تأثیر قارچ میکوریزا بر رشد و عملکرد فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum*.L) تحت شرایط تنش خشکی

مژگان انجیلی[۱]، بهروز اسماعیل پور[۱*]، حمیده فاطمی[۱] و پریسا جلیل‌وند[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۲۷)

چکیده

تولید گیاهان در شرایط درون شیشه‌ای یکی از روش‌های سریع و ارزان در تولید محصولات باغبانی است. ولی گیاهچه‌های حاصل از این روش نسبت به سایر گیاهان حساسیت بیشتری داشته و نیاز به سازگاری بیشتری با عوامل اقلیمی دارند. به‌منظور بررسی اثر همزیستی دو گونه قارچ میکوریز بر سازگاری، رشد و عملکرد فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum*.L) رقم *Inspiration* در شرایط تنش خشکی، دو آزمایش اجرا شد. آزمایش اول، تأثیر تلقیح گیاهچه‌های حاصل از کشت بافت با قارچ میکوریزا (گونه‌های *Glomus fasciculatum* و *Glomus intraradicese*) به‌صورت مایه‌کوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رشد گیاهان تلقیح شده نسبت به شاهد بیشتر بود. در آزمایش دوم، گیاهچه‌های تلقیح شده با قارچ میکوریزا و شاهد در معرض سه سطح تنش خشکی (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه) قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش تنش خشکی، تعداد انشعابات، سطح برگ، میزان کلروفیل، هدایت روزنه‌ای، درصد کلونیزاسیون و میزان فسفر کاهش و مقادیر پتاسیم و تجمع پرولین برگ افزایش یافت. تلقیح با قارچ میکوریز *G. intraradicese* تعداد برگ، کلروفیل و وزن تر و خشک میوه را در شرایط تنش خشکی افزایش و میزان پرولین را کاهش داد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش، همزیستی با قارچ میکوریز در شرایط آبیاری ۷۵٪ نیاز آبی گیاه را برای دستیابی به عملکرد مناسب و صرفه‌جویی در آب مصرفی در تولید گیاه فلفل دلمه‌ای مناسب دانست.

کلمات کلیدی: پرولین، عملکرد، فسفر، کلروفیل، هدایت روزنه‌ای

مقدمه

خشکی یکی از اصلی‌ترین عوامل غیر زیستی محدود کننده رشد گیاهان در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا، از جمله ایران، محسوب می‌شود (۱، ۵ و ۶). تنش خشکی باعث به تأخیر انداختن جوانه‌زنی و کاهش رشد اندام‌های هوایی، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز، تعرق، هدایت روزنه‌ای و برهم خودن موازنه هورمونی در گیاه می‌شود (۳ و ۴). با کاهش پتانسیل آب خاک، گیاهان برای حفظ قدرت جذب آب و ایجاد جریان آب از خاک به ریشه‌ها باید پتانسیل آب درونی را با مکانیسم تنظیم اسمزی کاهش دهند. در این حالت، پتانسیل اسمزی گیاه

۱. گروه باغبانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: behsmaiel@yahoo.com

توسط انباشتگی فعال یون‌های معدنی مثل پتاسیم، کلسیم و کلر یا ترکیبات آلی مثل پرولین و یا کربوهیدرات‌ها کاهش می‌یابد (۸).

یکی از روش‌های افزایش پایداری تولید گیاهان در شرایط تنش خشکی، استفاده از رابطه همزیستی میکوریزی است. میکوریزا نوعی همزیستی دوجانبهٔ مفید بین انواع خاصی از قارچ‌های خاک‌زی و سیستم ریشه‌ای گیاهان است (۳۴). در واقع، قارچ‌های میکوریز با ایجاد رابطه همزیستی با ریشه اغلب گیاهان و با گسترش ریشه خود به درون خاک، موجب افزایش جذب عناصر غذایی معدنی غیرمتحرک مانند فسفر، روی و مس شده و جذب و انتقال مواد توسط میکوریز می‌تواند تولید زیست‌توده را در خاک‌هایی با کمبود منیزیم، کلسیم و فسفر بهبود بخشد (۱۷). همزیستی با قارچ میکوریز آربوسکولار باعث افزایش میزان فتوسنتز می‌گردد، که این امر افزایش ذخیره‌سازی و صدور فرآورده‌های فتوسنتزی را نیز در پی دارد (۱۰).

قارچ‌های میکوریز قادر هستند با افزایش جذب آب و کاهش اثرهای منفی تنش‌های محیطی از قبیل خشکی باعث بهبود رشد و عملکرد گیاه میزبان شوند (۱ و ۱۷). این قارچ‌ها در شرایط تنش خشکی با تأثیر بر تعادل آبی گیاه و از طریق بهبود جذب آب و پتانسیل آماس برگ، کنترل منافذ روزنه‌ای و تعرق، افزایش طول و عمق ریشه و توسعه هیف‌های انتهایی، مقاومت زیادی را در گیاه القا می‌کنند (۱۰). در شرایط تنش رطوبتی، هدایت هیدرولیکی سیستم ریشه‌های گیاهان میکوریزی بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی است که این موضوع در اثر افزایش توسعه سطح سیستم ریشه می‌باشد (۵۰). گیاهان کلونیزه شده با قارچ‌های میکوریز به علت پتانسیل آب برگ زیادتر مقاومت به خشکی بیشتری را نشان می‌دهند (۱۵). استرادا لونا و همکاران (۱۸) دریافتند که گیاهچه‌های کلونیزه شده فلفل نسبت به گیاهچه‌های غیرکلونیزه بیشترین محتوای رطوبت نسبی را در طول دوره اوج تلفات آب در گیاه داشتند.

فلفل دلمه‌ای، با نام علمی *Capsicum annum* L. از سبزی‌های میوه‌ای و یکساله متعلق به خانواده بادنجان است که اهمیت تغذیه‌ای آن براساس خاصیت اشتهاآوری، هضم غذا، مقدار کاروتن و ترکیبات آنتی‌اکسیدانی و دارا بودن بیشترین مقدار ویتامین C در بین سبزی‌ها بعد از جعفری است (۲). از آنجایی که جوانه‌زنی بذر فلفل کند می‌باشد و این امر موجب کندی رشد گیاهچه‌های حاصل از کشت بذر می شود، بنابراین یکی از روش‌های ازدیاد نشای فلفل دلمه‌ای و تولید انبوه گیاهانی با کیفیت خوب و عاری از عوامل بیماری‌زا، استفاده از روش کشت بافت است (۳۳). این امر می‌تواند گامی مهم در جهت رفع مشکلات موجود در تکثیر این گیاه باشد (۲۳ و ۳۹). از سوی دیگر، گیرایی نشای این گیاه نسبت به گوجه‌فرنگی کمتر می‌باشد. تلقیح با قارچ میکوریز نیز در افزایش زنده‌مانی گیاهچه‌ها و گیرایی نشای این گیاه مؤثر است (۲۱، ۲۲، ۲۵). تلقیح ریشه‌های گیاهچه‌های ریزازدیاد شده با قارچ میکوریز نقش سودمندی را در نشاکاری بعدی آنها دارد (۲۳). بنابراین، هدف عمده این تحقیق در استفاده از روش کشت بافت، تسریع در جوانه‌زنی بذر فلفل، افزایش، تسریع در تولید گیاهچه و نشای فلفل، استفاده از قارچ میکوریز در جهت افزایش میزان زنده‌مانی و سازگاری بیشتر گیاهان فلفل دلمه‌ای در زمان انتقال به زمین اصلی و مقاومت در برابر تنش خشکی بود که با توجه به مسئله کمبود آب در ایران و نقش میکوریز در بوم‌نظام‌های کشاورزی به‌منظور بهبود حاصلخیزی و رطوبت قابل استفاده در خاک تحت تأثیر افزایش توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه فلفل دلمه‌ای حائز اهمیت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو آزمایش مجزا در گلخانه دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۳۹۲ اجرا گردید. در آزمایش اول، تأثیر تلقیح با دو گونه قارچ میکوریز (*Glomus intraradices* و *Glomus fasciculatum*) بر سازگاری گیاهچه‌های کشت بافتی فلفل دلمه‌ای رقم Inspiration در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار و آزمایش دوم به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار به‌منظور بررسی تأثیر تنش خشکی بر گیاهچه‌های کشت بافتی فلفل تلقیح شده با قارچ میکوریز



شکل ۱. به ترتیب از چپ به راست: مراحل انتقال گیاهچه کشت بافتی و سازگاری

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد آزمایش

بافت خاک	کربن آلی (٪)	نیتروژن (٪)	فسفر (٪)	پتاسیم (٪)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (dS/m)
لوم رسی	۰/۰۶۸	۰/۰۱۴	۰/۰۸	۰/۰۳	۷/۱	۱/۳

اجرا گردید. فاکتورهای آزمایشی در آزمایش دوم شامل دو گونه قارچ میکوریز (*Glomus intraradices* و *Glomus fasciculatum*) و تنش خشکی در سه سطح (۱۰۰ (بدون تنش)، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) بود. بذر فلفل دلمه‌ای رقم Inspiration از شرکت پاکان بذر اصفهان و گونه‌های قارچ میکوریز از شرکت فناوری زیست توران تهیه شد.

