



Original article

Effects of mycorrhizal fungi and selenium foliar application on yield, chlorophyll fluorescence, and some physiological traits of rye (*Secale cereale* L.) under salinity stressKhadijeh Sourazar¹, Raouf Seyed Sharifi^{2*}, Salim Farzaneh², Mohammad Sedghi²¹Ph.D. student, Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran²Professors, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received 12 March 2025; Revised 27 April 2025; Accepted 5 May 2025

Extended abstract**Introduction**

Rye (*Secale cereale* L.) is a key cereal crop, recognized for its historical significance and resilience. It exhibits exceptional adaptability for cultivation in arid, semi-arid, and marginal environments, including acidic soils or those contaminated with heavy metals, and functions effectively as a soil improver. Salinity, a major abiotic stress, severely compromises physiological and morphological traits in plants, leading to ionic toxicity, nutrient imbalance, and the degradation of cellular and photosynthetic structures. To mitigate the detrimental effects of salinity, the exogenous application of biological and inorganic protectants, specifically arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and selenium (Se), has emerged as a promising strategy for enhancing plant resilience and crop productivity. As a beneficial trace element, selenium (Se) exerts hormone-like effects, enhancing growth, metabolism, and environmental stress resistance when applied at optimal concentrations. Selenium also enhances the nutritional quality of agricultural products by increasing their amino acid content. Similarly, AMF, acting as symbiotic organisms, play a pivotal role in promoting plant growth under salinity stress. By establishing specialized intraradical structures, these fungi facilitate nutrient uptake and transport, thereby enhancing host resilience to environmental stresses. Additionally, they alleviate salinity stress by activating defense mechanisms, inducing secondary metabolite production, and improving soil structure. Therefore, this study aimed to investigate the effects of AMF and Se on chlorophyll fluorescence dynamics and physiological traits of rye under salinity stress.

Materials and methods

A factorial experiment, based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications, was conducted in 2024 at the research greenhouse of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili. The experimental treatments consisted of three salinity levels (0, 65, and 130 mM NaCl), two mycorrhizal inoculation levels (non-inoculated and inoculated with *Glomus mosseae*), and four selenium (Se) foliar concentrations (0, 1.5, 3, and 4.5 mg L⁻¹). Seeds of a local rye genotype native to Ardabil were sown at a density of 380 seeds m⁻², corresponding to 61 seeds per pot. AMF inoculum (*Glomus mosseae*) was obtained from Zist Fanavar Turan Co. and applied to the soil at a rate of 20 g m⁻² (equivalent to 3.2 g per pot), according to the manufacturer's instructions. Selenium solutions were prepared by dissolving sodium selenate in deionized water using an ultrasonic bath (100 W, 40 kHz) to ensure complete dissolution. Foliar application of Se was performed during the stem elongation stage. Electrical conductivity (EC) was measured using an EC meter (Model Mi 180 Bench Meter, Milwaukee Instruments). The flag leaf chlorophyll index was assessed using a portable

* Corresponding author: Raouf Seyed Sharifi; E-Mail: raouf_ssharifi@yahoo.com

chlorophyll meter (SPAD-502, Minolta, Japan). Furthermore, chlorophyll fluorescence parameters (F_0 , F_v , F_m , F_v/F_m) were recorded using a portable fluorometer (Optic Science-OS-30, USA). Soluble protein content in flag leaf tissue was quantified at the flowering stage (BBCH 61) using the Bradford assay. At maturity, five representative plants per pot were sampled to determine the mean grain yield per plant for subsequent data analysis. The experimental data were analyzed using SAS (version 9.4), and treatment means were compared using the LSD test at the 0.05 probability level.

Results and discussion

Results indicated that salinity stress significantly decreased chlorophyll fluorescence parameters, including maximum fluorescence (F_m), variable fluorescence (F_v), and quantum yield (F_v/F_m), as well as grain yield and chlorophyll and nitrogen indices; however, it increased minimum fluorescence (F_0). Conversely, the application of mycorrhiza and selenium effectively mitigated the adverse effects of salinity, as evidenced by significant reductions in electrical conductivity and F_0 values. At the highest salinity level, the combined application of selenium and mycorrhiza at flowering stage (86 days after planting) significantly increased chlorophyll index (85.3%), nitrogen index (57.2%), F_m (48.3%), F_v (207%), F_v/F_m (44.2%), and grain yield per plant (75.3%) compared with untreated plants under the same salinity conditions. Furthermore, across all sampling stages, the individual or combined application of selenium and mycorrhiza consistently decreased electrical conductivity and F_0 (minimum fluorescence).

Conclusion

In conclusion, the application of selenium and mycorrhiza enhances grain yield in rye under salt stress, primarily by improving physiological attributes.

Keywords: Electrical Conductivity, Chlorophyll index, Grain Yield, Leaf Soluble Protein, Quantum yield

بررسی اثر قارچ مایکوریزا و محلول پاشی سلنیوم بر عملکرد، فلورسانس کلروفیل و برخی صفات فیزیولوژیکی چاودار (*Secale cereale L.*) تحت تنش شوری

خدیجه صورآذر^۱، رئوف سیدشریفی^{۲*}، سلیم فرزانه^۱، محمد صدقی^۲

۱. دانشجوی دکتری رشته فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲. استاد، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
واژه‌های کلیدی: پروتئین محلول در برگ شاخص کلروفیل عملکرد دانه عملکرد کوانتومی هدایت الکتریکی	این پژوهش با هدف بررسی اثر قارچ مایکوریزا و محلول پاشی سلنیوم بر عملکرد و برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی چاودار تحت تنش شوری، به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۳ اجرا شد. تیمارها شامل سه سطح شوری (عدم اعمال شوری به عنوان شاهد، شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌مولار)، دو سطح مایکوریزا (عدم کاربرد و کاربرد مایکوریزا <i>Glomus mosseae</i>)، و چهار سطح محلول پاشی سلنیوم (محلول پاشی با آب خالص به عنوان شاهد و کاربرد ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌گرم سلنیوم در لیتر) بودند. نتایج نشان داد که شوری به طور معنی‌داری موجب کاهش شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (به جز فلورسانس حداقل)، شاخص نیتروژن و عملکرد دانه شد. ولی کاربرد توأم مایکوریزا و سلنیوم توانست اثرات منفی شوری را کاهش دهد. تحت شوری ۱۳۰ میلی‌مولار در مرحله گلدهی گیاه، کاربرد مایکوریزا و محلول پاشی ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم، شاخص کلروفیل (۸۵/۳ درصد)، شاخص نیتروژن (۵۷/۲ درصد)، فلورسانس بیشینه (۴۸/۳ درصد)، فلورسانس متغیر (۲۰۷ درصد)، عملکرد کوانتومی (۴۴/۲ درصد) و عملکرد دانه (۷۵/۳ درصد) را در مقایسه با عدم کاربرد مایکوریزا و سلنیوم در همین سطح از شوری افزایش داد. در تمامی مراحل نمونه‌برداری و ترکیبات تیماری، کاربرد مایکوریزا و سلنیوم هدایت الکتریکی و فلورسانس حداقل را کاهش داد. بر اساس این نتایج، کاربرد محافظ‌های زیستی و معدنی (مایکوریزا و سلنیوم) می‌تواند عملکرد دانه چاودار تحت تنش شوری را به واسطه‌ی کاهش هدایت الکتریکی و بهبود اجزای فلورسانس کلروفیل افزایش دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵	

مقدمه

مناطق مختلفی از اروپا، آسیا و آمریکای لاتین کشت می‌شود (Kaur et al., 2021).

شوری ناشی از آب آبیاری و خاک به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین تنش‌های محیطی شناخته می‌شود که موجب کاهش جدی عملکرد گیاهان زراعی می‌گردد (Saeedi et al., 2024). حدود ۱۱۲۵ میلیون هکتار از زمین‌های قابل کشت جهان (یعنی ۱۰٪ از کل زمین‌های کشاورزی) تحت تأثیر شوری قرار دارند و سالانه حدود ۱/۵ میلیون هکتار به این اراضی شور اضافه می‌شود (Mishra et al., 2023).

چاودار (*Secale cereale L.*) پس از گندم یکی از غلات مهم و منحصر به فردی است که غنی از پروتئین گلوتن بوده و به همین دلیل در تولید محصولات غذایی مختلف مانند نان و بیسکویت، از آرد آن استفاده می‌شود. علاوه بر این، چاودار به‌عنوان ماده اولیه در تولید نوشیدنی‌هایی مانند آبجو کاربرد دارد (Stępniewska et al., 2021). این ویژگی‌های منحصر به فرد همراه با توانایی بالای چاودار در تحمل شرایط محیطی سخت، آن را به یک گیاه مناسب برای کشت در زمین‌های شور و فقیر از نظر مواد مغذی تبدیل کرده است و امروزه در

فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه ایفا می‌کند. این عنصر قادر است با افزایش عملکرد کوانتومی (Fv/Fm) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، در نهایت کارایی فتوسنتزی گیاهان تحت تنش شوری را، به طور مؤثری بهبود بخشد (Saeedi et al., 2024). نتایج یک بررسی نشان داد که محلول‌پاشی بوته‌های کلزا با سلینیوم در شرایط تنش، ضمن افزایش فلورسانس بیشینه، فلورسانس متغیر و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II، منجر به افزایش عملکرد دانه شد (Sheikhzadeh et al., 2022). همچنین، پژوهشی دیگر نشان داد که استفاده از سلینیوم با بهبود شاخص‌های فلورسانس کلروفیل و حداکثر کارایی کوانتومی فتوسیستم II و کاهش هدایت الکتریکی، قادر است به طور مؤثری به بهبود عملکرد دانه کلزا در شرایط تنش کمک نماید (Rostamihir et al., 2023).

قارچ‌های میکوریزا نیز به‌عنوان ارگانسیم‌های موثر در همزیستی با گیاهان، نقش مهمی در بهبود رشد گیاهان در شرایط شوری ایفا می‌کنند. این قارچ‌ها جذب و انتقال مواد مغذی ضروری در ریشه گیاهان را افزایش و موجب بهبود مقاومت گیاه در برابر تنش‌های محیطی می‌شود. آنها همچنین با فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی گیاه و بهبود ساختار خاک، به کاهش اثرات شوری کمک می‌کنند (Golubkina et al., 2019). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از قارچ میکوریزا، به طور مؤثری اثرات منفی تنش‌های محیطی بر گیاهانی مانند گندم را کاهش داده و از طریق بهبود یکپارچگی غشای سلولی، کاهش نشت الکترولیت و تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، عملکرد کوانتومی و رشد گیاهان را در شرایط تنش، بهبود می‌بخشند (Abdelaal et al., 2024).

تحقیقات نشان داده است که استفاده توأم سلینیوم و میکوریزا می‌تواند اثرات سینرژیکی بر بهبود رشد و عملکرد گیاهان داشته باشد (Golubkina et al., 2019). با این حال، اطلاعات محدودی درباره اثرات توأم این عوامل بر عملکرد و دیگر صفات گیاهان تحت تنش شوری وجود دارد. از این رو هدف این پژوهش، بررسی اثرات میکوریزا و محلول‌پاشی سلینیوم بر عملکرد و روند تغییرات هدایت الکتریکی، شاخص کلروفیل، شاخص نیتروژن، عملکرد کوانتومی و اجزای فلورسانس کلروفیل چاودار، تحت شرایط شوری بود.

شوری به طور مستقیم بر مراحل رشد رویشی و زایشی گیاهان و ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی آنها تأثیر می‌گذارد و منجر به سمیت و عدم تعادل یونی، کاهش جذب مواد مغذی، کاهش سرعت رشد و فتوسنتز می‌شود. همچنین، شوری از طریق اثرات ثانویه تنش اسمزی و اکسیداتیو بر گیاهان اثر گذاشته و منجر به تخریب ساختارهای سلولی (Saeedi et al., 2024; Usman et al., 2023)، نشت الکترولیت‌ها و افزایش هدایت الکتریکی و پراکسیداسیون لیپیدی دیواره‌های سلولی (Mishra et al., 2023) و در نهایت به دلیل محدودیت رشدی گیاهان، منجر به کاهش عملکرد می‌شود. از این رو، یافتن راهکارهایی برای کاهش اثرات شوری و استفاده بهینه از منابع آب و خاک شور، اهمیت فراوانی دارد.

یکی از راهبردهای نوین در مدیریت شوری، استفاده از مواد معدنی نظیر سلینیوم (Se) است. سلینیوم به‌عنوان یک عنصر کمیاب ضروری، نقش دوگانه‌ای شبیه به هورمون‌های گیاهی ایفا می‌کند و در غلظت‌های مناسب، می‌تواند رشد و متابولیسم گیاه را افزایش داده و مقاومت گیاهان را در برابر تنش‌های محیطی بهبود بخشد (Sun et al., 2025; Saeedi et al., 2024). سلینیوم همچنین با تقویت فتوسنتز، متابولیسم کربن و نیتروژن، و افزایش محتوای اسیدهای آمینه، به بهبود کیفیت محصولات کشاورزی کمک می‌کند (Zahedi et al., 2020). در این راستا محلول‌پاشی برگی سلینیوم روشی ایمن و کارآمد برای تأمین نیاز گیاهان به این عنصر و بهبود سلامت انسان از طریق مصرف محصولات غنی از سلینیوم است (Taha et al., 2021).

