



علوم و تحقیقات بذر ایران

سال دوازدهم/ شماره چهارم/ ۱۴۰۴ (۸۰-۶۳)

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22124/jms.2026.9715



تغییرپذیری پرولین، قندهای محلول و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهچه سویا در واکنش به رژیم‌های مختلف آبیاری و گونه‌های مایکوریزا

زهرا نجفی‌وفا^۱، نسرین قمری‌رحیم^{۲*}، عادل سی و سه مرده^{۳*}، یوسف سهرابی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۶

چکیده

تنش خشکی تعادل اسمزی و پایداری اکسیداتیو سویا را به‌طور جدی مختل می‌کند، اما نقش گونه‌محور قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار (AMF) در تنظیم این فرآیندها تحت رژیم‌های مختلف آبیاری به‌طور کامل تبیین نشده است. این پژوهش در سال ۱۴۰۳ به‌صورت فاکتوریل ۳×۳ در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل رژیم‌های آبیاری در سه سطح (۱۰۰٪ ظرفیت زراعی به‌عنوان شاهد، ۸۰٪ ظرفیت زراعی به‌عنوان تنش کم‌آبی متوسط و ۵۰٪ ظرفیت زراعی به‌عنوان تنش کم‌آبی شدید) و کاربرد گونه‌های مایکوریزا (*Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices*) بود. اثر این تیمارها بر پرولین، قندهای محلول، محتوای نسبی آب (RWC)، مالون‌دی‌آلدئید (MDA) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاهچه سویا مورد ارزیابی قرار گرفت. کاهش آبیاری در سطوح ۸۰ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه موجب افت معنی‌دار RWC و افزایش تجمع اسمولیت‌ها، پراکسیداسیون چربی و فعالیت آنتی‌اکسیدانی شد. تلقیح با AMF شدت این پاسخ‌ها را کاهش داد و *Rhizophagus intraradices* مؤثرترین عملکرد را در بهبود وضعیت آبی، تنظیم اسمزی و کاهش آسیب اکسیداتیو به‌ویژه در خشکی متوسط و شدید نشان داد. این نتایج حاکی از آن است که AMF، به‌ویژه *Rhizophagus intraradices*، از طریق بهبود وضعیت آبی، تجمع اسمولیت‌ها و کاهش آسیب اکسیداتیو در افزایش تحمل خشکی سویا نقش دارد. در مجموع، پژوهش حاضر شواهد جدیدی از کارایی برتر *Rhizophagus intraradices* ارائه می‌دهد و استفاده از این گونه را به‌عنوان راهبردی پایدار برای مدیریت خشکی در کشت سویا پیشنهاد می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پراکسیداسیون چربی (مالون‌دی‌آلدئید)، تنش خشکی، مایکوریزا، محتوای نسبی آب

۱- پژوهشگر پسادکتری، گروه تولیدات گیاهی و ژنتیک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. zahranajafivafa.64@gmail.com

۲- دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه تولیدات گیاهی و ژنتیک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. nasringhamarirahim@gmail.com

۳- استاد؛ گروه تولیدات گیاهی و ژنتیک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. a33@uok.ac.ir

۴- استاد؛ گروه تولیدات گیاهی و ژنتیک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. y.sohrabi@uok.ac.ir

*نویسنده مسئول: a33@uok.ac.ir

مقدمه

سویا (*Glycine max* L.) به عنوان یکی از مهم ترین گیاهان دانه ای جهان، به دلیل ارزش غذایی بالا و نقش کلیدی آن در تأمین پروتئین و روغن گیاهی، جایگاه ویژه ای در سیستم های کشاورزی دارد. با این حال، عملکرد این گیاه به شدت تحت تأثیر تنش خشکی قرار می گیرد. کمبود آب موجب افت وضعیت آبی برگ، کاهش ظرفیت فتوسنتزی و برهم خوردن تعادل متابولیسم سلول می شود و به دنبال آن تولید گونه های فعال اکسیژن افزایش می یابد که می تواند به آسیب غشایی و اختلال در فرایندهای فیزیولوژیک منجر شود (Hasanuzzaman et al., 2020; Najafi Vafa et al., 2022a). در چنین شرایطی، گیاه با تولید اسمولیت هایی نظیر پرولین و قندهای محلول تلاش می کند پایداری اسمزی و ساختارهای سلولی را حفظ کند (Zulfiqar et al., 2021; Najafi Vafa et al., 2022a). علاوه بر این، آنزیم هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT) به عنوان خط دفاعی آنتی اکسیدانی نقش اساسی در حذف گونه های فعال اکسیژن دارند (Mittler, 2022). افزایش فراوانی رخدادهای خشکسالی در نتیجه تغییرات اقلیمی، تهدیدی جدی برای پایداری تولید سویا، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شود (FAO, 2023). از سوی دیگر، محدودیت منابع آب، استفاده از روش های آبیاری پرمصرف را کمتر قابل اجرا کرده و نیاز به رویکردهای تلفیقی برای افزایش مقاومت گیاهان به کم آبی را برجسته ساخته است. یکی از رویکردهای زیست سازگار، بهره گیری از قارچ های میکوریزای آربسکولار (AMF) است. این همزیستی یک ارتباط دوطرفه و سودمند است که در آن قارچ با گسترش شبکه هیف های خارجی، توانایی گیاه را در جذب آب و عناصر غذایی افزایش می دهد و بهبود کارایی مصرف آب، تثبیت ساختار ریشه و تقویت پاسخ های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی (از جمله تنظیم اسمزی و دفاع آنتی اکسیدانی) را سبب می شود. در مقابل، گیاه نیز بخشی از ترکیبات کربنی حاصل از فتوسنتز را برای رشد و بقای قارچ فراهم می کند. این تبادل متقابل، کارایی همزیستی را در افزایش تحمل گیاهان به تنش خشکی

تقویت می کند (Begum et al., 2019; Wang et al., 2023; Najafi Vafa et al., 2024). مطالعات نشان داده اند که همزیستی میکوریزایی می تواند تجمع اسمولیت ها و فعالیت آنتی اکسیدانی را در گیاهان زراعی از جمله سویا بهبود دهد و اثرات منفی خشکی را کاهش دهد (Li et al., 2022).

با وجود پیشرفت های قابل توجه در بررسی اثرات خشکی و همزیستی میکوریزایی، بخش زیادی از پژوهش های پیشین تنها یکی از جنبه های اسمولیتی یا آنتی اکسیدانی را به طور جداگانه بررسی کرده اند (Singh et al., 2024). علاوه بر این، بیشتر مطالعات، تنش خشکی را به صورت یک وضعیت شدید در برابر آبیاری کامل تعریف کرده اند و کمتر به بررسی تدریجی سطوح مختلف ظرفیت زراعی پرداخته اند که شرایط واقعی مزرعه را بهتر بازتاب می دهد (Ahmad et al., 2021). همچنین، تعامل میان تیمارهای میکوریزا و سطوح متفاوت رطوبت خاک و تأثیر همزمان آن ها بر شاخص های بیوشیمیایی مرتبط با تحمل تنش، هنوز به طور جامع بررسی نشده است. این خلأ دانشی، ضرورت انجام پژوهشی را که بتواند تغییرات پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی را در ارتباط با سطوح مختلف آبیاری و حضور میکوریزا تحلیل کند، آشکار می سازد.

تنش خشکی با ایجاد اختلال در فتوسنتز، برهم خوردن تعادل اسمزی و افزایش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) موجب آسیب به ساختارهای سلولی گیاه می شود. در این شرایط، بررسی برخی شاخص های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی می تواند تصویر دقیق تری از پاسخ گیاه به تنش ارائه دهد. کلروفیل کل به عنوان شاخصی از ظرفیت فتوسنتزی گیاه در شرایط تنش مورد استفاده قرار می گیرد. تجمع اسمولیت هایی مانند پرولین و قندهای محلول نقش مهمی در تنظیم اسمزی و حفظ پایداری غشاها دارد. همچنین فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی نظیر سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT) در خنثی سازی گونه های فعال اکسیژن مؤثر است، در حالی که مالون دی آلدئید (MDA) به عنوان شاخصی از پراکسیداسیون لیپیدی و میزان آسیب اکسیداتیو غشاها در نظر گرفته می شود. بنابراین اندازه گیری این صفات می تواند درک بهتری از سازوکارهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی تحمل تنش خشکی در گیاه سویا فراهم کند.

هدف این پژوهش، پر کردن این خلأ دانشی از طریق ارزیابی اثرات متقابل سطوح مختلف آبیاری و تلقیح با دو گونه قارچ میکوریزای آربسکولار *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* بر شاخص‌های بیوشیمیایی مرتبط با تحمل خشکی شامل پرولین، قندهای محلول، محتوای نسبی آب (RWC)، مالون‌دی‌آلدئید (MDA) و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در سویا (*Glycine max* L.) بود. این پژوهش با رویکردی کاربردی، در پی ارائه راهکاری زیست پایه و پایدار برای مدیریت تنش خشکی در سیستم‌های زراعی سویا، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک است.