در این تحقیق، برای تولید گیاهچه‌ها، بذرها در محیط کشت MS کشت گردیدند و تا مرحله ۵ تا ۶ برگی در محیط کشت قرار گرفتند. پس از این مرحله، گیاهان به گلدان‌های کاغذی انتقال یافتند (شکل ۱).

بستر خاکی مورد استفاده شامل نسبت ۲ به ۱ خاک و ماسه با بافت لوم رسی بود. برای این منظور، ابتدا خاک مناسب تهیه و مورد تجزیه قرار گرفت که نتایج آن در (جدول ۱) آمده است. خاک مورد استفاده به مدت یک ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار یک اتمسفر اتوکلاو گردید. سپس، برای مایه‌کوبی هر کیلوگرم از خاک، ۵۰ گرم از هر یک از دو گونه قارچ میکوریز استفاده شد (۶). پس از سازگاری صفات، میزان کلروفیل، درصد ریزش، ارتفاع گیاهچه و درصد زنده‌مانی اندازه‌گیری شد. گیاهان پس از سازگاری به گلدان‌های بزرگتر انتقال یافتند و سپس تیمارهای خشکی اعمال شد (۱۷). برای این منظور، ابتدا تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری صورت گرفت (۴، ۱۲، ۲۳) و بافت خاک لوم رسی تشخیص داده شد. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری با استفاده از استوانه نمونه دست نخورده (به حجم ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب) از عمق ۵-۶ سانتی‌متری از سطح خاک تهیه شد. پس از وزن کردن، در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. سپس، جرم مخصوص ظاهری با استفاده از فرمول زیر به‌دست آمد (۱۲، ۲۳):

$$\rho_b = ms / Vt \qquad [۱]$$

که در آن ρb جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، ms جرم خاک خشک (گرم) و Vt حجم کل خاک (سانتی‌متر مکعب) می‌باشد.

برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه، گلدانی را پر از خاک کرده و تا حد غرقاب آبیاری شد و ۴۸ ساعت روی گلدان با پلاستیک پوشانده شد. سپس، نمونه دست نخورده از عمق ۵-۶ سانتی‌متری از سطح خاک تهیه و پس از توزین، در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و مجدداً وزن شد. تفاوت وزن نمونه در این دو مرحله جرم آب تبخیر شده را نشان می‌دهد. با استفاده از فرمول زیر، رطوبت ظرفیت مزرعه به‌دست آمد (۱۲):

$$\theta_{fc} = m_w / m_s \quad [۲]$$

که در آن θ_{fc} رطوبت ظرفیت مزرعه (گرم بر گرم) و m_w جرم آب می‌باشد. رطوبت نقطه پژمردگی با استفاده از دستگاه صفحه فشاری با اعمال مکش ۱۵ بار اندازه‌گیری گردید (۲۴) که مقدار رطوبت در این شرایط ۱۱٪ بود. آب قابل نگهداری در خاک با استفاده از معادله‌های (۳) و (۴) محاسبه گردید. عمق ریشه برای هر تیمار بر حسب میانگین نفوذ ریشه چند گیاه (نماینده جامعه گیاهی) محاسبه گردید (۱۳).

$$AW = \frac{(\theta_{fc} - \theta_{wp})}{۱۰۰} \times D\rho_b \quad [۳]$$

$$RAW = AW \times MAD \quad [۴]$$

که AW آب قابل نگهداری در خاک (سانتی‌متر)، θ_{wp} رطوبت نقطه پژمردگی (گرم بر گرم)، D عمق ریشه در خاک (سانتی‌متر)، RAW آب سهل‌الوصول (سانتی‌متر) و MAD حداکثر تخلیه مجاز است. حداکثر تخلیه مجاز در این آزمایش‌ها ۰/۵، ۰/۲۵ و بدون تخلیه (نگهداشتن خاک در رطوبت ظرفیت مزرعه) در نظر گرفته شد.

برای اعمال تنش خشکی بر گیاهان، ابتدا رابطه بین جرم و رطوبت گلدان به شرح زیر محاسبه گردید. برای به حداقل رساندن تأثیر رطوبت بر وزن خاک درون گلدان، آن را هواخشک نموده، سپس مقدار یکسانی از شن درشت پس از توزین برای ایجاد زهکش کافی در کف گلدان‌ها ریخته شد. آنگاه گلدان‌ها روی ترازویی با دقت ۰/۱ گرم قرار گرفته و مخلوط خاک و ماسه با نسبت ۱: ۲ و به مقدار مساوی در همه آنها ریخته شد. آنگاه یکی از گلدان‌ها را به‌طور تصادفی انتخاب نموده و خاک داخل آن کاملاً غرقاب گشته و به‌وسیله پلاستیک پوشانیده شد و اجازه داده شد که آب ثقلی آن خارج شود. بعد از آنکه رطوبت خاک به ظرفیت مزرعه رسید (آبی از ته گلدان خارج نشد)، گلدان به مدت سه هفته و تا زمانی که وزن آن ثابت شود، به صورت روزانه توزین و یادداشت‌برداری گردید. سپس، خاک داخل گلدان در یک ظرف مخصوص تخلیه و وزن ظرف همراه با خاک درون آن یادداشت گردید (A) و در آون با دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید و بعد از خارج کردن از آون، دوباره خاک همراه ظرف توزین شد (B) و تفاوت این دو وزن (قبل و بعد از آون) جرم آب M_w خاک درون گلدان در آخرین مرحله آزمایش را نشان داد. درنهایت، رطوبت جرمی به‌صورت زیر به‌دست آمد:

$$\theta_m = \frac{Mw}{Ms} = \frac{A-B}{B-C} \quad [۵]$$

که C وزن گلدان خالی است.

با توجه به اینکه اختلاف جرم گلدان‌ها در هر روز متوالی نشانگر مقدار آب تبخیر شده می‌باشد و مقدار خاک خشک در هر مرحله ثابت است، با اضافه کردن اختلاف جرم گلدان‌ها در هر دوره زمانی اندازه‌گیری به M_w، رطوبت در آن مرحله به دست می‌آید. لذا، با افزودن آب‌های تبخیر شده، رطوبت در تمام مراحل آزمایش (۲۱ روز) به‌دست آمد. با به‌دست آمدن جرم گلدان و رطوبت جرمی، رابطه خطی بین آنها توسط نرم‌افزار Excel تعیین گردید: در موقع اعمال تنش‌ها، با داشتن جرم گلدان، رطوبت گلدان‌ها توسط رابطه رگرسیونی بدست آمده قابل محاسبه بود. برای اعمال تنش از معادله [۴] استفاده شد. بجای MAD، سه سطح تنش یعنی شاهد (بدون تنش)، ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه قرار داده شد و با اندازه‌گیری جرم گلدان‌ها تلاش گردید رطوبت گلدان‌ها در سطح تنش ثابت نگه داشته شود. تعیین مقدار آب مورد نیاز برای هر تیمار تنش خشکی، از طریق وزن نمودن گلدان‌ها انجام گرفت (۲۶).