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که شوری به‌طور قابل‌توجهی راندمان فتوسنتزی و عملکرد کوانتومی (Fv/Fm) گندم را کاهش می‌دهد. در این راستا طاه و همکاران (Taha et al., 2021) گزارش کردند که شوری موجب کاهش معنی‌دار شاخص‌های فلورسانس می‌شود، ولی کاربرد سلینیوم قادر است اثرات منفی تنش شوری را کاهش داده و فعالیت فتوسنتزی را با مهار تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) که عامل اصلی تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی است، بهبود بخشد. علاوه بر این، سلینیوم با تعدیل اثرات شوری و حفظ یکپارچگی ساختاری کلروپلاست، می‌تواند موجب افزایش سطح رنگدانه‌های کلروفیل و فعالیت آنزیم‌های مرتبط با بیوسنتز آنها شود (Jiang et al., 2017). از سوی دیگر، سلینیوم نقش مهمی در تنظیم

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۳ انجام شد. عوامل آزمایش شامل شوری در سه سطح (عدم اعمال شوری به عنوان شاهد، ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌مولار با کلرید سدیم)، دو سطح قارچ مایکوریزا (عدم کاربرد و کاربرد *Glomus mosseae*) و چهار سطح محلول‌پاشی سلنیوم (محلول‌پاشی با آب به عنوان شاهد و محلول‌پاشی ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنات سدیم (Na_2O_4Se) بود (Adeli et al., 2023)) که از شرکت شیمیا آزمون اصفهان تهیه شد. تعداد زیاد گلدان‌های آزمایشی (۷۲ گلدان به قطر ۴۵ سانتی‌متر) و عدم امکان قرارگیری تمامی گلدان‌های آزمایشی بر یک قسمت از گلخانه که کاملاً از نظر تمامی عوامل آزمایشی از شرایط یکسانی برخوردار باشند، از جمله مواردی بودند که موجب شد تا از طرح بلوک کامل تصادفی به جای طرح کاملاً تصادفی استفاده شود. گلدان‌هایی با قطر ۴۵ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر، حاوی ترکیبی از ماسه، کود حیوانی و خاک معمولی (به نسبت ۲:۱:۱) تهیه شد. با استفاده از نرم‌افزار Calc Salt (به استناد هدایت الکتریکی و درصد عصاره اشباع خاک)، مقدار نمک مورد نیاز برای هر کیلوگرم خاک گلدان در هریک از سطوح شوری محاسبه و به خاک هر گلدان یک هفته پیش از کاشت اضافه شد (Sourazar and Seyed Sharifi, 2023). برای حفظ شوری در طول دوره رشد در زیر هر گلدان زیر گلدانی قرار داده شد تا بعد از هر سه تا چهار نوبت آبیاری، نمک‌های احتمالی وارد شده به زیر گلدانی دوباره در آب حل شده و به داخل هر گلدان برگشت داده شود. قارچ مصرفی از شرکت زیست فناوران توران تهیه و به استناد توصیه شرکت مذکور، ۲۰ گرم در هر مترمربع خاک (معادل ۳/۲ گرم برای هر گلدان) استفاده شد. بذر چاودار (ژنوتیپ بومی اردبیل) پس از ورنالیزاسیون به مدت ۱۲ روز در دمای دو درجه سانتی‌گراد در کلد انکوباتور (مدل I.KH.RI90، شرکت ایران خودساز، ایران)، بر اساس تراکم توصیه شده این رقم (۳۸۰ بذر در مترمربع) که معادل ۶۱ بذر در هر گلدان می‌شد، کشت شد. علف‌های هرز به صورت دستی کنترل شد. دمای گلخانه ۲۰-۳۰ درجه سانتی‌گراد با طول دوره روشنایی ۱۶-۱۵ ساعت (با استفاده

از ترکیبی از لامپ‌های معمولی و مهتابی) بود. محلول‌پاشی سلنیوم در مرحله ساقه‌دهی ($BBCH^1$ ۳۰) در دو نوبت با فاصله زمانی یک هفته بین ساعت ۶ تا ۷ عصر انجام شد (Yousefi Rad and Safa, 2021). لازم به ذکر است که نمونه‌برداری‌های مربوط به صفاتی که به صورت روندی اندازه‌گیری می‌شد، هر چهار روز یک‌بار پس از ظهور برگ پرچم، از مرحله آبستنی تا گلدهی گیاه (بر اساس کدهای ۴۳ و ۶۱ مقیاس $BBCH$) انجام شد.

برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی برگ پرچم، برگ‌ها پس از تمیز کردن، به پنج قسمت تقسیم شده و در فالكون‌های حاوی ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر دو بار تقطیر قرار گرفتند. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای چهار درجه سانتی‌گراد، هدایت الکتریکی آن‌ها با دستگاه EC متر (مدل Mi 180 Bench Meter) اندازه‌گیری شد.

شاخص کلروفیل برگ پرچم با دستگاه کلروفیل‌سنج (SPAD-502 مینولتا، ژاپن) اندازه‌گیری شد. شاخص نیتروژن برگ از همان برگ‌هایی که شاخص کلروفیل اندازه‌گیری شد و بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (Scharf et al., 2006).

$$N = 0.017332 + 0.0016322 \times SPAD \quad [1]$$

شاخص‌های فلورسانس کلروفیل (F_v/F_m , F_m , F_0) نیز با دستگاه فلورسانس کلروفیل (Optic Science-OS-30، آمریکا) اندازه‌گیری شدند. برای این منظور، به طور تصادفی شش برگ پرچم توسعه‌یافته (در بازه زمانی ۸-۱۰ صبح) انتخاب و پس از ۲۰ دقیقه قرارگیری در تاریکی با استفاده از کلیپس‌های مخصوص، مقادیر F_0 (حداقل فلورسانس)، F_m (حداکثر فلورسانس)، F_v (فلورسانس متغیر) و F_v/F_m (حداکثر عملکرد کوانتومی فتوسیستم II) ثبت شدند (Sourazar and Seyed Sharifi, 2023). محتوای پروتئین محلول برگ پرچم نیز در مرحله گلدهی (۶۱ $BBCH$) با روش برادفورد (Bradford, 1976) اندازه‌گیری شد.

در زمان رسیدگی، پنج بوته از هر گلدان برداشت و میانگین عملکرد بوته‌ها، به عنوان عملکرد دانه تک بوته در تجزیه داده‌ها استفاده شد. تجزیه داده‌ها با نرم‌افزار آماری

1. Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry

با افزایش پایداری پروتئین‌های تیلاکوئیدی، در جلوگیری از تجزیه کلروفیل و حفظ کارایی فتوسنتزی گیاهان موثر است (Wang et al., 2024). از طرفی، کلروفیل نه تنها در فرآیند فتوسنتز بلکه در تولید پروتئین‌های محلول که به‌عنوان ذخایر نیتروژن شناخته می‌شوند نیز نقش دارد. این پروتئین‌ها برای تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه برای ادامه فرآیند فتوسنتز ضروری هستند (Liu et al., 2021). ضمن آنکه سنتز کلروفیل یک فرآیند پیچیده بوده و به عناصر معدنی مختلف مانند آهن، منگنز، مس و روی وابسته است (Wang and Grimm, 2015) و به نظر می‌رسد افزایش شاخص کلروفیل با کاربرد سلنیوم می‌تواند ناشی از تأثیر سلنیوم در تقویت جذب عناصر مورد نیاز برای سنتز کلروفیل باشد که منجر به افزایش شاخص کلروفیل در برگ‌ها شده است (Luo et al., 2019).

مطالعه وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) نشان داد که محلول پاشی سلنیوم موجب افزایش محتوای کلروفیل برگ‌ها در مرحله تشکیل غلاف می‌شود، مرحله‌ای که معمولاً برگ‌ها وارد فرایند پیری شده و کلروفیل شروع به تجزیه می‌کند. این افزایش غلظت کلروفیل به توانایی سلنیوم در مهار فرایند تخریب کلروفیل نسبت داده می‌شود که موجب حفظ عملکرد کلروفیل برای مدت‌زمان بیشتری می‌شود. از این رو استفاده از سلنیوم می‌تواند تأثیر قابل توجهی در کاهش آسیب‌های ناشی از تجزیه کلروفیل و افزایش فرایند فتوسنتزی داشته باشد.

کاربرد قارچ میکوریزا نیز در افزایش شاخص کلروفیل مؤثر بود. در این زمینه بررسی‌های مصطفوی و همکاران (Mostafavi et al., 2024) نشان داد که گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزا تحت تنش شوری شاخص سبزینگی برگ بالاتری نسبت به گیاهان تلقیح نشده داشته و اظهار داشتند که کاربرد قارچ میکوریزا در بهبود جذب مواد مغذی، تنظیم تبادلات گازی و افزایش محتوای کلروفیل در شرایط نامساعد محیطی نقش مثبتی داشته و می‌تواند پتانسیل فتوسنتزی گیاهان را در شرایط شوری افزایش دهد. در این بررسی استفاده توأم میکوریزا و سلنیوم تأثیر بیشتری بر بهبود شاخص کلروفیل نسبت به استفاده انفرادی از این تیمارها داشت که نشان‌دهنده اثرات هم‌افزایی این دو عامل در تعدیل و یا کاهش اثرات ناشی از شوری است که می‌تواند به بهبود شاخص کلروفیل (جدول ۲) و افزایش تولید پروتئین‌های

SAS ver 9.4، رسم نمودارها با Excel و مقایسات میانگین با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص کلروفیل

تجزیه واریانس نشان داد که اثر سه‌جانبه شوری، میکوریزا و محلول پاشی سلنیوم در تمامی مراحل نمونه‌برداری (به‌غیر از ۷۸ روز پس از کشت) بر شاخص کلروفیل معنی‌داری بود (جدول ۱). بیش‌ترین شاخص کلروفیل در اوایل نمونه‌برداری (۶۲ روز پس از کاشت) مشاهده شد و با گذشت زمان و پیری گیاه، در تمامی ترکیبات تیماری، شاخص کلروفیل برگ پرچم روندی کاهشی نشان داد و شدت این کاهش در سطوح بالای شوری بیشتر بود (جدول ۲). به نظر می‌رسد شوری جذب نیتروژن و سنتز کلروفیل را مختل و موجب کاهش قابل توجه شاخص‌های نیتروژن و کلروفیل می‌شود (جدول ۲). همچنین این تنش بر دسترسی گیاه به عناصر غذایی اثر منفی داشته و در تجزیه کلروفیل و کاهش آن در مراحل پایانی رشد گیاه به دلیل تشدید پیری برگ‌ها موثر است. نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان مبنی بر کاهش شاخص‌های نیتروژن و کلروفیل تحت تنش شوری، گزارش شده است (Sourazar and Seyed Sharifi, 2023). اما استفاده توأم از میکوریزا و محلول پاشی سلنیوم، موجب افزایش شاخص کلروفیل شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کم‌ترین شاخص کلروفیل در تمامی مراحل نمونه‌برداری از جمله در مراحل آبستنی و گلدهی (به ترتیب در ۶۲ و ۸۶ روز پس از کاشت) در شرایط عدم استفاده از میکوریزا و سلنیوم در شوری ۱۳۰ میلی‌مولار به‌دست آمد. به بیانی دیگر در بالاترین سطح شوری در مراحل آبستنی و گلدهی، استفاده توأم میکوریزا و سلنیوم منجر به افزایش ۳۱ و ۳۷/۸ درصدی شاخص کلروفیل نسبت به سطح شاهد (عدم کاربرد میکوریزا و سلنیوم) شد.

کلروفیل به‌عنوان رنگدانه اصلی در فرآیند فتوسنتز گیاهان نقش حیاتی داشته و در برگ‌ها به کمپلکس‌های پروتئینی متصل است. این اتصال از سلول‌ها در برابر آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از مولکول‌های آزاد محافظت می‌کند. در صورتی‌که کلروفیل از پروتئین‌های کمپلکس جذب‌کننده نور (LHCs) در تیلاکوئیدها جدا شود، می‌تواند به ساختار سلولی آسیب وارد کند و عملکرد کوانتومی (جدول ۸) گیاه را کاهش دهد (Kuai et al., 2018; Saeedi et al., 2024). در این زمینه، کاربرد سلنیوم در شرایط شوری

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر میکوریزا و سلنیوم بر شاخص های کلروفیل و نیتروژن برگ پرچم چاودار تحت تنش شوری.
Table 1. Analysis of variance (mean square) the effects of mycorrhiza and selenium on chlorophyll and nitrogen indices flag leaf of rye under salinity stress.

S. O. V	منابع تغییر	df	شاخص کلروفیل (روز پس از کاشت) Chlorophyll Index (Spad) (Days after planting)						
			62	66	70	74	78	82	86
			Block	بلوک	2	50.73**	25.31**	68.55**	85.72**
Salinity (S)	شوری	2	1193.86**	1266.45**	1320.08**	931.03**	1347.01**	1151.63**	948.82**
Mycorrhiza (M)	مایکوریزا	1	510.93**	236.53**	186.24**	288.40**	267.96**	201.00**	375.84**
Selenium (Se)	سلنیوم	3	835.43**	897.1**	765.59**	856.32**	731.84**	894.81**	830.39**
S×M	شوری × مایکوریزا	2	19.25*	3.99 ^{ns}	11.99 ^{ns}	20.42**	32.24*	15.42 ^{ns}	7.77 ^{ns}
S×Se	شوری × سلنیوم	6	26.81**	25.14**	41.56**	47.86**	19.62**	47.06**	19.11**
M×Se	مایکوریزا × سلنیوم	3	1.40 ^{ns}	16.18 ^{ns}	16.26*	28.65**	17.00*	9.58 ^{ns}	19.47**
S×M×Se	شوری × مایکوریزا × سلنیوم	6	33.02**	27.15**	23.69**	6.52*	6.97 ^{ns}	14.33*	9.36*
Error	خطا	46	5.04	3.94	4.66	2.79	4.22	4.91	3.26
CV(%)	ضریب تغییرات	-	4.7	4.5	5.9	4.5	5.3	5.8	5.3

Table 1. Continued

جدول ۱. ادامه

S. O. V	منابع تغییر	df	شاخص نیتروژن (روز پس از کاشت) Nitrogen Index (Days after planting)						
			62	66	70	74	78	82	86
			Block	بلوک	2	0.00014**	0.000067*	0.000183**	0.000228**
Salinity (S)	شوری	2	0.00318**	0.003374**	0.003517**	0.002480**	0.003588**	0.003068**	0.002528**
Mycorrhiza (M)	مایکوریزا	1	0.001361**	0.000630**	0.000496**	0.000768**	0.000714**	0.000535**	0.0001001**
Selenium (Se)	سلنیوم	3	0.002226**	0.002390**	0.002039**	0.002281**	0.001950**	0.002384**	0.002212**
S×M	شوری × مایکوریزا	2	0.000051*	0.000011 ^{ns}	0.000032 ^{ns}	0.000054*	0.000086*	0.000041 ^{ns}	0.000021 ^{ns}
S×Se	شوری × سلنیوم	6	0.000071**	0.000067**	0.000111**	0.000127**	0.000052**	0.000125**	0.000051**
M×Se	مایکوریزا × سلنیوم	3	0.000004 ^{ns}	0.000016 ^{ns}	0.000043*	0.000076**	0.000045*	0.000025 ^{ns}	0.000052*
S×M×Se	شوری × مایکوریزا × سلنیوم	6	0.000088**	0.000046*	0.000063**	0.000017*	0.000018 ^{ns}	0.000038*	0.000025*
Error	خطا	46	0.000013	0.000010	0.000012	0.000007	0.000011	0.000013	0.000009
CV(%)	ضریب تغییرات	-	3.8	3.6	4.7	3.2	4.6	4.5	3.8

ns, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively

تربیتیکاله تحت تنش شوری، افزایش شاخص کلروفیل در نتیجه همزیستی با قارچ میکوریزا را به نقش عناصر کلیدی

محلول (شکل ۱ الف) کمک کند. نریمانی و همکاران (Narimani et al., 2024) در مطالعه‌ای بر روی گیاه

مانند نیتروژن و منیزیم در ساختار مولکولی کلروفیل و بهبود جذب این عناصر توسط گیاه نسبت دادند. آقایی و همکاران (Aghaei et al., 2021) نیز در پژوهشی بر روی گندم نشان دادند کاربرد قارچ میکوریزا با کاهش گونه‌های فعال اکسیژن و افزایش پایداری غشاء سلولی از طریق افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی، می‌توانند به طور غیرمستقیم موجب افزایش محتوای کلروفیل در برگ‌ها شوند.

