



بررسی تأثیر دو گونه قارچ میکوریزا-آربوسکولار در سطوح مختلف تنش رطوبتی بر برخی ویژگی‌های رشدی ذرت

عزیز مجیدی^{۱*}، پرنگ امیری^۲

۱. استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران

۲. کارشناس ارشد زراعت، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، مهاباد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۷/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۱۳

چکیده

در شرایط تنش، همزیستی گونه‌های قارچ میکوریزا-آربوسکولار با ریشه گیاه میزبان، تأثیر مستقیمی بر تحمل خشکی در گیاهان دارد. به منظور بررسی تأثیر دو گونه قارچ میکوریزا-آربوسکولار در سطوح مختلف تنش رطوبتی بر برخی ویژگی‌های رشدی ذرت، این آزمایش به صورت فاکتوریل با دو عامل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با پنج تکرار در شرایط گلخانه اجرا گردید. عامل اول مربوط به سطوح تنش رطوبتی شامل ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی و عامل دوم مربوط به دو گونه قارچ میکوریزا شامل *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* و شاهد (عدم تلقیح) بودند. نتایج نشان داد که تنش رطوبتی موجب کاهش ارتفاع بوته و وزن خشک اندام هوایی به ترتیب به میزان ۱۳٪ و ۱۷٪ شد. تنش رطوبتی بر وزن خشک ریشه بی‌تأثیر بود ولی قارچ‌های میکوریزا وزن خشک ریشه را افزایش داده و تأثیر *G. mosseae* نسبت به گونه *G. intraradices* بیشتر بود. علیرغم افزایش شدت تنش رطوبتی، قارچ‌های میکوریزا شاخص کلروفیل SPAD را افزایش داد. بیشترین شاخص کلروفیل مربوط به تیمار تلقیح با قارچ *G. mosseae* در ۰/۶ ظرفیت زراعی معادل ۲۷/۰۲ بود. گیاه تلقیح شده با قارچ *G. mosseae* نسبت به *G. intraradices* کارایی بیشتری در حفظ رطوبت نسبی آب برگ در شرایط تنش رطوبتی داشت. بیشترین درصد کلونیزاسیون ریشه معادل ۳۹/۰۴ در تیمار تلقیح با قارچ *mosseae* *G.* در ۶۰٪ رطوبت زراعی به دست آمد. به‌طور کلی، نتایج پیشنهاد می‌کنند که در شرایط تنش رطوبتی، گونه *G. mosseae* قادر به برقراری ارتباط همزیستی مؤثرتری با ریشه گیاه ذرت تحت شرایط انجام این آزمایش بود.

واژه‌های کلیدی: تنش رطوبتی، شاخص کلروفیل، کلونیزاسیون ریشه، همزیستی میکوریزائی

مقدمه

موردنیاز برای رشد طبیعی و تکمیل چرخه زندگی گیاهان تلقی می‌گردد. در گیاهان صدمات بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی ناشی از تنش رطوبتی اتفاق می‌افتد که درجه خسارات آن‌ها به عواملی مانند مدت‌زمان بروز تنش، مقاومت ژنتیکی و مرحله رشد فنولوژیکی بستگی دارد (Gong et al., 2013).

ذرت در مرحله گلدهی، به تنش رطوبتی بسیار حساس است (Daryanto et al., 2016). این محصول، در مراحل

محصولات زراعی در معرض تنش‌های محیطی متعددی قرار دارند که همگی بر رشد آن‌ها مؤثر بوده و در نتیجه، میزان تولید محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Farooq et al., 2011). تنش خشکی مخرب‌ترین این تنش‌هاست که بیش از سایر تنش‌ها، قابلیت تولیدی محصولات زراعی را کاهش می‌دهد (Lambers et al., 2008). کاهش مداوم نزولات جوی توأم با افزایش تبخیر و تعرق، منجر به بروز خشکی می‌شود (Mishra and Cherkauer, 2010) که به فقدان رطوبت

فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی آن باید به گونه‌ای باشد که گیاه میزبان بتواند به طور موفقیت‌آمیزی از عهده شرایط محیطی محدودکننده برآید (Auge et al., 1995)؛ بنابراین، توانایی‌های ویژه اندوفیت‌های AMF برای سازگاری بهتر گیاه میزبان به مقدار کم آب خاک، می‌تواند ضابطه مناسبی برای انتخاب گونه‌های کارای قارچ‌ها برای تولید مایه تلقیح باشد (Liebersbach et al., 2004). بدین منظور، در این تحقیق میزان کارایی دو گونه جنس *Glomus* شامل *G. intraradices* و *G. mosseae* بر بهبود برخی صفات رشدی ذرت تحت شرایط تنش رطوبتی مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در گلخانه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی انجام گرفت. بدین منظور، نمونه خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری یک خاک زراعی که غلظت فسفر آن کمتر از پنج میلی‌گرم بر کیلوگرم بود، تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن بر طبق استانداردهای موسسه تحقیقات خاک و آب اندازه‌گیری شدند (Aliehaie, 1997). بافت خاک به روش هیدرومتر، pH به وسیله الکتروود شیشه‌ای در گل اشباع، هدایت الکتریکی با دستگاه الکتروکانداکتومتر در عصاره‌ی گل اشباع، کربن آلی به روش دی کرومات پتاسیم، نیتروژن به روش کج‌دال، فسفر قابل جذب به روش اولسن و پتاسیم قابل جذب با روش استات آمونیوم یک نرمال و عناصر کم‌مصرف به روش DTPA اندازه‌گیری شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده برای انجام آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. خاک مذکور غیر شور با pH قلیائی و بافت متوسط بوده، از نظر کربنات کلسیم معادل، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب خاک در شرایط کمبود و از نظر عناصر کم‌مصرف روی، آهن و منگنز در حد بهینه بودند (Malakouti et al., 2005).