صفاتی از قبیل ارتفاع بوته، تعداد انشعابات فرعی ساقه، وزن خشک میوه و ریشه، سطح برگ توسط دستگاه سطح‌سنج (Leaf area meter) مدل ΔT انگلستان، میزان کلروفیل به وسیله دستگاه کلروفیل‌سنج دستی مدل CCM 200 ساخت کشور آمریکا)، هدایت روزنه‌ای با دستگاه پرومتر مدل SC ساخت کشور آمریکا، میزان فسفر با روش کوتونی (۱۴)، پتاسیم با دستگاه فلیم‌فتومتر (۲۹)، پرولین با روش بیتس و همکاران (۹) و درصد کلونیزاسیون ریشه با استفاده از روش فیلیپس و هایمن (۴۲) اندازه‌گیری شدند. داده‌های مربوط به آزمایش در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.1 تجزیه شده و

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر قارچ میکوریز بر سازگاری گیاهچه فلفل دلمه‌ای

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		ارتفاع	میزان ریزش برگ	میزان کلروفیل
قارچ میکوریز	۲	۴/۲**	۱۰**	۶۱/۹**
اشتباه آزمایشی	۴۲	۰/۷۸	۰/۲۵	۸/۴۸
ضریب تغییرات (٪)		۱۲	۲۶	۱۳/۹۳

**معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر قارچ میکوریز بر شاخص‌های رشد فلفل دلمه‌ای در آزمایش اول

تیمار تلمیح میکوریز / شاهد	ارتفاع گیاه (cm)	میزان ریزش برگ ٪	میزان کلروفیل CCM 200
شاهد	۷/۱b	۲/۸۶b	۱۸/۷۴b
G .intraradicese	۸a	۱/۳۳a	۲۱/۲۱a
G. fasciculatum	۷/۰۶b	۱/۶a	۲۲/۷۶a

در هر ستون، حروف یکنواخت نمایانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

میانگین تیمارها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها در آزمایش سازگاری گیاهچه فلفل دلمه‌ای نشان داد که اثر قارچ میکوریز بر صفات میزان کلروفیل، میزان ریزش برگ و ارتفاع گیاهچه معنی‌دار است (جدول ۲).

نتایج حاصل از جدول مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۳) در آزمایش سازگاری گیاهچه‌ها نشان می‌دهد که بیشترین ارتفاع گیاه (۸ سانتی‌متر) مربوط به گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* بود که اختلاف معنی‌داری را با گیاهان فاقد قارچ میکوریز (۷/۱ سانتی‌متر) و گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. fasciculatum* (۷/۰۶ سانتی‌متر) نشان دادند. یافته‌های این تحقیق در رابطه با تأثیر تلقیح قارچ میکوریز توسط نتایج سایر محققین تأیید می‌گردد. پادیلا و همکاران (۳۹، ۴۰، ۴۱) گزارش دادند که ارتفاع گیاهچه‌های ریزازدیاد شده *Pouteria Lucuma* در شرایط تلقیح با قارچ میکوریز بیشتر از گیاهچه‌های شاهد بدون قارچ میکوریز بود. استرادا لونا و دیویس (۷، ۱۸) نتیجه گرفتند که کلونیزه کردن سریع گیاهچه‌های ریزازدیاد شده فلفل با قارچ میکوریز موجب افزایش سازگاری فیزیولوژیک شده و به ترمیم سریع گیاهچه‌ها و رشد بیشتر در طول بعد از سازش کمک می‌کند. وو و زیا (۵۲) گزارش دادند که گیاهچه‌های نارنگی تلقیح شده با قارچ میکوریز نسبت به گیاهچه‌های فاقد قارچ میکوریز از ارتفاع بیشتری برخوردار بودند. با توجه به اینکه گیاهچه انتقال یافته از شرایط درون شیشه‌ای با بستر کاشت خاکی با شرایط تنش ناشی از انتقال مواجه شده است، این امر سبب کاهش ارتفاع و در پی آن کاهش رشد گیاه گردید. خالید (۲۷) اظهار داشت که رشد کم، یک حالت سازگار کننده گیاه برای زنده ماندن گیاه در شرایط تنش است، به این دلیل که گیاه، مواد غذایی و انرژی را به جای استفاده برای رشد شاخساره، به سمت مولکول‌های نگهداری کننده در برابر تنش هدایت می‌کند.

میزان ریزش برگ

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها (جدول ۳) در

آزمایش سازگاری گیاهچه نشان داد که بیشترین میزان ریزش برگ (۲/۸۶) در گیاهان فاقد قارچ میکوریز بود که اختلاف معنی‌داری را با گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* (۱/۳۳) و گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. fasciculatum* (۱/۶) داشتند. ولی بین دو تیمار قارچ میکوریز اختلاف معنی‌دار نبود. شوک ناشی از انتقال سبب ریزش تعدادی از برگ‌ها شد که تلقیح با قارچ میکوریز با بهبود روابط آبی و شاخص‌های رشد این ریزش را کاهش داد. ریزش برگ یکی از شاخص‌های سازگاری گیاه برای رهایی از اثرهای تنش‌های محیطی می‌باشد (۵، ۱۱). در شرایط تنش خشکی، گیاه برای مقابله با از دست رفتن رطوبت، از سطح اندام تعرق کننده می‌کاهد و با کاهش تعداد برگ یا مساحت سطح برگ، سطح فتوسنتز کننده خود را کاهش می‌دهد و متعاقب آن ظرفیت فتوسنتزی گیاه کاهش می‌یابد (۳۸).

میزان کلروفیل

مقایسه میانگین تأثیر تلقیح با قارچ میکوریز (جدول ۳) مشخص می‌کند که بیشترین میزان کلروفیل (۲۲/۷۶) مربوط به تیمار گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. fasciculatum* بود که تفاوت معنی‌داری با گیاهان تلقیح نشده با قارچ میکوریز (۱۸/۷۴) داشتند. ولی بین تیمار گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. fasciculatum* و گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* (۲۱/۲۱) تفاوت معنی‌دار نبود. نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های سایر محققین به شرح زیر سازگاری داشت. ماتور و ویاس (۳۰، ۳۲) اظهار داشتند که افزایش میزان فتوسنتز در گیاهچه‌های ریزازدیاد شده تلقیح شده با قارچ میکوریز نسبت به گیاهچه‌های فاقد میکوریز می‌تواند به افزایش سنتز کلروفیل نسبت داده شود. افتخاری و همکاران (۱۶) گزارش دادند که افزایش محتوای کلروفیل در گیاهچه‌های ریزازدیادی تلقیح شده نسبت به گیاهچه‌های فاقد میکوریز می‌تواند به علت جذب بیشتر عناصر غذایی ضروری از قبیل آهن، مس و منیزیم باشد. استرادا لونا و همکاران (۱۹) دریافتند که گیاهچه‌های ریزازدیاد شده *Psidium guajava* که با قارچ میکوریز تلقیح شده بودند در مقایسه با گیاهچه‌های تلقیح نشده، سرعت فتوسنتز بیشتری داشتند.

نتایج حاصل از بررسی سازگارنمودن گیاهچه‌ها

نتایج حاصل از این آزمایش به‌طور کلی بیانگر آن است که میزان رشد و افزایش سرعت رشد در گیاهان تلقیح شده نسبت به شاهد بیشتر بود. فورتاناتو و همکاران (۲۰) گزارش کردند که بقای گیاهچه‌های آرتیشو حاصل از ریزازدیادی که قبل از انتقال به گلدان با قارچ میکوریز تلقیح شده بودند ۹۰-۹۵ درصد بود. روئیز لوزانو و آزکان (۴۵، ۴۷) گزارش دادند که گیاهچه‌های کاهو در شرایط تلقیح با قارچ میکوریز بقای ۱۰۰٪ و با عدم تلقیح با قارچ میکوریز بقای ۹۵٪ داشتند.

نتایج آزمایش دوم (تأثیر تنش خشکی و قارچ میکوریزا)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها در آزمایش دوم نشان داد که تأثیر تنش خشکی بر تعداد میوه، وزن خشک میوه، تعداد انشعابات فرعی، سطح برگ، پرولین، هدایت روزنه‌ای و میزان پتاسیم و فسفر در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. اثر قارچ میکوریزا بر صفات تعداد میوه و شاخص کلروفیل در سطح احتمال ۵٪ و بر میزان پرولین و پتاسیم در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود. اثر متقابل تیمارها نیز برای وزن خشک میوه، میزان پرولین و میزان کلروفیل در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود (جدول ۴).

انشعابات فرعی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها در آزمایش دوم نشان داد که تأثیر تنش خشکی بر انشعابات فرعی معنی‌دار بود. ولی اثر قارچ میکوریزا روی این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۴). مقایسه میانگین داده‌ها در جدول (۵) نشان داد که افزایش تنش خشکی باعث کاهش تعداد انشعابات فرعی در گیاه فلفل دلمه‌ای شد.

