



The effect of inoculation with native mycorrhizal fungi of Khuzestan and the application of phosphorus fertilizer on soil phosphatase enzyme activity and the concentration of some elements in Zea mays.

Marzieh Kolahkaj¹ | Roya Zalaghi^{2✉} | Gholam Reza Ghezelbash³ | Nasser Aliasgharzad⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail:

M-kolahkaj@stu.scu.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

E-mail: r.zalaghi@scu.ac.ir

3. Department of Biology, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: rghezelbash@scu.ac.ir

4. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail:

n-aliasghar@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Jan. 20, 2025

Revised: March. 10, 2025

Accepted: June. 24, 2025

Published online: Aug. 2025

Keywords:

Colonization,
Mycorrhiza,
Phosphorus,
Phosphatase.

ABSTRACT

In sustainable agriculture, the use of arbuscular mycorrhizal fungi to improve plant growth and plant mineral nutrition (especially phosphorus) has a special place. A factorial pot experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in greenhouse conditions. Treatments included phosphorus fertilizer (control (zero), 100 and 200 kg ha⁻¹ triple superphosphate) and inoculation with mycorrhizal fungi (without inoculation and inoculation with *F. mosseae* strain A1 and *F. mosseae* strain A2). After 3 months, the plants were harvested and the activity of acid and alkaline phosphatase enzymes in the soil, soil Olsen phosphorus, concentration of phosphorus, nitrogen, magnesium, and potassium in the plant were measured. The results showed that applying phosphorus fertilizer and using mycorrhizal fungi increased the dry weight of the plant and the concentration of phosphorus, nitrogen, potassium, and magnesium in the shoot. Inoculation with mycorrhizal fungi increased root colonization and also increased the activity of acid phosphatase enzymes (25.2 and 37.07 percent, respectively, for strains A1 and A2 compared to the treatment without inoculation) and alkaline (5.49 and 6.49 percent, respectively, for strains A1 and A2 compared to the treatment without inoculation) in the soil, but these parameters decreased with the application of phosphorus fertilizer. In general, the results showed that in soils with low total and Olsen phosphorus, using obtained phosphorus fertilizer and inoculation with mycorrhiza through symbiosis with the plant leads to better absorption of elements from the soil and better plant growth.

Cite this article: Kolahkaj, M., Zalaghi, R., Ghezelbash, G.R. & Aliasgharzad, N. (2025). The effect of inoculation with native mycorrhizal fungi of Khuzestan and the application of phosphorus fertilizer on soil phosphatase enzyme activity and the concentration of some elements in Zea mays., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (6), 1593-1608.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.388988.669868>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.388988.669868>

EXTENDED ABSTRACT

Background and aim

Phosphorus is the second most important nutrient required by plants after nitrogen and is involved in all biochemical processes, energy-generating compounds, and in addition, the construction of cell membranes and energy transfer. Excessive use of phosphate fertilizers in agricultural lands to provide phosphorus required by crops has always caused environmental problems. In recent years, to reduce these harmful effects, auxiliary resources such as biofertilizers have been significantly used. In sustainable agriculture, the use of arbuscular mycorrhizal fungi to improve plant growth and plant mineral nutrition (especially phosphorus) has a special place. Therefore, the purpose of this study was to understand the effect of inoculation with mycorrhizal fungi at different levels of phosphorus fertilizer on phosphatase enzyme activity and absorption of phosphorus, magnesium, potassium, and nitrogen by corn plants and on some soil and plant characteristics in a sandy loam soil.

Methodology

A factorial pot experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in greenhouse conditions. Treatments included phosphorus fertilizer (control (zero), 100 and 200 kg ha⁻¹ triple superphosphate) and inoculation with mycorrhizal fungi (without inoculation and inoculation with *F. mosseae* strain A1 and *F. mosseae* strain A2). After 3 months, the plants were harvested and the activity of acid and alkaline phosphatase enzymes in the soil, soil Olsen phosphorus, concentration of phosphorus, nitrogen, magnesium, and potassium in the plant were measured.

Findings

The results showed that applying phosphorus fertilizer and using mycorrhizal fungi increased the dry weight of the plant and the concentration of phosphorus, nitrogen, potassium, and magnesium in the shoot. Inoculation with mycorrhizal fungi increased root colonization and also increased the activity of acid phosphatase enzymes (25.2 and 37.07 percent, respectively, for strains A1 and A2 compared to the treatment without inoculation) and alkaline (5.49 and 6.49 percent, respectively, for strains A1 and A2 compared to the treatment without inoculation) in the soil, but these parameters decreased with the application of phosphorus fertilizer.

Conclusion

The results of this study show that although the use of phosphorus fertilizer has reduced the colonization of corn plant roots by mycorrhizal fungi; however, the use of mycorrhizal fungi, even in treatments with 200 kg ha⁻¹ of phosphorus fertilizer, has still increased the activity of acid and alkaline phosphatases (compared to the corresponding treatment without inoculation), increased soil phosphorus, improved phosphorus absorption, and increased plant yield. For crop production in phosphorus-poor soils, fertilization with phosphorus fertilizers is required. The use of mycorrhizal fungi in plant cultivation has improved plant growth and better absorption of phosphorus, nitrogen, magnesium, and potassium elements by the plant. The mycorrhizal fungi used in this study, especially Strain A2, had a very significant and positive effect on plant characteristics. In general, the results showed that in soils with low total and Olsen phosphorus, using obtained phosphorus fertilizer and inoculation with mycorrhiza through symbiosis with the plant leads to better absorption of elements from the soil and better plant growth.

Author Contributions

The study was conceptualized by Marzieh Kolahkaj, Roya Zalaghi, Gholam Reza Ghezelbash, and Nasser Aliasgharzad who also provided oversight for project administration. The methodology was developed by Marzieh Kolahkaj, while the paper writing and software utilized for data analysis was also implemented by Roya Zalaghi, Gholam Reza Ghezelbash, and Nasser Aliasgharzad. Validation of the findings involved all authors ensuring the robustness of the results. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to thank Shahid Chamran University of Ahvaz for funding this project (grant number SCU.AS 1402.28572).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تاثیر مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزای بومی خوزستان و استفاده از کود فسفر بر فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک و غلظت برخی عناصر در گیاه ذرت

مرضیه کلاه‌کج^۱ | رویا زلفی^۲ | غلامرضا قزلباش^۳ | ناصر علی‌اصغرزاد^۴

۱. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: M-kolahkaj@stu.scu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: r.zalaghi@scu.ac.ir

۳. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: rghezelbash@scu.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: n-aliasghar@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در کشاورزی پایدار استفاده از قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار برای بهبود رشد گیاه و تغذیه ی گیاه (به ویژه فسفر) از جایگاه ویژه ای برخوردار است. برای درک تاثیر نوع جدایه قارچ میکوریزا و همچنین سطوح متفاوت فسفر، بر فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک و نیز بر جذب برخی عناصر در گیاه ذرت، آزمایش گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت. تیمارها شامل کود فسفر (سوپر فسفات تریپل در سه سطح شامل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۰/۸ گرم در هر گلدان)، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۰/۴ گرم در هر گلدان) و شاهد (بدون کود)) و مایه‌زنی با قارچ میکوریزا (بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی با F. mosseae strain A1 و F. mosseae strain A2) بود و پس از ۳ ماه برداشت گیاه صورت گرفت. فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی در خاک، غلظت فسفر قابل دسترس در خاک و فسفر، نیتروژن، منیزیم و پتاسیم در گیاه، وزن خشک گیاه و درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه اندازه گیری شد. نتایج نشان داد کاربرد کود فسفر و استفاده از قارچ میکوریزا سبب افزایش وزن خشک گیاه و غلظت فسفر، نیتروژن، پتاسیم و منیزیم اندام هوایی شده است. مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا سبب افزایش کلونیزاسیون ریشه و نیز افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی (۲۵/۳ و ۳۷/۰۷ درصد به ترتیب برای strain A1 و strain A2) و قلیایی (۴۹/۵ و ۴۹/۰۶ درصد به ترتیب برای strain A1 و strain A2) نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی خاک شد؛ ولی با کاربرد کود فسفر این پارامترها کاهش یافتند. به طور کلی نتایج به‌دست آمده نشان داد که در خاک‌های با فسفر کل و اولسن پایین، مصرف کود فسفردار و در کنار آن مایه‌زنی با میکوریزا (از طریق همزیستی با گیاه)، منجر به جذب بهتر عناصر از خاک و رشد بهتر گیاه می‌شود.
واژه‌های کلیدی: فسفر، فسفاتاز، کلونیزاسیون، میکوریزا.	
استناد: استناد: کلاه‌کج، مرضیه؛ زلفی، رویا؛ قزلباش، غلامرضا. و علی‌اصغرزاد، ناصر. (۱۴۰۴). تاثیر مایه زنی با قارچ‌های میکوریزای بومی خوزستان و استفاده از کود فسفر بر فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک و غلظت برخی عناصر در گیاه ذرت. <i>مجله تحقیقات آب و خاک ایران</i> ، ۵۶ (۶)، ۱۵۹۳-۱۶۰۸.	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.388988.669868	



مقدمه

در میان گیاهان زراعی، ذرت در جهان و ایران جزء غلات پرمصرف است و عمدتاً به منظور تولید علوفه و دانه کشت می شود. ذرت گیاهی از تیره ی گندمیان (*Poaceae*) می باشد که به علت تنوع فوق العاده در فرم، کیفیت و عادت رشدی، در بخش وسیعی از مناطق مستعد کشاورزی جهان مورد کشت و کار و بهره برداری قرار می گیرد (Al-Rawi et al., 2023). این گیاه نیاز کودی بالایی داشته و به خصوص تامین فسفر برای تولید دانه در ذرت نقش اساسی دارد.

