



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources



(OPEN ACCESS)

The effect of using native mycorrhizal fungal species of Khuzestan on the concentration of some compounds and micronutrients in *Zea mays* plants grown in saline soil

Marzieh Kolahkaj¹, Roya Zalaghi^{*2}, Gholam Reza Ghezelbash³,
Nasser Aliasgharzarad⁴

1. Ph.D. Student of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m-kolahkaj@stu.scu.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: r.zalaghi@scu.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Biology, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: rghezelbash@scu.ac.ir
4. Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: n-aliasghar@tabrizu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper Article history: Received: 05.10.2025 Revised: 09.03.2025 Accepted: 09.14.2025 Keywords: Mycorrhiza, Phosphatase, Phosphorus, Proline, Salinity	Background and Objectives: Soil salinity is a growing issue in agricultural soils, especially in arid and semi-arid regions, leading to reduced crop growth and production. Mycorrhizal fungi play a significant role in enhancing agricultural plant yields, especially in low-fertility soils, by increasing root surface area through the spread of fungal mycelia in the soil. This study aimed to investigate the effect of arbuscular mycorrhizal fungi on proline content, chlorophyll levels, and nutrient uptake in <i>Zea mays</i> plants grown in saline and non-saline soils. Materials and Methods: This experiment was conducted as a factorial experiment in a completely randomized design with two factors: inoculation with mycorrhizal fungi (<i>Funneliformis mosseae</i> strains A1 and A2) and salinity levels (saline soil with EC = 7 dS m⁻¹ and non-saline soil with EC = 2 dS m⁻¹). The experiment was conducted in a greenhouse with three replicates. The pots were maintained at 70% of field capacity for three months. Following plant harvest, the dry weight of roots and shoots, phosphorus concentration in roots and shoots, and the concentrations of certain elements—such as copper, zinc, iron, manganese, potassium, and sodium—in the shoots were measured. Additionally, leaf chlorophyll and proline contents were determined. Results: Salinity stress significantly reduced several measured plant and soil traits. Parameters such as leaf chlorophyll index, roots and shoot dry weight, phosphorus concentration in roots and shoots, Olsen phosphorus, microbial carbon, and colonization were reduced (by 12.3%, 12.2%, 7.1%, 43.75%, 3.6%, 30%, 28.5%, and 10.1%, respectively). Inoculation with A1 and A2 strains of mycorrhizal fungi improved most of the measured characteristics. The interaction effects of salinity and mycorrhizal fungi showed that for treatments that was inoculated with fungi, in non-saline condition, leaf chlorophyll, dry weight of roots and shoots, phosphorus in

roots and shoots, Olsen phosphorus, microbial carbon, colonization, potassium, copper, manganese, iron, and zinc were significantly increased (by 1.8%, 42.2%, 15.9%, 50%, 28.5%, 68.4%, 64.38%, 92.1%, 40.5%, 44.7%, 232.7%, 87.3%, and 28.125%, respectively).

Conclusion: Overall, the use of mycorrhizal fungi plays a significant role in the absorption of nutrients and in increasing the resistance of plants (especially *Zea mays* plants) to salinity stress. *Strain A2* performed better than *strain A1* in many cases, which indicates the difference between these two strains and their adaptation to environmental conditions. The use of mycorrhizal fungi, especially salt-tolerant strains, can improve plant growth in saline soils and increase the concentration of nutrients in the inoculated plants compared to non-inoculated conditions. Therefore, plants can have better growth and have higher tolerance to soil salinity by improving nutrient absorption through symbiotic microorganisms.

Cite this article: Kolahkaj, Marzieh, Zalaghi, Roya, Ghezelbash, Gholam Reza, Aliasghar zad, Nasser. 2026. The effect of using native mycorrhizal fungal species of Khuzestan on the concentration of some compounds and micronutrients in *Zea mays* plants grown in saline soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 16 (2), 79-98.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23652.2197

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر کاربرد گونه‌های قارچ میکوریزا بومی خوزستان بر غلظت برخی ترکیبات و عناصر ریزمغذی در گیاه ذرت کشت شده در خاک شور

مرضیه کلاه‌کج^۱، رویا زلقی^{۲*}، غلامرضا قزلباش^۳، ناصر علی اصغرزاد^۴

۱. دانشجوی دکتری علوم خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m-kolahkaj@stu.scu.ac.ir

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

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

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳	سابقه و هدف: شوری خاک یک مشکل روزافزون خاک‌های کشاورزی است که باعث کاهش سرعت رشد و تولید محصول به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود. یکی از مهم‌ترین نقش‌های قارچ میکوریزا، افزایش عملکرد گیاهان زراعی به‌خصوص در خاک‌هایی با حاصلخیزی پایین می‌باشد؛ که به دلیل افزایش سطح جذب ریشه گیاه از طریق گسترش میسلیم قارچ در خاک ایجاد می‌شود. این پژوهش به منظور بررسی تأثیر قارچ میکوریزا آربوسکولار بر محتوای پرولین، مقادیر شاخص کلروفیل و جذب مواد غذایی در خاک شور و غیرشور روی گیاه ذرت انجام شد.
واژه‌های کلیدی: پرولین، شوری، فسفاتاز، فسفر، مایکوریزا	مواد و روش‌ها: آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با عامل‌های مایه‌زنی با قارچ میکوریزا <i>Funneliformis mosseae</i> (در سه سطح بدون مایه‌زنی، مایه‌زنی با سویه A1 (جدا شده از خاک غیر شور) و مایه‌زنی با سویه A2 (جدا شده از خاک شور)) و شوری (در دو سطح؛ خاک شور $EC=7 \text{ dS m}^{-1}$ و غیرشور $EC=2 \text{ dS m}^{-1}$) با سه تکرار و با کشت گیاه ذرت تحت شرایط گلخانه ای اجرا گردید. گلدان‌ها به مدت ۳ ماه با رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه خاک نگهداری شدند. پس از برداشت گیاه، وزن خشک ریشه و اندام هوایی، غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی و غلظت برخی عناصر مانند مس، روی، آهن، منگنز، پتاسیم و سدیم در اندام هوایی اندازه‌گیری شد. هم‌چنین محتوای کلروفیل و پرولین برگ اندازه‌گیری شد. یافته‌ها: نتایج نشان داد در اثر تنش شوری، برخی صفات گیاهی و خاک اندازه‌گیری شده کاهش یافت. به طوری که شاخص کلروفیل برگ، وزن خشک ریشه و اندام هوایی، فسفر ریشه

و اندام هوایی و کلونیزاسیون (به ترتیب ۳/۱۲، ۱۲/۲، ۷/۱، ۴۳/۷۵، ۳/۶ و ۱۰/۱ درصد) کاهش یافتند. مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزای سویه A1 و سویه A2 سبب بهبود اکثر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده گردید. همچنین اثر متقابل شوری و قارچ میکوریزا نشان داد که در تیمارهای غیرشور و مایه‌زنی شده با قارچ نسبت به شاهد، کلروفیل برگ، وزن خشک ریشه و اندام هوایی، فسفر ریشه و اندام هوایی، کلونیزاسیون، پتاسیم، مس، منگنز، آهن و روی (به ترتیب ۸/۱، ۴۲/۲، ۱۵/۹، ۲۸/۵۰، ۹۲/۱، ۴۰/۵، ۴۴/۷، ۲۳۲/۷، ۸۷/۳ و ۲۸/۱۲۵ درصد) افزایش یافتند.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی، کاربرد قارچ میکوریزا نقش مؤثری در جذب عناصر غذایی و افزایش مقاومت گیاهان در تنش شوری ایفا می‌نماید. سویه A2 در بسیاری از موارد بهتر از سویه A1 عمل نمود که نشان‌دهنده تفاوت دو سویه و سازگاری سویه‌ها با شرایط محیطی می‌باشد. کاربرد قارچ‌های میکوریزا به‌خصوص گونه مقاوم به شوری می‌تواند سبب بهبود رشد بهتر گیاه در شرایط خاک شور شده و غلظت عناصر در گیاه را نسبت به حالت عدم مصرف قارچ میکوریزا افزایش داد. بنابراین، گیاهان با افزایش جذب مواد مغذی به واسطه میکروارگانیسم‌های همزیست، می‌توانند رشد بهتر و مقاومت بالاتری در شرایط تنش شوری داشته باشند.

استناد: کلاه‌کج، مرضیه، زلّقی، رویا، قزلباش، غلامرضا، علی‌اصغرزاد، ناصر (۱۴۰۵). تأثیر کاربرد گونه‌های قارچ میکوریزا بومی خوزستان بر غلظت برخی ترکیبات و عناصر ریزمغذی در گیاه ذرت کشت شده در خاک شور. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۶ (۲)، ۹۸-۷۹.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23652.2197



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

در میان گیاهان زراعی، ذرت با نام علمی *Zea mays* به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات دانه‌درشت به دلیل نقش مهمی که در تغذیه انسان و دام دارد، در عرصه تولید جهانی از جایگاه ارزشمندی برخوردار است و به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی از قبیل گرمادوست بودن، برخورداری از مسیر فتوسنتزی چهار کربنه و کارایی بالای مصرف آب در مقایسه با سایر غلات، مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. از طرف دیگر، ذرت در بین گیاهان زراعی چهار کربنه حساسیت بالایی را به تنش‌های محیطی دارد که سبب کاهش عملکرد در اثر انواع تنش‌های محیطی می‌شود (۱).