آزمایش به صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی در پنج تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی عبارت بودند از: عامل تنش رطوبتی در سه سطح آبیاری در ظرفیت زراعی (شاهد)، آبیاری در ۰/۸ ظرفیت زراعی و آبیاری در ۰/۶ ظرفیت زراعی و عامل مایه تلقیح در سه سطح: عدم تلقیح، تلقیح با گونه قارچ *G. intraradices* و تلقیح با گونه قارچ *G. mosseae* بودند.

رشد رویشی و زایشی به آب بیشتری نیاز دارد ولی اگر در مرحله استقرار با کمبود رطوبت مواجه باشد، تولید محصول به دلیل گلدهی زودرس، کاهش چشمگیری می‌یابد (Cao and Wj, 2004; Min et al., 2016). مطالعات قبلی مقاومت نسبت به تنش خشکی در ذرت نشان داده است که در ارقام مقاوم، فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی ارتقاء یافته، پراکسیدانهای چربی کاهش و تجمع اسمولیت‌ها و تنظیم فشار تورمی سلول بهبود و کارایی فرآیندهای فتوسنتزی حفظ می‌گردند (Anjum et al., 2016; Min et al., 2016). در این زمینه، بررسی‌ها نشان داده است که همزیستی قارچ‌های آربوسکولار-میکوریزا (AMF) برای تحمل و غلبه بر اثرات سوء تنش‌های رطوبتی در گونه‌های مختلف گیاهان (Gholamhoseini et al., 2013) و از جمله گیاه ذرت (Bárzana et al., 2015) بسیار مؤثر است.

همزیستی AMF اثرات تنش خشکی را از طریق جذب مستقیم آب و انتقال آن توسط هیف‌های قارچ به میزبان (Avis et al., 2008)، افزایش هدایت هیدرولیکی (Bárzana et al., 2015)، تنظیم ارتقاء یافته اسمزی (Aroca et al., 2007) و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی (Bompadre et al., 2014) کاهش می‌دهد. گیاهان تلقیح شده با AMF سطوح بالاتری از رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، پارامترهای فلورسانس کلروفیل و تولید فتوسنتزی خالص را نسبت به گیاهان شاهد دارا می‌باشند (Yooyongwech et al., 2016)؛ بنابراین، روابط آبی گیاه همزیست با قارچ و تغییرات این روابط به تعداد کثیری از مکانیسم‌ها مربوط است که فقط به بهبود شرایط تغذیه‌ای گیاه مربوط نمی‌شوند (Leung et al., 2013). در حقیقت، مطالعات بیشتری برای شناخت مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم که روابط آبی همزیستی قارچ AM-گیاه را کنترل می‌کنند، مورد نیاز است (Xu et al., 2016) و در این ارتباط، شناخت توانایی رابطه همزیستی گیاهان با گونه‌های کارای قارچ برای افزایش درجه تحمل خشکی بسیار مورد توجه است (Smith and Read, 2008). علاوه بر تفاوت‌های فیزیولوژیکی گونه‌ها و تفاوت‌های مربوط به جدایه‌های جغرافیایی آن‌ها، تنوع زیستی قارچ‌های AM بسیار گسترده است.

اطلاعات اندکی در مورد عملکرد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی این میکروارگانیسم‌ها در دست است (Eskandari, et al., 2017). یکی از مهم‌ترین نکات رابطه همزیستی قارچ میکوریزا با گیاه میزبان این است که

سینگل کراس ۷۰۴ بود. پس از کاشت بذرها و سبز شدن آنها، بوته‌ها تنک شده و نهایتاً در داخل هر گلدان دو بوته نگه‌داشته شدند. قبل از کشت بذور ذرت به مدت ۱۵ دقیقه در هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد ضدعفونی سطحی شدند و سپس سه بار با آب مقطر شستشو گردیدند. بر اساس نتایج آزمون خاک، توصیه کودی مطابق استانداردهای مؤسسه تحقیقات خاک و آب برای عناصر نیتروژن و پتاسیم به انجام رسیده و به ترتیب از منابع اوره و کلرید پتاسیم تأمین شدند (Malakouti et al., 2005). پتاسیم قبل از کشت با خاک گلدان‌ها مخلوط و نیتروژن در طول دوره رشد گیاه با غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر به‌صورت محلول غذایی به گلدان‌ها اضافه شد.