عنصر فسفر بعد از نیتروژن از مهم ترین عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان است و در کلیه ی فرآیندهای بیوشیمیایی، ترکیبات انرژی زا و علاوه بر آن، ساخت غشاهای سلول و انتقال انرژی تاثیر دارد (Zhao et al., 2024). علاوه بر این، فسفر در ساختار بیوشیمیایی فسفولیپیدها و نوکلئوتیدها نقش مهمی دارد. ویژگی هایی مانند واکنش خاک (pH)، کاتیون های محلول و تبادل (کلسیم، منیزیم، آهن و آلومینیوم)، نوع ذرات معدنی (رس) و آلی و ویژگی های سطح آن ها بر شکل های مختلف فسفر در خاک تاثیرگذار است (He et al., 2024).

مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی فسفاته در زمین های کشاورزی، برای تامین فسفر مورد نیاز محصولات، همواره مشکلات زیست محیطی را به دنبال داشته است (Chen et al., 2008). با مصرف بالای کودهای فسفر علاوه بر آلودگی آب های سطحی (سرشار سازی^۱) و زیرزمینی، کود اضافه در خاک به فرم های بسیار کم محلول تثبیت می شود در حالیکه خاک دارای مقادیر بالای فسفر نامحلول می باشد ولی گیاهان کشت شده نمی توانند فسفر مورد نیاز خود را جذب نمایند و کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی کاهش می یابد (An et al., 2022).

در سال های اخیر، برای کاهش این اثرات زیان بار، منابع کمکی همچون کودهای زیستی به شکل قابل توجه قرار گرفته است (Chakraborty and Akhtar, 2021). در حال حاضر به کارگیری موجودات مفید خاکزی، تحت عنوان کود زیستی یکی از طبیعی ترین و مطلوب ترین راه حل ها برای بهبود و حفظ تعادل بیولوژیکی خاک، در زمین های کشاورزی می باشد (Tarafdar et al., 1994). از جمله تاثیرات کودهای زیستی حفظ تنوع زیستی، کمک به جذب بهتر عناصر غذایی توسط گیاه و بهبود رشد و تولید بیومس گیاه است. قارچ های میکوریزا آربوسکولار، به عنوان کودهای زیستی به شمار می روند (Zhao et al., 2024). این قارچ ها توانایی برقراری رابطه ی همزیستی با اغلب گیاهان زراعی را دارا می باشند. قارچ های میکوریزا فعالیت برخی از آنزیم های مرتبط با انحلال فسفر (فسفاتاز، آکالین فسفاتاز، ...) را بالا می برند و به کمک این فرآیند جذب فسفر و رشد گیاه را بهبود می بخشند (Pu et al., 2024). از مهم ترین نقش های میکوریزا بالا بردن مقدار عملکرد گیاهان زراعی در زمین هایی است که خاک حاصلخیزی پایینی دارد (Yuan et al., 2024). قارچ میکوریزا با افزایش سطح جذب ریشه ها به کمک میسلیوم قارچ در خاک سبب جذب عناصر غذایی میشود. به شکلی کلی مایه زنی خاک با قارچ های میکوریز، فیزیولوژی ریشه ی گیاهان را تغییر داده و نیز ساخت و ساز آنزیم های گیاهی و میکروبی مانند گلوتامین سنتتاز، آرژینیناز، اوره آز و فعالیت فسفاتاز را تحت تاثیر قرار میدهد (Zhang et al., 2024). هیف های میکوریزی با ایجاد تغییرات شیمیایی، سبب می شوند که حلالیت فسفر در نواحی ریزوسفر گیاه تحت تاثیر قرار گیرد که می توان به تراوش هیدرونیوم^۲ و ترشح آنزیم فسفاتاز از هیف های قارچ های میکوریزا اشاره کرد (Wang et al., 2023). این فعالیت ها سبب می شود که گیاه میکوریزایی به منابع فسفر غیر قابل دسترس، دسترسی کافی داشته باشد (Ul Haq et al., 2023).

در دسترس نبودن برخی عناصر غذایی سبب تغییرات مهمی در مورفولوژی ریشه ها، توان تولید ترکیبات مختلف و مواد هیومیکی (هیومیک و فولویک اسید) و تولید بعضی آنزیم ها توسط آن ها خواهد شد و نیز سبب افزایش احتمال همزیستی گیاه با میکوریزا می گردد (Wang et al., 2020). بنابراین مقدار فسفر اولیه خاک و مصرف کود فسفر، بر همزیستی میکوریزی و نیز بر مقدار تولید آنزیم فسفاتاز، تاثیرگذار می باشد (Guan et al., 2024). با این که پژوهش های زیادی تاکنون در زمینه جذب عنصر فسفر توسط میکوریزا صورت گرفته، اما چگونگی اثر قارچ میکوریزا بر جذب عنصر فسفر به طور کامل شناخته نشده است (Meng et al., 2024). بهبود تولید در گیاهان میکوریزایی، علاوه بر بهبود جذب فسفر، به جذب بیشتر عناصر غذایی کم نیاز و ناپویا از جمله روی و مس نسبت می دهند. در خاک های آهکی دیده شده که بین ۱۶ تا ۲۵ درصد روی جذب شده از طریق گسترش هیف های قارچ میکوریزا جذب و انتقال یافته است (Bitterlich et al., 2024).

بسیاری از پژوهش‌ها گزارش داده اند که در خاک‌های رسی افزودن کود فسفر سبب کاهش فعالیت میکوریزا می‌گردد (Ekelof., 2007). اما پژوهش‌های کمی درباره خاک‌های سبک و با کمبود فسفر موجود می‌باشد و اینکه چه مقدار کود فسفر بایستی به خاک اضافه گردد و قارچ میکوریزا در چه سطوحی از فسفر فعال می‌باشد همواره مورد بحث بوده است. لذا هدف از این پژوهش درک تاثیر مایه‌زنی با قارچ میکوریزا در سطوح مختلف کود فسفر بر فعالیت آنزیم فسفاتاز و جذب فسفر، منیزیم و پتاسیم و نیتروژن توسط گیاه ذرت و بر برخی ویژگی‌های خاک و گیاه در یک خاک لوم شنی بوده است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری، آماده سازی خاک و کشت گیاه

نمونه‌برداری از خاک مزارع رامهرمز با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری انجام شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و در جدول ۱ ارائه شده است. برای اندازه گیری نیتروژن کل خاک از روش تقطیر و تیتراسیون با دستگاه کج‌دال (Bremner, 1996) و برای اندازه گیری پتاسیم از روش استات آمونیوم نرمال (Sparks et al., 2020) استفاده شد.

پس از یکنواخت نمودن خاک و عبور از الک ۴ میلیمتری (الک شماره ۵)، ۴ کیلوگرم خاک در گلدان‌ها ریخته شد. کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل در سه سطح شامل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۰/۸ گرم در هر گلدان، مقدار مرسوم کود مورد استفاده در منطقه برای ذرت)، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (معادل ۰/۴ گرم در هر گلدان، برابر ۵۰ درصد مقدار مرسوم) و شاهد (بدون کود فسفر) به گلدان‌ها اضافه شد. از آنجایی که کود فسفر معمولاً به صورت نواری به مزارع اضافه می‌گردد، در این تحقیق نیز کود فسفر به صورت لایه ای در گلدان قرار داده شد. برای اطمینان از درصد فسفر کود سوپر فسفات تریپل ابتدا مقادیر مختلفی کود فسفر به نمونه‌هایی از خاک اضافه شده و فسفر کل آن‌ها اندازه گیری شد.

