Plant Production and Genetics
Vol. 5, No. 2, Autumn & Winter 2024, p. 169-182
DOI: 10.22034/PLANT.2024.141259.1103

تولید و ژنتیک گیاهی
جلد ۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۳، صفحه ۱۸۲-۱۶۹
مقاله پژوهشی

تأثیر تنش خشکی و قارچ میکوریزا بر برخی صفات فیزیولوژیک و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه ترخون (*Artemisia dracunculus* L.)

لیلا منصوری[۱]، محمود اثنی عشری[۲*]، معصومه عامریان[۳]

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲. استاد، گروه علوم باغبانی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۸

چکیده

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زنده و عامل محدود کننده تولید موفقیت آمیز محصولات گیاهی در سراسر جهان است و اثرات منفی زیادی بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاهان دارد. قارچ‌های میکوریزا تأثیر قابل توجهی بر رشد گیاه، جذب آب، تغذیه مواد معدنی و محافظت در برابر تنش‌های غیر زیستی دارند. لذا به منظور بررسی قارچ میکوریزا بر برخی صفات فیزیولوژیک و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه ترخون در شرایط تنش خشکی، پژوهشی به صورت آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول تنش خشکی در دو سطح شامل ۱۰۰ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (ظرفیت گلدان) و فاکتور دوم تلقیح با قارچ میکوریزا در ۵ سطح شامل (*G.hoi + G. mosseae*، *G.hoi + G. intraradices*، *G. mosseae + G. intraradices*، *G.hoi + G. mosseae + G. intraradices* و شاهد) بودند. طبق نتایج به دست آمده، کاربرد قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، پراکسید هیدروژن، گایاکول پراکسیداز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز و همچنین میزان مالون دی‌آلدئید، فنل کل و اسید آسکوربیک برگ‌ها شد. کاربرد قارچ میکوریزا برخلاف تنش خشکی سبب بهبود محتوی پتاسیم و فسفر برگ گردید. کاربرد سه گونه قارچ میکوریزا (*G. intraradices +G.hoi + G. mosseae*) تأثیر بهتری بر صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ترخون تحت تنش خشکی داشت. نتایج تحقیق بیانگر اثر مثبت قارچ میکوریزا در افزایش تحمل به خشکی گیاه ترخون و مهار بهتر رادیکال‌های آزاد تولید شده در شرایط تنش بود.

کلیدواژگان: اسید آسکوربیک، پتاسیم، فنل کل، کاتالاز

*ایمیل نویسنده مسئول: m.esnaashari@basu.ac.ir

مقدمه

ترخون (*Artemisia dracunculus* L.) گیاه علفی و چند ساله از خانواده Asteraceae است. بسته به آب و هوای محیط رشد، دارای ساقه‌های چوبی و سبز مایل به زرد یا سبز مایل به قهوه‌ای به ارتفاع ۳۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر می‌باشد (Basiri & Nadjafi, 2019). ترخون دارای بیش از ۸۰۰ گونه پراکنده در نقاط مختلف جهان می‌باشد. ایران دارای ۳۴ گونه یکساله و چند ساله است که برخی از آن‌ها منحصر به این کشور هستند (Mohammadi *et al*., 2023). برگ‌ها و قسمت‌های رویشی ترخون حاوی انواع مواد فعال بیولوژیکی از جمله اسانس‌ها، کومارین‌ها و فلاونوئیدها است (Lamian *et al*., 2017).

خشکی یکی از شایع‌ترین و مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی است و تنش خشکی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک، رشد و عملکرد گیاهان را محدود می‌کند. علاوه بر این، خشکسالی‌های فصلی اغلب حتی در مناطق غیرخشک رخ می‌دهد (Lamian *et al*., 2017). بنابراین، درک مکانیسم‌هایی که گیاهان برای پاسخ به تنش خشکی به کار می‌گیرند بسیار حائز اهمیت است (Farooq *et al*., 2021). تأثیر خشکی بر رشد گیاه به عوامل مختلفی از جمله مقاومت ژنتیکی گیاه، مرحله رشد و مدت زمان قرار گرفتن گیاه در معرض خشکی و برخی عوامل دیگر بستگی دارد (Amerian *et al*., 2020). در گیاهان، متابولیسم گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند سوپراکسید ($O_2^{\cdot-}$)، پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال هیدروکسیل (OH^-) در تعادل پویا (dynamic balance) نگه داشته می‌شود (Nasirzadeh *et al*., 2021). در شرایط تنش کم‌آبی، این تعادل به‌هم می‌خورد و فعالیت بیشتر سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی برای کاهش آسیب به بافت‌های گیاه مورد نیاز است (Zhanassova *et al*., 2021). به دلیل نقش‌های چند منظوره ROS، لازم است سلول‌ها سطح ROS را به شدت کنترل کنند تا از آسیب اکسیداتیو در گیاه جلوگیری نمایند (Shawon *et al*., 2020). سلول‌های گیاهی دارای مجموعه‌ای از سیستم‌های محافظتی و ترمیم‌کننده هستند که وقوع آسیب اکسیداتیو را به حداقل می‌رساند. این سیستم‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: سیستم‌هایی که با گونه‌های فعال اکسیژن واکنش می‌دهند و آن‌ها را در سطح پایین نگه می‌دارند مانند کاتالاز (CAT)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD) و پراکسیداز (POX)) و سیستم‌هایی که آنتی اکسیدان‌های اکسید شده را بازسازی می‌کنند از جمله گلوتاتیون (GSH)، گلوتاتیون ردوکتاز (GR)، آسکوربات و ردوکتازهای مونو و دهیدروآسکوربات (Patanè *et al*., 2022). در تحقیقی روی گیاه ترخون مشخص گردید که تنش خشکی باعث افزایش میزان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز شده است (Mumivand *et al*., 2021). برای کاهش مشکل تنش خشکی، راهبردهای زیادی وجود دارد که قارچ میکوریزا آربوسکولار یک راه کارآمد و جدید برای قادر ساختن گیاهان به رشد خوب در محیط‌های مستعد خشکی است (Oliveira *et al*., 2022). ارتباط موفقیت آمیز بین گیاهان و قارچ میکوریزا آربوسکولار یک استراتژی برای بهبود وضعیت تغذیه هر دو گروه است که استفاده از کودها را کاهش می‌دهد. قارچ میکوریزا آربوسکولار کربوهیدرات مورد نیاز خود را از گیاه میزبان جذب می‌کند، در حالی که گیاهان از این ارتباط با افزایش جذب مواد مغذی سود می‌برند که تحمل به تنش‌های غیرزیستی را بهبود می‌بخشد (Cheng *et al*., 2021).