یکی از عوامل مهمی که محدودکننده تولیدات گیاهی در ایران و جهان است، مسأله شوری خاک و آب است که مساحت زیادی از اراضی جهان را تحت‌تأثیر خود قرار داده است (۲). کشور ما در شرایط خشک و نیمه خشک قرار دارد، ۵۰ درصد از اراضی کشاورزی با درجات مختلف شوری و قلیائیت روبه‌رو هستند. شوری یکی از مهم‌ترین تنش‌های اسمزی است که به شکل قابل‌توجهی رشد و عملکرد گیاه را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۳). در صورتی که غلظت نمک محلول به حدی باشد که پتانسیل آب خاک را به $-0/5$ تا -1 پاسکال برسد در این شرایط، تنش شوری در خاک بروز پیدا می‌کند که سبب کاهش کیفیت خاک برای تولید بهینه محصول می‌شود (۴).

در شوری‌های پایین، تغییرات ایجاد شده و پاسخ‌های عملکردی گیاه ممکن است قابل برگشت باشند. اما با تداوم روند تنش و ضعف سازگاری گیاه، آسیب‌های ایجاد شده غیر قابل برگشت می‌شود و این پدیده باعث کاهش رشد در گیاه خواهد شد (۵). این شرایط با ایجاد طیف گسترده‌ای از بی‌نظمی‌ها برای

انجام فعالیت‌های ضروری در مقیاس سلولی، سبب کاهش شدید محصولات زراعی می‌شود (۶). گیاهان تحت تنش شوری، با تنش آبی هم‌زمان مواجه می‌شوند که منجر به عدم تعادل آب و الکترولیت‌ها و آسیب به مولکول‌های حیاتی مانند DNA، پروتئین‌ها و لیپیدها می‌شود. خشکی فیزیولوژیکی ناشی از شوری، جذب آب از خاک را به شدت محدود می‌کند (۷).

در برخی از پژوهش‌ها نشان داده شد که جذب عناصر روی، منگنز، مس، فسفر، نیتروژن و کلسیم توسط گیاه، در شرایط تنش شوری کاهش پیدا کرده است (۸). همچنین در بررسی تنش شوری در گیاه گندم، دیده شد که از محتوای کلروفیل کل، کلروفیل a و کلروفیل b کاسته شده است (۶). شوری در گیاهان سبب تخریب ساختمان کلروپلاست و کاهش محتوای کلروفیل می‌شود و این به خاطر افزایش کلروفیل‌لاز و تغییر در متابولیسم نیتروژن و ساخت ترکیباتی هم‌چون پرولین می‌باشد (۹). نمک‌ها از طریق کاهش پتانسیل اسمزی محلول خاک و با ایجاد سمیت یون‌ها، اختلال در تعادل یون‌ها و یا کمبودهای تغذیه‌ای باعث آسیب به گیاه می‌شوند. علاوه بر این افزایش جذب نمک به وسیله ی گیاه، سبب ایجاد بی‌نظمی در فرآیندهای سلولی و فیزیولوژیک می‌شود (۱۰). مقاومت به شوری در گیاهان با قابلیت تنظیم اسمزی در ارتباط است و گیاهان روش‌های متفاوتی برای جلوگیری از تخریب فعالیت‌های ترمودینامیک و شیمیایی بین محیط بیرون و درون سلول خود را ایجاد می‌کنند (۱۲). از جمله این موارد می‌توان به افزایش توانایی پروتوپلاسم گیاهی برای تحمل تنش اشاره کرد (۹). یکی از روش‌های تحمل شوری در گیاهان، کنترل محتوای آب است، زیرا محتوای آب و املاح با همدیگر مقدار فشار آماس را تنظیم می‌کنند (۷). گیاهان در شرایط تنش شوری، برای حفظ تعادل

اسمزی با تجمع یک سری ترکیبات آلی خاص مثل ساکاروز و سنتز آمینواسیدهای ویژه پتانسیل آب درونی خود را کاهش می‌دهند (۱۱). این مواد شامل ترکیبات آلی محلول همانند ترکیبات نیتروژنی (پرولین، گلیسین، بتائین) و کربوهیدرات‌های محلول (مانیتول، ساکارز، رافینوز، الیگوساکارید) بوده که در فرایندهای شیمیایی گیاه مشکلی به وجود نمی‌آورند و با تنظیم اسمزی و حفظ تورژسانس و نگهداری حجم سلول سبب کاهش آثار تنش می‌شوند (۹). هم‌چنین پراکسیداسیون لیپیدها و تخریب غشا در اثر تولید پراکسید هیدروژن در تنش شوری، افزایش می‌یابد و ایجاد مقاومت در برابر تنش شوری وابسته به پایداری غشای دو لایه‌ای لیپیدی و اسیدهای چرب غیراشباع است، این مواد پایداری در غشا را تنظیم می‌کنند (۱۳).

قارچ‌های میکوریزا آربسکولار از عوامل بیولوژیک خاک‌ها هستند، که باعث افزایش سطح مؤثر ریشه و توانایی افزایش جذب فسفر از منابع غیرمتحرک به وسیله فعالیت آنزیم فسفاتاز و ترکیبات آلی می‌گردند. استفاده تجاری از این قارچ‌ها در کودهای زیستی قابل توجیه و مقرون به صرفه می‌باشد (۱۴). همزیستی گیاهان با قارچ میکوریزا آربسکولار می‌تواند، نقش مهمی در تولید ترکیبات آلی گیاهی داشته باشد. از جمله این ترکیبات پرولین است، که نقش مهمی در تنظیمات اسمزی و محافظت از ساختارهای داخلی سلول‌های گیاهی در شرایط تنش را دارا می‌باشد (۱۵). ایجاد تجمع قندهای محلول توسط همزیستی میکوریزا یک پاسخ مثبت به تنش شوری است، زیرا قندها باعث جلوگیری از تغییر ساختار پروتئین‌های محلول، حفظ تعادل اسمزی در سلول گیاهان و حفظ تمامیت غشا می‌شوند (۱۶). طبق پژوهش‌های انجام شده در اثر تنش شوری، کلروفیل a نسبت به کلروفیل b دچار تنش بیشتری

می‌شود و استفاده از قارچ میکوریزا سبب حفظ بیش‌تر محتوی این دو رنگدانه و هم‌چنین نسبت آن‌ها می‌گردد (۱۷). میکوریزا به‌طورکلی به گیاهان کمک می‌کند تا مواد مغذی و آب را بهتر جذب کنند. این موضوع در خاک‌های شور اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند، زیرا شوری می‌تواند جذب مواد مغذی و آب را برای گیاهان دشوارتر کند. در خاک‌هایی که سالیان طولانی تحت‌تأثیر شوری بوده‌اند میکروب‌های خاک نیز خود را با شوری سازگار می‌نمایند. بنابراین استفاده از میکوریزای سازگار با شوری می‌تواند به گیاهان کمک کند تا در این شرایط سخت زنده بمانند و رشد بهتری داشته باشند. برخی از قارچ‌های میکوریزا می‌توانند به کاهش اثرات منفی شوری بر گیاهان کمک کنند. به عنوان مثال، برخی از آن‌ها می‌توانند با جذب یون‌های سمی مانند سدیم، از ورود آن‌ها به گیاه جلوگیری کنند (۱۸). بنابراین این پژوهش به منظور بررسی تأثیر قارچ میکوریزا آربسکولار بر محتوی پرولین، مقادیر کلروفیل و اثر بر جذب عناصر غذایی در خاک شور و غیر شور بر روی گیاه ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آماده‌سازی خاک و کشت گیاه: این پژوهش با کشت گلدانی گیاه ذرت در دو خاک شور و غیر شور و کاربرد گونه‌های مختلف میکوریزا انجام شد. از خاک مزارع رامهرمز با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری صورت گرفت. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به روش‌های استاندارد (۱۹) اندازه‌گیری و در جدول ۱ ارائه شده است. بافت خاک به روش هیدرومتری و pH و EC نمونه‌های خاک در عصاره ۱ به ۵ خاک به آب،

به‌ترتیب با دستگاه pH متر و EC متر اندازه‌گیری شد (۱۹). درصد ماده آلی به روش تیتراسیون برگشتی (والکلی بلک) (۲۰)، فسفر قابل‌جذب با عصاره‌گیری با بی کربنات سدیم به روش اولسن (۲۱) و نیتروژن به روش کج‌دال (۲۲) اندازه‌گیری شدند. درصد کربنات کلسیم با استفاده از اسید هیدروکلریک و تیتراسیون با سود و پتاسیم کل خاک در عصاره اشباع با دستگاه فلیم فوتومتری اندازه‌گیری شد (۲۳).