در این پژوهش از دو جدایه قارچ میکوریزا (A1 و A2) که در مراحل قبلی از مزارع نیشکر مربوط به پژوهشگاه طرح‌های توسعه نیشکر در جنوب اهواز، از خاک‌های دارای فسفر کل ۷۰۰ تا ۹۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم و فسفر اولسن ۱۰ تا ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم جداسازی شده بودند، استفاده گردید. این جدایه‌ها بعد از شناسایی مولکولی با کدهای PQ851067 و PQ851068 در NCBI تحت نامهای *F. mosseae* strain A1 و *F. mosseae* strain A2 ثبت شدند. این قارچ‌ها در بستر ماسه استریل با بذر سترون ذرت تکثیر شدند. سپس بستر کشت به همراه ریشه‌های خرد شده ذرت به عنوان مایه تلقیح به کار برده شد. برای هر گلدان ۴ کیلوگرمی ۱۰۰ گرم مایه تلقیح (حاوی ۳۰۰ اسپور در هر گرم) قارچ استفاده شد. برای تیمارهای بدون قارچ نیز ۱۰۰ گرم مایه تلقیح استریل شده به کار برده شد. کشت ذرت در اواسط فروردین ماه سال ۱۴۰۲ انجام شد. ابتدا سه چهارم حجم گلدان با خاک پر شد. در مرحله بعد مقدار مورد نیاز کود فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل ۴۵ درصد برای هر گلدان توزین شده و به صورت لایه ای قرار داده شده و روی آن با یک سانتی متر خاک پوشانده شد. سپس مایه تلقیح میکوریزا به صورت لایه ای روی خاک قرار داده شد و بذر روی آن قرار گرفت و روی آن با حدود یک سانتی متر خاک پوشانده شد. در هر گلدان ۶ بذر جوانه زده قرار داده و پس از دو هفته در هر گلدان ۳ بوته نگهداری شد. کود اوره به مقدار ۶۰ کیلوگرم در هکتار به کار رفت که برای هر گلدان محاسبه و توزین و در دو نوبت همراه با کشت و یک ماه پس از کشت به کار برده شد. گیاهان به مدت ۳ ماه نگه داری شدند و در طول دوره رشد آبیاری هفتگی یک تا دو بار تا ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه با آب مقطر انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل با دو عامل مایه‌زنی قارچ در سه سطح (بدون مایه‌زنی، مایه‌زنی با strain A1 و strain A2) و عامل کود فسفر در سه سطح (شاهد، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح پنج درصد صورت گرفت. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین با نرم افزار SPSS صورت گرفت و منحنی‌ها با نرم افزار Excel رسم گردید.

آزمایشات گیاه

در هنگام برداشت گیاه، ریشه و اندام هوایی جدا شده و پس از شستشو با آب مقطر، خشک (۷۰ درجه سانتیگراد ۷۲ ساعت) شده و سپس توزین و آسیاب گردید. بخشی از ریشه‌ها برای رنگ آمیزی به صورت تازه نگهداری شد. رنگ آمیزی ریشه با تریفان بلو (Giovannetti and Mosse, 1980) و محاسبه‌ی درصد کلونیزاسیون ریشه توسط میکوریزا به روش تقاطع خطوط شبکه (Khanam et al., 2006) انجام شد. درصد نیتروژن در اندام هوایی گیاه به روش کج‌دال اندازه گیری شد (Bremner, 1996). بخشی از پودر خشک گیاه به روش

اکسیداسیون تر (با اسیدکلریدریک و اسید نیتریک) هضم و عصاره گیری شد (Imami, 1996). اندازه گیری فسفر در عصاره‌های گیاه با روش رنگ سنجی رنگ زرد وانادیوم مولیبدات (Ali Ehyaei and Behbahanizade, 1993) و قرائت با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (DR.HACH ۵۰۰) در طول موج ۴۷۰ نانومتر انجام شد. برای اندازه گیری غلظت پتاسیم از دستگاه فلیم فتومتر استفاده گردید. غلظت منیزیم نیز به روش تیتراسیون (محلول اسید نیتریک یک مولار) اندازه گیری شد (Walsh, 1971).

ویژگی‌های خاک

برخی خصوصیات شیمیایی و زیستی خاک اطراف ریشه در گلدان‌ها اندازه گیری شد. میزان ماده آلی خاک، از روش اکسایش تر (Nelson and Sommers, 1996)، نیتروژن کل خاک (Bremner, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با سود (Allison and Moodie, 1965) و پتاسیم کل خاک (Brown and Warncke, 1988) اندازه گیری شد. آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی (بافر اسیدی با pH 6.5 جهت اندازه گیری فسفاتاز اسیدی، بافر قلیایی با pH 11 جهت اندازه گیری فسفاتاز قلیایی) با استفاده از سوبسترای پارانیتروفنیل فسفات و بافر استاندارد و قرائت با اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر (Bremner, 1996) و فسفر اولسن خاک به روش استخراج با بیکربنات پتاسیم و اضافه نمودن محلول بیکرومات پتاسیم و اسید اسکوربیک و رنگ سنجی با اسپکتروفتومتر با طول موج ۶۰۰ نانومتر (Olsen et al., 1954) اندازه گیری شد.

نتایج

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری و در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۲ و ۳ نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر ویژگی‌های گیاه و خاک آمده است. اثر کود فسفر، مایه‌زنی میکوریزا و اثر متقابل آنها بر ویژگی‌های گیاه معنی‌دار بود (به جز کلروفیل گیاه که اثر متقابل معنی‌دار نیست). همچنین تاثیر متقابل تیمارها بر ویژگی‌های خاک و گیاه معنی‌دار بوده است.

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده آزمایش

بافت خاک	کربنات کلسیم معادل (%)	ماده آلی (%)	pH	هدایت الکتریکی (dSm ⁻¹)	نیتروژن کل (%)	فسفر اولسن mg Kg ⁻¹	فسفر کل mg Kg ⁻¹	پتاسیم کل mg Kg ⁻¹
لوم شنی	۴۱	۱/۲۹	۶/۹	۱/۰۱	۰/۱۳	۸/۴۸	۹۲/۴۲	۳۴۰

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس تاثیر سطوح فسفر و جدایه میکوریز بر میانگین مربعات صفات مورد بررسی گیاه ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	وزن خشک ریشه	وزن خشک هوایی	درصد کلونیزاسیون	فسفر ریشه	فسفر اندام هوایی	نیتروژن اندام هوایی	پتاسیم اندام هوایی	منیزیم اندام هوایی
فسفر	۲	۳/۳۸۹**	۵/۹۱**	۳۸۷*	**۰/۰۰۵	**۰/۰۰۳	۱/۸۸**	۱/۰۶**	۳۱۱/۸۱ ns
قارچ میکوریزا	۲	۴/۷۳**	۱۰/۲۵**	۶۲۵۶/۳**	**۰/۱۹۱	**۲۴۸/۲۳**	۱/۳۸۴**	۱/۰۴۷**	**۱۲۶۶۷/۷
فسفر × قارچ میکوریزا	۲	۰/۰۴۹۳*	۰/۰۳۹۳**	۹۰/۶۶۷**	**۰/۰۰۱	**۲۴/۷۸**	۰/۰۱۱۲*	۰/۱۵۰**	۱۷۲/۳۷ ns
خطا	۴	۰/۰۳۵۳	۰/۸۵	۱۲/۹۶۳	۰/۰۰۱	۰/۰۳۴	۰/۰۶۴	۰/۰۲۱	۸۸۶
ضریب تغییرات (%)	۱۸	۰/۱۱	۰/۱۵	۱۳/۲۹	۰/۰۱۸	۴/۹۵	۱/۶۴	۳/۸۵	۱/۸۰

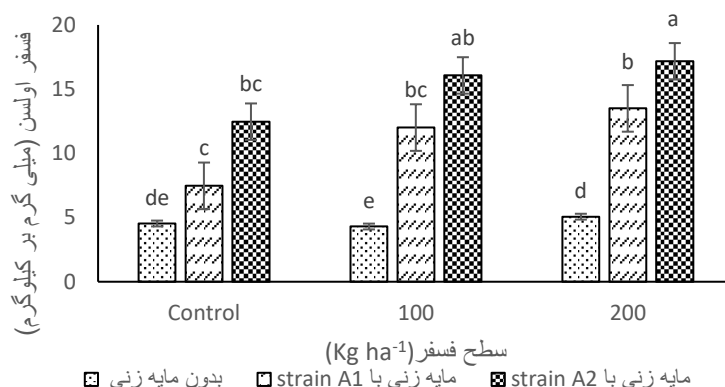
ns، * و ** به ترتیب: بدون اختلاف معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس تاثیر سطوح فسفر و جدایه میکوریز بر میانگین مربعات صفات مورد بررسی خاک

