

اثر قارچ میکوریزا و چین بر میزان عناصر غذایی ماکرو، میکرو و فعالیت ویژه آنزیمهای آنتی اکسیدانی آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) در سطوح مختلف آبیاری

مصطفی امانی ماچیانلی^۱، عبدالله جوانمرد*^۲، علی استادی^۲، احمد آقایی^۳، فرزاد رسولی^۴

^۱ گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، مراغه، ^۲ گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه،

^۳ گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه، ^۴ گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷)

چکیده

به منظور بررسی اثر کاربرد قارچ میکوریزا و چین بر میزان عناصر غذایی ماکرو، میکرو و فعالیت برخی آنزیمهای آنتی‌اکسیدانی در سطوح مختلف آبیاری، آزمایشی به صورت اسپلیت پلات در زمان و مکان با ۱۲ تیمار و سه تکرار در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه در سال زراعی ۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتور اصلی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح: آبیاری پس از ۲۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (W_{20})، آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (W_{50}) و آبیاری پس از ۸۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (W_{80}) و فاکتور فرعی و فرعی فرعی به ترتیب مصرف و عدم مصرف قارچ میکوریزا و برداشت در دو چین بودند. نتایج نشان داد، بیشترین و کمترین غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و کلسیم به ترتیب در تیمار W_{80} و W_{20} مشاهده شد. همچنین، غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و منیزیم با کاربرد قارچ میکوریزا به ترتیب ۱۷/۴، ۲۴/۷، ۲۰/۹، ۲۰/۶، ۱۱/۸ و ۱۸/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. در بین سطوح آبیاری مختلف، بیشترین کلروفیل a (۰/۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، کلروفیل b (۰/۴۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل کل (۱/۲۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در آبیاری نرمال به دست آمد. همچنین، بیشترین میزان فعالیت ویژه آنزیمهای آنتی‌اکسیدانی از قبیل سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز در تنش‌های متوسط و شدید و با کاربرد قارچ میکوریزا به دست آمد. به طور کلی، نتایج نشان داد کاربرد قارچ میکوریزا نقش مؤثری در جذب عناصر غذایی و افزایش مقاومت گیاهان در تنش خشکی ایفا می‌نماید.

کلمات کلیدی: پرولین، تنش خشکی، کشاورزی پایدار، کود زیستی، گیاهان دارویی

مقدمه

است (Karimi et al., 2018). تنش آبی با توجه به مدت زمان، دوام و شدت آن تأثیرات منفی بر مشخصات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهان دارد که در نهایت منجر به کاهش عملکرد کمی و کیفی آن‌ها خواهد شد. با توجه به محدودیت سطح زیرکشت و کمبود منابع آبی

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان در سرتاسر جهان و جز شایع‌ترین تنش‌های محیطی محسوب می‌شود. میانگین بارندگی سالانه در ایران ۲۲۴-۲۷۵ میلی‌متر در سال بوده که از میانگین جهانی آن حدود ۷۰ درصد کمتر

پایدار که در تغذیه پایدار نقش مهمی را ایفا می‌کنند، تمرکز بیشتری شده است. این گیاهان در سراسر جهان از زمان‌های قدیم به علت اثرات مفیدشان بر سلامت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Amani Machiani et al., 2018). آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.) گیاهی است از تیره نعناعیان (Lamiaceae) با ساختار بوته‌ای و ساقه مستقیم و علفی یا چوبی و پرشاخه به ارتفاع ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر است (Askary et al., 2018). پیکر رویشی آویشن حاوی مواد مؤثره و از نوع اسانس است (Mozaffarian, 2008). اسانس این گیاه زردرنگ و مقدار آن بین ۱ تا ۳ درصد متغیر است. مهم‌ترین اجزاء تشکیل‌دهنده اسانس تیمول، گاماترپینن، پی‌سایمن و کارواکرول هستند. علاوه بر این، پیکر رویشی گیاه حاوی تانن، فلاونوئید، ساپونین و مواد تلخ نیز می‌باشد (Alavi-Samani et al., 2015). از تتور و عصاره‌های الکلی پیکر رویشی این گیاه برای معالجه سرفه، گلودرد، برونشیت و آسم استفاده فراوان می‌شود. همچنین از تیمول و کارواکرول آویشن به‌عنوان نگهدارنده مواد غذایی در صنایع غذایی استفاده می‌شود (Askary et al., 2018). از اسانس این گیاه به‌عنوان آروماترایی (درمان با مواد معطر) استفاده شده و در خمیر دندان نیز به‌عنوان یک ماده ضدباکتری مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pavela et al., 2018).

با توجه به افزایش تقاضای استفاده از گیاهان دارویی، لزوم کشت و پرورش این گیاهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک حائز اهمیت است. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کاربرد قارچ میکوریزا در رژیم‌های مختلف آبیاری بر میزان جذب عناصر غذایی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۱۳۹۸ در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی با ارتفاع ۱۴۸۵ متر از سطح دریا اجرا گردید. قبل از اجرای آزمایش سه

در جهان، مصرف کودهای شیمیایی در طی انقلاب سبز و پس از آن، به‌عنوان تنها راهکار افزایش تولید در واحد سطح در نظر گرفته شده است. با توجه به کارایی پایین کودهای شیمیایی (۳۰-۵۰ درصد) و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف بالای آن‌ها، ضروری است استفاده از کودهای زیستی توسعه پیدا کنند (Razavi et al., 2017). استفاده از کودهای بیولوژیکی که شامل مجموعه مکملی از جوامع میکروبی همراه و هم‌زیست هستند با بهبود رشد گیاه از یک سو و کاهش هزینه‌های تولید از سوی دیگر از آلاینده‌گی محیط می‌کاهند (Liu et al., 2018). قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار (Arbuscular Mycorrhizal Fungi)، یکی از عوامل بیولوژیک خاک‌های زراعی هستند که به‌دلیل افزایش سطح مؤثر ریشه و به‌دنبال آن سطح جذب و توانایی افزایش جذب فسفر از منابع غیرمتحرک به‌واسطه فعالیت آنزیم فسفاتاز و ترکیبات آلی حل‌کننده فسفات نامحلول، موجب استفاده تجاری از این قارچ‌ها به‌عنوان کودهای زیستی شده است (Mohammadi et al., 2019). علاوه بر این، همزیستی با مایکوریزا اثرات سوء ناشی از فقر عناصر غذایی و تنش‌های خشکی و شوری را کاهش و رشد گیاه، جذب عناصر غذایی نظیر نیتروژن، فسفر، برگشت‌پذیری (پس از تنش) و تحمل گیاه را افزایش می‌دهد (Begum et al., 2019). Gheisari Zardak و همکاران (۲۰۱۸) نتیجه گرفتند که غلظت فسفر در گیاه رازیانه (*Foeniculum vulgare*) با کاربرد قارچ میکوریزا در سال اول و دوم آزمایش به‌ترتیب ۱۰۸ و ۱۳۳ درصد نسبت به عدم تلقیح افزایش یافت. Weisany و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش کردند که کاربرد قارچ میکوریزا موجب افزایش میزان کلروفیل و عملکرد اسانس شوید (*Anethum graveolens*) گردید. همچنین Copetta و همکاران (۲۰۰۶) نیز مشاهده کردند که تلقیح گونه دارویی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) با سه گونه مختلف قارچ میکوریزا باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع ساقه، سطح برگ، زیست‌توده، طول و میزان انشعابات جانبی ریشه و میزان اسانس در مقایسه با شاهد شد. امروزه، بر رشد گیاهان دارویی در سیستم‌های کشاورزی

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

ماده آلی (درصد)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	اسیدیته	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	فسفر قابل جذب	نیتروژن کل (درصد)	بافت خاک
۰/۸۸	۰/۹۱	۷/۹۸	۴۷۲	۱۲/۷	۰/۰۸۹	لومی رسی شنی

نمونه خاک به صورت تصادفی از قسمت‌های مختلف محل اجرای آزمایش انتخاب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱). علاوه بر این، سایر مشخصات فیزیکی خاک از قبیل ظرفیت زراعی خاک و نقطه پژمردگی دائم با نمونه‌گیری تصادفی از خاک و در آزمایشگاه خاک شناسی دانشگاه مراغه اندازه‌گیری گردید.

