحت تأثیر تیمارها نشان نداد که به دلیل وضعیت بافری خاک می‌باشد. اگرچه زئولیت استفاده‌شده تا حدودی قلیایی بود (۷/۹)، اما به دلیل مقدار کم زئولیت استفاده‌شده و نیز به دلیل ظرفیت بافری خاک، تغییر معنی‌داری در pH خاک (۷/۷) ایجاد نکرد.

0.5 M K_2SO_4 برای ۳۰ دقیقه شیکر و سپس سانترفیوژ شده و کربن آلی محلول در عصاره‌ها به روش تیتراسیون برگشتی با فروسولفات آمونیوم اندازه‌گیری شد. MBC از تفاوت نمونه گازدهی شده با نمونه گازدهی نشده و با در نظر گرفتن ضریب اصلاحی ۰/۳۸، به دلیل استخراج ناقص کربن زی‌توده میکروبی، محاسبه گردید.

فسفر زی‌توده میکروبی خاک (MBP) با روش گازدهی-استخراج اندازه‌گیری شد (۲۴). به طور خلاصه، برای هر خاک، سه نمونه ۵ گرمی خاک تازه در ظروف شیشه‌ای ۱۰۰ میلی‌لیتری قرار داده شد. نمونه اول به عنوان شاهد بدون اصلاح رها شد، نمونه دوم فسفر (به شکل KH_2PO_4) معادل ۲۵ میکروگرم در هر گرم خاک دریافت نمود و نمونه سوم با کلروفورم بدون اتانول (۴۸ ساعت، ۲۵ درجه سانتی‌گراد) گازدهی شد. ۱۰۰ میلی‌لیتر 0.5 M $NaHCO_3$ به نمونه‌ها اضافه شد، به مدت ۳۰ دقیقه شیکر و سپس عصاره‌گیری شد و غلظت فسفر در عصاره‌ها با روش رنگ‌سنجی (مولیبدن آبی) با استفاده از اسپکتروفتومتری در ۸۸۰ نانومتر تعیین شد (۲۵). از آنجایی که میزان فسفر اضافه‌شده به نمونه دوم مشخص می‌باشد، با مقایسه فسفر نمونه سوم با شاهد و نمونه دوم، MBP خاک محاسبه شده و با استفاده از ضریب تبدیل ۰/۴ برای محاسبه استخراج ناقص MBP محاسبه شد (۲۴).

تجزیه و تحلیل آماری: این آزمایش (کلاً با ۳۶ گلدان) به صورت آزمایش فاکتوریل و دو فاکتور (۱- اصلاح‌کننده

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس تأثیر تیمارها بر میانگین مربع پارامترهای مورد اندازه‌گیری.

Table 3. Results of ANOVA of treatments on mean square of measured parameters.

خطا Error	اصلاح‌کننده * قارچ Amendment*Fungi	قارچ Fungi	اصلاح‌کننده Amendments	پارامتر Parameter
24	6	2	3	درجه آزادی df
0.26	0.24	0.15	18.88***	کلروفیل Chlorophyll
0.54	1.38*	11.27***	70.56***	فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase
0.66	0.21*	10.74***	30.45***	فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase
0.24	0.06	3.10***	4.66***	فسفر اولسن Olsen P
0.16×10^{-5}	0.03×10^{-4}	0.01×10^{-3} ***	0.58×10^{-4} ***	فسفر کل Total P
0.71	0.22	4.86**	16.97***	وزن اندام هوایی Shoot weight
0.27	0.124	0.83*	3.23***	وزن ریشه Root weight
0.06	0.08*	1.24***	4.09***	غلظت فسفر اندام هوایی P content of shoot
0.04	0.02	0.23**	1.03***	غلظت فسفر ریشه P content of root
4.64	3.78	79.85***	468.42***	کربن زی‌توده میکروبی Microbial biomass C
0.59	0.99	8.21***	21.82***	فسفر زی‌توده میکروبی Microbial biomass P

***، ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۰۵ درصد

پژوهش بیش‌تر بود که به دلیل استفاده از خاک کربناته با pH 7.7 می‌باشد که به آکالین فسفاتاز اجازه می‌دهد طول عمر بیش‌تری در خاک داشته باشد و فعالیت بالاتری از آن اندازه‌گیری و ثبت شود. مطالعات قبلی هم‌چنین فعالیت آکالین فسفاتاز بالاتری را در خاک استان همدان (۲۷) و خاک استان خوزستان تحت کشت کتان (*Linum usitatissimum* L.) (۲۸) گزارش دادند می‌تواند به دلیل محتوای بالای کربنات کلسیم در این خاک‌ها باشد (۲۷ و ۲۸).