شاخص نیتروژن برگ پرچم

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش هر سه عامل شوری، میکوریزا و سلنیوم در تمامی مراحل نمونه‌برداری (به جز در مرحله ۷۸ روز پس از کاشت) بر شاخص نیتروژن معنی‌دار شد (جدول ۱). به نظر می‌رسد شوری به دلیل تأثیر منفی بر جذب مواد مغذی توسط گیاه، منجر به کاهش شاخص نیتروژن شد، اما کاربرد میکوریزا و سلنیوم قادر بودند بخشی از اثرات منفی ناشی از شوری را تعدیل و شاخص نیتروژن را افزایش دهند. طوری که مقایسه میانگین‌ها نشان داد در تمامی مراحل نمونه‌برداری، شاخص نیتروژن در کاربرد توأم میکوریزا و سلنیوم (به‌ویژه در کاربرد ۳ و ۴/۵ میلی گرم

در لیتر سلنیوم) به طور قابل‌توجهی افزایش یافت که نشان‌دهنده اثر مثبت کاربرد این سطوح از سلنیوم در بهبود وضعیت نیتروژن گیاهان تحت تنش شوری است (جدول ۲). گرچه در تمامی تیمارها با گذشت زمان کاهش شاخص نیتروژن در نتیجه پیری گیاه، امری طبیعی است، ولی شدت این کاهش در سطوح بالای شوری و عدم کاربرد میکوریزا و سلنیوم بیشتر از دیگر ترکیبات تیماری بود. البته کاربرد میکوریزا و سلنیوم در تمامی مراحل به‌ویژه در مراحل اولیه نمونه‌برداری (۶۲ روز پس از کشت)، از شاخص نیتروژن بالاتری برخوردار بود. در اکثر مراحل نمونه‌برداری و در تمامی سطوح شوری، بالاترین مقادیر شاخص نیتروژن متعلق به کاربرد توأم میکوریزا با مقادیر بالای سلنیوم و کمترین این مقادیر را تیمارهای بدون تعدیل‌کننده (عدم کاربرد سلنیوم و میکوریزا) داشتند (جدول ۲). به نظر می‌رسد میکوریزا با حل کردن و آزادسازی NPK از منابع نامحلول در خاک به‌ویژه نیتروژن که به طور مستقیم بر شاخص کلروفیل و عملکرد فتوسنتزی گیاه تأثیر می‌گذارد، منجر به افزایش جذب نیتروژن توسط گیاه (Sheteiwy et al., 2021) و به تبع از آن منجر به افزایش شاخص نیتروژن (جدول ۲)،

جدول ۲. مقایسه میانگین تأثیر میکوریزا و سلنیوم بر شاخص‌های کلروفیل و نیتروژن برگ پرچم چاودار تحت تنش شوری.

Table 2. Means comparison of effects of mycorrhiza and selenium on chlorophyll and nitrogen indices flag leaf of rye under salinity stress.

تیمارها Treatments	شاخص کلروفیل (روز پس از کاشت) Chlorophyll Index (Spad) (Day after planting)					
	62	66	70	74	82	86
S ₁ ×M ₁ ×Se ₁	40.73	37.73	37.03	35.73	33.53	29.23
S ₁ ×M ₁ ×Se ₂	47.13	52.20	52.07	46.63	45.03	39.03
S ₁ ×M ₁ ×Se ₃	57.90	55.73	54.47	48.80	48.57	44.93
S ₁ ×M ₁ ×Se ₄	59.33	56.70	55.57	53.10	49.27	49.60
S ₁ ×M ₂ ×Se ₁	49.63	47.63	46.53	37.03	36.50	37.03
S ₁ ×M ₂ ×Se ₂	60.43	51.20	49.40	51.97	45.77	45.80
S ₁ ×M ₂ ×Se ₃	62.33	58.73	53.03	54.07	50.67	46.83
S ₁ ×M ₂ ×Se ₄	61.53	57.87	56.73	54.63	51.47	48.67
S ₂ ×M ₁ ×Se ₁	35.77	30.80	29.57	29.47	24.57	22.97
S ₂ ×M ₁ ×Se ₂	44.57	35.63	32.97	33.30	30.20	28.20
S ₂ ×M ₁ ×Se ₃	46.23	41.90	43.17	39.87	41.07	35.67
S ₂ ×M ₁ ×Se ₄	51.80	50.00	48.63	48.07	46.50	41.63
S ₂ ×M ₂ ×Se ₁	38.97	34.77	34.63	34.33	34.60	31.87
S ₂ ×M ₂ ×Se ₂	43.23	43.13	38.47	44.97	38.30	33.10
S ₂ ×M ₂ ×Se ₃	54.63	45.23	45.17	45.43	42.37	42.97
S ₂ ×M ₂ ×Se ₄	56.10	53.43	50.60	50.30	47.53	44.07
S ₃ ×M ₁ ×Se ₁	33.43	29.70	28.63	27.47	23.13	21.73
S ₃ ×M ₁ ×Se ₂	34.43	33.57	32.1	28.43	27.60	24.23
S ₃ ×M ₁ ×Se ₃	40.03	39.03	33.63	38.30	29.13	30.53
S ₃ ×M ₁ ×Se ₄	45.33	44.50	41.57	41.97	39.30	36.27
S ₃ ×M ₂ ×Se ₁	37.13	31.97	30.47	30.63	26.40	25.70
S ₃ ×M ₂ ×Se ₂	37.70	36.03	39.93	31.33	28.23	27.23
S ₃ ×M ₂ ×Se ₃	45.57	42.20	35.60	43.53	31.90	35.33
S ₃ ×M ₂ ×Se ₄	53.37	48.80	47.47	40.93	44.27	40.27
LSD (0.05)	3.69	3.26	3.54	2.74	3.64	2.96

Table 2. Continued

تیمارها Treatments	شاخص نیتروژن (روز پس از کاشت) Nitrogen Index (Day after planting)					
	62	66	70	74	82	86
S ₁ ×M ₁ ×Se ₁	0.084	0.079	0.078	0.076	0.072	0.065
S ₁ ×M ₁ ×Se ₂	0.094	0.102	0.102	0.093	0.091	0.081
S ₁ ×M ₁ ×Se ₃	0.112	0.108	0.106	0.097	0.097	0.091
S ₁ ×M ₁ ×Se ₄	0.114	0.110	0.108	0.104	0.098	0.098
S ₁ ×M ₂ ×Se ₁	0.098	0.095	0.093	0.078	0.077	0.078
S ₁ ×M ₂ ×Se ₂	0.116	0.101	0.098	0.102	0.092	0.092
S ₁ ×M ₂ ×Se ₃	0.119	0.113	0.104	0.105	0.100	0.094
S ₁ ×M ₂ ×Se ₄	0.118	0.112	0.110	0.106	0.101	0.097
S ₂ ×M ₁ ×Se ₁	0.076	0.068	0.065	0.065	0.057	0.055
S ₂ ×M ₁ ×Se ₂	0.090	0.075	0.071	0.072	0.067	0.063
S ₂ ×M ₁ ×Se ₃	0.093	0.086	0.088	0.082	0.084	0.075
S ₂ ×M ₁ ×Se ₄	0.102	0.092	0.097	0.09	0.093	0.085
S ₂ ×M ₂ ×Se ₁	0.081	0.074	0.074	0.073	0.074	0.069
S ₂ ×M ₂ ×Se ₂	0.088	0.088	0.080	0.091	0.080	0.071
S ₂ ×M ₂ ×Se ₃	0.106	0.091	0.091	0.091	0.086	0.087
S ₂ ×M ₂ ×Se ₄	0.109	0.104	0.099	0.099	0.095	0.089
S ₃ ×M ₁ ×Se ₁	0.072	0.066	0.064	0.062	0.055	0.053
S ₃ ×M ₁ ×Se ₂	0.073	0.072	0.070	0.064	0.062	0.057
S ₃ ×M ₁ ×Se ₃	0.083	0.081	0.072	0.080	0.065	0.067
S ₃ ×M ₁ ×Se ₄	0.091	0.090	0.085	0.086	0.081	0.076
S ₃ ×M ₂ ×Se ₁	0.078	0.069	0.067	0.067	0.060	0.059
S ₃ ×M ₂ ×Se ₂	0.079	0.076	0.082	0.068	0.063	0.062
S ₃ ×M ₂ ×Se ₃	0.092	0.086	0.075	0.088	0.069	0.075
S ₃ ×M ₂ ×Se ₄	0.104	0.097	0.095	0.084	0.089	0.083
LSD (0.05)	0.006	0.005	0.006	0.004	0.006	0.005

S₁, S₂ و S₃ به ترتیب عدم اعمال شوری و شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی مولار. M₁ و M₂ به ترتیب بدون و با کاربرد میکوریزا. Se₁, Se₂, Se₃ و Se₄ به ترتیب محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی گرم در لیتر سلنیوم.
S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 65 and 130 mM salinity. M₁ and M₂ are without and with application of mycorrhiza. Se₁, Se₂, Se₃ and Se₄ are foliar application with water as control and foliar application 1.5, 3 and 4.5 mg. L⁻¹ of selenium.

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تاثیر میکوریزا و سلنیوم بر هدایت الکتریکی برگ پرچم چاودار تحت تنش شوری.

Table 3. Analysis of variance (mean square) of effects of mycorrhiza and selenium on the electrical conductivity flag leaf of rye under salinity stress.

S. O. V	منابع تغییر df	هدایت الکتریکی (روز پس از کاشت) Electrical Conductivity (Day after planting)							
		62	66	70	74	78	82	86	
Block	بلوک	2	150.27**	1117.20**	545.69**	292.14**	1474.20**	1263.42**	1096.34**
Salinity (S)	شوری	2	582.98**	3173.17**	4560.48**	6765.39**	5206.04**	6449.89**	15056.78**
Mycorrhiza (M)	مایکوریزا	1	112.72**	784.08**	1587.66**	1030.58*	1201.32**	1091.22**	1788.02**
Selenium (Se)	سلنیوم	3	405.57**	2648.13**	3092.72**	5339.21**	3922.83**	4492.93**	9731.14**
S×M	شوری×مایکوریزا	2	9.85 ^{ns}	122.90**	59.09 ^{ns}	84.93*	2.84 ^{ns}	26.57 ^{ns}	251.12*
S×Se	شوری×سلنیوم	6	14.18**	121.71**	133.06**	184.98**	89.44 ^{ns}	165.19**	204.18*
M×Se	مایکوریزا×سلنیوم	3	10.53*	64.45**	29.53 ^{ns}	51.36*	184.36**	22.70 ^{ns}	95.16 ^{ns}
S×M×Se	شوری×مایکوریزا×سلنیوم	6	1.64 ^{ns}	22.60**	87.48**	67.42**	95.77*	90.60 ^{ns}	192.54*
Error	خطا	46	3.40	6.85	20.21	17.08	41.38	48.13	63.79
CV(%)	ضریب تغییرات	-	5.1	4.2	6.2	4.7	6.7	6	5.9

ns, * و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

ns, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

الکتریکی نسبت به همان سطوح شوری در عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌ها شد (جدول ۴).

به‌نظر می‌رسد کاربرد میکوریزا با حفظ پایداری غشای سلولی و جلوگیری از نشت الکترولیت‌ها، ضمن کاهش هدایت الکتریکی و تعدیل اثرات ناشی از شوری، از تخریب کلروفیل و کاهش عملکرد کوانتومی جلوگیری کرده و مقادیر شاخص‌های فتوسنتزی نظیر Fv'/Fm' و NPQ را بهبود می‌بخشد (Narimani et al., 2024; Wu et al., 2016).

سلنیوم نیز می‌تواند با تاثیر بر جذب عناصر غذایی و تعامل با پلاسما (غشای پلاسمایی) و فرایندهای متابولیکی سلول، ضمن تنظیم تجمع یون‌ها در سلول‌های گیاهی، نفوذپذیری غشای پلاسمایی را برای برخی یون‌ها تغییر داده و به تعادل یون‌ها در سلول کمک کند. به بیانی دیگر تغییرات مثبت ناشی از سلنیوم می‌تواند با حفظ تعادل یونی و کمک به پایداری غشای سلولی، از آسیب‌های احتمالی به غشا جلوگیری و منجر به کاهش هدایت الکتریکی شود (Ameen et al., 2024). دادنیا (Dadnia, 2018) گزارش کرد که استفاده از سلنیوم موجب کاهش نشت یون از دیواره سلولی گیاه گندم در شرایط تنش شد. برخی محققان اظهار داشتند که سلنیوم می‌تواند از قطعه‌قطعه شدن میتوکندری در اثر تنش جلوگیری کرده و تا حدودی با کنترل فرآیند تنفس، از تخریب غشای سلولی و افزایش هدایت الکتریکی جلوگیری کند (Seppänen et al., 2015).