قارچ‌های میکوریزا روابط همزیستی پایداری با ریشه‌های گیاه ایجاد می‌کنند و هیف‌های گسترده می‌توانند کارایی مصرف آب گیاه را افزایش دهند. در عین حال، این روابط می‌تواند متابولیسم گیاهی (مانند آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و پراکسیدها) را تنظیم کند تا آسیب خشکی به گیاهان کاهش یابد و در نتیجه، تحمل گیاهان را در برابر تنش خشکی بهبود بخشد (Liao *et al*., 2021). با این حال، استفاده از تلقیح قارچ میکوریزا آربوسکولار برای کاهش اثر نامطلوب تنش کمبود آب بر سیستم آنتی‌اکسیدانی هنوز ناشناخته است. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر ارزیابی تعدادی از مکانیسم‌هایی بود که به‌وسیله آن‌ها قارچ میکوریز از گیاهان ترخون در برابر آسیب ناشی از تنش خشکی محافظت می‌کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در گلخانه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی در سال ۱۴۰۰ انجام گرفت. ریزوم‌های گیاه ترخون از مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان کرمانشاه تهیه شد. به منظور دست‌یابی به گیاهانی یکنواخت و یک‌دست قطعاتی از ریزوم‌ها به طول چهار سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر انتخاب شد. تحقیق به صورت یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. فاکتور اول، سطوح آبیاری شامل دو سطح شاهد (۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی خاک) و آبیاری در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی خاک (تنش خشکی) بود و تلقیح گیاه ترخون باگونه‌های مختلف قارچ‌های میکوریزا از جنس *Glomus* در ۵ سطح (*G. hoi + G. mosseae* ، *G.hoi + G. intraradices* ، *G. mosseae + G. intraradices* ، *G.hoi + G. mosseae + G. intraradices* و شاهد) به عنوان فاکتور دوم در نظر گرفته شد. در مهرماه ریزوم‌ها به گلدان‌های دو کیلویی پلاستیکی به قطر دهانه ۱۹و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر حاوی مخلوطی از خاک زراعی و ماسه با نسبت ۱:۱ انتقال یافتند، ترکیب خاکی قبلاً به مدت دو ساعت در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۲ اتمسفر اتوکلاو شده بود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است. به منظور تهویه و بهبود زهکشی، در کف هر گلدان به مقدار ۱۰۰ گرم پوکه معدنی ریخته شد و جمعاً وزن هر گلدان ۲۰۰۰ گرم شد. در زمان کشت ریزوم‌ها، ۱۰۰گرم از مایه تلقیح که شامل خاک حاوی اسپور، ریسه‌ها و هیف مایکوریزا بود در زیر هر قطعه ریزوم استفاده شد. پس از استقرار بوته‌ها، تیمارهای آبیاری اعمال گردید. به‌منظور جلوگیری از تنش ناگهانی و ایجاد تکانهٔ اسمزی در گیاهان، در شروع آزمایش تنش خشکی به‌طور تدریجی تا رسیدن به سطح تنش مورد نظر اِعمال و سپس به مدت ۲ ماه ادامه یافت. اِعمال تنش خشکی به صورت وزنی صورت گرفت (Ardalani *et al.*, 2015). جهت محاسبهٔ درصد وزنی رطوبت خاک در نقطهٔ ظرفیت زراعی، ابتدا گلدان‌های یکدست با وزن و شکل یکسان تهیه و بعد با استفاده از ترازو به میزان هم وزن پرشدند. تعدادی از گلدان‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در آب غرق گردیدند تا اینکه تمامی هوای موجود در خلل و فرج خاک آن‌ها به‌وسیلهٔ آب جایگزین شد. سپس گلدان‌ها از آب خارج شدند و جهت جلوگیری از تبخیر سطحی از خاک آن‌ها، روی سطح خاک به وسیلهٔ فویل آلومینیومی پوشانده شد. در ادامه کار، گلدان‌ها روی سطوح مشبک به مدت ۴۸ ساعت جهت زهکشی آب اضافی تا رسیدن به ظرفیت زراعی قرار گرفتند. سپس گلدان‌ها به سرعت وزن گردیدند و در ادامه، خاک آن‌ها در دمای ۱۰۵ درجهٔ سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت کاملاً خشک و وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. نهایتاً درصد وزنی رطوبت خاک در نقطهٔ ظرفیت زراعی با استفاده از رابطهٔ ذیل محاسبه گردید.

$$FC = (FCW-DW)/DW \times 100$$

که در آن، FCW وزن خاک در ظرفیت زراعی و DW وزن خاک خشک شده در آون است.

برای رسیدن به وزن گلدانها در ۵۰٪ ظرفیت زراعی، از رابطهٔ ذیل استفاده گردید.

$$A50\% = F50\% \times (FC100\% \times DW) + DW + PW + PLW$$

که در آن، A50% وزن کل گلدان همراه با بوته در ۵۰٪ ظرفیت زراعی، F50% مقدار درصد وزنی رطوبت مورد نیاز نسبت به ظرفیت زراعی، FC100% درصد رطوبت خاک در ظرفیت زراعی، DW وزن خاک خشک گلدان، PW وزن گلدان و PLW وزن بوته های هر گلدان هستند. با استفاده از روابط فوق، تا پایان دورهٔ آزمایش، با توزین روزانهٔ گلدان‌ها، درصد رطوبت خاک در تیمارهای تنش خشکی در حد ۵۰٪ ظرفیت زراعی نگه داشته شد. در تیمار شاهد نیز با استفاده از همین روش، رطوبت خاک تا پایان دورهٔ آزمایش در حد رطوبت زراعی نگهداری گردید. پس از شروع اِعمال تیمارهای تنش، هر چند روز یک بار در تعدادی از گلدان‌های اضافی، گیاهان از خاک خارج و توزین شدند و میانگین وزن آن‌ها در رابطهٔ فوق وارد گردید و بدین ترتیب اضافه وزن بوته‌ها طی آزمایش مد نظر قرار گرفت. در پایان دوره اعمال تنش خشکی، برگ‌های بالغ و سالم هر بوته انتخاب و برای اندازه‌گیری صفات مورد بررسی به آزمایشگاه انتقال یافت.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در آزمایش

بافت خاک	فسفر قابل‌جذب	پتاسیم قابل‌جذب (ppm)	pH	هدایت الکتریکی (dS/m)
لومی	۱۶	۹۳/۳	۷/۹	۰/۷۵

غلظت مالون دی آلدئید بر اساس روش Stewart & Bewley (1980) اندازه‌گیری شد. ابتدا ۰/۲ گرم نمونه تازه برگی با ۲ میلی‌لیتر تری کلرو استیک اسید (TCA) یک درصد به عنوان بافر استخراج ساییده و سپس و به‌مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد. یک میلی‌لیتر از محلول رویی به‌دست آمده با ۴ میلی‌لیتر محلول تیوباربیتوریک اسید (TBA) ۰/۵ درصد حاوی (TCA) ۲۰ درصد، مخلوط گردید و در حمام آب جوش (۹۵ درجه سلسیوس) به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد. پس از سرد شدن نمونه‌ها جذب در طول موج ۶۰۰ نانومتر ($A_{۶۰۰}$) قرائت گردید و از مقدار جذب آن‌ها در طول موج ۵۳۲ نانومتر ($A_{۵۳۲}$) کسر شد. غلظت نهایی مالون دی آلدئید با استفاده از ضریب خاموشی $155\ mmol^{-1}cm^{-1}$ محاسبه گردید و بر حسب میکرومول بر گرم وزن تر بیان شد.

پراکسید هیدروژن بر اساس واکنش H_2O_2 با پتاسیم یدید (Potassium iodide) و با استفاده از روش Alexieva (2001) اندازه‌گیری شد. برای این منظور نیم گرم نمونه برگی در نیتروژن مایع آسیاب شد و به پودر به‌دست آمده ۱میلی‌لیتر پرکلریک اسید در حضور ۵٪ PVP اضافه شد. سپس محلول به مدت ۱۰ دقیقه با ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید و pH مایع‌رویی حدود ۵/۶ تنظیم شد. محلول به مدت ۱۰ دقیقه با ۱ واحد آسکوربات اکسیداز انکوبه شد تا آسکوربات قبل از سنجش اکسید شود و در نهایت، تغییر جذب در ۵۹۰ نانومتر بررسی شد. سنجش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز طبق روش Nakano & Asada (1981) انجام گرفت.

