Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

The effect of mycorrhizal fungi inoculation on physiological characteristics and root mass of *Paulownia fortunei* seedlings under drought stress

Elham Hasani[1], Morteza Pourreza[*2], Saeid Jalali Honarmand[3], Ali Beheshti Ale-Agha[4]

1. Graduate of Forest Science and Engineering, Dept. of Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: elhamhasani.2868@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: pourreza@razi.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Plant Production and Genetic, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: sjhonarmand@yahoo.com
4. Associate Prof., Dept. of Soil Science Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: beheshtiali97@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 10.18.2023
Revised: 11.26.2023
Accepted: 12.30.2023

Keywords:
Environmental stress,
Greenness index,
Microorganism,
Photosynthesis

ABSTRACT

Background and Objectives: Paulownia species is one of the trees introduced for wood production. Developing afforestation in arid and semi-arid areas presents a challenge due to limited water resources. Drought stress is a significant obstacle to the growth and establishment of plantations, making it crucial to implement innovative methods and techniques to reduce water usage for tree irrigation. Using mycorrhizal fungi to coexist with plants saves water consumption and increases tree establishment success. The study aimed to investigate the impact of arbuscular mycorrhiza fungi on the physiological characteristics and root mass of *Paulownia fortunei* seedlings under drought stress.

Materials and Methods: The experiment followed a completely randomized design with two factors and three replications. These factors were drought stress at four levels (80%, 60%, 40%, and 100% of crop capacity) and mycorrhizal fungi at two levels (with and without mycorrhiza). This experiment took measurements for root wet and dry weight, electrolyte leakage, greenness index, photosynthetic gas exchange (including net rate of photosynthesis, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, and stomatal conductance), and leaf temperature. Two-way analysis of variance was performed after confirming the normal distribution of data to compare the response of mycorrhizal fungi-inoculated seedlings with those not inoculated under drought stress.

Results: The net rate of photosynthesis in the treatment with mycorrhiza at the non-stress level was about 4 times higher than its value in the treatment without mycorrhiza at the severe stress level. Also, the amount of stomatal conductance in the treatment with mycorrhiza at the non-stress level showed an increase of about 10 times compared to its value in the treatment without mycorrhiza at the severe stress level. The rate of transpiration was also showed an increase of about 6 times in the treatment with mycorrhiza in the non-stress level compared to the treatment without mycorrhiza in the severe stress level. The dry weight of the root in the treatment with mycorrhiza at the non-stress level was about 3.5 times higher than its value in the treatment without mycorrhiza at the severe stress level. But the amount of electrolyte leakage in the treatment without

mycorrhiza showed an increase of about 7% compared to the amount in the treatment with mycorrhiza. In addition, the greenness index in the treatment without mycorrhiza was about 8% lower than its value in the treatment with mycorrhiza. The concentration of intercellular carbon dioxide also showed an increase of about 13% in the treatment with mycorrhiza compared to its value in the treatment without mycorrhiza.

Conclusion: It was concluded that the application of mycorrhizal fungi plays an effective role in photosynthetic gas exchange and membrane stability, ultimately increasing the resistance and survival of *Paulownia fortunei* seedlings in drought stress. Therefore, the use of mycorrhiza in afforestation with this species in dry areas should be suggested.

Cite this article: Hasani, Elham, Pourreza, Morteza, Jalali Honarmand, Saeid, Beheshti Ale-Agha, Ali. 2024. The effect of mycorrhizal fungi inoculation on physiological characteristics and root mass of *Paulownia fortunei* seedlings under drought stress. *Journal of Plant Production Research*, 31 (3), 147-164.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JOPP.2023.21823.3079
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۵۰
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۷۸

تأثیر قارچ مایکوریزا بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و زی‌توده ریشه نهال‌های پالونیا (*Paulownia fortunei*) در تنش خشکی

الهام حسنی[۱]، مرتضی پوررضا*[۲]، سعید جلالی هنرمند[۳]، علی بهشتی آل آقا[٤]

۱. دانش‌آموخته علوم و مهندسی جنگل، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: elhamhasani.2868@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: pourreza@razi.ac.ir
۳. دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: sjhonarmand@yahoo.com
٤. دانشیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: beheshtiali97@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۰۷/۲٦
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۲/۰۹/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۱۰/۰۹

واژه‌های کلیدی:
تنش محیطی،
شاخص سبزینگی،
فتوسنتز،
میکروارگانیسم‌ها

چکیده

سابقه و هدف: پالونیا به عنوان یکی از درختان تندرشد به منظور تولید چوب به شمار می‌رود. از آن‌جا که گسترش جنگل‌کاری‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک با محدویت آب روبرو بوده و تنش خشکی از عوامل محدودکننده گسترش و استقرار جنگل‌کاری‌ها به‌شمار می‌رود، استفاده از روش‌های نوین در کاهش مصرف آب برای آبیاری درختان اهمیت فراوانی دارد. یکی از این روش‌ها، بهره‌گیری از همزیستی قارچ‌های مایکوریزا با ریشه گیاهان است که از یک سو سبب صرفه‌جویی در مصرف آب و از سوی دیگر باعث افزایش موفقیت استقرار درختان می‌شود. بنابراین پژوهش کنونی با هدف بررسی اثر مایه‌کوبی قارچ‌های مایکوریزا-آربسکولار بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و زی‌توده ریشه نهال پالونیا، تحت تنش خشکی انجام شد.

مواد و روش‌ها: این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و دو فاکتور شامل تنش‌خشکی در چهار سطح (٤۰، ٦۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و قارچ مایکوریزا (در دو سطح با مایکوریزا و بدون مایکوریزا) اجرا شد. مایه‌کوبی مایکوریزا به صورت بذرمال قبل از کشت انجام شد. در این آزمایش ویژگی‌های وزن تر و خشک ریشه، نشت الکترولیت، شاخص سبزینگی، تبادل گازهای فتوسنتزی شامل (نرخ خالص فتوسنتز، غلظت CO_2 بین سلولی، سرعت تعرق و هدایت روزنه‌ای) و دمای برگ اندازه‌گیری شد. برای مقایسه پاسخ نهال‌های مایه‌کوبی شده با قارچ‌های مایکوریزا با نمونه‌های مایه‌کوبی نشده تحت تنش خشکی، پس از بررسی توزیع نرمال داده‌ها از آنالیز واریانس دو طرفه استفاده شد.

یافته‌ها: یافته‌های این آزمایش نشان داد که اثر برهم‌کنش تنش خشکی و قارچ مایکوریزا برای صفات نرخ خالص فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، سرعت تعرق و وزن خشک ریشه معنی‌دار بود.

اثر ساده قارچ مایکوریزا بر شاخص سبزینگی و وزن تر ریشه معنی‌دار بود. هم‌چنین اثر ساده تنش خشکی بر صفات نشت الکترولیت، غلظت CO_2 بین سلولی، وزن تر ریشه، دمای برگ معنی‌دار بود. نرخ خالص فتوسنتز در تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش نسبت به مقدار آن در تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید حدود ٤ برابر افزایش داشت. هم‌چنین، مقدار هدایت روزنه‌ای در تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش نسبت به مقدار آن در تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید حدود ۱۰ برابر افزایش نشان داد. سرعت تعرق نیز در تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش نسبت به تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید حدود ٦ برابر افزایش نشان داد. وزن خشک ریشه در تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش نسبت به مقدار آن در تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید حدود ۳/۵ برابر بیش‌تر بود. ولی مقدار نشت الکترولیت در تیمار بدون مایکوریزا نسبت به مقدار آن در تیمار با مایکوریزا حدود ۷ درصد افزایش نشان داد. به علاوه، شاخص سبزینگی در تیمار بدون مایکوریزا حدود ۸ درصد کم‌تر از مقدار آن در تیمار با مایکوریزا بود. غلظت دی‌اکسیدکربن بین سلولی نیز در تیمار با مایکوریزا نسبت به مقدار آن در تیمار بدون مایکوریزا حدود ۱۳درصد افزایش نشان داد. یافته‌های این آزمایش نشان داد که ویژگی‌های فیزیولوژیک هم‌چون نرخ خالص فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، غلظت CO_2 بین سلولی، سرعت تعرق، دمای برگ و شاخص سبزینگی در تمام سطوح تنش خشکی افزایش یافت اما نشت الکترولیت به صورت معنی‌داری در همه سطوح تنش کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: به‌نظر می‌رسد که کاربرد قارچ میکوریزا نقش مؤثری در تبادل گازهای فتوسنتزی و پایداری غشا و در نهایت افزایش مقاومت و زنده‌مانی نهال پالونیا فوروتونی در تنش خشکی ایفا می‌کند. بنابراین کاربرد مایکوریزا در جنگل‌کاری با این گونه در مناطق خشک، پیشنهاد شود.