آزمایش به صورت اسپلینت پلات در زمان و مکان بر پایه طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با ۱۲ تیمار و سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح: آبیاری پس از تخلیه ۲۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (W_{20}) به‌عنوان شاهد، آبیاری پس از تخلیه ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (W_{50}) به‌عنوان تنش ملایم و آبیاری پس از تخلیه ۸۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (W_{80}) به‌عنوان تنش شدید و فاکتور فرعی و فرعی فرعی به‌ترتیب مصرف و عدم مصرف قارچ میکوریزا و برداشت در دو چین (چین اول و چین دوم) بودند. هر کرت شامل پنج خط کاشت به طول چهار متر با فواصل ردیفی ۴۰ سانتی‌متر و فاصله روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر بود. قارچ *Funneliformis mosseae* مورد استفاده در این تحقیق از کلینیک گیاه پزشکی اسدآباد همدان تهیه شد. قبل از کاشت، از خاکی که حاوی هیف‌های قارچ میکوریزا، بقایای ریشه و اسپور (حدود ۱۰۰۰ اسپور در هر ۱۰ گرم خاک) بود، در داخل خطوط کاشت و زیر نشاها به مقدار ۸۰ گرم در هر ردیف کاشت استفاده گردید. به‌منظور آماده‌سازی زمین جهت کاشت، در اوایل پاییز ۱۳۹۷ شخم نیمه‌عمیق توسط گاواهن برگرداندار انجام و در بهار پس از شخم سطحی، جهت نرم‌کردن خاک از دو نوبت دیسک عمود بر هم استفاده شد. براساس نتایج آنالیز خاک، ۶۰ کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات تریپل قبل از کاشت و ۸۰ کیلوگرم در هکتار اوره

(۳۰ کیلوگرم در هنگام کاشت به‌صورت کود استارتر و مابقی آن در دو مرحله رشد رویشی و پس از برداشت چین اول آویشن) به خاک اضافه گردید. نشاهای آویشن از شرکت پاکان بدر اصفهان تهیه و در ۵ اردیبهشت ماه با تراکم ۱۲/۵ بوته در متر مربع در عمق پنج سانتی‌متری خاک کاشته شدند. اولین نوبت آبیاری بلافاصله بعد از کاشت صورت گرفت. به‌منظور سازگاری بیشتر نشاهای منتقل‌شده به خاک و حصول رشد بهینه در یک ماه اول هیچ گونه تنش اعمال نشد. جهت اعمال سطوح تنش خشکی از دستگاه تی دی آر (Time-Domain Reflectometry, Model TRIME-FM, England Maximum allowable depletion,) حداکثر درصد تخلیه (MAD) آب در دسترس (Soil available water, SAW) استفاده شد. جهت اعمال تنش‌های مختلف با استفاده از روابط زیر مورد محاسبه قرار گرفت (Bahreininejad et al., 2013):

$$SAW = (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times d \times 100$$

$$I_d = SAW \times p$$

$$I_g = [I_d \times 100] / E_a$$

در این رابطه θ_{fc} ، θ_{pwp} ، d ، p ، I_d ، E_a و I_g به‌ترتیب ظرفیت زراعی خاک (۲۷/۴ درصد)، نقطه پژمردگی دائم (۱۳/۹ درصد)، عمق خاک (سانتی‌متر)، درصد تنش اعمال‌شده (۲۰، ۵۰ و ۸۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی)، عمق آبیاری (۱۵ سانتی‌متر)، کارایی آبیاری (۶۵ درصد در نظر گرفته شده است) و میزان نهایی آبیاری در تنش‌های مختلف می‌باشند. برداشت آویشن در مرحله گلدهی کامل در دو چین صورت گرفت. چین اول در اواخر تیرماه و چین دوم پس از رویش مجدد در اواخر شهریورماه برداشت گردید (جدول ۲).

تعیین غلظت عناصر نمونه‌های گیاهی (در برگ) از نمونه‌های خشک‌شده به روش هضم تر Dong و همکاران (۲۰۰۶) انجام گرفت. ابتدا تمامی ظروف شیشه‌ای مورد نیاز با

جدول ۲- مراحل رشدی آویشن در طول دوره آزمایشی

کشت	۵ اردیبهشت
رشد رویشی	۱۵ خرداد
گلدهی	تیر ماه
دانه بندی	-
رسیدگی	-
برداشت	دو مرحله‌ای: اواخر تیر و شهریور

برگی در مرحله گلدهی کامل پس از تعیین وزن تر بین دو کاغذ صافی درون ظروف پتری محتوای آب مقطر قرار گرفتند. پتری‌ها به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و در تاریکی قرار داده شدند. سپس وزن برگ‌ها که در حالت تورژسانس کامل بودند، اندازه‌گیری شدند. نمونه‌های تر برگ در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد و پس از آن وزن خشک اندازه‌گیری شد و در نهایت محتوای نسبی آب برگ‌ها از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$RWC (\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100$$

در این رابطه FW، DW و TW به ترتیب وزن تر، وزن خشک و وزن برگ متورم شده می‌باشد.

برای اندازه‌گیری پرولین از روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) استفاده شد. غلظت پرولین نمونه‌ها در مرحله گلدهی کامل با استفاده از اسپکتروفتومتر و منحنی استاندارد پرولین خالص در طول موج ۵۲۰ نانومتر برحسب میکرومول بر گرم وزن تر گیاه محاسبه گردید. همچنین غلظت مالون دی‌آلدئید موجود در برگ‌های آویشن از طریق روش Heath و Packer (۱۹۶۸) در طول موج ۵۳۲ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و برحسب نانومول بر گرم وزن تر گیاه گزارش گردید.

جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ابتدا غلظت پروتئین محلول اندازه‌گیری گردید. جهت سنجش غلظت پروتئین، اندام هوایی تازه گیاه پس از توزین، با سه میلی‌لیتر بافر فسفات ۰/۵ میکرومولار (pH = ۶/۸) به صورت هموژن در آمد. پس از آن نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد و دور ۱۵۰۰۰ سانتریفیوژ شدند. از بخش

اسید کلریدریک تجاری ۰/۱ درصد شسته شدند. سپس ۰/۲ گرم از ماده خشک گیاهی به لوله‌های هضم منتقل گردیدند. دو میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد به لوله‌ها اضافه شد. لوله‌ها به مدت ۲۴ ساعت بدون اعمال هیچ دمایی در اجاق هضم قرار داده و سپس به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۰۰ سانتی‌گراد حرارت داده شدند. غلظت نیتروژن با روش کج‌لدال، غلظت فسفر با روش Tandon و همکاران (۱۹۶۸) و با استفاده از نشانگر مولیبدات وانادات و غلظت پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌تومتر اندازه‌گیری شدند (Jones, 1972). غلظت عناصر کلسیم، آهن، روی و منیزیم با استفاده از جذب اتمی (AA-6300 F; Shimadzu, Kyoto, Japan) تعیین گردید.

کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ‌های آویشن در گلدهی کامل با روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) اندازه‌گیری شد. بدین منظور ۱۰۰ میلی‌گرم وزن تر برگ در داخل هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر استن ۸۰ درصد خوب ساییده گردید. سپس لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. حجم محلول فوقانی توسط استن ۸۰ درصد به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد و مقدار کلروفیل و کاروتنوئید توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV-1800, Shimadzu, Japan) با میزان جذب در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳/۲ و ۶۴۶/۸ تعیین و غلظت کلروفیل و کاروتنوئید با استفاده از روابط زیر محاسبه گردید:

$$Chl a = (12.25A_{663.2}) - (2.79A_{646.8})$$

$$Chl b = (21.5A_{646.8}) - (5.1A_{663.2})$$

$$Chl a+b = (7.15A_{663.2}) + (18.71A_{646.8})$$

$$Car = [1000A_{470} - 1.82C_a - 85.02C_b] / 198$$

جهت تعیین محتوای نسبی آب برگ‌ها (RWC)، قطعات

روی عصاره برای سنجش غلظت پروتئین محلول عصاره‌های گیاهی استفاده شد. جذب نمونه‌ها در طول موج ۵۹۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر خوانده گردید و غلظت پروتئین برحسب میلی‌گرم در یک گرم وزن تر محاسبه شد (Bradford, 1976). فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز براساس قابلیت بازدارندگی آن از احیای فتوشیمیایی نیتروبلو تترازولیوم کلراید (NBT) در طول موج ۵۶۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Beauchamp and Fridovich, 1971). همچنین، اندازه‌گیری فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز به ترتیب توسط روش Upadhyaya و همکاران (۱۹۸۵) و Asada و Nakano (۱۹۸۱) اندازه‌گیری گردید.