سنجش آسکوربات پراکسیداز به کاهش جذب در طول موج ۲۹۰ نانومتر با اکسید شدن آسکوربات به‌دست آمد. یک واحد آسکوربات به صورت ۱ میلی‌مول آسکوربات اکسید شده در دقیقه تعریف شد. سنجش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز بر اساس روش Herzog & Fahimi (1973) انجام شد. محلول واکنش پراکسیداز (۳ میلی‌لیتر) حاوی ۲۰ میلی‌مول در لیتر بافر فسفات ۲۰ میلی‌مول در لیتر گایاکول، ۴۰ میلی‌مول در لیتر هیدروژن پراکسید و ۴۰ لیتر عصاره آنزیمی بود. تغییر در جذب محلول واکنش در ۴۷۰ نانومتر تعیین شد. هر ۴۰ ثانیه به عنوان یک واحد مقدار آنزیم مورد نیاز برای افزایش ۱ واحد جذب در نوری چگالی در ۴۷۰ نانومتر در ۱ دقیقه تعریف شد. فعالیت آنزیم کاتالاز با استفاده از روش ایبای (IBA) (1984) اندازه‌گیری شد. برای این منظور، واکنش محلول کاتالاز (۳ میلی‌لیتر) حاوی ۱۵ میلی‌مول در لیتر بافر فسفات، ۱۵ میلی‌مول در لیتر پراکسید هیدروژن و ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی واکنش با افزودن عصاره آنزیمی آغاز شد. تغییرات در جذب محلول واکنش در ۲۴۰ نانومتر بود، هر ۴۰ ثانیه قرائت به‌عنوان یک واحد فعالیت آنزیم تعریف شد. هر واحد آنزیم مورد نیاز برای کاهش ۰/۱ واحد جذب در نوری چگالی در ۲۴۰ نانومتر در دقیقه ۱ در نظر گرفته شد. فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز از طریق اندازه‌گیری توانایی آن در جلوگیری از احیای نوری ماده شیمیایی نیتروبلوتترازولیوم (Nitroblue Tetrazolium (NBT)) به روش Dhindsa و همکاران (1981) اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها زیر نور لامپ فلورسانس ۱۵ وات در فاصله ۳۰ سانتی‌متری و به مدت ۱۵ دقیقه قرار داده شدند تا واکنش آنزیمی آغاز گردد. پس از این مدت، جذب آن‌ها بلافاصله در طول‌موج ۵۶۰ نانومتر قرائت شد. هر یک واحد فعالیت آنزیم SOD به‌عنوان مقداری از آنزیم یا پروتئین (برحسب میلی‌گرم) منظور گردید که در طول موج ذکرشده موجب ۵۰ درصد کاهش احیای فتوشیمیایی نیتروبلوتترازولیوم در مقایسه با نمونه شاهد می‌گردد. در این آزمایش، از مخلوط ۳ میلی‌لیتر محلول واکنش و ۲۰۰ میکرو لیتر بافر استخراج که در تاریکی قرار داشت، به‌عنوان blank استفاده شد. فعالیت آنزیم سوپراکسیداز دیسموتاز برحسب واحد در میلی‌گرم برگ از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\text{فعالیت آنزیم} = \frac{100 - \left[\frac{\text{OD Control} - \text{OD Sample}}{\text{OD Control}} \times 100\right]}{50}$$

که در آن $A_{560}(control)$ و $A_{560}(sample)$ به ترتیب مقادیر جذب نور محلول شاهد و نمونه مورد بررسی در طول موج ۵۶۰ نانومتر هستند. برای اندازه‌گیری غلظت فنل کل از معرف فولین-سیکالتو استفاده شد (Singleton & Rossi, 1965). ابتدا ۰/۳ میلی‌لیتر عصاره برگ با ۱/۵ میلی‌لیتر فولین ۱۰ درصد ترکیب و بعد از گذشت ۱۰ دقیقه، ۱/۲ میلی‌لیتر کربنات سدیم ۷ درصد به آن اضافه شد. نمونه حاصل به مدت ۹۰ دقیقه روی شیکر قرار گرفت و در انتها، ۶ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد که حجم نهایی به ۹ میلی‌لیتر رسید. نهایتاً با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر میزان جذب نور نمونه‌ها در طول موج ۷۶۵ نانومتر قرائت گردید. برای اندازه‌گیری اسید آسکوربیک از روش Hodges و همکاران، (1996) استفاده شد. برای این منظور، ۰/۵ گرم از بافت برگ تازه ترخون با ۵ میلی‌لیتر اتانول ۹۵٪ ساییده شد. سپس به عصاره به‌دست آمده، ۰/۲ گرم از ماده ۲ ـ ۶ دی‌کلروفنل‌ایندول‌فنل حل شده در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. در ادامه، مقدار ۱۰ میلی‌گرم اسید آسکوربیک خالص با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. برای تیتراسیون، ۵ قطره اسید متافسفریک با ۱۰ میلی‌لیتر از محلول استاندارد ویتامین ث (بی‌رنگ و شفاف) ترکیب گردید و با معرف دی کلرو فنل ایندوفنل تیتراسیون شد. عمل تیتراسیون تا زمانی که محلول به رنگ صورتی کم‌رنگ در بیاید ادامه پیدا کرد و در نهایت، مقدار دی‌کلروفنل‌ایندول‌فنل مصرفی یادداشت شد و این محلول رنگی به عنوان شاهد مورد استفاده قرار گرفت. در پایان، میزان اسید اسکوربیک بر حسب میلی‌گرم در گرم بیان شد. غلظت فسفر نمونه‌ها به روش رنگ سنجی (معرف نیترو وانادو-مولیبدات) اندازه‌گیری شد (Ghazanshahi, 2006). در این روش، یون‌های ارتوفسفات در محیط اسیدی با محلول وانادات – مولیبدن کمپلکس زردرنگی را تشکیل می‌دهند. ابتدا به یک گرم نمونه برگ خشک و پودر شده، ۲ میلی‌لیتر اسید نیتریک و ۱ میلی‌لیترآب مقطر اضافه شد. سپس ۲ میلی‌لیتر عصاره برداشته شد و ۸ میلی‌لیتر آب مقطر و ۲ میلی‌لیتر معرف نیتروواناد‌ومولیبدات به آن اضافه گردید و پس از گذشت یک ساعت و به هنگام تشکیل کمپلکس زرد رنگ فسفووانادو مولیبدات مقدار جذب محلول‌ها در طول موج ۴۳۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شد. برای اندازه‌گیری پتاسیم، نمونه‌های خشک گیاهی با اسید نیتریک مخلوط و به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس روی اجاق هضم قرار داده شدند و غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر و با روش نشر شعله‌ای اندازه‌گیری شد سپس مقدار آن برحسب درصد وزن خشک گزارش گردید (Tabatabaei, 2009). تجزیه داده‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۴ انجام شد و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن ($P \leq 0.05$) استفاده گردید.

