University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research
Vol. 14, No. 2, Summer 2024 (197-212)
doi: 10.22124/CR.2024.27578.1823
pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115

RESEARCH PAPER OPEN ACCESS

Evaluating *Funneliformis mosseae* symbiosis with barley cultivars under salinity stress conditions

Roghaie Azimkhani[1], Reza Fotovat[2], Ehsan Mohsenifard[3*], Nasser Aliasgharzad[4] and Maryam Nadimi[5]

1. Ph.D. Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
2. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
3. Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran (* Corresponding author: mohsenifard.ehsan@znu.ac.ir)
4. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
5. Researcher, Institute de Recherche en Biologie Ve´ge´tale, De´partement de Sciences Biologiques, Universite´ de Montre´al, Montre´al, Canada.

Comprehensive abstract

Introduction

Symbiosis with arbuscular mycorrhizal (AM) fungi often increases the tolerance of host plants against various stresses. Among abiotic stresses, salinity causes considerable loss in crop productivity. Comprehensive study of plant genotypes response to symbiosis with AM fungi and potential role of this relationship in improving the adverse effects of salinity and increasing plant tolerance would be effective in increasing crop yield. The present study aimed to investigate response of commercial barley varieties to mycorrhizal colonization under salinity stress.

Materials and methods

In this experiment, six commercial barley varieties including Khatam, Golshan, Afzal, Aras, Makoui and Dasht were evaluated at two salinity levels of NaCl (0 and 150 mM) and two symbiosis levels including inoculated and non-inoculated with *Funneliformis mosseae*. A factorial design in a randomized complete block design with three replications was conducted under greenhouse conditions in Zanjan University, Zanjan, Iran. Five weeks after cultivation, barley plants were harvested and the traits related to fungal structures including total colonization rate, and the frequency of hyphae, arbuscule and vesicle were measured. Also, some physiological traits including shoot fresh weight, leaf relative water content (RWC), shoot Na^+ concentration, shoot K^+ concentration, and Na^+/K^+ ratio were measured.

Research findings

The results of this experiment showed that there was a significant variation between barley varieties in terms of colonization rate and hyphae, arbuscule and vesicle frequencies of AM fungus. Also, salinity stress reduced the colonization rate, and hyphae and arbuscule frequencies of the fungus, but increased the vesicle frequency, which this reduction was more considerable in salt-tolerant varieties, Khatam and Afzal, especially in Afzal. The increase in vesicle frequency was also significant only in Makoui, Aras and Dasht varieties. The results showed that salinity stress reduced shoot fresh weight and leaf relative water content, and increased Na^+ concentration and Na^+/K^+ ratio in all barley varieties, but these changes in Makoui, Aras and Dasht varieties especially in Aras were more than other varieties. On the other

hand, colonized plants exhibit lower shoot fresh weight and leaf RWC compared to non-colonized ones. However, symbiosis enhanced leaf RWC in Khatam and Golshan varieties under non-stress conditions.

Conclusion

The results of this study showed that there was a significant difference between barley commercial varieties in terms of response to symbiosis with mycorrhizal fungus and response to salinity stress. Although the reduction of colonization rate may help barley plants to prevent the consumption of carbohydrate resources, the expected results of symbiosis in terms of improving barley plant growth or reducing the adverse effects of salinity stress on the plant was not observed in the present study. This indicates the complexity of the symbiotic relationship between plant and fungus, and environmental conditions especially stress conditions can increase this complexity.

Keywords: Colonization rate, Na^+/K^+ ratio, Relative water content, Shoot fresh weight

Received: April 27, 2024 Accepted: June 25, 2024

Cite this article:

Azimkhani, R., Fotovat, R., Mohsenifard, E., Aliasgharzad, N., & Nadimi, M. (2024). Evaluating *Funneliformis mosseae* symbiosis with barley cultivars under salinity stress conditions. *Cereal Research*, *14*(2), 197-212. doi: 10.22124/CR.2024.27578.1823.

تحقیقات غلات
دوره چهاردهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳ (۲۱۲-۱۹۷)
doi: 10.22124/CR.2024.27578.1823

مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد

ارزیابی قابلیت همزیستی قارچ *Funneliformis mosseae* با رقم‌های زراعی جو تحت شرایط تنش شوری

رقیه عظیم‌خانی[۱]، رضا فتوت[۲]، احسان محسنی‌فرد[۳*]، ناصر علی‌اصغرزاد[۴] و مریم ندیمی[۵]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران (* نویسنده مسئول: mohsenifard.ehsan@znu.ac.ir)
۴- استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۵- محقق، مرکز تحقیقات زیست شناسی گیاهی، گروه علوم زیستی، دانشگاه مونترال، مونترال، کانادا

چکیده جامع

مقدمه: همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار (Arbuscular mycorrhizal Fungi) اغلب سبب افزایش تحمل گیاهان در مقابله با تنش‌های مختلف می‌شود. در بین تنش‌های غیرزنده، شوری سبب کاهش قابل توجه در میزان تولید محصول می‌شود. مطالعه واکنش ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان به همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار و پتانسیل استفاده از این رابطه در بهبود تأثیرات نامطلوب شوری و افزایش تحمل گیاهان، در افزایش عملکرد گیاهی مفید خواهد بود. مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر قارچ میکوریز آربسکولار بر پاسخ چند رقم تجاری جو تحت شرایط تنش شوری صورت گرفت.

مواد و روش‌ها: در این آزمایش، شش رقم تجاری جو شامل خاتم، گلشن، افضل، ماکویی، ارس و دشت در دو سطح شوری NaCl شامل صفر و ۱۵۰ میلی‌مولار و دو سطح همزیستی شامل تلقیح و عدم تلقیح با *Funneliformis mosseae* مورد بررسی قرارگرفت. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان اجرا شد. پنج هفته پس از کشت، گیاهان برداشت شده و صفات مرتبط با ساختارهای قارچ میکوریز شامل میزان کلونیزاسیون کل و فراوانی هیف، آربسکول و وزیکول قارچ اندازه‌گیری شدند. همچنین، برخی از صفات فیزیولوژیک رقم‌های جو شامل وزن تر اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ، غلظت Na^+، غلظت K^+ و نسبت Na^+/K^+ اندام هوایی مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌های تحقیق: نتایج این آزمایش نشان داد که بین رقم‌های جو از نظر میزان کلونیزاسیون و فراوانی هیف، آربسکول و وزیکول قارچ تنوع معنی‌داری وجود داشت. از طرف دیگر تنش شوری، میزان کلونیزاسیون و فراوانی هیف و آربکسول قارچ را کاهش داد، اما فراوانی وزیکول قارچ افزایش یافت، که میزان کاهش در رقم‌های متحمل خاتم و افضل و به‌ویژه در رقم افضل، قابل توجه بود. افزایش فراوانی وزیکول نیز فقط در رقم‌های ماکویی، ارس و دشت معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که تحت تاثیر تنش شوری، وزن تر اندام هوایی و محتوای نسبی آب برگ، کاهش و غلظت Na^+ و نسبت Na^+/K^+ اندام هوایی در تمامی رقم‌های جو افزایش یافت، اما میزان تغییرات این صفات در رقم‌های ماکویی، ارس و دشت و به‌ویژه در رقم ارس بیش‌تر از سایر

رقم‌ها بود. علاوه بر این، وزن تر و محتوای نسبی آب برگ در گیاهان کلونیزه شده با قارچ میکوریز کم‌تر از گیاهان کلونیزه نشده بود، با این‌حال، همزیستی قارچ سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ رقم‌های خاتم و گلشن در شرایط بدون تنش شوری شد.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین رقم‌های تجاری جو از لحاظ پاسخ به همزیستی با قارچ میکوریز و واکنش به تنش شوری وجود داشت. با آنکه کاهش کلونیزاسیون ممکن است به گیاه در جلوگیری از مصرف منابع کربوهیدرات کمک کند، اما در مطالعه حاضر، نتیجه مورد انتظار از همزیستی از نظر بهبود رشد گیاه جو و یا تعدیل آثار نامطلوب شوری بر گیاه مشاهده نشد. این امر نشان‌دهنده پیچیدگی رابطه همزیستی بین گیاه و قارچ است و شرایط محیطی و به‌ویژه شرایط تنش می‌تواند این پیچیدگی را بیش‌تر کند.