منابع تغییر	درجه آزادی	فسفر اولسن	آنزیم فسفاتاز قلیایی	آنزیم فسفاتاز اسیدی
فسفر	۲	۳/۳۸۹**	۲۱۸۰*	۶۹۷۹/۱**
قارچ میکوریزا	۲	۲۵۶/۱۶۷**	۹۱۷۳۱**	۳۴۱۳۳/۵۹۳**
فسفر × قارچ میکوریزا	۲	۷/۳۷۹**	۶۲۷/۷۷*	۲۶۰۶/۱۴۸*
خطا	۴	۱/۳۸۷	۵۶۷/۴۰۷	۲۱۸۰/۱۴
ضریب تغییرات (%)	۱۸	۲/۵۱۲	۲/۲	۰/۲۲

ns، * و ** به ترتیب: بدون اختلاف معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

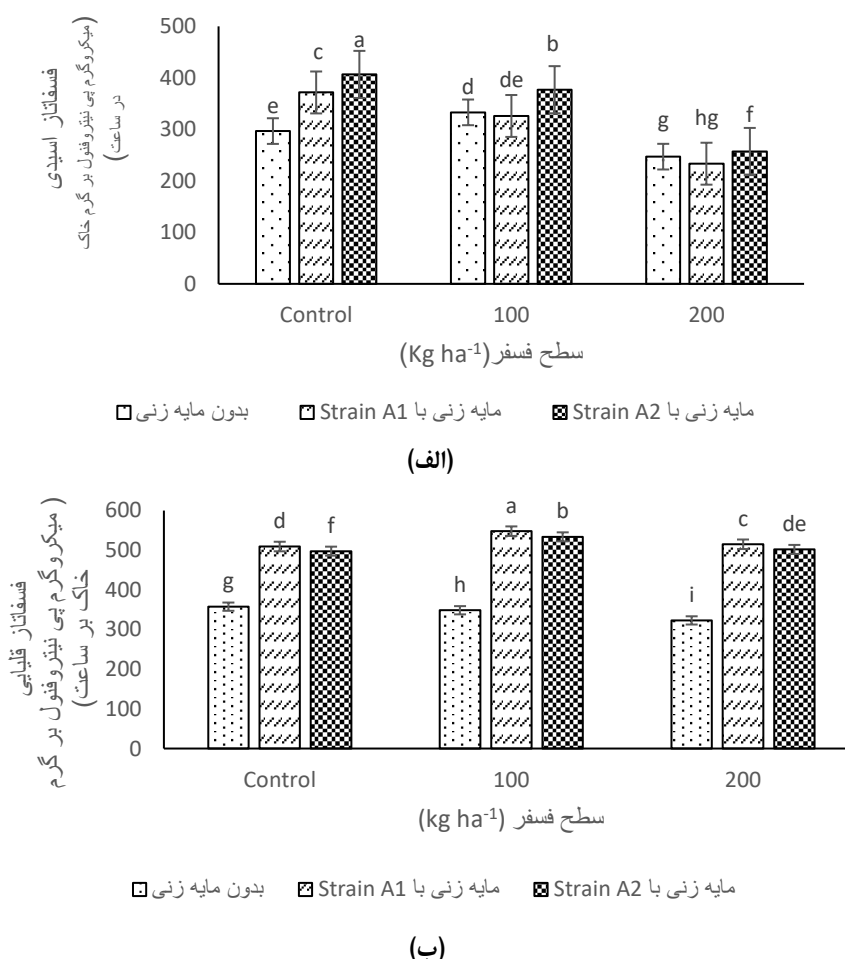
فسفر اولسن خاک: مقدار فسفر اولسن خاک ۸/۴۸ میلی گرم بر کیلوگرم بود که زیر سطح بحرانی گیاه ذرت (۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم) است (جدول ۱) و بعد از برداشت گیاه نیز کاهش یافت (شکل ۱) چون بخشی از آن را گیاه مورد استفاده قرار داده است. با افزایش کاربرد کود فسفر، فسفر اولسن خاک افزایش معنی داری نسبت به شاهد نداشته است که می تواند به دلیل غیرمتحرک شدن فسفر توسط کربنات های خاک باشد و در این تیمارها مقدار اندک فسفر که به شکل اولسن بوده است سریعاً توسط گیاه جذب شده است (شکل ۵). البته سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش معنی دار نسبت به سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نشان می دهد ولی این افزایش تنها به اندازه ۱۰/۸۳ درصد است. در حالی که با کاربرد میکوریزا، در هر سطح کود فسفر (سطح صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰)، افزایش شدید فسفر اولسن را نسبت به تیمار متناظر بدون مایه زنی نشان داده است. در مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح میکوریزا و کود فسفر ($p < 0.05$)، بیشترین مقدار فسفر اولسن خاک در تیمار مایه زنی با Strain A2 در سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر و کمترین مقدار آن در تیمار بدون مایه زنی و بدون کود فسفر بوده است (شکل ۱). افزایش کارایی جذب فسفر با مایه زنی قارچ میکوریزا نشان دهنده اثرات هم افزایی بین گیاه و میکوریزا میباشد. اثرات مفید قارچ میکوریزا بسته به گونه ی قارچ، نوع خاک و گونه ی گیاه متفاوت میباشد (Bhantana et al., 2021). قارچ های میکوریزا با تولید آنزیم فسفاتاز (شکل ۲) سبب افزایش فسفر قابل دسترس گیاه می شوند که پژوهشگران دیگر نیز به این موضوع اشاره نموده اند (Reid and Bowen., 1979). در بیشتر مطالعات اثرات مثبت این قارچها در مقادیر پایین فسفر قابل دسترس خاک گزارش شده است (kapoor et al., 2004). اما در برخی مطالعات اثرات مثبت قارچ، تا سطوح ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم فسفر قابل دسترس خاک گزارش شده است (Smith and Read, 2010). قارچ های میکوریزا آربوسکولار با ترشح اسیدهای آلی مانند اگزالات ها که میل ترکیبی شدیدی با آهن، کلسیم و آلومینیوم دارند، سبب آزاد شدن فسفر پیوند یافته با ترکیبات دارای این عناصر میشوند (Sato et al., 2019).



شکل ۱. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل میکوریزا و سطوح فسفر بر مقدار فسفر اولسن خاک. هیستوگرام های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می باشند.

فعالیت آنزیم فسفاتاز خاک: فسفاتاز نقش مهمی در حل کردن فسفات نامحلول خاک جدای از دیگر مکانیسم های حل فسفات بازی میکند. آنزیم فسفاتاز اسیدی توسط گیاهان و ریزجانداران تولید می شوند؛ درحالی که تولید فسفاتاز قلیایی به ریزجانداران نسبت داده شده است (Spohn and Kuzyakov, 2013). طبق گزارش Sultana و همکاران (۲۰۱۶) تلقیح دوگانه قارچ و باکتری فعالیت فسفاتاز را از طریق افزایش تولید سیدروفورها و نیز دیگر فعالیتهای آنزیمی افزایش میدهند. در این پژوهش به دلیل اینکه خاک قلیایی بوده، آنزیم فسفاتاز قلیایی از فسفاتاز اسیدی بیشتر شده است. پژوهشگران دیگر نیز فعالیت فسفاتاز قلیایی بالاتری را در برخی خاکها گزارش کرده اند (Zalaghi et al., 2023). برخی گونه های میکوریزا آربوسکولار آنزیم های فسفاتاز اسیدی (Tarafdar, 1995) و فسفاتاز قلیایی (Kojima et al., 1998) تولید میکنند که در دیواره سلولی هیف های برون ریشه ای این گروه قارچی وجود دارند. این آنزیم ها موجب تجزیه فسفات های آلی و پیروفسفات های غیرآلی و آزادسازی فسفر از کمپلکس آلی میشوند. پژوهشگران زیادی کاهش فعالیت فسفاتاز را با افزایش سطح فسفر خاک گزارش داده اند (Zhang et al., 2005). در پژوهش حاضر، نیز کاربرد کود فسفر، سبب کاهش فعالیت فسفاتازها در خاک شده است که به دلیل وجود فسفر اولسن بالاتر در این تیمارها و نیاز کمتر به آنزیم فسفاتاز برای حل نمودن فسفر می باشد. در تیمارهای بدون مایه زنی، کاربرد کود فسفر سبب کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی نسبت به شاهد بدون کود فسفر شده است. اما در تیمارهای حاوی کود، مایه زنی با قارچ های میکوریزا سبب افزایش فعالیت فسفاتاز قلیایی نسبت به تیمارهای بدون مایه زنی و حتی