جدول ۴. تجزیه واریانس تاثیر تنش خشکی و میکوریز بر صفات رشد و عملکرد و محتوای عناصر در گیاه فلفل دلمه‌ای

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات									
		انشعاب فرعی	سطح برگ	هدایت روزنه‌ای	میزان کلروفیل	پرولین	تعداد میوه	وزن خشک میوه	پتاسیم	فسفر	درصد کلونیزاسیون
تنش خشکی	۲	۶/۷۷**	۱۱۴۶/۱۶**	۲۴۳۶/۴۹**	۴۹۶/۹**	۵/۶۳**	۹/۵۲**	۱۲/۵۱**	۳/۹۱**	۰/۰۳۸**	۰/۵۸**
قارچ میکوریز	۲	۰/۰۲۷^{ns}	۱۶۱/۹^{ns}	۱۸/۵۵^{ns}	۲۵/۹۹**	۰/۶۵**	۴/۳۶*	۱/۹۳*	۴/۶۴**	۰/۰۰۴۳^{ns}	۰/۰۷**
میکوریز×تنش خشکی	۴	۰/۶۹^{ns}	۱۸۶/۹۵^{ns}	۵۹/۷۳^{ns}	۹۵/۷۸*	۰/۵۴**	۱/۳۲^{ns}	۲/۳۹**	۰/۵۷^{ns}	۰/۰۰۱۳^{ns}	۰/۰۳**
اشتباه آزمایشی	۲۷	۰/۵۷	۱۹۴/۴۳	۲۱۳/۸۷	۳۳/۴۳	۰/۱۰۲	۱/۰۸	۰/۴۲	۲/۳۹	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱
ضریب		۱۹/۲	۲۸/۲۸	۱۸/۷۲	۲۹/۳۷	۱۳/۲۳	۲۹/۳۰	۲۱/۶۵	۱۸/۲	۱۶/۹۰	۶/۲۰

جدول ۵. مقایسه میانگین اثرهای قارچ میکوریز و تنش خشکی بر صفات رشد و عملکرد و محتوای عناصر در گیاه فلفل دلمه‌ای

تیمار		انشعابات فرعی	سطح برگ (cm^2)	هدایت روزنه‌ای ($mmol/m^2s$)	تعداد میوه	پتاسیم (mg/g)	فسفر (mg/g)
قارچ میکوریز	شاهد	۳/۹۱^{a}	۴۶/۳۵^{a}	۷۸/۰۶^{a}	۲/۶۶^{b}	۳/۹۲^{b}	۰/۲۰^{b}
	G. intraradicese	۳/۹۱^{a}	۵۳/۴۱^{a}	۷۹/۱۹^{a}	۳/۷۵^{a}	۴/۴۹^{b}	۰/۲۴^{a}
	G. fasciculatum	۴^{a}	۴۸/۱۱^{a}	۷۶/۷^{a}	۳/۶۶	۵/۱۶^{a}	۰/۲۱^{ab}
تنش خشکی (درصد ظرفیت مزرعه)	شاهد	۴/۶۶^{a}	۵۵/۷۶^{a}	۹۱/۴۴^{a}	۳/۹۱^{a}	۳/۹۲^{b}	۰/۲۷^{b}
	۷۵	۴^{b}	۵۴/۰۷۱^{a}	۷۹/۴۶^{a}	۳/۸۳^{a}	۴/۶۱^{a}	۰/۲۲۵^{b}
	۵۰	۳/۱۶^{c}	۳۸/۰۵^{b}	۶۳/۰۵^{b}	۲/۳۳^{b}	۵/۰۵^{a}	۰/۱۶^{c}

در هر ستون، حروف مشترک نمایانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشند.

به‌گونه‌ای که بیشترین میزان انشعابات (۴/۶۶ در بوته) در شرایط فاقد تنش و کمترین میزان انشعابات فرعی (۳/۱۶) در سطح تنش ۵۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه مشاهده شد (جدول ۵). از آنجا که شاخه‌دهی زیاد تحت تنش خشکی می‌تواند به جهت مصرف رطوبت خاک یک صفت نامطلوب باشد، بنابراین کاهش تعداد و طول شاخه‌های جانبی در شرایط کم‌آبی می‌تواند به عنوان یک مکانیسم سازگاری برای گیاه تلقی گردد (۸).

سطح برگ

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تنش خشکی تأثیر معنی‌داری بر سطح برگ داشت. اما اثر قارچ میکوریزا بر صفت سطح برگ معنی‌دار نبود (جدول ۴). با افزایش تنش خشکی، سطح برگ گیاه فلفل دلمه‌ای کاهش یافت، به‌طوری که کمترین سطح برگ (۳۸/۵۲ سانتی‌متر مربع) در شرایط ۵۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه و بیشترین سطح برگ (۵۵/۶ سانتی‌متر مربع) در شرایط فاقد تنش خشکی مشاهده شد (جدول ۵). محققین، کاهش سطح برگ را به دلیل کاهش محتوای نسبی آب برگ و کوچک شدن اندازه سلول‌ها، کاهش تقسیم سلول‌های مریستمی و در نتیجه کند شدن رشد برگ، توقف تولید برگ، تسریع پیری و در پی آن ریزش برگ‌ها می‌دانند (۴ و ۱۰). تنش آبی باعث کاهش توسعه ریشه و کاهش پتانسیل آب برگ، توقف گسترش سطح برگ، کاهش معنی‌دار شاخص سطح برگ و سرعت رشد

محصول می‌گردد (۵ و ۳۰، ۳۱). نایدو و همکاران (۳۵، ۳۷) اظهار داشتند که تنش خشکی در کلیه ژنوتیپ‌های گیاه *Vigna radrata* موجب کاهش سطح برگ گردید که دلیل آن را می‌توان به مکانیسم گیاه در جهت کاهش اتلاف آب و تعرق نسبت داد.

تعداد میوه

تأثیر سطوح تنش خشکی و همزیستی با قارچ میکوریز بر تعداد میوه فلفل دلمه‌ای معنی‌دار بود (جدول ۴). به‌طوری که بیشترین تعداد میوه مربوط به تیمار بدون تنش خشکی (۳/۹۱) و کمترین تعداد در تیمار ۵۰٪ آبیاری (۲/۳۳) دیده شد. در واقع، با اعمال تنش خشکی، کاهش ۴۰ درصدی در تعداد میوه در گیاه فلفل دلمه‌ای مشاهده شد (جدول ۵). میشل و همکاران (۳۴، ۳۶) نیز در پژوهشی، با بررسی تأثیر تنش خشکی و شوری بر کمیت و کیفیت گیاه گوجه‌فرنگی، اظهار داشتند که عملکرد میوه در اثر کمبود آب کاهش ۳۷ درصدی نشان داد که با نتایج این تحقیق مشابهت داشت. همچنین، مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای تلقیح با قارچ میکوریز نشان داد که بیشترین تعداد میوه (۳/۷۵) در گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* بود که با گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. fasciculatum* (۳/۶۶) تفاوت معنی‌داری نداشت و کمترین تعداد میوه (۲/۶۶) در شاهد بدون تلقیح با قارچ میکوریز به‌دست آمد (جدول ۵). در این راستا، استرادا لونا و دیویس (۷، ۱۸) گزارش دادند که تلقیح گیاهان فلفل دلمه‌ای با قارچ میکوریز تعداد میوه را نسبت به گیاهان فاقد قارچ میکوریز افزایش داد. آنها بیشترین اثربخشی قارچ‌های میکوریزی آربوسکولار در افزایش تعداد میوه و عملکرد گیاه را مربوط به جذب عناصر غذایی، به‌ویژه فسفر و پتاسیم، برای گیاه دانستند. در شرایط تنش کم‌آبی، در انتقال مواد غذایی در گیاه، اختلال ایجاد می‌شود. اما برخی از قارچ‌های مفید خاک‌زی مانند میکوریز، با تشکیل کلنی در ریشه و افزایش سطح جذب آب و مواد غذایی، عملکرد را در گیاهان تحت تنش بهبود می‌بخشد. افزایش جذب عناصر غذایی عمدتاً به دلیل انتشار میسلیوم‌های قارچ کلونیزه کننده بافت‌های درونی ریشه و تشکیل یک سیستم مکمل جذب در سیستم ریشه‌ای گیاه است که بهره‌گیری از حجم بیشتر خاک را ممکن می‌سازد که ریشه‌های تغذیه کننده به آن دسترسی ندارند (۶).