نتایج و بحث

طبق نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، قارچ میکوریزا، تنش خشکی و اثر متقابل بین قارچ میکوریزا و تنش خشکی اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر محتوی پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدئید و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی داشتند (جدول ۲). تحت شرایط عدم تنش خشکی، میزان پراکسید هیدروژن برگ با مایه‌زنی با تیمارهای مختلف قارچی مایکوریزا نسبت به تیمار شاهد (بدون مایه‌زنی) تفاوت معنی‌داری نداشت. هم‌چنین تحت شرایط عدم تنش، بین تیمارهای قارچی مایکوریزا اختلاف معنی‌داری از نظر تأثیر بر افزایش پراکسید هیدروژن برگ مشاهده نشد، اگرچه بیشترین میزان پراکسید هیدروژن برگ در تیمار *G. hoi + G. mosseae* مشاهده شد (جدول ۳). در شرایط تنش خشکی، بین تیمارهای مختلف کاربرد قارچ مایکوریزا به لحاظ غلظت پراکسید هیدروژن اختلاف معنی‌داری وجود داشت و کمترین میزان غلظت پراکسید هیدروژن در تیمار *G. hoi + G. mosseae* و تیمار ترکیبی هر سه نوع قارچ به‌دست آمد (جدول ۳). با توجه به نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳)، غلظت مالون دی آلدئید در شرایط تنش خشکی (۱/۱۴ میکرومول بر گرم) نسبت به شاهد (۰/۵۷میکرومول بر گرم) افزایش نشان داد (جدول ۳).

در شرایط تنش خشکی، مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا باعث کاهش غلظت مالون دی آلدئید برگ ترخون شد به طوری‌که تحت تنش خشکی کم‌ترین غلظت مالون دی آلدئید برگ به تیمار *G. hoi + G. mosseae + G. intraradices* و *G. mosseae+G. intraradices* به‌ترتیب با ۰/۷۱ و ۰/۷۵ میکرومول بر گرم وزن‌تر و بیشترین به

تیمار شاهد مربوط بود (جدول ۳). در شرایط عدم تنش، تیمار با قارچ‌های میکوریزا باعث شد غلظت مالون دی آلدئید در برگ دارای روند ثابتی باشد و بین تیمارهای مختلف مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا تفاوت معنی‌داری در غلظت مالون دی آلدئید مشاهده نشد (جدول ۳).

طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۳)، فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز تحت تنش خشکی به تیمار شاهد (آبیاری کامل) افزایش پیدا کرد (جدول ۳). مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا تحت تنش خشکی باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ نسبت به گیاهان شاهد (بدون مایه‌زنی) شد (جدول ۳). بیش‌ترین میزان فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز برگ ترخون در تیمار تنش خشکی همراه با تلقیح گیاه ترخون با سه گونه قارچ میکوریزای *G. hoi* + *G. mosseae* + *G. intraradices* به دست آمد (جدول ۳).

جدول ۲– نتایج تجزیه واریانس اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدئید و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ ترخون

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		پراکسید هیدروژن	مالون دی آلدئید	سوپر اکسید دیسموتاز	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	گایاکول پراکسیداز
قارچ میکوریزا	۴	۲۹۷۰۶۸/۸۲**	۰/۴۹۲**	۱۲۰۸/۱۳**	۲۳۷۸/۲۲**	۱/۹۸**	۳۴۹/۴۰**
تنش خشکی	۱	۱۲۵۱۱۴۰/۷۶**	۰/۲۰۴**	۳۷۹۱/۴۷**	۳۲۰۶/۳۳**	۶۶/۱۸**	۳۶۲/۰۵**
تنش خشکی×قارچ	۴	۱۵۸۷۶۴/۷۶**	۰/۰۳۲**	۲۲۲/۰۴**	۲۴۹/۱۴**	۳/۹۱**	۵۱/۲۲**
اشتباه آزمایش	۲۰	۲۸۲۵۴/۱۴	۰/۰۰۶۵	۴۸/۵۳	۵۳/۲۱	۰/۸۰	۷/۸۳
ضریب تغییرات (٪)	-	۱۵/۸۵	۹/۴۷	۱۲/۷۹	۱۲/۰۲	۱۶/۰۶	۲۰/۰۱

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

جدول ۳– نتایج مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر پراکسید هیدروژن و مالون دی آلدئید و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ ترخون

قارچ میکوریزا	تنش‌خشکی (درصد ظرفیت‌زراعی)	پراکسید هیدروژن(نانو مول در گرم وزن تر)	مالون دی‌آلدئید(میکرو مول بر گرم)	سوپر اکسید دیسموتاز(واحدآنزیمی در میلی‌گرم پروتئین)	کاتالاز(واحد آنزیمی در میلی گرم پروتئین)	آسکوربات پراکسیداز(واحد آنزیمی درمیلی‌گرم پروتئین)	گایاکول پراکسیداز(واحد آنزیمی در میلی‌گرم پروتئین)
شاهد	۱۰۰	۸۸۵/۸^{c}	۰/۵۷^{e}	۳۶/۴۲^{fg}	۲۷/۳۴^{f}	۲/۸۰^{f}	۳/۹۷^{g}
	۵۰	۱۸۷۶/۱^{a}	۱/۱۴^{a}	۳۳/۱۷^{g}	۲۹/۴۳^{f}	۲/۹۶^{f}	۵/۰۹^{g}
G. mosseae+G. hoi	۱۰۰	۹۷۳/۴^{c}	۰/۶۲^{e}	۳۶/۷۲^{fg}	۴۷/۹۷^{e}	۳/۵۷^{f}	۷/۴۶^{efg}
	۵۰	۹۱۰/۲^{c}	۰/۹۴^{b}	۵۹/۵۷^{cd}	۶۹/۸۸^{c}	۶/۸۱^{cd}	۱۳/۰۸^{cd}
G. intraradices+G. hoi	۱۰۰	۷۹۸/۱^{c}	۰/۶۶^{e}	۴۷/۳۷^{defg}	۵۹/۳۷^{cde}	۴/۴۴^{ef}	۱۲/۴۰^{de}
	۵۰	۱۳۱۱/۴^{b}	۰/۸۲^{c}	۷۳/۲۲^{b}	۸۴/۲۰^{b}	۸/۷۲^{ab}	۲۴/۱۰^{b}
G. intraradices+G. mosseae	۱۰۰	۸۷۳/۱^{c}	۰/۶۰^{e}	۴۴/۰۱^{efg}	۵۴/۲۸^{de}	۳/۹۵^{f}	۱۰/۰۲^{def}
	۵۰	۱۳۳۶/۳^{b}	۰/۷۵^{cd}	۶۷/۴۱^{bc}	۷۱/۶۸^{c}	۷/۶۲^{bc}	۱۵/۰۰^{cd}
G. intraradices+G. mosseae+G. hoi	۱۰۰	۷۴۷/۹^{c}	۰/۶۳^{e}	۵۴/۵۵^{de}	۶۲/۶۱^{cd}	۵/۶۹^{cd}	۱۷/۶۱^{c}
	۵۰	۹۲۴/۴^{c}	۰/۷۱^{cd}	۹۱/۵۲^{a}	۹۲/۲۱^{a}	۹/۲۶^{a}	۳۱/۲۷^{a}