به منظور تعیین درصد همزیستی، ریشه‌های آویشن در انتهای فصل رشدی به آزمایشگاه منتقل شدند. ریشه‌ها به اندازه یک سانتی‌متر برش داده شدند. سپس در داخل محلول KOH ۱۰ درصد به مدت ۱۰-۵ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده و پس از آن با آب مقطر شستشو داده شدند. در مرحله بعد، ریشه‌ها داخل محلول HCL ۲ درصد به مدت ۲۰-۱۵ دقیقه قرار داده شدند. جهت رنگ‌آمیزی، ریشه‌ها در داخل تریپان بلو ۰/۰۵ درصد به مدت ۱۰ دقیقه روی چراغ بونزن حرارت داده شد و مجدداً با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس ریشه‌ها در محلولی که حاوی اسید لاکتیک، گلیسرول و آب به نسبت ۱:۱:۱ (V:V:V) تا زمان سنجش نگهداری شدند (Phillips and Hayman, 1970). درصد کلونیزاسیون با روش خطوط متقاطع محاسبه گردیدند. به این صورت که برای هر تیمار آزمایشی، ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده به قطعات یک سانتی‌متری برش داده شده و به صورت تصادفی داخل پلیت شیشه‌ای قرار داده شدند. سپس روی یک صفحه شطرنجی به ابعاد ۱×۱ سانتی‌متر قرار گرفتند. جهت مشاهده و شمارش ریشه‌های آلوده به قارچ میکوریزا و غیرآلوده از یک استیرو میکروسکوپ (بینوکولار) با بزرگنمایی ۴۰× استفاده گردید. ریشه‌های آلوده و غیرآلوده که با خطوط عمودی و افقی صفحه شطرنجی تقاطعی را ایجاد کرده بودند، هر کدام به صورت مجزا و جداگانه شمارش گردیدند. و درصد کلونیزاسیون از رابطه زیر به دست

آمد: (Giovannetti and Mosse, 1980).

۱۰۰ × (مجموع کل ریشه‌های آلوده و غیرآلوده / مجموع ریشه‌های آلوده) = درصد کلونیزاسیون

در نهایت بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس به صورت اسپلیت پلات در زمان و مکان با استفاده از نرم‌افزار آماری MSTAT-C ver. 2.10 و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

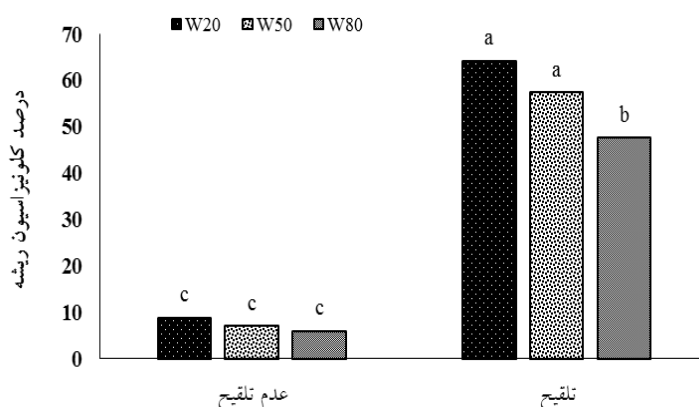
درصد کلونیزاسیون ریشه: نتایج تجزیه واریانس نشان داد درصد کلونیزاسیون ریشه تحت تأثیر اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری در قارچ میکوریزا قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین (۶۴/۳۶ درصد) و کمترین میزان درصد کلونیزاسیون ریشه (۵/۹۹ درصد) به ترتیب در شرایط آبیاری نرمال با کاربرد قارچ میکوریزا و تنش شدید و عدم تلقیح میکوریزا به دست آمد. با افزایش سطوح تنش از میزان کلونیزاسیون ریشه کاسته شد. به طوری که میزان کلونیزاسیون ریشه در تنش خفیف و شدید به ترتیب ۱۲ و ۲۷ درصد نسبت به شرایط نرمال آبیاری کاهش یافت (شکل ۱). کاهش میزان کلونیزاسیون ریشه به ویژه در تنش شدید به کاهش فعالیت جمعیت میکروبی خاک نسبت داده می‌شود. Shukla و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند رطوبت خاک یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان فعالیت جمعیت میکروبی خاک و به ویژه قارچ‌های میکوریزا است و میزان فعالیت موجودات نامبرده شده با کاهش رطوبت به شدت کاهش می‌یابد. در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، Abdel-Salam و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند درصد کلونیزاسیون ریشه در گیاه گل محمدی (*Rosa damascena Mill.*) با افزایش تنش خشکی کاهش یافت.

عملکرد ماده خشک: نتایج تجزیه واریانس نشان داد عملکرد ماده خشک تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری، میکوریزا و چین قرار گرفت (جدول ۴). در بین سطوح آبیاری، بیشترین (۵۴۸/۷ گرم در مترمربع) و کمترین (۳۸۰/۸ گرم در مترمربع) میزان عملکرد ماده خشک به ترتیب در آبیاری نرمال

جدول ۳- تجزیه واریانس درصد کلونیزاسیون ریشه آویشن

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلونیزاسیون ریشه (%)
تکرار	۲	۱۷/۲۹ ^{ns}
سطوح آبیاری	۲	۱۴۲/۵۹ ^{**}
خطای اول	۴	۷/۴۱
میکوریزا	۱	۱۰۸۹۵/۳۴ ^{**}
تنش × میکوریزا	۲	۷۲/۲۷ [*]
اشتباه آزمایشی	۶	۷/۳۷۶
ضریب تغییرات (درصد)		۱۰/۹۰

ns و *، ** به ترتیب معنی دار در سطح ۱٪ و ۵٪ و عدم تفاوت معنی دار



شکل ۱- درصد کلونیزاسیون ریشه آویشن باغی در سطوح مختلف آبیاری با کاربرد قارچ میکوریزا. در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری با هم ندارند. W₂₀ و W₅₀ و W₈₀ به ترتیب آبیاری در شرایط نرمال، تنش خفیف و تنش شدید هستند.

دریافتی باعث افزایش تولید ماده خشک خواهد شد. همچنین، نتایج نشان داد کاربرد قارچ میکوریزا منجر به افزایش ۱۲/۵ درصدی عملکرد ماده خشک آویشن نسبت به عدم کاربرد قارچ گردید (جدول ۵). از آنجایی که عملکرد ماده خشک در گیاهان دارویی برآیندی از صفات رشدی مختلف از قبیل ارتفاع بوته، قطر کانوپی و ... است؛ بنابراین می‌توان بیان کرد برقراری رابطه همزیستی قارچ میکوریزا با ریشه آویشن با بهبود صفات رشدی گیاه از طریق بهبود در جذب عناصر غذایی، جذب رطوبت، افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌های محیطی منجر به افزایش عملکرد شده است (Begum et al., 2019). علاوه بر این، نتایج نشان داد عملکرد ماده خشک

(W₂₀) و تنش شدید (W₈₀) مشاهده شد. با افزایش سطوح تنش از میزان عملکرد ماده خشک کاسته شد. به طوری که عملکرد ماده خشک در تنش‌های متوسط و شدید ۲۱/۳ و ۳۰/۶ درصد نسبت به آبیاری نرمال کاهش پیدا کرد (جدول ۵). کاهش عملکرد ماده خشک با افزایش تنش خشکی را می‌توان به کاهش صفات رشدی از قبیل ارتفاع بوته و شاخص سطح برگ نسبت داد (Gao et al., 2020). Lak و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که افزایش ماده خشک تولیدی در گیاهان تحت شرایط آبیاری مطلوب می‌تواند به دلیل گسترش بیشتر سطح برگ و نیز دوام سطح برگ باشد که با ایجاد منبع فیزیولوژیکی کارآمد جهت استفاده هر چه بیشتر از نور

جدول ۴- تجزیه واریانس عملکرد ماده خشک و برخی عناصر غذایی در برگ آویشن باغی (*Thymus Vulgaris L.*)

منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد ماده خشک	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	روی	کلسیم	منیزیم	محتوی نسبی آب
تکرار	۲	۶۶۳۴/۸	۱۸/۷	۰/۱	۱۱/۸	۳۸۵۵۵/۶	۱۲/۶	۰/۲	۱/۱	۱۲/۹۹
تنش	۲	۸۸۸۸۵/۴**	۱۳۲/۱*	۱/۶**	۱۲۹/۵*	۷۹۰۰۷/۱*	۱۴۷/۲*	۴/۷**	۲/۱ ^{ns}	۵۷۲/۲**
خطای یک	۴	۲۹۴۲/۲	۸/۱	۰/۱	۱۶/۴	۱۰۵۸۵/۹	۱۸/۲	۰/۲	۰/۴	۲/۰۲
میکوریزا	۱	۲۵۷۲۳/۹**	۵۰/۹**	۰/۴**	۶۰/۳**	۳۵۵۵۹/۹**	۴۱/۷**	۰/۷ ^{ns}	۴/۵**	۱۱۳/۱**
تنش×میکوریزا	۲	۲۱۲۳/۸ ^{ns}	۰/۴ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۷ ^{ns}	۵۴۳/۹ ^{ns}	۰/۲ ^{ns}	۰/۱ ^{ns}	۰/۲**	۱/۳ ^{ns}
خطای دو	۶	۱۱۰۴/۱	۲/۱	۰/۰۳	۱/۷	۹۷۱/۷	۲/۹	۰/۱	۰/۰۲	۱/۲
چین	۱	۶۷۰۷۲/۴**	۱/۱ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}	۱/۲ ^{ns}	۶۷۵۶/۳ ^{ns}	۲/۰۱ ^{ns}	۰/۵ ^{ns}	۰/۱ ^{ns}	۳۵۰/۴**
چین×تنش	۲	۱۵۳/۱ ^{ns}	۰/۶ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۳ ^{ns}	۱۶۴۰/۵ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۲۳/۱ ^{ns}
چین×میکوریزا	۱	۴۳۱۲/۳ ^{ns}	۰/۴ ^{ns}	۰/۰۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۹۴/۷ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۱ ^{ns}	۰/۱ ^{ns}	۲۰/۳ ^{ns}
تنش×میکوریزا×چین	۲	۵۲۸۳/۳ ^{ns}	۰/۲ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۱ ^{ns}	۴/۵ ^{ns}	۰/۰۳ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۱/۳ ^{ns}
خطای سه	۱۲	۵۲۸۳/۳	۱/۳	۰/۰۲	۰/۳	۲۲۲۹/۹	۰/۵۰	۰/۵	۰/۰۳	۱۱/۹
ضریب تغییرات		۱۶/۱	۷/۷	۹/۱	۶/۳	۱۰/۱	۶/۸	۱۱/۲	۶/۹	۸/۵

***، **، * به ترتیب معنی دار در سطح ۱٪ و ۵٪ و عدم تفاوت معنی دار

ادامه جدول ۴-

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کارتوتنوئید	پروکلین	مالون دی آلدئید	آسکوربات پراکسیداز	گایاکول پراکسیداز	سوپراکسید دیسموتاز
تکرار	۲	۰/۰۲۲	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۵۸	۰/۰۲	۰/۱۰	۱/۸
تنش	۲	۰/۱۱۱**	۰/۱**	۰/۴۹**	۰/۰۳ ^{ns}	۱۹/۶۹**	۵/۳۳**	۱/۵۵**	۰/۱۲ ^{ns}	۳۵/۱*
خطای یک	۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۶۶	۰/۲۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۴/۹
میکوریزا	۱	۰/۰۱۲**	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۵**	۰/۰۳*	۰/۰۳ ^{ns}	۱/۳۱**	۰/۱۲**	۰/۰۵*	۷/۱**
تنش×میکوریزا	۲	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۶ ^{ns}	۰/۰۵**	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۸ ^{ns}
خطای دو	۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۵
چین	۱	۰/۰۳۵**	۰/۱۱**	۰/۲۷**	۰/۰۹**	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۴**	۲/۸ ^{ns}
چین×تنش	۲	۰/۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۲۵ ^{ns}	۰/۱۰ ^{ns}	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۱/۲ ^{ns}
چین×میکوریزا	۱	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۲۵ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۱ ^{ns}
تنش×میکوریزا×چین	۲	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۲ ^{ns}
خطای سه	۱۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰۳۴	۰/۰۰۵	۰/۹
ضریب تغییرات		۷/۶	۹/۷	۹/۲	۵/۴	۸/۵	۱۱/۴	۹/۹	۸/۵	۱۰/۹

***، **، * به ترتیب معنی دار در سطح ۱٪ و ۵٪ و عدم تفاوت معنی دار

آویشن در چین اول ۲۱/۱ درصد بیشتر از چین دوم بود (جدول ۷). از آنجایی که در چین اول شرایط محیطی از قبیل دمای محیط، طول دوره روشنایی، طول روز و تابش آفتاب بیشتر است لذا بیشتر شدن عملکرد ماده خشک در چین اول به

جدول ۵- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک و عناصر ماکرو و میکرو در سطوح مختلف آبیاری و کاربرد قارچ میکوریزا

تیمار	عملکرد ماده خشک (گرم بر متر مربع)	نیتروژن	فسفر	پتاسیم (گرم بر کیلوگرم)	کلسیم	منیزیم	آهن (میلی گرم بر کیلوگرم)	روی
آبیاری								
آبیاری نرمال (W ₂₀)	۵۴۸/۷ ^a	۱۸/۵ ^a	۲/۵ ^a	۱۷/۱ ^a	۴/۹۹ ^a	۳/۰۴ ^a	۴۲۸/۲ ^a	۲۲/۳ ^a
تنش خفیف (W ₅₀)	۴۳۱/۹ ^b	۱۴/۵ ^b	۱/۹۸ ^b	۱۳/۲ ^{ab}	۴/۰۴ ^b	۲/۴۸ ^a	۳۰۵/۲ ^b	۱۸/۹ ^{ab}
تنش شدید (W ₈₀)	۳۸۰/۸ ^b	۱۱/۹۸ ^b	۱/۷ ^b	۱۰/۶ ^b	۳/۸ ^b	۲/۲۱ ^a	۲۷۴/۹۶ ^b	۱۵/۳ ^b
میکوریزا								
شاهد	۴۲۷/۱ ^b	۱۳/۸ ^b	۱/۷۴ ^b	۱۲/۳۷ ^b	۴/۱۵ ^a	۲/۲ ^b	۳۰۴/۷ ^b	۱۷/۸ ^b
قارچ <i>Funneliformis mosseae</i>	۴۸۰/۵ ^a	۱۶/۲ ^a	۲/۱۷ ^a	۱۴/۹۶ ^a	۴/۴۲ ^a	۲/۶ ^a	۳۶۷/۵ ^a	۱۹/۹ ^a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی داری با هم ندارند.

Sanullah و همکاران (۲۰۱۲) دلیل کاهش جذب عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی را به کاهش فعالیت جمعیت میکروارگانیسمی خاک و کاهش تحرک عناصر غذایی در این شرایط نسبت دادند. علاوه بر این، pH رایزوسفر میکوریزا به دلیل جذب یون آمونیوم و آزادسازی یون H^+ پایین تر است. کاهش اسیدیته خاک موجب افزایش حلالیت عناصر غذایی به ویژه فسفر در دسترس ریشه خواهد شد (Nazeri et al., 2013). از آنجایی که خاک مورد آزمایش قلیایی است، لذا در شرایط تیمار شاهد (عدم مصرف میکوریزا) قلیایی بودن خاک به عنوان یک عامل محدودکننده در جذب فسفر عمل می کند. لذا افزایش میزان جذب فسفر با کاربرد قارچ میکوریزا به دلیل افزایش حلالیت این عنصر در اثر کاهش اسیدیته خاک توسط میکوریزا نسبت داده می شود. همچنین نتایج نشان داد غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و منیزیم با کاربرد قارچ میکوریزا به ترتیب ۱۷/۴، ۲۴/۷، ۲۰/۹، ۲۰/۶، ۱۱/۸ و ۱۸/۲ درصد نسبت به عدم مصرف افزایش نشان داد (جدول ۵). از دلایل افزایش جذب عناصر غذایی با کاربرد قارچ میکوریزا می توان به افزایش سطح جذب ریشه با تولید شبکه گسترده ای از هیف ها و همچنین ترشح اسیدهای آلی و آنزیم های فسفاتاز اشاره کرد که منجر به افزایش محلولیت و دسترسی عناصر غذایی در محیط اطراف

مساعد بودن شرایط محیطی و همچنین بیشتر بودن طول دوره رشدی در این چین نسبت داده می شود. به طور مشابه Amani Machiani و همکاران (۲۰۱۷) با مقایسه دو چین نعنای فلفلی مشاهده کردند که ماده خشک تولیدی این گیاه در چین اول بیشتر از چین دوم بود.