آزمایش به صورت فاکتوریل با دو عامل مایه‌زنی قارچ در سه سطح (بدون مایه‌زنی، مایه‌زنی با سویه A1 و سویه A2) و عامل شوری در دو سطح (خاک شور با $EC=7 \text{ dS m}^{-1}$ و غیرشور $EC=2 \text{ dS m}^{-1}$) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. ابتدا خاک با $EC=2 \text{ dS m}^{-1}$ انتخاب شده و نیمی از خاک جدا شده و شوری آن به $EC=7 \text{ dS m}^{-1}$ رسانده شد. شوری توسط نمک‌های NaCl ، CaCl_2 و MgCl_2 (به نسبت وزنی ۲ به ۱ و ۱) با حل کردن نمک‌ها در آب مقطر و اسپری پاشی، به خاک اعمال شد و قابلیت هدایت الکتریکی مرتباً اندازه‌گیری شد تا زمانی که خاک به $EC=7 \text{ dS m}^{-1}$ رسید. خاک برای رسیدن به تعادل چهار هفته نگهداری شد و پس از این زمان مجدداً EC اندازه‌گیری شد. پس از یکنواخت نمودن خاک و عبور از الک ۲ میلی‌متری، خاک در گلدان‌های ۴ کیلوگرمی ریخته شد.

در این پژوهش از قارچ‌های میکوریزا کلکسیون خاکشناسی دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده شد. دو گونه قارچ میکوریزا که در مراحل قبلی از مزارع نیشکر مربوط به پژوهشگاه طرح‌های توسعه نیشکر در جنوب اهواز جداسازی شده بودند، استفاده گردید. سویه *Funneliformis mosseae* A1 (فراوان‌ترین سویه جدا شده از نیشکر مزارع غیر شور $EC < 4$) و سویه *F. mosseae* A2 (فراوان‌ترین سویه جدا شده از نیشکر مزارع شور $EC=7/5 \text{ dS m}^{-1}$) جداسازی و

شناسایی مولکولی شده و با کدهای PQ851067 و PQ851069 در NCBI ثبت شده‌اند. فراوان‌ترین قارچ میکوریزا منطقه جنوب اهواز *F. mosseae* بوده که هم از گیاه نیشکر مزارع شور (۲ مزرعه) و غیر شور (۲ مزرعه) و هم از گیاه برنج در این منطقه جداسازی شد و نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که گونه غالب که در این منطقه موجود می‌باشد و با گیاهان همزیستی ایجاد می‌کند گونه فوق می‌باشد. این قارچ‌ها در بستر ماسه استریل با بذر استریل ذرت تکثیر شده و بستر کشت به همراه ریشه‌های خورد شده ذرت به عنوان مایه تلقیح به کار برده شد. برای هر گلدان ۴ کیلوگرمی ۲۰۰ گرم مایه تلقیح قارچ، به‌صورت لایه‌ای، در زیر بذرها قرار داده شد. برای تیمارهای بدون قارچ نیز ۲۰۰ گرم مایه تلقیح استریل شده به کار برده شد (۲۴). کشت ذرت در اواسط فروردین ماه سال ۱۴۰۲ انجام شد. کود فسفردار از منبع سوپر فسفات تریپل به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار (۰/۲۵ گرم در گلدان) به صورت پایه استفاده شد. لازم به ذکر است که این مقدار کود فسفردار معادل نصف میزان مورد نیاز بر اساس آزمون خاک بود ولی به دلیل استفاده از قارچ میکوریز و تأثیری که این قارچ در بهبود استفاده از کود فسفردار دارد و هم‌چنین برای استقرار بهتر همزیستی میکوریزی مقدار کود فسفردار به نصف کاهش یافت. کود نیتروژنی از منبع اوره به میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار (۰/۳۷۵ گرم در گلدان) تقسیط شده در دو نوبت پایه و سرک (روز ۴۰ پس از کاشت) به گلدان‌ها اضافه شد (۲۵). در هر گلدان ۶ بذر جوانه زده قرار داده و پس از دو هفته در هر گلدان ۳ بوته نگهداری شد. گیاهان به‌مدت ۳ ماه نگهداری شدند و در طول دوره رشد، آبیاری هفته‌ای یکبار تا ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه با آب مقطر انجام شد. برای کنترل رطوبت از گلدان‌های تخریبی (گلدان‌های تخریبی، گلدان‌های فرعی بوده که

در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران اهواز با دستگاه جذب اتمی (مدل Perkin Elmer's 8300) انجام شد. کلروفیل گیاه در روز ۴۵ به وسیله دستگاه کلروفیل متر SPAD-502Plus اندازه‌گیری شد. برای هر گلدان پنج قرائت صورت گرفت و میانگین گرفته شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک برگ‌ها و اندام‌های هوایی و ریشه در فویل آلومینیومی پیچیده شد و در آون با دمای ۷۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. سپس با ترازوی استاندارد با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. پرولین موجود در برگ در روز ۴۵ براساس روش Bates اندازه‌گیری شد. نمونه‌های گیاهی خشک را به پودر کرده و ۰/۱ گرم از پودر را در هاون با ۱۰ میلی‌لیتر از محلول اسید سولفوسالسیلیک ۳ درصد ساییده شد. پرولین با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (۲۹).

تحلیل آماری: تجزیه واریانس و مقایسه میانگین با نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح پنج درصد صورت گرفت و منحنی‌ها با نرم‌افزار Excel رسم گردید.

همانند گلدان‌های اصلی کشت شده و با اندازه‌گیری و کنترل رطوبت آن‌ها در طی کشت می‌توان میزان رطوبت مورد نیاز برای آبیاری گلدان‌های اصلی را محاسبه نمود) استفاده شد. دمای گلخانه در دوره رشد گیاه ۲۳ تا ۳۶ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی درون گلخانه ۶۰ درصد و طول روز به شب ۱۳ به ۱۱ ساعت بود.

اندازه‌گیری‌ها در گیاه: پس از سه ماه برداشت گیاه صورت گرفت، ریشه و اندام هوایی جدا شده و پس از شستشو با آب شهر و سپس با آب مقطر، خشک و توزین گردید. هضم گیاه به روش اکسیداسیون تر (با اسیدکلریدریک و اسید نیتریک) انجام شده (۲۳) و بخشی از ریشه‌ها برای رنگ‌آمیزی به صورت تازه نگهداری شد. رنگ‌آمیزی ریشه با تریپان بلو^۱ (۲۶) و محاسبه درصد کلونیزاسیون ریشه در مایکوریزا به روش تقاطع با خطوط شبکه (۲۷) انجام شد. اندازه‌گیری فسفر در عصاره‌های گیاه با روش رنگ‌سنجی (وانادات- مولیبدات)، (۲۸) قرائت با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (5000 DR, HACH) در طول موج ۴۷۰ نانومتر و قرائت عناصر کم‌مصرف (شامل آهن، روی، منگنز، مس) در عصاره‌های هضم

جدول ۱- پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده.

Table 1. Physicochemical parameters of the used soil.

پتاسیم کل	فسفر کل	فسفر اولسن	نیترژن کل	قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع	pH عصاره اشباع	ماده آلی	معادل کربنات کلسیم	بافت خاک
Total K	Total P	Olsen P	Total N	Electrical conductivity of saturated extract	pH of saturated extract	Organic matter	calcium carbonate	soil texture
mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	(%)	EC (dS.m ⁻¹)		OM (%)	CCE (%)	
340	92.42	8.48	0.13	2.01	6.9	1.29	41	Sandy Loam

1- Trypan blue

نتایج و بحث

مورد بررسی معنی‌دار بوده است، اما به منظور مقایسه بهتر ویژگی‌های مورد بررسی در ادامه تنها اثرات متقابل بحث شده‌اند.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۲، اثرات اصلی سطوح مختلف شوری و تیمار قارچ میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها در مورد بسیاری از ویژگی‌های

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر فاکتورهای مورد آزمایش بر میانگین مربعات صفات مورد بررسی گیاه ذرت.

Table 2. Analysis of variance of the effect of the tested factors on the mean squares of the studied traits of *Zea mays* plants.