فلورسانس کمینه

سطوح شوری، میکوریزا و سلنیوم اثر معنی‌داری بر فلورسانس کمینه در تمامی مراحل نمونه‌برداری داشت (جدول ۵). در تمامی مراحل نمونه‌برداری با افزایش شوری، مقادیر فلورسانس حداقل افزایش و با کاربرد میکوریزا و سلنیوم کاهش یافت (جدول ۶). کاربرد میکوریزا همراه با ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم در شرایط عدم اعمال شوری در تمامی مراحل نمونه‌برداری، از کم‌ترین فلورسانس حداقل نسبت به دیگر ترکیب‌های تیماری برخوردار بود (جدول ۶). شوری بر فرایندهای فتوسنتزی، به‌ویژه عملکرد فتوسیستم II، تأثیر منفی می‌گذارد و در این زمینه یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی کارایی PSII، فلورسانس کمینه (F0) است. افزایش F0 تحت تنش شوری نشان دهنده کاهش پایداری PSII و آسیب به پروتئین‌های کلیدی نظیر D1 است (He et al., 2023). در پژوهشی مشابه آقایی و همکاران

میزان نیتروژن برگ‌ها و در نتیجه افزایش محتوای پروتئین برگ (شکل ۱ الف) و همچنین افزایش شاخص کلروفیل شده است (جدول ۲). به بیانی دیگر وجود رابطه قوی بین شاخص کلروفیل و نیتروژن (Moenirad et al., 2021) موجب شده است که ترکیبات تیماری با مقادیر بالای شاخص نیتروژن، معمولاً با شاخص کلروفیل (جدول ۲) بالاتر همراه باشند. از طرفی سلنیوم می‌تواند بیان آنزیم‌های کلیدی مرتبط با متابولیسم نیتروژن را افزایش داده و کارایی استفاده از نیتروژن در گیاهان را بهبود بخشد. این تأثیر ممکن است از طریق چرخه گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سینتتاز باشد که فرآیند تثبیت نیتروژن و تبدیل نیتروژن معدنی به ترکیبات آلی قابل استفاده را، تسریع کند. محصولات این فرآیند می‌توانند به‌عنوان سیگنال‌ها یا پیش‌سازهای عمل کنند که متابولیسم اولیه و ثانویه گیاهان را تنظیم نموده و در نتیجه غلظت نیتروژن در برگ‌ها را افزایش دهند (Sun et al., 2025).

هدایت الکتریکی برگ پرچم

اثرات شوری، میکوریزا و سلنیوم در تمامی مراحل نمونه‌برداری (به‌جز روزهای ۶۲ و ۸۲ روز پس از کاشت) بر هدایت الکتریکی برگ پرچم چاودار معنی‌دار بود (جدول ۳). مقادیر هدایت الکتریکی با گذشت زمان و افزایش غلظت شوری، افزایش یافت که نشان‌دهنده اثر منفی شوری بر کاهش جذب آب و افزایش فشار اسمزی داخل سلولی است که منجر به آسیب غشای سلولی می‌شود، و چون غشاهای آسیب دیده دیگر قادر به حفظ ترکیبات داخل سلولی نیستند در نتیجه منجر به افزایش هدایت الکتریکی در گیاه می‌شود (Zong et al., 2023).

بیش‌ترین هدایت الکتریکی در شوری ۱۳۰ میلی‌مولار در آخرین مرحله رشدی مشاهده شد. با این حال، استفاده توأم میکوریزا و سلنیوم، به‌ویژه در محلول‌پاشی ۳ و ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم، موجب کاهش ۳۶/۴ تا ۵۵/۵ درصدی هدایت الکتریکی نسبت به عدم کاربرد میکوریزا و سلنیوم در همان سطح شوری شد (جدول ۴).

کاربرد توأم میکوریزا با ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم در شرایط عدم اعمال شوری، کم‌ترین هدایت الکتریکی را در مرحله آبستنی نشان داد. در سطوح شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌مولار، کاربرد توأم میکوریزا با ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به ترتیب موجب کاهش ۸۷ و ۳۶ درصدی هدایت

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر مایکوریزا و سلنیوم بر هدایت الکتریکی برگ پرچم چاودار تحت تنش شوری.

Table 4. Mean comparison the effects of mycorrhiza and selenium on electrical conductivity flag leaf of rye under salinity stress.

تیمارها Treatments	هدایت الکتریکی (روز پس از کاشت) Electrical Conductivity (Day after planting)				
	66	70	74	78	86
	----- $\mu\text{S cm}^{-1}$ -----				
S ₁ ×M ₁ ×Se ₁	73.50	83.93	99.23	107.03	148.56
S ₁ ×M ₁ ×Se ₂	54.20	72.06	74.23	84.00	101.06
S ₁ ×M ₁ ×Se ₃	49.66	53.93	62.40	78.76	94.00
S ₁ ×M ₁ ×Se ₄	38.50	51.46	58.60	66.03	89.93
S ₁ ×M ₂ ×Se ₁	68.66	65.90	92.30	89.83	122.93
S ₁ ×M ₂ ×Se ₂	44.53	49.76	71.23	76.43	109.60
S ₁ ×M ₂ ×Se ₃	41.50	47.90	56.60	71.43	98.00
S ₁ ×M ₂ ×Se ₄	36.10	45.93	53.80	68.56	86.66
S ₂ ×M ₁ ×Se ₁	86.36	98.00	121.06	127.70	180.80
S ₂ ×M ₁ ×Se ₂	77.53	75.83	104.93	112.33	152.90
S ₂ ×M ₁ ×Se ₃	63.20	74.53	82.20	91.80	130.43
S ₂ ×M ₁ ×Se ₄	52.20	63.93	68.80	82.86	114.36
S ₂ ×M ₂ ×Se ₁	75.26	85.43	95.96	103.53	167.26
S ₂ ×M ₂ ×Se ₂	55.73	78.73	88.80	100.76	144.40
S ₂ ×M ₂ ×Se ₃	56.96	59.30	79.10	95.33	125.86
S ₂ ×M ₂ ×Se ₄	46.20	56.56	65.53	80.26	105.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₁	85.16	102.70	123.20	130.03	183.50
S ₃ ×M ₁ ×Se ₂	83.56	99.73	113.83	120.33	171.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₃	65.53	88.46	107.76	116.10	161.80
S ₃ ×M ₁ ×Se ₄	65.13	68.90	85.03	87.33	138.20
S ₃ ×M ₂ ×Se ₁	81.23	95.03	118.06	124.33	176.33
S ₃ ×M ₂ ×Se ₂	79.23	92.50	110.96	109.40	158.43
S ₃ ×M ₂ ×Se ₃	67.26	81.56	102.20	100.20	134.46
S ₃ ×M ₂ ×Se ₄	62.66	62.16	75.93	86.20	118.00
LSD (0.05)	4.30	7.38	6.79	10.57	13.12

S₁, S₂ و S₃ به ترتیب بدون شوری و شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی مولار. M₁ و M₂ به ترتیب بدون و با کاربرد مایکوریزا. Se₁, Se₂, Se₃ و Se₄ به ترتیب محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی گرم سلنیوم.

S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 65 and 130 mM salinity. M₁ and M₂ are without and with application of mycorrhiza. Se₁, Se₂, Se₃ and Se₄ are foliar application with water as control and foliar application 1.5, 3 and 4.5 mgL⁻¹ of selenium.

لیپیدی (Puccinelli et al., 2017)، ضمن بهبود پایداری غشاها و کاهش هدایت الکتریکی (جدول ۴)، از افزایش FO جلوگیری می کند. همچنین سلنیوم با افزایش شاخص کلروفیل (جدول ۲) و فلورسانس بیشینه (جدول ۶)، به دلیل ایجاد شرایط بهینه مراکز واکنش فتوسنتزی، عملکرد PSII را تثبیت می کند (Sheikhalipour et al., 2021).

فلورسانس بیشینه

اثرات توأم شوری، مایکوریزا و سلنیوم بر روند تغییرات فلورسانس بیشینه برگ پرچم چاودار در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین ها نشان داد که بالاترین مقدار فلورسانس بیشینه برگ پرچم در شرایط عدم اعمال شوری به دست آمد (جدول ۶). کاربرد سلنیوم و مایکوریزا منجر به افزایش فلورسانس بیشینه در تمامی سطوح شوری شد (جدول ۶). به طوری که در مرحله آبستنی (۶۲ روز پس از کاشت)، حداکثر فلورسانس بیشینه در کاربرد توأم مایکوریزا و محلول پاشی ۴/۵ میلی گرم در لیتر سلنیوم در

(Aghaei et al., 2021) گزارش کردند که تنش شوری با ایجاد محدودیت در جذب آب، ضمن کاهش محتوای نسبی آب برگ و تخریب ساختار کلروفیل، منجر به افزایش فلورسانس حداقل در برگ گندم شد. بخش دیگری از افزایش FO بواسطه شوری می تواند ناشی از تاثیر شوری در افزایش گونه های فعال اکسیژن و تخریب ساختار غشاهای تیلاکوئیدی مرتبط باشد. در چنین شرایطی به نظر می رسد کاربرد مایکوریزا نیز با تقویت سیستم دفاع آنتی اکسیدانی و افزایش جذب مواد مغذی، ضمن کاهش تولید گونه های فعال اکسیژن و حفظ پایداری PSII، موجب تقویت ساختار غشاهای تیلاکوئیدی و جلوگیری از نشت یونی شده (جدول ۴) و همین موضوع می تواند منجر به کاهش FO و افزایش نسبت Fv/Fm (جدول ۸) شود که نشان دهنده بهبود کارایی فتوسیستم II است (Porcel et al., 2015).

به نظر می رسد سلنیوم نیز به عنوان یک عنصر مفید، با تقویت سیستم آنتی اکسیدانی و کاهش پراکسیداسیون

به نظر می‌رسد قارچ‌های میکوریزا از طریق مکانیسم‌هایی مانند افزایش جذب مواد مغذی (به‌ویژه فسفر)، حفظ تعادل یونی، گسترش هیف‌های قارچی به مناطقی از خاک که ریشه قادر به نفوذ در همچون مناطقی نیست، با کمک به جذب آب و افزایش توانایی گیاه در برابر تنش‌های محیطی (Sheteiwy et al., 2021; Aghaei et al., 2021) موجب شده است که اختلالات در زنجیره انتقال الکترون علیرغم تنش شوری کاهش یافته و فلورسانس حداکثر افزایش یابد.

فلورسانس متغیر

اثرات سه‌جانبه شوری، میکوریزا و محلول‌پاشی سلنیوم در تمامی مراحل نمونه‌برداری بر فلورسانس متغیر در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۷). مقادیر فلورسانس متغیر با گذشت زمان احتمالاً به دلیل پیر شدن و کاهش فعالیت فتوسنتزی گیاه کاهش می‌یابد. روند مشابهی نیز در کاهش فلورسانس متغیر با افزایش سطوح شوری مشاهده گردید. به عبارتی افزایش شدت شوری منجر به کاهش ظرفیت پذیرش و انتقال الکترون در فتوسنتز و کاهش فلورسانس متغیر شد. این نتایج با یافته‌های نریمانی و همکاران (Narimani et al., 2024) مبنی بر اینکه شوری با کاهش شاخص کلروفیل و محتوای نسبی آب برگ تریتیکاله، موجب افزایش فلورسانس حداقل و کاهش فلورسانس متغیر در برگ پرچم شد هماهنگ است.

در مراحل مختلف نمونه‌برداری، کم‌ترین مقادیر فلورسانس متغیر در بالاترین سطح شوری در عدم کاربرد سلنیوم و میکوریزا و بیش‌ترین این مقدار در شرایط عدم اعمال شوری و کاربرد توأم میکوریزا و سلنیوم به دست آمد (جدول ۸). به بیانی دیگر کاربرد سلنیوم و میکوریزا قادر بودند اثرات منفی شوری را کاهش و به بهبود عملکرد فتوسنتزی گیاه در شرایط تنش کمک کنند (جدول ۸). فلورسانس متغیر که از تفاضل فلورسانس بیشینه و فلورسانس کمینه به دست می‌آید، از جمله شاخص‌های مهم کارایی فتوسنتزی است (Sourazar and Seyed Sharifi, 2023) و کاربرد میکوریزا و سلنیوم با افزایش فلورسانس بیشینه و کاهش فلورسانس کمینه (جدول ۶) منجر به افزایش این صفت شده است.

شرایط عدم اعمال شوری به دست آمد که در مقایسه با عدم کاربرد میکوریزا و سلنیوم تحت شوری ۱۳۰ میلی‌مولار، از افزایش ۹۹ درصدی برخوردار بود (جدول ۶).

در ۸۶ روز پس از کشت یا آخرین مرحله نمونه‌برداری که مصادف با مرحله گلدهی بود، بیش‌ترین فلورسانس بیشینه در کاربرد توأم میکوریزا با سه میلی‌گرم در لیتر سلنیوم در شرایط عدم اعمال شوری و کم‌ترین مقدار آن در بالاترین سطح شوری و عدم کاربرد میکوریزا و سلنیوم به دست آمد که از افزایش ۷۸/۷ درصدی فلورسانس بیشینه برخوردار بودند (جدول ۶). نتایج مشابهی نیز توسط صورآذر و سیدشریفی (Sourazar and Seyed Sharifi, 2023) مبنی بر افزایش مقدار فلورسانس بیشینه برگ پرچم گیاه تریتیکاله در شرایط تنش شوری با کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش گزارش شده است. آن‌ها اظهار داشتند که کاهش در فلورسانس بیشینه در شرایط تنش شوری ناشی از اختلال در زنجیره انتقال الکترون فتوسنتزی بواسطه تجمع نمک در سلول‌های گیاهی است که می‌تواند بر حرکت یون‌ها و سایر مولکول‌های ضروری و فتوسنتز تأثیر منفی گذاشته و عملکرد آنزیم‌ها و پروتئین‌های مربوط به انتقال الکترون در دستگاه فتوسنتزی را مختل کند. این اختلالات به‌ویژه در فتوسیستم II، منجر به کاهش کارایی فتوسنتز و در نتیجه کاهش فلورسانس بیشینه می‌شود. معمولاً فلورسانس بیشینه زمانی ایجاد می‌شود که فوتون‌های نوری به‌طور کامل جذب شده و تمامی ناقل‌های الکترون در فتوسیستم II احیا شده و همه مراکز واکنشی این سیستم بسته می‌شوند (Mehta et al., 2010). زمانی که مراکز واکنشی فتوسیستم II به‌طور کامل بسته شوند، عملکرد فلورسانس به تدریج افزایش یافته و در عین حال سرعت واکنش‌های فتوشیمیایی کاهش پیدا می‌کند. زیرا به هنگام بسته شدن مراکز واکنشی، فتوسیستم II قادر به پذیرش الکترون‌های بیشتری می‌شود و در نتیجه Fm (فلورسانس بیشینه) افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، هرچه بسته شدن سیستم به تأخیر افتد و الکترون‌های بیشتری در آن پذیرفته شوند، کارایی سیستم بالاتر خواهد بود. افزایش فلورسانس از حالت کمینه به بیشینه نیز به دلیل فعالیت کوئینون ب (QB) و ذخیره بالای پلاستوکوئینون در سیستم اتفاق می‌افتد (Mehta et al., 2010). با افزایش سطوح تنش، فلورسانس بیشینه کاهش می‌یابد و این کاهش ناشی از اختلالات ایجاد شده در فتوسیستم II و کاهش کارایی سیستم فتوسنتزی به دلیل شوری است.

جدول ۵. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر میکوریزا و سلنیوم بر فلورسانس کمینه و فلورسانس بیشینه برگ پرچم گیاه چاودار تحت تنش شوری.