عناصر غذایی: نتایج تجزیه واریانس نشان داد غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی تحت تأثیر جداگانه سطوح مختلف آبیاری و کاربرد قارچ میکوریزا قرار گرفتند. ولی غلظت عنصر کلسیم فقط تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت. علاوه بر این، غلظت منیزیم تحت تأثیر کاربرد میکوریزا و اثر متقابل سطوح آبیاری در میکوریزا قرار گرفت (جدول ۴). به طور کلی با افزایش سطح تنش، از غلظت عناصر غذایی کاسته شد. به طوری که بیشترین و کمترین غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و کلسیم به ترتیب در آبیاری شاهد (W₂₀) و تنش شدید (W₈₀) مشاهده شد (جدول ۵). با کاهش رطوبت خاک، تحرک عناصر غذایی به ویژه فسفر و پتاسیم و سایر عناصر غذایی به سطح ریشه کمتر شده و از دسترسی منابع غذایی در اختیار گیاه کاسته خواهد شد. زیرا عناصر غیرمتحرک از قبیل فسفر در شرایط خشکی به ذرات رس موجود در خاک چسبیده و به میزان کمتری در اختیار ریشه قرار می گیرند (Hussain et al.,)

جدول ۶- مقایسه میانگین کلروفیل، کارتنوئید، پرولین، مالون دی آلدهید و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آویشن باغی در سطوح مختلف آبیاری و کاربرد قارچ میکوریزا

تیمار	محتوی نسبی آب (درصد)	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کارتنوئید	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر)	مالون دی آلدهید (نانومول بر گرم وزن تر)	گایاکول پراکسیداز (میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین)	سوپراکسید دیسموتاز
سطوح آبیاری									
آبیاری نرمال (W ₂₀)	۸۰/۱ a	۰/۸۰ a	۰/۴۸ a	۱/۲۸ a	۰/۴۹ a	۲/۹۷ c	۲/۰۹ b	۰/۶۸ a	۴/۵۰ c
تنش خفیف (W ₅₀)	۷۳/۳ b	۰/۶۶ b	۰/۴۱ b	۱/۰۷ b	۰/۴۳ a	۴/۲۱ b	۲/۹۳ a	۰/۸۰ a	۶/۷۳ b
تنش شدید (W ₈₀)	۶۶/۳ c	۰/۶۱ b	۰/۲۶ c	۰/۸۷ c	۰/۳۹ a	۵/۵۳ a	۳/۴۰ a	۰/۸۸ a	۷/۵۶ a
میکوریز									
شاهد	۷۱/۴۵ b	۰/۶۷ b	۰/۴۱ b	۱/۰۷ b	۰/۴۰ b	۴/۲۶ a	۲/۹۹۷ a	۰/۷۵ b	۵/۸ b
قارچ <i>Funneliformis mosseae</i>	۷۸/۹۹ a	۰/۷۱ a	۰/۴۷ a	۱/۱۸ a	۰/۴۶ a	۴/۲۰ a	۲/۶۱۵ b	۰/۸۲ a	۶/۷ a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

نسبت داد (Kamanga et al., 2018).

علاوه بر این نتایج نشان داد میزان محتوی نسبی آب برگ‌های آویشن در چین دوم ۸/۸ درصد نسبت به چین یک بیشتر بود (جدول ۷). دلیل افزایش محتوی نسبی آب در چین دوم را می‌توان به کاهش طول روز و کاهش دمای محیط به چین اول نسبت داد که در نهایت منجر به کاهش تعرق گیاه و افزایش RWC خواهد شد. همچنین، با کاربرد قارچ میکوریزا میزان محتوی نسبی آب آویشن ۱۰/۵ درصد نسبت به عدم مصرف افزایش یافت (جدول ۶). دلیل افزایش میزان RWC با کاربرد قارچ میکوریزا را به ایجاد شبکه‌های گسترده هیف‌های قارچ بر روی ریشه که منجر به افزایش دسترسی ریشه به منابع به‌ویژه رطوبت و عناصر غذایی می‌شود، نسبت دادند (Zhang et al., 2018). و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که وجود رابطه همزیستی قارچ با ریشه گیاهان منجر به بهبود هدایت هیدرولیکی آب به داخل ریشه شده که در نهایت باعث افزایش محتوی نسبی آب در سلول‌های گیاهی خواهد شد. هیف‌های قارچی از طریق افزایش جذب عناصر غذایی، مقاومت انتقال آب به درون ریشه را کاهش داده و از این طریق منجر به افزایش جذب آب خواهند شد. همچنین نفوذ

ریشه (رایزوسفر) می‌شود (Begum et al., 2019). Bahadori و Ghorbanian (۲۰۱۸) نتیجه گرفتند میزان غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در آویشن باغی با کاربرد قارچ میکوریزا به ترتیب ۷۶/۷، ۳۶/۸ و ۴۸/۲ درصد نسبت به عدم مصرف قارچ افزایش یافت.

محتوی نسبی آب: نتایج تجزیه واریانس نشان داد میزان محتوی نسبی آب برگ‌های آویشن تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری، چین و قارچ میکوریزا قرار گرفت (جدول ۴). بیشترین (۸۰/۱ درصد) و کمترین (۶۶/۳ درصد) محتوی نسبی آب آویشن به ترتیب در آبیاری شاهد (W₂₀) و تنش شدید (W₈₀) به دست آمد. میزان رطوبت نسبی در تنش‌های متوسط و شدید ۸/۵ و ۱۷/۲ درصد نسبت به آبیاری نرمال کاهش یافت (جدول ۶). محتوای نسبی آب گیاهان به وضعیت میزان آب در سلول‌های گیاهی به‌ویژه در شرایط تنش اشاره دارد. Tanentzap و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که میزان RWC در گیاهان به حجم سلول‌های گیاهی و همچنین تعادل بین میزان آب جذب‌شده توسط ریشه و میزان آب تعرق یافته دارد. بنابراین، کاهش میزان RWC با افزایش سطح تنش را می‌توان به کاهش جذب آب توسط ریشه و از طرفی افزایش تعرق گیاه

جدول ۷- مقایسه میانگین عملکرد ماده خشک، کلروفیل، کارتنوئید، آنزیم گایاکول پراکسیداز و محتوی نسبی آب آویشن باغی در چین اول و دوم

تیمار	عملکرد ماده خشک (گرم بر متر مربع)	کلروفیل a (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل b (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کلروفیل کل (میلی گرم بر گرم وزن تر)	کارتنوئید (میلی گرم پروتئین)	گایاکول پراکسیداز (میکرومول بر دقیقه)	محتوی نسبی آب (درصد)
چین یک	۴۹۶/۹۵ ^a	۰/۷۲ ^a	۰/۴۴ ^a	۱/۱۶ ^a	۰/۴۸ ^a	۰/۸۲ ^a	۷۰/۱ ^b
چین دو	۴۱۰/۶۲ ^b	۰/۶۶ ^b	۰/۳۳ ^b	۰/۹۹ ^b	۰/۳۹ ^b	۰/۷۵ ^b	۷۶/۳ ^a

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

کلروفیل در این رابط را می‌توان به کاهش جذب عناصر غذایی جهت رشد و ساخت بیومولکول‌های حیاتی گیاه دانست که این امر در نهایت منجر به کاهش تولید کلروفیل خواهد شد (Emami bistgani et al., 2017). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، Bahreininejad و همکاران (۲۰۱۳) گزارش کردند که میزان کلروفیل و کارتنوئید آویشن دنایی (*Thymus daenensis* L.) در شرایط تنش خشکی نسبت به آبیاری نرمال کاهش معنی‌داری پیدا کرد.