استناد: حسنی، الهام، پوررضا، مرتضی، جلالی هنرمند، سعید، بهشتی آل آقا، علی (۱۴۰۳). تأثیر قارچ مایکوریزا بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و زی‌توده ریشه نهال‌های پالونیا (*Paulownia fortunei*) در تنش خشکی. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۱ (۳)، ۱۶۴-۱۴۷.

DOI: 10.22069/JOPP.2023.21823.3079

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

ایجاد و گسترش جنگل‌کاری‌ها و فضاهای سبز شهری برای پاسخ به نیازهای جوامع در حال گسترش یک امر بدیهی و ضروری است. علاوه بر تولید چوب، جنگل‌کاری‌ها و فضای‌های سبز شهری، نقش به‌سزایی در فراهم آوردن شرایطی برای گذراندن اوقات فراغت شهروندان، تولید اکسیژن و حذف آلاینده‌ها و پالایش هوا دارند. خشکسالی یکی از فراوان‌ترین و شدیدترین تنش‌های غیرزیستی است که بر بسیاری از ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی رشد گیاه در زیست‌بوم‌های خشک و نیمه‌خشک تأثیر منفی می‌گذارد (۱، ۲) و در مراحل مختلف رشد، سبب کاهش رویش ارتفاعی، رویش قطری ساقه و وزن تر و خشک اندام‌ها گیاهان می‌شود (۳، ٤). کاهش وزن خشک ریشه با کاهش حجم و سطح ریشه داراری ارتباط مستقیم است که این خود سبب ایجاد مشکل در جذب آب و مواد غذایی از خاک است (۵). درختان برای رشد مطلوب به آب نیاز داشته و تنش خشکی از مهم‌ترین تنش‌های محیطی مؤثر بر زنده‌مانی و رویش درختان است. هم‌چنین تحت‌تأثیر تنش خشکی غلظت CO_2 بین روزنه‌ای، تعرق، هدایت روزنه‌ای، سرعت فتوسنتز و محتوای کلروفیل کاهش یافته و حتی زنده‌مانی گیاه نیز به خطر می‌افتد (٦، ۷). کاهش میزان شاخص سبزینگی (کلروفیل اسپد)، در شرایط تنش خشکی را می‌توان به افزایش آنزیم‌های کلروفیلاز (۸)، کاهش پایداری غشا (نشت الکترولیت) و آسیب به پروتئین‌ها نسبت داد (۹). بنابراین استفاده از راهکارهای مناسب و نوین، می‌تواند شرایط را برای مقاومت نهال‌های درختی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در برابر تنش خشکی فراهم نماید، از مهم‌ترین این راهکارها می‌توان به انتخاب گونه‌های مقاوم به تنش خشکی، استفاده از روش‌های کم‌آبیاری و افزایش تاب‌آوری گونه‌ها در مقابل تنش خشکی با به‌کارگیری راهکارهای زیست‌فناوری مانند همزیستی با میکروارگانیسم‌ها اشاره نمود (۱، ۱۰). قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار یکی از پرکاربردترین قارچ‌های مایکوریزا است که می‌توانند با بیش از ۸۰ درصد از گونه‌های گیاهان زمینی همزیستی ایجاد کنند (۱۱). همزیستی بین مایکوریزا و گیاهان برای رشد گیاه، مقاومت در برابر تنش، چرخه مواد غذایی و بهبود کیفیت خاک به اثبات رسیده است (۱۲، ۱۳، ٤). تنظیم مقاومت به خشکی گیاه توسط قارچ مایکوریزا یک فرایند بسیار پیچیده شامل انواع متابولیت‌ها ومسیرهای متابولیکی است (١٤). در شرایط خشکسالی، همزیستی با مایکوریزا می‌تواند بقای نهال را افزایش داده (۲، ۱۵)، جذب و انتقال آب و فسفر توسط گیاه میزبان را تقویت کرده و سبب افزایش فتوسنتز شود (١٦، ۱۷) و توانایی تبادل گاز و بهره‌وری مصرف آب را نیز بهبود می‌بخشد (١٤، ۱۸). از اثرهای همزیستی مایکوریزایی، ایجاد تغییر در هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه است، به‌نحوی‌که مشاهده شده، در شرایط تنش خشکی، هدایت روزنه‌ای و تعرق در گیاهانی که دارای همزیستی مایکوریزایی هستند، نسبت به گیاهان غیرمایکوریزایی افزایش می‌یابد (۲۰). افزایش دما در شرایط تنش خشکی ناشی از کاهش هدایت روزنه‌ای بود (۱۹). کاربرد مایکوریزا هم‌چنین سبب کاهش نشت یونی در شرایط تنش خشکی نسبت به گیاهان مایه‌کوبی نشده با مایکوریزا می‌شود (۲۱). در پژوهشی توسط زاریک و همکاران (۲۰۱٦)، یافته‌ها نشان داد که همزیستی با قارچ مایکوریزا در بهبود تحمل به خشکی گونه بنه دارای تأثیر مثبت بوده و هم‌چنین مایه‌کوبی با این قارچ به‌طور قابل‌توجهی باعث جذب مواد معدنی در این درخت شده است، بنابراین مایه‌کوبی مایکوریزایی می‌تواند یک راه‌حل بالقوه برای حفاظت و استقرار مجدد بنه نسبت به

بوم‌سازگان طبیعی خود باشد (۲۲). در پژوهشی دیگر هوانگ و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی نقش مایکوریزا در تنظیم مقاومت به خشکی در گیاه سیب پرداختند، یافته‌های آن‌ها نشان داد که مایه‌کوبی مایکوریزا باعث بهبود ظرفیت تبادل گازی، افزایش مهار اکسیژن فعال (H_2O_2)، ایجاد ظرفیت تنظیم اسمزی بیش‌تر، افزایش فراسنجه‌های فلورسانس کلروفیل و استفاده از سیگنال‌های MAPK، برای تعاملات بین گیاهان سیب و قارچ مایکوریزا شده و سرعت فتوسنتز خالص، هدایت روزنه‌ای و میزان تعرق را تحت تنش خشکی افزایش دادند (۱٤). نوده و همکاران (۲۰۲۱)، پژوهشی بر روی تأثیر محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد بر زنده‌مانی نهال‌های پالونیا فوروتونی تحت تنش خشکی پژوهشی انجام دادند، یافته‌های این پژوهش نشان داد که کاهش رطوبت خاک، زنده‌مانی نهال‌ها را به‌صورت معنی‌داری کاهش داد و استفاده از محلول‌پاشی در شرایط تنش خشکی در زنده‌مانی نهال‌ها تغییر معنی‌داری به‌وجود نمی‌آورد (۲۳).

پالونیا فوروتونی (*Paulownia fortunei*)، یکی از تندرشدترین گونه‌های جنس پالونیا است که در مناطقی از چین، لائوس و ویتنام که متوسط بارندگی ۷۷۰ میلی‌متر است به شکل طبیعی رشد می‌کند و با شرایط اسیدیته خاک سازگاری دارد، در پرورش نهال این گونه هم باید از آب‌گرفتگی و هم از خشکی خاک جلوگیری شود (۲٤). پژوهش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که گونه‌های پالونیا برای رشد و عملکرد مناسب در مناطقی با بارندگی کم‌تر از رویشگاه طبیعی، به آبیاری منظم کافی و با شوری کم نیاز دارند (۲۳، ۲۵). پژوهش هشیش و همکاران (۲۰۲۲)، نشان داد که مایه‌کوبی نهال‌های پالونیا با قارچ‌های مایکوریزا می‌تواند باعث افزایش رویش نهال‌ها شود (۲٦). حتی در شرایط تنش شوری نیز نهال‌های مایکوریزایی عملکرد بهتری نشان دادند. تاکنون پژوهش‌هایی درباره پاسخ رویشی گونه پالونیا (*Paulownia fortunei*) به تنش شوری و خشکی انجام شده است (۲۳، ۲۵) ولی اطلاعاتی درباره تأثیر مایه‌کوبی قارچ‌های مایکوریزا بر عملکرد و ویژگی‌های فیزیولوژیکی نهال‌های پالونیا (*Paulownia fortunei*) در شرایط تنش خشکی ارائه نشده است. به همین دلیل هدف از انجام این پژوهش، شناسایی تأثیر قارچ مایکوریزا آربسکولار بر برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک و زی‌توده ریشه نهال‌های گونه پالونیا فوروتونی در شرایط تنش خشکی است.