مواد و روش‌ها

طرح آزمایشی و تیمارها

این آزمایش در سال ۱۴۰۳ به صورت فاکتوریل 3×3 در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه کردستان، سنجید انجام شد. شرایط گلخانه شامل دمای حدود 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد در روز، 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد در شب و رطوبت نسبی حدود ۵۰-۶۰ درصد بود. تیمارها شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) و سه سطح تلقیح میکوریزا بودند: بدون تلقیح (شاهد)، تلقیح با *Funneliformis mosseae* و تلقیح با *Rhizophagus intraradices* (*Glomus mosseae* syn) و تلقیح با *Glomus intraradices* (syn). سطوح آبیاری بر اساس مطالعات پیشین مربوط به ایجاد تنش ملایم و شدید خشکی در شرایط گلخانه انتخاب شدند. مایه تلقیح میکوریزا به مقدار ۱۰ گرم در هر گلدان هنگام کاشت در ناحیه ریشه استفاده شد. در مجموع ۹ ترکیب تیماری با سه تکرار (۲۷ واحد آزمایشی) مورد ارزیابی قرار گرفتند و تخصیص تیمارها به گلدان‌ها به صورت تصادفی انجام شد.

گیاه مورد استفاده، گلدان‌ها و آماده‌سازی خاک

رقم سویا (*Glycine max* L.) رقم L9 به عنوان گیاه آزمایشی انتخاب شد. که بذر آن از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه گردید. این آزمایش شامل ۹ تیمار و سه تکرار بود، بنابراین در مجموع ۲۷ گلدان به عنوان واحدهای آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. گلدان‌های پلاستیکی با ابعاد تقریبی $25 \times 30 \times 25$ سانتی‌متر (ارتفاع $\times$ قطر دهانه $\times$ قطر کف) به کار گرفته شدند و هر گلدان با حدود ۲

کیلوگرم خاک پر شد. خاک مصرفی از لایه سطحی (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری) یک مزرعه زراعی مجاور گلخانه برداشت شد. خاک پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، به صورت غیر استریل مورد استفاده قرار گرفت. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک غیر استریل قبل از کاشت شامل بافت، pH، هدایت الکتریکی (EC)، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل جذب اندازه‌گیری و در جدول ۱ ارائه شده است. در هر گلدان، ۶ بذر سویا در عمق حدود ۳-۴ سانتی‌متر کشت شد. پس از سبز شدن و استقرار، در مرحله دو تا سه برگه، بوته‌های اضافی حذف شده و ۲ بوته یکنواخت در هر گلدان حفظ گردید تا تراکم گیاهی در همه واحدهای آزمایشی یکسان باشد.

کاربرد میکوریزای آربسکولار (AMF)

برای اعمال تیمار میکوریزا از اینوکولوم تجاری قارچ‌های میکوریزای آربسکولار (*Arbuscular Mycorrhizal Fungi*; AMF) استفاده شد. گونه‌های مورد استفاده شامل *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüßler و *Rhizophagus intraradices* (N.C. Schenck & G.S. Sm.) C. Walker & A. Schüßler بودند.

اینوکولوم میکوریزا در زمان کاشت بذرها به خاک اضافه شد و نه بعد از شروع تنش خشکی؛ زیرا برقراری همزیستی میکوریزایی نیازمند تماس اولیه ریشه‌های جوان با اسپورهای قارچ است و معمولاً ۳-۵ هفته تا رسیدن به کلونیزاسیون مؤثر زمان می‌برد. بنابراین اعمال قارچ پس از اعمال تنش امکان‌پذیر نیست و در مطالعات استاندارد نیز همیشه در زمان کاشت انجام می‌شود (Read, & Smith, 2010; Smith et al., 2018).

اینوکولوم در عمق ۳-۵ سانتی‌متری (ناحیه بذر و محل رشد اولیه ریشه‌ها) قرار گرفت. مقدار مصرف بر اساس دامنه رایج در مطالعات گلدانی بین ۵ تا ۱۰ گرم در هر گلدان تعیین می‌شود؛ در این آزمایش مقدار ۱۰ گرم استفاده شد تا در خاک غیر استریل که ممکن است قارچ‌های بومی با قارچ‌های تلقیح‌شده رقابت کنند استقرار قارچ‌های مورد مطالعه تضمین شود (Brundrett and Tedersoo, 2018). این مقدار حاوی حدود ۲۰۰-۳۰۰ اسپور بود که در مطالعات گلدانی استاندارد مقدار مناسب و غیرزیادی

درصد آب نسبی برگ براساس روش استاندارد (Barrs and Weatherley, 1962) اندازه‌گیری شد. بدین‌صورت که ابتدا وزن تازه (FW) ثبت شد، سپس نمونه‌ها به مدت ۴-۶ ساعت در آب مقطر قرار داده شدند تا به وزن تورژسانس کامل (TW) برسند. در نهایت، نمونه‌ها در آن ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن خشک (DW) تعیین شد. مقدار RWC طبق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$RWC (\%) = (TW - DW / FW - DW) \times 100$$

صفات بیوشیمیایی و آنزیمی

برای اندازه‌گیری دیگر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نظیر کلروفیل کل، پرولین، قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌ها (سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز) و مالون‌دی‌آلدئید نمونه‌های برگ بلافاصله پس از برداشت در نیتروژن مایع غوطه‌ور شدند تا فعالیت متابولیکی بافت متوقف گردد. سپس نمونه‌ها تا زمان انجام اندازه‌گیری‌ها به آزمایشگاه منتقل و در فریزر با دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

کلروفیل کل برگ

برای اندازه‌گیری کلروفیل کل، ده روز پس از اعمال تیمار تنش خشکی از برگ‌های بالغ و کاملاً گسترش‌یافته قسمت بالایی گیاه (برگ‌های دوم و سوم) نمونه‌برداری شد. برای این منظور از بافت تازه برگ (حدود ۱/۰ گرم) استفاده گردید. کلروفیل با استون ۸۰ درصد استخراج و جذب نوری محلول در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید. غلظت کلروفیل با استفاده از روابط Arnon (1949) محاسبه و بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ گزارش شد.

پرولین آزاد

مقدار پرولین آزاد برگ‌ها با روش رنگ‌سنجی (Bates et al., 1973) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خشک یا تازه پس از استخراج با محلول سولفوسالسیلیک، با معرف نین‌هیدرین و اسید استیک واکنش داده و مخلوط حاصل در بن‌ماری گرم شد. پس از سرد شدن و استخراج با تولوئن، جذب محلول در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید.

قندهای محلول

برای تعیین قندهای محلول از روش رنگ‌سنجی فنول اسید سولفوریک استفاده شد (Dubois et al., 1956). ابتدا قندهای محلول از بافت گیاهی با آب داغ استخراج و سپس با فنول ۵ درصد و اسید سولفوریک غلیظ واکنش

تلقی می‌شود. با توجه به استفاده از خاک غیر استریل، احتمال حضور جمعیت‌های طبیعی قارچ‌های میکوریزای بومی وجود داشت؛ با این حال برای ارزیابی اثر تیمارهای میکوریزایی، تیمار بدون تلقیح میکوریزا (شاهد) نیز در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه اثر تلقیح قارچ‌های مورد مطالعه با شرایط طبیعی خاک فراهم گردد.

اعمال رژیم‌های آبیاری و کنترل رطوبت خاک

تا پیش از اعمال تیمار تنش، تمامی گلدان‌ها به صورت یکنواخت و بر اساس ظرفیت زراعی آبیاری شدند تا استقرار اولیه بوته‌ها تا مرحله ۳-۴ برگی کامل گردد. پس از این مرحله، تیمارهای آبیاری از ابتدای مرحله غلاف‌بندی (R3) اعمال شدند و تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک (R7)، حدود ۴۵ روز ادامه یافتند.

آبیاری بر اساس روش وزنی و ظرفیت زراعی خاک انجام شد (Barrs and Weatherley, 1962; Kiani and Sohrabi, 2022). برای تعیین ظرفیت زراعی، ابتدا خاک گلدان‌ها به‌طور کامل تا حد اشباع آبیاری شد و پس از خروج آب ثقی و گذشت حدود ۴۸ ساعت، وزن گلدان‌ها به‌عنوان وزن خاک در ظرفیت زراعی ثبت گردید. سپس وزن گلدان‌ها به‌طور منظم اندازه‌گیری شد و مقدار آب از دست‌رفته بر اساس اختلاف وزن گلدان‌ها محاسبه و به همان میزان آب برای حفظ سطوح مختلف رطوبتی اعمال شد.

میزان آب مورد نیاز برای هر سطح آبیاری بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید:

$$Water\ added = (W_{fc} - W_{current})$$

که در آن W_{fc} وزن گلدان در ظرفیت زراعی و $W_{current}$ وزن گلدان در زمان اندازه‌گیری است. بر این اساس، سطوح مختلف آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی از طریق تنظیم مقدار آب اضافه‌شده به گلدان‌ها حفظ شدند.

صفات اندازه‌گیری‌شده و روش‌های آزمایشگاهی

به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیکی، ده روز پس از انجام مرحله دوم محلول‌پاشی و اعمال تیمارهای تنش، از برگ‌های بالغ و کاملاً گسترش‌یافته قسمت بالایی گیاه (برگ‌های دوم و سوم) نمونه‌برداری شد. پس از برداشت، نمونه‌های برگی بر اساس ماهیت هر صفت در دو گروه پردازش شدند:

صفات مرتبط با وضعیت آب بافت (RWC)

داده شدند. پس از سرد شدن، جذب نوری در طول موج ۴۹۰ نانومتر قرائت گردید.