همچنین نتایج نشان داد با کاربرد قارچ میکوریزا میزان کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید به ترتیب ۵/۹، ۱۴/۶، ۱۰/۳ و ۱۵ درصد نسبت به عدم مصرف قارچ افزایش یافت (جدول ۶). کلروفیل رنگدانه‌ای است که نقش اصلی آن دریافت انرژی نور برای استفاده در فتوسنتز است. مولکول کلروفیل از دو بخش (یک سر پورفیرین و یک هیدروکربن طولی با دنباله فیتول) تشکیل شده است. پورفیرین از چهار حلقه پیرول حاوی نیتروژن که به صورت حلقوی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. کامل‌کننده مولکول کلروفیل یک یون منیزیم است که با چهار اتم نیتروژن در مرکز حلقه تشکیل کلات می‌دهد. لذا افزایش میزان کلروفیل و کارتنوئید تحت همزیستی ریشه گیاه با قارچ میکوریزا را می‌توان به اثر مثبت این قارچ در جذب عناصر غذایی مورد نیاز از قبیل نیتروژن و منیزیم نسبت داد (Begum et al., 2019). Elhindi و همکاران (۲۰۱۷) مشاهده کردند که کاربرد قارچ میکوریزا منجر به افزایش میزان کلروفیل و به تبع آن افزایش میزان فتوسنتز در گیاه دارویی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) گردید. علاوه بر این نتایج نشان داد میزان

هیف‌های قارچی به درون کورتکس ریشه و پس از آن به منطقه آندودرم، مسیر کم مقاومتی را در عرض ریشه جهت حرکت آب فراهم نموده و در نتیجه آب با مقاومت کمتری در عرض ریشه تا رسیدن به آوندهای چوبی مواجه خواهد شد.

کلروفیل و کارتنوئید: سطوح مختلف آبیاری، چین (برداشت) و کاربرد قارچ میکوریزا اثر معنی‌داری بر غلظت کلروفیل a و کلروفیل کل داشتند. درحالی‌که میزان کلروفیل b فقط تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و چین قرار گرفت. علاوه بر این، میزان کارتنوئید آویشن نیز تحت تأثیر کاربرد قارچ میکوریزا و چین قرار گرفت (جدول ۴). در بین سطوح آبیاری مختلف، بیشترین میزان کلروفیل a (۰/۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، کلروفیل b (۰/۴۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل کل (۱/۲۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط آبیاری نرمال به دست آمد. درحالی‌که کمترین میزان کلروفیل a، b و کل در تنش شدید (W_{80}) حاصل شد. همچنین، میزان کلروفیل a، b و کل در شرایط تنش شدید (W_{80}) نسبت به آبیاری نرمال به ترتیب ۲۳/۸، ۴۵/۸ و ۳۲ درصد کاهش پیدا کردند (جدول ۶). دلیل کاهش میزان کلروفیل با افزایش تنش خشکی را به کاهش میزان کلروپلاست در اثر افزایش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن نسبت دادند (Mohammadi et al., 2019). Abd Elbar و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که قرارگرفتن گیاه در تنش خشکی منجر به افزایش میزان رادیکال‌های فعال اکسیژن شده که این امر به نوبه خود باعث پراکسیداسیون لیپیدی غشاها و در نهایت تجزیه کلروفیل موجود در برگ گیاهان خواهد شد. همچنین یکی دیگر از دلایل کاهش میزان

اکسیداتیو است. بنابراین، افزایش میزان مالون دی‌آلدید در تنش متوسط و شدید به افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و پراکسیداسیون لیپیدی غشاها مربوط می‌شود (Uzilday et al., 2012). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، Mohammadi و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که محتوای پرولین در گونه‌های مختلف آویشن تحت شرایط تنش خشکی افزایش معنی‌داری پیدا کرد. علاوه‌براین نتایج نشان داد محتوای مالون دی‌آلدید با کاربرد قارچ میکوریزا نسبت به عدم‌مصرف آن ۱۲/۸ درصد کاهش یافت. کاهش میزان مالون دی‌آلدید با کاربرد قارچ میکوریزا به کاهش اثرات منفی در شرایط تنش خشکی از طریق بهبود جذب رطوبت طریق افزایش سطح جذب، گسترش منطقه نفوذ ریشه و کاهش مقاومت انتقال آب به درون سلول‌های گیاهی مربوط می‌شود (Wu et al., 2013). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، Boutasknit و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند کاربرد قارچ میکوریز منجر به کاهش میزان مالون دی‌آلدید گیاه دارویی خرنوب (*Cerantonia siliqua*) با کاهش اثرات منفی ناشی از تنش خشکی گردید.

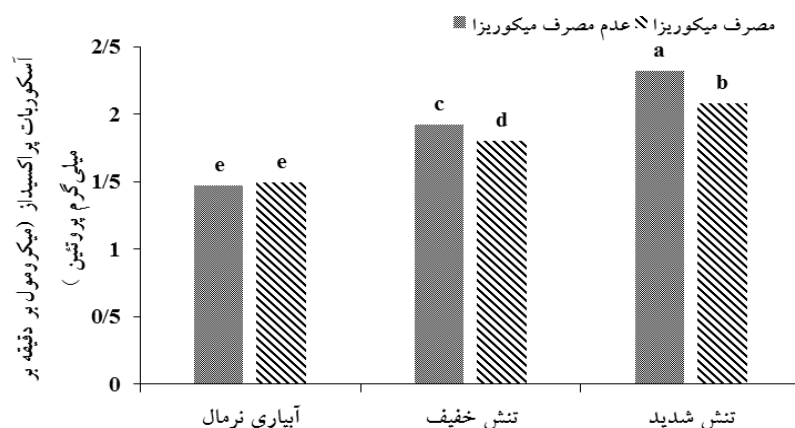
آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی: نتایج نشان داد آنزیم سوپراکسید دیسموتاز تحت تأثیر اثر جداگانه سطوح مختلف آبیاری و کاربرد قارچ میکوریزا قرار گرفتند. همچنین، فعالیت آسکوربات پراکسیداز تحت تأثیر اثرات متقابل دو فاکتور ذکرشده قرار گرفت. فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز نیز تحت تأثیر چین و کاربرد قارچ میکوریزا قرار گرفت (جدول ۴). با توجه به شکل ۲، بیشترین (۲/۳۲) میکرومول بر دقیقه بر میلی‌گرم پروتئین) میزان فعالیت ویژه آنزیم آسکوربات پراکسیداز به ترتیب در تنش شدید (W_{80}) بدون تلقیح با قارچ میکوریزا حاصل شد.

به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده این است که با افزایش سطوح تنش خشکی بر میزان فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز افزوده شده است. یکی از راهکارهای مقاومت گیاهان در تنش خشکی افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است. یکی از وظایف آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان افزایش تحمل و مقاومت گیاه در برابر تنش‌های

کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید در چین اول به ترتیب ۹/۱، ۳۳/۳، ۱۷/۲ و ۲۳/۱ درصد نسبت به چین دوم افزایش نشان داد (جدول ۷). بیشتربودن میزان کلروفیل و کارتنوئید در چین اول به دلیل بهینه‌بودن شرایط رشدی از قبیل طول روز و تابش آفتاب، دمای محیط و غیره و همچنین زیادبودن طول دوره رشدی گیاه در چین اول نسبت به چین دوم است (Amani Machiani et al., 2017).

پرولین: میزان پرولین فقط تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۴). میزان پرولین در تنش متوسط و شدید نسبت به آبیاری نرمال به ترتیب ۴۱/۷ و ۸۶/۲ درصد افزایش نشان داد (جدول ۶). افزایش میزان پرولین به‌عنوان یک راهکار دفاعی برای گیاه در مقابله با تنش خشکی محسوب می‌شود. پرولین اسیدآمینه‌ای است که بخش عمده بسیاری از پروتئین‌های درگیر در تنظیم اسمزی، دیواره سلولی و غشا را تشکیل می‌دهد (Hayat et al., 2012). در تنش خشکی، پرولین در حفظ پتانسیل اسمزی، حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن، حفاظت ماکرومولکول‌ها از دناتوره‌شدن و تنظیم اسیدپتید سلول نقش اساسی ایفا می‌نماید. علاوه‌براین، افزایش میزان پرولین به‌عنوان منبع نیتروژن و کربن برای گیاهان تحت تنش شدید عمل می‌کند و از این طریق تحمل گیاه در برابر تنش را افزایش می‌دهد (Amini et al., 2015). در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، Mohammadi و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند محتوای پرولین در گونه‌های مختلف آویشن تحت شرایط تنش خشکی افزایش معنی‌داری پیدا کرد.