مواد و روش‌ها

پژوهش کنونی به‌منظور تعیین تأثیر همزیستی قارچ مایکوریزا بر برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی نهال پالونیا تحت تنش‌خشکی، در سال ۱٤۰۱-۱۳۹۹ در گلخانه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی در استان کرمانشاه اجرا شد. این آزمایش گلدانی، به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و دو فاکتور انجام شد. فاکتور اول شامل چهار سطح خشکی (بدون تنش با آبیاری کامل ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، تنش ملایم با آبیاری در ۸۰ درصد ظرفیت زراعی، تنش متوسط با آبیاری در ٦۰ درصد ظرفیت زراعی و تنش شدید با آبیاری در ٤۰ درصد ظرفیت زراعی) بود که برای تعیین ظرفیت زراعی، یکی از گلدان‌ها از خاک مورد استفاده پر و با ترازو وزن شد. سپس با اضافه نمودن آب، خاک گلدان را تا درجه اشباع رسانده و چندین ساعت اجازه داده شد تا گلدان آب اضافی را خارج و به ظرفیت زراعی مزرعه برسد. سپس گلدان را به سرعت وزن شده و خاک آن را در آون با دمای ۱۰۵ درجه به‌مدت ٤۸ ساعت قرار داده تا کاملاً خشک شود. در این مرحله درصد وزنی رطوبت خاک در ظرفیت

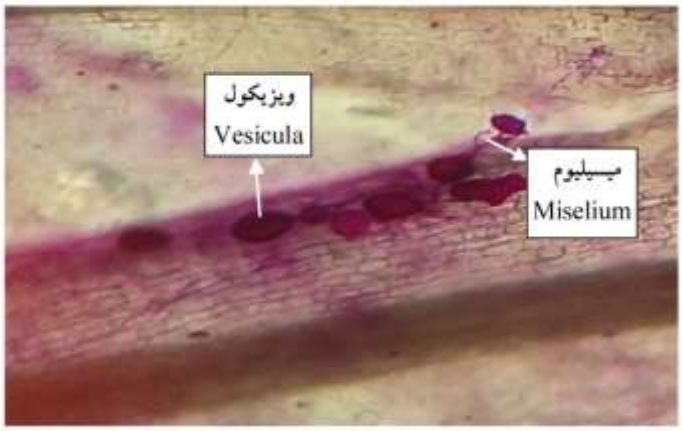
زراعی و میزان رطوبت موجود در خاک جهت اعمال تیمارهای خشکی مشخص شد (۲۸). اعمال تیمارهای تنش‌خشکی بر اساس روش‌های وزنی و دستگاه رطوبت سنج خاک (مدل LUTRON PMS- 714) انجام شد. و فاکتور دوم شامل دو عامل بدون و با قارچ‌های مایکوریزا آربسکولار بود. قارچ مایکوریزای تجاری به نام مایکوروت، حاوی سویه‌های *Glomus mosseae*، *Glomus intradices* و *Glomus etuncatum* با تعداد (CFU/g) $۱۰^{۷}$ تا $۱۰^{۸}$ بود که توسط شرکت دانش‌بنیان زیست فناور پیشتاز واریان با تأیید مؤسسه آب و خاک کشور تولید شده بود. تیمار بذرهای پالونیا به مدت یک هفته در دمای چهار درجه سانتی‌گراد با سرمادهی و خیسانده شدن در آب به مدت ٢٤ ساعت قبل از کشت انجام شد، سپس در دو سینی کشت، به صورت مجزا جهت تولید نهال کاشته شد. یک سینی با بذرهایی که قبل از کاشت، مرطوب و سپس با قارچ مایکوریزا بذرمال شده بودند و سینی دیگر که با بذرهای مایه‌کوبی‌نشده پر شدند. بسترهای کشت در محیط گلخانه و در دمای بین ۲۲ تا ٢٦ درجه سانتی‌گراد با آبیاری منظم تا زمان جوانه‌زنی نگهداری شد. پس از تولید، نهال‌ها در مرحله چهاربرگی به گلدان‌های با ابعاد (۱۵*۲۵) منتقل شدند، گلدان‌ها با ترکیبی از خاک مزرعه، ماسه و خاک برگ (۱:۱:۲) با وزن خشک حدود هزار و دویست گرم پر شدند. پس از انتقال نهال‌ها به گلدان به مدت یک ماه هر هفته از کود ۲۰-۲۰-۲۰ با دستور مصرف پنج گرم در یک لیتر به صورت آبیاری به میزان صد در صد ظرفیت زراعی، استفاده شد (۲۷)، و اعمال تنش‌های خشکی به مدت ٤٠ روز انجام گرفت. پس از اتمام دوره تنش برای تعیین کلونیزاسیون قارچ مایکوریزا از روش فیلیپس و هایمن (۱۹۷۰)، با اندکی تغییر استفاده شد (۲۹). از قسمت‌های جوان ریشه در تیمارها حدود یک گرم جدا و توسط آب مقطر شستشو داده شد، سپس قطعات یک سانتی‌متری به ظرف‌های حاوی هیدروکسید پتاسیم ده درصد انتقال داده شد. جهت از بین بردن رنگ ریشه‌ها، به مدت یک ساعت ظرف‌ها در حمام آب گرم با دمای ۹۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. سپس با آب کاملاً شستشو و به مدت پنج دقیقه در محلول اسید کلریدریک یک درصد قرار داده شدند. در این مرحله در محلول اسید لاکتو گلیسیرول اسید فوشین یک درصد، حدود یک ساعت و پس از آن یک ساعت دیگر در حمام آب گرم با دمای ۹۰ درجه سلسیوس و به مدت ۳۰ دقیقه در محلول لاکتوگلیسیرول قرار گرفتند. ۱۰۰ قطعه از ریشه‌های رنگ‌آمیزی شده هر یک از تیمارها (شاهد، ملایم، متوسط و شدید)، به کمک میکروسکوپ نوری با بزرگ‌نمایی ۱۰۰ و ٤٠، جهت اطمینان از انجام کلونیزاسیون بررسی شدند. وزن تر و خشک ریشه نهال‌های شاهد و مایکوریزایی با ترازویی با دقت یک درصد گرم اندازه‌گیری و یادداشت شد. در اواخر تنش خشکی، جهت اندازه‌گیری نشت الکترولیت غشا، بر اساس هدایت الکتریکی مواد یونی نشت شده از سلول‌های برگ به داخل آب مقطر از روش سایرام و همکاران (۲۰۰۱) استفاده شد (۳۰). پس از پایان اعمال تنش خشکی از هر تیمار (برای هر تیمار سه تکرار وجود داشت)، یک نمونه از برگ‌های میانی به مقدار یک و نیم گرم توزین و انتخاب شد. سپس درون هر لوله آزمایش ٦٠ میلی لیتر آب دو بار تقطیر ریخته شد و نمونه‌ها را در لوله‌های آزمایش به صورت مجزا قرار داده و در دمای ٤٠ درجه به مدت ۲۰ دقیقه نگه داشته شد. در نهایت با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (Extech)، اندازه‌گیری‌ها بر حسب واحد میکروزیمنس خوانش و اعداد مربوطه یادداشت شد. شاخص سبزینگی برگ نیز با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج یا اسپد که روشی غیرتخریبی است، شاخص کلروفیل برگ خوانش و یادداشت شد. تقریباً ۳۰ روز پس از اعمال تنش‌ها در هر تیمار (برای

هر تیمار سه تکرار وجود داشت)، بر روی سومین برگ توسعه یافته دو نمونه نهال، از قسمت بالای آن‌ها واقع در وسط طول برگ ، تعداد سه عدد از برگ‌ها و میانگین‌شان، اندازه‌گیری شد. اعداد خوانده شده توسط اسپد، مجموع کلروفیل a و b را در گیاه مشخص می‌کند (۳۱). هم‌زمان با پایان دوره تنش خشکی، با استفاده از دستگاه فتوسنتزمتر (Bio Scientific Ltd)، جهت اندازه‌گیری تبادلات گازی این گونه، از هر تیمار یک نمونه (برای هر تیمار سه تکرار وجود داشت)، از قسمت بالایی هر نهال، دومین یا سومین برگ توسعه‌یافته انتخاب و مابین دستگاه به صورتی که نور خورشید بر آن بتابد قرار داده شد. اعداد پس از سی ثانیه تا یک دقیقه زمانی که بر روی دستگاه ثابت شدند، قرائت و یادداشت شد. متغیرهای ثبت شده در این بخش شامل: نرخ خالص فتوسنتز (A)، نرخ تعرق (E)، غلظت CO_2 بین سلولی (ci)، هدایت روزنه‌ای (gs) و دمای سطح برگ (Tic) بود.