خاک گلدان‌ها پس از هوا خشک‌کردن از الک پنج میلی‌متری عبور داده شدند. نمونه خاک فراهم‌شده در دستگاه اتوکلاو استریل گردیدند تا آلودگی‌های احتمالی قارچ یا باکتری از بین بروند. در داخل هر گلدان ۱۰ کیلوگرم از خاک استریل شده ریخته شد. مایه تلقیح قارچ‌های میکوریزا از بخش تحقیقات بیولوژی خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه گردید. از مایه تلقیح مذکور به میزان ۲۵ گرم در هر گلدان مطابق تیمارها استفاده شد. داخل هر گلدان تعداد پنج حفره به عمق سه و نیم سانتی‌متر ایجاد و مایه تلقیح قارچ مطابق تیمارها در کف حفره‌ها ریخته شده و سپس نسبت به کاشت بذر در همان حفرات اقدام گردید تا مایه تلقیح در تماس مستقیم با بذور قرار گیرند. رقم ذرت کشت‌شده رقم

جدول ۱. میانگین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1. Average physical and chemical properties of the soil used in the experiment

هدایت الکتریکی EC (dS/m)	مواد خنثی شونده TNV	کربن آلی OC (%)	شن sand	رس clay	اسیدیته pH	فسفر P	پتاسیم K	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn	بافت Tex
0.5	1.7	0.9	34	26	7.2	4.5	79	13.7	7.9	1.8	Silt

وزن خاک خشک گلدان، PW وزن گلدان و PLW وزن بوته-های هر گلدان هستند.

پس از شروع اعمال تنش‌های رطوبتی، هر پنج روز یک‌بار در تعدادی از گلدان‌های اضافی گیاهان از خاک خارج و وزن بوته‌ها (اندام هوایی و ریشه) محاسبه و در معادلات بالا وارد شد. مقدار آب موردنیاز گلدان‌ها به‌صورت یک روز در میان به روش وزنی محاسبه و به گلدان‌های مربوطه مطابق تیمارها اضافه شدند (Widiastuti et al., 2008)

در مرحله شروع گلدهی، صفاتی مانند ارتفاع بوته، مساحت سطح برگ، شاخص کلروفیل (با استفاده از کلروفیل سنج Spad-502 Minolta)، مقدار رطوبت نسبی برگ اندازه‌گیری شدند. برای برآورد مساحت سطح برگ از روش (Ponsens et al., 2010) استفاده شد. برای این منظور، برگ مشخصی از بوته (برگ هفتم) انتخاب‌شده و بزرگ‌ترین طول و عرض آن اندازه‌گیری گردید. مساحت سطح برگ مطابق فرمول زیر محاسبه گردید:

$$L \times W \times 0.785 \quad [4]$$

در این فرمول، L بیشترین طول برگ و W بیشترین عرض برگ هر دو برحسب سانتی‌متر است.

برای تعیین مقدار رطوبت نسبی، از برگ بالغ انتهایی استفاده شد. بعد از جدا نمودن برگ‌ها از گیاه بلافاصله

پس از گذشت حدود ۳۰ روز از کاشت، تنش رطوبتی بر روی بوته‌های موجود در گلدان‌ها اعمال شد. جهت ایجاد شرایط تنش ابتدا رطوبت ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با استفاده از دستگاه‌های صفحه فشاری و غشاء فشاری در فشارهای یک‌سوم و ۱۵ اتمسفر اندازه‌گیری شدند. سپس نمونه خاک در دمای 105°C به مدت ۲۴ ساعت خشک‌شده و وزن خاک خشک اندازه‌گیری شد (Alihaie, 1997). مقادیر آب تیمارها به روش وزنی مطابق فرمول‌های ذیل محاسبه گردید:

$$A100\% = (\Theta_{FC100\%} \times Dw) + DW + PW + PLW \quad [1]$$

$$A80\% = F80\% \times (\Theta_{FC100\%} \times Dw) + DW + PW + PLW \quad [2]$$

$$A60\% = F60\% \times (\Theta_{FC100\%} \times Dw) + DW + PW + PLW \quad [3]$$

در این فرمول‌ها A100%، A80% و A60% به ترتیب وزن کل گلدان همراه با بوته در ضرایب رطوبتی ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه، F60% و F80% به ترتیب مقادیر کسر رطوبتی موردنیاز نسبت به درصد رطوبتی ظرفیت مزرعه، $\Theta_{FC100\%}$ درصد رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه، Dw

درصد کلونیزاسیون، ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده به قطعات یک سانتی‌متری برش داده شدند و درصد کلونیزاسیون ریشه با استفاده از میکروسکوپ برآورد شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها، بر اساس آزمایش‌های فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SAS به انجام رسید. مقایسه میانگین تیمارها به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ صورت گرفت.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطوح تنش رطوبتی بر ارتفاع گیاه معنی‌دار بود (جدول ۲). بیشترین ارتفاع گیاه به میزان ۷۴/۲۷ سانتیمتر در ۱۰۰٪ رطوبت ظرفیت زراعی به دست آمد. کاهش رطوبت به میزان ۸۰٪، اثر محسوسی بر کاهش ارتفاع گیاه داشت ولی کاهش بیشتر آن در ۶۰٪ رطوبت ظرفیت زراعی تأثیری بر ارتفاع گیاه نداشت (جدول ۳). کاهش ارتفاع گیاه در نتیجه افزایش تنش رطوبتی احتمالاً به علت اختلال در فتوسنتز و کاهش تولید و انتقال ترکیبات فتوسنتزی به بافت‌های مریستمی در حال رشد گیاه است. یکی از اولین علائم کمبود آب، کاهش فشار تورژسانس و در نتیجه کاهش تقسیم سلولی در اندام‌های جوان در حال رشد است. با کاهش تقسیم سلولی، رشد و توسعه اندام‌ها نیز محدود شده و به همین دلیل، اولین اثر محسوس تنش رطوبتی بر روی رشد گیاهان به صورت کوچک‌تر شدن برگ‌ها یا کاهش ارتفاع گیاهان ظهور می‌کند (Li et al., 2011).