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD)

برای اندازه گیری فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، از بافت تازه برگ استفاده شد. حدود ۵/۰ گرم از برگ های تازه در حضور بافر فسفات پتاسیم سرد (۵۰ میلی مولار، pH=7.8) حاوی ۱ میلی مولار EDTA در هاون چینی و روی یخ هموزن گردید. سپس عصاره حاصل در دمای ۴ درجه سانتی گراد به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و مایع رویی به عنوان عصاره آنزیمی برای اندازه گیری فعالیت SOD مورد استفاده قرار گرفت. فعالیت آنزیم SOD بر اساس توانایی این آنزیم در مهار احیای نیتروبلاتوتترازولیوم (NBT) توسط رادیکال سوپراکسید اندازه گیری شد (Beauchamp and Fridovich, 1971). مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی مولار، pH=7.8)، متیونین (۱۳ میلی مولار)، نیتروبلاتوتترازولیوم (NBT) با غلظت ۷۵ میکرومولار، ریبوفلاوین (۲ میکرومولار) و EDTA (۱/۰ میلی مولار) بود. پس از افزودن عصاره آنزیمی به مخلوط واکنش، لوله ها به مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه در معرض نور فلورسنت قرار گرفتند تا واکنش نوری انجام شود. در حضور رادیکال های سوپراکسید، NBT احیا شده و رنگ آبی تشکیل می دهد، اما حضور آنزیم SOD این فرایند را مهار می کند. شدت رنگ ایجاد شده در طول موج ۵۶۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد. یک واحد فعالیت آنزیم SOD به مقدار آنزیمی گفته می شود که موجب ۵۰ درصد مهار در احیای NBT گردد و نتایج بر اساس واحد آنزیمی در گرم وزن تر برگ گزارش شدند.

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)

فعالیت آنزیم کاتالاز طبق روش (Aebi, 1984) و بر اساس توانایی این آنزیم در تجزیه هیدروژن پراکسید (H_2O_2) اندازه گیری شد. برای استخراج آنزیم، حدود ۵/۰ گرم از بافت تازه برگ در حضور بافر فسفات پتاسیم سرد (۵۰ میلی مولار، pH=7) در هاون چینی و روی یخ هموزن گردید. سپس عصاره حاصل به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفیوژ شد و مایع رویی به عنوان عصاره آنزیمی برای سنجش فعالیت CAT مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام واکنش آنزیمی، مخلوط واکنش شامل بافر فسفات پتاسیم

۵۰ میلی مولار (pH=7)، محلول هیدروژن پراکسید با غلظت ۱۵ میلی مولار و مقدار مشخصی از عصاره آنزیمی بود. واکنش با افزودن عصاره آنزیمی آغاز شد و تغییرات جذب نوری محلول در طول موج ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر ثبت گردید. کاهش جذب نوری هیدروژن پراکسید در طول زمان نشان دهنده تجزیه آن توسط آنزیم کاتالاز است. فعالیت آنزیم بر اساس شیب کاهش جذب نوری در واحد زمان محاسبه و نتایج به صورت واحد آنزیمی در گرم وزن تر برگ بیان شدند.

میزان مالون دی آلدئید (MDA)

میزان مالون دی آلدئید (MDA) به عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها بر اساس روش Cakmak and Horst (1991) اندازه گیری شد. برای این منظور، ۵/۰ گرم از بافت تازه گیاه در ۵ میلی لیتر محلول تری کلرو استیک اسید ۰/۱٪ (TCA) همگن شد و سپس به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. یک میلی لیتر از محلول رویی با ۴ میلی لیتر محلول حاوی ۲۰٪ TCA و اسید تیوباریتوریک ۰/۵٪ (TBA) مخلوط شد. مخلوط واکنش به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای ۹۵ درجه سانتی گراد قرار داده شد و سپس بلافاصله در حمام یخ سرد گردید. پس از سانتریفیوژ مجدد، جذب محلول در طول موج های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد. مقدار MDA با استفاده از ضریب خاموشی مولی ۱۵۵ میلی مولار بر سانتی متر محاسبه و بر حسب نانومول در گرم وزن تازه بیان گردید.

عملکرد دانه در گلدان

عملکرد دانه در پایان دوره رشد از هر گلدان برداشت شد. با توجه به اینکه در هر گلدان دو بوته رشد داده شد، بذرهای هر گلدان پس از برداشت با ترازوی حساس توزین و عملکرد دانه به صورت گرم بر گلدان گزارش شد.

تجزیه و تحلیل آماری

داده های به دست آمده از اندازه گیری صفات مختلف، ابتدا از نظر نرمال بودن و یکنواختی واریانس ها بررسی شد. سپس تجزیه واریانس داده ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با استفاده از نرم افزار SAS انجام گرفت. مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. ترسیم نمودارها و نمایش گرافیکی نتایج با استفاده از نرم افزار Microsoft Excel صورت گرفت.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش گلدانی بل از کاشت سویا

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used in the pot experiment before planting soybean.

ویژگی	واحد	مقدار	اندازه‌گیری
Texture بافت	—	لوم	هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)
Sandy شن	درصد	40	—
Silt سیلت	درصد	40	—
Clay رس	درصد	20	—
پی‌اچ، نسبت ۵: ۲: ۱ خاک: آب pH (1:2, 5 soil: water)	—	7.4	(Page, 1982)
ای‌سی، نسبت ۵: ۲: ۱ خاک: آب EC (1:2, 5 soil: water)	dS m ⁻¹	1.2	(Page, 1982)
Organic matter (%) ماده آلی	درصد	1.8	(Black -Walkley, 1962)
نیترژن کل (N)	درصد	0.12	کج‌دال
فسفر قابل جذب (P)	mg kg ⁻¹	18	اولسن
پتاسیم قابل جذب (K)	mg kg ⁻¹	210	فلیم‌فتومتر

نتایج و بحث

اثر آبیاری و مایکوریزا بر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمار آبیاری و تلقیح مایکوریزا تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک

درصد بر بیشتر صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی از جمله محتوای نسبی آب برگ (RWC)، پرولین، کلروفیل کل، قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (کاتالاز و سوپراکسید دیسموتاز)، مالون‌دی‌آلدئید و عملکرد دانه در گلدان داشتند، در حالی که اثر متقابل آن‌ها برای اکثر صفات معنی‌دار نبود (جدول ۲).

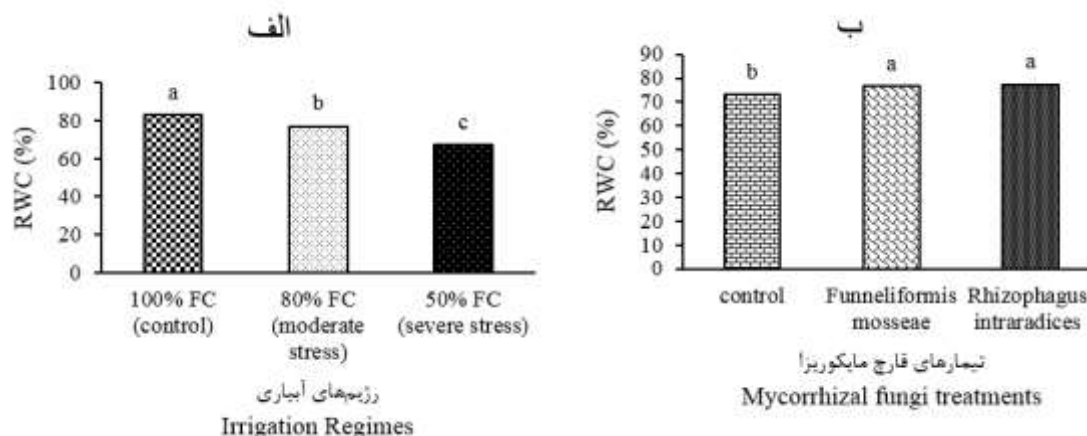
جدول ۲- تجزیه واریانس عملکرد دانه در گلدان و صفات فیزیولوژیک بیوشیمیایی تحت تأثیر آبیاری، مایکوریزا و اثر متقابل آن‌ها

Table 2. Analysis of variance of grain yield in pots and physiological traits under irrigation, mycorrhiza and their interaction.

میانگین مربعات Mean of squares										
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	محتوای نسبی آب RWC	کلروفیل کل Total chlorophyll	پروکلین Prolin	قند محلول در الکل Soluble carbohydrates in alcohol	قند محلول در آب Soluble carbohydrat es in water	سوپراکسید دیسموتاز SOD	کاتالاز CAT	مالون‌دی‌آلد ئید MAD	عملکرد دانه در گلدان Yield in pot
رژیم آبیاری Irrigation regime	2	578.5**	0.023**	0.022**	131.27**	414**	45186**	186.11**	61.59**	1.42**
مایکوریزا Mycorrhiza	2	47.92**	0.0024**	0.0046**	15*	9.16 ^{ns}	10222**	38.11**	117.92**	0.19**
آبیاری × مایکوریزا Irrigation regime × Mycorrhiza	4	4.93 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	1.72 ^{ns}	3.63 ^{ns}	383 ^{ns}	4.05 ^{ns}	3.20 ^{ns}	0.007 ^{ns}
خطا Error	18	5.12	0.0003	0.0004	4.82	5.71	1209	4.55	1.18	0.012
ضریب تغییرات CV (%)		2.98	7.22	5.62	18.84	13.77	6.28	4.65	3.78	8.66

ns و *، ** به ترتیب نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم اختلاف معنی‌دار هستند.

*, **, ns were significantly different at 1 %, 5 % and no significant differences, respectively.