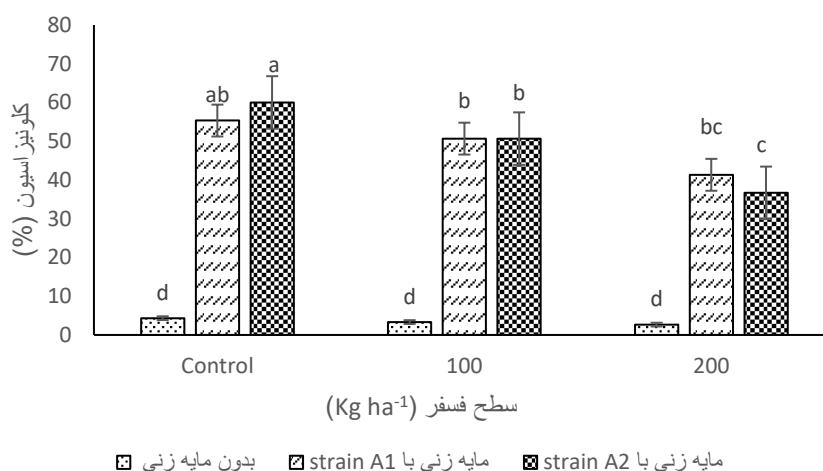
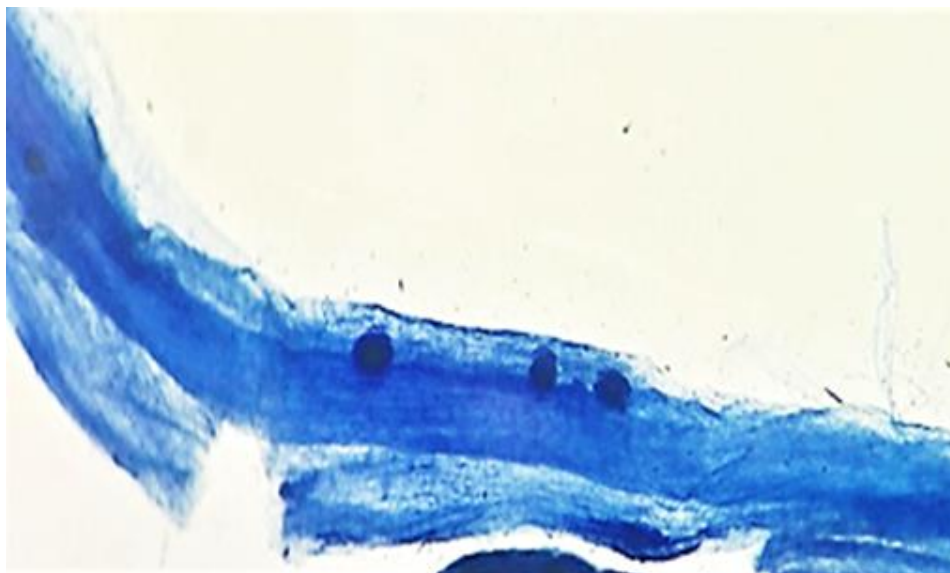
افزایش نسبت به تیمارهای مایه‌زنی شده‌ی شاهد (بدون کود) شده است. این موضوع می‌تواند به دلیل رشد بهتر گیاه و تولید بیومس بالاتر در این تیمارها باشد که با بهبود رشد گیاه جامعه میکروبی اطراف ریشه نیز بهتر رشد کرده و مجموع جامعه میکروبی و گیاه آنزیم بیشتری تولید می‌نمایند. همچنین نوع خاک مهم می‌باشد که دارای بافتی سبک با فسفر کل پایین می‌باشد و با وجود مصرف کود فسفر، فسفر اولسن خاک افزایش یافته ولی در تیمارهای بدون مایه‌زنی با قارچ حتی با مصرف ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر اولسن هنوز مقادیر بسیار پایین و کمتر از ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک دارد. پس در چنین خاکی با وجود مصرف کود فسفر، همچنان نیاز به میکوریزا برای افزایش فعالیت فسفاتاز و افزایش فسفر اولسن مشهود می‌باشد. افزایش فعالیت فسفاتاز در پی کاربرد کود فسفر می‌تواند به دلیل بهبود رشد گیاه در این تیمارها باشد که بر ترشحات ریشه و جمعیت میکروبی ریزوسفر تاثیرگذار می‌باشد (Spohn and Kuzyakov, 2013). فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی (به طور میانگین ۲۵/۲ و ۳۷/۰۷ درصد به ترتیب برای Strain A1 و Strain A2 نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی) و فسفاتاز قلیایی (به طور میانگین ۴۹/۵ و ۴۹/۰۶ درصد به ترتیب برای Strain A1 و Strain A2 نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی) افزایش نشان داد ولی با کاربرد کود فسفر این پارامترها کاهش یافتند (شکل ۲).



شکل ۲. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل میکوریزا و سطوح فسفر بر مقدار فسفاتاز اسیدی (الف) و قلیایی (ب) خاک. هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

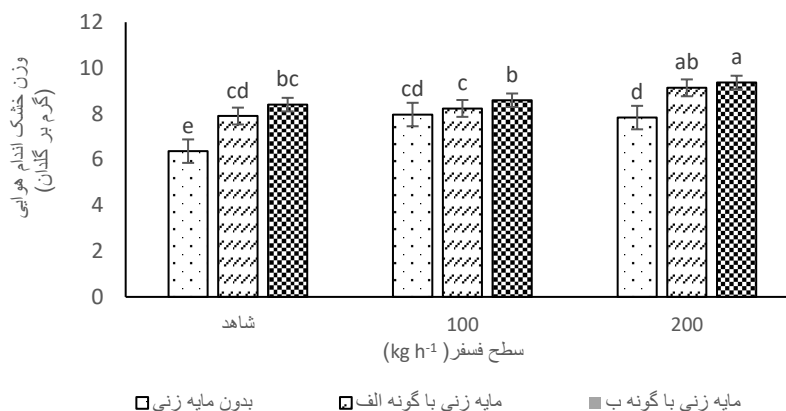
کلونیزاسیون ریشه: از شاخص‌های مهم نشان‌دهنده فعالیت قارچ‌های میکوریزا، درصد کلونیزاسیون ریشه می‌باشد که تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند ویژگی‌های ظاهری و ساختمانی سیستم ریشه ای، کمیت و کیفیت ترشحات ریشه ای و مصرف کودهای شیمیایی (به ویژه کودهای فسفر) قرار میگیرد (Miao-Miao et al., 2020). ریشه گیاه توسط قارچ‌های میکوریز کلونیزه شده است (شکل ۳) و تحت تاثیر تیمارهای مایه‌زنی شده، درصد کلونیزاسیون بالاتر و فعالیت فسفاتاز بالاتری نشان دادند که موید این نکته می‌باشد که قارچ‌های میکوریزا در تولید آنزیم فسفاتاز نقش دارند. در این پژوهش با افزایش سطح کود فسفر درصد کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ‌های میکوریزا

کاهش یافته و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز نیز کاهش یافته ولی باز هم در تیمارهای دارای کود فسفر، مایه‌زنی با قارچ سبب افزایش فسفاتاز قلیایی شده است. بالا بودن مقدار فسفر در گیاه سبب کاهش ترشحات ریشه و کاهش کلونیزاسیون ریشه در این تیمارها می‌شود (Xia et al., 2023).