اثرات مستقل گونه‌های قارچ میکوریزا نیز از نظر ارتفاع بوته معنی‌دار گردیده (جدول ۲) و بیشترین ارتفاع گیاه در تیمار تلقیح با گونه *G. intraradices* حاصل شد (جدول ۳). نتایج فوق با نتایج سایر محققین در این ارتباط مطابقت داشت (Wu et al., 2006; Zhang et al., 2010; Asrar and Elhindi, 2011). اثرات متقابل سطوح تنش خشکی و قارچ‌های میکوریزا بر ارتفاع بوته معنی‌داری نگردید.

وزن خشک اندام هوایی

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات مستقل سطوح تنش خشکی به‌طور معنی‌داری وزن خشک اندام هوایی را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۲). با افزایش شدت

نمونه‌ها با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند (وزن تر) و سپس به مدت ۲۴ ساعت در آب مقطر قرار گرفته و در این مدت در محیط آزمایشگاهی با دمای تقریبی ۲۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده و سپس توزین شدند (وزن اشباع)، در نهایت برگ‌ها در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و سپس توزین شدند و از رابطه زیر مقدار آب نسبی برگ محاسبه گردید (Matin et al., 1989).

$$R_{WC} = \frac{W_F - W_d}{W_T - W_d} \times 100 \quad [5]$$

در این رابطه WF وزن تر برگ‌ها، Wd وزن خشک برگ‌ها و WT وزن آماس برگ‌ها است.

پس از گذشت هشت هفته از زمان تنک کردن بوته‌ها، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه و درصد کلونیزاسیون ریشه در تمام گلدان‌ها اندازه‌گیری شدند. برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی، ابتدا اندام‌های هوایی گیاهان به‌صورت کف‌بر برداشت شده، پس از شستشو با آب مقطر در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار داده شدند. سپس وزن خشک اندام هوایی با ترازوی با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، پس از برداشت اندام‌های هوایی، ریشه همراه با خاک اطراف آن از داخل گلدان خارج شد. به‌منظور جلوگیری از قطع ریشه‌های موبین، ریشه‌ها در یک ظرف پر از آب قرار داده و به‌دقت شسته و تمیز شدند. برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه، پس از قرار دادن نمونه‌ها در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت از طریق ترازو با دقت ۰/۰۰۱ استفاده شد. برای اندازه‌گیری درصد کلونیزاسیون از روش (Giovannetti and Mosse, 1980) استفاده شد. برای این منظور، پس از اشباع کردن گلدان‌ها، خاک گلدان‌ها به‌آرامی شسته شد. پس از تمیز کردن ریشه‌ها از بخش‌های مختلف ریشه حدود یک گرم نمونه تهیه و در ظروف حاوی آب و الکل ۷۰٪ نگهداری شدند. سپس به مدت یک ساعت در محلول هیدروکسید پتاسیم یک درصد و دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. پس از شستشو به مدت ۲۰ دقیقه در محلول آب‌اکسیژنه قلیایی یک درصد عمل رنگ‌بری انجام شد. مجدداً ریشه‌ها چندین بار شسته شده و برای اسیدی شدن به مدت سه دقیقه در محلول اسید کلریدریک یک درصد قرار داده شد. سپس ریشه‌ها در محلول لاکتوگلیسرین تریپان بلو به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. برای تعیین

(2010; Asrar and Elhindi, 2011; Liu et al., 2011 مطابقت داشت.

تلقیح بذور درت با گونه‌های قارچ میکوریزا هرچند باعث افزایش ۱۲-۱۰٪ وزن خشک اندام هوایی شد ولی این افزایش از نظر آماری معنی‌دار نبود.

تنش رطوبتی وزن خشک اندام‌های هوایی کاهش یافت. کاهش وزن خشک گیاه با افزایش تنش رطوبتی را می‌توان به اختلال در عمل فتوسنتز و کاهش تولید مواد فتوسنتزی جهت انتقال به اندام‌های در حال رشد نسبت داد. نتایج مذکور با نتایج گزارش شده توسط سایر محققین (Ponsens et al.,

جدول ۲. میانگین مربعات صفات مورد بررسی در آزمایش ذرت در شرایط تنش آبی و تلقیح با قارچ‌های میکوریزا

Table 2. Mean squares of studied traits in corn experiment under drought stress conditions and inoculation with mycorrhizal fungi

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	شاخص کلروفیل	سطح برگ	رطوبت نسبی برگ	کلونیزاسیون ریشه
S.O.V	df	Plant height	Shoot dry weight	Root weight	Chlorophyll Index	Leaf area	Leaf relative humidity	Root colonization
تنش خشکی	2	477**	14.7**	0.04 ^{ns}	4.32 ^{ns}	245 ^{ns}	0.018*	171.2 ^{ns}
Drought stress (S)								
قارچ میکوریزا	2	255*	1.6 ^{ns}	0.66**	24.33*	1099*	0.031**	1423.5**
mycorrhizal (M)								
S*M	4	54 ^{ns}	0.6 ^{ns}	0.07 ^{ns}	13.41*	743*	0.021*	317.8**
Error	32	86	1.5	0.07	5.20	227	0.006	80.15
CV (%)	-	13.68	13.5	13.84	6.40	14.35	15.02	27.77