درصد کلنیزاسیون Root colonization%	کلروفیل Chlorophyll	پروترین Proline	فسفر ریشه P con. of root	فسفر اندام هوایی P con. of shoot	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	درجه آزادی Degree of freedom	منابع تغییر Source of variations
256.9**	8.0**	0.205**	0.07**	0.001*	3.22**	3.2**	1	شوری Salinity
4546.4**	17.08**	0.305**	0.04**	0.003**	36.92**	8.85**	2	قارچ میکوریزا Mycorrhizal fungi
35.39**	0.05 ^{ns}	0.006*	0.006**	0.00019 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.23 ^{ns}	2	شوری × قارچ میکوریزا Salinity × Myco.
1.056	0.26	0.006	0.008	0.00008	0.12	0.07	12	خطا Error
0.64	1.35	0.32	13.38	6.73	3.58	2.77		ضریب تغییرات Coefficient of variations

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

^{ns}، * and **, respectively: no significant difference and significant at 5 and 1% probability level

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

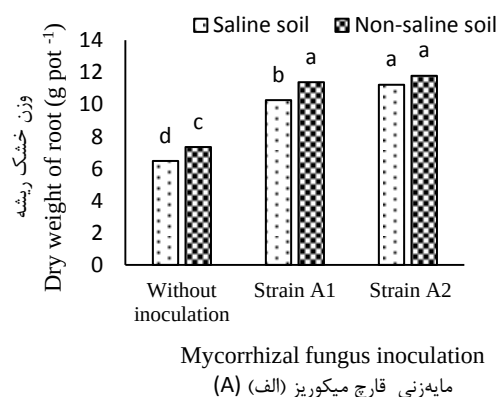
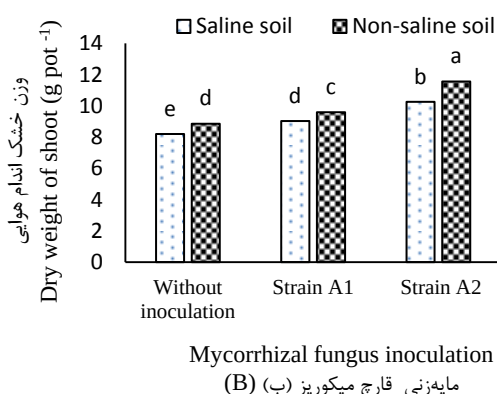
نسبت پتاسیم به سدیم K/Na	سدیم اندام هوایی Na con. shoot	پتاسیم اندام هوایی K con. shoot	روی اندام هوایی Zn con. shoot	منگنز اندام هوایی Mn con. shoot	مس اندام هوایی Cu con. shoot	آهن اندام هوایی Fe con. shoot	درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییر Sources of variations
0.04**	6.36**	0.02 ^{ns}	563.361*	1045.769*	6.24**	7.501 ^{ns}	1	شوری Salinity
0.63**	3.32**	1.59**	197.394*	9653.459**	15.45**	99.823**	2	قارچ میکوریزا Mycorrhizal fungi
0.01 ^{ns}	0.15**	0.15 ^{ns}	24.374*	130.957*	0.06 ^{ns}	0.612 ^{ns}	2	شوری × قارچ میکوریزا Salinity × Myco.
0.03	0.01	0.21	154.605	456.728	0.75	9.263	12	خطا Error
23.35	4.14	445.38	0.076	0.5	9.71	0.205		ضریب تغییرات Coefficient of variation

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

^{ns}، * and **, respectively: no significant difference and significant at 5 and 1% probability level

سدیم و کلر در گیاه باعث پیری زود هنگام برگ‌ها، کاهش شاخص سطح برگ و کاهش سطوح فتوستنز می‌شود (۳۱). رشد گیاه در شرایط شوری در تیمارهای میکوریزی نسبت به تیمارهای متناظر غیرمیکوریزی به‌طور معناداری افزایش یافت. مکانیسم افزایش مقاومت به شوری توسط قارچ میکوریزا می‌تواند به علت بهبود تغذیه گیاه میزبان، تولید تنظیم کننده‌های اسمزی، افزایش توانایی فتوستنزی و کارایی استفاده آب و تسهیل جذب آب در گیاهان کلونیزه شده باشد (۴). سویه A2 از خاک شور جدا شده بود و نسبت به سویه A1 از نظر وزن خشک اندام هوایی و ریشه بهتر عمل نموده است که نشان‌دهنده سازگاری و کارآمدی بهتر این قارچ با شرایط شوری می‌باشد (شکل ۱).

وزن خشک ریشه و اندام هوایی: نتایج نشان داد شوری و تلقیح میکوریزا تأثیری معنادار ($p < 0.05$) بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه دارد (جدول ۲). تیمار مایه‌زنی شده با سویه A2 بیش‌ترین وزن خشک ریشه (۱۱/۹۷ گرم در گلدان) و بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی (۱۱/۷ گرم در گلدان) را نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی در خاک شور داشت. افزایش شوری رشد ریشه را کاهش داده و بر تجمع ماده خشک در گیاه تأثیر منفی می‌گذارد. کاهش وزن خشک بافت‌ها به دلیل افزایش هزینه متابولیک در شرایط شور و کاهش تولید زیتوده گیاهی است (۳۰). شوری باعث القاء تنش اسمزی می‌شود که نتیجه آن پایین آمدن نرخ رشد ریشه و برگ به دلیل تنش‌های ایجاد شده می‌باشد. دلیل این است که افزایش غلظت یون‌های



شکل ۱- اثرات متقابل شوری با قارچ میکوریزا بر میزان وزن خشک ریشه (الف) و اندام هوایی (ب).

هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 1. Interactive effects of salinity and mycorrhizal fungi on the dry weight of roots (A) and aerial parts (B). Histograms that share at least one common letter indicate no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

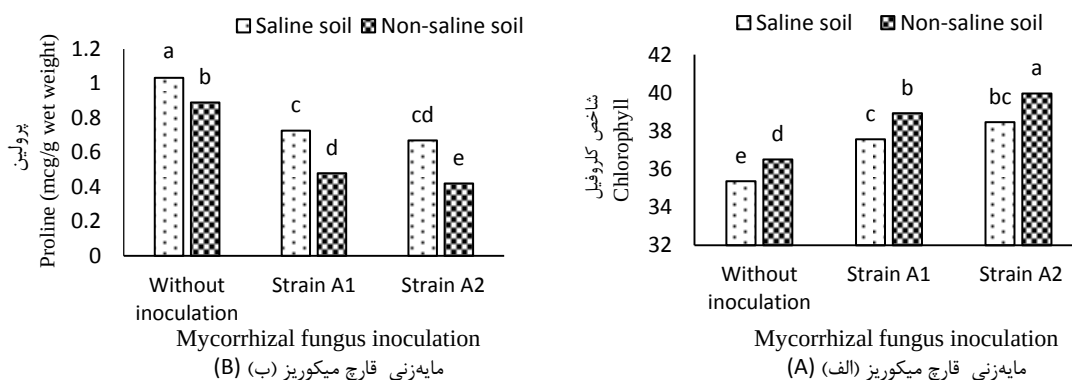
برهم خوردن توازن یونی ناشی از کاهش جذب یون‌های ضروری و انباشتگی یون‌های مضر و کم‌آبی ناشی از جذب آب که با کاهش سنتز پروتئین، تعرق و انتقال یون همراه است، باعث افزایش محتوای پرولین گیاه می‌شود (۳۲). پرولین به‌عنوان یک اسمولیت، سازگاری مناسبی با آنزیم‌ها و

محتوای پرولین: هر دو عامل شوری و مایه‌زنی میکوریزا و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان پرولین برگ معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین مقدار پرولین را تیمار بدون مایه‌زنی در خاک شور داشته است (شکل ۲، ب). تولید پرولین در گیاه پاسخی به تنش‌های محیطی و به ویژه شوری می‌باشد. شوری به دلیل

ماکرومولکول‌های سلول دارد و از ساختار پروتئین‌ها و غشاء سلول‌ها محافظت و به‌عنوان رباینده رادیکال هیدروکسیل نیز عمل می‌کند. این اسید آمینه در واقع به عنوان یک شاخص در تعیین میزان حساسیت به تنش خشکی در گیاهان است که بالا رفتن میزان آن در بافت‌های گیاهی به نوعی بیانگر فعال شدن ساز و کار تنظیم اسمزی است و فراهم آمدن شرایط برای جذب بیش‌تر آب و املاح از محیط می‌باشد (۳۰). افزایش فعالیت پرولین برگ‌ها با افزایش فعالیت پروتئاز، تجمع اسید آمینه، کاهش میزان کلروفیل برگ و پروتئین همراه است. پرولین در تحمل شوری و تنظیم اسمزی و حفظ فعالیت آنزیمی در گیاهان نقش دارد (۳۳). بررسی داده‌های این پژوهش نشان داد مایکوریزا باعث کاهش تولید پرولین در شرایط تنش شده است و در تیمارهای دارای درصد کلونیزاسیون بالاتر (شکل ۳) مقدار پرولین کم‌تر بود. می‌توان استنباط کرد، حضور مایکوریزا تا حدودی توانسته است اثر شوری بر گیاه را کاهش دهد که در نتیجه آن پرولین هم کم شده است. قارچ‌های مایکوریزا با تولید هیف‌های فراوان باعث افزایش سطح تماس ریشه‌ها با خاک می‌شوند و نتیجه آن افزایش جذب آب و عناصر غذایی موجود در خاک توسط ریشه‌ها و افزایش بیومس گیاه نسبت به تیمارهای بدون مایه‌زنی (شکل ۱) در شرایط تنش شوری شده و به این ترتیب میزان پرولین کاهش می‌یابد.