پس از دسته‌بندی داده‌ها، پراکنش نرمال و همگنی واریانس داده‌ها به ترتیب با آزمون شاپیرو ویلک و آزمون لون بررسی شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها از برنامه آماری SPSS استفاده شد. از آنالیز واریانس دو طرفه برای بررسی معنی‌داری اثر ساده و برهم‌کنش فاکتورها استفاده شد و برای مقایسه میانگین داده‌ها، در صورت معنی‌دار شدن نتیجه آنالیز واریانس، از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج و بحث

یافته‌های بررسی کلونیزاسیون ریشه با قارچ‌های مایکوریزا نشان داد که قارچ مایکوریزا به خوبی با ریشه نهال‌های پالونیا مایه‌کوبی شده است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است، میسلیوم قارچ در اپیدرم و سلول‌های قشر ریشه نفوذ پیدا کرده و وزیکول گلابی شکل به صورت بین‌سلولی در بافت کورتکس ریشه تشکیل شده است.



شکل ۱- کلونیزاسیون ریشه نهال‌های پالونیا با قارچ مایکوریزا.

Fig. 1. Root colonization of Paulownia seedlings with mycorrhiza.

زی‌توده ریشه: برون‌داد تجزیه واریانس نشان داد که، اثر ساده مایکوریزا و تنش‌خشکی بر وزن تر ریشه در سطح یک درصد معنی‌دار شد. هم‌چنین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش‌خشکی بر وزن تر ریشه معنی‌دار نبوده ولی بر وزن خشک ریشه در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). برون‌داد مقایسه میانگین‌ها نشان داد که، وزن تر ریشه در تیمار با مایکوریزا ۱/۲ برابر بیش‌تر از مقدار آن در تیمار بدون مایکوریزا بود.

هم‌چنین وزن تر ریشه مربوط به سطح بدون تنش ۲/۵ برابر وزن آن در سطح تنش شدید بود (جدول ۲). مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی نشان داد، بیش‌ترین وزن خشک ریشه مربوط به تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش با افزایش ۳/٦ برابر نسبت به تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید بود (شکل ۲). گونه پالونیا فوروتونی گزینه‌ای مناسب جهت زراعت چوب و جنگل‌کاری تلفیقی (اگروفارستری) در شمال کشور به‌شمار می‌رود. خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و زنده‌مانی این گونه محسوب می‌شود که به عملکرد نهالستان‌ها آسیب‌های شدیدی وارد می‌کند. یافته‌های پژوهش کنونی نشان داد که تنش خشکی باعث کاهش اکثر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در هر دو تیمار مایکوریزایی و غیر مایکوریزایی شد ولی کاربرد قارچ مایکوریزا سبب مقاومت نهال‌ها نسبت به نهال‌های غیر مایکوریزایی شد. یافته‌ها نشان داد که با افزایش سطوح تنش، وزن تر و خشک ریشه، هم در گیاهان مایه‌کوبی شده و هم در گیاهان مایه‌کوبی نشده با قارچ مایکوریزا کاهش یافت در حالی‌که زی‌توده ریشه به صورت معنی‌داری در گیاهان مایکوریزایی نسبت به گیاهان بدون مایکوریزا در همه سطوح تنش افزایش داشت. به صورت کلی کاهش وزن خشک ریشه با کاهش حجم و سطح ریشه مرتبط بود که این مهم در جذب آب و مواد غذایی از خاک مؤثر است (۵). در شرایط تنش خشکی به علت کاهش پتانسیل آب از طریق برهم زدن تعادل یونی، کاهش جذب، انتقال و مصرف عناصر غذایی، احیا و متابولیسم نیتروژن و پروتئین، تخریب غشای سلولی، کاهش تقسیم سلولی، کاهش وزن خشک ریشه و در نهایت ویژگی‌های مورفولوژی و فیزیولوژی گیاه تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد (۱، ۲). علاوه بر این گیاهان برای زنده ماندن در شرایط تنش خشکی مواد غذایی و انرژی را به جای رشد ریشه و اندام‌ها، در اختیار مولکول‌های نگهداری کننده در مقابل تنش قرار می‌دهند (۳، ٤). مایه‌کوبی قارچ‌های مایکوریزا با گیاهان از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا سبب افزایش مقاومت در مقابل انواع تنش‌های محیطی از جمله تنش‌خشکی در شمار زیادی از گونه‌های درختی می‌شوند. همزیستی مایکوریزایی سبب افزایش هدایت آب در ریشه و افزایش وزن ریشه می‌شود (۱، ۲، ۱۰، ١٦). قارچ‌های مایکوریزا قادرند با ریسه‌های خارجی خود سطح جذب در ریشه گیاهان را افزایش داده و به تبع آن سبب بهبود جذب آب، عناصر معدنی به ویژه فسفر از خاک گردند (۲۲) و به این ترتیب باعث افزایش وزن تر و خشک ریشه نهال‌ها تحت تنش‌خشکی شوند (۳). افزایش تولید هورمون‌های گیاهی از جمله جیبرلین و سیتوکنین به واسطه مایه‌کوبی با قارچ مایکوریزا باعث افزایش ریشه‌زایی و رشد ریشه می‌شوند که این مهم نیز یکی از عوامل افزایش وزن خشک ریشه می‌باشد (٤، ۱۲، ۱۳).

نشت الکترولیت: برون‌داد آنالیز واریانس داده‌های مربوط به نشت الکترولیت، نشان داد که تأثیر ساده مایکوریزا و سطوح تنش‌خشکی بر آسیب غشای سلولی یا نشت الکترولیت در سطح یک درصد معنی‌دار بوده ولی برهم‌کنش مایکوریزا و تنش‌خشکی بر این صفت معنی‌دار نبود (جدول ۱). نشت الکترولیت در تیمار بدون مایکوریزا افزایش ۱/۰۷ برابری نسبت به تیمار با مایکوریزا بود. هم‌چنین برون‌داد مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین نشت الکترولیت مربوط به سطح تنش شدید با ۱/۲ برابر نسبت به سطح بدون تنش بود و اختلاف معنی‌داری بین دو سطح تنش متوسط و شدید و هم‌چنین بین دو سطح تنش ملایم و شاهد مشاهده نشد (جدول ۲). یافته‌های به دست آمده نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی به دلیل آسیب وارد شده به غشای

سلولی، پایداری غشا کاهش یافته و نشت یونی افزایش می‌یابد در حالی که در گیاهان مایه‌کوبی شده با قاچ مایکوریزا میزان نشت الکترولیت غشا به صورت معنی‌داری نسبت به گیاهان مایه‌کوبی نشده در همه سطوح تنش کاهش یافته و پایداری غشا در همه سطوح تنش بیش‌تر بود. پایداری غشا از طریق تراوش یون‌ها از آن به بیرون مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین راهکارها در جهت حفظ بقای گیاهان در شرایط تنش خشکی، افزایش توان گیاه در حفظ محتویات و آب سلولی است، گرما و تنش خشکی ساختمان غشاء را تغییر داده و موجب آسیب غشای سلولی، نشت یون‌ها به بیرون از سلول‌ها و در نتیجه کاهش پایداری غشا می‌شوند (۹). یافته‌های پژوهش وو و شا (۲۰۰۶)، نشان داد که در شرایط تنش غشای سیتوپلاسمی گیاهان از پایداری کمی برخوردار بوده و نشت یونی گیاهان در تنش خشکی به صورت معنی‌داری افزایش می‌یابد و کاربرد قارچ مایکوریزا به دلیل بهبود ثبات غشا و کاهش آسیب به آن منجر به کاهش نشت یونی در شرایط تنش نسبت به شرایط بدون مایکوریزا می‌شود (۲۱) که با یافته‌های این پژوهش مطابقت داشت. از طرفی افزایش مقاومت غشا با مایه‌کوبی مایکوریزا را می‌توان به افزایش محتوای آب سلول و جذب فسفر نسبت داد (۱۶، ۱۷).