: به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و غیر معنی‌دار. ns، * و **

ns, ** and * indicate significant differences at 0.05, 0.01 and not significant respectively

جدول ۳. میانگین اثر سطوح تنش خشکی و گونه‌های قارچ میکوریزا بر ارتفاع بوته، وزن‌های خشک اندام هوایی و ریشه

Table 4. Effect of drought stress and mycorrhizal fungus species on the plant height, shoot and root dry weights

تیمار	ارتفاع بوته	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه
Treatment	Plant height (cm)	Shoot dry weight (g)	Root dry weight (g)
FC	74.27 ^a	6.13 ^a	0.36 ^a
0.8 FC	64.70 ^b	5.08 ^b	0.25 ^a
0.6 FC	64.30 ^b	4.15 ^c	0.28 ^a
شاهد (Check)	69.07 ^{ab}	4.84 ^a	0.16 ^b
<i>G. intraradices</i>	71.07 ^a	5.48 ^a	0.19 ^b
<i>G. mosseae</i>	63.13 ^b	5.04 ^a	0.54 ^a

intraradices و تیمار شاهد مشاهده نگردید. بر اساس نتایج سایر محققین می‌توان اظهار داشت که تحت شرایط تنش خشکی، روزه‌های هوایی بسته‌شده، میزان فتوسنتز کاهش یافته و در نهایت رشد ریشه سریعاً متوقف شده و بدین طریق ظرفیت جذب و انتقال آب و عناصر غذایی از خاک به طرف اندام هوایی کاهش می‌یابد (Meybodi and Gharayazi, 2001). از طرفی در شرایط تنش خشکی، هدایت هیدرولیکی سیستم ریشه‌های گیاهان میکوریزی

وزن خشک ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها مربوط به وزن خشک ریشه نشان داد که اثر مستقل سطوح تنش رطوبتی بر وزن خشک ریشه معنی‌دار نگردید ولی اثر مستقل تیمارهای مربوط به گونه‌های قارچ میکوریزا بر وزن خشک ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در تیمار *G. mosseae* نسبت به گونه *G. intraradices* وزن خشک ریشه بیشتر بود. تفاوت معنی‌داری بین گونه *Glomus*

شاخص کلروفیل SPAD در سطح احتمال پنج درصد معنی-دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که علیرغم افزایش شدت تنش رطوبتی، قارچ‌های میکوریزا شاخص کلروفیل SPAD را افزایش داد. بیشترین شاخص کلروفیل مربوط به تیمار تلقیح با قارچ *G. mosseae* در FC ۰/۶ بود که با تیمار تلقیح با قارچ *G. intraradices* در همان عامل رطوبتی تفاوت نداشت (جدول ۴). نتایج مذکور با نتایج مورته و همکاران (Morte et al., 2001) مطابقت داشت.

بیشتر از گیاهان غیر میکوریزی است که این موضوع در اثر افزایش سطح ریشه و یا طول ریشه‌های میکوریزی است (Giri et al., 2005; Kungu et al., 2008; Jongrunklang et al., 2011).

شاخص کلروفیل (SPAD)

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل سطوح تنش رطوبتی و گونه‌های قارچ‌های میکوریزا بر

جدول ۴. اثر سطوح تنش خشکی و گونه‌های قارچ میکوریزا بر شاخص کلروفیل SPAD، سطح برگ و درصد کلونیزاسیون ریشه
Table 4. Effect of drought stress levels and mycorrhizal species on SPAD chlorophyll index, leaf area, leaf relative humidity and root colonization percentage

خشکی Drought stress levels	گونه قارچ میکوریزا Mycorrhizal fungus specie	شاخص کلروفیل Chlorophyll Index	سطح برگ Leaf area (cm ²)	رطوبت نسبی برگ Leaf relative humidity (%)	کلونیزاسیون ریشه Root colonization (%)
FC	شاهد (Check)	32.32 ^b	87.62 ^c	0.33 ^c	19.36 ^d
	<i>G. intraradices</i>	37.66 ^a	128.93 ^a	0.48 ^a	28.66 ^{bc}
	<i>G. mosseae</i>	35.74 ^{ab}	104.08 ^{bc}	0.37 ^{bc}	37.04 ^b
0.8 FC	شاهد (Check)	32.40 ^b	101.01 ^{bc}	0.30 ^c	28.02 ^{bc}
	<i>G. intraradices</i>	34.70 ^{ab}	103.46 ^{bc}	0.42 ^{ab}	21.19 ^c
	<i>G. mosseae</i>	37.70 ^a	96.69 ^{bc}	0.41 ^{ab}	54.33 ^a
0.6 FC	شاهد (Check)	32.58 ^b	99.68 ^{bc}	0.28 ^c	33.9 ^b
	<i>G. intraradices</i>	35.92 ^a	107.11 ^{bc}	0.30 ^c	28.58 ^{bc}
	<i>G. mosseae</i>	37.02 ^a	116.71 ^{ab}	0.41 ^{ab}	39.04 ^a

حروف کوچک انگلیسی مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است

*The Similar small letter indicate a significant difference of 5%, level

نتایج ارائه شده توسط ناگاراتنا و همکاران (Nagarathna et al., 2007) را تأیید نمود.