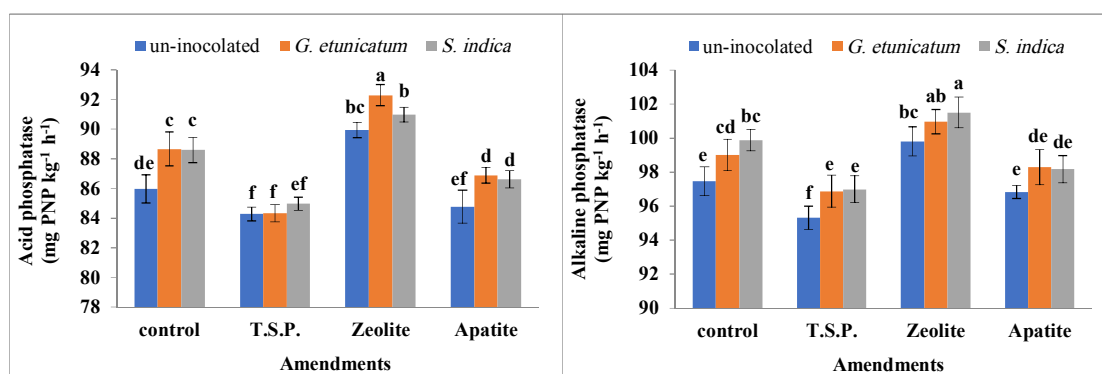
مقایسه میانگین فعالیت آنزیم‌های اسید و آکالین فسفاتاز در خاک (شکل ۱) نشان می‌دهد میزان آکالین فسفاتاز بیش‌تر از اسید فسفاتاز است. درحالی‌که اسید فسفاتاز می‌تواند در خاک از میکروارگانیسم‌های خاک، ریشه گیاهان و جانوران خاک ترشح شود، اما آکالین فسفاتاز در خاک تنها از میکروارگانیسم‌های خاک ترشح می‌شود (۲۶)؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که میزان فعالیت اسید فسفاتاز بیش‌تر باشد، اما برخلاف انتظار میزان فعالیت آکالین فسفاتاز در این

می‌تواند با رساندن مواد مغذی به ریزجانداران خاک و ایجاد محیط مناسب برای رشد آن‌ها سبب افزایش تولید فسفاتازها در خاک شود (۳۱). در پژوهش حاضر تیمارهای دارای ژئولیت با این‌که فسفر کل کم‌تری نسبت به تیمارهای دارای آپاتیت و سوپرفسفات تریپل داشته‌اند (شکل ۲) اما کربن و فسفر زی‌توده میکروبی بیش‌تری را نشان داده‌اند (شکل ۳) که به معنای رشد بهتر میکروارگانیسم‌ها در تیمارهای حاوی ژئولیت می‌باشد و این موضوع در کنار رشد بهتر گیاه (شکل ۴) می‌تواند دلیل افزایش تولید و فعالیت فسفاتازها در خاک باشد.

تلقیح گیاه با قارچ‌های همزیست به‌طور معنی‌داری ($P < 0/05$) باعث افزایش فعالیت اسید و آلکالین فسفاتاز در شاهد و در برخی تیمارهای دریافت‌کننده مواد اصلاحی شد. تیمار دریافت‌کننده ژئولیت و تلقیح‌یافته با *G. etunicatum* بیش‌ترین فعالیت اسید فسفاتاز را نشان داد. تیمار دارای ژئولیت و تلقیح با *S. indica* بیش‌ترین فعالیت آلکالین فسفاتاز را نشان داد که تفاوت معنی‌داری با تیمار ژئولیت تلقیح‌یافته با *G. etunicatum* نداشت. قارچ‌های همزیست محرک رشد می‌توانند حلالیت فسفر را با تولید آنزیم‌های فسفاتاز افزایش دهند (۳۲ و ۳۳). مطالعات دیگر پژوهش‌گران نشان داده است که مایه‌زنی با قارچ‌های همزیست ریشه، سبب افزایش فعالیت فسفاتاز و افزایش غلظت فسفر در گیاهانی مانند نارنج چینی (trifoliolate) تلقیح‌شده با *S. indica* (۳۴) و نیز در انبه (*Mangifera indica*) تلقیح‌شده با قارچ‌های میکوریز (۳۵) شده است. هم‌چنین در موز تلقیح‌شده با *Funneliformis mosseae*، افزایش فسفر اولسن خاک و افزایش رشد گیاه مشاهده شد (۳۶).

میزان فعالیت اسید و آلکالین فسفاتازها در تیمارهای دریافت‌کننده آپاتیت و سوپرفسفات تریپل کاهش یافت و در تیمارهای ژئولیت نسبت به شاهد افزایش یافت. کاهش فعالیت فسفاتازها در اثر مصرف کودهای فسفر (آپاتیت و سوپرفسفات تریپل) به دلیل تأمین فسفر مورد نیاز گیاه توسط کود می‌باشد، در چنین شرایطی به دلیل اضافه نمودن مقدار زیادی فسفر به خاک (که بخشی از آن هم به‌صورت محلول می‌باشد)، جمعیت و فعالیت ریزجانداران حل‌کننده فسفات و تولید اسیدهای آلی و فسفاتازها کاهش می‌یابد (۲۹). فعالیت فسفاتازها در تیمارهای آپاتیت بیش‌تر از سوپرفسفات تریپل بود که به دلیل شکل نامحلول فسفر در آپاتیت می‌باشد که نسبت به سوپرفسفات تریپل حلالیت کم‌تر داشته و نیاز به فسفاتاز بیش‌تری برای تبدیل آن به فرم قابل‌دسترس گیاه می‌باشد. Liu و همکاران (۲۰۲۰) نیز در پژوهشی در چین در بررسی آنزیم فسفاتاز در ریزوسفر گندم، بر کاهش فعالیت فسفاتاز با افزایش کوددهی تأکید داشته‌اند (۳۰). ایشان تغییر جمعیت میکروبی و کاهش ژن‌های مرتبط با تولید فسفاتاز را دلیل این امر عنوان نموده‌اند.