هدایت روزنه‌ای

مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که سطوح تنش خشکی باعث کاهش هدایت روزنه‌ای در برگ‌های گیاه فلفل دلمه‌ای شد، به‌گونه ای که بیشترین هدایت روزنه‌ای در شرایط عدم تنش خشکی (۹۱/۴۴ $mmol/m^2s$) و کمترین میزان هدایت روزنه‌ای در سطح تنش ۵۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه (۶۳/۰۵ $mmol/m^2s$) مشاهده شد. البته، تفاوت معنی‌داری بین تیمار عدم تنش خشکی و ۷۵٪ رطوبت ظرفیت مزرعه (۷۹/۴۶ $mmol/m^2s$) مشاهده نشد (جدول ۵). تنش خشکی سبب ایجاد محدودیت روزنه‌ای می‌شود که با افزایش شدت تنش، این محدودیت تشدید شده و در نهایت، منجر به بسته شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز می‌گردد (۴). در شرایط بروز تنش خشکی، افزایش تجمع اسید آبسیزیک در برگ‌ها باعث بسته شدن روزنه‌ها و جلوگیری از اتلاف آب می‌شود (۴۵). لاولور (۲۹، ۳۱) اظهار داشت که یکی از عوامل مهم در کاهش فتوسنتز، بسته شدن روزنه‌ها در شرایط کمبود آب می‌باشد، که نتیجه آن باعث کاهش هدایت روزنه‌ای و در نهایت کاهش میزان فتوسنتز و غلظت دی‌اکسید کربن در فضای بین سلولی برگ می‌شود و این امر به نوبه خود سبب جلوگیری از متابولیسم می‌گردد.

میزان پتاسیم

با توجه به مقایسه میانگین تیمارها (جدول ۵)، با افزایش شدت تنش خشکی، مقدار عنصر پتاسیم در برگ‌های گیاهان فلفل دلمه‌ای افزایش یافت، به‌طوری که بیشترین میزان پتاسیم (۵/۰۵ میلی‌گرم بر گرم) در شرایط تنش ۵۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه و کمترین میزان پتاسیم (۳/۹۲ میلی‌گرم بر گرم) در شرایط عدم تنش مشاهده شد. اما میزان پتاسیم بین سطوح تنش ۷۵ و ۵۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه تفاوت معنی‌داری نشان نداد. در

آزمایشی، مشاهده شد که با افزایش تنش آبی، غلظت پتاسیم در تمام بخش‌های ساقه سویا به‌شدت افزایش یافت و سبب کاهش پتانسیل آب درون آوندها نسبت به پتانسیل آب خاک گردید (۳۳، ۳۵). در شرایط بروز تنش آبی، غلظت یون‌های پتاسیم افزایش می‌یابد، که این تجمع زیاد پتاسیم یک سازگاری برای تحمل به خشکی است که به بقا و تولید در شرایط خشکی کمک می‌کند (۵). پتاسیم نقش حیاتی در فتوسنتز دارد، چون باعث افزایش مستقیم رشد، شاخص سطح برگ و جذب دی‌اکسید کربن می‌شود و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به خارج برگ را تسهیل می‌کند. این فعالیت نتیجه تشکیل ATP بیشتر بوده که برای تجمع مواد فتوسنتزی در آوندهای آبکش لازم است. جذب و جداسازی بر تقسیم‌بندی یون‌ها نه تنها در هنگام رشد طبیعی، بلکه برای رشد در شرایط شوری و خشکی، مهم می‌باشد. زیرا بروز این دو تنش سبب اختلال در تقسیم بندی یون‌ها می‌شود که جزء اصلی برای تقسیم بندی یون‌ها، ژن‌های مربوط به کانال‌های غیرهمسوی (Antiport) سدیم- پتاسیم می‌باشد (۱۵). پتاسیم در تنظیم اسمزی، تغییرات قندها و اسیدهای آمینه و کنترل روزنه‌ای نقش ایفا می‌کند (۱۰).

با توجه به جدول (۵)، بیشترین میزان جذب عنصر پتاسیم در شرایط تلقیح گیاهان با قارچ میکوریز *G. fasciculatum* بود (۵/۱۶ میلی‌گرم بر گرم) که تفاوت معنی‌داری را با تیمارهای عدم تلقیح با قارچ میکوریز (۳/۹۲) و گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* (۴/۴۹ میلی‌گرم بر گرم) داشتند. سوبرامانیان و همکاران (۴۸، ۴۹) گزارش دادند که در شرایط تنش خشکی، از غلظت پتاسیم در بخش هوایی گیاه ذرت کاسته شد، ولی گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز نسبت به گیاهان فاقد قارچ مقدار پتاسیم بیشتری در دانه داشتند. دیویس و همکاران (۱۵) گزارش دادند که تلقیح با میکوریز، میزان پتاسیم را در میوه‌های فلفل دلمه‌ای افزایش داد.

میزان فسفر زیست‌توده (RCP)

مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که افزایش شدت تنش خشکی موجب کاهش جذب عنصر فسفر در برگ‌های گیاه فلفل دلمه‌ای شد. به گونه‌ای که بیشترین جذب فسفر در شرایط عدم تنش خشکی (۰/۲۷ میلی‌گرم بر گرم) و کمترین میزان جذب عنصر فسفر در تیمار ۵۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه (۰/۱۶ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده شد (جدول ۵). منافی و همکاران (۴) گزارش دادند که در شرایط تنش، غلظت فسفر در بخش هوایی گیاهان گوجه‌فرنگی کاهش یافت. در شرایط بروز تنش خشکی، به علت کاهش حجم آب خاک و همچنین کاهش توزیع عناصر غذایی، جذب مواد غذایی از ریشه کم می‌شود و در پی آن انتقال مواد غذایی از ریشه‌ها به شاخه کاهش می‌یابد. نتایج مقایسه میانگین تأثیر تلقیح با قارچ میکوریز بر غلظت فسفر در (جدول ۵) بیانگر آن است که بیشترین میزان جذب عنصر فسفر (۰/۲۴ میلی‌گرم بر گرم) در گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* حاصل شد که با تیمارهای تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. fasciculatum* (۰/۲۱ میلی‌گرم بر گرم) و عدم تلقیح (۰/۲ میلی‌گرم بر گرم) تفاوت معنی‌داری داشت.

وزن خشک میوه

مقایسه میانگین اثرهای متقابل نشان داد که اثر تنش خشکی و تلقیح با قارچ میکوریز بر وزن خشک میوه تنها در تیمار ۱۰۰٪ آبیاری معنی‌دار شد جدول (۴)، به‌طوری‌که در شرایط عدم تنش، گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* بیشترین میزان وزن خشک میوه (۵/۲۷ گرم) را داشت که تفاوت معنی‌داری را با گیاهان فاقد قارچ میکوریز (۴/۲۵ گرم) و گیاهان تلقیح شده با میکوریز *G. fasciculatum* (۲/۹۷ گرم) نشان دادند (جدول ۶). منا ویولانت و همکاران (۳۲، ۳۴) گزارش دادند که گیاهچه‌های فلفل دلمه‌ای تلقیح شده با قارچ میکوریز وزن خشک بیشتری نسبت به گیاهچه‌های فاقد قارچ میکوریز در هر دو شرایط تنش خشکی و عدم تنش داشتند. تحقیقات گاه و همکاران (۲۱، ۲۲) نشان داد که نشاهای گوجه‌فرنگی تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. mossea* در خاکی که فسفر کمی داشته بهتر از نشاهای فاقد قارچ میکوریز رشد

جدول ۶. مقایسه میانگین اثرهای متقابل تنش خشکی و تلقیح با قارچ میکوریز بر شاخص‌های رشد فلفل دلمه‌ای

تنش خشکی (ظرفیت)	قارچ میکوریز	وزن خشک میوه (گرم)	پرولین (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	شاخص کلروفیل	درصد کلونیزاسیون
۱۰۰	شاهد	۴/۲۵^{b}	۱/۷^{e}	۲۴/۴۲^{b}	۱۱/۸۶ ^{d}
	G. intraradicese	۵/۲۷^{a}	۱/۸۲^{e}	۳۲/۲۷^{a}	۳۵/۳۷ ^{a}
	G. fasciculatum	۲/۹۷^{c}	۱/۹۶^{ed}	۱۷/۸۵^{bc}	۳۲/۳۴ ^{a}
۷۵	شاهد	۲/۴۱^{c}	۲/۳۴ ^{cd}	۱۷/۸^{bc}	۱۰/۴۵ ^{d}
	G. intraradicese	۲/۵۷^{c}	۲/۰۱^{ed}	۲۰/۹۷^{bc}	۳۳/۲۱ ^{a}
	G. fasciculatum	۲/۹^{c}	۲/۳۸^{cd}	۱۸/۸^{bc}	۲۶/۵۳ ^{b}
۵۰	شاهد	۱/۹۷^{c}	۳/۸۵^{a}	۱۱/۵^{c}	۷/۴۸ ^{e}
	G. intraradicese	۲/۵۳^{c}	۲/۶۷b^{c}	۱۶/۵^{bc}	۲۵/۳۵ ^{b}
	G. fasciculatum	۲/۱۹^{c}	۲/۹۷^{b}	۱۲/۵۲^{c}	۱۹/۴۸ ^{c}

در هر ستون، حروف مشترک نمایانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ می‌باشند.