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

گیاهان در مواجه با تنش خشکی واکنش‌های مختلفی از خود نشان می‌دهند که شامل تغییر در ویژگی‌های فیزیولوژیکی و میزان جذب عناصر غذایی است (Jahed *et al*., 2023). در شرایط تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی، روند فزاینده‌ای در تولید برخی از ROS مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2) ، سوپراکسید (O_2)، هیدروکسیل (OH) و رادیکال آلکوکسی (RO) مشاهده می‌گردد. یکی از محصولات نهایی پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی در اثر آسیب گونه‌های فعال اکسیژن، مالون دی آلدئید است (Asayesh *et al*., 2023). پائین بودن میزان مالون دی آلدئید نشان‌دهنده پایین بودن آسیب وارده در اثر تنش به غشای سلولی است که خود بیانگر تحمل گیاه به تنش می‌باشد (Luo *et al*., 2023). در تحقیق حاضر، تنش خشکی باعث افزایش میزان مالون دی آلدئید در برگ ترخون شد (جدول ۳). برای از بین بردن اثرات مضر ROS، سیستم‌های دفاعی آنزیمی و غیرآنزیمی تحت فشارهای محیطی تکامل یافته‌اند. بنابراین، آنزیم‌های خاصی مانند کاتالاز، پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز (APX) و گلوتاتیون ردوکتاز در سیستم جاروب ROS فعال شده‌اند تا آسیب‌های اکسیداتیو را به حداقل برسانند. آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی نیز مانند رنگدانه‌های برگ (کاروتنوئیدها) و ترکیبات مختلف فنلی (فنل، فلاونوئیدها، اسید آسکوربیک و آنتوسیانین‌ها) نقش محافظتی در جلوگیری از تولید ROS دارند (Kong *et al*., 2023). با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر، در شرایط تنش خشکی در گیاهان میکوریزایی و غیرمیکوریزایی میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش یافت (جدول ۷). آسکوربات پراکسیداز در سم‌زدایی هیدروژن پراکسیداز تولید شده در اثر فعالیت سوپر اکسید دیسموتاز نقش دارد (Jardim-Messeder *et al*., 2023). کاتالاز در تبدیل پراکسید هیدروژن به آب و اکسیژن در پراکسی‌زوم‌ها نقش دارد تا از اثر سمی پراکسید هیدروژن جلوگیری کند (Zahedi *et al*., 2023). افزایش میزان آنزیم کاتالاز در شرایط تنش خشکی در اسفناج (*Spinacia oleracea* L.) (Alotaibi *et al*., 2023)، کدو (*Cucurbita pepo* L.) (Jahed *et al*., 2023) و فلفل (*Capsicum annumn* L.) (Alluqmani & Alabdallah, 2023) نیز گزارش شده است. در تحقیقات انجام شده افزایش فعالیت کاتالاز می‌تواند سبب افزایش میزان تحمل گیاه به شرایط تنش خشکی گردد (Kong *et al*., 2023). افزایش محتوی مالون دی آلدئید، نشان‌دهنده کافی نبودن سطح فعالیت آنزیم پراکسیداز در جاروب کردن گونه‌های فعال اکسیژن برای حفاظت از غشا است (Kong *et al*., 2023). آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز از H_2O_2 به عنوان سوبسترا برای واکنش استفاده می‌کنند و افزایش

خشکی منجر به افزایش فعالیت این دو آنزیم می‌شود (Mittler, 2002). در تحقیقی روی گیاه استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni)، میزان ترکیبات و آنزیم‌های آنتی-اکسیدانی تحت شرایط تنش خشکی افزایش یافت (Sheikhalipour *et al*., 2023). در گیاهان میکوریزایی برای مقابله با تنش خشکی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز، گلوتاتیون پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز افزایش می‌یابد که سبب حذف گونه‌های سمی اکسیژن در کلروپلاست می‌گردد (Amani *et al*., 2023). طبق نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، قارچ میکوریزا سبب افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده است (جدول ۷). قارچ‌های میکوریزا از طریق کاهش پراکسیداسیون لیپیدی و نفوذپذیری غشا و افزایش تجمع ترکیبات تنظیم-کننده اسمزی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان می‌توانند خسارت ناشی از تنش کم‌آبی را کاهش دهند (Naseem & Bano, 2014). در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) کاربرد قارچ میکوریزا تحت شرایط تنش خشکی به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی (مانند فنل کل) منجر شده است (Amani *et al*., 2023). براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴)، قارچ میکوریزا و تنش خشکی اثرات معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر میزان فسفر و پتاسیم برگ ترخون داشتند (جدول ۴). درحالیکه اثر متقابل بین قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر میزان فسفر و پتاسیم برگ ترخون معنی‌دار نشد (جدول ۴).

جدول ۴– نتایج تجزیه واریانس اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر غلظت فسفر و پتاسیم برگ ترخون

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		فسفر	پتاسیم
قارچ میکوریزا	۴	۰/۰۱۱**	۰/۱۰۲**
تنش خشکی	۱	۰/۰۷۷**	۰/۲۵۹**
تنش خشکی × قارچ میکوریزا	۴	۰/۰۰۳ns	۰/۰۰۳ns
اشتباه آزمایش	۲۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳
ضریب تغییرات (٪)	-	۱۵/۹۹	۹/۰۷

** و ns، به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و غیر معنی‌دار

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که غلظت فسفر و پتاسیم در پاسخ به تنش خشکی نسبت به تیمار عدم تنش (آبیاری کامل) کاهش پیدا کرد (جدول ۵). مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا باعث افزایش غلظت فسفر و پتاسیم برگ نسبت به گیاهان شاهد (بدون مایه‌زنی) شد. بالاترین میزان فسفر و پتاسیم در تیمار ترکیبی هر سه نوع قارچ *G. hoi* + *G. mosseae* + *G. intraradices* به‌دست آمد که باعث افزایش میزان فسفر و پتاسیم برگ ترخون نسبت به گیاهان شاهد (بدون مایه‌زنی) شد (جدول ۵).

جدول ۵ – مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر غلظت فسفر و پتاسیم برگ ترخون

	تیمارها	فسفر (میلی گرم در گرم وزن خشک)	پتاسیم (میلی گرم در گرم وزن خشک)
قارچ میکوریزا	Control	۰/۲۱۰c	۰/۴۸d
	G. hoi + *G. mosseae*	۰/۲۴۹bc	۰/۵۴cd
	G. hoi + *G. intraradices*	۰/۲۶۷b	۰/۵۹c
	G. mosseae + *G. intraradices*	۰/۲۹۸ab	۰/۷۰b
	G. intraradices+*G. mosseae*+*G. hoi*	۰/۳۲۳a	۰/۸۰a
تنش خشکی (درصد ظرفیت زراعی)	۱۰۰	۰/۳۲۰a	۰/۷۱a
	۵۰	۰/۲۱۸b	۰/۵۳b

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

میزان پتاسیم و فسفر برگ ترخون در شرایط تنش خشکی کاهش نشان داد که با نتایج به‌دست آمده در گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.) (Bukhari *et al*., 2022) مطابقت داشت. جذب و انتقال عناصر غذایی در گیاهان تحت مکانیسم‌های جریان توده‌ای، انتشار و پدیده اسمز است که همگی تابعی از مقدار رطوبت موجود در خاک می‌باشند. در صورت کاهش رطوبت خاک، میزان جذب عناصر غذایی تغییر خواهد کرد (Farhadi *et al*., 2020). کاهش تعرق، اختلال در سیستم انتقال فعال و نفوذ پذیری غشا به کاهش توان جذب ریشه منجر شده که با کاهش جذب مواد غذایی همراه است (Kikhazaleh *et al*., 2023). گیاهان در هنگام مواجه با تنش خشکی با مصرف انرژی میزان جذب پتاسیم را افزایش می‌دهند که با تأثیر مثبت بر فتوسنتز و افزایش محتوی پروتئین‌های محلول به افزایش تحمل گیاه به تنش خشکی منجر می‌شود (Darwish *et al*., 2022).