شکل ۱- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ‌های مایکوریزا (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر محتوای نسبی آب در مقایسه با شاهد. میانگین‌هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 1. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on relative water content (RWC) compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

اثربخشی مربوط به *Rhizophagus intraradices* بود که نسبت به سایر تیمارها توان بالاتری در بهبود وضعیت آبی گیاه نشان داد (شکل ۲). کاهش RWC از مهم‌ترین شاخص‌های بیانگر شدت تنش و افت پتانسیل آب سلولی به‌شمار می‌رود و با محدودیت رشد و کاهش عملکرد مرتبط است (Farooq et al., 2019). یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های قبلی در سویا و سایر حبوبات همخوان است که نشان داده‌اند خشکی با ایجاد نابرابری بین جذب و تعرق، به‌طور مستقیم محتوای آب برگ را کاهش می‌دهد (Zulfiqar et al., 2021; Hasanuzzaman et al., 2020). نتایج حاضر با نتایج گزارش‌شده در گندم، ذرت و سویا مطابقت دارد که در آن‌ها مایکوریزا آربسکولار توانسته است وضعیت آبی گیاه را از طریق اصلاح هدایت هیدرولیکی ریشه و افزایش جذب آب در خشکی بهبود بخشد (Li et al., 2019; Abbaspour et al., 2018).

کلروفیل کل

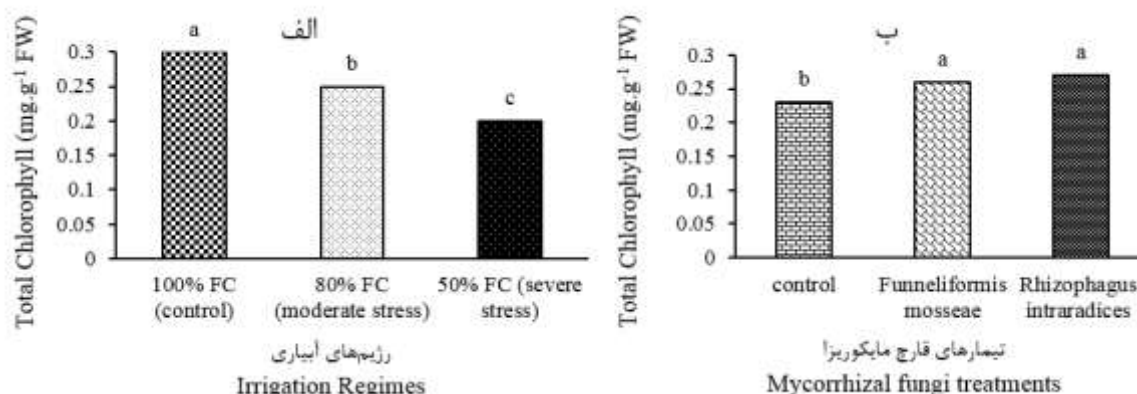
نتایج حاصل از مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میزان کلروفیل کل تحت تأثیر هر دو عامل آبیاری و مایکوریزا به‌طور معنی‌داری تغییر کرد. در بین سطوح مختلف آبیاری نیز، بالاترین مقدار کلروفیل در آبیاری کامل (۱۰۰٪) به میزان ۰/۳۰ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ به‌دست آمد و با کاهش سطح آبیاری، مقدار کلروفیل روند کاهشی نشان

محتوای نسبی آب برگ (RWC)

درصد آب نسبی برگ به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر هر دو عامل تنش خشکی و تلقیح مایکوریزایی قرار گرفت (جدول ۲). بر اساس نتایج حاصل، کاهش سطح آبیاری منجر به کاهش RWC شد؛ به‌طوری‌که در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰٪) بالاترین مقدار با ۸۲/۹۷ درصد مشاهده گردید، در سطح ۸۰٪ آبیاری این مقدار به ۷۷/۱ درصد کاهش یافت و پایین‌ترین مقدار RWC در آبیاری ۵۰٪ با ۶۷/۱۱ درصد ثبت شد (شکل ۱ الف). این کاهش تدریجی بیانگر آن است که محدودیت آبی، توانایی گیاه در حفظ آب بافتی را کاهش داده و بدین ترتیب موجب افت پتانسیل آب سلولی و تشدید اثرات تنش خشکی می‌شود. در کنار اثر آبیاری، تلقیح گیاه با قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار نیز تأثیر قابل توجهی بر RWC داشت. گیاهان شاهد (فاقد قارچ) کمترین مقدار آب نسبی برگ را با ۷۳/۱۱ درصد نشان دادند، در حالی که تلقیح با *Funneliformis mosseae* مقدار RWC را به ۷۶/۶۱ درصد افزایش داد. بیشترین مقدار در تیمار *Rhizophagus intraradices* با ۷۷/۴۶ درصد ثبت شد (شکل ۱ ب). این افزایش بیانگر آن است که همزیستی مایکوریزایی با بهبود کارایی جذب آب، افزایش توسعه ریشه و بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک ریشه، توانایی گیاه در حفظ آب بافتی را تقویت می‌کند. بیشترین

(۰/۲۶ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) مشاهده شد که هر دو به طور معنی داری بالاتر از تیمار شاهد (۰/۲۳ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) بودند (شکل ۲ ب). این افزایش نشان می دهد که همزیستی میکوریزایی سبب افزایش پایداری رنگدانه های کلروفیلی و کارایی فتوسنتزی گیاه می شود. در مجموع، نتایج نشان داد که هم مایکوریزا و هم آبیاری کافی نقش مهمی در افزایش کلروفیل کل و بهبود وضعیت فتوسنتزی گیاه دارند.

داد؛ به طوری که در آبیاری ۸۰ درصد مقدار آن ۰/۲۵ و در آبیاری ۵۰ درصد به کمترین مقدار یعنی ۰/۲۰ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ رسید (شکل ۲ الف). کاهش کلروفیل در شرایط کم آبی احتمالاً به دلیل تخریب رنگدانه ها و کاهش سنتز کلروفیل در اثر تنش خشکی است. در بین تیمارهای میکوریزا، بیشترین مقدار کلروفیل کل در تیمار *Rhizophagus intraradices* (۰/۲۷ میلی گرم بر گرم وزن تر برگ) و پس از آن در *Funneliformis mosseae*



شکل ۲- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ های مایکوریزا (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر مقدار کلروفیل کل در مقایسه با شاهد. میانگین هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی داری ندارند.

Figure 2. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on total chlorophyll content compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

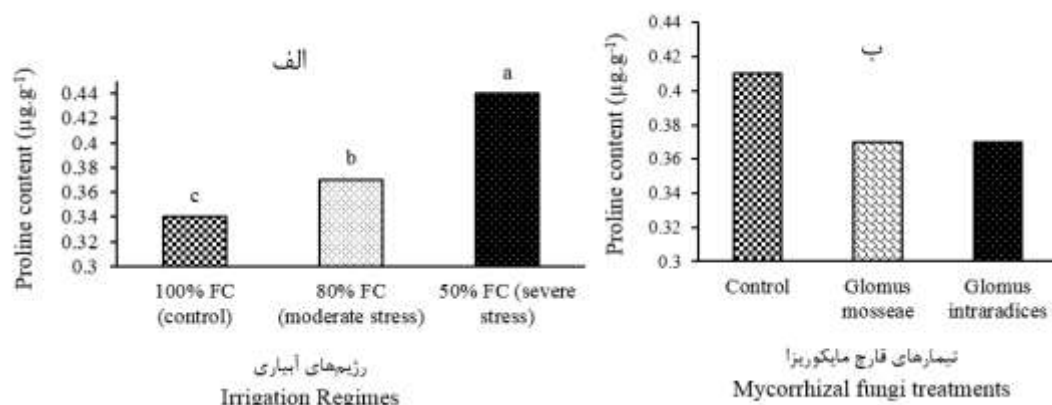
حالی که تلقیح با *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* مقدار پرولین را ۰/۳۷ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ کاهش داد. این کاهش معنی دار نشان می دهد که همزیستی میکوریزایی از شدت تنش فیزیولوژیکی می کاهد و نیاز گیاه به تجمع پرولین به عنوان اسمولیت دفاعی را کاهش می دهد (شکل ۳ ب).

قندهای محلول

نتایج به دست آمده نشان داد که هر دو نوع قند محلول، شامل قندهای محلول در آب و قندهای محلول در الکل، به طور معنی داری تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفتند (جدول ۲). به طور کلی، کاهش میزان آبیاری موجب افزایش قابل توجه این ترکیبات شد و نشان داد که گیاه در شرایط محدودیت رطوبتی با افزایش سنتز و تجمع این گروه از کربوهیدرات های محلول، اقدام به تنظیم فشار اسمزی و حفظ تعادل آبی بافت ها می کند. در مورد

محتوای پرولین

مقدار پرولین برگ به طور معنی داری تحت تأثیر هر دو عامل آبیاری و تلقیح میکوریزایی قرار گرفت (جدول ۲). بر اساس میانگین داده ها، مقدار پرولین با کاهش سطح آبیاری روندی افزایشی نشان داد؛ به طوری که در آبیاری کامل (۱۰۰٪) کمترین مقدار ۰/۳۴ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ، در آبیاری ۸۰٪ مقدار ۰/۳۷ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ و در آبیاری ۵۰٪ بیشترین مقدار ۰/۴۴ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ مشاهده شد (شکل ۳ الف). افزایش تجمع پرولین در سطوح پایین آبیاری بیانگر نقش تنظیمی این ترکیب در حفظ تعادل اسمزی و محافظت سلولی در برابر تنش خشکی است. از سوی دیگر، مقایسه میانگین های مربوط به تلقیح قارچ های میکوریزا نشان داد که بیشترین مقدار پرولین در تیمار شاهد (بدون قارچ) با ۰/۴۱ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ مشاهده شد، در