مشاهده می‌شود که تیمارهای دریافت‌کننده ژئولیت، تغییرات قابل‌توجهی در میزان فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز نشان می‌دهند و کاربرد ژئولیت باعث افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم‌ها شد. ژئولیت ظرفیت نگهداری آب خاک را بالا برده و نیز به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی که دارد عناصر تغذیه‌ای را به‌خوبی در سطح خود نگه‌داشته و باعث بهبود ویژگی‌های خاک، فعالیت بیش‌تر میکروارگانیسم‌ها و رشد بهتر گیاه می‌شود. هم‌چنین کاربرد ژئولیت



شکل ۱- تأثیر تیمارها روی فعالیت فسفاتاز اسیدی و قلیایی خاک.

ستون‌های دارای یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌دار با آزمون دانکن ($P < 0.05$) نشان ندادند.

اختصارها: T.S.P. سوپر فسفات تریپل.

Figure 1. Effect of treatments on acid and alkaline phosphatase content of soil.

Values followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

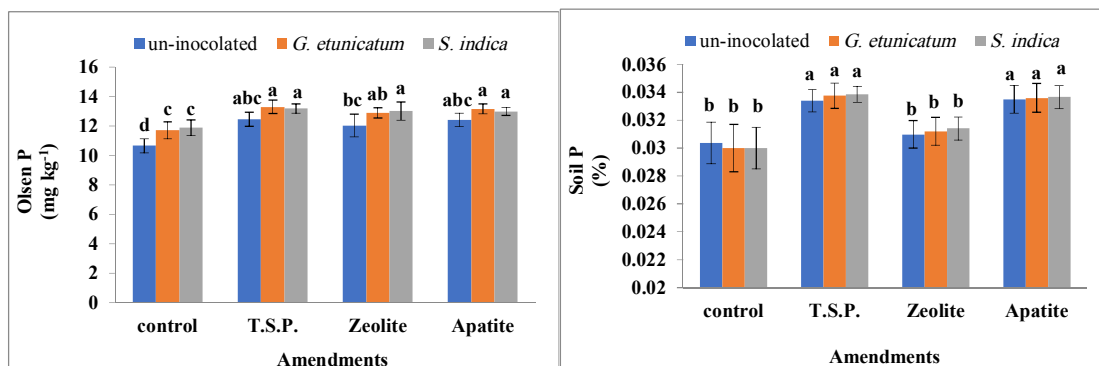
Abbreviations: T.S.P. triple super phosphate.

نکته جالب توجه این‌جا می‌باشد که فسفر موجود در هیف‌های قارچ طی اندازه‌گیری، به‌عنوان فسفر اولسن استخراج می‌شود (۳۸). هم‌چنین افزایش فسفر اولسن در تیمار ژئولیت بدون تلقیح نسبت به شاهد بدون تلقیح بیانگر تأثیر مثبت ژئولیت بر افزایش فسفر اولسن خاک می‌باشد. این‌که افزودن ژئولیت باعث افزایش حلالیت فسفر می‌شود در پژوهش‌های دیگر نیز دیده شده (۳۹) و دلایل مختلفی برای آن بیان شده از جمله این‌که ژئولیت می‌تواند با کاهش آهن و آلومینیوم تبادلی خاک، تثبیت فسفر روی کلوئیدهای خاک و اکسی هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم را کاهش می‌دهد و سبب افزایش فسفر در دسترس می‌شود (۴۰). از طرف دیگر ژئولیت با داشتن CEC بالا، عناصر غذایی را در حالت تبادلی نگه‌داشته که برای گیاه و میکروارگانیسم‌ها جذب این عناصر بسیار تسهیل می‌شود. این موضوع سبب رشد بهتر گیاه و میکروارگانیسم‌ها در حضور ژئولیت شده که خود بر تولید بیشتر اسیدهای آلی و آنزیم فسفاتاز (شکل ۱) و تبدیل فسفر به حالت قابل تبادل مؤثر می‌باشد (۴۱). از طرف دیگر CEC بالای ژئولیت سبب می‌شود مقادیر بالایی از کاتیون‌های Ca^{2+} را جذب نموده و پایین

در شکل ۲ تأثیر تیمارها بر مقدار فسفر کل خاک و فسفر اولسن خاک (فسفر قابل جذب توسط گیاه) مشاهده می‌شود. فسفر کل خاک در تیمارهای سوپرفسفات تریپل و آپاتیت افزایش معنی‌داری ($P < 0.05$) نسبت به تیمار شاهد داشته است. کاربرد ژئولیت تغییری در فسفر کل خاک ایجاد نکرد که با توجه به نبود فسفر در ژئولیت (جدول ۲) بدیهی می‌باشد. کاربرد اصلاح‌کننده‌ها منجر به افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) در فسفر اولسن خاک نسبت به شاهد شدند. هم‌چنین تلقیح با قارچ‌های همزیست سبب افزایش فسفر اولسن خاک در تیمارهای شاهد و ژئولیت-*S. indica* شد. تلقیح با قارچ‌های همزیست تغییر معنی‌داری در محتوای فسفر کل خاک ایجاد نمود که با توجه به تغییرات فسفر اولسن خاک در اثر تلقیح با قارچ، تأکیدی بر این موضوع می‌باشد که قارچ‌های همزیست فسفر را از شکل کم محلول در خاک به فرم‌های محلول‌تر تبدیل می‌نمایند ولی در محتوای کل فسفر خاک تغییری ایجاد نمی‌نمایند (۳۷). برخی پژوهش‌ها نیز بر این مسأله تأکید نموده‌اند که قارچ‌های میکوریز با جذب فسفر در هیف خود تحرک فسفر را در خاک افزایش داده و

می‌گردد و بدین‌صورت فسفر به فرم محلول‌تر درمی‌آید (۴۱).