مالون دی‌آلدید: غلظت مالون دی‌آلدید تحت تأثیر اثر جداگانه سطوح مختلف آبیاری و کاربرد قارچ میکوریزا قرار گرفت (جدول ۴). در بین سطوح آبیاری، بیشترین (۳/۴۰) نانومول بر گرم وزن تر) و کمترین (۲/۰۹) نانومول بر گرم وزن تر) میزان غلظت مالون دی‌آلدید به ترتیب در تنش شدید (W_{80}) و آبیاری نرمال به‌دست آمد. همچنین میزان مالون دی‌آلدید در تنش‌های متوسط و شدید به ترتیب ۴۰/۲ و ۶۲/۷ درصد نسبت به آبیاری نرمال افزایش نشان داد (جدول ۶). محتوای مالون دی‌آلدید شاخصی از میزان خسارت تنش



شکل ۲- میزان فعالیت ویژه آنزیم آسکوربات پراکسیداز در سطوح مختلف آبیاری با کاربرد قارچ میکوریزا

انتقال مجدد آن‌ها به گیاهان از طریق ریشه می‌شود که در نهایت منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های نامبرده شده و بهبود مقاومت گیاهان به شرایط تنش خشکی خواهد شد. در تطابق با نتایج پژوهش حاضر، Al-Arjani و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند کاربرد قارچ میکوریزا منجر به افزایش میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاه ارمنک رونده (*Ephedra foliata* Boiss) گردید.

علاوه بر این، آنزیم گایاکول پراکسیداز در چین دوم ۸/۵ درصد نسبت به چین اول کاهش یافت (جدول ۵). به نظر می‌رسد با توجه به این‌که در زمان برداشت، در چین دوم گیاه از نظر رطوبتی و همچنین دمای هوا در شرایط تنشی کمتری نسبت به چین اول قرار داشت، لذا آثار منفی ناشی از تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن در این شرایط کمتر بوده و به تبع آن میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تولیدشده نیز در سطح کمتری قرار داشتند.

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که در تنش‌های خفیف و شدید، جذب عناصر غذایی ماکرو و میکرو توسط گیاه کاهش یافت. با کاربرد قارچ میکوریزا به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، افزایش میزان محتوی نسبی آب، جذب عناصر غذایی ماکرو و میکرو در آویشن باغی مشاهده گردید که در نهایت منجر به بهبود شرایط رشدی و فیزیولوژیکی گیاه

محیطی و به‌ویژه تنش خشکی است. این آنزیم‌ها از سلول‌های گیاهی در برابر رادیکال‌های فعال اکسیژن محافظت کرده و از اثرات منفی آن‌ها می‌کاهند. آنزیم‌های نامبرده با رادیکال‌های فعال اکسیژن واکنش نشان داده و از اثرات منفی آن بر پراکسیداسیون لیپیدی غشا و نابودی سلول‌های گیاهی می‌کاهند (Ahmad, 2014). به‌طور مشابه، Mohammadi و همکاران (۲۰۱۹) گزارش کردند که تنش خشکی منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در آویشن باغی گردید.

همچنین نتایج نشان داد با تلقیح قارچ میکوریزا میزان آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز به ترتیب ۶/۲، ۹/۳ و ۱۵/۵ درصد نسبت به عدم مصرف قارچ افزایش یافت. قارچ میکوریزا با افزایش دسترسی عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن، فسفر و پتاسیم زمینه لازم جهت تولید بیومولکول‌هایی از قبیل پروتئین‌های مختلف را فراهم ساخته و از این طریق منجر به تولید و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از قبیل آسکوربات پراکسیداز، گایاکول پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز خواهد شد و در نهایت منجر به افزایش تحمل گیاهان و کاهش آثار منفی رادیکال‌های فعال اکسیژن در شرایط خشکی خواهد شد (Hashem et al., 2016). از طرف دیگر، Mirshad و Puthur (۲۰۱۶) گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی، تلقیح قارچ‌های میکوریزا با ریشه گیاهان منجر به افزایش بیان ژن‌های تولیدکننده آنزیم و همچنین پروتئین‌های تنظیم‌کننده از قبیل کالمودولین در قارچ و

و افزایش ۵/۹، ۱۴/۶، ۱۰/۳ و ۱۵ کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید نسبت به عدم مصرف قارچ گردید. علاوه بر این، تلقیح قارچ میکوریز منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از قبیل سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، آسکوربات پراکسیداز (APX) و گایاکول پراکسیداز (GPX) گردید. براساس نتایج

به‌دست آمده می‌توان کاربرد کودهای زیستی به‌ویژه قارچ میکوریز را به‌عنوان یک راهکار پایدار در جهت کاهش اثرات منفی خشکی و بهبود رشد گیاهان در این شرایط به‌عنوان تیمار برتر معرفی نمود.

منابع

- Abd Elbar, O. H., Farag, R. E. and Shehata, S. A. (2019) Effect of putrescine application on some growth, biochemical and anatomical characteristics of *Thymus vulgaris* L. under drought stress. *Annals of Agricultural Sciences* 64: 129-137.
- Abdel-Salam, E., Alatar, A. and El-Sheikh, M. A. (2018) Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi alleviates harmful effects of drought stress on damask rose. *Saudi Journal of Biological Sciences* 25: 1772-1780.
- Ahmad, P. (2014) Drought stress induced oxidative damage and antioxidants in plants. In: *Oxidative Damage to Plants: Antioxidant Networks and Signaling*. (eds. Ahmad, P., Jamsheed, S., Hameed, A., Rasool, S., Sharma, I., Azooz, M. M. and Hasanuzzaman, M.) Pp. 345-367. Academic Press, S. P. College, Srinagara, Jammu and Kashmir, India.
- Al-Arjani, A. B. F., Hashem, A. and Abd_Allah, E. F. (2020) Arbuscular mycorrhizal fungi modulate dynamics tolerance expression to mitigate drought stress in *Ephedra foliata* Boiss. *Saudi Journal of Biological Sciences* 27: 380-394.
- Alavi-Samani, S. M., Kachouei, M. A. and Pirbalouti, A. G. (2015) Growth, yield, chemical composition, and antioxidant activity of essential oils from two thyme species under foliar application of jasmonic acid and water deficit conditions. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 4: 109-113.
- Amani Machiani, M., Javanmard, A. and Shekari, F. (2017) The effect of intercropping patterns on peppermint (*Mentha piperita* L.) dry biomass yield and essential oil content and faba bean (*Vicia faba* L.) seed yield. *Journal of Crop Production and Processing* 7: 79-97.
- Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M. R. and Maggi, F. (2018) Evaluation of competition, essential oil quality and quantity of peppermint intercropped with soybean. *Industrial Crops and Products* 111: 743-754.
- Amini, S., Ghobadi, C. and Yamchi, A. (2015) Proline accumulation and osmotic stress: An overview of *P5CS* gene in plants. *Journal of Plant Molecular Breeding* 3: 44-55.
- Askary, M., Behdani, M. A., Parsa, S., Mahmoodi, S. and Jamialahmadi, M. (2018) Water stress and manure application affect the quantity and quality of essential oil of *Thymus daenensis* and *Thymus vulgaris*. *Industrial Crops and Products* 111: 336-344.
- Bahadori, F. and Ghorbanian, D. (2018) Evaluation of vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus intraradices*) efficiency on essential oil and dry herb yield of *Thymus vulgaris* in the field conditions. *Plant Production Technology* 10: 81-91.
- Bahreinejad, B., Razmjoo, J. and Mirza, M. (2013) Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. *International Journal of Plant Production* 7: 151-166.
- Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil* 39: 205-207.
- Beauchamp, C. and Fridovich, I. (1971) Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Analytical Biochemistry* 44: 276-287.
- 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: 1-15.
- Bradford, M. (1976) A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Annual Review of Biochemistry* 72: 248-254.
- Boutasknit, A., Baslam, M., Ait-El-mokhtar, M., Anli, M., Ben-Laouane, R., Douira, A., Modafar, C. E., Mitsui, T., Wahbi, S. and Meddich, A. (2020) Arbuscular mycorrhizal fungi mediate drought tolerance and recovery in two contrasting carob (*Ceratonia siliqua* L.) ecotypes by regulating stomatal, water relations, and (in) organic adjustments. *Plants* 9: 1-19.
- Copetta, A., Lingua, G. and Berta, G. (2006) Effects of three AM fungi on growth, distribution of glandular hairs, and essential oil production in *Ocimum basilicum* L. var. Genovese. *Mycorrhiza* 16: 485-494.
- Dong, J., Wu, F. and Zhang, G. (2006) Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*). *Plant Physiology Biochemistry* 64: 1659-1666.