Table 5. Analysis of variance (mean square) the effects of mycorrhiza and selenium on the minimum fluorescence and maximum fluorescence of flag leaf of rye under salinity stress.

S. O. V	منابع تغییر	df	فلورسانس کمینه (روز پس از کاشت)						
			Minimum Fluorescence (Day after planting)						
			62	66	70	74	78	82	86
Block	بلوک	2	190.79*	633.18**	822.79**	551.06**	737.79**	292.35*	1293.39**
Salinity (S)	شوری	2	8748.50**	11814.8**	10875.3**	9945.18**	11227.6**	13330.3**	16003.5**
Mycorrhiza (M)	مایکوریزا	1	3828.12**	2222.2**	3389.39**	1880.89**	946.12**	4186.1**	8106.8**
Selenium (Se)	سلنیوم	3	5698.64**	5936.8**	6389.41**	7366.69**	6168.8**	12247.3**	19105.6**
S×M	شوری×مایکوریزا	2	42.00 ^{ns}	238.43*	146.43 ^{ns}	29.76 ^{ns}	130.79 ^{ns}	396.17**	20.22 ^{ns}
S×Se	شوری×سلنیوم	6	200.24**	219.9**	123.45*	376.98**	641.87**	618.70**	303.65*
M×Se	مایکوریزا×سلنیوم	3	2.01 ^{ns}	45.07 ^{ns}	40.65 ^{ns}	233.59*	270.12*	275.94**	179.37 ^{ns}
S×M×Se	شوری×مایکوریزا×سلنیوم	6	268.67**	200.8**	275.13**	183.30*	170.29*	75.15 ^{ns}	371.42*
Error	خطا	46	32.60	30.40	47.25	53.07	41.75	41.98	107.17
CV (%)	ضریب تغییرات		4.83	4.6	5.9	5.2	4.2	3.8	5.8

Table 5. Continued جدول ۵. ادامه

S. O. V	منابع تغییر	df	فلورسانس بیشینه (روز پس از کاشت)						
			Maximum Fluorescence (Day after planting)						
			62	66	70	74	78	82	86
Block	بلوک	2	12155.01**	4882.60 ^{ns}	2612.26*	55268.17**	6168.79**	5967.06*	1286.68 ^{ns}
Salinity (S)	شوری	2	431281.6**	391171.7**	282216.51**	215463.1**	129692.4**	132950.8**	111947.5**
Mycorrhiza (M)	مایکوریزا	1	127596.6**	129201.3**	209881.1**	75336.68**	34936.06**	53192.35**	22.15.1**
Selenium (Se)	سلنیوم	3	351917.8**	289765.9**	294752.6**	23787.53**	122521.2**	100911.6**	93851.6**
S×M	شوری×مایکوریزا	2	5389.26 ^{ns}	3029.39 ^{ns}	17450.54**	16009.39*	2206.35**	1559.18 ^{ns}	1205.43 ^{ns}
S×Se	شوری×سلنیوم	6	8405.05**	10115.13**	5793.48**	8235.24**	3836.21*	2708.70*	2452.40*
M×Se	مایکوریزا×سلنیوم	3	5608.94 ^{ns}	8004.76*	753.38 ^{ns}	1156.83 ^{ns}	3421.80**	425.83 ^{ns}	1932.38 ^{ns}
S×M×Se	شوری×مایکوریزا×سلنیوم	6	7138.63*	8491.20**	1899.02*	3814.42**	1246.25*	3702.22*	2143.24*
Error	خطا	46	2239.26	1733.32	656.68	807.56	401.34	1115.50	712.01
CV %	ضریب تغییرات		5.8	5.5	3.5	4.3	3.9	6.2	5.8

ns, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

جدول ۶. مقایسه میانگین تاثیر مایکوریزا و سلنیوم بر فلورسانس کمینه و بیشینه پرچم چاودار تحت تنش شوری.

Table 6. Means comparison of effects of mycorrhiza and selenium on minimum and maximum fluorescence flag leaf of rye under salinity stress.

تیمارها Treatments	فلورسانس کمینه (روز پس از کاشت) (Minimum Fluorescence (Day after planting))					
	62	66	70	74	78	86
S ₁ ×M ₁ ×Se ₁	134.67	131.00	147.00	165.33	165.67	216.67
S ₁ ×M ₁ ×Se ₂	117.67	95.67	104.67	119.00	140.00	161.00
S ₁ ×M ₁ ×Se ₃	89.00	92.33	96.67	105.67	112.67	134.33
S ₁ ×M ₁ ×Se ₄	86.33	85.33	93.67	102.67	123.33	129.67
S ₁ ×M ₂ ×Se ₁	111.00	112.67	119.00	138.67	162.00	171.33
S ₁ ×M ₂ ×Se ₂	84.67	103.67	108.00	114.33	116.667	143.00
S ₁ ×M ₂ ×Se ₃	82.33	89.00	87.67	106.00	109.67	125.67
S ₁ ×M ₂ ×Se ₄	79.33	83.33	91.00	103.00	119.33	121.67
S ₂ ×M ₁ ×Se ₁	153.33	162.00	165.00	179.00	190.67	239.33
S ₂ ×M ₁ ×Se ₂	124.67	153.67	153.33	161.67	174.00	209.00
S ₂ ×M ₁ ×Se ₃	121.67	120.00	136.00	155.67	143.33	177.00
S ₂ ×M ₁ ×Se ₄	107.00	106.33	130.33	125.33	137.00	153.00
S ₂ ×M ₂ ×Se ₁	138.67	144.33	158.67	170.67	181.67	222.00
S ₂ ×M ₂ ×Se ₂	128.00	126.67	138.67	149.00	157.33	187.33
S ₂ ×M ₂ ×Se ₃	96.67	115.67	111.67	134.67	133.33 ¹	148.33
S ₂ ×M ₂ ×Se ₄	93.00	100.33	100.00	122.33	128.00	139.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₁	154.67	164.00	170.00	180.67	192.33	242.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₂	151.33	156.67	167.66	177.00	185.00	230.00
S ₃ ×M ₁ ×Se ₃	141.00	150.67	144.33	159.00	169.66	201.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₄	124.67	130.33	131.67	138.67	154.33	177.33
S ₃ ×M ₂ ×Se ₁	148.33	159.33	161.67	172.00	174.33	234.66
S ₃ ×M ₂ ×Se ₂	135.33	134.00	145.00	170.33	179.33	183.67
S ₃ ×M ₂ ×Se ₃	131.66	136.33	124.33	128.00	162.67	182.00
S ₃ ×M ₂ ×Se ₄	102.00	109.33	130.00	138.00	176.66	157.33
LSD (0.05)	9.38	9.04	11.29	11.97	10.61	17.01

Table 6. Continued

جدول ۶. ادامه

تیمارها Treatments	فلورسانس بیشینه (روز پس از کاشت) (Maximum Fluorescence (Day after planting))						
	62	66	70	74	78	82	86
S ₁ ×M ₁ ×Se ₁	774.67	635.67	635.33	564.67	495.67	484.00	470.00
S ₁ ×M ₁ ×Se ₂	873.33	851.33	801.33	779.67	669.00	546.67	616.00
S ₁ ×M ₁ ×Se ₃	1031.33	934.33	921.33	811.00	683.67	648.67	632.67
S ₁ ×M ₁ ×Se ₄	1066.00	997.67	936.67	857.00	731.33	672.67	645.00
S ₁ ×M ₂ ×Se ₁	793.00	810.67	690.00	589.67	542.33	535.00	532.00
S ₁ ×M ₂ ×Se ₂	1013.67	960.33	857.00	733.67	698.33	688.33	598.67
S ₁ ×M ₂ ×Se ₃	1049.33	977.00	956.67	848.67	709.33	703.00	660.67
S ₁ ×M ₂ ×Se ₄	1090.00	987.00	973.00	867.33	721.33	716.67	653.00
S ₂ ×M ₁ ×Se ₁	555.00	502.33	512.00	451.67	423.33	411.67	378.67
S ₂ ×M ₁ ×Se ₂	630.00	592.33	565.67	505.00	505.00	521.33	445.00
S ₂ ×M ₁ ×Se ₃	706.67	786.33	751.67	629.33	556.67	534.33	516.00
S ₂ ×M ₁ ×Se ₄	960.00	897.67	777.67	798.67	629.00	592.33	580.00
S ₂ ×M ₂ ×Se ₁	613.00	657.00	662.67	545.67	470.33	463.33	427.67
S ₂ ×M ₂ ×Se ₂	738.33	706.33	729.33	684.67	541.67	507.67	525.00
S ₂ ×M ₂ ×Se ₃	899.00	760.67	877.67	750.67	642.33	624.67	537.33
S ₂ ×M ₂ ×Se ₄	984.33	917.33	898.67	827.33	655.33	634.67	623.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₁	543.33	489.00	456.67	436.33	417.00	397.67	369.67
S ₃ ×M ₁ ×Se ₂	569.67	535.67	472.33	469.00	449.67	402.67	386.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₃	737.67	572.00	611.67	594.67	471.67	485.67	510.00
S ₃ ×M ₁ ×Se ₄	764.33	758.00	706.00	607.33	597.67	524.33	538.00
S ₃ ×M ₂ ×Se ₁	596.00	518.00	546.33	489.67	434.33	423.00	406.33
S ₃ ×M ₂ ×Se ₂	707.33	678.00	594.67	573.33	541.67	472.33	491.67
S ₃ ×M ₂ ×Se ₃	789.67	728.67	819.33	665.00	588.67	496.33	503.00
S ₃ ×M ₂ ×Se ₄	948.67	868.00	836.00	705.00	612.67	609.33	548.33
LSD (0.05)	77.77	68.42	42.11	46.70	32.92	54.89	43.85

S₁, S₂ و S₃ به ترتیب عدم اعمال شوری و اعمال شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی‌مولار. M₁ و M₂ به ترتیب بدون و با کاربرد مایکوریزا. Se₁, Se₂, Se₃ و Se₄ به ترتیب محلول پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول پاشی ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم.

S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 65 and 130 mM salinity. M₁ and M₂ are without and with application of mycorrhiza. Se₁, Se₂, Se₃ and Se₄ are foliar application with water as control and foliar application 1.5, 3 and 4.5 mg.L⁻¹ selenium

عملکرد کوانتومی

عدم کاربرد میکوریزا و سلنیوم در سطح شوری ۱۳۰ میلی مولار برخوردار بود. در سطح ثابت از کاربرد میکوریزا و محلول پاشی ۴/۵ میلی گرم در لیتر سلنیوم در مراحل ابتدا و انتهای نمونه برداری، شوری ۶۵ میلی مولار از افزایش ۶ تا ۱۶ درصدی عملکرد کوانتومی در مقایسه با شوری ۱۳۰ میلی مولار برخوردار بود (جدول ۸). عملکرد کوانتومی یکی از مهم ترین شاخص های فیزیولوژیکی برای ارزیابی بازده کوانتومی فتوسیستم (PSII) و ظرفیت فتوشیمیایی گیاه است که تنش های محیطی نظیر شوری با تاثیر مستقیم بر سیستم فتوسنتزی (Krause and Weis, 1988)، عملکرد کوانتومی را تحت تاثیر قرار می دهند. بخشی از کاهش عملکرد کوانتومی در شرایط تنش زا می تواند نشان دهنده تغییرات ساختاری و عملکردی در دستگاه فتوسنتزی باشد که بر رشد و بهره وری گیاه اثر منفی می گذارد (He et al., 2023). برخی محققان اظهار داشتند که شوری با ایجاد اختلال در خوشه منگنز (Manganese Cluster)، ساختار پروتئینی-فلزی شامل چهار اتم منگنز و یک اتم کلسیم که در مرکز واکنش PSII وظیفه اکسیداسیون آب و تولید اکسیژن را بر عهده دارد، مختل نموده و منجر به کاهش فعالیت فتوسیستم I و

مطابق نتایج تجزیه واریانس، کاربرد شوری، میکوریزا و سلنیوم در تمامی مراحل نمونه برداری (به جز نمونه برداری در ۷۴ و ۸۲ روز پس از کاشت)، بر عملکرد کوانتومی در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی دار بودند (جدول ۸). گرچه در تمامی ترکیبات تیماری با گذشت زمان، عملکرد کوانتومی از روند نزولی برخوردار بود ولی میزان این کاهش با افزایش شوری افزایش و با کاربرد میکوریزا و سلنیوم از کاهش کمتری برخوردار بود (جدول ۸ و ۹). به بیانی دیگر کاربرد میکوریزا با مقادیر ۳ و ۴/۵ میلی گرم در لیتر سلنیوم در شرایط عدم اعمال شوری، از بالاترین عملکرد کوانتومی در مراحل اولیه نمونه برداری در مقایسه با دیگر ترکیبات تیماری برخوردار بود، در حالی که عدم کاربرد میکوریزا و سلنیوم در سطوح شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی مولار، از کمترین عملکرد کوانتومی و از روند کاهشی شدیدتری در مقایسه با دیگر ترکیبات تیماری برخوردار بودند. در شرایط عدم شوری در مراحل ابتدا و انتهای نمونه برداری، عملکرد کوانتومی در اثر کاربرد توأم میکوریزا با ۳ میلی گرم در لیتر سلنیوم از افزایش به ترتیب ۶۴/۹ و ۸۶ درصدی عملکرد کوانتومی در مقایسه با

جدول ۷. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر میکوریزا و سلنیوم بر فلورسانس متغیر و عملکرد کوانتومی برگ پرچم گیاه چاودار تحت تنش شوری.

Table 7. Analysis of variance (mean square) the effects of mycorrhiza and selenium on the variable fluorescence and quantum yield of flag leaf of rye under salinity stress.