آمدن غلظت کاتیون‌های کلسیم در محلول خاک سبب حل شدن برخی مواد معدنی حاوی فسفر نامحلول



شکل ۲- تأثیر تیمارها روی فسفر اولسن و فسفر کل خاک.

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌دار با آزمون دانکن ($P < 0.05$) نشان ندادند.

اختصارها: T.S.P. سوپر فسفات تریپل.

Figure 2. Effect of treatments on olsen phosphorus content of soil and total soil phosphorus percent. Values followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$) by Duncan's multiple range test. Abbreviations: T.S.P. triple super phosphate.

یک جریان مداوم و آهسته از فسفر معدنی را برای گیاه تأمین نماید (۴۲ و ۴۳) و سبب افزایش جذب فسفر به گیاه گردد (۴۴ و ۴۵).

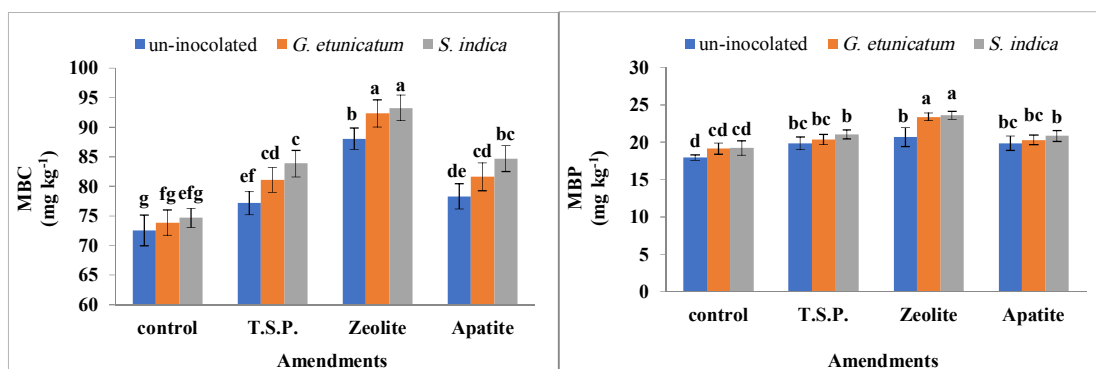
قارچ‌ها بیومس زیادی در خاک دارند و تلقیح گیاه با قارچ‌های همزیست ریشه، سبب ایجاد همزیستی مؤثر با گیاه و پخش شدن هیف‌های قارچ در خاک شده که نوعی زی‌توده میکروبی بوده و باعث افزایش بیومس میکروبی خاک می‌شود (۴۶). علاوه بر این، استفاده از قارچ‌های همزیست ریشه به دلیل بهبود رشد گیاه و رشد بیش‌تر ریشه گیاه سبب افزایش منطقه ریزوسفر در خاک شده که خود باعث رشد بهتر دیگر میکروارگانیسم‌های خاک شده و MBC و MBP خاک افزایش بیش‌تری می‌یابد. پژوهش‌گران دیگر نیز افزایش MBC را در پی تلقیح گیاه با قارچ‌های همزیست ریشه گزارش داده‌اند (۴۶). همچنین در تیمارهای دریافت‌کننده زئولیت، کود فسفره و آپاتیت افزایش MBC و MBP مشاهده می‌شود که به دلیل رشد بهتر گیاه و میکروارگانیسم‌ها

MBC و MBP خاک در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده شد کاربرد زئولیت، آپاتیت و سوپرفسفات تریپل باعث افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) در MBC و MBP نسبت به شاهد شد. هم‌چنین تلقیح با قارچ‌های همزیست منجر به افزایش MBC و MBP شد.

MBC کربن زی‌توده میکروبی می‌باشد که بخش فعال کربن خاک می‌باشد و MBP فسفر زی‌توده میکروبی و بخش فعال فسفر خاک می‌باشد. به دلیل آهکی بودن خاک‌های ایران، بخش بزرگی از فسفر خاک به‌صورت نامحلول می‌باشد و کود فسفر اضافه‌شده به خاک نیز به شکل ترکیبات نامحلول درمی‌آید. MBP یک منبع باارزش و فعال از فسفر در خاک می‌باشد. فسفر در این منبع، به دلیل تکثیر سریع و طول عمر کوتاه میکروب‌ها، به‌صورت متوالی بین حالت‌های آلی و معدنی تغییر شکل داده و این منبع به‌خوبی فسفر را در اختیار گیاه قرار می‌دهد. پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که MBP می‌تواند

خاک (آنزیم فسفاتاز، MBC و MBP) و ویژگی‌های گیاه (وزن خشک و کلروفیل) نسبت به شاهد افزایش معنی‌دار داشته و در بسیاری موارد نسبت به تیمارهای حاوی کود فسفره و آپاتیت نیز بهتر بوده است.

در این تیمارها می‌باشد. در تیمار حاوی ژئولیت بیش‌ترین مقادیر MBC و MBP مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل کارآمدی بالا و ویژگی‌های بسیار خوب ژئولیت باشد که باینکه در این تیمارها فسفر کم‌تری به خاک رسیده است اما ویژگی‌های زیستی



شکل ۳- تأثیر تیمارها روی کربن و فسفر زی‌توده میکروبی خاک.

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌دار با آزمون دانکن ($P < 0.05$) نشان ندادند.

اختصارها: T.S.P. سوپر فسفات تریپل.