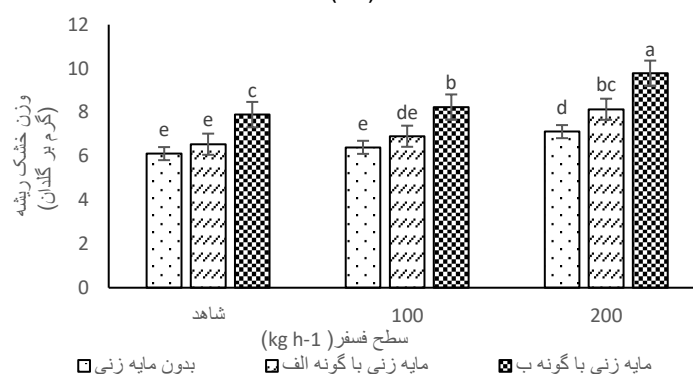


شکل ۳. ریشه ذرت رنگ آمیزی شده که با قارچ میکوریزا کلونیزه شده (بالا) و نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل میکوریزا و سطوح فسفر بر مقدار کلونیزاسیون (پایین). هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

وزن خشک ریشه و اندام هوایی: مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح میکوریزا در کود فسفر ($p < 0.05$) نشان دهنده تاثیر مثبت کاربرد کود فسفر و مایه‌زنی با قارچ در افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه ذرت بود. در گیاهان میکوریزای با افزودن کود فسفر وزن خشک بیشتری نسبت به گیاهان غیر میکوریزای دیده شد (شکل ۴). قارچ میکوریزا از طریق گسترش هیف و توسعه سیستم ریشه، سطح جذب آب بیشتری برای گیاه فراهم و به دنبال جذب آب بیشتر مواد غذایی بیشتری جذب شده که سبب تولید و تجمع ماده خشک بیشتری در گیاه میگردد. استفاده از قارچ میکوریزا با جذب فسفر و دیگر عناصر غذایی سرعت رشد گیاه را افزایش می‌دهد و بر تخصیص و انتقال عناصر غذایی بین ریشه و ساقه اثر میگذارد، به طوری که با افزایش جذب عناصر غذایی و انتقال آنها وزن خشک اندام هوایی افزایش می‌یابد (Ortas, 2010). در گیاهانی که از فسفر کافی برخوردار هستند وزن خشک بیشتری در بخش اندام هوایی و ریشه گزارش شده است (Aliasgharzad et al., 2021).



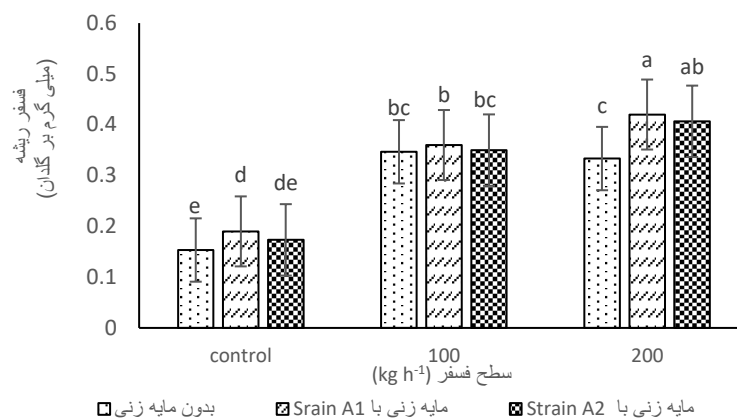
(الف)



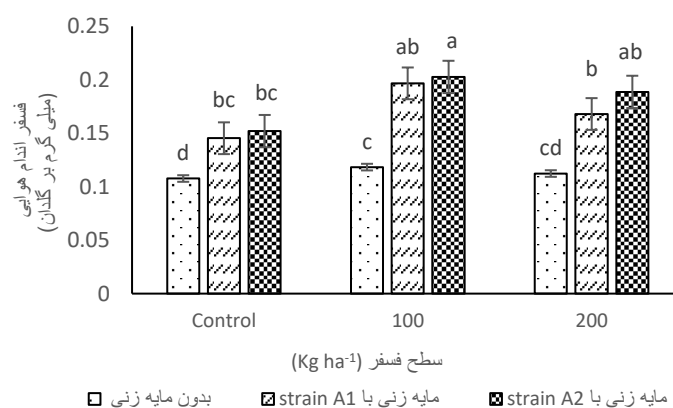
(ب)

شکل ۴. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل میکوریزا و سطوح فسفر بر فسفر وزن خشک ریشه (الف) و اندام هوایی (ب). هیستوگرام های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می باشند.

فسفر ریشه و اندام هوایی: با افزایش سطح کود فسفر، غلظت فسفر ریشه و اندام هوایی افزایش یافته است (شکل ۵). سطح بحرانی فسفر در گیاه ذرت ۱۵ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Sadeghi et al., 2015). Zahedifar et al (2012) ضمن بررسی اثر فسفر و ماده آلی بر فسفر خاک و گیاه اسفناج نتیجه گرفتند افزایش فسفر خاک در تمام سطوح مورد استفاده، عملکرد گیاه را افزایش می دهد. مایه زنی با قارچ های میکوریزا در بیشتر تیمارها سبب افزایش فسفر گیاه (۱۵/۳۸ درصد نسبت به تیمار بدون مایه زنی) شده است. در پژوهش دیگر نیز دیده شد که میکوریزا موجب افزایش معنی دار غلظت عناصر فسفر آهن، روی، مس منگنز و بور در گیاه ذرت است (Aliasgharzadeh et al., 2001). میکوریزا از طریق کاهش pH خاک سبب افزایش جذب عناصر غذایی و در نتیجه افزایش عملکرد گیاه می شود (Harris et al., 2007). هیف های قارچ گستردگی بسیار زیادی در خاک داشته و نسبت به ریشه گیاه سطح ویژه بالاتری دارند که خود به جذب عناصر غذایی و به ویژه فسفر کمک می کند. همچنین قارچ های میکوریزا با تولید آنزیم های فسفاتاز و تولید آنیون ها و دیگر متابولیت ها، فسفر را جذب نموده و فسفر در هیف های قارچ تحرک بسیار بالاتری نسبت به خاک داشته و در گیاهان میکوریزایی سرعت جریان فسفر به درون گیاه ۳ الی ۶ مرتبه بیشتر از گیاهان غیر میکوریزایی است (Aliasgharzad et al., 2021). بر اساس گزارش Turk et al (2006) قارچ های میکوریزا در افزایش جذب مواد معدنی به ویژه فسفر و تجمع زیتوده بسیاری از محصولات در خاک های با فسفر کم، تأثیر مثبت دارند. برخی از پژوهشگران گزارش نمودند که در گونه هایی مانند غلات، که دارای سیستم ریشه ای گسترده و بسیار منشعب و تارهای کشنده بلند هستند، قارچ های میکوریزا جذب فسفر را تغییر نمی دهد یا سبب افزایش بسیار اندک آن میشود (Tarafdar and Marschner, 1994).



(الف)



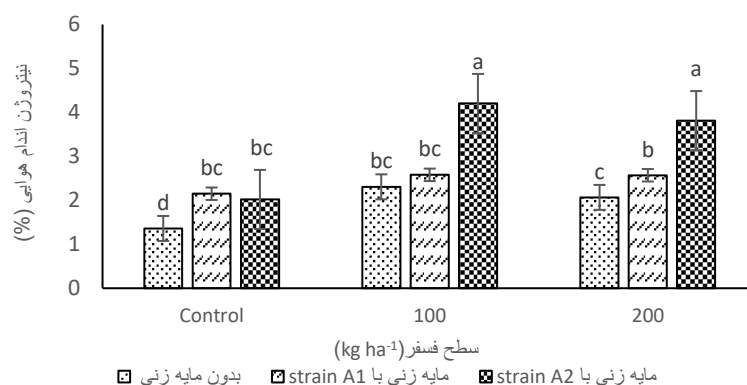
(ب)

شکل ۵. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل میکوریزا و سطوح فسفر بر غلظت فسفر در ریشه (الف) و اندام هوایی (ب). هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

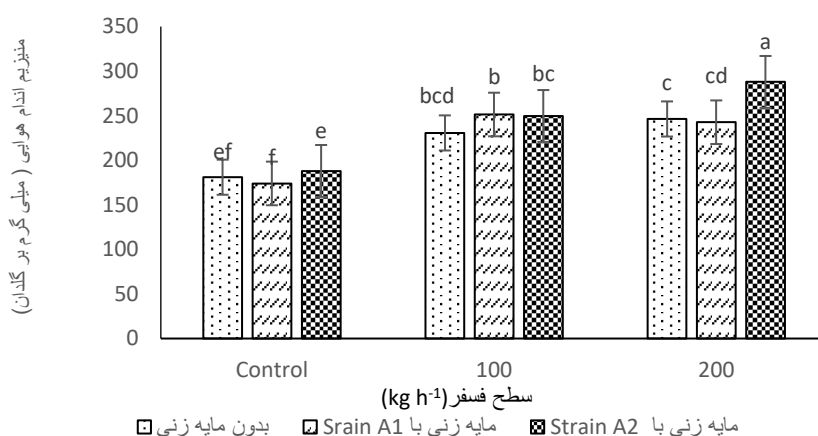
تأثیر تیمارها بر غلظت نیتروژن، منیزیم و پتاسیم گیاه: با افزایش سطوح کود فسفر، نیتروژن، منیزیم و پتاسیم اندام هوایی به ترتیب (۴۰/۵، ۲۲/۲۹، ۴۳/۰۱ درصد) افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل رشد بهتر گیاه در این تیمارها باشد. اصولاً با تامین عنصری که در محدودیت می‌باشد (در اینجا فسفر)، جذب دیگر عناصر افزایش می‌یابد و رشد نیز افزایش می‌یابد (Mitra, 2017). همچنین مایه‌زنی با میکوریزا سبب افزایش غلظت این عناصر در اندام هوایی گیاه شده است (شکل ۶). بر اساس مطالعات (Smith and Read 2010) قارچ‌های میکوریزایی موجب بهبود جذب نیتروژن، پتاسیم، منیزیم، مس و روی در خاک‌های فقیر میشوند.