پتاسیم به‌دلیل وظایف مهمی که در گیاه دارد به آن عنصر کیفیت گفته می‌شود و بیش‌ترین نقش آن در گیاه خاصیت کاتالیزوری آن است (ملکوتی، ۱۳۸۷). پتاسیم از مهم‌ترین کاتیون‌های مورد نیاز گیاه است که می‌تواند از طریق تنظیم روزنه‌ها، تنظیم اسمزی و سنتز پروتئین‌ها تحمل گیاه به تنش خشکی را افزایش دهد (Marschner, 2012). عنصر فسفر نقش‌های مهمی در گیاه بازی می‌کند از جمله انتقال انرژی در داخل سلول‌ها. علاوه بر این، فسفر جزئی از اسیدهای نوکلئیک است. کاهش قابلیت تحرک فسفر در خاک‌های با رطوبت پائین دلیل کاهش میزان جذب فسفر توسط ریشه گیاه است (Heidari & Rezapor, 2011). دانشیان و همکاران (۲۰۱۰) دریافتند که مایه‌زنی بذر کدو پوست کاغذی (*Cucurbita pepo* L.) با قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی موجب افزایش مقدار فسفر و پتاسیم در اندام هوایی گیاه می‌شود که با نتایج پژوهش ما مطابقت دارد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که قارچ میکوریزا تأثیر معنی‌داری بر میزان پتاسیم و فسفر برگ ترخون داشت (جدول ۵).

نتایج بررسی جوکار و همکاران (۱۳۹۲) نشان داد که تیمار با قارچ میکوریزا مقاومت به خشکی گیاه را از طریق جذب پتاسیم و فسفر افزایش می‌دهد. علاوه بر این قارچ میکوریزا به علت شبکه گسترده میسلیوم‌ها امکان جذب آب را از مناطق دورتر فراهم می‌کند. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۶) حاکی از آن است که قارچ میکوریزا، تنش خشکی و اثر متقابل بین قارچ میکوریزا و تنش خشکی اثرات معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر محتوی فنل کل و اسید آسکوربیک داشتند.

جدول ۶–تجزیه واریانس اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر فنل کل و اسید آسکوربیک برگ ترخون

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		فنل کل	اسید آسکوربیک
قارچ میکوریزا	۴	۲۰/۲۶**	۰/۱۴**
تنش خشکی	۱	۱۶/۹۷**	۰/۲۵**
تنش خشکی × قارچ میکوریزا	۴	۱/۴۴ **	۰/۰۱ **
اشتباه آزمایش	۲۰	۰/۳۰	۰/۰۰۳
ضریب تغییرات (٪)	-	۶/۴۷	۱۲/۳۸

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۷)، غلظت فنل کل برگ در شرایط عدم تنش خشکی (آبیاری کامل) دارای اختلاف معنی‌داری با شرایط تنش خشکی بود و تنش خشکی باعث افزایش فنل کل برگ شد (جدول ۷). تحت تنش خشکی، مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزا باعث افزایش معنی‌دار فنل کل برگ نسبت به گیاهان شاهد شد. بیشترین غلظت فنل کل برگ در شرایط تنش خشکی و تلقیح ترخون با سه گونه قارچ میکوریزای *G. hoi* + *G. mosseae* + *G. intraradices* با (۱۲/۳۱ میلی‌گرم اسید گالیک بر گرم) به دست آمد (جدول ۷). در شرایط عدم تنش نیز کاربرد قارچ‌های میکوریزا باعث افزایش غلظت فنل کل برگ نسبت به تیمار شاهد گردید (جدول ۷). با توجه به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین میزان اسید آسکوربیک (۰/۸۱ میلی‌گرم درگرم وزن تر) در تیمار تنش خشکی همراه با کاربرد سه گونه قارچ میکوریزا *G. hoi* + *G. mosseae* + *G. intraradices* به دست آمد (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریزا و تنش خشکی بر فنل کل و اسید آسکوربیک برگ ترخون

قارچ میکوریزا	تنش خشکی (٪ ظرفیت زراعی)	فنل کل (میلی‌گرم اسید گالیک بر گرم)	اسید آسکوربیک (میلی‌گرم درگرم وزن تر)
شاهد	۱۰۰	۵/۸۸^{f}	۰/۲۶^{g}
Control	۵۰	۶/۱۹^{ef}	۰/۲۵^{g}
G. mosseae+*G. hoi*	۱۰۰	۷/۱۰^{e}	۰/۳۲^{fg}
	۵۰	۹/۰۴ ^{cd}	۰/۵۰^{cd}
G. intraradices+*G. hoi*	۱۰۰	۸/۵۰^{d}	^{de}/۴۵^{de}
	۵۰	۱۰/۵۳^{b}	۰/۶۸^{b}
G. intraradices+*G. mosseae*	۱۰۰	۸/۰۶^{d}	۰/۳۸^{ef}
	۵۰	۸/۷۲^{cd}	۰/۵۹^{bc}
G. intraradices+*G. mosseae*+*G. hoi*	۱۰۰	۹/۶۹^{b}	۰/۵۱^{cd}
	۵۰	۱۲/۳۱^{a}	۰/۸۱^{a}

حروف همسان در هر ستون و در هر تیمار بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

در شرایط تنش خشکی، میزان فنل کل برگ ترخون افزایش نشان داد (جدول ۷) که می‌تواند به‌دلیل افزایش میزان فعالیت آنزیم مسئول بیوسنتز فنل‌ها (فنیل آلانین آمونیالیاز) باشد. فنل‌ها سازوکار دفاعی در مقابل تنش خشکی است که از دهیدراته شدن سلول‌ها جلوگیری کرده و در تنظیم پتانسیل رداکس و جاروب انواع اکسیژن فعال نقش دارند (Redha *et al*., 2012). افزایش میزان فنل کل در شرایط تنش خشکی در توت‌فرنگی (*Fragaria* x *ananassa*) (Ünal & Okatan 2023) و ریحان (*Ocimum basilicum* L.) (Rahimi *et al*., 2023) نیز گزارش شده است. افزایش میزان فنل در گیاهان تیمار شده با قارچ میکوریزا می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت آنزیم پلی فنل اکسیداز باشد (Amani Machiani *et al*., 2022). در تحقیق حاضر، تنش خشکی و کاربرد قارچ میکوریزا میزان فنل کل و اسید آسکوربیک برگ ترخون را افزایش داد (جدول ۷). در مطالعه‌ای روی گیاه کنجد (*Sesamum indicum* L.) کاربرد قارچ میکوریزا در شرایط تنش خشکی باعث افزایش میزان فنل کل گردید (Ghasemi *et al*., 2023). بروز تنش خشکی با افزایش محتوی اسید آسکوربیک در برگ ترخون همراه بود (جدول ۷) که با نتایج به دست آمده در گیاه ریحان (Hamidi *et al*., 2022) مطابقت داشت. اسید آسکوربیک یکی از ترکیبات آنتی‌اکسیدانی است که در شرایط تنش خشکی می‌تواند سبب تحریک سلولی، رشد طولی و گسترش سلولی و نیز توسعه دیواره سلولی شود. اسید آسکوربیک در سم‌زدایی پراکسیدهیدروژن نقش دارد (Hamidi *et al*., 2022). تیمار قارچ میکوریزا سبب افزایش میزان اسید آسکوربیک برگ ترخون شد (جدول ۷). در ملون‌ها تیمار با قارچ میکوریزا سبب افزایش میزان اسید آسکوربیک در شرایط تنش خشکی شد (Miceli *et al*., 2023).