شاخص کلروفیل: نتایج داده‌ها نشان داد که تنش شوری باعث کاهش (۳/۱۲ درصد) کلروفیل گیاه شد (جدول ۲). تنش شوری به دلیل اثر مهارکنندگی ناشی از تجمع یون‌های نمکی مختلف، سبب اختلال در

بیوسنتز کلروفیل و کاهش کلروفیل گیاه می‌شود (۳۴). در شرایط تنش شوری، رقابت و پیشی گرفتن ساخت گلوتامین کیناز (آنزیم کاتالیزکننده پرولین) نسبت به آنزیم گلوتامات لیگاز (اولین آنزیم مسیر بیوسنتز کلروفیل) باعث می‌شود تا پیش‌ساز گلوتامات بیش‌تر به مصرف ساخت پرولین برسد و بنابراین بیوسنتز کلروفیل با محدودیت مواجه می‌شود (۳۵). هم‌چنین افزایش غلظت یون‌های سمی سدیم، کلر و تنظیم‌کننده‌های رشدی مانند اسید آبسزیک و اتیلن تحت تنش شوری سبب افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌لاز شده که متلاشی‌کننده ساختار کلروپلاست می‌باشد و منجر به سست شدن اتصال کلروفیل با پروتئین‌های کلروپلاستی می‌شود (۳۶). تیمارهایی که دارای یون سدیم بیش‌تری باشند کلروفیل خود را زودتر از دست می‌دهند (۶). در تیمارهای مایه‌زنی شده با قارچ‌های مایکوریزا نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی میزان کلروفیل افزایش یافت و سویه $A2$ نسبت به $A1$ از نظر افزایش کلروفیل گیاه بهتر عمل نموده است (شکل ۲، الف). یکی از مهم‌ترین نقش‌های مایکوریزا افزایش محتوای کلروفیل است. مایکوریزا با افزایش میزان نیتروژن، پتاسیم و فسفر در گیاه، باعث افزایش میزان رنگیزه‌ها (کلروفیل) شده و با تولید مواد فتوسنتزی در نهایت باعث بهبود رشد و عملکرد گیاه ذرت می‌شود (۳۷). با افزایش سطوح تنش از مقدار ماده خشک و مقدار کلروفیل کاسته شده است. در دیگر پژوهش‌ها نیز کاربرد قارچ مایکوریزا منجر به افزایش چند درصدی ماده خشک سویا و افزایش کلروفیل نسبت به عدم کاربرد قارچ گردید (۳۸).



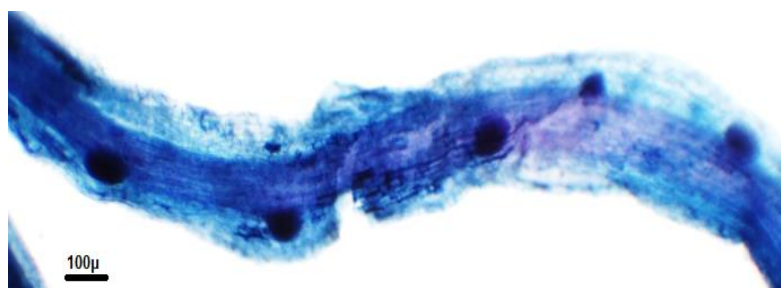
شکل ۲- اثرات متقابل شوری و میکوریزا بر میزان کلروفیل (الف) و پرولین (ب).

هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 2. Interactive effects of salinity and mycorrhiza on chlorophyll content (A) and proline levels (B).
Histograms that share at least one common letter indicate no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

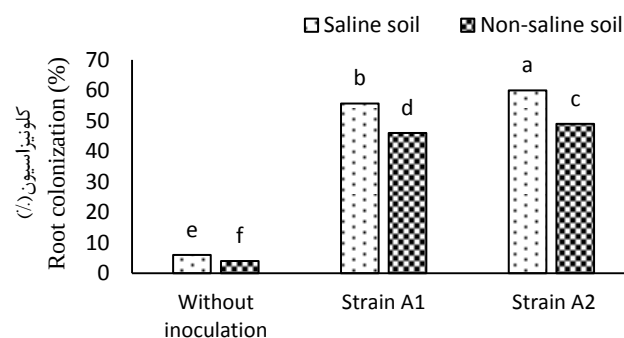
به دلیل تنش وارده به قارچ و تأثیر شوری بر روی جوانه‌زنی اسپور و تولید هیف کاهش رشد قارچ و کاهش کلونیزاسیون ریشه گیاه دیده شده است (۴۰). باید توجه کرد که سطح شوری خاک، نوع قارچ و نوع گیاه عوامل مؤثر در این روند می‌باشند. یکی از شاخص‌های مهم فعالیت قارچ‌های میکوریزا میزان کلونیزاسیون سیستم ریشه‌ای توسط این قارچ‌ها است که توسط عوامل مختلفی از جمله خصوصیات ظاهری و ساختمانی، سیستم ریشه‌ای، مقدار و کیفیت ترشحات ریشه‌ای، سطح شوری خاک، مصرف کودهای شیمیایی فسفردار و غلظت‌های بالای عناصر سنگین تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۴۱). قارچ‌های میکوریزا با کلونیزاسیون ریشه گیاهان میزبان، سبب بهبود جذب مواد معدنی به ویژه فسفر شده و منابع کربنی را از گیاه دریافت می‌کند. اهمیت این قارچ‌ها در اکثر اکوسیستم‌ها به واسطه فوایدی نظیر افزایش رشد، مقاومت به بیماری‌های خاکزاد، حفظ خاکدانه‌ها و نیز بهبود چرخه میکروبی و مواد غذایی در خاک است (۴۲). درصد کلونیزاسیون در خاک شور نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی ۴۵ درصد افزایش یافت که این افزایش در سویه A2 نسبت به سویه A1 بیش‌تر است (شکل ۳).

کلونیزاسیون ریشه: کلونیزاسیون ریشه گیاه ذرت، پس از رنگ‌آمیزی ریشه‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳، الف). نتایج نشان داد درصد کلونیزاسیون ریشه در تیمارهای مایه‌زنی شده با قارچ میکوریزا در مقایسه با تیمار بدون مایه‌زنی اختلاف معنی‌داری داشت. بیش‌ترین درصد کلونیزاسیون در تیمار مایه‌زنی شده با سویه A2 در خاک شور (۶۱ درصد) و کم‌ترین درصد کلونیزاسیون در تیمار بدون مایه‌زنی در خاک غیر شور (۴ درصد) مشاهده شد (شکل ۳، ب). وجود کلونیزاسیون در تیمارهای بدون مایه‌زنی، به دلیل غیراستریل بودن خاک مورد استفاده است اما مقدار پایین مایه‌زنی در این تیمارها نشان می‌دهد که جمعیت قارچ‌ها در این خاک ضعیف می‌باشد که می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله شنی بودن خاک مورد استفاده، درصد کم ماده آلی خاک و نیز استفاده از سموم قارچ کش در اراضی کشاورزی باشد (شکل ۱) (۳۹). بالارفتن درصد کلونیزاسیون با تلقیح قارچ‌های میکوریزا به خاک نشان‌دهنده مؤثر بودن تلقیح و کارآمد بودن استفاده از میکوریزا در چنین خاکی باشد. در این تحقیق شوری سبب افزایش درصد کلونیزاسیون ریشه شده است در حالی که در برخی پژوهش‌ها گزارش شده که با افزایش شوری



(الف)

(A)



Mycorrhizal fungus inoculation

مایه‌زنی قارچ میکوریز (ب) (B)

شکل ۳- ریشه کلونیزه شده (الف)، مقایسه میانگین اثرات متقابل شوری با مایکوریزا بر میزان کلونیزاسیون (ب).

هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 3. Colonized root (A), comparison of the mean interactive effects of salinity and mycorrhiza on the level of colonization (B).

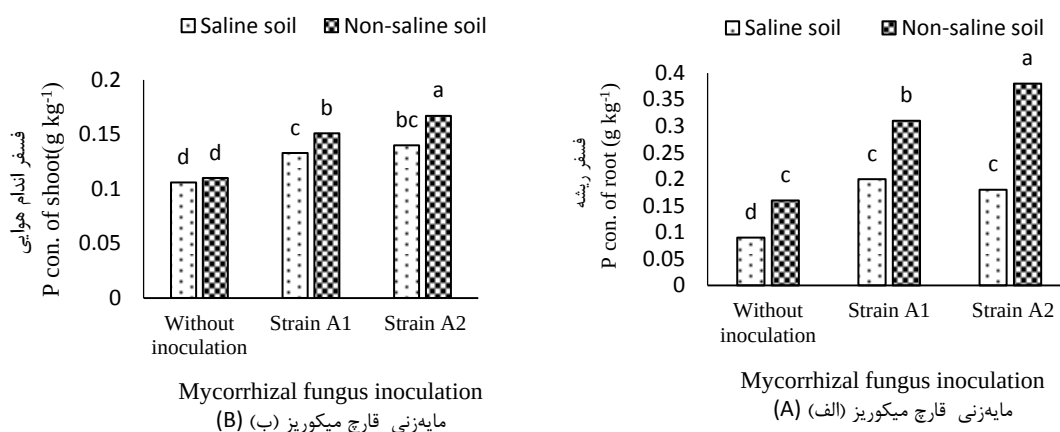
Histograms that share at least one common letter indicate no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

هیف‌های قارچ سبب افزایش سطح جذب فسفر می‌شود؛ که به‌طور قابل توجهی جذب فسفر را در واحد سطح ریشه بهبود می‌بخشد (۴۴). تأثیر قارچ میکوریزا در جذب فسفر و رشد گیاه، تحت تأثیر برهمکنش میان گیاه میزبان، قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار و سایر فاکتورهای محیطی تعیین می‌گردد (۴۵). در گیاهان مایکوریزای سرعت جریان فسفر به درون گیاه ۳ تا ۶ مرتبه بیش‌تر از گیاهان غیرمایکوریزای است (۴۶). به‌طورکلی شوری، غلظت فسفر را در بافت‌های گیاهی کاهش می‌دهد که این کاهش فسفر را به رقابت بین فسفر و کلرید برای جذب شدن توسط ریشه گیاه مربوط دانسته‌اند (۴۷).