واژه‌های کلیدی: فراوانی کلونیزاسیون، محتوای نسبی آب برگ، نسبت Na^+/K^+، وزن تر اندام هوایی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵

نحوه استناد به این مقاله:

عظیم‌خانی، رقیه، فتوت، رضا، محسنی‌فرد، احسان، علی‌اصغرزاد، ناصر، و ندیمی، مریم. (۱۴۰۳). ارزیابی قابلیت همزیستی قارچ *Funneliformis mosseae* با ارقام زراعی جو تحت شرایط تنش شوری. *تحقیقات غلات*، ۱۴(۲)، ۲۱۲-۱۹۷.
doi: 10.22124/CR.2024.27578.1823

مقدمه

قارچ‌های میکوریز آربسکولار (Arbuscular mycorrhizal Fungi) که همزیست‌های اجباری گیاهان هستند، با اغلب گیاهان رابطه همزیستی برقرار کرده و با جذب بهتر آب و موادغذایی، اغلب سبب بهبود رشد و تولید محصول بیش‌تر گیاه می‌شوند. رابطه متقابل بین گیاه و قارچ میکوریز آربسکولار می‌تواند تأثیر تنش‌های زنده و غیرزنده را تعدیل کند و تحمل گیاهان برای تحمل تأثیرات نامطلوب شوری را افزایش دهد (Evelin *et al*., 2009; Ganugi *et al*., 2019).

شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و تولید گیاهان است که با شدت گرفتن تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی تبدیل شده است. با بالا رفتن غلظت نمک‌ها، پتانسیل آب خاک کاهش می‌یابد و در نتیجه توانایی گیاهان برای جذب آب و مواد معدنی کم‌تر می‌شود. از طرف دیگر، با وارد شدن مقدار بیش‌تری از یون‌های سمی، تعادل یونی و اسمزی سلول گیاه به‌هم می‌خورد. تجمع یون سدیم (Na^+)، نسبت Na^+/K^+ سلول را تغییر داده و در دسترس بودن یون‌های پتاسیم برای فعالیت آنزیم‌های مختلف، تنظیم فشار اسمزی و بسته شدن روزنه‌ها را کاهش می‌دهد (Munns & Gilliham, 2015). همچنین، در نتیجه به‌هم خوردن تعادل یونی، سرعت فتوسنتز کاهش می‌یابد و با ایجاد اختلال در فتوسنتز گیاه، تولید گونه‌های اکسیژن فعال‌شده (Reactivated Oxygen Species) القا می‌شود. با تجمع این مولکول‌ها، شوری بخش دوم آسیب خود به گیاه یعنی تنش اکسیداتیو را وارد خواهد کرد (Singh *et al*., 2021).

مکانیسم‌های مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان مختلف توسعه یافته‌اند که تحمل به سطوح بالای یون‌های سدیم در سطح بافت و سلول را برای آن‌ها امکان‌پذیر می‌کند (Munns & Gilliham, 2015). یکی از مهم‌ترین این مکانیسم‌ها تغییر در تعادل یونی و تنظیم جذب و انتقال Na^+ در داخل گیاه است. جذب انتخابی K^+ در مقابل Na^+ به‌عنوان یک مکانیسم فیزیولوژیک مهم افزایش تحمل به شوری در بسیاری از گونه‌های گیاهی مورد توجه قرار گرفته است. گیاهان با روش‌هایی مانند محدود کردن جذب Na^+، کنترل انتقال Na^+ در فاصله‌های طولانی داخل گیاه، تجمع یون‌های سمی درون واکوئل‌ها و تلاش برای حفظ نسبت K^+/Na^+ در سیتوزول، اثرات سمی یون Na^+ را کاهش می‌دهند (Zeeshan *et al*., 2020). مطالعه و شناسایی مکانیسم‌های تحمل به شوری در گیاهان مختلف برای استفاده از آن‌ها در اصلاح برای تحمل به شوری و معرفی رقم‌های متحمل ضروری است.

جو (*Hordeum vulgare*) یک گیاه زراعی مهم با پتانسیل سازگاری بالا در نواحی مختلف جهان و یکی از مهم‌ترین گیاهان اقتصادی است که در نواحی با خاک‌های شور یا قلیا کشت می‌شود. با آنکه جو متحمل‌ترین گیاه غله نسبت به تنش شوری است، اما رشد و عملکرد آن مانند هر گیاه دیگری در اثر تنش شوری کاهش می‌یابد. بین ارقام مختلف جو از لحاظ میزان تحمل شوری تنوع وجود دارد (Ahmed *et al*., 2013). واریته‌های متحمل شوری جو در مقایسه با واریته‌های غیرمتحمل، Na^+ کم‌تری در بافت‌های هوایی خود دارند (Ahmed *et al*., 2013; Zeeshan *et al*., 2020)؛ علاوه بر این، تنظیم پتانسیل اسمزی، تنظیم محتوای نسبی آب برگ (Keshavarz *et al*., 2022) و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (Nefissi Ouertani *et al*., 2021) از دیگر مکانیسم‌هایی است که تأثیر معنی‌دار آن‌ها بر تحمل به شوری ارقام جو تأیید شده است. همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار می‌تواند از طریق تقویت این مکانیسم‌ها تحمل شوری گیاهان را بهبود بخشد (Evelin *et al*., 2009; Porcel *et al*., 2016). قارچ میکوریز آربسکولار از طریق مکانیسم‌های مختلف مانند بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه، کاهش نسبت Na^+/K^+ برگ‌ها، تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با سم‌زدایی سلولی و تقویت رشد ریشه‌ها، می‌تواند تحمل جو نسبت به تنش شوری را افزایش دهد (Khalvati *et al*., 2010; Masrahi *et al*., 2023).

مطالعه حاضر به‌منظور بررسی تفاوت بین شش رقم تجاری جو از لحاظ پاسخ به همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار، تحمل شوری و رابطه احتمالی بین توسعه ساختارهای قارچ و تحمل به شوری رقم‌ها صورت گرفت. همچنین تأثیر تنش شوری بر برخی صفات فیزیولوژیک در حضور همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار ارزیابی شد. با توجه به اینکه تا کنون اطلاعات کاملی در مورد تحمل به شوری در برخی از این رقم‌ها گزارش نشده است، مطالعه حاضر می‌تواند در ترسیم تصویر کلی از تحمل به شوری این رقم‌ها و تأثیر همزیستی قارچ میکوریز آربوسکولار بر آن‌ها سودمند باشد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر به‌صورت آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان اجرا شد که در آن سه عامل همزیستی (شامل تلقیح و یا عدم تلقیح با قارچ میکوریز آربسکولار *Funneliformis mosseae*)، شوری (شامل نمک NaCl با غلظت صفر و ۱۵۰ میلی‌مولار) و ژنوتیپ (شامل رقم‌های تجاری افضل، گلشن، خاتم، ارس، ماکویی و دشت) مورد بررسی قرار گرفت. رقم‌های افضل، گلشن و خاتم به‌عنوان رقم‌های متحمل به شوری در مطالعات مختلف معرفی شده‌اند (Tavakoli *et al*., 2010; Barati *et al*., 2021; Sahafi *et al*., 2021)، اما برای سه رقم ارس، ماکویی و دشت، منابع کافی تا زمان اجرای این آزمایش در مورد تحمل به شوری این رقم‌ها پیدا نشد.