نتیجه‌گیری کلی

طبق نتایج به دست آمده، کاربرد سه گونه قارچ میکوریزا نسبت به شاهد تأثیر بهتری بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و میزان فنل کل و اسید آسکوربیک داشت. قارچ‌های میکوریزا باعث جذب بیشتر عناصر مهمی مانند فسفر و پتاسیم شدند که نقش مهمی در جلوگیری از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و اثرات نامطلوب آن‌ها در خاک دارد. در گیاهان میکوریزایی احتمالاً تجمع یون‌ها و اسمولیت‌ها در سلول‌های برگ تحت تنش خشکی بیشتر است که باعث کاهش پتانسیل اسمزی و افزایش تحمل به تنش خشکی گیاه ترخون شده است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از تمامی حمایت‌ها و همکاری دانشگاه بوعلی سینا و دانشگاه رازی کرمانشاه جهت فراهم آوردن امکانات مورد نیاز برای اجرای این پایان نامه کارشناسی ارشد، تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

منابع

Alluqmani, S. M., & Alabdallah, N. M. (2023). Exogenous application of carbon nanoparticles alleviates drought stress by regulating water status, chlorophyll fluorescence, osmoprotectants, and antioxidant enzyme activity in *Capsicum annumn* L. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(20), 57423-57433.

Alotaibi, M. O., Ikram, M., Alotaibi, N. M., Hussain, G. S., Ghoneim, A. M., Younis, U., Naz, N., & Danish, S. (2023). Examining the role of AMF-Biochar in the regulation of spinach growth attributes, nutrients concentrations, and antioxidant enzymes in mitigating drought stress. *Plant Stress*, *10*, 1-13.

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Habibi Machiani, R., & Sadeghpour, A. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi and changes in primary and secondary metabolites. *Plants*, *11*(17), 1-10.

Amani, M., Sabzi-Nojadeh, M., Alizadeh-Salteh, S., Younessi-Hamzekhanlu, M., Farmani, B., Hatef Heris, H., Mohammadian, S. H., & Piretarighat, S. (2023). Improving the antioxidant activities of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under the influence of different species of mycorrhiza under water stress. *Journal of Horticultural Science*, *37*(2), 377-389.

Amerian, M., Zebarjadi, A., & Mehrabi, J. A. (2020). Effect of dfferent concentrations of selenium on some morphological and physiological characteristics of dragons head (*Lallemantia iberica*) under different irrigation regimes. *Journal of Water Research in Agriculture*, *34*(3), 415-431.

Ardalani, Sh., Saeidi, M., Jalali Honarmand, S., Ghobadi, M. E., & Abdoli, M. (2015). Effect of post anthesis drought stress on some agronomic and physiological traits related to source strength in four bread wheat genotypes. *Cereal Research*, *5*(1), 45-65.

Asayesh, Z. M., Arzani, K., Mokhtassi-Bidgoli, A., & Abdollahi, H. (2023). Enzymatic and non-enzymatic response of grafted and ungrafted young European pear (*Pyrus communis* L.) trees to drought stress. *Scientia Horticulturae*, 310, 111745.

Basiri, M. H., & Nadjafi, F. (2019). Effect of plant density on growth, yield and essential oil characteristics of Iranian Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) landraces. *Scientia Horticulturae*, 257, 108655.

Bukhari, M. A., Yousaf, M., Ahmad, Z., Rafay, M., Shah, A. N., Abbas, A., Shah, A. A., Javed, T., Afzal, M., Ali, S., & Abdullah, M. I. (2022). Enhancing drought stress tolerance in camelina (*Camelina sativa* L.) through exogenous application of potassium. *Physiologia Plantarum*, *174*(5), 1-16.

Cheng, S., Zou, Y. N., Kuča, K., Hashem, A., Abdallah, E. F., &Wu, Q. S. (2021). Elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi. *Frontiers in Microbiology*, *12*, 1-16.

Darwish, T., Fadel, A., Chahine, S., Baydoun, S., Jomaa, I., & Atallah, T. (2022). Effect of potassium supply and water stress on potato drought tolerance and water productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *53*(9), 1100-1112.

Farhadi, H., Sharifani, M. M., Alizadeh, M., Hokmabadi, H., & Aliniaifard, S. (2020). Investigating the effect of different drought levels on the concentration of low-consumption and high-consumption mineral elements of pistachio rootstocks and interstitial hybrids of pistachio (*Pistacia vera* L.). *Journal of Pistachio Science and Technology*, *5*(9), 46-69.

Farooq, M., Ahmad, R., Shahzad, M., Sajjad, Y., Hassan, A., Shah, M. M., Naz, S., & Khan, S. A. (2021). Differential variations in total flavonoid content and antioxidant enzymes activities in pea under different salt and drought stresses. *Scientia Horticulturae*, *287*(3), 110258.

Ghasemi, M., Zahedi, M., Gheysari, M. and Sabzalian, M. R. (2023). Effects of inoculation with four mycorrhizal species on seed phenolic and fatty acids of sesame plants grown under different irrigation regimes. *Scientific Reports*, *13*(1), 1-15.

Ghazanshahi, J. (2006). Plant and Soil Analysis. Hooma Publication, Pp, 272. (In Persian)

Hamidi, M., Moghadam, H. T., Nasri, M., Kasraie, P., & Larijani, H. 2022. The effect of ascorbic acid and bio fertilizers on basil under drought stress. *Brazilian Journal of Biology*, *84*, 1-14.

Heidari, M., & Rezapor, A. (2011). Effects of water stress on yield and sulfur, chlorophyll and nutrient concentrations in *Nigella sativa*. *Journal of Crop Production Products*, *1*(1), 81-90.

Jahed, P., Sedghi, M., Sharifi, R. S., & Sofallan, O. (2023). Effect of priming on germination traits and antioxidant enzymes of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seeds with different vigor under drought stress. *Journal of Agricultural Sciences*, *29*(2), 491-506.

Jardim-Messeder, D., Caverzan, A., Balbinott, N., Menguer, P. K., Paiva, A. L., Lemos, M., Cunha, J. R., Gaeta, M.L., Costa, M., Zamocky, M., Saibo, N. J. M., Silveira, J. A. G., Margis, R., & Margis-Pinheiro, M. (2023). Stromal ascorbate peroxidase (OsAPX7) modulates drought stress tolerance in rice (*Oryza sativa*). *antioxidants*, *12*(2), 1-23.

Kikhazaleh, M., Ramroudi, M., Galavi, M., Ghanbari, S. A., & Fanaei, H. R. (2023). Effect of potassium on yield and some qualitative and physiological traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *46*(10), 2380-2392.

Kong, H., Meng, X., Akram, N. A., Zhu, F., Hu, J., & Zhang, Z. (2023). Seed priming with fullerol improves seed germination, seedling growth and antioxidant enzyme system of two winter wheat cultivars under drought stress. *Plants*, *12*(6), 1-14.

Lamian, A., Badi, H. N., Mehrafarin, A., & Sahandi, M. S. (2017). Changes in essential oil and morpho-physiological traits of tarragon (*Artemisia dracuncalus* L.) in responses to arbuscular mycorrhizal fungus, AMF (*Glomus intraradices* NC Schenck & GS Sm.) inoculation under salinity. *Acta Agriculturae Slovenica*, *109*(2), 215-227.

Liao, X., Chen, J., Guan, R., Liu, J., & Sun, Q. (2021). Two arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress and improves plant growth in Cinnamomum migao seedlings. *Mycobiology*, *49*(4), 396-405.