- Elhindi, K. M., El-Din, A. S. and Elgorban, A. M. (2017) The impact of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating salt-induced adverse effects in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences* 24: 170-179.
- Emami Bistgani, Z., Siadat, S. A., Bakhshandeh, A., Ghasemi Pirbalouti, A. and Hashemi, M. (2017) Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Thymus daenensis* Celak. *Crop Journal* 5: 407-415.
- Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W. and He, X. (2020) Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of two adonis species in Northeast China. *Scientia Horticulturae* 259: 108795.
- Gheisari Zardak, S., Movahhedi Dehnavi, M., Salehi, A. and Gholamhoseini, M. (2018) Effects of using arbuscular mycorrhizal fungi to alleviate drought stress on the physiological traits and essential oil yield of fennel. *Rhizosphere* 6: 31-38.
- Giovannetti, M. and Mosse, B. (1980) An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist* 84: 489-500.
- Hashem, A., Abd-Allah, E. F., Alqarawi, A. A., Al-Huqail, A. A., Wirth, S. and Egamberdieva, D. (2016) The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria enhances plant growth of *Acacia gerrardii* under salt stress. *Frontiers in Microbiology* 7: 1089.
- Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J. and Ahmad, A. (2012) Role of proline under changing environments: A review. *Plant Signaling and Behavior* 7: 1456-1466.
- Heath, R. L. and Packer, L. (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 125: 189-198.
- Hussain, H. A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S. A., Men, S. and Wang, L. (2018) Chilling and drought stresses in crop plants: Implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in Plant Science* 9: 1-21.
- Jones, J. B. (1972) Plant tissue analysis for micronutrients. In: *Micronutrients in Agriculture*. (ed. Mortvedt, J. J.) Pp. 319-346. Soil Science Society America, Madison.
- Kamanga, R. M., Mbega, E. and Ndakidemi, P. (2018) Drought tolerance mechanisms in plants: Physiological responses associated with water deficit stress in *Solanum lycopersicum*. *Advances in Crop Science and Technology* 6: 1-8.
- Karimi, V., Karami, E. and Keshavarz, M. (2018) Vulnerability and adaptation of livestock producers to climate variability and change. *Rangeland Ecology and Management* 71: 175-184.
- Lak, S., Naderi, N., Siadat, S. A., Aynehband, A. and Noormohammadi, Gh. (2007) Effects of water deficiency stress on yield and nitrogen efficiency of grain corn hybrid KSC 704 at different nitrogen rates and plant population. *Iranian Journal of Agricultural Science and Natural Resources* 14: 63-76.
- Lichtenthaler, H. K. (1987) Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol* 148: 350-382.
- Liu, H., Song, F., Liu, S., Li, X., Liu, F. and Zhu, X. (2018) Arbuscular mycorrhiza improves nitrogen use efficiency in soybean grown under partial root-zone drying irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65: 269-279.
- Mirshad, P. P. and Puthur, J. T. (2016) Arbuscular mycorrhizal association enhances drought tolerance potential of promising bioenergy grass (*Saccharum arundinaceum* retz.). *Environmental Monitoring and Assessment* 188: 425-445.
- Mohammadi, H., Amirikia, F., Ghorbanpour, M., Fatehi, F. and Hashempour, H. (2019) Salicylic acid induced changes in physiological traits and essential oil constituents in different ecotypes of *Thymus kotschyanus* and *Thymus vulgaris* under well-watered and water stress conditions. *Industrial Crops and Products* 129: 561-574.
- Mozaffarian, V. (2008) *A Pictorial Dictionary of Botany Botanical Taxonomy Latin-English-French-Germany-Persian*. Koeltz Scientific Books, Germany.
- Nakano, Y. and Asada, K. (1981) Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and Cell Physiology* 22: 867.
- Nazeri, N. K., Lambers, H., Tibbett, M. and Ryan, M. R. (2013) Do arbuscular mycorrhizas or heterotrophic soil microbes contribute toward plant acquisition of a pulse of mineral phosphate? *Plant and Soil* 373: 699-710.
- Pavela, R., Zabka, M., Vrchotova, N. and Triska, J. (2018) Effect of foliar nutrition on the essential oil yield of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Industrial Crops and Products* 112: 762-765.
- Phillips, J. M. and Hayman, D. (1970) Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society* 55: 158-161.
- Razavi, S., Jahan, M., Mahallti, M. and Ghalibaf, K. (2017) Radiation absorption and use efficiency of common mallow (*Malva sylvestris* L.) affected by different sources of organic, biological and chemical fertilizers and intercropping with fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*). *Iranian Journal of Field Crops Research* 15: 136-149.

- Sanaullah, M., Rumpel, C., Charrier, X. and Chabbi, A. (2012) How does drought stress influence the decomposition of plant litter with contrasting quality in a grassland ecosystem? *Plant and Soil* 352: 277-288.
- Shukla, A., Kumar, A., Jha, A., Salunkhe, O. and Vyas, D. (2013) Soil moisture levels affect mycorrhization during early stages of development of agroforestry plants. *Biology and Fertility of Soils* 49: 545-554.
- Tandon, H. L. S., Cescas, M. P. and Tyner, E. H. (1968) An acid-free vanadate-molybdate reagent for the determination of total phosphorus in soils. *Soil Science Society of America Journal* 32: 48-51.
- Tanentzap, F. M., Stempel, A. and Ryser, P. (2015) Reliability of leaf relative water content (RWC) measurements after storage: Consequences for in situ measurements. *Botany* 93: 535-541.
- Upadhyaya, A., Sankhla, D., Davis, T. D., Sankhla, N. and Smith, B. N. (1985) Effect of paclobutrazol on the activities of some enzymes of activated oxygen metabolism and lipid peroxidation in senescing soybean leaves. *Journal of Plant Physiology* 121: 453-461.
- Uzilday, B., Turkan, I., Sekmen, A. H., Ozgur, R. and Karakaya, H. C. (2012) Comparison of ROS formation and antioxidant enzymes in *Cleome gynandra* (C4) and *Cleome spinosa* (C3) under drought stress. *Plant Science* 182: 59-70
- Weisany, W., Raei, Y. and Ghassemi-Golezani, K. (2016) *Funneliformis mosseae* alters seed essential oil content and composition of dill in intercropping with common bean. *Industrial Crops and Products* 79: 29-38.
- Wu, Q. S., Srivastava, A. K. and Zou, Y. N. (2013) AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. *Scientia Horticulturae* 164: 77-87.
- Zhang, F., Zou, Y. N. and Wu, Q. S. (2018) Quantitative estimation of water uptake by mycorrhizal extraradical hyphae in citrus under drought stress. *Scientia Horticulturae* 229: 132-136.

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and harvesting time on the macro- and micronutrients and antioxidant enzymes activity of thyme (*Thymus Vulgaris* L.) in the different irrigation levels

Mostafa Amani Machiani¹, Abdollah Javanmard^{*2}, Ali Ostadi², Ahmad Aghae³ and Farzad Rasouli⁴

¹ Department of Agricultural Science, Technical and Vocational University (TVU), Maragheh, Iran

² Department of Genetics and Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Maragheh

³ Department of Plant Biology, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

⁴ Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

(Received: 06/10/2020, Accepted: 06/04/2021)

Abstract

In order to evaluate the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and harvesting time on the macro- and micronutrients and antioxidant enzyme activities of thyme (*Thymus vulgaris* L.) at different irrigation levels, a field experiment was carried out as Split plot in time and place with 12 treatments and three replications at the faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran, in 2019. The first factor was three irrigation levels included irrigation after depletion of 20% maximum allowable depletion (W_{20}), depletion of 50% of maximum allowable depletion (W_{50}) and depletion of 80% of maximum allowable depletion (W_{80}) as severe stress. The sub factor was application and non-application of mycorrhiza and sub factor was harvesting time (first and second harvest). The results demonstrated that the highest and lowest content of N, P, K, Zn, Fe and Ca was observed in W_{20} and W_{80} irrigation levels, respectively. Also, with application of AMF, the content of N, P, K, Fe, Zn and Mn increased by 17.4, 24.7, 20.9, 20.6, 11.8 and 18.2% compared with the untreated control. Among different irrigation levels, the highest content of Chlorophyll a (0.8 mg/g fresh weight), b (0.48 mg/g fresh weight) and total (1.28 mg/g fresh weight) was achieved in the non-stress conditions (W_{20}). Also, the highest antioxidant enzymes activity such as superoxide dismutase, ascorbate peroxidase and guaiacol peroxidases was achieved in the moderate and severe water stress conditions with application of AMF. Generally, the results showed that application of AMF play a main role in improving plant nutrient absorption and increasing resistant to drought stress conditions.

Keywords: Bio-fertilizer, Drought stress, Medicinal and aromatic plants, Proline, Sustainable agriculture

Corresponding author, Email: A.javanmard@maragheh.ac.ir