مایه تلقیح قارچ میکوریز اولیه از مرکز تحقیقات خاک و آب کشور تهیه و روی گیاه سورگوم تکثیر شد. بذر مورد نیاز رقم‌های تجاری جو از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. بذرها با هیپوکلریت سدیم یک درصد ضدعفونی و در دمای $25^{\circ}C$ در تاریکی جوانه‌دار شدند. قبل از کاشت بذرها، هر گلدان پلاستیکی با ۲/۵ کیلوگرم مخلوط خاک مزرعه و ماسه دوبار استریل به نسبت (v/v) ۲:۱ پر شده و سپس پنج عدد بذر جوانه‌دار در هر گلدان کشت شد. برای تلقیح با قارچ میکوریز آربسکولار، هنگام کشت ۴۰ گرم مایه تلقیح به هر یک از گلدان‌های دارای تیمار همزیستی افزوده شد، اما برای گلدان‌های بدون تلقیح، همین مقدار مایه تلقیح دوبار استریل اضافه شد. در ضمن، به هر گلدان بدون قارچ میکوریز آربسکولار، حدود ۲۵۰ میلی‌لیتر عصاره خاک تهیه شده از مایه تلقیح که دو بار با استفاده از کاغذ صافی با منافذ ۲۰ میکرومتر (Schliecher & Schuel, Germany) صاف شده بود، افزوده شد تا یکنواختی جمعیت میکروبی خاک بین گلدان‌های بدون تیمار و دارای تیمار قارچ حفظ شود. پس از گذشت حدود هفت روز از کشت گیاهان، با مشاهده هیف قارچ در نمونه‌های ریشه جو در زیر میکروسکوپ، برقراری همزیستی تأیید شد. گیاهان در گلخانه در دمای $25^{\circ}C$ /$22^{\circ}C$ (روز / شب) و رطوبت ۶۰٪ رشد کردند. تنش شوری در مرحله چهار برگی با افزودن آب شهری تصفیه شده و استریل حاوی NaCl به گلدان‌های دارای تیمار شوری اعمال شد، اما برای گلدان‌های بدون تیمار شوری، آب شهری تصفیه شده استریل بدون NaCl اضافه شد. برای جلوگیری از شوک اسمزی، آبیاری گلدان‌های دارای تیمار شوری ابتدا با غلظت ۲۵ میلی‌مولار NaCl انجام و طی چند روز این غلظت به غلظت نهایی ۱۵۰ میلی‌مولار رسانده شد. در طول آزمایش، گلدان‌ها در وضعیت رطوبتی ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه (Field capacity) نگهداری شدند. بر این اساس و همچنین تفاوت هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity) زه‌آب هر گلدان و شوری آب آبیاری، مقدار آب برای هر گلدان محاسبه و افزوده شد. شوری محلول‌ها با استفاده از EC متر (Trans instruments، مدل BC3020) اندازه‌گیری شد.

برداشت گیاهان پنج هفته پس از زمان کشت انجام شد. قبل از برداشت، آخرین برگ توسعه‌یافته گیاه جدا و برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ (RWC) روی بسته‌های یخ به آزمایشگاه منتقل شد. محتوای نسبی آب برگ با استفاده از وزن تر (FW)، وزن خشک (DW) و وزن تورژسانس (TW) قطعات برگی، بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد:

$$RWC = \frac{TW-DW}{FW-TW} \qquad (۱)$$

غلظت یون‌های Na^{+} و K^{+} اندام‌های هوایی گیاهان برداشت شده با استفاده از فلیم‌فتومتر (JENWAY مدل PFP7) اندازه‌گیری شد. همچنین برای مشاهده قارچ، مقدار یک گرم نمونه ریشه از هر گلدان برداشت و با استفاده از تریپن‌بلو (Trypan blue) و روش فیلیپس و هیمن (Phillips & Hayman, 1970) رنگ‌آمیزی شد. ساختارهای قارچ با استفاده از میکروسکوپ (Gallen III; Leica) مشاهده و درصد کلونیزاسیون کل و ساختارهای قارچ (هیف، آربسکول و وزیکول) با استفاده از روش تقاطع خطوط شبکه (Gridline intersect) تعیین شد (Giovannetti & Mosse, 1980).

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. قبل از تجزیه داده‌ها، نرمال بودن خطاها بررسی و در صورت نیاز تبدیل داده‌ها انجام شد. مقایسه میانگین تیمارها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

کلونیزاسیون ارقام تجاری جو

رقم‌های تجاری جو به‌طور موفقیت‌آمیزی با قارچ *Funneliformis mosseae* کلونیزه شدند. در مقابل، در

گلدان‌های بدون تیمار همزیستی، ساختار قارچی مشاهده نشد (شکل ۱). نتایج تجزیه واریانس صفات مربوط به قارچ میکوریز در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که تجزیه واریانس ابتدا بر اساس طرح اجرا شده، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد، اما به‌دلیل معنی‌دار نشدن تفاوت بین بلوک‌ها برای هیچ‌یک از صفات، تجزیه آماری در نهایت بر اساس طرح پایه کاملاً تصادفی صورت گرفت. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تمام صفات مربوط به قارچ میکوریزا تحت تأثیر ژنوتیپ (رقم جو)، شوری و برهمکنش بین این دو قرار گرفتند (جدول ۱). به‌طور کلی، شوری سبب کاهش معنی‌دار درصد کلونیزاسیون کل، هیف و آربسکول قارچ به‌ترتیب به‌میزان ۲۶، ۲۵ و ۴۹ درصد و نیز افزایش معنی‌دار فراوانی وزیکول به‌میزان ۲۳ درصد شد. نتایج مطالعات قبلی نیز تأثیر تنش‌های مختلف محیطی بر فراوانی کلونیزاسیون و ساختارهای قارچی در گیاهان را گزارش کرده‌اند، به‌طوری‌که سندک و همکاران (Sendek *et al.*, 2019)، کاهش فراوانی کلونیزاسیون و فراوانی ساختارهای قارچی را در اثر تنش خشکی در جو گزارش کرد. گیاه میزبان، کربن آلی مورد نیاز قارچ را تأمین می‌کند و تغییر در شرایط گیاه میزبان، بر همزیستی قارچ تأثیرگذار خواهد بود. به‌نظرمی‌رسد تلاش گیاه برای مقابله با تنش سبب فعال شدن مکانیسم‌هایی مانند کاهش سرعت و میزان انتقال کربوهیدرات‌ها به سیتوپلاسم سلول‌های آربسکول در گیاه می‌شود تا از این طریق میزان رشد قارچ در گیاه و در نتیجه هزینه حفظ رابطه همزیستی برای گیاه کاهش پیدا کند (Salmeron-Santiago *et al.*, 2021).

در شرایط بدون تنش شوری، چهار رقم گلشن، خاتم، افضل و ارس به‌ترتیب بیش‌ترین فراوانی کلونیزاسیون و دو رقم ماکویی و دشت کم‌ترین میانگین فراوانی کلونیزاسیون را داشتند. اما در شرایط تنش شوری، مقدار این صفت به‌ویژه در رقم افضل به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل ۲). روند مشابهی در تغییرات صفت فراوانی هیف با تفاوت اندکی مشاهده شد. در مورد فراوانی آربسکول نیز قبل از تنش شوری، بیش‌ترین میانگین در رقم‌های گلشن، خاتم، افضل و ارس مشاهده شد، اما بر اثر تنش شوری این صفت در رقم‌های افضل، دشت و خاتم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و میزان این کاهش نسبت به کاهش فراوانی هیف و کلونیزاسیون بیش‌تر بود. در مورد فراوانی وزیکول، تفاوت بین رقم‌ها قبل از تنش شوری معنی‌دار بود. افزایش این صفت بر اثر تنش شوری در رقم‌های گلشن، ماکویی و ارس معنی‌دار بود، اما در رقم‌های خاتم، افضل و دشت، تغییر معنی‌داری در اثر شوری مشاهده نشد (شکل ۲).

شکل ۱- ساختارهای قارچ *Funneliformis mosseae* در ریشه ارقام تجاری جو: H، هیف؛ A، آربسکول؛ V، وزیکول.