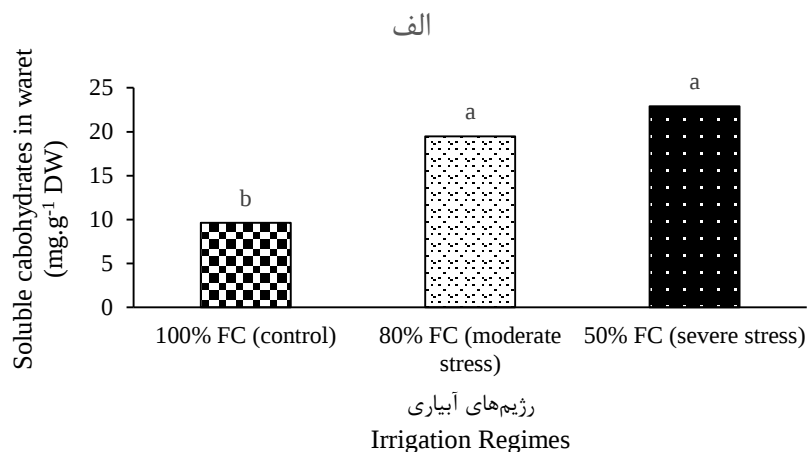
شکل ۳- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ‌های مایکوریزا (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر محتوای پرولین در مقایسه با شاهد. میانگین‌هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 3. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on proline content compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

پاسخ به تنش خشکی افزایش یافته و نقش مهمی در تنظیم اسمزی، حفاظت سلولی، و تحمل گیاه در برابر کاهش رطوبت دارند. همچنین، تلقیح با مایکوریزا، به‌ویژه *Rhizophagus intraradices* با تقویت وضعیت فیزیولوژیک گیاه و کاهش شدت تنش، موجب افزایش بیشتر قندهای محلول در الکل شد. افزایش قندهای محلول، علاوه بر نقش در تنظیم اسمزی، می‌تواند در پایداری پروتئین‌ها و غشاهای، و نیز در تنظیم سیگنال‌های مربوط به پاسخ به تنش مشارکت داشته باشد (Hosseini et al., 2020; Krasensky and Jonak, 2012). الگوی مشاهده‌شده در این پژوهش، یعنی افزایش تدریجی قندهای محلول با تشدید خشکی، با نتایج مطالعات در سویا و سایر گیاهان زراعی همسو است (Saeed et al., 2021).

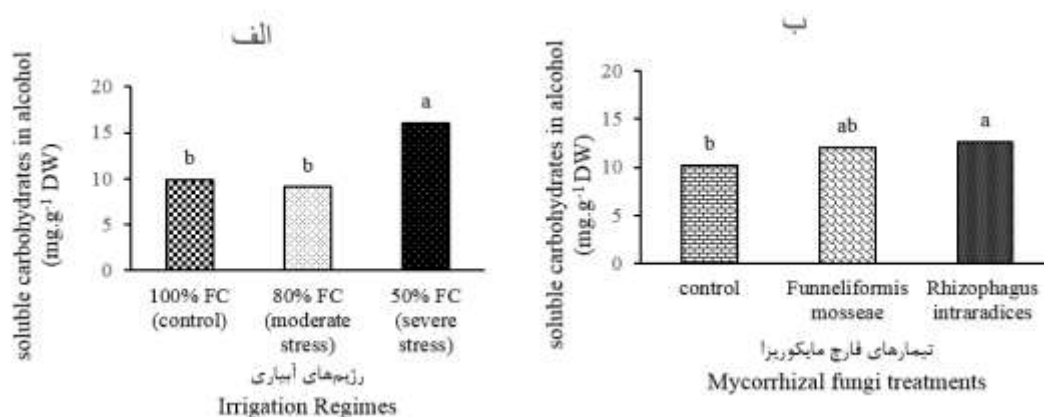
تلقیح مایکوریزا، به‌ویژه *Rhizophagus intraradices*، سبب افزایش بیشتر قندهای محلول در الکل نسبت به شاهد شد که نشان می‌دهد همزیستی مایکوریزایی نه تنها وضعیت آبی را بهبود می‌بخشد، بلکه مسیرهای متابولیکی تولید و تجمع کربوهیدرات‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش قندها در گیاهان مایکوریزایی پیش‌تر نیز گزارش شده و به بهبود فتوسنتز، افزایش تخصیص کربن به ریشه و همچنین نقش تنظیمی مایکوریزا بر بیان ژن‌های مرتبط با متابولیسم کربن نسبت داده شده است (Ruiz-Lozano et al., 2016).

قندهای محلول در آب، مشاهده شد که مقدار این ترکیبات در آبیاری کامل (۱۰۰٪) برابر با ۹/۶۳ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک بود. با کاهش آبیاری به ۸۰٪ مقدار آن به‌طور چشمگیری به ۱۹/۴۹ میلی‌گرم بر گرم افزایش یافت و در شرایط تنش شدید (۵۰٪ آبیاری) بیشترین مقدار با ۲۲/۸۹ میلی‌گرم بر گرم ثبت شد. الگوی آماری نیز این روند افزایشی را تأیید کرده و تیمارهای ۸۰٪ و ۵۰٪ آبیاری را در گروه‌های آماری بالاتر نسبت به آبیاری کامل قرار داد (شکل ۴). قندهای محلول در الکل نیز روندی مشابه نشان دادند. مقدار این نوع قندها در آبیاری کامل ۹/۸۶ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک بود و با کاهش آبیاری به ۸۰٪ مقدار نسبتاً مشابهی (۹/۰۶ میلی‌گرم) مشاهده شد؛ اما در تنش شدید (۵۰٪) مقدار آن به ۱۶/۰۴ میلی‌گرم بر گرم افزایش یافت. این افزایش نشان می‌دهد که قندهای محلول در الکل نیز نقش مهمی در سازگاری گیاه با تنش خشکی دارند (شکل ۵ الف). تلقیح گیاه با قارچ مایکوریزا آربسکولار نیز موجب تغییرات معنی‌دار در قندهای محلول در الکل شد. در تیمار شاهد مقدار این ترکیبات ۱۰/۲ میلی‌گرم بر گرم بود، در حالی که تلقیح با *Funneliformis mosseae* مقدار قند محلول در الکل را به ۱۲/۰۹ میلی‌گرم افزایش داد و بیشترین مقدار در تیمار *Rhizophagus intraradices* با ۱۲/۶۷ میلی‌گرم بر گرم مشاهده شد (شکل ۵ ب). به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که هر دو نوع قند محلول در



شکل ۴- تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر میزان قندهای محلول در آب. میانگین‌هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 4. The effect of different levels of irrigation on water-soluble sugars content. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.



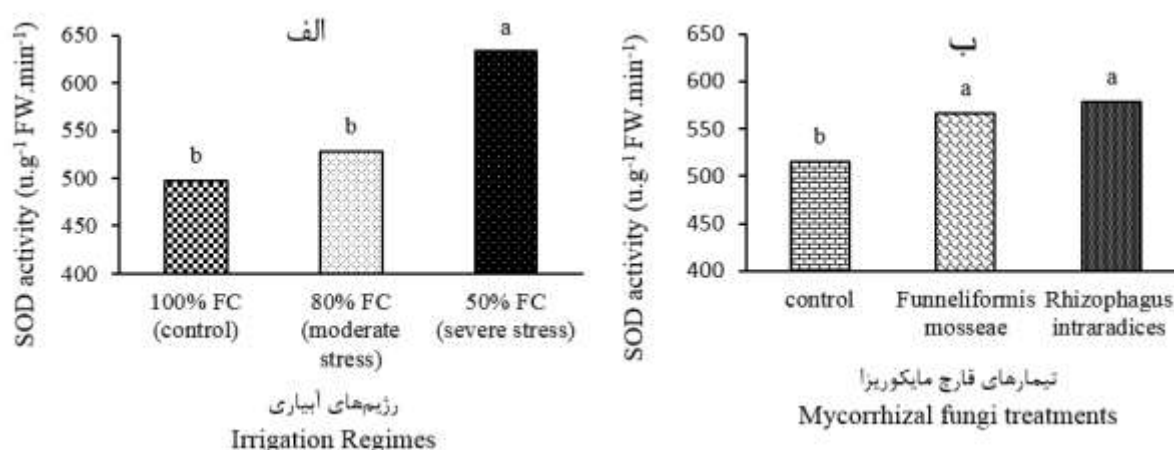
شکل ۵- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ‌های میکوریزا (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر میزان قندهای محلول در الکل در مقایسه با شاهد. میانگین‌هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 5. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on alcohol-soluble sugars content compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

میلی گرم پروتئین ثبت شد (شکل ۶ الف). این افزایش در سطوح پایین آبیاری نشان‌دهنده آن است که گیاه در مواجهه با تنش خشکی با تولید بیشتر گونه‌های فعال اکسیژن روبه‌رو شده و در پاسخ به این فشار اکسیداتیو، فعالیت SOD را به عنوان نخستین خط دفاع آنتی‌اکسیدانی خود تقویت می‌کند. همچنین، تلقیح گیاه با قارچ‌های میکوریزا آریسکولار موجب افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد. گیاهان شاهد، که فاقد هرگونه همزیستی قارچی بودند، پایین‌ترین مقدار فعالیت SOD را

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت تأثیر هر دو عامل آبیاری و تلقیح میکوریزایی قرار گرفت و تغییرات معنی‌داری را نشان داد (جدول ۲). کاهش سطح آبیاری منجر به افزایش فعالیت SOD شد؛ به‌طوری‌که در آبیاری کامل (۱۰۰٪) مقدار این آنزیم برابر با ۴۹۸ میکرومول بر میلی‌گرم پروتئین بود، در سطح ۸۰٪ آبیاری این مقدار به ۵۲۸ میکرومول بر میلی‌گرم پروتئین افزایش یافت و بالاترین فعالیت در تیمار ۵۰٪ آبیاری با ۶۳۳ میکرومول بر

پژوهش نشان داد که تنش خشکی موجب افزایش فعالیت آنزیم SOD شد که بیانگر فعال شدن سازوکارهای دفاعی گیاه در مقابله با تنش اکسیداتیو است. همچنین، تلقیح مایکوریزایی در مقایسه با گیاهان شاهد باعث افزایش فعالیت این آنزیم گردید. در میان تیمارهای قارچی، تلقیح *Rhizophagus intraradices* بیشترین مقدار فعالیت SOD را نشان داد که می‌تواند بیانگر نقش مؤثر این قارچ در بهبود پاسخ‌های فیزیولوژیکی گیاه تحت شرایط تنش خشکی باشد.