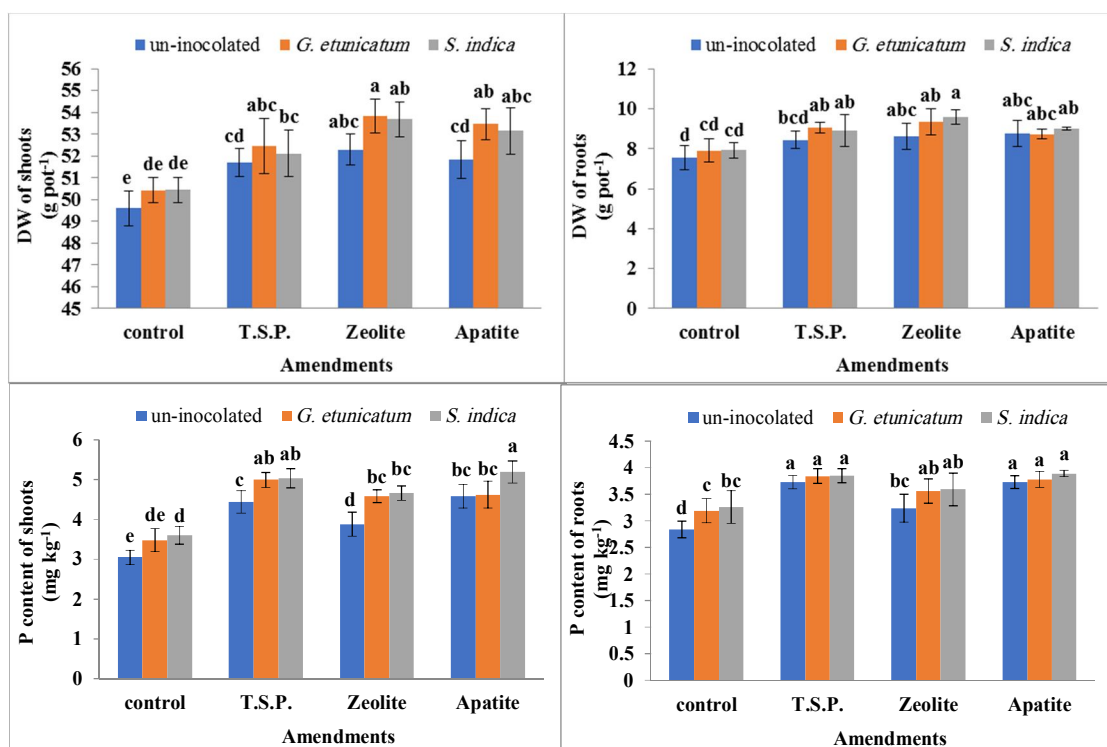
Figure 3. Effect of treatments on MBC and MBP.

Values followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

Abbreviations: T.S.P. triple super phosphate.

ژئولیت (۴۷) و تاج خروس در پی کاربرد ژئولیت (۴۸) گزارش دادند. هم‌چنین دیگر پژوهش‌گران تأثیر مثبت کاربرد هیدروکسی آپاتیت را بر فسفر گیاهانی مانند سویا، سورگوم، نخود و پاکچوی گزارش داده‌اند (۴۹) و افزایش فسفر و کلسیم خاک و افزایش هورمون جیبرلین را عامل این بهبود دانسته‌اند. هم‌چنین برخی پژوهش‌گران تأثیر مثبت کوددهی فسفره و مایه‌زنی با میکوریز را بر وزن خشک گیاه پیاز، میزان فسفر گیاه، میزان کلروفیل گیاه و افزایش فسفر اولسن خاک گزارش داده‌اند (۵۰).

شکل ۴ افزایش وزن خشک بافت‌های گیاهی (افزایش وزن اندام هوایی و ریشه طی شش ماه) و هم‌چنین میزان فسفر موجود در بافت‌های گیاهی را نشان می‌دهد. هر دو عامل، کاربرد اصلاح‌کننده‌ها و تلقیح قارچ‌ها باعث افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) وزن خشک و میزان فسفر اندام هوایی و ریشه شدند. تیمارهای با کاربرد ژئولیت بیش‌ترین مقدار افزایش وزن خشک و سوپر فسفات تریپل و آپاتیت بیش‌ترین افزایش را در میزان فسفر اندام هوایی و ریشه نشان دادند. دیگر پژوهش‌گران نیز افزایش بیومس گیاهانی مانند جو و ذرت در پی کاربرد فسفوژئوسوم و



شکل ۴- تأثیر تیمارها روی وزن خشک و غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه گیاه.

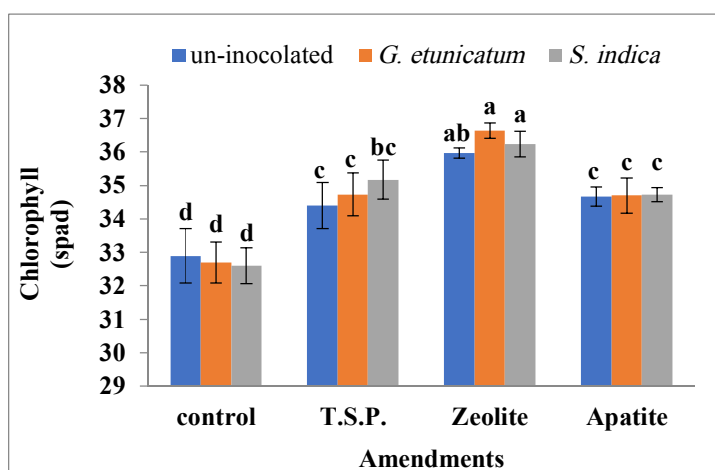
ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌دار با آزمون دانکن ($P < 0.05$) نشان ندادند.