محتوی رطوبت نسبی برگ

اثرات مستقل سطوح تنش رطوبتی بر محتوای رطوبت نسبی برگ از نظر آماری معنی‌دار بوده و با کاهش مقدار رطوبت خاک میزان رطوبت نسبی برگ کاهش یافت. تفاوت کاملاً معنی‌داری بین اثرات مستقل گونه‌های قارچ میکوریزا از نظر رطوبت نسبی برگ وجود داشت و تلقیح با قارچ میکوریزا موجب افزایش رطوبت نسبی برگ گردید. تفاوتی بین تأثیر دو گونه قارچ از محتوی رطوبت نسبی برگ وجود نداشت. اثرات متقابل تنش رطوبتی و قارچ میکوریزا بر صفت مذکور نیز معنی‌دار گردید و بیشترین محتوای رطوبت نسبی برگ در تیمار رطوبت ظرفیت مزرعه در تلقیح با قارچ *G. intraradices* به دست آمد که با تیمار ۰/۶ رطوبت ظرفیت

مساحت سطح برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل سطوح تنش رطوبتی و گونه‌های قارچ‌های میکوریزا بر مساحت سطح برگ در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مساحت سطح برگ در تیمار ۱۰۰٪ رطوبت ظرفیت مزرعه و تلقیح با گونه قارچ *G. intraradices* مشاهده شد که با تیمار ۰/۶ رطوبت ظرفیت مزرعه و تلقیح با قارچ *G. mosseae* در یک کلاس آماری قرار داشت (جدول ۴). این امر بیانگر کارایی بیشتر گونه *G. mosseae* تحت شرایط تنش رطوبتی است. به‌طور کلی مطالعات انجام‌گرفته نشان داده است که افزایش جذب آب در گیاهان میکوریزی اغلب منجر به افزایش سطح و محتوای آب نسبی برگ و کاهش هدایت روزنه‌ای می‌شود (Hu et al., 2010). نتایج مذکور

توسط قارچ‌های میکوریز بستگی به گیاه میزبان و گونه‌های قارچ دارد و حتی جدایه‌های یک‌گونه که از مناطق مختلف جمع‌آوری شده باشند از نظر درصد کلونیزاسیون اختلاف دارند هرچند این جدایه‌ها از نظر مرفولوژی مشابه هستند ولی از نظر فیزیولوژی ممکن است متفاوت باشند (Barin et al., 2006). لذا بالا رفتن درصد کلونیزاسیون ریشه در تلقیح یک‌گونه با گونه دیگر در هر گیاهی بی‌ارتباط به توانایی ذاتی آن گونه نیست.

نتیجه‌گیری نهایی

به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان داد که تلقیح ریشه ذرت با قارچ‌های میکوریزا-آربوسکولار موجب افزایش شاخص کلروفیل برگ و تولید ماده خشک گیاه در رژیم‌های رطوبتی کمتر از ظرفیت مزرعه شد. افزایش بیشتر عوامل موردبررسی در این تحقیق از قبیل ارتفاع گیاه، شاخص کلروفیل، مساحت سطح برگ، رطوبت نسبی برگ، تولید ریشه و اندام هوایی در نتیجه استفاده از گونه *G. mosseae* نسبت به گونه *G. intraradices*، علیرغم حاکمیت تنش رطوبتی در خاک، پیشنهاد می‌کند که این گونه در شرایط تنش خشکی قادر به برقراری ارتباط همزیستی مؤثرتری با ریشه گیاه ذرت است؛ بنابراین، برای افزایش درجه تحمل گیاه ذرت نسبت به تنش‌های رطوبتی و افزایش راندمان جذب آب، گونه مذکور کارا تر است. برای تحقیقات آتی، مقایسه درجه همزیستی گونه‌های قارچ میکوریزا-آربوسکولار در شرایط تنش‌های زنده و غیرزنده در مزرعه پیشنهاد می‌گردد.

مزرعه در تلقیح با گونه قارچ *G. mosseae* تفاوتی نداشت (جدول ۶). نتیجه مذکور بیانگر کارایی بیشتر گونه قارچ *G. mosseae* در حفظ رطوبت نسبی آب برگ تحت شرایط تنش رطوبتی بود. نتایج مشابهی توسط محققین دیگر (Liu et al., 2004; Aliasgharzad et al., 2006; Kungu et al., 2008) در رابطه با تأثیر قارچ‌های میکوریزا در بهبود محتوی رطوبت نسبی گیاه تحت شرایط تنش خشکی گزارش گردیده است.