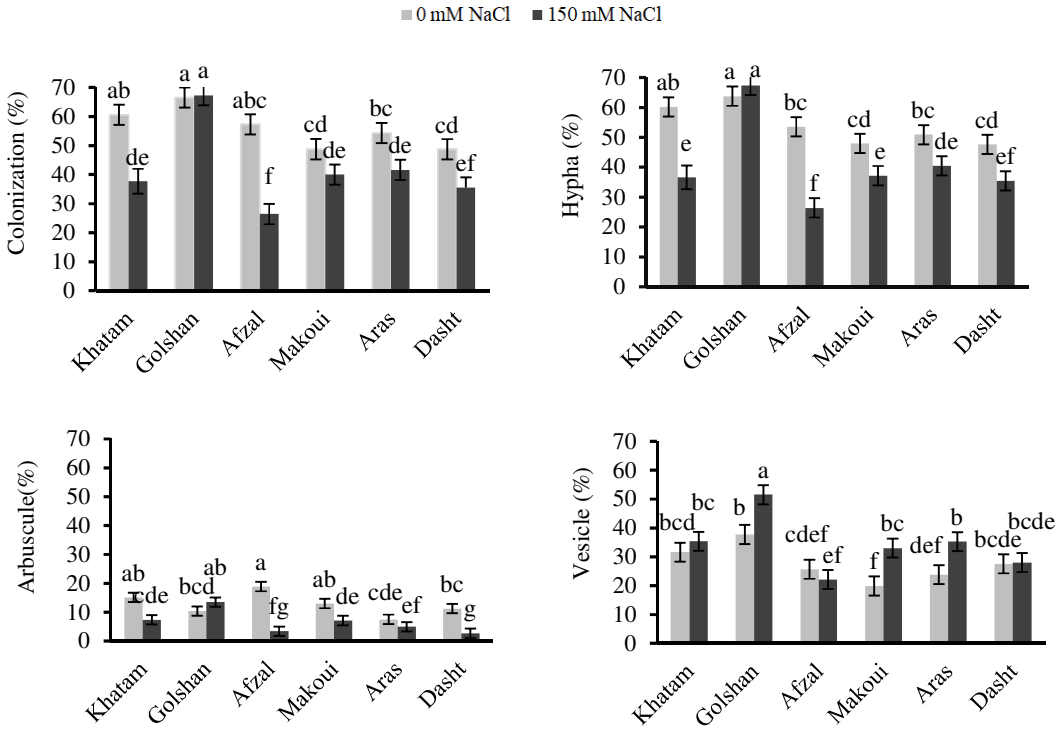
Figure 1. *Funneliformis mosseae* structures in the roots of commercial barley cultivars: H, Hypha; A, Arbuscule; V, Vesicle.

جدول ۱- تجزیه واریانس فراوانی کلونیزاسیون کل و ساختارهای قارچ *Funneliformis mosseae* در ریشه ارقام تجاری جو

Table 1. Analysis of variance for total colonization and fungal structure abundance of *Funneliformis mosseae* in barley cultivars roots

Source of variation	df	Mean square			
		Total colonization	Hypha	Arbuscle	Vesicle
Salinity	1	1843.66 **	1551.43 **	344.75 **	380.57 **
Genotype (Cultivar)	5	529.19 **	534.33 **	34.72 **	329.60 **
Salinity × Genotype	5	178.73 **	172.28 **	58.15 **	80.04 **
Error	24	36.44	31.02	7.91	32.60
CV (%)		12.31	11.71	29.28	18.44

ns and ** Not-significant and significant at 1% probability level, respectively.



شکل ۲- مقایسه میانگین برهمکنش شوری×ژنوتیپ بر فراوانی کلونیزاسیون کل و ساختارهای قارچ در ریشه رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Figure 2. Means comparison of salintity×genotype interaction for colonization rate and fungal structures abundance in studied barley cultivars roots. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.

تأثیر نامطلوب تنش بر فراوانی کلونیزاسیون، علاوه بر شدت تنش به ژنوتیپ گیاه نیز بستگی دارد (Evelin *et al*., 2009). در مطالعات همزیستی واریته‌های تجاری جو با گونه‌های مختلف قارچ میکوریز آربسکولار مقادیر متنوعی برای فراوانی کلونیزاسیون گزارش‌شده است (Grace *et al*., 2009). مطالعه صورت گرفته توسط ال‌موتیری و همکاران (Al Mutairi *et al*., 2020) نشان داد که فراوانی کلونیزاسیون بین رقم‌های مختلف جو تلقیح‌شده با قارچ میکوریز *R. irregularis* متفاوت است. میزان کلونیزاسیون گیاه و همچنین فراوانی اندام‌های قارچی در ریشه گیاه، به ژنوتیپ گیاه، جنس و گونه قارچ، و شرایط محیطی به‌ویژه مقدار فسفر خاک بستگی دارد (Ganugi *et al*., 2019). متوسط کلونیزاسیون در رقم‌های جو در مطالعه حاضر ۴۹٪ بود و در شرایط بدون تنش شوری، فراوانی کلونیزاسیون با فراوانی ساختارهای قارچی هیف و آربسکول متناسب بود. به‌عبارت دیگر، در رقم‌های خاتم، گلشن و افضل که فراوانی کلونیزاسیون بیش‌تر بود، فراوانی بیش‌تری برای هیف و آربسکول نیز مشاهده شد. باید توجه داشت که فراوانی کلونیزاسیون همواره متناسب با فراوانی ساختارهای قارچی نیست. در مطالعه صورت گرفته روی سه گیاه ذرت، گندم و جو، فراوانی وزیکول‌ها در جو و گندم بیش‌تر از سورگوم بود، در حالی‌که تفاوت بین سه گیاه از نظر سطوح کلونیزاسیون و فراوانی ساختارهای قارچی دیگر نظیر هیف و آربسکول معنی‌دار نبود (Sisaphaithong *et al*., 2012). در مطالعه دیگری گزارش شد که تفاوت زیادی از نظر فراوانی کلونیزاسیون کل ریشه جو و همچنین فراوانی وزیکول‌ها بین دو گونه قارچ میکوریز آربسکولار *G. geosporum* و *G. intraradices* وجود داشت، در حالی‌که فراوانی آربسکول چندان متفاوت نبود (Grace *et al*., 2009). تبادل مواد غذایی بین گیاه و قارچ در محل آربسکول‌ها اتفاق می‌افتد و فراوانی بالای این ساختارهای قارچی می‌تواند نشان دهنده نقش فعال قارچ در بهبود دسترسی گیاه به مواد جذب شده توسط قارچ از خاک باشد. از طرف دیگر، افزایش فراوانی این ساختارها سبب مصرف منابع کربن گیاه

می‌شود و بنابراین گیاه همواره میزان فراوانی کلونیزاسیون و همچنین فراوانی آربسکول قارچ را کنترل می‌کند (Vierheilig, 2004). در مقابل، تعداد زیاد وزیکول‌ها که اندام‌های ذخیره‌ای قارچ هستند، نشان می‌دهد که کربن ارسال شده از گیاه میزبان به‌طور مؤثری برای بهبود عملکرد یا توسعه قارچ استفاده نشده است (Sisaphaithong *et al*., 2012). به‌طور کلی، در شرایط تنش، میزان کلونیزاسیون و به‌ویژه فراوانی آربسکول کاهش می‌یابد. تنش سبب کوتاه‌تر شدن دوره عمر آربسکول‌ها و نیز کاهش فراوانی وزیکول‌ها می‌شود، زیرا ساخته شدن این ساختارها نیازمند مصرف مقدار زیادی از منابع انرژی گیاه است (Feng *et al*., 2020). در مطالعه حاضر، میزان کاهش فراوانی کلونیزاسیون، هیف و آربسکول بر اثر تنش شوری در رقم‌های متحمل به‌ویژه افضل قابل توجه و افزایش فراوانی وزیکول در رقم‌های متحمل خاتم و افضل غیرمعنی‌دار بود. بنابراین، می‌توان گفت که اگر همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار برای رقم‌های مطالعه شده جو سودمند نباشد، کاهش بیش‌تر توسعه قارچ به‌عنوان مکانیسمی برای تحمل بهتر تنش شوری توسط رقم‌های متحمل انتخاب می‌شود.

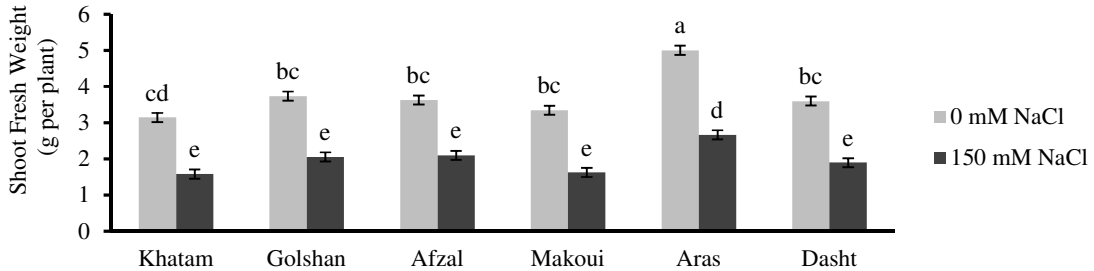
وزن تر اندام هوایی. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات همزیستی، شوری و ژنوتیپ و برهمکنش شوری×ژنوتیپ بر صفت وزن تر اندام‌های هوایی رقم‌های جو معنی‌دار بود. شوری مقدار این صفت را به‌میزان قابل توجه ۴۶/۹۴٪ کاهش داد. در شرایط بدون تنش شوری، دو رقم ارس و خاتم به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین وزن تر را داشتند، اما در اثر تنش شوری، کاهش قابل توجهی در وزن تر رقم ارس مشاهده شد (شکل ۳). از طرفی تأثیر همزیستی بر وزن تر اندام گیاهی سبب شد گیاهان کلونیزه شده با قارچ میکوریز در مقایسه با گیاهان کلونیزه نشده، ۱۷/۳۴٪ وزن تر کم‌تری داشته باشند.