کرده و گوجه‌فرنگی‌ها وزن خشک بیشتری داشتند. آندرس و همکاران (۷، ۱۸) دریافتند که گیاهچه‌های کلونیزه شده فلفل کمترین ABA برگی و بیشترین محتوای آب نسبی (RWC) را نسبت به گیاهچه‌های غیرکلونیزه در طول دوره اوج از دست-دهی آب در گیاه دارند. اغلب، میکوریز تحمل خشکی را از طریق اجتناب از خشکی بهبود داده است که این می‌تواند با بهبود استفاده از فسفر و نیتروژن و دیگر مواد غذایی تحریک-کننده رشد به‌وسیله گیاهان میکوریزدار باشد. قارچ‌های میکوریز قادر هستند که اثرهای نامطلوب تنش خشکی را در گیاهان تعدیل نمایند. همزیستی قارچ میکوریز با اغلب گیاهان تحت شرایط تنش خشکی باعث بهبود تولید از طریق جذب بیشتر عناصر غذایی غیرمتحرک مانند فسفر، روی و مس می‌شود. بعلاوه، تحمل گیاهان به خشکی را از طریق بهبود جذب آب و پتانسیل آماس برگ، کنترل منافذ روزنه‌ای و تعرق، افزایش طول و عمق ریشه و توسعه هیف‌های انتهایی افزایش می‌دهد (۸ و ۱۹).

میزان پرولین

میزان آبیاری و نوع تلقیح اثرهای متفاوتی را بر میزان پرولین گیاه داشتند، به‌طوری که بیشترین میزان پرولین (۳/۸۵ میلی‌گرم بر گرم) در گیاهان فاقد قارچ میکوریز و آبیاری ۵۰٪ (۳/۸۵ میلی‌گرم بر گرم) و کمترین میزان پرولین مربوط به تیمار فاقد قارچ میکوریز و آبیاری ۱۰۰٪ (۶/۷۵ میلی‌گرم بر گرم) دیده شد (جدول ۶). کاهش میزان آبیاری از ۱۰۰ به ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب باعث افزایش ۷۶ و ۲۸ درصدی در میزان پرولین برگ فلفل دلمه‌ای شد (جدول ۶). تجمع محافظین اسمزی از قبیل اسید آمینه پرولین یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های دفاعی گیاهان در مقابله با تنش‌های غیرزنده است (۱۴ و ۴۵ ۴۶). افزایش تجمع پرولین تحت تنش‌های شوری و خشکی باعث کاهش تورژسانس اولیه گیاه می‌شود که این امر فعال شدن توالی پیچیده‌ای از فرایندهای تطابقی مرتبط با سطح تحمل گیاه به تنش را در پی دارد (۱۸، ۲۰). افزایش تجمع پرولین تحت شرایط تنش خشکی یک مکانیزم دفاعی است که به گیاه کمک می‌کند تا پتانسیل اسمزی یاخته‌های خود را برای جذب آب کاهش دهد، که در گیاهانی نظیر ریحان و پروانش (۲۷) و گشنیز (۲۰) نیز مشاهده شده است. بوسال و شیند (۱۰) گزارش کردند که در اثر تنش خشکی، میزان پرولین برگ‌های زنجبیل به‌طور معنی‌داری افزایش یافت.

کوزنتسوف و شویاکُوا (۳۰) با تأکید بر ضروری بودن پرولین در امر سازگاری گیاهان به تنش‌ها، اثرهای بیولوژیک زیادی مثل تنظیم اسمزی، عمل آنتی‌اکسیدانی، انتقال انرژی، ذخیره کربن و نیتروژن و چندین نقش دیگر را برای پرولین

برشمردند که برای پایداری سلول و انتقال از یک حالت به حالت سازگاری جدید لازم است. محتوای پرولین به عنوان شاخص متحمل به خشکی در بافت گیاهان تحت تنش خشکی استفاده می‌شود. زیرا تجمع پرولین به ازدیاد سطح اسمزی سلول‌های گیاهی که تحت کمبود آب قرار دارند کمک می‌کند. تجمع پرولین به گیاه کمک می‌کند تا در دوره کوتاهی بعد از اعمال تنش خشکی زنده مانده و بتواند بعد از رفع تنش، رشد خود را بازیابی کند. بنابراین، اثر مثبت بر عملکرد خواهد داشت. اما در طولانی‌مدت، تجمع آن حتی اثر منفی بر عملکرد خواهد گذاشت، زیرا منابع فتوسنتزی گیاه را به سمت فرایندهایی غیر از پر شدن دانه منحرف می‌گرداند (۴۸، ۵۰). برای تجمع پرولین در گیاه در هنگام تنش خشکی دلایل مختلفی ارائه شده است. برخی آن را به علت اثر تنظیمی ABA بر فرایندهای نوری در متابولیسم پرولین (۴۴، ۴۶) و برخی آن را به وجود ترکیبات پر انرژی حاصل از فتوسنتز می‌دانند که سبب تحریک سنتز پرولین می‌شود. تنش خشکی از دو طریق، افزایش بیان آنزیم‌های سنتزکننده پرولین و کاهش فعالیت آنزیم‌های تخریب کننده پرولین، باعث افزایش میزان پرولین در گیاه می‌شود (۵۲، ۵۳).

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که مقدار پرولین در گیاهان بدون قارچ میکوریز بیشتر از گیاهان دارای قارچ میکوریز بود که این نتیجه، به تأثیر مثبت همزیستی با این قارچ در افزایش جذب آب توسط گیاه در شرایط تنش خشکی نسبت داده شد. نتایج بیان می‌کنند که کلونیزه شدن قارچ میکوریز تحمل به خشکی را در گیاهان میزبان افزایش می‌دهد، که این افزایش تحمل به خشکی به پرولین وابستگی ندارد؛ ولی با سطوح پتاسیم، کلسیم و منیزیم مرتبط است. پورسل و همکاران (۴۴) تجمع سطوح زیاد پرولین در ریشه‌ها و پرولین کمتر را در شاخساره‌های گیاه سویای آمیخته شده با قارچ میکوریز، در مقایسه با گیاهان بدون قارچ، تحت شرایط تنش خشکی گزارش کردند. پینیور و همکاران (۴۳) در تحقیقات خود روی گیاه رز، تجمع بیشتر پرولین در ریشه‌ها و تجمع کمتر آن در شاخساره‌های گیاهان رز آمیخته شده با قارچ میکوریز در مقایسه با گیاهان رز بدون قارچ تحت شرایط تنش خشکی اثبات کردند. وو و زیا (۵۲) گزارش کردند که برگ‌های گیاهان نارنج سه برگ حاوی قارچ میکوریز تحت شرایط آبیاری کامل و تنش خشکی، پرولین کمتری نسبت به برگ‌های گیاهان بدون قارچ داشتند که این ممکن است به دلیل مقاومت بیشتر نهال‌های حاوی قارچ به خشکی یا آسیب کمتر آنها تحت شرایط خشکی باشد.