شاخص سبزینگی: درباره شاخص سبزینگی، یافته‌های به دست آمده از آنالیز واریانس نشان داد که اثر ساده مایکوریزا بر میزان سبزینگی گیاه در سطح یک درصد معنی‌دار شده در حالی‌که اثر ساده سطوح تنش خشکی و برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی بر این صفت معنی‌دار نشد (جدول ۱). برون‌داد مقایسه میانگین‌ها نشان داد که، میزان شاخص سبزینگی مربوط به تیمار با مایکوریزا با افزایش ۱/۰۹ برابر نسبت به تیمار بدون مایکوریزا بود (جدول ۲). کاهش میزان شاخص سبزینگی یا کلروفیل برگ در این پژوهش با افزایش سطوح تنش می‌تواند به علت کاهش پایداری غشا (نشت الکترولیت) و آسیب به پروتئین‌ها (۹) در نهال‌ها باشد. مهم‌ترین اثر خشکی در بیش‌تر گیاهان، تخریب کلروپلاست و کاهش محتوای کلروفیل برگ بود (۷). کاهش میزان کلروفیل برگ در شرایط تنش خشکی را می‌توان به دلایلی هم‌چون ازدیاد میزان آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل (کلروفیلاز) نسبت داد (۸). کاهش میزان کلروفیل در شرایط تنش مربوط به افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن سلول، که موجب پراکسیداسیون و در نهایت تجزیه رنگیزه‌ها می‌شود، می‌باشد (۸). در حالی‌که با کاربرد مایکوریزا شاخص سبزینگی نسبت به گیاهان بدون مایکوریزا در همه سطوح تنش افزایش داشت. کاربرد مایکوریزا علاوه بر بهبود جذب آب و مواد غذایی (۲۲)، سبب حفظ یکپارچگی غشا، جلوگیری از آسیب به کلروپلاست، افزایش میزان کلروفیل برگ و به تبع آن میزان فتوسنتز می‌شود (۱٤) که این یافته‌ها با یافته‌های پژوهش کنونی هم راستا بود.

نرخ خالص فتوسنتز: درباره نرخ خالص فتوسنتز نیز برون‌داد آنالیز واریانس نشان داد که، اثر ساده مایکوریزا و سطوح تنش خشکی در سطح یک درصد و برهم‌کنش آن‌ها بر این صفت در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). برون‌داد مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی نشان داد که، نرخ خالص فتوسنتز مربوط به تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش افزایش ٤/۰٤ برابری نسبت به تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید داشت (شکل ۳). یافته‌ها نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی نرخ خالص فتوسنتز کاهش می‌یابد. تنش خشکی به دلیل نقش فراگیری که در جذب عناصر غذایی، تبادل انرژی و غلظت گاز CO_2 بین‌سلولی گیاه دارد، بر میزان فتوسنتز تأثیرگذار است و سبب کاهش آن

می‌شود، هم‌چنین بسته شدن روزنه‌ها سبب افزایش دمای برگ و اختلال در فتوسنتز می‌گردد (۷). اما نهال‌های مایه‌کوبی شده با قارچ مایکوریزا در همه سطوح خشکی نسبت به گیاهان مایه‌کوبی نشده دارای نرخ خالص فتوسنتز بیش‌تری بودند. همزیستی مایکوریزایی با افزایش غلظت CO_2 بین سلولی و هم‌چنین با جذب فسفر به واسطه افزایش رشد میسیلیوم‌ها در فضایی دورتر، جذب مواد غذایی سیستم ریشه‌ای را بهبود می‌بخشد، به صورتی‌که گیاه از طریق جذب فسفر و نیتروژن، فتوسنتز را افزایش می‌دهد (۱۷، ۲۲). به صورت کلی اولین پاسخ گیاهان به تنش خشکی بستن روزنه‌ها می باشد تا هدررفت آب کاهش یابد، کاربرد قارچ مایکوریزا سبب افزایش هدایت روزنه‌ای از طریق بهبود جذب آب توسط هیف‌های انتهایی قارچ‌ها و افزایش تعرق شده و هم‌چنین با افزایش هدایت روزنه‌ای میزان دی‌اکسید کربن قابل دسترس برای سلول‌های مزوفیل جهت استفاده در فتوسنتز بیش‌تر شده و در نتیجه ورود ماده خام اولیه مورد نیاز در فرآیند فتوسنتز، میزان نرخ خالص فتوسنتز را افزایش می‌دهد (۱٤، ۱۸).

هدایت روزنه‌ای: با توجه به برون‌داد تجزیه واریانس داده‌های هدایت روزنه‌ای مشاهده شد که هم اثرهای ساده و هم برهم‌کنش مایکوریزا و سطوح تنش‌خشکی در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین برهم‌کنش نشان داد، هدایت روزنه‌ای مربوط به تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش دارای افزایش ۱۰/۳ برابری تسبت به تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید بود و میان سطوح تنش ملایم و متوسط چه با مایکوریزا و چه بدون مایکوریزا تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ٤). یافته‌های این پژوهش نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی، هدایت روزنه‌ای در نهال‌های مایکوریزایی و غیرمایکوریزایی کاهش می‌یابد، در حالی‌که در گیاهان مایه‌کوبی شده با قارچ مایکوریزا در همه سطوح تنش خشکی هدایت روزنه‌ای به‌صورت معنی‌داری نسبت به گیاهان مایه‌کوبی نشده افزایش یافت. بستن روزنه‌ها به دلیل تجمع اسید آبسیزیک در سلول‌های محافظ روزنه در اثر انتقال پیام از ریشه به برگ در شرایط تنش خشکی می‌باشد و جزو اولین پاسخ های گیاه به تنش خشکی می‌باشد، در واقع گیاهان نسبت به تنش خشکی از طریق بستن سریع روزنه‌ها، تعرق را کاهش و از تلفات بیش‌تر آب جلوگیری به عمل می‌آورند، همزیستی مایکوریزایی، با افزایش حساسیت روزنه‌ها سبب بهبود جذب آب و پتانسیل آماس برگ، کنترل منافذ روزنه‌ای، تعرق و هم‌چنین جذب بهتر فسفر (١٦، ١٧) تحمل به تنش خشکی را در گیاهان افزایش می‌دهد (١٤، ١٨).

سرعت تعرق: هم‌چنین با توجه به برون‌داد تجزیه واریانس سرعت تعرق، اثرهای ساده مایکوریزا و سطوح تنش خشکی در سطح یک درصد معنی‌دار شد و برهم‌کنش آن‌ها نیز بر این صفت در سطح پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). برون‌داد مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی نشان داد سرعت تعرق مربوط به تیمار با مایکوریزا در سطح بدون تنش ٦/۰۲ برابر نسبت به تیمار بدون مایکوریزا در سطح تنش شدید افزایش داشت و مابین سطوح تنش متوسط و شدید چه با مایکوریزا چه بدون مایکوریزا تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۵). با توجه به یافته‌های به دست آمده از این پژوهش نهال‌های غیر مایکوریزایی در برابر افزایش سطح تنش خشکی با بستن روزنه‌ها و کاهش نرخ تعرق، سبب مقاومت نهال‌ها شده، اما نهال‌های مایه‌کوبی شده با قارچ مایکوریزا نرخ تعرق بیش‌تری نسبت به نهال‌های غیر مایکوریزایی داشتند که دلیل آن را می‌توان به افزایش میزان فتوسنتز در نهال‌های مایکوریزایی نسبت داد که یافته‌های این پژوهش با یافته‌های پژوهش

حیدری و کریمی (۲۰۱۳) هم راستا بود (۲۰). تنش خشکی سبب کاهش جذب آب توسط ریشه گیاه، کاهش تعرق، کاهش هدایت روزنه‌ای و فتوسنتز و در نهایت به‌هم خوردن تعادل هورمونی در گیاه می‌شود، زمانی که جذب آب در گیاه کاهش می‌یابد به تبع آن سطح برگ نیز کم شده و تعرق نیز کاهش پیدا می‌کند (٦). از اثرهای همزیستی مایکوریزایی، ایجاد تغییر در هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه است، به‌نحوی‌که مشاهده شده، در شرایط تنش خشکی، هدایت روزنه‌ای و تعرق در گیاهانی که دارای همزیستی مایکوریزایی هستند، نسبت به گیاهان غیرمایکوریزایی افزایش می‌یابد. افزایش میزان تعرق را می‌توان به افزایش فتوسنتز در گیاهان مایه‌کوبی شده با قارچ مایکوریزا در شرایط تنش خشکی نسبت داد (۲۱).