شکل ۶- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ‌های مایکوریزا (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) در مقایسه با شاهد. میانگین‌هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 6. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on superoxide dismutase (SOD) activity compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

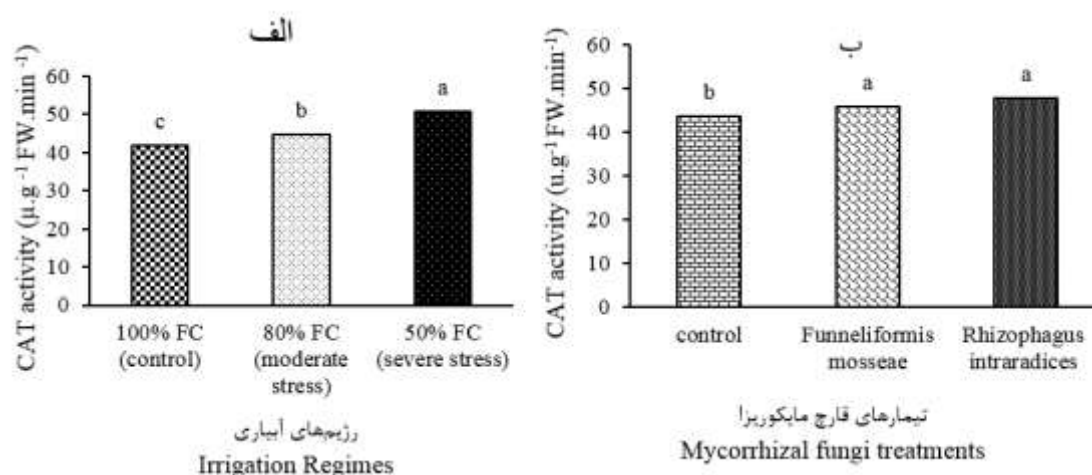
هیدروژن افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، بررسی تأثیر تلقیح مایکوریزا نشان داد که حضور قارچ‌ها موجب افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم شد. گیاهان شاهد (فاقد قارچ) کمترین فعالیت کاتالاز را با ۴۳/۷۸ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ در دقیقه نشان دادند، در حالی که تلقیح با *Funneliformis mosseae* این مقدار را به ۴۶ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ در دقیقه افزایش داد. بیشترین فعالیت CAT در تیمار *Rhizophagus intraradices* با ۴۷/۸۹ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ در دقیقه مشاهده شد (شکل ۷ ب). این نتایج نشان می‌دهد که همزیستی مایکوریزایی با بهبود وضعیت تغذیه‌ای و آبرسانی گیاه و همچنین کاهش آثار استرس اکسیداتیو، موجب تقویت سامانه آنتی‌اکسیدانی و افزایش فعالیت کاتالاز می‌شود. به‌طور کلی، افزایش فعالیت کاتالاز در سطوح پایین آبیاری

فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT)

فعالیت آنزیم کاتالاز به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی و تلقیح قارچ‌های مایکوریزا آرب سکولار قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، کاهش سطح آبیاری منجر به افزایش فعالیت CAT شد؛ به‌گونه‌ای که در آبیاری کامل (۱۰۰٪) کمترین مقدار با ۴۲ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ در دقیقه ثبت گردید، در سطح ۸۰٪ آبیاری مقدار فعالیت به ۴۴/۷۷ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ در دقیقه افزایش یافت و در پایین‌ترین سطح آبیاری (۵۰٪) بیشترین فعالیت آنزیمی برابر با ۵۲/۸۹ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ در دقیقه مشاهده شد (شکل ۷ الف). این روند افزایشی بیانگر آن است که گیاه در پاسخ به کاهش رطوبت و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن، با تقویت سامانه دفاعی خود، فعالیت کاتالاز را برای خنثی‌سازی پراکسید

(CAT) و پراکسیداز (POD) را افزایش می‌دهند و به این ترتیب سرعت حذف ROS را بالا برده و پراکسیداسیون لیپیدها را محدود می‌کنند (Begum et al., 2019; Estrada et al., 2013). هرچند در این پژوهش تمرکز بر MDA بوده است، احتمالاً الگوی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز با این یافته‌ها سازگار است؛ به گونه‌ای که گیاهان تلقیح‌شده با مایکوریزا، فعالیت آنتی‌اکسیدانی بالاتری نسبت به گیاهان شاهد داشته‌اند.

و نیز در گیاهان تلقیح‌شده با مایکوریزا حاکی از آن است که هر دو عامل، نقش مهمی در بهبود توان دفاعی گیاه در برابر تنش خشکی دارند. حضور قارچ‌های مایکوریزا، به‌ویژه *Rhizophagus intraradices*، با کارآمدتر کردن سیستم آنتی‌اکسیدانی، شدت تنش وارده را کاهش داده و کارکرد فیزیولوژیکی گیاه را در شرایط کم‌آبی بهبود می‌بخشد. شواهد متعددی وجود دارد که نشان می‌دهد گیاهان مایکوریزایی تحت تنش خشکی سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسیددیسموتاز (SOD)، کاتالاز



شکل ۷- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ‌های مایکوریزا (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر فعالیت آنزیم کاتالاز (CAT) در مقایسه با شاهد.

میانگین‌هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

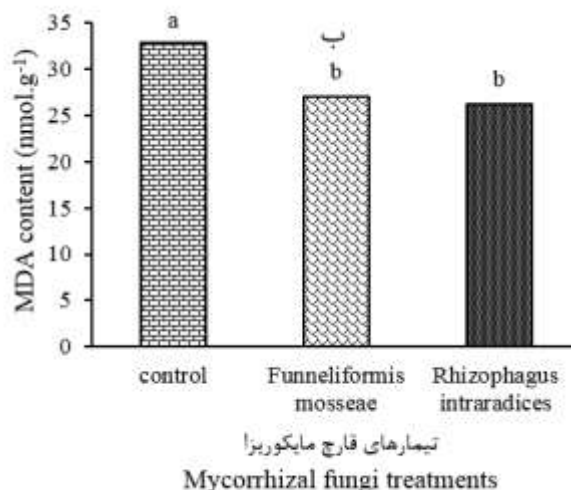
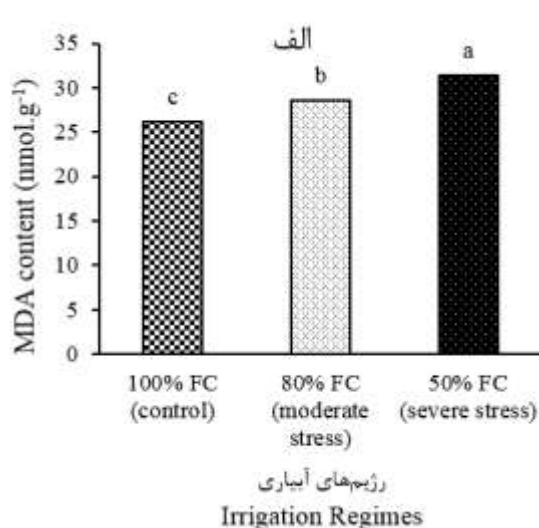
Figure 7. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on catalase (CAT) activity compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

مقدار MDA در گیاهان شاهد (بدون قارچ) با ۳۲/۸۸ نانومول بر گرم وزن تر برگ مشاهده شد. در مقابل، تلقیح با *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices* به ترتیب موجب کاهش MDA به ۲۷/۱۱ و ۲۶/۲۲ نانومول بر گرم وزن تر برگ شد (شکل ۸ ب). کاهش معنی‌دار MDA در تیمارهای مایکوریزایی نشان می‌دهد که همزیستی گیاه با قارچ‌های آربسکولار قادر است با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و محدود کردن آسیب اکسیداتیو، پایداری غشایی را در شرایط تنش افزایش دهد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که کمبود آب شدت پراکسیداسیون لیپیدها و تجمع MDA را افزایش می‌دهد، اما همزیستی مایکوریزایی به‌طور مؤثری این آسیب اکسیداتیو را کاهش می‌دهد و موجب بهبود

مالون‌دی‌آلدئید (MDA)

نتایج نشان داد که محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) تحت تأثیر هر دو عامل آبیاری و تلقیح مایکوریزا به‌طور معنی‌داری تغییر کرد (جدول ۲). در بین سطوح مختلف آبیاری، مقدار MDA با کاهش تأمین آب روند افزایشی داشت؛ به‌طوری‌که آبیاری کامل (۱۰۰٪) کمترین مقدار ۲۲/۲۶ نانومول بر گرم وزن تر برگ، آبیاری ۸۰ درصد مقدار ۲۸/۵۵ نانومول بر گرم وزن تر برگ و آبیاری ۵۰ درصد بیشترین مقدار ۳۱/۴۴ نانومول بر گرم وزن تر برگ را نشان داد (شکل ۸ الف). این الگو بیانگر آن است که محدودیت آبی شدت پراکسیداسیون لیپیدها را افزایش داده و منجر به تجمع بیشتر MDA و در نتیجه آسیب غشایی بالاتر می‌شود. در بررسی اثر مایکوریزا نیز، بیشترین

تلقیح با قارچ‌های میکوریزا آربسکولار و در سطوح مختلف آبیاری بررسی شد که امکان ارزیابی نقش این همزیستی زیستی در کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی را فراهم می‌کند. در مقابل، کاهش معنی‌دار MDA در گیاهان تلقیح شده با میکوریزا نسبت به شاهد نشان می‌دهد که همزیستی آربسکولار توانسته است شدت استرس اکسیداتیو را کاهش دهد و از غشاهای برابر آسیب ناشی از ROS محافظت کند. برتری *Rhizophagus intraradices* در کاهش MDA نسبت به *Funneliformis mosseae* بیانگر کارایی بیشتر این سویه در فعال‌سازی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی و/یا کاهش تولید ROS است.