میزان کلروفیل

مقایسه میانگین اثرهای متقابل نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، میزان کلروفیل در تمام تیمارها کاهش یافت، به‌طوری که شرایط عدم تنش گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز *G. intraradicese* بیشترین میزان کلروفیل بیشترین میزان کلروفیل(۳۲/۲۸ واحد CCM ۲۰۰)را داشت که تفاوت معنی‌داری با شاهد (۲۴/۴۲ واحد CCM ۲۰۰) و گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز (۸۵/۱۷ *G .fasciculatum* واحد CCM۲۰۰) نشان دادند شان دادند (جدول ۶). اعمال تنش آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد به ترتیب باعث کاهش ۲۶ و ۵۹ درصدی در میزان کلروفیل گیاه شد؛ چون تنش خشکی با تحریک فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و پراکسیداز در گیاه باعث تخریب کلروپلاست و در نتیجه کاهش میزان کلروفیل در گیاه می‌شود (۳۸). همچنین، در شرایط بدون تنش خشکی، همزیستی با قارچ *G. fasciculatum* باعث افزایش در میزان کلروفیل گیاه شد (جدول ۶). تانگ و همکاران (۵۰) نیز در پژوهشی روی تأثیر مایه‌زنی ذرت با قارچ میکوریز گزارش کردند که تلقیح موجب افزایش سنتز کلروفیل و فتوسنتز شده است. آنها علت این امر را به افزایش جذب نیتروژن توسط گیاهان تلقیح داده شده با میکوریز نسبت دادند. گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریز اغلب دارای مقدار کلروفیل بیشتر از گیاهان فاقد میکوریز بوده و میزان کلروفیل نیز با میزان فتوسنتز متناسب است (۱ و ۱۵). کیائو و همکاران (۴۵) در تحقیق روی

گیاه نخودفرنگی و همچنین وو و زیا (۵۲) در تحقیق روی گیاهچه‌های مرکبات به نتایج مشابهی دست یافتند.

درصد کلونیزاسیون

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرهای متقابل تأثیر تیمارها (جدول ۶) نشان داد که با افزایش شدت تنش خشکی، درصد کلونیزاسیون ریشه گیاهان کاهش یافت و بیشترین مقدار برای این صفت (۳۳/۲۱ درصد) در گیاهان تلقیح شده با قارچ *G. intraradices* در ۱۰۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه حاصل شد و کمترین درصد کلونیزاسیون نیز در گیاهان تلقیح نشده با قارچ در شرایط تنش ۵۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه به‌دست آمد. کاهش درصد کلونیزاسیون با افزایش سطح تنش احتمالاً به‌علت کاهش در تندش اسپور و رشد هیف باشد. مرحله مهم‌تر پس از تندش اسپور، رشد هیف حاصل از تندش است که نقش اساسی در کلونیزاسیون ریشه ایفا می‌کند. ظاهراً رشد هیف بیشتر از تندش اسپور تحت تأثیر پتانسیل اسمزی قرار می‌گیرد (۳۶، ۳۸). در این تحقیق، گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ *G. intraradices* نسبت به گیاهان مایه‌زنی شده با قارچ *G. fasciculatum* درصد کلونیزاسیون بیشتری داشتند. افزایش درصد کلونیزاسیون در یک گونه قارچی نسبت به گونه دیگر، به گونه گیاهی و نوع قارچ بستگی دارد و حتی ایزوله‌های یک گونه که از مناطق مختلف جمع‌آوری شده باشند از نظر درصد کلونیزاسیون اختلاف دارند (۳۸، ۴۹). ولی برخلاف نتایج این تحقیق، خلوتی و همکاران (۲۸) در تحقیقات خود روی گیاه جو به این نتیجه دست یافتند که درصد کلونیزاسیون ریشه در شرایط تنش بسیار بیشتر از تیمار شاهد بوده و قارچ میکوریز *Glomus mosseae* سبب افزایش جذب آب در شرایط کم‌آبی گردید.

نتیجه‌گیری

نتایج این آزمایش نشان داد که قارچ میکوریز ارتفاع گیاهچه‌های حاصل از کشت بافت و کلروفیل فلفل دلمه‌ای را افزایش داد. همچنین، قارچ میکوریز میزان ریزش برگ گیاهچه‌های حاصل از کشت بافت فلفل دلمه‌ای را در مرحله ایجاد سازگاری کاهش داد. تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار در شاخص‌های رشد و فیزیولوژیک در فلفل دلمه‌ای شد، در حالی که میزان پرولین و پتاسیم را افزایش داد. تلقیح با قارچ میکوریز *G. intraradicese* تعداد برگ، کلروفیل، وزن تر و خشک میوه، تعداد میوه و میزان پتاسیم و فسفر فلفل دلمه‌ای را در شرایط تنش خشکی افزایش و میزان پرولین را کاهش داد. به‌طور کلی، براساس نتایج حاصل از این پژوهش، همزیستی با قارچ میکوریز در شرایط آبیاری ۷۵٪ نیاز آبی گیاه، برای دستیابی به عملکرد قابل قبول و نیز صرفه‌جویی در آب مصرفی و عناصر غذایی، به‌ویژه فسفر، به واسطه بهبود توسعه سیستم ریشه‌ای گیاه، می‌تواند منجر به تعدیل اثرهای تنش شده و گیاه را در برابر عوامل نامساعد محیطی محفوظ نگه دارد.

منابع مورد استفاده

۱. صلانی، ز.، ع. حسنی.، م. صدقیانی.، ف. سفیدکن و م. برین. ۱۳۹۰. تاثیر دو گونه قارچ آربوسکولار مایکوریزا (*Glomus mosseae* و *Glomus intraradices*) بر رشد، مقادیر کلروفیل و جذب فسفر در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت شرایط تنش خشکی. فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، جلد ۲۷، شماره ۳. صفحه ۴۷۱-۴۸۶

۲. پیوست، غ. ۱۳۸۸. سبزیکاری (ویرایش چهارم). انتشارات دانشگاه گیلان. ۴۸۰ ص.

۳. خاکشور مقدم، ز.، م. لاهوتی و ز. گنجعلی. ۱۳۹۰. بررسی اثرات تنش خشکی ناشی از پلی اتیلن گلایکول بر جوانه زنی و خصوصیات مورفوفیزیولوژیک گیاه شوید (*Anethum graveolens* L.). نشریه علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵،

جلد ۲۵، شماره ۲. ۱۸۵-۱۹۳

۴. منافی، ح.، ن. علی اصغرزاده، م. ر. نیشابوری و ف. رجالی. ۱۳۹۱. تحمل تنش کمبود آب در گوجه فرنگی در همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار. نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۲ (۲): ۱-۱۷.