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات فیزیولوژیک مطالعه شده در ریشه رقم‌های تجاری جو

Table 2.Analysis of variance of the studied physiological traits in commercial barley cultivars

Source of variation	df	Mean square				
		Fresh weight	RWC	Na^+ concentration	K^+ concentration	Na^+/K^+ ratio
Replication	2	0.69 **	0.001 ^{ns}	76.92 **	0.27 ^{ns}	0.02 **
Symbiosis (Sym)	1	5.32 **	0.091 ^{ns}	0.37 ^{ns}	19.49 ^{ns}	0.000 ^{ns}
Salinity (Sal)	1	55.58 **	0.29 **	457.42 *	728.43 **	0.15 **
Genotype (Gen)	5	3.25 **	0.01 **	3.30 ^{ns}	408.16 **	0.003 *
Sym × Sal	1	0.05 ^{ns}	0.002 ^{ns}	16.99 **	34.34 ^{ns}	0.004 *
Sym × Gen	5	0.09 ^{ns}	0.003 *	1.52 ^{ns}	312.98 **	0.001 ^{ns}
Sal × Gen	5	0.260*	0.001^{ns}	11.13 **	138.66 ^{ns}	0.002 *
Sym × Sal × Gen	5	0.11	0.003 *	4.41 ^{ns}	85.16 ^{ns}	0.002 ^{ns}
Error	46	0.09	0.001	2.00	54.66	0.001
CV (%)	-	10.70	3.80	22.25	11.60	25.17

^{ns} and * and ** Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۳- مقایسه میانگین برهمکنش شوری×ژنوتیپ بر وزن تر اندام هوایی رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

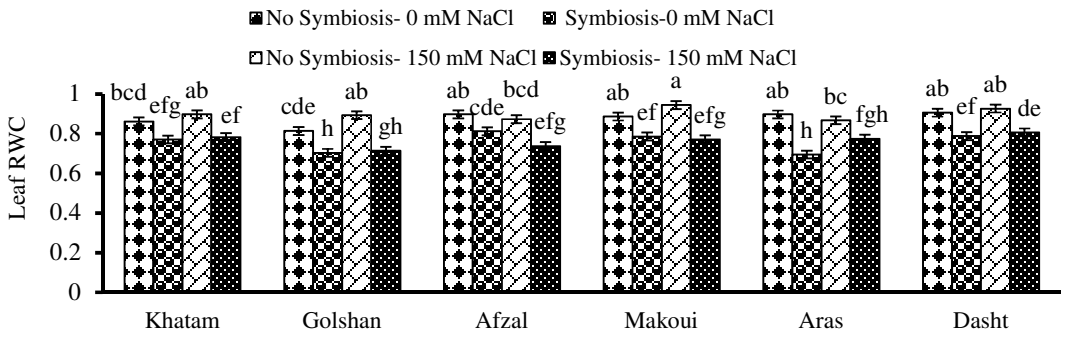
Figure 3. Comparison of means of salintity×genotype interaction for shoot fresh weight in commercial barley cultivars. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.

در بیش‌تر مطالعات انجام شده، تأثیر مثبت همزیستی بر رشد و عملکرد گیاه جو گزارش شده است. محمد و همکاران (Mohammad *et al*., 2003) تأثیر مثبت همزیستی با قارچ میکوریز *Glomus intraradesis* را بر بهبود رشد گیاه جو تحت شرایط تنش شوری گزارش کردند. فغانی و همکاران (Faghani *et al*., 2017) نیز در ارزیابی تأثیر تلقیح با قارچ میکوریز *G. intraradesis* بر رقم‌های جو گزارش کردند که همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار با افزایش جذب عناصر غذایی، عملکرد جو را در شرایط تنش شوری بهبود بخشید. باید توجه داشت که گیاه جو واکنش رشدی متغیری نسبت به همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار از خود نشان می‌دهد. در مطالعه همزیستی دو گونه قارچ میکوریز آربسکولار *G. geosporum* و *G. intraradices* با رقم تجاری جو، کاهش رشد اندام هوایی (وزن خشک اندام هوایی) بر اثر همزیستی مشاهده شد که تفاوت بین گونه‌های قارچ میکوریز آربسکولار از نظر میزان تأثیر منفی قارچ بر رشد گیاه جو معنی‌دار نبود (Grace *et al*., 2009). کاهش وزن تر اندام هوایی جو در همزیستی با مخلوطی از قارچ‌های میکوریز آربسکولار نیز گزارش‌شده است (Sendek *et al*., 2019). باید توجه داشت که کاهش رشد گیاه در نتیجه همزیستی همواره به معنی منفی بودن تأثیر همزیستی بر گیاه نیست. همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار می‌تواند بدون تأثیر مثبت بر رشد گیاه و تولید زیست‌توده (بیوماس)، سبب بهبود کیفیت دانه گیاه جو شود (Watts-Williams & Cavagnaro, 2018). گزارش شده است که همزیستی با قارچ، با وجود کاهش میزان رشد رقم‌های جو، توانست میزان جذب فسفر توسط گیاه میزبان را افزایش دهد (Christophersen *et al*., 2009).

از طرف دیگر، توسعه قارچ در گیاه که در مراحل اولیه توسعه رابطه همزیستی بین قارچ و گیاه اتفاق می‌افتد، نیازمند مصرف منابع انرژی زیادی توسط قارچ است (Salmeron-Santiago *et al*., 2021) و قارچ میکوریز آربسکولار پس از استقرار کامل، می‌تواند تأثیر اصلی خود را بر رشد و عملکرد گیاه نشان دهد. در مطالعه حاضر برداشت گیاهان پنج هفته پس از کاشت صورت گرفت و در نتیجه این امکان وجود دارد که این مدت زمان برای جبران منابع کربن دریافت شده از گیاه توسط قارچ کافی نباشد.

محتوای نسبی آب برگ. تجزیه واریانس صفت محتوای نسبی آب برگ نشان داد که اثرات ساده شوری و ژنوتیپ و برهمکنش همزیستی×ژنوتیپ و همزیستی×شوری×ژنوتیپ معنی‌دار بودند (جدول ۲). تنش شوری در حالت کلی سبب کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ رقم‌های تجاری جو به‌میزان ۱۴٪ شد. در گیاهان تلقیح‌نشده، رقم‌های ارس و افضل به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان کاهش را در محتوای نسبی آب برگ در اثر شوری را نشان دادند، در حالی‌که درگیاهان تلقیح‌شده، بیش‌ترین میزان کاهش این صفت در اثر شوری در رقم‌های گلشن و ماکویی و کم‌ترین میزان آن در رقم افضل دیده شد. همچنین در حالت بدون تنش شوری، افزایش معنی‌داری در محتوای نسبی آب برگ دو رقم متحمل خاتم و گلشن تحت تأثیر همزیستی با قارچ مشاهده شد، اما در رقم‌های دیگر در حضور تنش شوری این تأثیر مثبت مشاهده نشد (شکل ۴). از طرف دیگر، تأثیر همزیستی بر صفت محتوای نسبی آب برگ و نیز بر میزان تغییر این صفت تحت شرایط تنش شوری بین رقم‌های مختلف متفاوت بود. در رقم متحمل افضل، در هر دو شرایط حضور همزیستی و بدون همزیستی، محتوای نسبی آب برگ در شرایط تنش شوری کم‌ترین کاهش را داشت، در حالی‌که این وضعیت در رقم‌های متحمل گلشن و خاتم مشاهده نشد.

گزارش شده است که تنش‌های آبی و به‌ویژه تنش شوری، محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ و پتانسیل اسمزی سلول‌ها را کاهش می‌دهند (Goudarzi & Pakniyat, 2008). در مقابل، مطالعاتی نیز در رقم‌های تجاری و وحشی جو وجود دارد که نشان می‌دهند شوری تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ در رقم‌های تجاری و وحشی جو ندارد، اما سبب کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی گیاه به‌ویژه در رقم‌های تجاری می‌شود (Ahmed *et al*., 2013). همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار می‌تواند تحمل گیاه جو به تنش را با بهبود کارایی مصرف فسفر، بهبود روابط آبی گیاه، افزایش محتوای نسبی آب برگ، افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و انتقال فسفر بیش‌تر به برگ‌ها بهبود بخشد که در نتیجه این فرایندها، عملکرد فتوسنتزی گیاه و رشد آن بهبود پیدا می‌کند (Khalvati *et al*., 2010 Bayani *et al*., 2015;).