غلظت CO_2 بین‌سلولی: درباره غلظت دی‌اکسیدکربن بین سلولی نیز برون‌داد تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده مایکوریزا در سطح یک درصد و اثر ساده سطوح تنش‌خشکی بر غلظت CO_2 بین‌سلولی، در سطح پنج درصد معنی‌دار شد، اما برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی بر این صفت بی‌معنی شد (جدول ۱). برون‌داد مربوط به مقایسه میانگین‌ها نشان داد که غلظت دی‌اکسیدکربن بین سلولی در تیمار مایکوریزا نسبت به تیمار بدون مایکوریزا ۱/۱۵ برابر افزایش داشت. هم‌چنین برون‌داد مقایسه میانگین مشخص کرد که غلظت CO_2 بین‌سلولی در سطح بدون تنش دارای افزایش ۱/۲ برابری نسبت به سطح تنش شدید بود و مابین سطوح تنش شاهد، ملایم، و متوسط تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲). یافته‌های این پژوهش نشان داد با افزایش سطوح تنش چه با کاربرد مایکوریزا و چه بدون کاربرد آن، غلظت CO_2 بین سلولی کاهش می‌یابد، اما کاربرد مایکوریزا سبب افزایش این صفت در گیاهان مایکوریزایی در همه سطوح تنش خشکی نسبت به نهال‌های غیرمایکوریزایی شد. دمای هوا از فاکتورهای مهم اکولوژیکی بود که سرعت جذب CO_2 را تعیین می‌کند، چنان‌چه در شدت دمای بالا میزان انتشار دی‌اکسیدکربن از هوا به دلیل بسته شدن روزنه‌ها به داخل سلول کاهش می‌یابد و این مهم دلیل اصلی جذب CO_2 به روزنه‌ها است (٦). قارچ مایکوریزا سبب افزایش هدایت روزنه‌ای و به تبع آن فتوسنتز در گیاهان شده و در فرآیند فتوسنتز جهت تامین انرژی ATP و NADPH مصرف می‌شود که سبب بازسازی CO_2 می‌شود و به همین دلیل میزان دی‌اکسیدکربن بین سلولی در نهال‌های مایکوریزایی بیش‌تر است (۱۸).

دمای برگ: برون‌داد تجزیه واریانس داده‌های دمای برگ نشان داد که اثر ساده مایکوریزا بر دمای برگ معنی‌دار نبوده ولی تأثیر سطوح تنش بر این صفت در سطح پنج درصد معنی‌دار شد. هم‌چنین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی بر دمای برگ معنی‌دار نبود (جدول ۱). برونداد مقایسه میانگین‌ها نشان داد که دمای برگ در تیمار سطح تنش شدید دارای افزایش ۱/۰٦ برابری نسبت به تیمار سطح بدون تنش بود ولی مابین سطوح تنش ملایم، متوسط و تنش شدید و هم‌چنین سطوح شاهد، تنش ملایم و تنش متوسط اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). یافته‌ها نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی میزان دمای برگ افزایش می‌یابد، اما در نهال‌های مایه‌کوبی شده با قارچ مایکوریزا میزان دمای برگ افزایش بیش‌تری نسبت به نهال‌های مایه‌کوبی نشده در همه سطوح تنش داشت. این افزایش دما ناشی در شرایط تنش خشکی به دلیل بسته شدن روزنه‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای و کاهش تعرق می‌باشد و در گیاهان مایه‌کوبی شده با قارچ مایکوریزا این افزایش دما به دلیل افزایش هدایت روزنه‌ای و سرعت فتوسنتز بود که این با یافته‌های حسنی و همکاران (۲۰۰۳) مطابقت دارد (۱۹).

جدول ۱- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) ویژگی‌های فیزیولوژیک و زی‌توده ریشه گونه پالونیا در شرایط خشکی و مایه‌کوبی مایکوریزا.

Table 1. Analysis of variance (mean squares) of physiological traits and root weight of Paulownia under drought stress as inoculated by mycorrhiza.

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی df	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	شاخص سبزینگی Chlorophyll Index	نرخ خالص فتوسنتز Net rate of photosynthesis	هدایت روزنه‌ای stomatal conduction	سرعت تعرق Sweat rate	غلظت CO_2 بین‌سلولی Intercellular CO_2 concentration	وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تر ریشه Root fresh weight	دمای برگ leaf temperature
مایکوریزا mycorrhiza	1	82.1^{**}	54.4^{**}	34.8^{**}	0.024^{**}	11.1^{**}	6468.1^{**}	38.7^{**}	262.6^{**}	5.7^{ns}
تنش Stress	3	125.8^{**}	2.5^{ns}	28.1^{**}	0.008^{**}	10.1^{**}	2971.4^{*}	90.4^{**}	834.9^{**}	4.7^{*}
مایکوریزا × تنش Mycorrhiza× Stress	3	3.1^{ns}	1.7^{ns}	2.9^{*}	0.001^{**}	0.566^{*}	1150.7^{ns}	9.1^{*}	26.6^{ns}	0.182^{ns}
خطا error	16	9.1	2.09	0.617	0.001	0.209	557.9	1.7	9.2	1.5
ضریب تغییرات (درصد) Std. Deviation %	24	0.10	0.06	0.47	0.73	0.58	0.14	0.48	0.46	0.03

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم اختلاف معنی‌دار، اختلاف معنی‌دار به ترتیب در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ درصد

^{ns}, * and ** indicate insignificance and significance at the statistical level of 5 and 1%, respectively

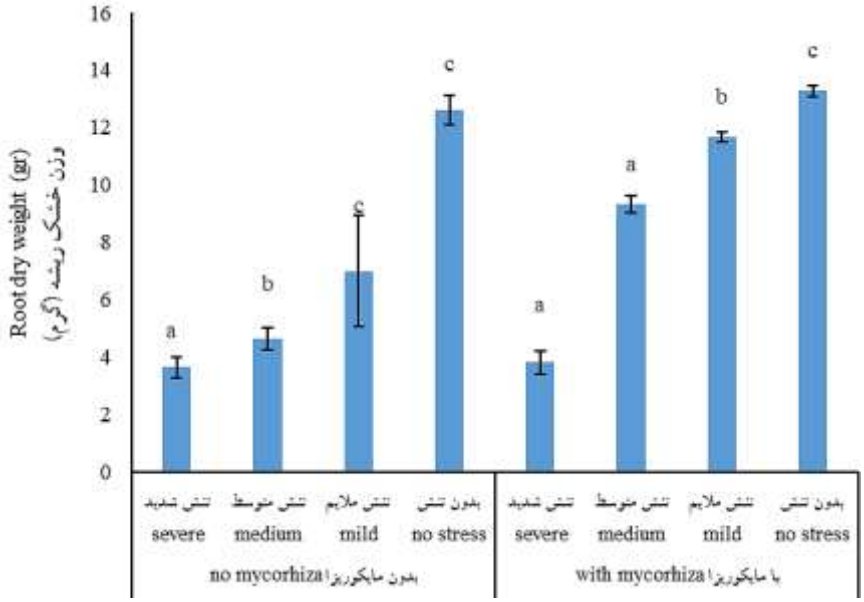
جدول ۲- مقایسه میانگین (خطا معیار ± میانگین) اثرهای ساده تنش خشکی و مایکوریزا ویژگی‌های فیزیولوژیک و وزن ریشه گونه پالونیا.

Table 2. Mean comparison (Mean ± SE) of the effect of drought stress and mycorrhiza on some physiological traits and root weight of Paulownia.