5. Abdul-Jaleel, C., P.Manivannan., A.Wahid., M. Farooq., R. Somasundaram and R. Panneerselvam. 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. Inter. J. Agri. Biol. 11: 100-105.
6. Aliasgharzad, N., M. R. Neyshabouri and G. Salimi. 2006. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium japonicum on drought stress of soybean. Biol. Bratis. 19: 324-328.
7. Andres, A., Estrada-luna, T.and Davies, Jr. 2003. Arbuscular mycorrhiza fungi influence water relations , gas exchenge, abscisic acid and growth of micropropagated chili ancho pepper (Capsicum annuum) plantlets during acclimatization and post- acclimatization. J. Plant Physio., 160: 1073-1083.
8. Augé, R.M. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. Mycorr. 11(1): 3-42.
9. Bates, L.S., R. P.Waldern, and I. D. Teave. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant. Soil. 39: 205-107.
10. Bhosal, K. S. and B. P. Shinde. 2011. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on proline and chlorophyll content in Zingiber Officinale rosc grown under water stress. Ind. J. Fund. Appl. Life Sci. 3: 172-176.
11. Bohnert H.J., D.E. Nelson and R.G. Jensen. 1999. Adaptation to environmental stress. J. Plant Cell. 7: 1099-1111.
12. Cavazza, L., Patruno, A., and Cirillo, E. 2007. Field capacity in soils with a yearly oscillating water table. Biosy. Eng., 98: 364-370.
13. Charles, D.R., Burt, M. 1995. The surface irrigation manual waterman industries, INC.
14. Cottenie, A. 1980. Methods of Plant Analysis. In: Soil and Plant Testing. FAO Soils Bull. 38: 64-100.
15. Davies, F.T., V. Olalde-Portugal, L.Aguilera-Gomez, M. J. Alvarado, R. C. Ferrera-Cerrato, and Boutton, T.W. 2002. Alleviation of drought stress of chili ancho pepper (*Capsicum* annuum L.CV.San Luis) with arbuscular mycorrhizal indigenous to Mexico. Sci. Hort. 92(3): 347-359.
16. Eftekhari, M, M.Alizadeh, K. Mashayekhi, H. Asghari and B. Kamkar. 2010. Integration of arbuscular mycorrhizal fungi to grape Vine (*Vitis vinifera* L.) in nursery stage. J. Adv. Lab. Res. Biol. 1(1): 102-111.
17. Esmaielpour, B., P. Jalilvand and J. Hadian. 2013. Effects of drought stress and arbuscular mycorrhizal fungi on some morphophysiological traits and yield of savory. J. Agroeco. 5 (2): 169-177.
18. Estrada-Luna, A. and F. Davies. 2003. Arbuscular mycorrhizal fungi influence water relations, gas exchange, abscisic acid and growth of micropropagated chile ancho pepper (*Capsicum annuum*) plantlets during acclimatization and post-acclimatization. J. Plant. Physiol. 160(9): 1073-1083.
19. Estrada-Luna, A.A., JR. Davies and F.T., Egilla. 2000. Mycorrhizal fungi enhancement of growth and gas exchange of micropropagated guava plantlets (*Psidium guajava* L.) during ex vitro acclimatization and plant establishment. Mycor. 10: 1-8.
20. Farahani, A., H. Lebaschi., M. Hussein., S.A.Hussein., V. A. Reza and D. Jahanfar. 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, different levels of phosphorus and drought stress on water use efficiency, relative water content and proline accumulation rate of Coriander (*Coriandrum sativum* L.). J. Med. Plant. Res. 2(6): 125-131.
21. Fortunato, I.M., C. Ruta, A.Castrignano, and F. Saccardo. 2005. The effect of mycorrhizal symbiosis on the development of micropropagated artichokes. Sci. Hort. 106: 472-483.
22. Goh، T.B., Banerjee، M.R., Tu, S., and Burton، D.L. 1997. Vesicular arbuscular mycorrhiza mediated uptake and translocation of P and Zn by wheat in a calcareous Soil. Can. J. Soil, 77: 339-346.
23. Gupta, C. G., N. Lakshmi and T.Srivalli. 1998. Micropropagation studies on a male sterile line of Capsicum annuum L. at Nagarjuna university. Capsi. News. let, 17: 5-42.
24. Jacob, H., and Clarke, G. 2002. Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Method. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
25. Kapoor, R., D. Sharma and A.K. Bhatnagar. 2008. Arbuscular mycorrhizal in micropropagation systems and their potential applications. Sci. Hort. 116: 227-239.
26. Karunya, S., and Kailash, P. 1994. Effect of water stress on water relations, photosynthesis, and elemnt content of tomato. Plant Physio. Biochem, (New Delhi). 21(1): 33-37.
27. Khalid, K. A. 2006. Influence of water stress on growth, essential oil and chemical composition of herbs (*Ocimum sp*.). Int. Agrophys. 20: 289- 296.
28. Khalvati, M. A., Y. Hu., A.Mozafar and U.Schmidhalter. 2005. Quantification of water uptake by arbuscular-mycorrhizal hypha and its signification for leaf growth, water relations and gas exchange of barley subjected to drought stress. Plant Biol. 7(06): 706-712.

29. Knudsen, D., G.A. Peterson and P. F Pratt. 1982. Lithium, sodium, potassium. In Methods of soil analysis, part 2, ed. A. L. Page. Madison, Wisc: ASA-SSSA.
30. Kuznetsov, VI.V. and N.I. Shevyakova. 1999. Proline under stress: Biological role, metabolism and regulation. Rus. J. Plant. Physiol. 46: 274-287.
31. Lawlor, D.W. 2002. Limitation to photosynthesis in Water-stressed leaves: Stomata vs. metabolism and the role of ATP. Ann. Bot. 89(7): 871-885.
32. Mathur, N. and A.Vyas, 1997. Enzymatic changes in cluster bean by different VAM species. Agri. Sci. 17(1): 16-18.
33. Meghani, N., A. Jemmali and N. Elloumi. 2007. Morpho-histologial study on shoot bud regeneration in cotyledon cultures of pepper (*Capsicum annuum*). Biol. 6: 10-704.
34. Mena-Violante, H.G., O. Ocampo-Jiménez, L.Dendooven, G.Martínez-Soto, J.González-Castañeda, Jr. Davies, and V.Olalde-Portugal. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance fruit growth and quality of chile ancho (*Capsicum annum* L cv San Luis) plants exposed to drought. Mycor. 16(4): 261-267.
35. Misra, A. and N.K. Srivastava, 2000. Influence of water stress on Japanese mint. J. Herbs Spi. Med. Plants. 7(1): 51-58.
36. Mitchell, J.P., C.Shennan., S.R.Grattan and D.M. May. 1991. Tomato yield and quality under water deficit and salinity. J. Soc. Hort. Sci.116(2): 215-221.
37. Naidu, T.C.M., N. Raju and A.Narayanan. 2001. Screening of drought tolerance in greengram (*Vigna radiate* L.Wilczeek) genotypes under reducing soil moisture. India. J.plant physiol. 6(2): 197-201.
38. Norris, JR., DJ.Read, and A.K. Varma,. 1992. Methods in Microbiology: Techniques for the Study of Mycorrhiza. Academic Press, Ltd. London. 24:244.
39. Otroshy, M., K. Moradi, and M.Khayam. 2010. Micropropagation of *Capsicum annuum* L. in vitro. Iran. J. Biol. 2(1): 1-12.
40. Padilla, I.M.G. and C.L. Encina. 2005. Changes in root morphology accompanying mycorrhiza alleviation of phosphorus deficiency in micropropagated Annona Cherimola Mill. Plant Sci, 106: 360-369.
41. Padilla, I.M.G., E. CarmoaWestendorp, N. and, C.L. Encina. 2006. Micropropagation and effects of mycorrhiza and soil bacteria on acclimatization and development of (*pouteria lucumo* pav.) In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant, 42:193-196.
42. Phillips, J.M. and D.S. Hayman, 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular_arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Brit. Myco. Soc. 55(1): 158–161.
43. Pinior, A., G. Grunewaldt-Stöcker, H.Von Alten and R.Strasser. 2005. Mycorrhizal impact on drought stress tolerance of rose plants probed by chlorophyll fluorescence, proline content and visual scoring. Mycor. 15: 596-605.
44. Porcel, R., J.M. Barea, and J.M. Ruiz-Lozano.2004. Arbuscular mycorrhizal influence on leaf water potential, solute accumulation, and oxidative stress in soybean plants subjected to drought stress. J. Exp. Bot. 55: 1743-1750.
45. Qiao, G., X.P. Wen., L.F.Yu and X.B J. 2011. The enhancement of drought tolerance for pigeon pea inoculated by arbuscular mycorrhizal fungi. Plant. Soil. Environ. 57(12): 541-546.
46. Rontein, D., G. Basset and A.D. Hanson, 2002. Metabolic engineering of Osmoprotectant accumulation in plants. Metabol. Eng. 4: 49-56.
47. Ruiz-Lozano, J.M., and R. Azcón. 1997. Effect of calcium application on the tolerance of mycorrhizal lettuce plants to polyethylene glycol-induced water stress. Symb. 45: 135-139.
48. Sanchez, F.J., M. Manzaharer., E.F.Andrer., J.L. Ternorio., L.Ayerbe, and E.F. Andres. 1998. The turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water Stress. Field crop Res. 59: 225-235.
49. Subramanian, K. S., C. Charest, L. M. Dwyer, and R. I. Hamilton, 1997. Effects of mycorrhiza on leaf water potential, sugar and P contents during and after recovery of maize. Can. J. Bot. 75(9): 1582-1591.
50. Tang, M., H. Chen., J. C. Huangand and Z. Q. Tian. 2009. Arbuscular mycorrhiza fungi effects on the growth and physiology of (*Zea mays* L.) seedlings under diesel stress. Soil. Biol. Biochem. 41(5): 936-940.
51. Troeh, Z. I., and T. E. Loynachan. 2003. Endomycorrhizal fungal survival in continuous corn, soybean, and fallow. Agro. J. 95(1), 224-230.
52. Wu, Q.S. and R.X. Xia. 2006. Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. J. Plant. Physiol. 163: 417-425.
53. Zhang, J, H.T. Nguyen and A. Blum. 1999. Genetic analysis of osmotic adjustment in crop plants. J. Exp. Bot. 50: 291-302.