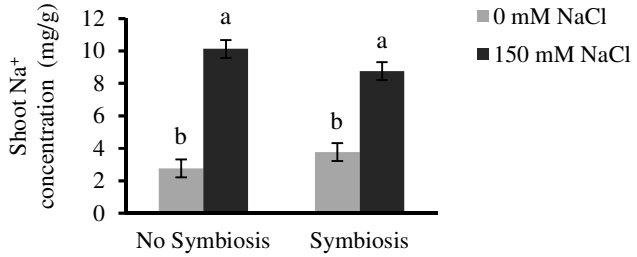


شکل ۴- مقایسه میانگین برهمکنش همزیستی×شوری×ژنوتیپ بر محتوای نسبی آب برگ رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Figure 4. Comparison of means of symbiosis×salintity×genotype interaction for leaf relative water content (RWC) in commercial barley cultivars. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.

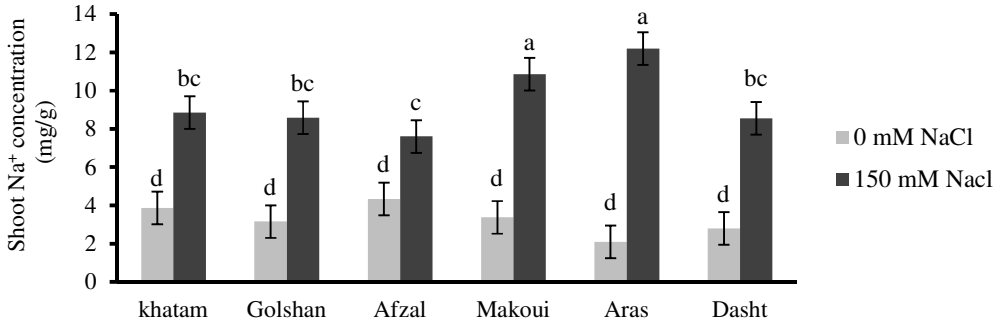
غلظت کاتیون‌های مرتبط با شوری

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات شوری و برهمکنش شوری×همزیستی و شوری×ژنوتیپ بر غلظت Na^+، اثرات شوری، ژنوتیپ و برهمکنش همزیستی×ژنوتیپ بر غلظت K^+، و اثرات شوری، ژنوتیپ و برهمکنش شوری× همزیستی و شوری×ژنوتیپ بر نسبت Na^+/K^+ معنی‌دار بود (جدول ۲). تنش شوری در مجموع سبب افزایش غلظت Na^+ به‌میزان ۱۸۸٪ و کاهش غلظت K^+ به‌میزان ۱۱/۵٪ شد. مقایسه میانگین برهمکنش شوری × همزیستی بر غلظت Na^+ نشان داد که در هر دو شرایط بدون تنش و تنش شوری، همزیستی تأثیر معنی‌داری بر غلظت Na^+ نداشت (شکل ۵). همچنین مقایسه میانگین برهمکنش شوری×ژنوتیپ نشان داد که در حالت بدون تنش شوری، تفاوت بین ارقام از نظر غلظت Na^+ معنی‌دار نبود، اما با اعمال تنش شوری، غلظت این عنصر در همه رقم‌ها به‌ویژه رقم ارس و پس از آن رقم ماکویی افزایش معنی‌دار نشان داد. کم‌ترین میزان افزایش غلظت بر اثر تنش شوری در رقم متحمل افضل مشاهده شد (شکل ۶). مقایسه میانگین برهمکنش همزیستی×ژنوتیپ، تأثیر متفاوت همزیستی بر غلظت K^+ در رقم‌های مختلف را نشان داد (شکل ۷). در گیاهان بدون همزیستی، رقم گلشن بیش‌ترین میانگین غلظت K^+ را داشت که تفاوت آن با رقم‌های خاتم، افضل و ماکویی معنی‌دار نبود. کم‌ترین مقدار این صفت نیز در رقم دشت مشاهده شد که تفاوت آن با رقم‌های ارس، ماکویی و افضل معنی‌دار نبود. تغییرات غلظت این کاتیون بر اثر همزیستی در رقم خاتم معنی‌دار بود، اما در سایر رقم‌ها همزیستی تأثیر معنی‌داری بر مقدار غلظت K^+ نداشت (شکل ۷).



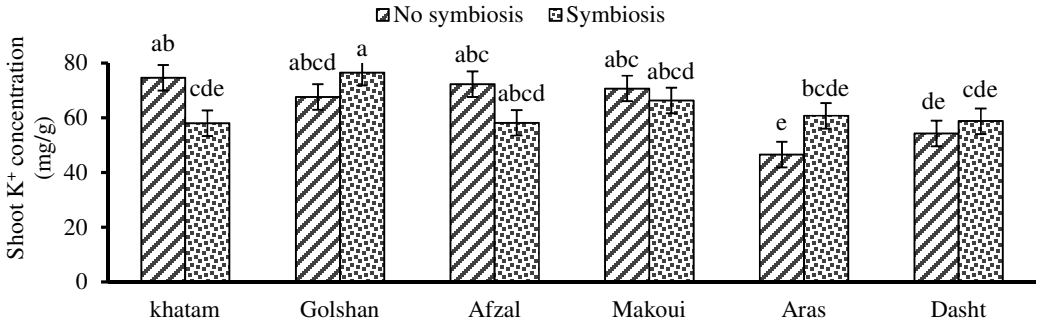
شکل ۵- مقایسه میانگین برهمکنش شوری× همزیستی بر غلظت Na^+ اندام هوایی در رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Figure 5. Comparison of means of salintity×symbiosis interaction for shoot Na^+ concentration in commercial barley cultivars. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.



شکل ۶- مقایسه میانگین برهمکنش شوری×ژنوتیپ بر غلظت Na^+ اندام‌های هوایی رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

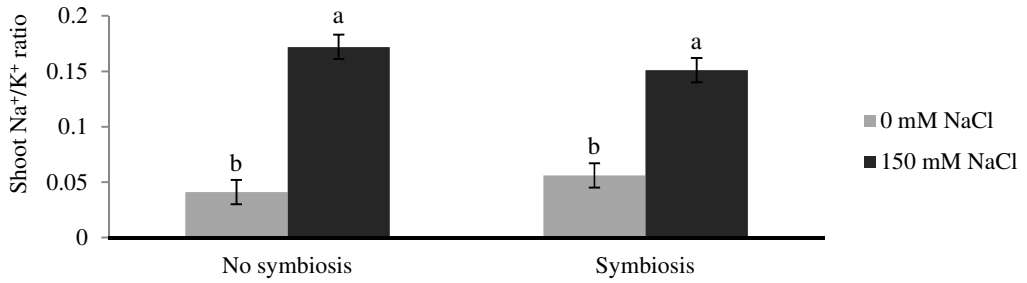
Figure 6. Comparison of means of salintity×genotype interaction for shoot Na^+ concentration in commercial barley cultivars. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.



شکل ۷- مقایسه میانگین برهمکنش همزیستی× ژنوتیپ بر غلظت K^+ در اندام‌های هوایی رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

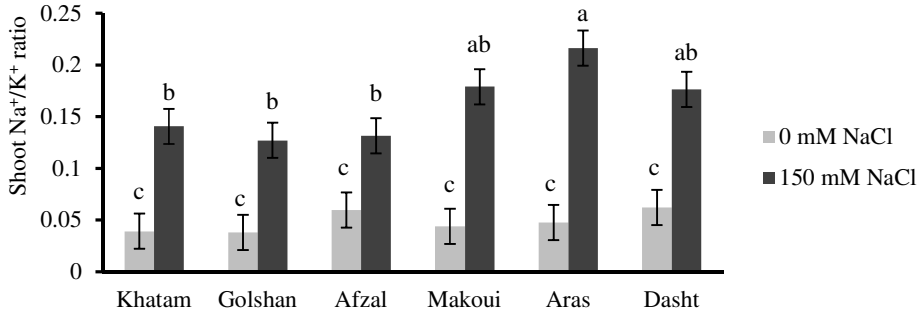
Figure 7. Comparison of means of symbiosis×genotype interaction for shoot K^+ concentration in commercial barley cultivars. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.