غلظت فسفر ریشه و اندام هوایی: در پژوهش حاضر بیش‌ترین افزایش میزان فسفر جذب شده توسط ریشه (۰/۴۱ گرم بر کیلوگرم) و اندام هوایی (۰/۱۸۶ گرم بر کیلوگرم) مربوط به تیمار مایه‌زنی با سویه A2 نسبت به شاهد دیده شد. هم‌چنین در اثر تنش شوری میزان فسفر جذب شده در ریشه و اندام هوایی کاهش یافت (شکل ۴). شوری خاک به‌طور معنادار جذب عناصر معدنی به‌ویژه فسفر را کاهش می‌دهد؛ زیرا یون‌های فسفات سریعاً با یون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم موجود در خاک‌های شور رسوب می‌دهد و به‌صورت غیرمتحرک درمی‌آید و برای گیاه غیرقابل‌دسترس می‌شود (۴۳). تشکیل همزیستی با قارچ و توسعه

دو خاک شور و غیر شور بهتر عمل نموده است و سبب افزایش برداشت فسفر در اندام هوایی و ریشه گیاه شده است.

از نظر غلظت فسفر در اندام هوایی و ریشه گیاه، سویه A2 در خاک غیرشور بهتر از سویه A1 عمل نموده است. البته از نظر جذب فسفر (حاصل ضرب غلظت فسفر در وزن اندام‌های گیاه)، سویه A2 در هر



شکل ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل شوری با قارچ میکوریزا بر غلظت فسفر ریشه (الف) و اندام هوایی (ب).

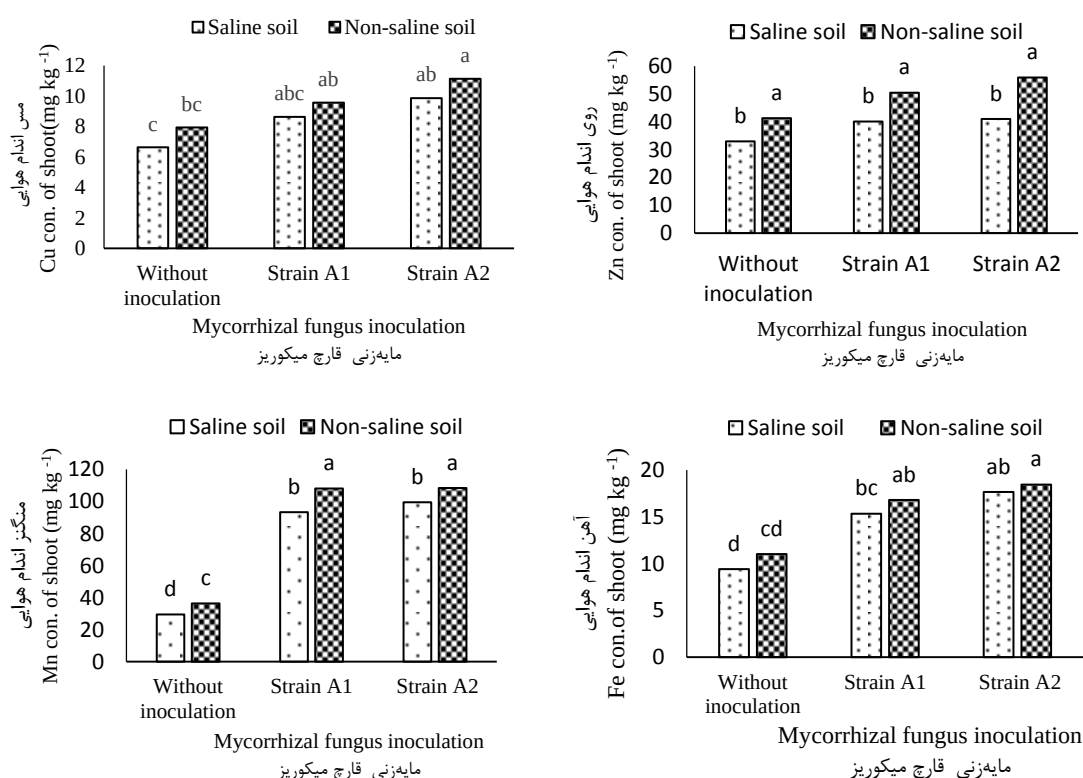
هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 4. Comparison of the mean interaction effects of salinity with mycorrhizal fungi on root (A) and shoot phosphorus concentrations (B).

Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سدیم، روی، مس، منگنز، آهن، آلومینیوم را نیز افزایش می‌دهد (۴۹). شی و همکاران (۲۰۱۳) با تلقیح نهال‌های گل‌پیچک چین (*Lonicera confusa*) با قارچ‌های میکوریزا طی ۵ سال گزارش کردند که در نهال‌های تلقیح شده غلظت عناصر P، N و K در برگ و گل به طور قابل توجهی نسبت به گیاهان تلقیح نشده افزایش یافت (۹). تلقیح گیاه با میکوریزا موجب بهبود وضعیت تغذیه‌ای، از جمله افزایش غلظت پتاسیم و کاهش غلظت سدیم در بافت برگ می‌شود (۵۰). در پژوهش حاضر نتایج نشان داد، دو سویه از نظر غلظت عناصر کم مصرف در گیاه شیه هم عمل نموده‌اند و اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۵).

غلظت عناصر کم‌مصرف: مقایسه میانگین داده‌های غلظت عناصر کم‌مصرف در اندام هوایی نشان داد که در خاک شور جذب عناصر غذایی کاهش می‌یابد (شکل ۵). شوری به دلیل ایجاد شرایط خاص شیمیایی و بالا بودن برخی عناصر نظیر سدیم و کلراید سبب کاهش جذب عناصر کم‌مصرف توسط گیاه می‌شود (۴۸). مایه‌زنی با قارچ میکوریزا سبب افزایش غلظت این عناصر در گیاه شد (شکل ۵). قارچ میکوریزا آربوسکولار جذب عناصر غذایی را توسط گیاه با افزایش در دسترس بودن و همچنین انتقال مواد مغذی مختلف بهبود می‌بخشد. کلونیزاسیون ریشه توسط قارچ میکوریزا آربوسکولار باعث تحریک جذب مواد مغذی در گیاهان می‌شود. قارچ میکوریزا علاوه بر فسفر، جذب عناصری دیگری مانند گوگرد، بور،



شکل ۵- اثرات متقابل شوری با قارچ میکوریزا بر غلظت عناصر غذایی کم مصرف در اندام هوایی.

هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 5. Interaction effects of salinity with mycorrhizal fungi on the amount of nutrients in the Shoot. Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

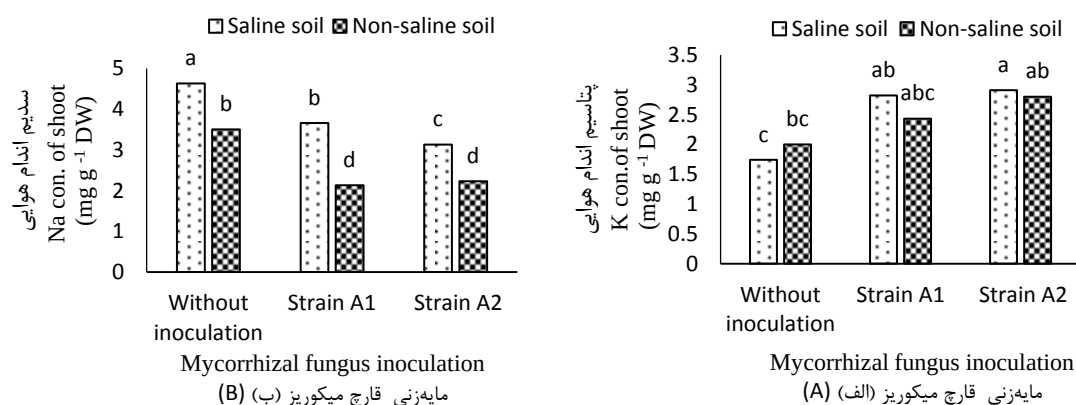
از جمله افزایش جذب آب، کاهش تنش‌های محیطی نظیر شوری، کاهش غلظت عناصر سنگین و افزایش مقاومت گیاه به عوامل بیماری‌زای ریشه دارد. این قارچ‌ها علاوه بر افزایش جذب مواد غذایی معدنی در گیاه می‌توانند سبب تحریک مواد تنظیم‌کننده رشد، افزایش فتوسنتز، بهبود تنظیم فشار اسمزی در شرایط خشکی و افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی نیز شوند (۵۲). در برخی پژوهش‌های فیزیولوژیک نشان داده شده که سمیت سدیم تنها به علت غلظت بالای آن در سیتوسول^۱ نبوده است، بلکه این اتفاق می‌تواند به دلیل به هم زدن دامنه فراهمی پتاسیم به دلیل قدرت رقابت بر سر جایگاه اتصال پتاسیم باشد (۱۳). با مقایسه میانگین‌ها مشاهده می‌شود که با افزایش

سدیم و پتاسیم اندام هوایی: با افزایش شوری، میزان پتاسیم اندام هوایی کاهش (شکل ۶، الف) و میزان سدیم اندام هوایی افزایش یافت (شکل ۶، ب). بیش‌ترین میزان سدیم در تیمار بدون مایه‌زنی در خاک شور و کم‌ترین میزان آن در تیمار مایه‌زنی با سویه A2 در خاک غیرشور نشان داده شد. سدیم به‌عنوان یک عنصر ضروری گیاه مطرح نیست و تجمع آن در گیاه در شرایط شوری منجر به کاهش یون‌های کلسیم و پتاسیم می‌گردد. اگرچه سدیم می‌تواند به افزایش تورژسانس کمک کند اما نمی‌تواند در فعالیت‌های ویژه مانند فعالسازی آنزیم‌ها و سنتز پروتئین‌ها جایگزین یون پتاسیم شود (۵۱). قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار از مهم‌ترین ریزجانداران خاک بوده که همزیستی آن‌ها با گیاهان فواید متعددی

1- Cytosol

خاک‌های شور عمل می‌کنند (۵۳). تلقیح گیاه با قارچ میکوریزا موجب بهبود وضعیت تغذیه‌ای از جمله افزایش غلظت پتاسیم در بافت برگ می‌شود و سویه A2 از نظر نسبت پتاسیم به سدیم نسبت به سویه A1 بهتر عمل نموده است (شکل ۷).

شوری به دلیل وجود اثر آنتاگونیسم میان پتاسیم و سدیم، نسبت پتاسیم به سدیم کاهش می‌یابد اما این نسبت در تیمارهای میکوریزایی مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد (شکل ۷). قارچ‌های میکوریزا با کاهش جذب سدیم و کلر و با انتقال کم‌تر آن‌ها به اندام هوایی همانند یک بهبوددهنده زیستی در

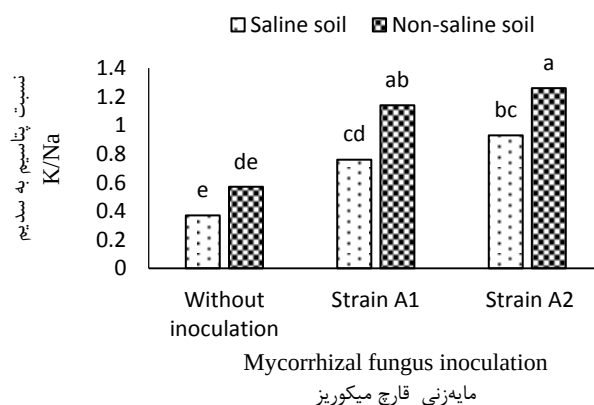


شکل ۶- اثرات متقابل شوری با قارچ میکوریزا بر غلظت پتاسیم (الف) و سدیم (ب) اندام هوایی.

هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 6. Interaction effects of salinity with mycorrhizal fungi on the amount of Potassium (A) and Sodium (B) concentration in the Shoot.

Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.



شکل ۷- اثرات متقابل شوری با قارچ میکوریزا بر نسبت پتاسیم به سدیم.

هیستوگرام‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ آزمون دانکن می‌باشند.

Figure 7. Interaction effects of salinity with mycorrhizal fungi on the potassium to sodium ratio. Histograms with at least one common letter have no significant difference at the 5% level of Duncan's test.

نشان‌دهنده این می‌باشد که با این‌که هر دو سویه از یک گونه می‌باشند، ولی با توجه به شرایط محیطی که در اطراف آن‌ها وجود داشته تغییرات و سازگاری داشته‌اند. این پژوهش می‌تواند به کشاورزان و محققان کمک کند تا از مزایای قارچ‌های میکوریزا برای بهبود شرایط خاک و کاهش تأثیرات منفی شوری بر روی گیاهان آگاه شوند. هم‌چنین، انتخاب سویه‌های مناسب قارچ میکوریزا می‌تواند تأثیر زیادی بر روی عملکرد گیاهان در شرایط تنش‌زا داشته باشد. استفاده از مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا در کشاورزی به‌ویژه در مناطق با تنش شوری می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر مدنظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

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

نتیجه‌گیری کلی

از خاک شنی با مقدار کم ماده آلی استفاده شده است. به‌دلیل این‌که نوع خاک‌ها معمولاً کم‌بازده هستند، زیرا ماده آلی کم، ظرفیت تبادل کاتیونی و نگهداشت آب در آن‌ها وجود دارد. نتایج شوری و مایه‌زنی با قارچ میکوریزا بر روی گیاه ذرت نشان داد که تنش شوری سبب کاهش تنفس خاک، کربن زیتوده میکروبی، فسفر اولسن، کلروفیل برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، غلظت فسفر و عناصر کم‌مصرف و افزایش پرولین گیاه شد. در تیمارهای مایه‌زنی با قارچ میکوریزا اکثر ویژگی‌های گیاه به‌طور معنی‌داری بهبود یافت. کاهش پرولین در تیمارهای مایه‌زنی شده با قارچ نشان‌دهنده تنش کم‌تر در این تیمارها می‌باشد. مایه‌زنی با قارچ میکوریزا در بهبود شرایط خاک و گیاه کاملاً کارآمد بوده و سویه A2 که از خاک شور جدا شده بود در بیش‌تر موارد به‌ویژه در تنش شوری، بهتر از سویه A1 عمل نمود که

منابع

- Shahzad, H., Ullah, S., Iqbal, M., Bilal, H. M., Shah, G. M., Ahmad, S., Zakir, A., Ditta, A., Farooqi, M. A., & Ahmad, I. (2024). Salinity types and level-based effects on the growth, physiology and nutrient contents of maize (*Zea mays*). *Turk Tarim ve Ormancilik Dergisi/ Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 48(3), 332-343. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3185>.
- Khan, M. I. R., & Farooq, M. (2020). Salinity stress in plants: A review on mechanisms of tolerance and physiological adaptations. *Plants*, 9(11), 1574. <https://doi.org/10.3390/plants9111574>.
- Sade, N., Yaish, M. W., & Kafkafi, U. (2020). The role of mycorrhizal fungi in alleviating salinity stress in plants: A review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 170. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00170>.
- Shahbaz, M., & Ashraf, M. (2020). Salinity stress in plants: Causes, effects, and remedies. *Environmental and Experimental Botany*, 178, 104159. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104159>.
- Zhang, H., Wang, Y., & Liu, C. (2021). Salinity affects chlorophyll content and photosynthetic performance in maize. *Journal of Plant Physiology*, 258, 153358. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153358>.
- Wang, Y., Ma, Y., & Zhang, Y. (2022). The role of proline in plant responses to salinity stress: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 175, 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.03.012>.
- Kumar, V., & Singh, S. (2023). Mycorrhizae and their role in alleviating salt stress in plants: Current status and