Luo, Y., Hu, T., Huo, Y., Wang, L., Zhang, L. and Yan, R. 2023. Effects of exogenous melatonin on chrysanthemum physiological characteristics and photosynthesis under drought stress. *Horticulturae*, *9*(1), 106.

Miceli, A., Vetrano, F., Torta, L., Esposito, A., & Moncada, A. (2023). Effect of mycorrhizal inoculation on melon plants under deficit irrigation regimes. *Agronomy*, *13*(2), 1-22.

Mittler, R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, *7*(9), 405-410.

Mohammadi, H., Khoshi, N., Hazrati, S., Aghaee, A., Falakian, M., & Ghorbanpour, M. (2023). Interaction of NaCl salinity and light intensity affect growth, physiological traits and essential oil constituents in *Artemisia dracunculus* L.(tarragon). *Biochemical Systematics and Ecology*, *107*, 104626.

Mumivand, H., Ebrahimi, A., Morshedloo, M. R., & Shayganfar, A. (2021). Water deficit stress changes in drug yield, antioxidant enzymes activity and essential oil quality and quantity of Tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). *Industrial Crops and Products*, *164*(1), 113381.

Mumivand, H., Ebrahimi, A., Shayganfar, A., & Khoshro, H. H. (2021). Screening of tarragon accessions based on physiological and phytochemical responses under water deficit. *Scientific Reports*, *11*(1), 17839.

Naseem, H., & Bano, A. (2014). Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their exopolysaccharide in drought tolerance of maize. *Journal of Plant Interactions*, *9*(1), 689-701.

Nasirzadeh, L., Sorkhilaleloo, B., Majidi Hervan, E., & Fatehi, F. (2021). Changes in antioxidant enzyme activities and gene expression profiles under drought stress in tolerant, intermediate, and susceptible wheat genotypes. *Cereal Research Communications*, *49*, 83-89.

Oliveira, T. C., Cabral, J. S. R., Santana, L.R., Tavares, G. G., Santos, L. D. S., Paim, T. P., Müller, C., Silva, F. G., Costa, A. C., Souchie, E. L., & Mendes, G. C. (2022). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* improves physiological tolerance to drought stress in soybean plants. *Scientific Reports*, *12*(1), 1-15.

Patanè, C., Cosentino, S. L., Romano, D., & Toscano, S. (2022). Relative water content, proline, and antioxidant enzymes in leaves of long shelf-life tomatoes under drought stress and rewatering. *Plants*, *11*(22), 3045.

Rahimi, M., Mortazavi, M., Mianabadi, A., & Debnath, S. (2023). Evaluation of basil (*Ocimum basilicum*) accessions under different drought conditions based on yield and physio-biochemical traits. *BMC Plant Biology*, *23*(1), 1-15.

Redha, A., Mansor, N. A. L., Suleman, P., Hasan, R. A., & Afzal, M. (2012). Modulation of antioxidant defenses in Conocarpus lancifolius under variable abiotic stress. *Biochemical Systematics and Ecology*, *43*, 80–86

Shawon, R. A., Kang, B. S., Lee, S. G., Kim, S.K., Lee, H. J., Katrich, E., & Ku, Y. G. (2020). Influence of drought stress on bioactive compounds, antioxidant enzymes and glucosinolate contents of Chinese cabbage (*Brassica rapa*). *Food chemistry*, 308, 125657.

Sheikhalipour, M., Gohari, G., Esmaielpour, B., Panahirad, S., Milani, M. H., Kulak, M., & Janda, T. (2023). Melatonin and tio2 nps application-induced changes in growth, photosynthesis, antioxidant enzymes activities and secondary metabolites in stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) under drought stress conditions. *Journal of Plant Growth Regulation*, *42*(3), 2023-2040.

Tabatabaei, S. J. (2009). The methods of plant mineral nourishing. First edition. Kharazmi Publisher. 562p. (In Persian).

Ünal, N., & Okatan, V. (2023). Effects of drought stress treatment on phytochemical contents of strawberry varieties. *Scientia Horticulturae*, *316*, 112013.

Zahedi, S. M., Hosseini, M. S., Fahadi Hoveizeh, N., Kadkhodaei, S., & Vaculík, M. (2023). Physiological and biochemical responses of commercial strawberry cultivars under optimal and drought stress conditions. *Plants*, *12*(3), 1-13.

Zhanassova, K., Kurmanbayeva, A., Gadilgereyeva, B., Yermukhambetova, R., Iksat, N., Amanbayeva, U., Bekturova, A., Tleukulova, Z., Omarov, R., & Masalimov, Z. (2021). ROS status and antioxidant enzyme activities in response to combined temperature and drought stresses in barley. *Acta Physiologiae Plantarum*, *43*(114), 1-12.

Plant Production and Genetics **تولید و ژنتیک گیاهی**

Vol.5 , No. 2, Spring & Summer 2024, p. 169-182 **جلد ۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۳، صفحه ۱۸۲-۱۶۹**

Research Article DOI: 10.22034/PLANT.2024.141259.1103

Effects of drought stress and mycorrhizal fungi on some characteristics of physiology and antioxidative enzymes in tarragon (*Artemisia dracunculus* L.)

Leila Mansori [1], Mahmood Esna-Ashari [*2], Masoomeh Amerian [3]

1. MSc. graduate, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2. Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
3. Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 08-05-2024
Accepted: 17-06-2024

Abstract

Drought stress is one of the most important abiotic stresses and the limiting factor in the successful production of plant products worldwide and has many negative effects on the physiological characteristics of plants. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have a pronounced impact on plant growth, water absorption, mineral nutrition, and protection from abiotic stresses. Therefore, in order to investigate the effect of mycorrhizal fungi on some physiological traits and antioxidant enzymes the tarragon plant under drought stress, this study was performed as a factorial experiment with two factors based on a completely randomized design with three repetitions. The first factor was drought stress at two levels including 100 and 50% field capacity (pot capacity) and the second factor was inoculation with mycorrhiza fungus from *Glomus* genus at 5 levels consisting of (*G.hoi* + *G. mosseae*, *G. hoi* + *G. intraradices*, *G. mosseae* + *G. intraradices*, *G. hoi* + *G. mosseae* + *G. intraradices* and no inoculation as contro). According to the results, the use of mycorrhizal fungi under drought stress conditions increased the activity of the enzymes of the ascorbate peroxidase, hydrogen peroxide, guaiacol peroxidase, catalase, superoxide dismutase as well as the amounts of malondialdehyde, total phenol and ascorbic acid in the leaves. The use of mycorrhiza fungus, unlike drought stress, increased potassium and phosphorus concentration. Application of the three mycorrhizal fungi combination (*G. intraradices* +*G.hoi* + *G. mosseae*) had a better effect on the physiological and biochemical traits than the control. The results of the research showed the positive effect of mycorrhizal fungus in increasing drought tolerance of tarragon plant and better control of free radicals produced under stress conditions.

Keywords: Ascorbic acid, potassium, total phenol, catalase

Citation: Mansori, L., Esna-Ashari, M., & Amerian, M. (2024). Effects of drought stress and mycorrhizal fungi on some characteristics of physiology and antioxidative enzymes in tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). *Plant Production and Genetics*, *5*(2), 169-182. https://doi.org/ 10.22034/PLANT.2024.141259.1103

Copyrights:
Copyrights rights for this article is retained by the author (s), with publication rights granted to Plant Production and Genetics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

[*]Corresponding Author Email: m.esnaashari@basu.ac.ir