قارچ میکوریزا علاوه بر فسفر، غلظت عناصری دیگری مانند گوگرد، بور، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، روی، مس، منگنز، آهن، آلومینیوم را نیز افزایش می‌دهند (Clark and Zeto, 2000). به نظر میرسد قارچ میکوریزا طریق گسترش سیستم ریشه ای گیاه، سبب افزایش جذب عناصر غذایی و در نهایت افزایش رشد گیاه شده اند. قارچ‌های میکوریزا با تولید هورمون‌های گیاهی و افزایش فعالیت آنزیم‌ها میتوانند رشد اندام‌های هوایی و ریشه گیاه را تشدید نموده و سبب بالا بردن ظرفیت جذب عناصر غذایی در گیاه شوند. نتایج Zuccarini (2007) نشان داد که مایه‌زنی گیاهان کاهو با ترکیبی از سه گونه قارچ میکوریزا (*Rhizophagus irregularis*, *Funneliformis mosseae*, *Funneliformis coronatum*) سبب افزایش جذب فسفر و پتاسیم شد. Sharda Waman and Bernard Felinov (2009) دریافتند که استفاده از مایه‌زنی به صورت جداگانه و ترکیبی قارچ *Rhizophagus irregularis* و *mosseae Funneliformis* سبب افزایش پتاسیم در گیاهان شد. ایشان افزایش جذب از طریق بهبود گسترش ریشه‌های قارچ در منافذ خاک را دلیل افزایش درصد پتاسیم برگ عنوان نموده اند. افزایش رشد در گیاهان میکوریزایی عمدتاً ناشی از تشدید فتوسنتز و همچنین افزایش جذب فسفر می‌باشد (Yuan et al., 2024). غلظت‌های پایین فسفر سبب کاهش رشد گیاه شده و افزایش فعالیت قارچ میکوریزا میشود و به دنبال آن تولید و ترشح فسفاتازها افزایش می‌یابد، چرا که تولید آنزیم فسفاتاز که در فعالیت فسفر نقش مهمی دارد با دسترسی فسفر رابطه ی معکوس دارد (Ul Haq et al., 2023). بالا بودن جذب فسفر در گیاهان میکوریزایی نقش قارچ‌های میکوریزایی را در انحلال فسفر معدنی از منابع کم محلول نشان می‌دهد.

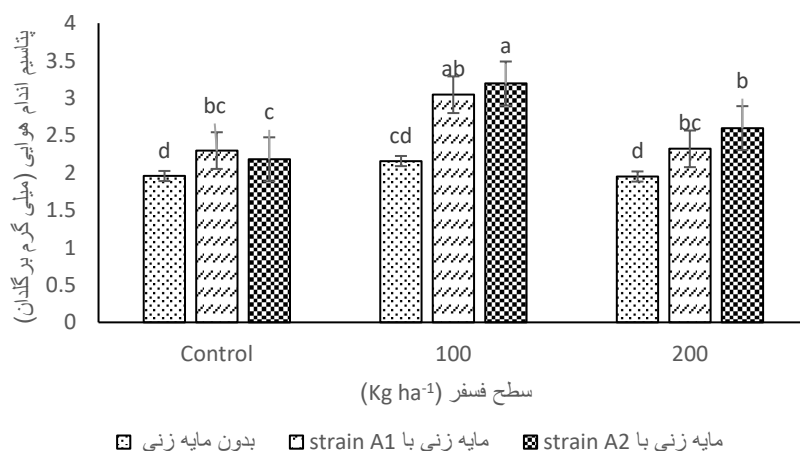
دهد که به وسیله‌ی افزایش سطح جذب کننده‌ی ریشه‌ها و همچنین تولید متابولیت‌هایی مانند یون هیدروژن و رهاسازی اسید توسط قارچ انجام می‌شود (Meng et al., 2024). این مکانیسم‌ها سبب حل شدن ترکیبات سخت درون خاک و آزادسازی عناصر دیگر مانند کلسیم و منیزیم از این ترکیبات می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶. نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل میکوریزا و سطوح فسفر بر غلظت نیتروژن (الف)، منیزیم (ب)، پتاسیم (ج) اندام هوایی. هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشند.

نتیجه گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان می دهد که هر چند استفاده از کود فسفر سبب کاهش کلونیزاسیون ریشه گیاه ذرت توسط قارچ میکوریزا شده است؛ اما کاربرد قارچ میکوریزا حتی در تیمارهای دارای ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر، باز هم سبب افزایش فعالیت فسفاتازهای اسیدی و قلیایی (نسبت به تیمار متناظر بدون مایه زنی)، افزایش فسفر اولسن خاک، بهبود جذب فسفر و افزایش عملکرد گیاه شده است. برای تولید محصول در خاک های سبک و فقیر از نظر فسفر، کوددهی با کودهای فسفر نیاز می باشد استفاده از قارچ های میکوریزا در کشت گیاه، سبب بهبود رشد گیاه و جذب بهتر عناصر فسفر، نیتروژن، منیزیم و پتاسیم توسط گیاه شده است. استفاده از این قارچ ها در کشت گیاهان با نیاز غذایی بالا مانند ذرت می تواند بر رشد گیاه و تولید محصول نقش موثری داشته باشد. قارچ های میکوریزا مورد استفاده در این پژوهش به ویژه Strian A2 تاثیر بسیار معنی دار و مثبتی بر ویژگی های گیاه داشت.

سپاس گذاری

نویسندگان بدینوسیله از دانشگاه شهید چمران اهواز که هزینه این طرح را تامین نموده است (شماره گرنت SCU.AS 1402.28572) تشکر می نماید.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

- Abdel-Fattah, G. M., Asrar, A. A., Al-Amri, S. M., & Abdel-Salam, E. M. (2014). Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphorus fertilization on the gas exchange, growth and phosphatase activity of soybean (*Glycine max L.*) plants. *Photosynthetica*, 52, 581-588.
- Ali Ehyaei, M., and Behbahanizade, A.A. (1993). Methods of soil analysis. Soil and Water Research Institute. 1: 893. 6-98.
- Aliasgharzadeh, N., Saleh Rastin, N., Towfighi, H. and Alizadeh, A. (2001). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of the Tabriz Plain of Iran in relation to some physical and chemical properties of soil. *Mycorrhiza*, 11(3), 119-122. (In Persian)
- Allison, L.E. and Moodie, C.D., (1965). Carbonat. In *Methods of Soil Analysis*, Part 2, Black, C.A. (ed), American Society of Agronomy: Madison, Wisc, 1379-1396.
- Al-Rawi, L. A. H. H., & Al-Marsoumi, H. G. K. (2023). Effect of Shading, Licorice Extract and Mycorrhizal on the Growth and Production of Commercial Cut Flowers of Two Cultivars of Shrubby Roses. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1262, No. 4, p. 042020). IOP Publishing.
- An, X., Liu, J., Liu, X., Ma, C., & Zhang, Q. (2022). Optimizing phosphorus application rate and the mixed inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing bacteria can improve the phosphatase activity and organic acid content in alfalfa soil. *Sustainability*, 14(18), 11342.
- Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X. C., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., ... & Hu, C. X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*, 84, 19-37.
- Bitterlich, M., Jansa, J., Graefe, J., Pauwels, R., Sudová, R., Rydlová, J., & Püschel, D. (2024). Drought accentuates the role of mycorrhiza in phosphorus uptake, part II—The intraradical enzymatic response. *Soil Biology and Biochemistry*, 193, 109414.
- Bremner, J. M., & Sparks, D. L. (1996). Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. *SSSA Book Series, Madison*, 1085-1121.
- Brown, I.R., and D. Warncke. (1988). Recommended cation tests and measures of cation exchange capacity. p. 15-16. In W.C. Dahnke (ed.) Recommended chemical soil test procedures for the North Central Region. North Dakota Agric. Exp. Stn. Bull. 499.
- Chakraborty, T., & Akhtar, N. (2021). Biofertilizers: prospects and challenges for future. *Biofertilizers: study and impact*, 575-590.
- Chen, M., Chen, J., & Sun, F. (2008). Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of the Total Environment*, 405(1-3), 140-152.
- Clark, R.B. and Zeto, S.K. (2000). Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition* 23: 867-902

