Research Article

Iranian Journal of Forest and Range Protection Research DOI: 10.22092/ijfrpr.2024.365107.1619
Vol. 22, No. 1, Page 109-126 (2024)

Evaluation of symbiosis of some poplar species with arbuscular fungi and mycorrhizal inoculation effects on one-year-old *Populus nigra* plants

Azadeh Salehi[1*], Mohammad Matinizadeh [2] and Elham Nouri[3]

1*- Corresponding author, Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: az.salehi@rifr-ac.ir
2- Associate Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
3- Research Expert, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 24.02.2024 Accepted: 07.04.2024

Abstract

Background and objectives: Poplars are important tree species in poplar plantations and agroforestry programs due to their fast growth, high biomass production, and ecological adaptation. On the other hand, arbuscular mycorrhizal fungi can have a good symbiosis with different poplar species. With this symbiosis, growth parameters, biomass production, absorption of water and nutrients, as well as the resistance of poplars to environmental stress, will be increased. Understanding the relationship between mycorrhizas and poplars and how mycorrhizas affect the growth and nutrition of such species may contribute to producing stronger and healthier plants and more sustainable practices in the future.

Methodology: In this study, first of all, the root mycorrhizal colonization percentage of some poplar species (available in the poplar research collection of Alborz Research Center) with arbuscular mycorrhizal fungi was investigated. Then, considering the high percentage of mycorrhizal symbiosis of *Populus nigra* "62/154" trees and the importance of this clone as a high-yielding poplar clone, widely used in poplar plantations in different parts of the country, symbiotic fungi with this clone were identified through the morphological properties of spores in the rhizosphere soil, and then the identified mycorrhizal fungi were used to produce mycorrhizal plants. Then, poplar cuttings were collected from the Alborz Research Center and planted in pots filled with clay-loam soil. The pots were kept outdoors during the experiment. At the time of planting, mycorrhizal inoculum was applied around each cutting. After that, under an experimental layout consisting of a completely randomized design, some morphophysiological (growth parameters, biomass production, and physiological parameters of leaves) and biochemical (macro and micro nutrients of root, stem, and leaf) responses of one-year-old mycorrhizal and non-mycorrhizal poplar plants were investigated.

Results: The results showed that the percentage of root mycorrhizal colonization of different poplar species was different. The highest percentage of root mycorrhizal colonization was observed in *P. nigra* "62/154" and *P. euphratica*, and the lowest percentage in *P. deltoides* "69/55". In the soil samples collected from the rhizosphere of *P. nigra* "62/154", five species of arbuscular mycorrhizal fungi, including *Claroideoglomus luteum*, *Diversispora tortuosa*, *Glomus aggregatum*, *Septoglomus constrictum*, and *Scutellospora heterogama*, were identified. The results demonstrated that mycorrhizal treatment had a significant positive effect ($P < 0.01$)

on growth parameters (diameter and stem length), biomass production (root and shoot dry weight and total dry weight), relative water content of leaves, and nutrient concentrations (nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, iron, zinc, and copper) of some plant tissues. Likewise, the content of proline and soluble sugars and the activity of antioxidant enzymes in leaves of mycorrhizal plants increased compared to non-mycorrhizal plants.
Conclusion: The high symbiosis percentage of different poplar species with arbuscular mycorrhizal fungi in natural conditions and the positive effect of mycorrhizal symbiosis on one-year-old poplar plants show that, considering the importance of the role of soil microbial communities in plant nutrition, growth, and protection against environmental stresses, investigating the biological interactions between soil microorganisms and poplars, especially in the early stages of growth, can be used to produce healthy and strong plants for poplar plantations.

Keywords: Growth, Mycorrhizal colonization, Nutrients, Physiological parameters

ارزیابی همزیستی برخی گونه‌های صنوبر با قارچ‌های آربسکولار و تأثیر همزیستی میکوریزی بر نهال‌های یکساله صنوبر تبریزی

آزاده صالحی[۱*]، محمد متینی‌زاده[۲] و الهام نوری[۳]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پست‌الکترونیک: az.salehi@rifr-ac.ir

۲- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۳- کارشناس پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹

چکیده

سابقه و هدف: گونه‌های مختلف جنس صنوبر به‌دلیل رشد سریع، تولید زی‌توده بالا و سازگاری خوب با مناطق اقلیمی مختلف، گونه‌های درختی مهمی در برنامه‌های زراعت چوب هستند. از سوی دیگر، قارچ‌های میکوریز آربسکولار می‌توانند همزیستی خوبی با گونه‌های مختلف صنوبر برقرار کنند که درنتیجه این همزیستی متغیرهای رشد، تولید زی‌توده، جذب آب و عناصر غذایی و مقاومت صنوبرها نسبت به تنش‌های محیطی افزایش می‌یابد. بنابراین، بررسی فعل‌وانفعالات بین درختان صنوبر و جامعه میکروبی خاک، همچنین بررسی تأثیر همزیستی میکوریزی در مراحل اولیه رشد صنوبرها، می‌تواند زمینه‌ای برای تولید نهال‌های قوی‌تر و سالم‌تر با پیامدهای مطلوب احتمالی برای رشد آنها در سال‌های آینده را فراهم کند.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، ابتدا درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه برخی گونه‌های صنوبر (موجود در کلکسیون تحقیقاتی صنوبر در ایستگاه تحقیقاتی البرز) با قارچ‌های میکوریز آربسکولار در شرایط طبیعی بررسی شد. با توجه به درصد بالای همزیستی میکوریزی صنوبر تبریزی- رقم سالاری و اهمیت این رقم به‌عنوان یک صنوبر پرمحصول در برنامه زراعت چوب مناطق خارج از شمال، قارچ‌های همزیست با این رقم صنوبر از طریق ویژگی‌های مورفولوژیکی اسپورهای موجود در خاک ریزوسفر شناسایی و قارچ‌های شناسایی‌شده برای تولید نهال‌های میکوریزی استفاده شد. در مرحله بعد، قلمه‌های این رقم صنوبر در گلدان‌های پرشده با خاکی با بافت لومی- رسی کاشته شدند. در زمان کاشت قلمه‌ها، مایه تلقیح میکوریزی در اطراف هر قلمه اضافه شد. پس از یک دوره رویش، زنده‌مانی و ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی (متغیرهای رشد و تولید زی‌توده و متغیرهای فیزیولوژیکی برگ) و بیوشیمیایی (عناصر غذایی اصلی و کمیاب اندام‌های ریشه، ساقه و برگ) نهال‌های یکساله میکوریزی و غیرمیکوریزی صنوبر مقایسه و بررسی گردید.

نتایج و یافته‌ها: نتایج این مطالعه نشان داد، درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه گونه و کلن‌های مختلف صنوبر با قارچ‌های میکوریز آربسکولار متفاوت و بیشترین درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه مربوط به گونه‌های تبریزی- رقم سالاری (*Populus nigra* "62/154") و پده (*P. euphratica*) و کمترین درصد مربوط به گونه "69/55" *P. deltoides* بود. در نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از ناحیه ریزوسفر درختان صنوبر تبریزی- رقم سالاری، پنج گونه قارچ میکوریز آربسکولار شامل *Glomus aggregatum*، *Diversispora tortuosa*، *Scutellospora heterogama*، *Septoglomus constrictum* و *Claroideoglomus luteum* شناسایی شد. نتایج تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نشان داد، تیمار میکوریزی تأثیر مثبت معنی‌داری ($P <$ ۰/۰۱) بر متغیرهای رشد (قطر و طول ساقه)، تولید زی‌توده (زی‌توده خشک ریشه و اندام هوایی و زی‌توده خشک کل)، محتوای نسبی آب برگ و غلظت عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، آهن، روی و مس) برخی اندام‌های گیاهی نهال‌های صنوبر داشت. همچنین، در نهال‌های میکوریزی صنوبر، افزایش معنی‌دار میزان پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برگ نسبت به نهال‌های غیرمیکوریزی مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: درصد بالای همزیستی میکوریزی گونه‌های مختلف صنوبر با قارچ‌های میکوریزی در شرایط طبیعی و تأثیر مثبت همزیستی میکوریزی بر نهال‌های یکساله صنوبر تبریزی نشان می‌دهد، با توجه به اهمیت نقش جوامع میکروبی خاک بر تغذیه، رشد و حفاظت گیاه در برابر تنش‌های محیطی، با بررسی فعل‌وانفعالات زیستی بین میکروارگانیسم‌های خاک و صنوبرها به‌ویژه در مراحل اولیه رشد، می‌توان برای تولید نهال‌های سالم و قوی در راستای برنامه‌های زراعت چوب بهره برد.