- future perspectives. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 123-137. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00745-8>.
8. Raza, A., & Khan, M. I. R. (2022). The impact of salinity on the physiological traits of crops: A review. *Agricultural Sciences*, 13(4), 451-469. <https://doi.org/10.4236/as.2022.134031>.
9. Shi, A. D., Li, Q., Huang, J. G., & Yuan, L. (2013). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition and chlorogenic acid content of *Lonicera confusa* seedlings under field conditions. *Pedosphere*, 23(3), 333-339. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60024-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60024-3).
10. Zhao, D., Wu, C., Wang, Y., Zhang, X., & Liu, L. (2015). Effects of salinity on chloroplast structure and function. *Plant Cell Reports*, 34(11), 1951-1960. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1858-9>.
11. Ashraf, M., & Harris, P. J. C. (2004). Abiotic stress tolerance in plants: An overview. *Biotechnology Advances*, 22(1-2), 1-32. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.001>.
12. Bates, G. W., Baird, L. M., & Barlow, P. (2006). The role of osmotic adjustment in salinity stress. *Plant Stress*, 1(1), 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.plnst.2006.06.001>.
13. Sah, S. K., Joshi, S. K., & Mishra, P. (2016). Lipid peroxidation and membrane stability in response to salinity. *Journal of Plant Physiology*, 197, 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.01.014>.
14. Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press.
15. Yang, Y., He, J., Zhang, Y., & Wang, S. (2016). Proline accumulation and its role in salinity stress in plants. *Plant Growth Regulation*, 78, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0075-5>.
16. Zhang, Z., Zhu, Y., Zhang, X., Li, J., & Wang, M. (2018). The role of soluble sugars in stress tolerance. *Plant Cell Reports*, 37(4), 565-573. <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2248-5>.
17. Aminifard, M. H., Zare, M., & Hoshmand, S. (2016). The effect of mycorrhizal fungi on chlorophyll content in plants under salinity stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16, 557-558. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162016005000006>.
18. Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, W., Wang, Y., & Zhang, J. (2020). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and nutrient uptake under saline conditions. *Agriculture*, 10(3), 62. <https://doi.org/10.3390/agriculture10030062>.
19. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (pp. 475-491). Soil Science Society of America.
20. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
21. Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *U.S. Department of Agriculture Circular*, 939, 1-19.
22. Kjeldahl, J. A. (1883). Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Zeitschrift für analytische Chemie*, 22(1), 366-382. <https://doi.org/10.1007/BF01338151>.
23. Daniel, G. E. (Ed.). (2018). *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America.
24. Gerwing, J., & Gelderman, R. (2019). Fertilizer recommendation guide (Annual Report EC750). U.S. Department of Agriculture, South Dakota State University.
25. Bhattarai, B. D. B. H. (2019). Nutrient management for sustainable agriculture: A global perspective. *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94794-5>.

26. Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 84(3), 489-500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>.
27. Sivakumar, N. (2012). Effect of edaphic factors and seasonal variation on spore density and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in sugarcane fields. *Annals of Microbiology*, 63(1), 151-160. <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0455-2>.
28. Chapman, H. D., & Pratt, D. F. (1961). *Methods of analysis for soil, plant, and water*. University of California Division of Agricultural Sciences.
29. Bates, L. S., Waldren, R. P. & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>.
30. Hasegawa, P. M., Bressan, R. A., Zhu, J. K., & Bohnert, H. J. (2000). Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51(1), 463-499. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.51.1.463>.
31. Zhang, H., & Yang, Y. (2020). Role of mycorrhizal fungi in alleviating salt stress in plants: A review. *Biology*, 9(8), 178. <https://doi.org/10.3390/biology9080178>.
32. Munns, R., & Gilliham, M. (2015). Salinity tolerance of plants: An overview of the mechanisms and strategies. *Plant Physiology*, 167(1), 1-12. <https://doi.org/10.1104/pp.114.249853>.
33. Shabala, S., & Mackay, A. (2019). Plant stress signaling: Salinity stress. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 20(9), 563-578. <https://doi.org/10.1038/s41580-019-0160-8>.
34. Kumar, S. (2012). Assay guided comparison for enzymatic and non-enzymatic antioxidant activities with special reference to medicinal plants. *Antioxidant Enzyme*, 14, 382-400. <https://doi.org/10.5772/5078252>.
35. Björn, L. O., Papageorgiou, G. C., Blankenship, R. E., & Govindjee. (2009). A viewpoint: Why chlorophyll a? *Photosynthesis Research*, 99(2), 85-98. <https://doi.org/10.1007/s11120-008-9395-x>.
36. Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3-42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>.
37. Tang, M., Chen, H., Huang, J. C., & Tian, Z. Q. (2009). Arbuscular mycorrhiza fungi effects on the growth and physiology of *Zea mays* L. seedlings under diesel stress. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 936-940. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.005>.
38. Nakhzari Moghadam, A., SamSami, N., Rahimi Karizaki, A., & Gholi Nejad, I. (2020). The effect of drought stress on the physiological traits and seed yield of soybean influenced by inoculation and non-inoculation with mycorrhizal fungi and Rhizobium bacteria. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 13(2), 413-423. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.2131.1531>. [In Persian]
39. McDonald, A. J., & Baird, J. (2017). The impact of fungicides on soil health and crop production. *Agriculture*, 7(3), 27.
40. Amanifar, S., Aliasgharzad, N., Najafi, N., Esteki, M., Oustan, S. H., & Bolandnazar, S. (2019). Evaluation of the effects of mycorrhizal inoculation on lead (Pb) uptake and growth of alfalfa in Pb-contaminated soil. *Iran Agricultural Research*, 38(1), 75-86. <https://doi.org/10.22099/iar.2019.5318>.
41. Bilalis, D., Karkanis, A., Angelopoulou, F., Travlos, I., Antoniadis, A., Ntatsi, G., Lazaridi, E., & Savvas, D. (2015). Effect of organic and mineral fertilization on root growth and mycorrhizal colonization of pea crops (*Pisum sativum* L.). *Bulletin UASVM Horticulture*, 72(2), 288-294. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:11497>.

42. Hosseinzadeh, M. H., Ghalavand, A., Mashhadi Akbar Boojari, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2020). Effect of deficit irrigation, mycorrhiza and nitrogen nutrition system on some chemical properties of soil, oil content and biological yield of purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 51(2), 29-48. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2019.267828.654535>.
43. Khamadi, F., Mesgarbashi, M., Hasibi, P., Farzaneh, M., & Enayatizmir, N. (2015). Influence of crop residue and nitrogen levels on nutrient content in grain wheat. *Applied Field Crops Research*, 28(4), 158-166. <https://doi.org/10.22092/aj.2016.106753>.
44. Fitter, A. H., Helgason, T., & Hodge, A. (2011). Nutritional exchanges in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: Implications for sustainable agriculture. *Fungal Biology Reviews*, 25(1), 68-72. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2011.01.002>.
45. Marizadeh, A., Bolandnazar, S., Hajilou, J., & Lotfollahy, A. (2021). The effect of commercial rootstocks and inoculation with two species of mycorrhizal fungi on some element uptake and qualitative traits of greenhouse cucumber. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 31(1), 145-161. <https://doi.org/10.22034/saps.2021.12793>. [In Persian]
46. Oraei, M., Tabatabaei, S. J., Fallahi, E., & Imani, A. (2009). The effects of salinity stress and rootstock on the growth, photosynthetic rate, nutrient and sodium concentrations of almond. *Journal of Horticulture Science and Biotechnology*, 23, 131-140. <https://doi.org/10.22067/jhorts4.v1388i2.2596>. [In Persian]
47. Seleiman, M. F., Aslam, M. T., Alhammad, B. A., Hassan, M. U., Maqbool, R., Chattha, M. U., Khan, I., Gitari, H. I., Uslu, O. S., Roy, R., & Battaglia, M. L. (2022). Salinity stress in wheat: Effects, mechanisms and management strategies. *Phyton*, 91(2), 1-14. <https://doi.org/10.32604/phyton.2022.017365>.
48. Basyal, B. (2024). Plant-arbuscular mycorrhizal fungi association under drought stress. Chapter in: *Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Sustainable Agriculture: Nutrient and Crop Management* (pp. 211-221). https://doi.org/10.1007/978-981-97-0300-5_10.
49. Khalilpour, M., Mozafari, V., & Abbaszadeh-Dahaji, P. (2021). Tolerance to salinity and drought stresses in pistachio (*Pistacia vera* L.) seedlings inoculated with indigenous stress-tolerant PGPR isolates. *Scientia Horticulturae*, 276, 110440. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110440>.
50. Sayyad-Amin, P., Borzouei, A., & Jahansooz, M. R. (2015). Biochemical responses of sorghum cultivars under salinity at vegetative and reproductive stages. *Indian Journal of Plant Physiology*, 20(4), 324-332. <https://doi.org/10.1007/s40502-015-0180-5>.
51. Shavalikohshori, O., Zalaghi, R., Sorkheh, K., & Enayatizmir, N. (2020). The effect of the application of *Pseudomonas* bacteria on wheat growth and some biological characteristics of a soil affected by salinity and cadmium concentrations. *Soil Biology*, 8(2), 209-221. <https://doi.org/10.1007/s00248-007-9239-9>. [In Persian]
52. Giri, B., Kapoor, R., & Mukerji, K. G. (2007). Improved tolerance of *Acacia nilotica* to salt stress by arbuscular mycorrhiza, *Glomus fasciculatum*, may be partly related to elevated K/Na ratios in root and shoot tissues. *Microbial Ecology*, 54(4), 753-760. <https://doi.org/10.1007/s00248-007-9239-9>.
53. Jafari, S., Chorom, M., Enayatizmir, N., & Motamedi, H. (2013). Evaluating the effects of *Bacillus subtilis* and *Corynebacterium glutamicum* on soil microbial indexes at different levels of salinity. *Agricultural Engineering*, 35(2), 55-70. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.25651>. [In Persian]