اختصارها: T.S.P. سوپر فسفات تریپل.

Figure 4. Effect of treatments on dry weight of plant tissues and the amount of phosphorus in the plant tissues. Values followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$) by Duncan's multiple range test. Abbreviations: T.S.P. triple super phosphate.

پی کاربرد ژئولیت نشان داده‌اند (۴۸). ایشان دلیل این امر را کاهش تنش اکسیداتیو و کاهش تولید سوپر اکسید دسموتاز و پرولین را در گیاه با کاربرد ژئولیت گزارش دادند. در تیمارهای مربوط به هر اصلاح‌کننده، تلقیح با قارچ‌های همزیست اثر معنی‌داری بر میزان کلروفیل برگ نداشت.

شکل ۵ اثرات تیمارها را بر میزان کلروفیل برگ نشان می‌دهد. تمام اصلاح‌کننده‌ها منجر به افزایش محتوای کلروفیل در مقایسه با شاهد شد. کاربرد ژئولیت به‌طور قابل‌توجهی بیش‌ترین میزان کلروفیل را به همراه داشت، درحالی‌که سوپرفسفات تریپل و آپاتیت اثرات مشابهی داشتند. دیگر گزارش‌ها نیز افزایش کلروفیل را در گیاهانی مانند تاج خروس در



شکل ۵- تأثیر تیمارها روی میزان کلروفیل گیاه.

ستون‌های دارای حداقل یک حرف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌دار با آزمون دانکن ($P < 0.05$) نشان ندادند.

اختصارها: T.S.P. سوپر فسفات تریپل.

Figure 5. Effect of treatments on chlorophyll content of leaves.

Values followed by the same letter are not significantly different ($P < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

Abbreviations: T.S.P. triple super phosphate.

مانند نهال‌های اکالیپتوس، استفاده از آپاتیت به دلیل قیمت ارزان‌تر، حلالیت کم‌تر و احتمال کم‌تر آلودگی زیست‌محیطی (آلودگی آب و مسأله یوتریفیکیشن) نسبت به کود سوپرفسفات تریپل توصیه می‌شود؛ و از آنجایی‌که معادن آپاتیت در کشور وجود دارد می‌توان از پودر آپاتیت به‌طور مستقیم استفاده نمود و از ایجاد هزینه‌های اضافی تولید کود ممانعت نمود. از نظر کلروفیل گیاه و ویژگی‌های خاک مانند فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی، MBC، MBP، زئولیت به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد و دیگر اصلاح‌کننده‌ها افزایش بیشتری را نشان داده که می‌تواند به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی بالای زئولیت و وجود برخی عناصر غذایی (به‌ویژه پتاسیم) در آن باشد که سبب بهبود رشد گیاه و نیز بهبود فعالیت‌های میکروبی شده است. نتایج این پژوهش بر تأثیر مثبت کاربرد زئولیت همراه با مایه‌زنی با قارچ‌های همزیست در رشد نهال‌های اکالیپتوس تأکید داشته و نیز پژوهش‌های پیش‌تر پیرامون استفاده هم‌زمان از آپاتیت و زئولیت پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری کلی

تیمارهای به‌کاربرده شده سبب بهبود رشد و افزایش وزن نهال‌های اکالیپتوس نسبت به شاهد شدند که لزوم کاربرد اصلاح‌کننده‌ها و کودهای زیستی را در کشت نهال‌های اکالیپتوس و زراعت چوب نشان می‌دهد.

کاربرد قارچ‌های همزیست سبب بهبود صفات رویشی نهال‌ها و پارامترهای خاک نسبت به شاهد شده است و به‌ویژه در افزایش وزن گیاه، فسفر گیاه و افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز تأثیرگذار بوده است. از نظر کربن و فسفر زی‌توده میکروبی خاک، وزن خشک گیاه و مقدار فسفر جذب‌شده به اندام‌های گیاه، بین دو قارچ به‌کار برده شده تفاوت معنی‌داری دیده نشد، لذا استفاده از هر کدام از قارچ‌ها می‌تواند نتایج مثبتی به همراه داشته باشد.

کاربرد آپاتیت، زئولیت و سوپرفسفات تریپل هر سه باعث افزایش فسفر اولسن خاک، وزن خشک اکالیپتوس و میزان فسفر اندام‌های گیاه نسبت به شاهد شدند. در صورت نیاز به مصرف فسفر در کشت‌هایی