مقایسه میانگین برهمکنش شوری × همزیستی برای صفت نسبت Na^+/K^+ نشان داد که در شرایط بدون تنش شوری، همزیستی تأثیر معنی‌داری بر این نسبت نداشت، اما در شرایط تنش شوری، نسبت Na^+/K^+ همزمان در گیاهان کلونیزه شده و کلونیزه نشده افزایش پیدا کرد، به‌طوری که در نهایت در شرایط تنش شوری، بین حالت وجود همزیستی و بدون همزیستی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۸). همچنین مقایسه میانگین شوری×ژنوتیپ نشان داد که در شرایط بدون تنش شوری، تفاوت معنی‌داری بین رقم‌های مختلف وجود نداشت، اما پس از اعمال تنش شوری مقادیر این نسبت در تمامی رقم‌ها افزایش یافت، اگرچه مقدار این افزایش در رقم‌های ماکویی، دشت و به‌ویژه ارس بیش‌تر از رقم‌های خاتم، گلشن و افضل بود (شکل ۹). ارتباط بین نسبت Na^+/K^+ و تحمل شوری گیاه جو در مطالعات مختلف گزارش شده است. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که غلظت Na^+ و نسبت Na^+/K^+ در رقم‌های متحمل جو افزایش کم‌تری نسبت به سایر رقم‌ها نشان می‌دهد که بیانگر انتقال کم‌تر یون Na^+ از آوندهای چوبی به برگ‌ها به‌عنوان مکانیسم مقابله با تنش شوری است، به‌طوری که ژنوتیپ‌هایی که افزایش کم‌تری در نسبت Na^+/K^+ در اندام‌های هوایی و ریشه‌های خود داشته باشند، می‌توانند به‌عنوان ژنوتیپ‌های متحمل به شوری عمل کنند (Ahmed *et al.*, 2013; Zeeshan *et al*., 2020).



شکل ۸- مقایسه میانگین برهمکنش شوری× همزیستی بر نسبت Na^+/K^+اندام هوایی رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Figure 8. Comparison of means of symbiosis×salinity interaction for shoot Na^+/K^+ ratio in commercial barley cultivars. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.



شکل ۹- مقایسه میانگین برهمکنش شوری× ژنوتیپ بر نسبت Na^+/K^+ در اندام‌های هوایی رقم‌های تجاری جو. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال ۵٪ ندارند.

Figure 9. Comparison of means of salintity×genotype interaction for shoot Na^+/K^+ concentration in studied commercial barley cultivars. Means followed by at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level.

ارتباط بین عملکرد دانه جو و نسبت Na^+/K^+ در اندام‌های هوایی در مطالعات مختلف گزارش شده است (Pakniyat *et al*., 2003; Khosravinejad *et al*., 2009). صحافی و همکاران (Sahafi *et al*., 2021) بر اساس شاخص‌های تحمل به شوری مبتنی بر عملکرد، رقم خاتم را به‌عنوان یکی از رقم‌های متحمل به شوری معرفی کردند. آن‌ها بیان کردند که رقم‌های متحمل جو از جمله خاتم با سازوکار جذب بیش‌تر K^+ و دفع بیش‌تر Na^+ و تنظیم پتانسیل اسمزی سلول با تنش شوری مقابله می‌کنند. توکلی و همکاران (Tavakoli *et al*., 2010) نسبت Na^+/K^+ را به‌عنوان صفت مهم تحمل به شوری در رقم متحمل افضل گزارش کردند. مطالعات نشان می‌دهند که در گیاهان مختلف از جمله غلات مهمی مانند گندم و برنج، همزیستی با میکوریز سبب تجمع کم‌تر یون Na^+ و کاهش نسبت Na^+/K^+ و در نهایت افزایش تحمل به شوری گیاه می‌شود (Evelin *et al*., 2009; Porcel *et al*., 2016). فراتحلیل (Meta-analysis) مربوط به تأثیر همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار بر تحمل به شوری گیاهان مختلف، نشان داد که همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار تأثیر قابل توجهی بر افزایش غلظت‌های K^+ در ریشه و اندام‌های هوایی دارد و به‌طور متوسط غلظت آن را به‌ترتیب ۴۷٪ و ۴۲٪ افزایش می‌دهد. همچنین، همزیستی نسبت Na^+/K^+ را به‌طور متوسط ۴۷٪ و ۵۸٪ به‌ترتیب در ریشه و اندام‌های هوایی کاهش می‌دهد (Augé *et al*., 2015). تأثیر مثبت همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار در کاهش نسبت Na^+/K^+ در رقم‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف گیاه جو نیز گزارش شده است. محمد و همکاران (Mohammad *et al*., 2003) گزارش کردند که همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار *G. intraradices* از

طریق کاهش غلظت Na^+ و بدون تأثیر بر غلظت K^+، سبب تعدیل تأثیر نامطلوب شوری بر گیاه جو می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنوع معنی‌داری بین رقم‌های مختلف جو از لحاظ درصد کلونیزاسیون و فراوانی ساختارهای قارچ میکوریز آربسکولار وجود داشت. شوری سبب کاهش فراوانی کلونیزاسیون در رقم‌های جو شد که به‌نظر می‌رسد کاهش رشد و توسعه قارچ در شرایط تنش شوری به‌ویژه در رقم‌های متحمل، می‌تواند به‌دلیل کاهش مصرف منابع کربن گیاه باشد. تنش شوری سبب کاهش رشد رویشی گیاه، کاهش محتوای آب برگ و افزایش نسبت Na^+/K^+ در اندام‌های هوایی شد که میزان تأثیر نامطلوب آن در رقم‌ها متفاوت بود. همچنین، با توجه به اینکه تأثیر منفی شوری بر این صفات در رقم ارس در مقایسه با رقم‌های متحمل شناخته شده خاتم، گلشن و افضل، به‌میزان قابل توجهی بیش‌تر بود، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که احتمالاً تحمل به شوری این رقم نیز کم‌تر از رقم‌های متحمل است. از طرف دیگر، بر اساس صفات مطالعه‌شده، همزیستی با قارچ میکوریز آربسکولار نتوانست تأثیر نامطلوب تنش شوری بر رقم‌های مورد بررسی را تعدیل کند. باید توجه داشت که استقرار و توسعه همزیستی در گیاه به انرژی زیادی نیاز دارد و تأثیر مثبت این رابطه پس از توسعه کامل قارچ رخ خواهد داد. به‌عبارت دیگر، با ادامه رشد گیاه ممکن است همزیستی نقش مؤثری در تحمل شرایط نامطلوب و افزایش عملکرد گیاه ایفاء کند. از طرف دیگر، عدم توانایی همزیستی در بهبود وضعیت گیاه ممکن است از سطح بالای شوری اعمال شده در این مطالعه ناشی شده باشد.

سپاسگزاری

از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج به‌دلیل تأمین بذرهای رقم‌های تجاری جو و همچنین از مؤسسه آب و خاک کشور برای تهیه مایه تلقیح قارچ میکوریز آربسکولار تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده‌است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

Ahmed, I. M., Cao, F., Zhang, M., Chen, X., Zhang, G., & Wu, F. (2013). Difference in yield and physiological features in response to drought and salinity combined stress during anthesis in Tibetan wild and cultivated barleys. *PLOS ONE*, *8*(10), e77869. doi: 10.1371/journal.pone.0077869.

Al Mutairi, A. A., Cavagnaro, T. R., Khor, S. F., Neumann, K., Burton, R. A., & Watts-Williams, S. J. (2020). The effect of zinc fertilisation and arbuscular mycorrhizal fungi on grain quality and yield of contrasting barley cultivars. *Functional Plant Biology*, *47*(2), 122-133. doi: 10.1071/FP19220.

Augé, R. M., Toler, H. D., & Saxton, A. M. (2015). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, *25*, 13-24. doi: 10.1007/s00572-014-0585-4.