S. O. V	df	فلورسانس متغیر (روز پس از کاشت) Variable Fluorescence (Day after planting)						
		62	66	70	74	78	82	86
Block	2	9396.5*	5164.76 ^{ns}	914.18 ^{ns}	48782.3**	1654.2*	4103.5*	507.5 ^{ns}
Salinity (S)	2	559826**	538935**	401779.3**	315267.26**	216031.**	230464.6**	212398.6**
Mycorrhiza (M)	1	175626.8**	165312.5**	265599.1**	101025.1**	47380.6**	87222.7**	56840.6**
Selenium (Se)	3	446990.4**	378623.1**	387440.3**	330021.2**	181234.7**	183446.5**	197611.9**
S×M	2	4545.26 ^{ns}	3890.37 ^{ns}	20246.22**	17335.12**	1788.22*	1098.43 ^{ns}	1279.76 ^{ns}
S×Se	6	9866.22*	12975.7**	7135.09**	11464.8**	6881.15**	4572.88*	3792.16**
M×Se	3	5650.2 ^{ns}	9113.4*	999.2 ^{ns}	1968.4 ^{ns}	4823.6**	1114.9 ^{ns}	3139.5*
S×M×Se	6	9411.5*	10400.4**	9**21875	4074.9**	1286*	3362.5*	3441.9**
Error	46	2543.1	1699.6	574.41	841.39	442.99	1221.89	726.66
CV(%)	ضریب تغییرات	7.9	6.5	3.9	5.6	5	9.2	7.9

Table 7. Continued

S. O. V	منابع تغییر	عملکرد کوانتومی (روز پس از کاشت) (Quantum Yield (Day after planting))							
		df	62	66	70	74	78	82	86
Block	بلوک	2	0.0029 ^{ns}	0.0016 ^{ns}	0.0064 ^{**}	0.0064 [*]	0.0045 [*]	0.0011 ^{ns}	0.0048 [*]
Salinity (S)	شوری	2	0.1734 ^{**}	0.1626 ^{**}	0.1801 ^{**}	0.2112 ^{**}	0.2194 ^{**}	0.24531 ^{**}	0.2274 ^{**}
Mycorrhiza (M)	مایکوریزا	1	0.0948 ^{**}	0.0211 ^{**}	0.0674 ^{**}	0.0533 ^{**}	0.0376 ^{**}	0.0730 ^{**}	0.0523 ^{**}
Selenium (Se)	سلنیوم	3	0.1136 ^{**}	0.1789 ^{**}	0.1385 ^{**}	0.1627 ^{**}	0.01712 ^{**}	0.1545 ^{**}	0.1969 ^{**}
S×M	شوری×مایکوریزا	2	0.0041 [*]	0.0035 [*]	0.0002 ^{ns}	0.0021 ^{ns}	0.0044 [*]	0.0115 ^{**}	0.0121 ^{**}
S×Se	شوری×سلنیوم	6	0.0047 ^{**}	0.0041 ^{**}	0.0021 ^{ns}	0.0048 ^{**}	0.0054 ^{**}	0.0039 ^{ns}	0.0096 ^{**}
M×Se	مایکوریزا×سلنیوم	3	0.0032 [*]	0.0007 ^{ns}	0.0055 ^{**}	0.0025 ^{ns}	0.0022 ^{ns}	0.0036 ^{ns}	0.0099 ^{**}
S×M×Se	شوری×مایکوریزا×سلنیوم	6	0.0033 ^{**}	0.0027 [*]	0.0037 ^{**}	0.0015 ^{ns}	0.0025 [*]	0.0019 ^{ns}	0.0032 [*]
Error	خطا	46	0.0009	0.0011	0.0010	0.0013	0.0010	0.0020	0.0007
CV(%)	ضریب تغییرات		3.9	4.4	4.2	4.9	4.4	6.4	4.7

ns, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

موجب شد عملکرد کوانتومی در شرایط شوری بهبود قابل توجهی داشته باشد (جدول ۸). مطالعات متعدد تأیید کرده‌اند همزیستی گیاهان با مایکوریزا ضمن افزایش سرعت رشد و ویژگی‌های عملکردی تحت تنش، از طریق تنظیم تعادل هورمونی، موجب کاهش جذب مواد مغذی ضروری و فعالیت تنظیم کننده‌های رشدی می‌شود (Sheteiwy et al., 2021; Wahab et al., 2023). همچنین سلنیوم از طریق تنظیم سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن به حفظ ساختار PSII و افزایش Fv/Fm کمک می‌کند (Sheikhzadeh et al., 2022). نتایج پژوهشی نشان داد که در شرایط شوری، سلنیوم موجب کاهش انرژی تلف شده در فتوسیستم II می‌شود و به‌طور قابل توجهی به‌واسطه کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، پارامترهای شاخص عملکرد فتوسنتزی را افزایش می‌دهد (Saeedi et al., 2024). علاوه بر این، گزارش شده است که سلنیوم قادر است با تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، در بهبود کارایی فتوسنتزی گیاهان و افزایش نسبت Fv/Fm تحت تنش شوری نقش داشته باشد (Taha et al., 2021).

افت عملکرد کوانتومی می‌شود (Yadav and Pospíšil, 2012) و برخی دیگر معتقدند جداسازی پلاستوسیانین از سیستوکروم C553 تحت تأثیر شوری، منجر به اختلال در زنجیره انتقال الکترون و کاهش بازده فتوشیمیایی PSII می‌شود (He et al., 2023). شوری با اختلال در تعادل یون‌ها در کلروپلاست، موجب افزایش غلظت یون سدیم (+Na) و کاهش یا جابجایی کاتیون‌های ضروری مانند پتاسیم (+K) می‌شود. این تغییرات یونی می‌توانند بر تعاملات الکترواستاتیکی مورد نیاز برای عملکرد درست آنزیم‌های فتوسنتزی اثر منفی داشته باشد. از طرفی افزایش غلظت سدیم ضمن آسیب به ساختار غشای تیلاکوئید، سیالیت آن را کاهش داده و این مسئله با اختلال در فعالیت آنزیم‌های مرتبط با غشاء و انتقال الکترون در فتوسیستم II، به کاهش کارایی فتوسنتزی منجر می‌شود (Saeedi et al., 2024). همچنین شوری موجب دناتوره شدن پروتئین‌های کلیدی فتوسیستم II، از جمله پروتئین D1 می‌شود و کاهش ظرفیت فتوشیمیایی این سیستم، منجر به کاهش بازده فتوسیستم II و افت عملکرد کوانتومی می‌شود (Saeedi et al., 2024). کاربرد قارچ مایکوریزا و سلنیوم

جدول ۸. مقایسه میانگین تاثیر مایکوریزا و سلنیوم بر فلورسانس متغیر و عملکرد کوانتومی برگ پرچم چاودار تحت تنش شوری.

Table 8. Means comparison of effects of mycorrhiza and selenium on variable fluorescence and quantum yield flag leaf of rye under salinity stress.

تیمارها Treatments	فلورسانس متغیر (روز پس از کاشت) (Variable Fluorescence (Day after planting))						
	62	66	70	74	78	82	86
S ₁ ×M ₁ ×Se ₁	640.00	504.67	488.33	399.33	330.00	296.67	253.33
S ₁ ×M ₁ ×Se ₂	755.67	755.67	696.67	660.67	529.00	397.33	455.00
S ₁ ×M ₁ ×Se ₃	942.33	842.00	824.67	705.33	571.00	514.67	498.33
S ₁ ×M ₁ ×Se ₄	979.67	912.33	843.00	754.33	608.00	554.33	515.33
S ₁ ×M ₂ ×Se ₁	682.00	698.00	571.00	451.00	380.33f	353.67	360.67
S ₁ ×M ₂ ×Se ₂	929.00	856.67	749.00	619.33	581.67	563.00	455.67
S ₁ ×M ₂ ×Se ₃	967.00	888.00	869.00	742.67	599.67	581.00	535.00
S ₁ ×M ₂ ×Se ₄	1010.67	903.67	882.00	764.33	602.00	602.00	531.33
S ₂ ×M ₁ ×Se ₁	401.67	340.33	347.00	272.67 ^{kl}	232.67	198.67	139.33
S ₂ ×M ₁ ×Se ₂	505.33	438.67	412.33	343.33 ^{ij}	331.00	322.33	236.00
S ₂ ×M ₁ ×Se ₃	585.00	666.33	615.67	473.67	413.33	359.00	339.00
S ₂ ×M ₁ ×Se ₄	853.00	791.33	647.33	673.33	492.00	450.00	427.00
S ₂ ×M ₂ ×Se ₁	474.33	512.67	504.00	375.00	288.67	269.00	205.67
S ₂ ×M ₂ ×Se ₂	610.33	579.67	590.67	535.67	384.33	351.67	337.67
S ₂ ×M ₂ ×Se ₃	802.33	645.00	766.00	616.00	509.00	472.67	389.00
S ₂ ×M ₂ ×Se ₄	891.33	817.00	798.67	705.00	527.33	505.67	484.00
S ₃ ×M ₁ ×Se ₁	388.67	325.00	286.67	255.67	224.67	183.00	127.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₂	418.33	379.00	304.67	292.00	264.67	192.33	156.33
S ₃ ×M ₁ ×Se ₃	596.67	421.33	467.33	435.67	302.00	307.33	308.67
S ₃ ×M ₁ ×Se ₄	639.67	627.67	574.33	468.67	443.33	355.00	360.67
S ₃ ×M ₂ ×Se ₁	447.67	358.67	384.67	317.67	260.00	215.67	171.67
S ₃ ×M ₂ ×Se ₂	572.00	544.00	449.67	403.00	362.33	270.00	308.00
S ₃ ×M ₂ ×Se ₃	658.00	592.33	695.00	537.00	426.00	336.33	321.00
S ₃ ×M ₂ ×Se ₄	846.67	758.67	706.00	567.00	436.00	445.33	391.00
LSD (0.05)	82.88	67.75	39.40	47.67	34.59	57.45	44.30

Table 8. Continued

جدول ۸. ادامه

تیمارها Treatments	عملکرد کوانتومی (روز پس از کاشت) (Quantum Yield (Day after planting))				
	62	66	70	78	86
S ₁ ×M ₁ ×Se ₁	0.708	0.661	0.649	0.657	0.599
S ₁ ×M ₁ ×Se ₂	0.778	0.825	0.802	0.824	0.779
S ₁ ×M ₁ ×Se ₃	0.873	0.879	0.828	0.847	0.809
S ₁ ×M ₁ ×Se ₄	0.888	0.885	0.921	0.877	0.871
S ₁ ×M ₂ ×Se ₁	0.825	0.714	0.750	0.746	0.616
S ₁ ×M ₂ ×Se ₂	0.937	0.821	0.854	0.810	0.833
S ₁ ×M ₂ ×Se ₃	0.960	0.911	0.910	0.899	0.891
S ₁ ×M ₂ ×Se ₄	0.935	0.931	0.910	0.898	0.896
S ₂ ×M ₁ ×Se ₁	0.604	0.583	0.551	0.519	0.498
S ₂ ×M ₁ ×Se ₂	0.754	0.645	0.628	0.585	0.560
S ₂ ×M ₁ ×Se ₃	0.726	0.798	0.722	0.649	0.617
S ₂ ×M ₁ ×Se ₄	0.837	0.834	0.814	0.796	0.794
S ₂ ×M ₂ ×Se ₁	0.679 ^l	0.598	0.691	0.585	0.582
S ₂ ×M ₂ ×Se ₂	0.754	0.694	0.709	0.707	0.761
S ₂ ×M ₂ ×Se ₃	0.871	0.733	0.759	0.730	0.735
S ₂ ×M ₂ ×Se ₄	0.871	0.881	0.823	0.857	0.802
S ₃ ×M ₁ ×Se ₁	0.582	0.538	0.549	0.515	0.479
S ₃ ×M ₁ ×Se ₂	0.616	0.616	0.597	0.560	0.484
S ₃ ×M ₁ ×Se ₃	0.678	0.682	0.619	0.630	0.655
S ₃ ×M ₁ ×Se ₄	0.796	0.711	0.749	0.791	0.727
S ₃ ×M ₂ ×Se ₁	0.638	0.574	0.554	0.538	0.519
S ₃ ×M ₂ ×Se ₂	0.683	0.662	0.681	0.639	0.571
S ₃ ×M ₂ ×Se ₃	0.739	0.778	0.743	0.669	0.622
S ₃ ×M ₂ ×Se ₄	0.821	0.772	0.778	0.748	0.691
LSD (0.05)	0.050	0.053	0.051	0.051	0.052

S₁, S₂ و S₃ به ترتیب عدم اعمال شوری و اعمال شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی مولار. M₁ و M₂ به ترتیب بدون و با کاربرد مایکوریزا. Se₁،

Se₂، Se₃ و Se₄ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی سلنیوم ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی گرم در لیتر.

S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 65- and 130-mM salinity. M₁ and M₂ are without and with application of mycorrhiza. Se₁, Se₂, Se₃ and Se₄ are no foliar application and foliar application 1.5, 3 and 4.5 mg.L⁻¹ selenium.

جدول ۹. مقایسه میانگین اثرات شوری × سلنیوم، مایکوریزا × سلنیوم، و شوری × مایکوریزا بر برخی صفات فیزیولوژیک چاودار.
Table 9. Mean comparison of effects of salinity × selenium, mycorrhiza × selenium, and salinity × mycorrhiz on some physiological traits of rye.