- Ekelof, J. (2007) Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. Master Thesis, Saint Louis University, Madrid, Spain.
- Erman, M. Demir, S. Ocak, E. Tüfenkçi, S. Oğuz, F. and Akköprü, A. (2011). Effects of Rhizobium, arbuscular mycorrhiza and whey applications on some properties in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under irrigated and rainfed conditions 1-Yield, yield components, nodulation and AMF colonization. *Field Crops Research* 122: 14-24.
- Faghani, E., Godarzi, M., & Safarnezhad, A. (2015). Effects of Mycorrhizal Symbiosism on some physiological characters of *Sesbania aculeata* against water deficient stress. *Applied Field Crops Research*, 28(106), 37-44.
- Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New phytologist*, 489-500.
- Guan, Z. H., Cao, Z., Li, X. G., Scholten, T., Kühn, P., Wang, L., ... & He, J. S. (2024). Soil phosphorus availability mediates the effects of nitrogen addition on community-and species-level phosphorus-acquisition strategies in alpine grasslands. *Science of The Total Environment*, 906, 167630.
- Harris, D., Rashid, A., Miraj, G., Arif, M., & Shah, H. (2007). 'On-farm' seed priming with zinc sulphate solution—A cost-effective way to increase the maize yields of resource-poor farmers. *Field Crops Research*, 102(2), 119-127.
- He, L., Huang, Y., Tang, C., & Xu, J. (2024). Combined use of arbuscular mycorrhizal fungi and alkaline lignin enhance phosphorus nutrition and alleviate cadmium stress in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Science of The Total Environment*, 950, 175335.
- Hoseini, S. S., Zalaghi, R., Enayatizamir, N., & Feizian, M. (2023). 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), 45-62.
- Imami Akfe. (1996). Methods of plant analysis (volume one).
- Jin, Z., Wang, G., George, T. S., & Zhang, L. (2024). Potential role of sugars in the hyphosphere of arbuscular mycorrhizal fungi to enhance organic phosphorus mobilization. *Journal of Fungi*, 10(3), 226.
- Kapoor, R. Giri, B. and Mukerji, K.G. (2004). Improved growth and essential oil yield and quality in *Foeniculum vulgar* Mill on mycorrhizal inoculation supplement with Pfertilizer. *Bioresource Technology* 93: 307-311
- Khanam, R., & Pillai, K. K. (2006). Effect of chromium picolinate on modified forced swimming test in diabetic rats: involvement of serotonergic pathways and potassium channels. *Basic & clinical pharmacology & toxicology*, 98(2), 155-159.
- Kojima, T., Hayatsu, M., & Saito, M. (1998). Intraradical hyphae phosphatase of the arbuscular mycorrhizal fungus, *Gigaspora margarita*. *Biology and Fertility of Soil*, 26, 331-335
- Li, Y., Zhou, Y., Han, X., Tang, M., & Zhang, H. (2024). Overexpression of LbPT7 Promotes Phosphorus Uptake by Plants and Affects Phosphorus Uptake by Arbuscular Mycorrhizas under High Phosphorus Condition. *Russian Journal of Genetics*, 60(5), 588-594.
- Lotfollahi, A., Bolandnazar, S., Aliasgharzad, N., Khoshru, B., & Siامي, A. (2021). Effects of Inoculation with Arbuscular Mycorrhiza and Mycorrhiza-Like Fungi on Growth and Phosphorus Uptake of Coriander. *JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE AND SUSTAINABLE PRODUCTION*, 31(1), 87-101.
- Meng, Lingbo, et al. (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungal Interacted with Biochar and Enhanced Phosphate-Solubilizing Microorganism Abundance and Phosphorus Uptake in Maize." *Agronomy* 14.8: 1678.
- Miao-Miao, X.I.E., Yu, W.A.N.G., Qiu-Shuang, L.I., Kamil, K.U.C.A. and Qiang-Sheng, W.U., 2020. A friendly-environmental strategy: application of arbuscular mycorrhizal fungi to ornamental plants for plant growth and garden landscape. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 48(3), 1100-1115.
- Mitra, G. (2017). Essential plant nutrients and recent concepts about their uptake. *Essential plant nutrients: Uptake, use efficiency, and management*, 3-36.
- Nelson D.W. and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis*, part 3, Chemical Methods, Sparks. D. L. (Ed.) Soil Science Society of America: Madison, WI, SSSA Book Serie 5: 153–188
- Olsen, S. R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
- Ortas, I. (2010). Effect of mycorrhiza application on plant growth and nutrient uptake in cucumber production under field conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8:116-122.
- Pu, Zitian, et al. (2024). Analysis of the influence of phytate-P on shoot and root traits in mycorrhizal-enhanced



- wheat varieties. *Plant and Soil*, 1-15.
- Reid, C.P.P., and Bown, G.D. (1979) Effect of Water Stress On Phosphorus Uptake by Mycorrhiza of *Pinus radiata*, *New Phytologist*, 83:103-108.
- Sadeghi, S., Heidari, G., & Sohrabi, Y. (2015). Effect of biological fertilizer and fertilization management on some growth indices of two maize varieties. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 25(3), 43-60.
- Sato, T., Hachiya, S., Inamura, N., Ezawa, T., Cheng, W., & Tawaraya, K. (2019). Secretion of acid phosphatase from extraradical hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* is regulated in response to phosphate availability. *Mycorrhiza*, 29, 599-605.
- Sharda Waman, M.K. and Bernard Felinov, R. (2009). Studies on effects of arbuscular mycorrhizal (Am) fungi on mineral nutrition of *Carica papaya* L. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 37: 183-186.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2010). *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods* (Vol. 14). John Wiley & Sons.
- Sultana, U., Desai, S., & Reddy, G. (2016). Successful colonization of roots and plant growth promotion of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) by seed treatment with *Pseudomonas putida* and *Azotobacter chroococcum*. *WJ Microbiol*, 3, 043-049.
- 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.
- Tarafdar, J. C. (1995). Visual demonstration of in vitro acid phosphatase activity of VA mycorrhizal fungi. *Current Science*, 69(6), 451-543.
- Tarafdar, J. C., and H. Marschner. (1994). Phosphatase activity in the rhizosphere and hyphosphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus." *Soil Biology and Biochemistry* 26.3, 387-395.
- Turk, M. A., Assaf, T. A., Hameed, K. M., and Tawaha, A. M. (2006). Significance of Mycorrhizae. *World Journal Agriculture Science*, 2: 16 – 20.
- Ul Haq, Jawad, et al. (2023). Arbuscular mycorrhiza fungi integrated with single super phosphate improve wheat-nitrogen-phosphorus acquisition, yield, root infection activity, and spore density in alkaline-calcareous soil. *Gesunde Pflanzen* 75.3, 539-548.
- Walsh L.M. 1971. Instrumental methods for analysis of soils and plant tissue. Soil science society of America. Inc. Madison, Wisconsin, USA, 222p.
- Wang, Guiwei, et al. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance plant phosphorus uptake through stimulating hyphosphere soil microbiome functional profiles for phosphorus turnover." *New Phytologist* 238.6, 2578-2593.
- Wang, Xin-Xin, et al. (2020). Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases phosphorus uptake and productivity of mixtures of maize varieties compared to monocultures. *Journal of Applied Ecology* 57.11, 2203-2211.
- Xia, D., An, X., López, I. F., Ma, C., & Zhang, Q. (2023). Enhancing alfalfa photosynthetic performance through arbuscular mycorrhizal fungi inoculation across varied phosphorus application levels. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1256084.
- Yuan, Jing, et al. (2024). Soil organic phosphorus is mainly hydrolyzed via phosphatases from ectomycorrhiza-associated bacteria rather than ectomycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 1-20.
- Zahedifar, M., Karimian, N., Ronaghi, A., Yasrebi, J., and Emam, Y. (2011). Soil-Plant nutrient relationship at different growth stages of spinach as affected by phosphorus and manure applications. *Commun. Soil Science Plant Analysis*, 42(15): 1765-1781.
- Zhao, Li-Li, et al. (2024). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Physiological Performance of *Sophora davidii* Seedling Under Low-Phosphorus Stress. *Journal of Plant Growth Regulation* 1-13.
- Zuccarini, P. 2007. Mycorrhizal infection ameliorates chlorophyll content and nutrient uptake of lettuce exposed to saline irrigation. *Plant Soil and Environment* 53: 283-289.