Barati, A., Nikkhah, H., Tabatabaee, S., Mahlooji, M., Tajali, H., Karimizadeh, M., Ravari, S., Ghazvini, H., Sorkhi, B., & Koocheki, A. (2021). Golshan, new salt tolerant barley variety suitable for cultivation in the temperate regions of Iran. *Research Achievements for Field & Horticulture Crops*, *9*(2), 153-163. [In Persian]. doi: 10.22092/RAFHC.2021.126236.1195.

Bayani, R., Saateyi, A., & Faghani, E. (2015). Influence of arbuscular mycorrhiza in phosphorus acquisition efficiency and drought-tolerance mechanisms in barley (*Hordeum vulgare* L.). *International Journal of Biosciences*, *7*(1), 86-94. doi: 10.12692/ijb/7.1.86-94.

Christophersen, H., Smith, F., & Smith, S. (2009). Arbuscular mycorrhizal colonization reduces arsenate uptake in barley via downregulation of transporters in the direct epidermal phosphate uptake pathway. *New Phytologist*, *184*(4), 962-974. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.03009.x.

Evelin, H., Kapoor, R., & Giri, B. (2009). Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. *Annals of botany, 104*(7), 1263-1280. doi: 10.1093/aob/mcp251.

Faghani, E., Mirkarimi, A., & Kheradmand, Gh. (2017). Evaluation effect of mycorrhizal inoculums with barley (*Hordeum vulgare* L.) symbiosys in ameliorating salinity stress in Golestan provinve. *Research Achivment for Improvement Crop Production*, *3*(1), 1-25. [In Persian].

Feng, Z., Liu, X., Feng, G., Zhu, H., & Yao, Q. (2020). Linking lipid transfer with reduced arbuscule formation in tomato roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungus under low pH stress. *Environmental Microbiology*, *22*(3), 1036-1051. doi: 10.1111/1462-2920.14810.

Ganugi, P., Masoni, A., Pietramellara, G., & Benedettelli, S. (2019). A review of studies from the last twenty years on plant–arbuscular mycorrhizal fungi associations and their uses for wheat crops. *Agronomy*, *9*(12), 840. doi: 10.3390/agronomy9120840.

Giovannetti, M., & Mosse, B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, *84*, 489-500. doi: 10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x.

Goudarzi, M., & Pakniyat, H. (2008). Evaluation of wheat cultivars under salinity stress based on some agronomic and physiological traits. *Journal of Agriculture & Social Sciences*, *4*(3), 35-38.

Grace, E., Cotsaftis, O., Tester, M., Smith, F., & Smith, S. (2009). Arbuscular mycorrhizal inhibition of growth in barley cannot be attributed to extent of colonization, fungal phosphorus uptake or effects on expression of plant phosphate transporter genes. *New Phytologist*, *181*, 983-949. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02720.x.

Keshavarz, H., Hosseini, S. J., Sedibe, M. M., & Achilonu, M. C. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi udes to support Iranian barley cultivated on cadmium contaminated soils. *Applied Ecology & Environmental Research*, *20* (1), 43- 53. doi: 10.15666/aeer/2001_043053.

Khalvati, M., Bartha, B., Dupigny, A., & Schröder, P. (2010). Arbuscular mycorrhizal association is beneficial for growth and detoxification of xenobiotics of barley under drought stress. *Journal of Soils & Sediments*, *10*, 54-64. doi: 10.1007/s11368-009-0119-4.

Khosravinejad, F., Heydari, R., & Farboodnia, T. (2009). Growth and inorganic solute accumulation of two barley varieties in salinity. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, *12*(2), 168-172. doi: 10.3923/pjbs.2009.168.172.

Masrahi, A. S., Alasmari, A., Shahin, M. G., Qumsani, A. T., Oraby, H. F., & Awad-Allah, M. M. (2023). Role of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing bacteria in improving yield, yield components, and nutrients uptake of barley under salinity soil. *Agriculture*, *13*(3), 1-18. doi: 10.3390/agriculture13030537.

Mohammad, M. J., Malkawi, H. I., & Shibli, R. (2003). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus fertilization on growth and nutrient uptake of barley grown on soils with different levels of salts. *Journal of Plant Nutrition*, *26*(1), 125-137. doi: 10.1081/PLN-120016500.

Munns, R., & Gilliham, M. (2015). Salinity tolerance of crops–what is the cost? *New phytologist, 208*(3), 668-67. doi: 10.1111/nph.13519.

Nefissi Ouertani, R., Abid, G., Karmous, C., Ben Chikha, M., Boudaya, O., Mahmoudi, H., Mejri, S., Jansen, R. K., & Ghorbel, A. (2021). Evaluating the contribution of osmotic and oxidative stress components on barley growth under salt stress. *AoB Plants, 13*(4), plab034. doi: 10.1093/aobpla/plab034.

Pakniyat, H., Kazempour, A., & Mohammadi, G. (2003). Variation in salt tolerance of cultivated (*Horedum vugare* L.) and wild (*H. spomtaneum* C. Koch) barley grnotypes from IRAN. *Iran Agricutural Research*, *22*(1), 45-62. [In Persian]. doi: 10.22099/iar.2003.4267.

Phillips, J., & Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, *55*(1), 158-161. doi: 10.1016/S0007-1536(70)80110-3.

Porcel, R., Aroca, R., Azcon, R., & Ruiz-Lozano, J. M. (2016). Regulation of cation transporter genes by the arbuscular mycorrhizal symbiosis in rice plants subjected to salinity suggests improved salt

tolerance due to reduced Na^+ root-to-shoot distribution. *Mycorrhiza*, *26*, 673-684. doi: 10.1007/s00572-016-0704-5.

Sahafi, S. S., Moussavi Nik, S. M., Tabatabaee, S. A., Sabbagh, S. K., & Ghanbari, S. A. (2021). Evaluation of sensitive and tolerant cultivars of barley to salt stress using tolerance indices in central regions of Iran. *Journal of Crop Production*, *14*(1), 103-122. [In Persian]. doi: 10.22069/EJCP.2021.18504.2380.

Salmeron-Santiago, I. A., Martínez-Trujillo, M., Valdez-Alarcón, J. J., Pedraza-Santos, M. E., Santoyo, G., Pozo, M. J., & Chávez-Bárcenas, A. T. (2021). An updated review on the modulation of carbon partitioning and allocation in arbuscular mycorrhizal plants. *Microorganisms*, *10*(1), 75. doi: 10.3390/microorganisms10010075.

Sendek, A., Karakoç, C., Wagg, C., Domínguez-Begines, J., do Couto, G. M., van der Heijden, M. G., Naz, A. A., Lochner, A., Chatzinotas, A., & Klotz, S. (2019). Drought modulates interactions between arbuscular mycorrhizal fungal diversity and barley genotype diversity. *Scientific Reports*, *9*(1), 9650. doi: 10.1038/s41598-019-45702-1.

Singh, M., Nara, U., Kumar, A., Choudhary, A., Singh, H., & Thapa, S. (2021). Salinity tolerance mechanisms and their breeding implications. *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, *19*(1), 173. doi: 10.1186/s43141-021-00274-4.

Sisaphaithong, T., Kondo, D., Matsunaga, H., Kobae, Y., & Hata, S. (2012). Expression of plant genes for arbuscular mycorrhiza-inducible phosphate transporters and fungal vesicle formation in sorghum, barley, and wheat roots. *Bioscience, Biotechnology, & Biochemistry*, *76*(12), 2364-236. doi: 10.1271/bbb.120782.

Tavakoli, F., Vazan, S., Moradi, F., Shiran, B., & Sorkheh, K. (2010). Differential response of salt-tolerant and susceptible barley genotypes to salinity stress. *Journal of Crop Improvement*, *24*(3), 244-260. doi: 10.1080/15427528.2010.481547.

Vierheilig, H. (2004). Further root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi in already mycorrhizal plants is suppressed after a critical level of root colonization. *Journal of Plant Physiology*, 161(3), 339-341. doi: 10.1078/0176-1617-01097.

Watts-Williams, S. J., & Cavagnaro, T. R. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain zinc concentration and modify the expression of root ZIP transporter genes in a modern barley (Hordeum vulgare) cultivar. *Plant Science*, *274*, 163-170. doi: 10.1016/j.plantsci.2018.05.015.

Zeeshan, M., Lu, M., Sehar, S., Holford, P., & Wu, F. (2020). Comparison of biochemical, anatomical, morphological, and physiological responses to salinity stress in wheat and barley genotypes deferring in salinity tolerance. *Agronomy*, *10*(1), 127. doi: 10.3390/agronomy10010127.