درصد کلونیزاسیون ریشه

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل سطوح تنش رطوبتی و گونه‌های قارچ‌های میکوریزا بر درصد کلونیزاسیون ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل تنش رطوبتی و قارچ میکوریزا بر درصد کلونیزاسیون ریشه در سطح پنج درصد معنی‌دار بود و بیشترین درصد کلونیزاسیون ریشه در تیمار تلقیح با قارچ *G. mosseae* در ۰/۸ درصد ظرفیت مزرعه حاصل شد که با تیمار تلقیح همان‌گونه در ۰/۶ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه در یک کلاس آماری قرار داشتند. نتایج مذکور با نتایج تعدادی از محققین (Aliasgharzad et al., 2006; Abo Ghalia and Khalafallah, 2008) مطابقت داشت. همچنین بررسی‌ها نشان داده است که تلقیح قارچ میکوریزا اثر معنی‌داری در افزایش درصد آلودگی ریشه دارد یعنی تلقیح قارچ‌ها بر درصد آلودگی ریشه مؤثر بوده و با افزایش جمعیت آن‌ها در خاک درصد آلودگی ریشه بالا می‌رود. درصد کلونیزاسیون ریشه

منابع

- Abo-Ghalia, H.H., Khalafallah, A.A., 2008. Responses of wheat plants associated with arbuscular mycorrhizal fungi to short-term water stress followed by recovery at three growth stages. *Journal of Applied Sciences Research*. 5, 570-580.
- Aliehaie, M., 1997. Descriptions of methods for chemical analysis of soil. Volume II, Soil and Water Research Institute, Publication No. 1024. [In Persian].
- Aliasgharzad, N., neyshabouri, M.R., Salimi, G., 2006. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. *Biologia*, Bratislava. 61, 324-328.
- Anjum, S.A., Tanveer, M., Ashraf, U., Hussain, S., Shahzad, B., Khan, I., Wang, L. 2016. Effect of progressive drought stress on growth, leaf gas exchange, and antioxidant production in two maize cultivars. *Environmental Science and Pollution Research*. 23, 17132-17141.
- Aroca, R., Porcel, R., Ruiz-lozano, J. M. 2007. How does arbuscular mycorrhizal symbiosis regulate root hydraulic properties and plasma membrane aquaporins in *Phaseolus vulgaris*

- under drought, cold or salinity stresses? *New Phytologist*. 173, 808–816.
- Asrar, A.W.A., Elhindi, K., 2011. Alleviation of drought stress of marigold (*Tagetes erecta*) plants by using arbuscular mycorrhizal fungi. *Saudi Journal of biological Sciences*. 18, 93-98.
- Avis, T.J., Gravel, V., Antoun, H., Tweddell, R.J., 2008. Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*. 40(7), 1733–1740.
- Auge, R.M., Stodola, A.J.W., Ebel, R.C., Duan, X., 1995. Leaf elongation and water relations of mycorrhizal sorghum in response to partial soil drying: two *Glomus* species at varying phosphorus fertilization. *Journal of Experimental Botany*. 46, 297-307.
- Barin M., Aliasgharzadeh, N., Samadi, V., 2006. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the yield and absorption of nutrients in tomato under salinity from NaCl and mixtures of salts, *Journal of Soil and Water Sciences*. 20(1), 94-120. [In Persian with English Summary].
- Bárzana, G., Aroca, R., Ruiz-Lozano, J.M. 2015. Localized and non-localized effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on accumulation of osmolytes and aquaporins and on antioxidant systems in maize plants subjected to total or partial root drying. *Plant, Cell AND Environment*. 38, 1613–1627.
- Bompadre, M.J., Silvani, V.A., Bidondo, L.F., de Molina, M.D.C.R., Colombo, R.P., Pardo, A.G., Godeasa, A.M., 2014. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate oxidative stress in pomegranate plants growing under different irrigation conditions. *Botany*. 92, 187–193.
- Cao, L.Z.X., Wj, B.X.P., 2004. Discuss on evaluating method to drought-resistance of maize in seedling stage. *Journal of Maize Science*. 12, 73–75.
- Daryanto. S., Wang, L., Jacinthe, P-A., 2016. Global Synthesis of Drought Effects on Maize and Wheat Production. *PLoS ONE*. 11(5), e0156362.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156362>
- Eskandari, S., Guppy, C.N., Knox, O.G.G., Backhouse, D., Haling, R.E. 2017. Mycorrhizal symbioses of cotton grown on sodic soils: A review from an Australian perspective. *Pedosphere*. 27(6), 1015–1026.
- Farooq, M., Bramley, H., Palta, J.A., Siddique, K.H.M., 2011. Heat stress in wheat during reproductive and grain-filling phases. *Critical Review in Plant Sciences*. 30, 491-507.
- Giovannetti, M., Mosse, B. 1980. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*. 84, 489–500.
- Giri, B., Kapoor, R., Mukerji, K.G., 2005. Effect of the arbuscular mycorrhizae *Glomus fasciculatum* and *G. macrocarpum* on the growth and nutrient content of *Cassia siamea* in a semi-arid Indian wasteland soil. *New Forests*. 29, 63-73.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Dolatabadian, A., Jamshidi, E., Khodaei-Joghan, A. 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress. *Agricultural Water Management*. 117, 106–114.
- Gong, B., Wen, D., Vanden Langenberg, K., Wei, M., Yang, F., Shi, Q., Wang, X. 2013. Comparative effects of NaCl and NaHCO₃ stress on photosynthetic parameters, nutrient metabolism, and the antioxidant system in tomato leaves. *Scientia Horticulture*. 157, 1–12.
- Hu, L., Wang, Z., Du, H., Huang, B., 2010. Differential accumulation of dehydrins in response to water stress for hybrid and common bermudagrass genotypes differing in drought tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 167, 103-109.
- Kungu, B.J., Lasco, R.D., Cruz, L.U.D., Cruz, R.E.D., Husain, T., 2008. Effect of vesicular arbuscular mycorrhiza (VAM) fungi inoculation on coppicing ability and drought resistance of *senna spectabilis*. *Pakistan Journal of Botany*. 40, 217-224.
- Lambers, H., Chapin, F., Pons, T., 2008. *Plant physiological ecology*. Springer, New York, p 540.
- Liebersbach, H., Steingrobe, B., Claassen, N., 2004. Roots regulate ion transport in the rhizosphere to counteract reduced mobility in dry soil. *Plant and Soil*. 260, 79–88.
- Leung, H.M., Wang, Z.W., Ye, Z.H., Yung, K.L., Peng, X.L., Cheung, K.C., 2013. Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in