تیمارها Treatments	(Days after planting)				فلورسانس کمینه F ₀	عملکرد کوانتومی F _v /f _m
	شاخص کلروفیل Spad		شاخص نیتروژن Nitrogen			
	78	78	62	82		
	----- μS cm ⁻¹ -----					
S ₁ ×Se ₁	37.12	0.0779	36.96	117.97	184.33	0.689
S ₁ ×Se ₂	48.18	0.096	29.67	97.85	137.33	0.857
S ₁ ×Se ₃	50.83	0.100	28.30	86.70	128.00	0.892
S ₁ ×Se ₄	52.62	0.103	26.52	87.08	116.50	0.897
S ₂ ×Se ₁	28.35	0.064	43.03	142.02	203.67	0.571
S ₂ ×Se ₂	34.30	0.073	39.32	126.08	177.50	0.633
S ₂ ×Se ₃	39.07	0.082	36.93	117.67	163.67	0.748
S ₂ ×Se ₄	43.28	0.088	31.00	98.30	135.67	0.784
S ₃ ×Se ₁	26.06	0.060	44.70	145.35	211.00	0.547
S ₃ ×Se ₂	30.73	0.067	41.93	136.52	206.33	0.620
S ₃ ×Se ₃	33.65	0.072	39.73	125.70	169.17	0.718
S ₃ ×Se ₄	40.95	0.084	32.77	108.05	166.67	0.759
LSD (0.05)	2.01	0.004	2.14	8.06	7.53	0.04

Table 9. Continued

جدول ۹. ادامه

تیمارها Treatment	شاخص کلروفیل Spad				فلورسانس کمینه F ₀	عملکرد کوانتومی F _v /f _m			
	شاخص نیتروژن Nitrogen		شاخص هدایت الکتریکی EC						
	78	78	62	82					
	(Days after planting)								
	روز پس از کاشت								
	78	78	62	82					
M ₁ ×Se ₁	28.90	0.0645	43.16	205.00	S ₁ ×M ₁	46.54	0.0933	147.25	0.807
M ₁ ×Se ₂	35.93	0.0760	38.25	186.22	S ₁ ×M ₂	47.83	0.0954	135.83	0.826
M ₁ ×Se ₃	37.89	0.0792	36.93	162.56	S ₂ ×M ₁	33.35	0.0718	182.42	0.637
M ₁ ×Se ₄	44.61	0.0901	30.29	143.33	S ₂ ×M ₂	39.15	0.0812	157.83	0.704
M ₂ ×Se ₁	32.12	0.0698	39.97	194.33	S ₃ ×M ₁	30.61	0.0673	193.17	0.565
M ₂ ×Se ₂	39.54	0.0819	35.69	161.22	S ₃ ×M ₂	35.09	0.0746	183.42	0.671
M ₂ ×Se ₃	44.48	0.0899	33.04	144.67					
M ₂ ×Se ₄	46.62	0.0934	29.93	135.89					
LSD (0.05)	1.94	0.003	1.75	6.14	LSD (0.05)	1.68	0.003	5.32	0.03

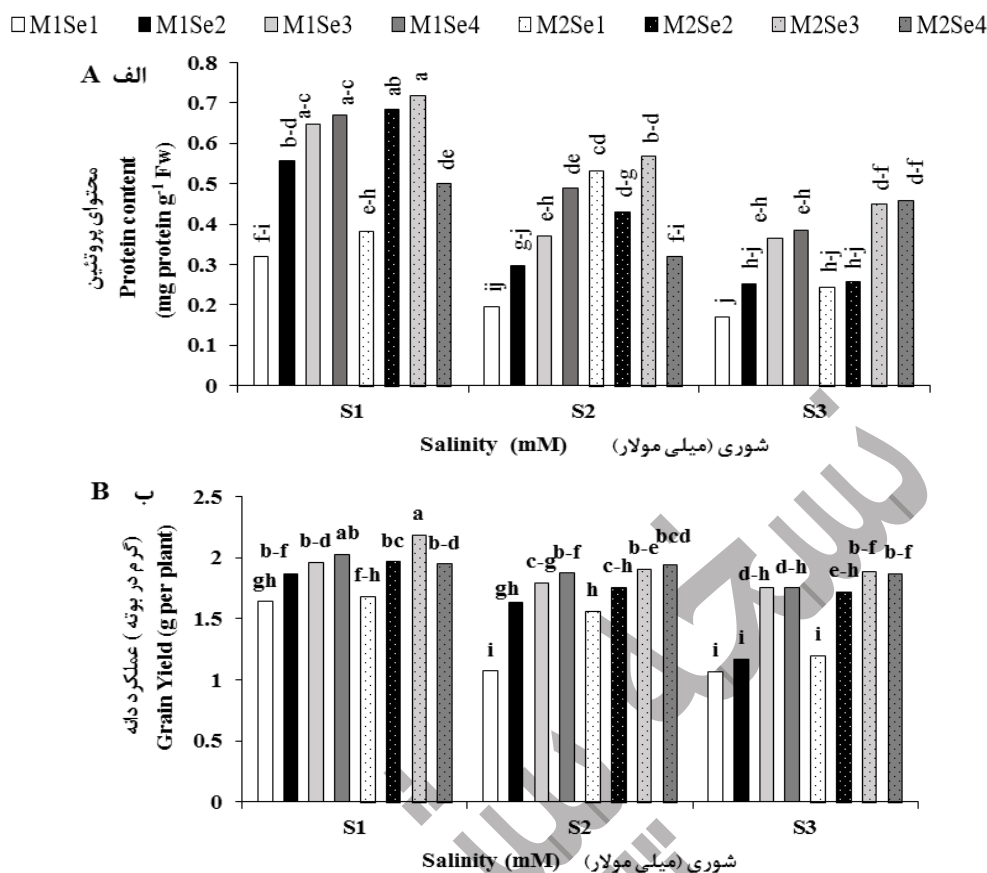
S₁, S₂ و S₃ به ترتیب عدم اعمال شوری و اعمال شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی مولار. M₁ و M₂ به ترتیب بدون و با کاربرد مایکوریزا Se₁, Se₂, Se₃ و Se₄ به ترتیب محلول پاشی با آب به عنوان شاهد، محلول پاشی سلنیوم ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی گرم در لیتر.

S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 65 and 130 mM salinity. M₁ and M₂ are without and with application of mycorrhiza. Se₁, Se₂, Se₃ and Se₄ are foliar application with water as control and foliar application 1.5, 3 and 4.5 mgL⁻¹ of selenium.

برخوردار بود. با این وجود، استفاده از مایکوریزا به همراه ۴/۵ میلی گرم در لیتر سلنیوم موجب افزایش ۴۳/۲ درصدی پروتئین محلول در مقایسه با تیمار شاهد (بدون کاربرد مایکوریزا و سلنیوم در شرایط بدون شوری) شد (شکل ۱ الف). پژوهشگران گزارش کردند که کاهش محتوای پروتئین در اثر تنش های محیطی ممکن است ناشی از کاهش سنتر برخی از پروتئین ها یا احتمالاً افزایش فعالیت آنزیم های پروتئولیتیک

محتوای پروتئین محلول برگ پرچم

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات سه جانبه شوری، مایکوریزا و سلنیوم بر محتوای پروتئین محلول برگ پرچم در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۱۰). بیشترین مقادیر پروتئین محلول برگ پرچم در ترکیب تیماری کاربرد مایکوریزا با سه میلی گرم در لیتر سلنیوم در شرایط بدون شوری به دست آمد، که در مقایسه با عدم استفاده از مایکوریزا و سلنیوم در بالاترین سطح شوری از کاهش ۷۲/۸ درصدی



شکل ۱. مقایسه میانگین تاثیر میکوریزا و سلنیوم بر محتوای پروتئین برگ پرچم (A) و عملکرد تک بوته (B) چاودار تحت تنش شوری S₁، S₂ و S₃ به ترتیب عدم اعمال شوری و شوری ۶۵ و ۱۳۰ میلی مولار. M₁ و M₂ به ترتیب بدون و با کاربرد میکوریزا. Se₁، Se₂، Se₃ و Se₄ به ترتیب عدم محلول پاشی، محلول پاشی ۱/۵، ۳ و ۴/۵ میلی گرم در لیتر سلنیوم. میانگین های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی داری بر اساس آزمون LSD با هم ندارند.

Fig. 1. Means comparison of effects of mycorrhiza and selenium on the flag leaf protein content (A) and yield per plant (B) of rye under salinity stress. S₁, S₂ and S₃ are no salinity, 65 and 130 mM salinity. M₁ and M₂ are without and with application of mycorrhiza. Se₁, Se₂, Se₃ and Se₄ are no foliar application and foliar application 1.5, 3 and 4.5 mg of selenium. Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

آزاد تولید شده تحت تنش، به گیاهان کمک کند تا در برابر تنش های غیرزیستی مقاومت نشان دهند. همچنین افزودن سلنیوم، سنتز پروتئین را از طریق تقویت اسیدهای آمینه حاوی گوگرد و کنترل فرایند زیست سنتز پورفیرین ها که نقش کلیدی در تولید کلروفیل دارند، تحریک می کند (Khan et al., 2023). وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) گزارش کردند که محلول پاشی سلنیوم می تواند به طور معنی داری غلظت پروتئین های محلول در برگ های گیاه را افزایش دهد. سلنیوم با مهار تخریب کلروفیل و تثبیت ساختار تیلاکوئیدها و پروتئین های وابسته به کلروفیل، نقش مهمی در حفظ کارایی سیستم فتوسنتزی ایفا می کند. این فرآیند نه تنها مانع کاهش محتوای کلروفیل می شود، بلکه موجب بهبود کارایی جذب نور و افزایش سرعت فتوسنتز

باشد. آن ها همچنین اظهار داشتند که اختلال در فرایند تثبیت نیتروژن که به دلیل مهار فعالیت آنزیم هایی مانند گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سینتتاز و نیترات ردوکتاز رخ می دهد، می تواند به کاهش احیای نیترات و در نهایت کاهش تولید پروتئین منجر شود (Panda and Khan, 2003).

قارچ های میکوریزا با تولید گلومالین، به دلیلی نقش مفیدی که در پایداری ساختار خاک، کمک به جذب آب و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک انجام می دهند، ضمن کمک به بهبود وضعیت آبی گیاه و افزایش فعالیت آنزیم های مرتبط با سنتز پروتئین، منجر به افزایش پروتئین های محلول برگ می شود (Gupta, 2020). پروتئین های محلول از عناصر کلیدی در رشد گیاهان هستند و نقش حیاتی در فعالیت های متابولیک گیاه دارند. سلنیوم می تواند با کاهش رادیکال های

کمک می‌کند. همچنین این عنصر از طریق حذف رادیکال‌های آزاد، آسیب ناشی از تنش را کاهش داده و احتمالاً با افزایش انتقال الکترون در زنجیره تنفسی، بیوسنتز کلروفیل را تقویت می‌کند. لذا به نظر می‌رسد این بهبود در ساختار و کارایی فتوسنتزی گیاه، تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی را افزایش داده و در نهایت موجب بهبود عملکرد دانه در شرایط تنش شوری می‌شود.

جدول ۱۰. تجزیه واریانس اثر مایکوریزا و سلنیوم بر محتوای پروتئین برگ پرچم و عملکرد تک بوته گیاه چاودار تحت تنش شوری.

Table 10. Analysis of variance (mean square) the effects of mycorrhiza and selenium on the flag leaf protein content and yield per plant of rye under salinity stress.

منابع تغییر	محتوای پروتئین برگ پرچم	عملکرد دانه تک بوته	درجه آزادی	S.O.V
	protein content of flag leaf	grain yield per plant	df	
Block	0.0216 ^{ns}	0.0252 ^{ns}	2	بلوک
Salinity (S)	0.3517 ^{**}	0.7751 ^{**}	2	شوری
Mycorrhiza (M)	0.0832 [*]	0.5206 ^{**}	1	مایکوریزا
Selenium (Se)	0.1493 ^{**}	1.1681 ^{**}	3	سلنیوم
S×M	0.0157 ^{ns}	0.0444 ^{ns}	2	شوری×مایکوریزا
S×Se	0.0300 [*]	0.0496 [*]	6	شوری×سلنیوم
M×Se	0.0529 ^{**}	0.0436 ^{ns}	3	مایکوریزا×سلنیوم
S×M×Se	0.0214 [*]	0.0515 [*]	6	شوری×مایکوریزا×سلنیوم
Error	0.0076	0.0165	46	خطا
CV (%)	20.4	7.5	-	ضریب تغییرات

ns, * and ** are non-significant, significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively.

از سوی دیگر قارچ‌های مایکوریزا با بهبود جذب مواد مغذی کلیدی مانند فسفر و نیتروژن و همچنین افزایش دسترسی به ریزمغذی‌ها، به تغذیه بهتر گیاه کمک کرده و رشد را تسریع می‌کنند. علاوه بر این، مایکوریزا از طریق تقویت مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی نظیر خشکی و شوری و همچنین بهبود

می‌گردد. افزایش فتوسنتز ضمن تامین منابع کربنی بیشتر برای گیاه، شرایط مناسبی را برای سنتز پروتئین‌ها، تقویت پایداری ساختار غشای سلولی، کاهش هدایت الکتریکی (جدول ۴) و بهبود عملکرد گیاه به همراه دارد (Wang et al., 2024). در این پژوهش به نظر می‌رسد بخشی از افزایش سنتز پروتئین‌های محلول برگ تحت تیمارهای مایکوریزا و سلنیوم با بهبود فراهمی نیتروژن برای فرایندهای متابولیسم گیاه، ناشی از افزایش شاخص نیتروژن (جدول ۲) باشد. اما شوری به دلیل کاهش شاخص نیتروژن (جدول ۲) منجر به محدود شدن سنتز پروتئین و در نتیجه کاهش محتوای پروتئین محلول برگ می‌شود. از این رو تغییر در شاخص نیتروژن می‌تواند توجیه‌کننده بخشی از نوسانات در محتوای پروتئین محلول برگ پرچم باشد.

عملکرد تک بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات سه‌جانبه شوری، مایکوریزا و سلنیوم بر عملکرد تک بوته در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۱۰). بیش‌ترین عملکرد دانه تک بوته در کاربرد توأم مایکوریزا و محلول پاشی سه میلی‌گرم در لیتر سلنیوم در شرایط عدم تنش شوری به دست آمد که در مقایسه با عدم استفاده از مایکوریزا و سلنیوم در بالاترین سطح شوری از افزایش ۳۵ درصدی برخوردار بود. همچنین استفاده از مایکوریزا و ۴/۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم در شرایط عدم اعمال شوری و شوری ۱۳۰ میلی‌مولار، موجب افزایش به ترتیب ۱۴ تا ۱۸/۷ درصدی عملکرد تک بوته نسبت به تیمار شاهد (عدم استفاده از مایکوریزا و سلنیوم در شرایط عدم شوری) شد (شکل ۱ ب).

تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که شوری می‌تواند منجر به تخریب ساختار کلروپلاست و ناپایداری پروتئین‌های متصل به کلروفیل شود که در فرآیند جذب و انتقال انرژی نوری در فتوسنتز نقش دارند. بخشی از کاهش عملکرد دانه در شرایط شوری و عدم کاربرد مایکوریزا و سلنیوم می‌تواند از اثر این عوامل در کاهش عملکرد کوانتومی ناشی شود (جدول ۸) که ضمن آسیب‌های جدی به ساختار فتوسنتزی گیاه، منجر به کاهش رشد و به تبع آن کاهش عملکرد دانه می‌شود (Balasubramaniam, et al., 2023). شیخ‌علی‌پور و همکاران (Sheikhalipour et al., 2021) اظهار داشتند که سلنیوم با تحریک جریان انرژی در فتوسیستم II و کاهش تنش اکسیداتیو در کلروپلاست، به بهبود فرآیند فتوسنتز

عملکرد گیاه در استفاده از میکوریزا و سلنیوم در شرایط تنش شوری، می‌تواند به کاهش نشت الکترولیت (جدول ۴) و افزایش عملکرد کوانتومی (جدول ۸)، مرتبط باشد.

نتیجه‌گیری نهایی

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش شوری با افزایش هدایت الکتریکی و فلورسانس حداقل کلروفیل، و کاهش شاخص کلروفیل، شاخص نیتروژن برگ و محتوای پروتئین برگ، موجب افت عملکرد دانه چاودار شد. باین‌حال، کاربرد میکوریزا و سلنیوم، به‌صورت انفرادی یا توأم، توانست با کاهش هدایت الکتریکی و فلورسانس حداقل و در مقابل، افزایش شاخص‌های کلروفیل و نیتروژن، اجزای فلورسانس حداکثر و متغیر، و عملکرد کوانتومی به تعدیل اثرات منفی شوری کمک کند. از این‌رو کاربرد میکوریزا و سلنیوم می‌تواند ضمن تعدیل بخشی از اثرات سوء شوری، به‌عنوان راهکاری مؤثر در افزایش عملکرد چاودار پیشنهاد شود.