است (گرنّت شماره SCU.AS1401.28572) تشکر

می‌نمایند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه شهید چمران

اهواز که هزینه اجرای این پژوهش را بر عهده گرفته

منابع

1. Leon, M., Cornejo, G., Calderón, M., González-Carrión, E., & Florez, H. (2022). Effect of deforestation on climate change: A co-Integration and causality approach with time series. *Sustainability*, 14, 11303.
2. Teulieres, C., & Marque, C. (2007). *Eucalyptus*. biotechnology in agriculture and forestry, 60. In transgenic Crops V (ed. by Pua, E.C., & Davey, M.R.) Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
3. Messier, C., Bauhus, J., & Sousa-Silva, R. (2021). For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests. *Conservation Letters*. e12829.
4. Goncalves, J. L. M., Stape, J. L., Laclau, J. P., Bouillet, J. P., & Ranger, J. (2008). Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*. 70 (2), 105-118.
5. Fernandez, J. Q. P., Dias, L. E., Barros, N. F., Novais, R. F., & Moraes, E. J. (2000). Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. *Forest Ecology and Management*. 127, 93-102.
6. Foltran, E. C., de Moraes Goncalves, J. L., Rocha, J. H. T., Bazani, J. H., Valduga, G. R., Rodrigues, M., Pavinato, P., Erro, J., & Garcia-Mina, J. M. (2019). Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a *Eucalyptus* plantation in a loamy Oxisol. *Forest Ecology and Management*. 435, 170-179.
7. Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., & Alamri, S. A. (2018). Fertilizers and their contaminants in soils, surface and groundwater. In: Dominick, A., DellaSala, & Michael, I. Goldstein (eds.) *The Encyclopedia of the Anthropocene*. 5, 225-240.
8. Chu, S., Xian, L., Zhao, N., Lai, C., Yang, W., Wang, J., Long, M., Liao, D., Ouyang, J., Wang, Z., Jacobs, D. F., & Zeng, S. (2023). Combined addition of bagasse and zeolite stabilizes potentially toxic elements in sewage sludge compost and improves *Eucalyptus urophylla* seedling growth. *Forest Ecology and Management*. 539, 121003.
9. Hackman, J., Ozyhar, T., Chien, S. H., Hilty, F., Woodley, A., & Cook, R. L. (2022). Evaluation of synthetic hydroxyapatite as a potential phosphorus fertilizer for application in Forest plantations. *Forest Science and Technology*. 18 (3), 127-134.
10. Chen, M., Li, Z., Huang, P., Li, X., Qu, J., Yuan, W., & Zhang, Q. (2018). Mechanochemical transformation of apatite to phosphoric slow-release fertilizer and soluble phosphate. *Process Safety and Environmental Protection*. 114, 91-96.
11. Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*. 184, 594-600.
12. Gill, S. S., Gill, R., Trivedi, D. K., Anjum, N. A., Sharma, K. K., Ansari, M. W., Ansari, A. A., Johri, A. K., Prasad, R., Pereira, E., Varma, A., & Tuteja, N. (2016). Piriformospora indica: Potential and significance in plant stress tolerance. *Frontiers in Microbiology*. 7, 332.
13. Lukiwatid, D. R., & Simanungkalit, R. D. M. (2002). Dry matter yield, N and P uptake of soybean with *Glomus manihotis* and *Bradyrhizobium japonicum*. In timetable of international meeting on direct application of phosphorus rock and related

- technology–latest developments and practical experiences. *International fertilizer development center muscle shoals (IFDC) USA Kuala Lumpur, Malaysia*, 16-20 July.
14. Smith, S. E., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*. 62, 227-250.
 15. Eldhuse, T. D., Swensen, B., Wickström, T., & Gro., W. (2007). Organic acids in root exudates from *Picea abies* seedlings influenced by mycorrhiza and aluminum. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 170, 645-648.
 16. Richardson, A. E. 2001. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. *Functional Plant Biology*. 28, 897-906.
 17. Sardabi, H., Rahmani, A., Hamze, B., Assareh, M. H., & Ghorany, M. (2010). Impact of different Eucalypt species on forest soil properties in Guilan province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 18, 1. [In Persian]
 18. Hazem, M., Dabrowski, P., Cetner Magdalena, D., Samborska Izabela A., Lukasik, I., Brestic, M., Zivcak, M., Tomasz, H., Mojski, J., Kociel, H., & Panchal Balaji, M. (2017). A comparison between different chlorophyll content meters under nutrient deficiency conditions. *Journal of Plant Nutrition*. 40 (7), 1024-1034.
 19. Gupta, P. K. (2004). Soil, plant, water and fertilizer analysis. *Agrobios (India)*. 438p.
 20. Cottenie, A. (1980). Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendations. 38, 2.
 21. Olsen, S. R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture, Washington.
 22. Tabatabai, M. A., Weave, S., Angle, P., Bottomley, D., Bezdicek, S., Smith, A., Tabatabai R. W., & Wollum, A. (1994). Soil enzyme. Pp: 775-834. In: Weaver, R. W. et al., (Eds.) Methods in soil analysis, Part 2: Microbiological and biochemical properties. *Soil Science Society of America*, Madison, WI.
 23. Jenkinson, D. S., & Powelson, D. S. (1976). The effect of biocidal treatments of metabolism in soil: A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*. 8, 209-213.
 24. Brookes, P. C., Powlson, D. S., & Jenkinson, D. S. (1982). Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 14 (4), 319-329.
 25. Kuo, S. (1996). Phosphorus. In: Sparks D.L. (ed.) Methods of soil analysis. *Agronomy 9*. ASA-SSSA, Madison, WI.
 26. Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., & Renella, G. (2011). Role of phosphatase enzymes, in: soil phosphorus in action. In: Bunemann, E.K. & Oberson, A.E.F. (Ed.). *Biological Process in Soil Phosphorus Cycling*. Heidelberg: Springer, pp. 215-243.
 27. Zalaghi R., & Safari-Sinegani, A. A. (2014). The importance of different forms of Pb on diminishing biological activities in a calcareous soil. *Chemistry and Ecology*. 30 (5), 446-462.
 28. Jamily, S., Zalaghi, R., & Mehdi Khanlou, K. (2024). Changes in microRNAs expression of flax (*Linum usitatissimum L.*) planted in a cadmium-contaminated soil following the inoculation with root symbiotic fungi. *International Journal of Phytoremediation*. 26 (8), 1221-1230.
 29. Liu, L., Gao, Z., Yang, Y., Gao, Y., Mahmood, M., Jiao, H., Wang, Z., & Liu, J. (2023). Long-term high-P fertilizer input shifts soil P cycle genes and microorganism communities in dryland wheat production systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 342, 108226.
 30. Liu, J., Ma, Q., Hui, X., Ran, J., Ma, Q., Wang, X., & Wang, Z. (2020). Long-term high-P fertilizer input decreased the total bacterial diversity but not phoD-harboring bacteria in wheat rhizosphere soil with available-P deficiency. *Soil Biology and Biochemistry*. 149, 107918.