شکل ۸- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ‌های میکوریزا (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر میزان مالون‌دی‌آلدئید (MDA) در مقایسه با شاهد. میانگین‌هایی که دارای حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

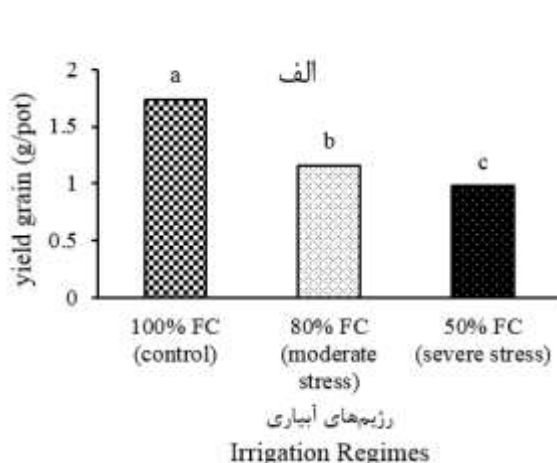
Figure 8. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on malondialdehyde (MDA) content compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

الف. این روند کاهشی نشان‌دهنده حساسیت گیاه به محدودیت رطوبتی و تأثیر مستقیم کمبود آب بر فرآیندهای رشد زایشی، پراکندگی دانه و انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های ذخیره‌ای است. از سوی دیگر، تلقیح گیاه با قارچ‌های میکوریزا آربسکولار موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه شد. گیاهان شاهد که فاقد همزیستی قارچی بودند، کمترین عملکرد را با ۱/۱۳ گرم در گلدان نشان دادند. تلقیح با *Funneliformis mosseae* مقدار عملکرد را به ۱/۳۴ گرم افزایش داد و بالاترین مقدار در

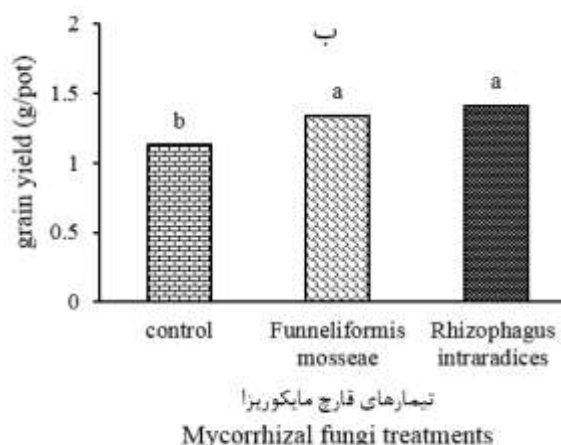
عملکرد دانه در گلدان

عملکرد دانه تحت تأثیر مجزای هر دو عامل میزان آبیاری و تلقیح میکوریزایی قرار گرفت و تغییرات معنی‌داری در پاسخ گیاه مشاهده شد (جدول ۲). کاهش سطح آبیاری باعث افت قابل توجه عملکرد شد؛ به‌طوری‌که در آبیاری کامل (۱۰۰٪) بیشترین عملکرد دانه با ۱/۷۴ گرم در گلدان حاصل شد، در حالی‌که با کاهش آبیاری به ۸۰٪ مقدار عملکرد به ۱/۱۶ گرم رسید و کمترین مقدار در تیمار ۵۰٪ آبیاری با ۰/۹۸ گرم ثبت گردید (شکل ۹).

همزیستی با *Rhizophagus intraradices* بود که نشان‌دهنده نقش مؤثر آن در بهبود بهره‌وری گیاه تحت تنش خشکی است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که سویا نسبت به تنش خشکی حساس است و کاهش معنی‌دار در رشد، سطح برگ، فعالیت فتوسنتزی و عملکرد دانه در شرایط کمبود آب مشاهده می‌شود (Saeed et al., 2021). هم‌چنین، گزارش شده است که کاربرد میکوریز آربسکولار در سویا می‌تواند با بهبود وضعیت تغذیه‌ای (به‌ویژه فسفر)، افزایش رشد ریشه، ارتقای وضعیت آبی و تقویت سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، بخشی از این اثرات منفی را جبران کند (Begum et al., 2019; Li et al., 2019).



تیمار *Rhizophagus intraradices* با ۱/۴۱ گرم در گلدان مشاهده شد (شکل ۹ ب). این بهبود عملکرد نشان می‌دهد که همزیستی میکوریزی با افزایش کارایی جذب آب و عناصر غذایی، بهبود فتوسنتز و ارتقای سلامت و پایداری فیزیولوژیک گیاه، موجب تقویت رشد زایشی و افزایش وزن نهایی دانه‌ها می‌شود. به‌طور کلی، کاهش عملکرد دانه در اثر تنش خشکی بیانگر تأثیر منفی کمبود آب بر مراحل رشد زایشی و پر شدن دانه است، در حالی که افزایش عملکرد در گیاهان تلقیح‌شده با میکوریزا نشان می‌دهد که این قارچ‌ها با بهبود وضعیت آبی و تغذیه‌ای گیاه، بخشی از اثرات محدودیت رطوبتی را جبران کرده و می‌توانایی گیاه در تولید و تخصیص مواد به دانه را افزایش می‌دهند. بیشترین سود فیزیولوژیک و عملکردی مربوط به



شکل ۹- تأثیر سطوح مختلف آبیاری (الف) و تیمارهای مختلف قارچ‌های میکوریزا (*Funneliformis*

mosseae and *Rhizophagus intraradices*) (ب) بر عملکرد دانه در مقایسه با شاهد. میانگین‌هایی که دارای

حروف یکسان هستند در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

Figure 9. The effect of different levels of irrigation (A) and different treatments of mycorrhizal fungi (*Funneliformis mosseae* and *Rhizophagus intraradices*) (B) on grain yield compared to control. Means of similar letters have no significant difference at 5% level.

وزن تر افزایش یافت که نشان‌دهنده افزایش حدود ۴۱/۲ درصدی آسیب اکسیداتیو در شرایط تنش خشکی است.

تلقیح با قارچ‌های میکوریز آربسکولار توانست بخشی از اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کند. در میان تیمارهای قارچی، گونه *Rhizophagus intraradices* عملکرد بهتری نسبت به *Funneliformis mosseae* نشان داد. مقدار مالون‌دی‌آلدئید در تیمار *Rhizophagus intraradices* برابر ۲۶/۲۲ نانومول بر گرم وزن تر بود، در

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۵۰ درصد ظرفیت زراعی موجب افت قابل توجه وضعیت آبی و افزایش آسیب اکسیداتیو در گیاه سویا شد. به‌طوری‌که محتوای نسبی آب برگ از ۹۷/۸۲ درصد در آبیاری کامل به ۶۷/۱۱ درصد در تنش شدید کاهش یافت که بیانگر کاهش حدود ۳۱/۴ درصدی وضعیت آبی گیاه است. هم‌چنین مقدار مالون‌دی‌آلدئید به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها از ۲۲/۲۶ به ۳۱/۴۴ نانومول بر گرم

نتایج این پژوهش نشان داد که کارایی گونه‌های مختلف میکوریز آربسکولار در بهبود تحمل خشکی در سویا یکسان نیست و *Rhizophagus intraradices* در بهبود وضعیت آبی گیاه، افزایش تجمع اسمولیت‌ها و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها مؤثرتر از *Funneliformis mosseae* عمل کرده است. بنابراین، انتخاب گونه مناسب میکوریزایی در زمان کشت می‌تواند به عنوان یک روش کمکی برای کاهش اثرات تنش خشکی در کشت سویا مورد توجه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه کردستان به خاطر فراهم نمودن امکانات این طرح تشکر می‌کنم.

حالی که در تیمار *Funneliformis mosseae* مقدار ۲۷/۱۱ نانومول بر گرم وزن تر اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده کاهش حدود ۳/۲۸ درصدی بیشتر در اثر *Rhizophagus intraradices* است.