ساختار خاک، شرایط بهینه‌تری برای رشد و توسعه گیاه فراهم نموده و در مجموع، موجب افزایش تولید زیست‌توده و عملکرد می‌شود (Wahab et al., 2023).

در پژوهشی عبدالعال و همکاران (Abdelaal et al., 2024) گزارش کردند که همزیستی گندم با قارچ میکوریزا تأثیر مثبتی در کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی داشت. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که قارچ میکوریزا قادر است حداکثر راندمان کوانتومی فتوسیستم II را بهبود بخشیده و با کاهش نشت الکترولیت‌ها و حفظ یکپارچگی ساختار سلولی، از آسیب به غشاهای سلولی جلوگیری و کارایی فتوسنتزی گیاه را حفظ کند. بخشی از افزایش عملکرد دانه با کاربرد قارچ میکوریزا را می‌توان به بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک از جمله شاخص نیتروژن برگ، شاخص کلروفیل و کارایی فتوسنتزی (افزایش F_v , F_m و F_v/F_m) نسبت داد. این بهبود ممکن است با نقش تقویتی میکوریزا در بهبود جذب آب و مواد مغذی، و همچنین برخی هورمون‌های گیاهی مهم مانند سیتوکینین‌ها و اسیدهای جبرلیک مرتبط باشد (Sheteiwiy et al., 2021). به بیانی دیگر بخشی از بهبود

منابع

- Abdelaal, K., Alaskar, A., Hafez, Y., 2024. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological, bio-chemical and yield characters of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) under drought stress conditions. *BMC Plant Biology*, 24, 1119. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05824-9>
- Adeli, H., Abdi, M., Faramarzi, A., Ajalli, J., Mohebbalipour, N., 2023. Effect of Application of sources and amounts of selenium on yield and Some physiological traits of three wheat cultivars in Maragheh dryland conditions. *Plant Production Technology*. 22, 123-133. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22084/ppt.2023.23365.2028>
- Aghaei, F., Seyed Sharifi, R., Narimani, H., 2021. Effects of uniconazole and biofertilizers application on yield and some biochemical characteristics of wheat under soil salinity stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. 14, 487-499. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.281.01730>
- Ameen, M., Zia, M.A., Najeeb Alawadi, H. F., Naqve, M., Mahmood, A., Shahzad, A. N., Khan, B.A., Alhammad, B.A., Aljabri, M., Seleiman, M. F., 2024. Exogenous application of selenium on sunflower (*Helianthus annuus* L.) to enhance drought stress tolerance by morpho-physiological and biochemical adaptations. *Frontiers in Plant Science*. 15, 1427420. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1427420>
- Balasubramaniam, T., Shen, G., Esmaeili, N., Zhang, H., 2023. Plants' response mechanisms to salinity stress. *Plants*. 12, 2253. <https://doi.org/10.3390/plants12122253>
- Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*. 72, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- Dadnia, M. R., 2018. Wheat response (*Triticum aestivum* L.) to selenium under normal irrigation and water deficit conditions. *Journal*

- of Crop Ecophysiology. 12, 21-36. [In Persian with English summary].
- Golubkina, N., Zamana, S., Seredin, T., Poluboyarinov, P., Sokolov, S., Baranova, H., Krivenkov, L., Pietrantonio, L., Caruso, G., 2019. Effect of selenium biofortification and beneficial microorganism inoculation on yield, quality and antioxidant properties of shallot bulbs. *Plants*. 8, 102 .
<https://doi.org/10.3390/plants8040102>
- Gupta M.M., 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi: the potential soil health indicators in Soil Health indicators. In: Giri, B., Varma A. (eds.), *Soil Health*. Springer, Cham, New York, NY, USA, pp. 183–195.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_11
- He, D., Guo, T., Peng, C., Li, J., Wang, F., 2023. Foliar application of lanthanum promotes growth and phytoremediation potential *Solanum nigrum* L. *Journal of Environmental Management*, 334, 117259.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117259>
- Jiang, C., Zu, C., Lu, D., Zheng, Q., Shen, J., Wang, H., Li, D., 2017. Effect of exogenous selenium supply on photosynthesis, Na⁺ accumulation and antioxidative capacity of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. *Scientific Reports*. 7, 420.
<https://doi.org/10.1038/srep42039>
- Kaur, P., Sandhu, K.S., Purewal, S.S., Kaur, M., Singh, S.K., 2021. Rye: A wonder crop with industrially important macromolecules and health benefits. *Food Research International*. 150, 110769.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110769>
- Khan, Z., Thounaojam, T.C., Chowdhury, D., Upadhyaya, H., 2023. The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review. *Plant Growth Regulation*. 100, 409-433. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0>
- Krause, G.H., Weis, E., 1988. The photosynthetic apparatus and chlorophyll fluorescence. An introduction. In: Lichtenthaler, H.K. (ed.), *Proceedings of the First International Chlorophyll Fluorescence Symposium*, 6–8 Jun. 1988. Bad Honnef, Germany. Springer, Dordrecht, The Netherland. pp. 3-11.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-2823-7_1
- Kuai, B., Chen, J., Hörtensteiner, S., 2018. The biochemistry and molecular biology of chlorophyll breakdown. *Journal of Experimental Botany*. 69, 751-767.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erx322>
- Liu, K., Li, S., Han, J., Zeng, X., Ling, M., Mao, J., Li, y., Jiang, J., 2021. Effect of selenium on tea (*Camellia sinensis*) under low temperature: Changes in physiological and biochemical responses and quality. *Environmental and Experimental Botany*. 188, 104475.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104475>
- Luo, H.W., He, L.X., Du, B., Wang, Z.M., Zheng, A.X., Lai, R.F., Tang, X.R., 2019. Foliar application of selenium (Se) at heading stage induces regulation of photosynthesis, yield formation, and quality characteristics in fragrant rice. *Photosynthetica*. 57.
<https://doi.org/10.32615/ps.2019.114>
- Mehta, P., Jajoo, A., Mathur, S., Bharti, S., 2010. Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves. *Plant Physiology and Biochemistry*. 48, 16-20.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.10.006>
- Mishra, A. K., Das, R., George Kerry, R., Biswal, B., Sinha, T., Sharma, S., Arora, P., Kumar, M., 2023. Promising management strategies to improve crop sustainability and to amend soil salinity. *Frontiers in Environmental Science*. 10, 962581. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.962581>
- Moenirad, A., Zeinali, E., Galeshi, S., Soltani, A., Eganepour, F., 2021. Investigation of fluorescence chlorophyll sensitivity, chlorophyll index, rate of Chlorophyll (a, b), nitrogen concentration and nitrogen nutrition index under under nitrogen and phosphorus nutrition in wheat. *Journal of Crop Production*, 14, 1-18. [In Persian with English summary].
<https://doi.org/10.22069/ejcp.2021.12259.1947>
- Mostafavi, S., Hajilou, J., Boland Nazar, S., 2024. The effect of symbiosis with mycorrhizal fungus on the physiological properties and nutrient uptake of ‘Supernova’ almonds grafted on GN15 rootstocks under salt stress conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 34(3), 327-349. [In Persian with English summary].
<https://doi.org/10.22034/saps.2024.60735.3188>
- Narimani, H., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M., 2024. Effects of mycorrhiza, vermicompost

- and putrescine on the morpho-physiological characteristics of triticale (*Triticosecale Wittmack*) under salinity stress. *Journal of Plant Process and Function*. 13, 61-94. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22034/13.59.61>
- Panda, S.K., Khan, M.H., 2003. Antioxidant efficiency in rice (*Oryza sativa* L.) leaves under heavy metal toxicity. *Journal of Plant Biology*. 30(1), 23-29
- Porcel, R., Redondo-Gómez, S., Mateos-Naranjo, E., Aroca, R., Garcia, R., Ruiz-Lozano, J.M., 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis ameliorates the optimum quantum yield of photosystem II and reduces non-photochemical quenching in rice plants subjected to salt stress. *Journal of Plant Physiology*. 185, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.07.006>
- Puccinelli, M., Malorgio, F., Rosellini, I., Pezzarossa, B., 2017. Uptake and partitioning of selenium in basil (*Ocimum basilicum* L.) plants grown in hydroponics. *Scientia Horticulturae*, 225, 271-276. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.014>
- Rostamihir, M., Sheikhzadeh, P., Khomari, S., Zare, N., 2023. Investigating the effect of nanoselenium in improving the physiological, biochemical and agronomic characteristics of spring rapeseed under water deficit stress at the end of the season. *Journal of Crop Production*. 16, 69-90. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22069/ejcp.2024.20922.2556>
- Saeedi, R., Seyedi, A., Esmaeilzadeh, M., Seyedi, N., Morteza Zahedi, S., Malekzadeh, M. R., 2024. Improving the performance of the photosynthetic apparatus of *Citrus sinensis* with the use of chitosan-selenium nanocomposite (CS+Se NPs) under salinity stress. *BMC Plant Biology*. 24, 745. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05462-1>
- Scharf, P.C., Brouder, S.M., Hoelt, R.G., 2006. Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the north central USA. *Agronomy Journal*. 98, 655-665. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0070>
- Seppänen, M.M., Kontturi, J., Madrid, J., Hartikainen, H., 2015. Agronomic biofortification of wheat with selenium enrichment and its identification in Brassica seeds and meal. *Plant and Soil*. 340, 501-510.
- Sheikhalipour, M., Esmaelpour, B., Behnamian, M., Gohari, G., Giglou, M.T., Vachova, P., Rastogi, A., Brestic, M., Skalicky, M., 2021. Chitosan-selenium nanoparticle (CS-Se NP) foliar spray alleviates salt stress in bitter melon. *Nanomaterials*, 11, 684. <https://doi.org/10.3390/nano11030684>
- Sheikhzadeh, P., Behzad, G., Zare, N., Rostamihir, M., 2022. Improvement of Photosynthetic and biochemical indices and cold tolerance in winter oilseed rape (*Brassica napus* L. var napus) by selenium nanoparticles application in the rosette stage. *Journal of Crops Improvement*. 26(2), 213-233. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22059/jci.2022.340264.2692>
- Sheteiwy, M.S., Ali, D.F.I., Xiong, Y.C., Brestic, M., Skalicky, M., Hamoud, Y.A., Ulhassan, Z., Shaghaleh, H., AbdElgawad, H., Farooq, M., Sharma, A., El-Sawah, A.M., 2021. Physiological and biochemical responses of soybean plants inoculated with Arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium under drought stress. *BMC Plant Biology*. 21, 1-21. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-02949-z>
- Sourazar, K., Seyed Sharifi, R., 2023. The effects of vermicompost and methanol on the trend of changes of chlorophyll fluorescence components and some physiological traits of triticale under salinity stress. *Iranian Journal of Plant Biology*. 14, 39-70. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22108/ijpb.2023.138576.1332>
- Stępniewska, S., Cacak-Pietrzak, G., Szafrńska, A., Ostrowska-Ligęza, E., Dziki, D., 2021. Assessment of the starch-amylolytic complex of rye flours by traditional methods and modern one. *Materials*. 14, 7603. <https://doi.org/10.3390/ma14247603>
- Sun, P., Ge, G., Sun, L., Bao, J., Zhao, M., Hao, J., Zhang, Y., Liy, G., Wang, Z., Jia, Y., 2025. Metabolomics combined with physiology and transcriptomics reveal the regulation of key nitrogen metabolic pathways in alfalfa by foliar spraying with nano-selenium. *Journal of Nanobiotechnology*. 23, 7. <https://doi.org/10.1186/s12951-024-03073-4>
- Taha, R.S., Seleiman, M. F., Shami, A., Alhammad, B.A., Mahdi, A.H. 2021. Integrated application of selenium and silicon enhances growth and anatomical structure, antioxidant defense system and yield of wheat

- grown in salt-stressed soil. *Plants*, 10, 1040. <https://doi.org/10.3390/plants10061040>
- Usman, S., Yaseen, G., Noreen, Z., Rizwan, M., Noor, H., Elansary, H. O., 2023. Melatonin and arginine combined supplementation alleviate salt stress through physiochemical adjustments and improved antioxidant enzymes activity in *Capsicum annuum* L. *Scientia Horticulturae*, 321, 112270. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112270>
- Wahab, A., Muhammad, M., Munir, A., Abdi, G., Zaman, W., Ayaz, A., Khizar, C., Reddy, S.P. P., 2023. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in regulating growth, enhancing productivity, and potentially influencing ecosystems under abiotic and biotic stresses. *Plants*. 12, 3102. <https://doi.org/10.3390/plants12173102>
- Wang, P., Grimm, B., 2015. Organization of chlorophyll biosynthesis and insertion of chlorophyll into the chlorophyll-binding proteins in chloroplasts. *Photosynthesis Research*. 126, 189-202. <https://doi.org/10.1007/s11120-015-0154-5>
- Wang, Y., Zhu, Q., Wang, Z., Wang, J., Wang, Z., Yu, F., Zhang, L., 2024. Effects of foliar application of amino acid-chelated selenite on photosynthetic characteristics of peanut (*Arachis hypogaea* L.) leaves at the podding stage. *Plant, Soil and Environment*. 70, 17-25. <https://doi.org/10.17221/406/2023-PSE>
- Wu, N., Li, Z., Wu, F., Tang, M., 2016. Comparative photochemistry activity and antioxidant responses in male and female *Populus cathayana* cuttings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under salt. *Scientific Reports*. 6, 37663. <https://doi.org/10.1038/srep37663>
- Yadav, D.K., Pospíšil, P., 2012. Evidence on the formation of singlet oxygen in the donor side photoinhibition of photosystem II: EPR spin-trapping study. *Plos One*. 7, e45883. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045883>
- Yousefi Rad, M., Safa, H., 2021. Effect of foliar application of salicylic acid and selenium on yield and yield components of dry land wheat. *Cereal Research*, 11, 31-41. [In Persian with English summary]. <https://doi.org/10.22124/cr.2021.19668.1670>
- Zahedi, S. M., Moharrami, F., Sarikhani, S., Padervand, M., 2020. Selenium and silica nanostructure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. *Scientific Reports*. 10, 17672. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74273-9>
- Zong, J., Zhang, Z., Huang, P., Yang, Y., 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviates salt stress in *Xanthoceras sorbifolium* through improved osmotic tolerance, antioxidant activity, and photosynthesis. *Frontiers in Microbiology*. 14, 1138771. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1138771>