فاکتورها Factor	تیمار Treatment	نشت الکترولیت (میکروزیمنس) Electrolyte leakage (µs)	شاخص سبزینگی Chlorophyll Index	غلظت CO_2 بین‌سلولی (میکرومول بر مول) Intercellular CO_2 concentration (µmol/mol)	وزن تر ریشه (گرم) Root fresh weight (gr)	دمای برگ (سانتی‌گراد) Leaf temperature (°C)
تنش خشکی drought stress	شاهد No stress	$44.4^{b} \pm 1.17$	$34.2^{a} \pm 0.665$	$258.3^{a} \pm 12.9$	$\pm 1.8\ 45.2^{a}$	$34.4^{b} \pm 0.61$
	ملایم mild	$47.0^{b} \pm 1.34$	$33.2^{a} \pm 0.93$	$240.1^{a} \pm 8.0$	$31.4^{b} \pm 2.63$	$35.4^{ab} \pm 0.482$
	متوسط medium	$51.3^{a} \pm 1.61$	$33.0^{a} \pm 0.92$	$235.2^{a} \pm 8.2$	$24.1^{c} \pm 2.3$	$35.7^{ab} \pm 0.484$
	شدید severe	$54.8^{a} \pm 1.46$	$32.7^{a} \pm 0.96$	$204.7^{b} \pm 18.1$	$17.8^{d} \pm 0.596$	$36.5^{a} \pm 0.419$
مایکوریزا mycorrhiza	با مایکوریزا With mycorrhiza	$47.5^{b} \pm 1.38$	$34.8^{a} \pm 0.31$	$251.04^{a} \pm 7.7$	$32.9^{a} \pm 3.1$	$36.0^{a} \pm 0.315$
	بدون مایکوریزا No mycorrhiza	$51.2^{a} \pm 1.46$	$31.8^{b} \pm 0.50$	$218.2^{b} \pm 10.0$	$26.3^{b} \pm 3.2$	$35.0^{a} \pm 0.445$

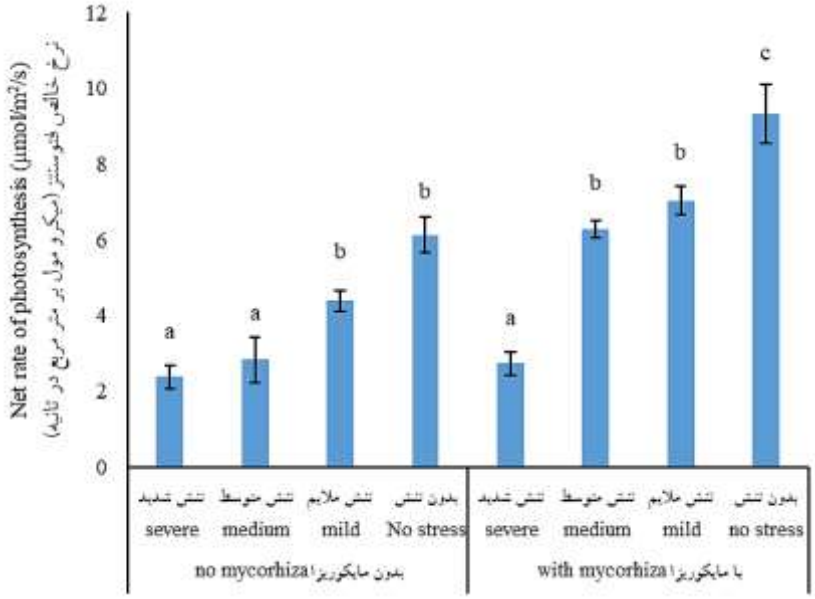
حروف مشابه در هر ستون برای هر فاکتور نشانه تفاوت غیرمعنی‌دار بین آن‌ها است

The same letters in columns for each factor indicate non-significant difference



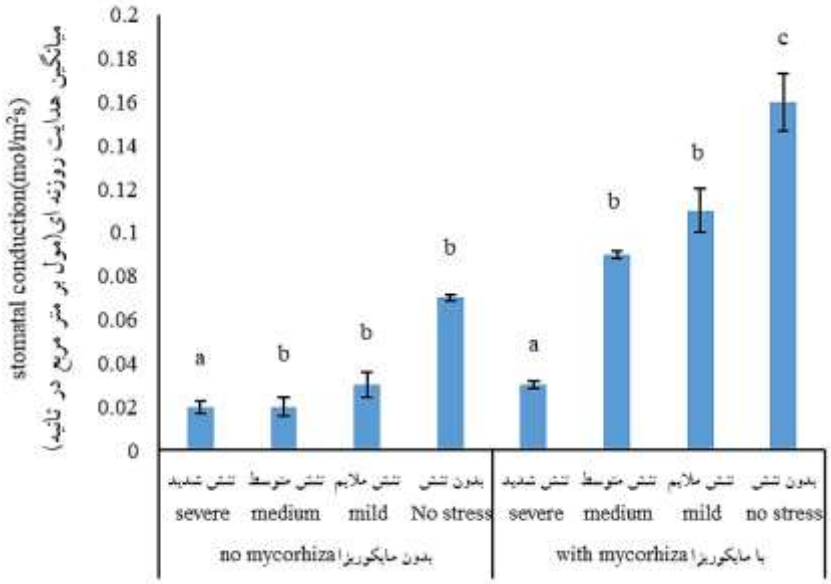
شکل ۲- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی بر وزن خشک ریشه.

Fig. 2. Interaction effect of drought stress and mycorrhiza on root dry weight.



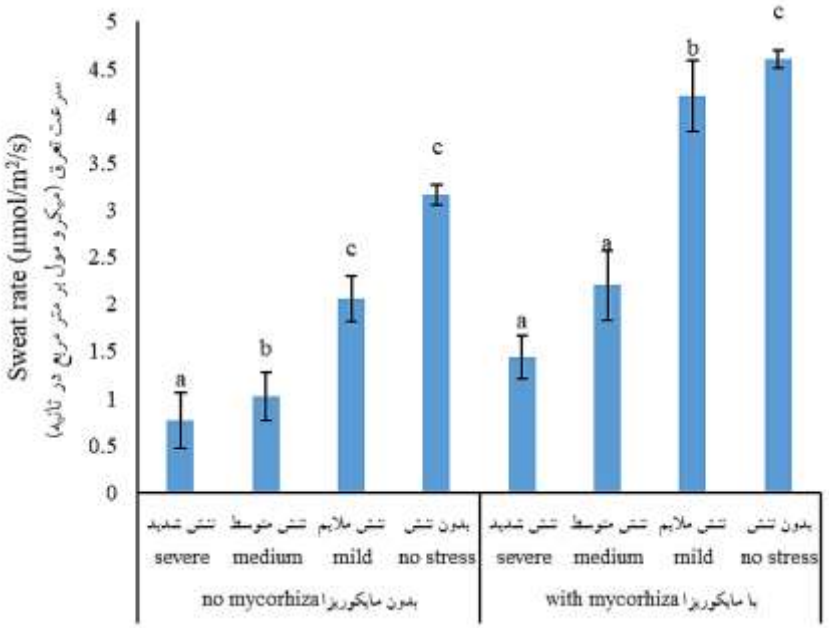
شکل ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی بر نرخ خالص فتوسنتز.

Fig. 3. Interaction effect of drought stress and mycorrhiza on net rate of photosynthesis.



شکل ٤- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی بر هدایت روزنه‌ای.

Fig. 4. Interaction effect of drought stress and mycorrhiza on net rate of stomatal conductance.



شکل ٥- مقایسه میانگین برهم‌کنش مایکوریزا و تنش خشکی بر سرعت تعرق.

Fig. 5. Interaction effect of drought stress and mycorrhiza on net rate of transpiration rate.

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش جاری نشان داد که با افزایش سطح خشکی، همه ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده به جز نشت الکترولیت، سرعت تعرق و دمای برگ روند کاهشی داشتند. با کاربرد قارچ مایکوریزا تحت تنش خشکی، تبادل گازهای فتوسنتزی شامل (نرخ خاص فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، غلظت CO_2 بین سلولی و سرعت تعرق)، شاخص سبزینگی، دمای برگ و وزن زی‌توده ریشه در نهال پالونیا فوروتونی افزایش و نشت الکترولیت کاهش یافت. با توجه به یافته‌های پژوهش‌های دیگر به نظر می‌رسد که قارچ مایکوریزا در کاهش آسیب به کلروپلاست و بهبود تبادلات گازی فتوسنتز اثر مهمی داشته و منجر به افزایش زنده‌مانی در گیاهان مایه‌کوبی شده می‌شود. هم‌چنین قارچ مایکوریزا با کاهش آسیب به کلروفیل سبب افزایش پایداری غشا و به تبع آن کاهش نشت الکترولیت شده و مقاومت گیاه را در برابر تنش خشکی بالا برد. براساس نتایج به‌دست آمده می‌توان کاربرد قارچ مایکوریزا را به عنوان یک راهکار پایدار در جهت کاهش اثرهای منفی خشکی، ایجاد مقاومت و بهبود شرایط فیزیولوژیکی گیاهان تحت تنش خشکی معرفی نمود.