31. Shivakumara, M. N., Krishna Murthy, R., Subbarayappa, T. C., Chamegowda, M. N., Thimmegowda, C. T., & Muthuraju, R. (2019). Effect of Zeolite and Fertilizer Application on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Finger Millet. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 8 (11), 1939-1957.
32. Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., & Reddy, S. P. P. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*. 12173102.
33. Diaz-Urbano, M., Goicoechea, N., Velasco, P., & Poveda, J. (2023). Development of agricultural bio-inoculants based on mycorrhizal fungi and endophytic filamentous fungi: Co-inoculants for improve plant-physiological responses in sustainable agriculture. *Biological Control*. 182, 105223.
34. Yang, L., Zou, Y. N., Tian, Z. H., Wu, Q. S., & Kuca, K. (2021). Effects of beneficial endophytic fungal inoculants on plant growth and nutrient absorption of trifoliolate orange seedlings. *Scientia Horticulturae*. 277, 109815.
35. Mohandas, S. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi benefit mango (*Mangifera indica* L.) plant growth in the field. *Scientia Horticulturae*. 143, 43-48.
36. Sahodaran, N. K., Arun, A. K., & Ray, J.G. (2019). Native arbuscular mycorrhizal fungal isolates (*Funneliformis mosseae* and *Glomus microcarpum*) improve plant height and nutritional status of banana plants. *Experimental Agriculture*. 55, 924-933.
37. Campos, P. M. S., Borie, F., Cornejo, P., Meier, S., Lopez-Raez, J. A., Lopez-Garcia, A., & Seguel, A. (2021). Wheat root trait plasticity, nutrient acquisition and growth responses are dependent on specific arbuscular mycorrhizal fungus and plant genotype interactions. *Journal of Plant Physiology*. 256, 153297.
38. Hou, L., Zhang, X., & Feng, G. (2021). Arbuscular mycorrhizal enhancement of phosphorus uptake and yields of maize under high planting density in the black soil region of China. *Scientific Reports*. 11, 1100.
39. Zheng, J., Chen, T., Chi, D., Xia, G., Wu, Q., Liu, G., Chen, W., Meng, W., Chen, Y., & Siddique, K. H. M. (2019). Influence of Zeolite and Phosphorus Applications on Water Use, P Uptake and Yield in Rice under Different Irrigation Managements. *Agronomy*. 9L: 537.
40. Aainaa, N., Haruna, H., Ahmed, O., & AbMajid, N. M. (2018) Effects of clinoptilolite zeolite on phosphorus dynamics and yield of *Zea Mays* L. cultivated on an acid soil. *Plos one*. 13, 9. e0204401.
41. Lancellotti, I., Toschi, T., & Passaglia, F. (2014). Release of agronomical nutrient from zeolite substrate containing phosphatic waste. *Chemistry in a sustainable society*. 21, 13237-13242.
42. Sugito, T., Yoshida, K., Takebe, M., Shinano, T., & Toyota, K. (2010) Soil microbial biomass phosphorus as an indicator of phosphorus availability in a Gleyic Andosol. *Soil Science and Plant Nutrition*. 56, 390-398.
43. Ayaga, G., Todd, A., & Brookes, P. C. (2006). Enhanced biological cycling of phosphorus increases its availability to crops in low-input sub-Saharan farming systems. *Soil Biology and Biochemistry*. 38, 81-90.
44. Saini, V. K., Bhandari, S. C., & Tarafdar, J. C. (2004). Comparison of crop yield, soil microbial biomass C, N, and P, N-fixation, nodulation and mycorrhizal infection in inoculated and non-inoculated sorghum and chickpea crops. *Field Crops Research*. 89, 39-47.
45. Chen, G. C., He, Z. L., & Huang, C. Y. (2000). Microbial biomass phosphorus and its significance in predicting phosphorus availability in red soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 31 (5-6), 655-667.

46. Hoseini, S. S., Zalaghi, R., Enayatizamir, N., & Feizian, M. (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 (14), 97-114. [In Persian]
47. Krutilina, V. S., Polyanskaya, S. M., Goncharova, N. A., & Letchamo, W. (2000). Effects of zeolite and phosphogypsum on growth, photosynthesis and uptake of Sr, Ca and Cd by barley and corn seedlings. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 35 (1), 15-29.
48. Karami, S., Hadi, H., Tajbaksh, M., & Modarres-Sanavy, S. A. M. (2020). Effect of zeolite on nitrogen use efficiency and physiological and biomass traits of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) under water-deficit stress conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 20, 1427-1441.
49. Maghsoodi, M. R., Ghodszad, L., & Asgari Lajayer, B. (2020). Dilemma of hydroxyapatite nanoparticles as phosphorus fertilizer: Potentials, challenges and effects on plants. *Environmental Technology & Innovation*. 19, 100869.
50. El-Sherbeny, T. M. S., Mousa, A. M., & El-Sayed R. (2022). Use of mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization to improve the yield of onion (*Allium cepa* L.) plant. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 29 (1), 331-338.