- phytoremediation of metal-contaminated soils: A review. *Pedosphere*. 23(5), 549–563.
- Li, Y., Zhao, H., Duan, B., Korpelainen, H., Li, C., 2011. Effect of drought and ABA on growth, photosynthesis and antioxidant system of *Continus coggygria* seedling under two different light conditions. *Environmental and Experimental Botany*. 71, 107-113.
- Liu, F., Jensen, C.R., Andersen, M.N., 2004. Drought stress effect on carbohydrate concentration in soybean leaves and pods during early reproductive development: its implication in altering pod set. *Field Crops Research*. 86, 1-13.
- Liu, H., Wang, X., Wang, D., Zou, Z., Liang, Z., 2011. Effect of drought stress on growth and accumulation of active constituents in *Salvia miltiorrhiza* Bunge. *Industrial Crops and Products*. 33, 84-88.
- Malakouti, M.J., Moshiri, F., Ghibi, M.N., Molavi, S., 2005. Optimum concentrations of nutrients in soil and some garden products (first part). Council policy development and efficient use of fertilizers and pesticides application of biological agriculture, Technical publication No. 406, Senate Publications, Tehran, Iran. [In Persian].
- Matin, M.A., Brown, J.H. Ferguson, H., 1989. Leaf water potential, relative water content, and diffusive resistance as screening techniques for drought resistance in barley. *Agronomy Journal*. 81, 100-105.
- Meybodi, M.M.S., Gharayazi, B., 2001. Physiological and Vegetative Aspects of Salinity Stress of Plants. Isfahan University of Technology publishing house, No. 78, Isfahan, 274 p. [In Persian with English Summary].
- Min, H., Chen, C., Wei, S., Shang, X., Sun, M., Xia, R., Liu, X., Hao, D., Chen, H., Xie, Q., 2016. Identification of drought tolerant mechanisms in maize seedlings based on transcriptome analysis of recombination inbred lines. *Frontiers in Plant Science*. 7, 1080. Doi: 10.3389/fpls.2016.01080
- Mishra, V., Herkauer, K.A., 2010. Retrospective droughts in the crop growing season: Implications to corn and soybean yield in the midwestern united states. *Agriculture and Forest Meteorology*. 150, 1030-1045.
- Morte, A., Diaz, G., Rodriguez, P., Alarcon, J.J., Sanchez-Blanco, M.J., 2001. Growth and water replications in mycorrhizal and Nonmycorrhizal *Pinus Halepensis* plants in response to drought. *Biologia plantarum*. 44, 263-267.
- Nagarathna, T.K., Prasad, T.G., Bagyaraj, D.J., Shadakshari, Y.G., 2007. Effect of arbuscular mycorrhiza and phosphorus levels on growth and water use efficiency in Sunflower at different soil moisture status. *Journal of Agricultural Technology*. 3, 221-229.
- Jongrunklang, N., Toomasan, B., Vorasoot, N., Jogloy, S., Boote, K.J., 2011. Rooting traits of peanut genotypes with different yield responses to pre-flowering drought stress. *Field Crops Research*. 120, 262-270.
- Ponsens, J., Hanson, J., Schellberg, J., Moeseler, B.M., 2010. Characterization of phenotypic diversity, yield and response to drought stress in a collection of Rhodes grass (*Chloris gayana* Kunth) accessions. *Field Crops Research*. 118, 57-72.
- Smith, S.E., Read, D.J., 2008. *Mycorrhizal Symbioses*, third ed. Academic Press, UK.
- Widiastuti N., Wu, H., Ang, M., Zhang, D.K., 2008. The potential application of natural zeolite for grey water treatment. *Desalination Journal*, 218, 271-280.
- Wu, Q., Xia, R., Hu, z., 2006. Effect of arbuscular mycorrhiza on the drought tolerance of poncirus *Trifoliata* seedlings. *Frontiers of Forestry in China*. 1, 100-104.
- Xu, Z.Y., Ban Y.H., Jiang, Y.H., Zhang, X.L., Liu, X.Y., 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi in wetland habitats and their application in constructed wetland: A review. *Pedosphere*. 26(5), 592–617
- Yooyongwech, S., Samphumphuang, T., Tisarum, R., Theerawitaya, C., Cha-um, S., 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved water deficit tolerance in two different sweet potato genotypes involves osmotic adjustments via soluble sugar and free proline. *Scientia Horticulturae*. 198, 107–117.
- Zhang, Y., Zhong, C.L., Chen, Y., Chen, Z., Jiang, Q.B., Pinyopusarker, C., Wu, K., 2010. Improving drought tolerance of *Casuarina equisetifolia* seedlings by arbuscular mycorrhizas under glasshouse conditions. *New Forests*. 10, 91-98