همچنین این قارچ در افزایش قندهای محلول نیز کارایی بیشتری داشت؛ به طوری که مقدار قند محلول در الکل در تیمار *Rhizophagus intraradices* برابر ۱۲/۶۷ میلی گرم بر گرم وزن خشک و در تیمار *Funneliformis mosseae* برابر ۱۲/۰۹ میلی گرم بر گرم وزن خشک بود که بیانگر حدود ۴/۸ درصد برتری این گونه در افزایش تجمع قندهای محلول است. علاوه بر این، بیشترین محتوای نسبی آب برگ نیز در تیمار *Rhizophagus intraradices* (۷۷/۴۶ درصد) در مقایسه با *Funneliformis mosseae* (۷۶/۶۱ درصد) مشاهده شد که حدود ۱/۱۱ درصد برتری را نشان می‌دهد. در مجموع،

منابع

- Abbaspour, H., Saeidi, G. and Afshari, R. 2018. Arbuscular mycorrhiza improves water status and yield of wheat under drought stress. Archives of Agronomy and Soil Science, 64(8), 1102–1115. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1412949> **(Journal)**
- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. In L. Packer (Ed.). Methods in Enzymology, Vol. 105, 121–126. Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3) **(Journal)**
- Ahmad, P., Jaleel, C. A., Salem, M. A., Nabi, G. and Sharma, S. 2021. Roles of enzymatic and non-enzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. Physiologia Plantarum, 172(2), 102–119. <https://doi.org/10.1111/ppl.13243> **(Journal)**
- Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in Beta vulgaris. Plant Physiology, 24(1), 1–15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1> **(Journal)**
- Barrs, H. D. and Weatherley, P. E. 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. Australian Journal of Biological Sciences, 15(3), 413–428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413> **(Journal)**
- Bárzana, G., Aroca, R., Bienert, G. P., Chaumont, F. and Ruiz-Lozano, J. M. 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases relative apoplastic water flow in maize roots under drought stress. Frontiers in Plant Science, 6, 787. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00787> **(Journal)**
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil, 39(1), 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060> **(Journal)**
- Beauchamp, C. and Fridovich, I. 1971. Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. Analytical Biochemistry, 44(1), 276–287. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(71\)90370-8](https://doi.org/10.1016/0003-2697(71)90370-8) **(Journal)**
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N. and Zhang, L. 2019. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. Frontiers in Plant Science, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068> **(Journal)**
- Brundrett, M., & Tedersoo, L. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. New Phytologist, 220(4), 1108–1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976> **(Journal)**
- Cakmak, I. and Horst, W. J. 1991. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). Physiologia Plantarum, 83, 463–468. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x> **(Journal)**

- Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017> **(Journal)**
- Estrada, B., Barea, J. M. and Azcón-Aguilar, C. 2013. Arbuscular mycorrhiza fungi alleviate oxidative stress in lettuce plants grown under different light intensities. *Plant Science*, 198, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.10.008> **(Journal)**
- Farooq, M., Hussain, M. and Siddique, K. H. M. 2019. Drought stress in wheat during flowering and grain filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 38(3), 190–205. <https://doi.org/10.1080/07352689.2019.1575679> **(Journal)**
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2023. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9910en> **(Journal)**
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. 1986. Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., 383–411. ASA and SSSA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15> **(Journal)**
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulficar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M. and Fotopoulos, V. 2020. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681> **(Journal)**
- Hosseini, S. A., Prasad, P. V. V. and Djanaguiraman, M. 2020. Osmolyte accumulation in plants under abiotic stress: mechanisms and perspectives. *Plant Physiology and Biochemistry*, 151, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.03.005> **(Journal)**
- Kiani, H. and Sohrabi, Y. 2022. Effects of controlled irrigation on soybean physiology under greenhouse conditions. *Journal of Plant Stress Physiology*, 12(3), 45–58. **(Journal)**
- Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K. and Dietz, K. J. 2019. The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. *Antioxidants*, 8(4), 94. <https://doi.org/10.3390/antiox8040094> **(Journal)**
- Li, M., Guo, R., Yu, F., Chen, X., Zhao, H., Li, H. and Wu, J. 2022. Arbuscular mycorrhiza fungi enhance drought tolerance in soybean by regulating osmolytes and antioxidant enzymes. *Agronomy*, 12(8), 1764. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081764> **(Journal)**
- Li, T., Hu, Y., Hao, Z., Li, H., Wang, Y. and Chen, B. 2019. Arbuscular mycorrhiza symbiosis improves photosynthesis and water status of maize under drought stress. *Plant and Soil*, 439, 567–583. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04062-1> **(Journal)**
- Mittler, R. 2022. ROS signaling in plant stress responses. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 299–328. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012655> **(Journal)**
- Najafi vafa, Z., Sohrabi, Y., Mirzaghaderi, GH. and Heidari, GH. 2022a. Soil Microorganisms and Seaweed Application with Supplementary Irrigation Improved Physiological Traits and Yield of Two Dryland Wheat Cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 13, pp. 1-23. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.855090> **(Journal)**
- Najafi vafa, Z., Sohrabi, Y., Mirzaghaderi, GH., Heidari, GH., Rizwan, M. and Sayyed, R.Z. 2024. Effect of bio-fertilizers and seaweed extract on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under different irrigation regimes: Two-year field study. *Chemosphere*. 364(143068), pp. 1- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143068> **(Journal)**
- Page, A. L. (Ed.). 1982. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* (2nd ed.). ASA and SSSA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed> **(Journal)**
- Ruiz-Lozano, Aroca, J.M., Zamarreño R. and Metal ' A. 2016. Arbuscular mycorrhizal symbiosis induces strigolactone biosynthesis under drought and improves drought tolerance in lettuce and tomato. *Plant Cell Environment*. 39, 441–452. <https://doi.org/10.1111/pce.12631> **(Journal)**
- Saeed, F., Afzaal, M., Niaz, B., Arshad, M.U., Tufail, T., Hussain, M.B. and Javed, A. 2018. Bitter melon (*Momordica charantia*): a natural healthy vegetable. *International Journal of Food Properties*. 21 (1), 1270–1290. <https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1446023> **(Journal)**
- Singh, S., Parihar, P., Singh, R., Singh, V.P. and Prasad, S.M. 2024. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated modulation of physiological and biochemical responses in plants under drought stress: A comprehensive review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(2), 521–538. DOI: 10.1007/s00344-023-11150-7 **(Journal)**
- Smith, S. E. and Read, D. J. 2010. *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.00001-1> **(Journal)**

- Smith, S. E., Facelli, E., Pope, S., & Smith, F. A. (2010). Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Plant and Soil*, 326, 3–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9981-5> **(Journal)**
- Wang, X., Pan, Q., Chen, F., Yan, X. and Liao, H. 2023. AMF-enhanced drought tolerance in soybean: physiological and molecular mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1198324. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1198324> **(Journal)**
- Zulfiqar, F., Ashraf, M. and Ahmad, P. 2021. Osmolytes and antioxidant defense in plants under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 162, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.020> **(Journal)**



Variations in proline, soluble sugars, and antioxidant enzymes of soybean in response to different irrigation regimes and mycorrhiza treatments

Zahra Najafi Vafa¹, Nasrin Ghamari Rahim^{2*}, Adel Siosemardeh^{3*}, Yousef Sohrabi⁴

Received: May 2, 2026

Accepted: May 27, 2026

Abstract

Drought stress severely disrupts osmotic balance and oxidative stability in soybean; however, the species-specific role of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in regulating these processes under different irrigation regimes has not been fully clarified. This study was conducted in 2024 as a 3×3 factorial experiment based on a completely randomized design with three replications. Experimental treatments included three irrigation regimes (100% field capacity as the control, 80% field capacity as moderate drought stress, and 50% field capacity as severe drought stress) and three mycorrhizal treatments (non-inoculated control, *Funneliformis mosseae*, and *Rhizophagus intraradices*). The effects of these treatments on proline, soluble sugars and relative water content (RWC), malondialdehyde (MDA), and antioxidant enzyme activity in soybean seedlings were evaluated. Reducing irrigation to 80% and 50% of field capacity significantly decreased RWC and increased osmolyte accumulation, lipid peroxidation, and antioxidant enzyme activity. Inoculation with AMF mitigated these stress responses, and *Rhizophagus intraradices* showed the most pronounced effect in improving plant water status, regulating osmotic adjustment, and reducing oxidative damage, particularly under moderate and severe drought conditions. These results indicate that AMF, especially *Rhizophagus intraradices*, contribute to enhanced drought tolerance in soybean through improved water status, increased osmolyte accumulation, and reduced oxidative damage. Overall, the findings provide evidence of the superior performance of *Rhizophagus intraradices* in alleviating drought stress in soybean.

Keywords: Drought stress; Lipid peroxidation (Malondialdehyde); Mycorrhiza; Relative water content

How to cite this article

Najafi Vafa, Z., Ghamari Rahim, N., Siosemardeh, A. and Sohrabi, Y. 2026. Variations in proline, soluble sugars, and antioxidant enzymes of soybean in response to different irrigation regimes and mycorrhiza treatments. Iranian Journal of Seed Science and Research, 12(4): 63-80. (In Persian)(**Journal**)
DOI: [10.22124/jms.2026.9715](https://doi.org/10.22124/jms.2026.9715)

COPYRIGHTS

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to the Iranian Journal of Seed Science and Research
The content of this article is distributed under Iranian Journal of Seed Science and Research open access policy and the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY4.0) License. For more information, please visit <http://jms.guilan.ac.ir/>

1. Postdoc Researcher of Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. zahranajafivafa.64@gmail.com
2. Ph.D. Student of Crop Physiology, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. nasringhamarirahim@gmail.com
3. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. a33@uok.ac.ir
4. Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. y.sohrabi@uok.ac.ir

*Corresponding author: a33@uok.ac.ir