منابع

1. Boutasknit, A., Baslam, M., Ait-El-Mokhtar, M., Anli, M., Ben-Laouane, R., Douira, A., El Modafar, C., Mitsui, T., Wahbi, S., & 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), 80.
2. Zamani Kebrabadi, B., Hojjati, S. M., Rejali, F., Esmaeili Sharif, M., & Saboohi, R. (2022). Investigation of the effect of mycorrhizal fungi on seedlings *Elaeagnus angustifolia* L. under drought stress under controlled conditions. *Forest Research and Development*, 7 (4), 623-638.
3. Osmolovskaya, N., Shumilina, J., Kim, A., Didio, A., Grishina, T., Bilova, T., Keltsieva, O. A., Zhukov, V., Tikhonovich, I., & Tarakhovskaya, E. (2018). Methodology of drought stress research: Experimental setup and physiological characterization. *International Journal of Molecular Sciences*, 19 (12), 4089.
4. Jabborova, D., Annapurna, K., Azimov, A., Tyagi, S., Pengani, K. R., Sharma, P., Vikram, K. V., Poczai, P., Nasif, O., Ansari, M. J., & Sayyed, R. Z. (2022). Co-inoculation of biochar and arbuscular mycorrhizae for growth promotion and nutrient fortification in soybean under drought conditions. *Frontier of Plant Science*, 13, 947547. **doi: 10.3389/ fpls.2022.947547.**
5. Gregory, P. (2007). Plant roots. Wiley Online Library.
6. Pinheiro, C., & Chaves, M. (2011). Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? *Journal of Experimental Botany*, 62 (3), 869-882.
7. Augé, R. M., Toler, H. D., & Saxton, A. M. (2015). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alters stomatal conductance of host plants more under drought than under amply watered conditions: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, 25 (1), 13-24.
8. Konôpka, B., Noguchi, K., Sakata, T., Takahashi, M., & Konôpková, Z. (2007). Effects of simulated drought stress on the fine roots of Japanese cedar (Cryptomeria japonica) in a plantation forest on the Kanto Plain, eastern Japan. *Journal of Forest Research*, 12 (2), 143-151. **https:// doi.org/10.1007/s10310-006-0257-0.**
9. Saraswathi, S. G., & Paliwal, K. (2011). Drought induced changes in growth, leaf

gas exchange and biomass production in *Albizia lebbeck* and *Cassia siamea* seedlings. *Journal of Environmental Biology*, 32 (2), 173-178.
10. Chen, W., Meng, P., Feng, H., & Wang, C. (2020). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological performance of *Catalpa bungei* CA Mey. under drought stress. *Forests*, 11 (10), 1117.
11. Smith, S. E., & Read, D. J. (2010). Mycorrhizal symbiosis. Academic press.
12. Amiri, R., Nikbakht, A., & Etemadi, N. (2015). Alleviation of drought stress on rose geranium [Pelargonium graveolens (L.) Herit.] in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. *Scientia Horticulturae*, 197, 373-380.
13. Gupta, M. M. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi: the potential soil health indicators. *Soil health*, 183-195.
14. Huang, D., Ma, M., Wang, Q., Zhang, M., Jing, G., Li, C., & Ma, F. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced drought resistance in apple by regulating genes in the MAPK pathway. *Plant Physiology and Biochemistry*, 149, 245-255.
15. Chávez, D., Rivas, G., Machuca, Á., Santos, C., Deramond, C., Aroca, R., & Cornejo, P. (2023). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal and Endophytic Fungi to Drought Tolerance in *Araucaria araucana* Seedlings. *Plants*, 12 (11), 2116.
16. Ren, A. T., Zhu, Y., Chen, Y. L., Ren, H. X., Li, J. Y., Kay Abbott, L., & Xiong, Y. C. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungus alters root-sourced signal (abscisic acid) for better drought acclimation in *Zea mays* L. seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 167, 103824. **https://doi.org/ https://doi.org/ 10.1016/ j.envexpbot. 2019.103824.**
17. Bouskout, M., Bourhia, M., Al Feddy, M. N., Dounas, H., Salamatullah, A. M., Soufan, W., Nafidi, H. A., & Ouahmane, L. (2022). Mycorrhizal fungi inoculation improves *Capparis spinosa's* yield, nutrient uptake and photosynthetic efficiency under water deficit. *Agronomy*, 12 (1), 149.
18. Rychter, A. M., & Rao, I. (2005). Role of phosphorus in photosynthetic carbon metabolism. *Handbook of Photosynthesis*, 2, 123-148.
19. Hassani, A., Omidbagi, R., & Abad, H. H. S. (2004). Study of some drought resistance indices in basil (*Ocimum basilicum*). *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 10 (4), 65. **https://www.magiran.com/ paper/177005.**
20. Heidari, M., & Karami, V. (2013). Effects of water stress and different mycorrhiza species on grain yield, yield components, chlorophyll content and biochemical components of sunflower. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 6 (1), 17-26.
21. Fattahi, M., Mohammadkhani, A., Shiran, B., Baninasab, B., & Ravash, R. (2021). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis with different pistachio rootstocks in salinity stress condition. *Journal of Plant Process and Function*, 9 (4), 309-326. **https://www.magiran.com/paper/2213 220.**
22. Zarik, L. (2016). Use of arbuscular mycorrhizal fungi to improve the drought tolerance of *Cupressus atlantica* G. Comptes Rendus Biologies.
23. Nodeh, M., Aliarab, A., & Sadati, S. e. (2021). Effect of foliar spray of growth regulators on survival and growth of *Paulownia fortunei* seedlings under drought stress. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 28 (3), 37-51. **https://doi.org/10.22069/ jwfst.2021.18866.1917.**
24. Zhu, Z. H., Chao, C. J., Lu, X. Y., & Xiong, Y. G. (1986). Paulownia in China: cultivation and utilization. International Development Research Centre.
25. Sheykh, H., Ali-Arab, A. R., & Sadati, S. E. (2017). Effect of salinity on seed germination, growth and survival of *paulownia fortunei* seedlings under laboratory and greenhouse conditions. *Forest and Wood Products*,

70 (4), 649-658. **https://doi.org/10.22059/jfwp.2017.238432.862.**

26. Hashish, K. I., Mazhar, A. A. E. H., & Abdel-Aziz, N. G. (2023). Chemical and Physiological Effect of Mycorrhiza and yeast on *Paulownia* Seedlings Grown under Saline Condition. *Egyptian Journal of Chemistry*, 66 (8), 425-438. **https://doi.org/10.21608/ejchem.2022.168402.7087.**
27. Khaleghi, A., Naderi, R., Brunetti, C., Maserti, B. E., Salami, S. A., & Babalar, M. (2019). Morphological, physiochemical and antioxidant responses of *Maclura pomifera* to drought stress. *Scientific Reports*, 9 (1), 19250. **https://doi.org/10.1038/s41598-019-55889-y.**
28. Sanjari, M., Siroosmehr, A., & Fakheri, B. (2015). The effects of drought stress and humic acid on some physiological characteristics of roselle. *Journal of Crops Improvement*, 17 (2), 403-414. **https://doi.org/10.22059/jci.2015.55189.**
29. Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (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 (1), 158-IN118. **https://doi.org/ https:// doi.org/ 10.1016/S0007-1536 (70) 80110-3.**
30. Sairam, R. K., & Saxena, D. C. (2000). Oxidative Stress and Antioxidants in Wheat Genotypes: Possible Mechanism of Water Stress Tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 184 (1), 55-61. **https://doi.org/https:// doi.org/ 10.1046/ j.1439-037x.2000.00358.x.**
31. Vouillot, M. O., Huet, P., & Boissard, P. (1998). Early detection of N deficiency in a wheat crop using physiological and radiometric methods. *Agronomie*, 18 (2), 117-130. **https://doi.org/10.1051/agro:19980202**.