واژه‌های کلیدی: رشد، عناصر غذایی، کلونیزاسیون میکوریزی، متغیرهای فیزیولوژیکی

مقدمه

صنوبرها (*Populus* spp.) با تنوع بالا و گسترش اکولوژیکی وسیع (Regier *et al*., 2009) و تأمین مواد اولیه برخی صنایع چوبی، از نظر اقتصادی گونه‌های مهمی هستند (Xiao *et al*., 2009). صنوبرها به‌دلیل رشد سریع، تولید زی‌توده بالا، سازگاری خوب (Zhang *et al*., 2020) و توزیع گسترده در مناطق اقلیمی مختلف (Salehi *et al*., 2022; Sixto *et al*., 2005)، در جهان به‌عنوان گونه درختی مهمی در پروژه‌های زراعت چوب، جنگل‌کاری و اگروفارستری مورد توجه می‌باشند (Jansson & Douglas, 2007). همچنین این گونه درختی تندرشد با قابلیت تثبیت خاک سطحی و کاهش فرسایش بادی و آبی خاک شناخته شده است (Ciadamidaro *et al*., 2014; Domíinguez *et al*., 2009). در ایران، صنوبرها از دیرباز توسط روستاییان در بیشتر مناطق کشور کشت شده‌اند و منبع اصلی تأمین چوب و مواد اولیه بسیاری از صنایع بوده‌اند. از بین گونه‌های جنس صنوبر، دو گونه سفیدپلت (*P. caspica*) و پده (*P. euphrotica*) از گونه‌های بومی به‌ترتیب در مناطق شمالی و جنوب‌غربی کشور هستند که از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی از ارزش‌های بالایی برخوردارند. گونه‌های دیگر مانند تبریزی (*P. nigra*) و کبوده (*P. alba*) از گذشته‌های بسیار دور در ایران کشت‌وکار شده‌اند و درواقع گونه‌های بومی‌شده ایران هستند. سایر گونه‌های صنوبر مانند *P. deltoides* و *P. euramericana* وارداتی بوده و در نواحی شمالی ایران کشت می‌شوند (Salehi *et al*., 2018).

قارچ‌های میکوریز آربسکولار با پراکنش وسیع، جزو مهمی از بوم‌سازگان خاک هستند. آنها می‌توانند با ریشه گیاهان عالی همزیستی برقرار کرده و نقش نظارتی مهمی در بوم‌سازگان‌های خشکی ایفا کنند (Han *et al*., 2024). گزارش شده است که قارچ‌های میکوریز آربسکولار با بیشتر گیاهان خشکی‌زی همزیستی برقرار می‌کنند (Smith & Read, 2008; Wang & Qiu, 2006). گیاهان برای قارچ‌های میکوریزی کربوهیدرات و لیپیدها را فراهم کرده (Jiang *et al*., 2017)، در مقابل قارچ‌های میکوریزی به گیاهان در جذب عناصر غذایی و آب کمک می‌کنند (Li *et al*., 2013). گیاهان مختلف به‌طور متفاوتی از همزیستی میکوریزی سود می‌برند (Yang *et al*., 2015). مطالعات نشان داده‌اند، مهمترین دلیل تفاوت در تأثیرات میکوریزی بر گیاهان، مربوط به ویژگی‌های ریشه است (Yang *et al*., 2016; Hoeksema *et al*., 2010). سیستم ریشه‌ای خوب توسعه‌یافته با ریشه‌های جانبی و مویین گسترده نشان‌دهنده ظرفیت قوی جذب عناصر غذایی است و در این حالت وابستگی گیاه به قارچ‌های میکوریزی ضعیف‌تر می‌شود (Yin *et al*., 2023; Maherali, 2014). قارچ‌های میکوریزی در فرایندهایی مانند انتقال، ذخیره و تبادل عناصر غذایی، بهبود شرایط خاک و حفظ تعادل در بوم‌سازگان‌های خشکی نقش دارند (Smith & Read, 2008). همچنین قارچ‌های میکوریزی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم رشد گیاه را از طریق ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های غیرزیستی (Han *et al*., 2024) مانند شوری (Hu & Chen, 2020)، خشکی (Hao *et al*., 2019)، گرم‌شدن اقلیم (Hu *et al*., 2015)، آلودگی فلزات سنگین (Salehi & Matinizadeh, 2017; Zhang *et al*., 2015) و در برخی موارد نسبت به عوامل بیماری‌زا یا پاتوژن‌های خاک بهبود می‌بخشند (Van

Der Heijden & Horton, 2009).

مطالعات نشان داده‌اند، گونه‌های متعلق به جنس صنوبر با قارچ‌های اکتو و اندو میکوریزی همزیستی برقرار می‌کنند و حتی در برخی موارد هر دو نوع قارچ میکوریزی در سیستم ریشه گیاه موجود است (Mestre *et al*., 2017; Gehring *et al*., 2006; Baum & Makeshin, 2000). از سوی دیگر، بررسی‌ها نشان داده‌اند، نهال‌های صنوبر جوان به‌طور وسیع با قارچ‌های میکوریز آربسکولار همزیست می‌شوند، در حالی که در درختان صنوبر بالغ و مسن همزیستی با قارچ‌های اکتومیکوریزی بیشتر است (Khasa *et al*., 2002). اما در واقعیت آنچه مسلم است حضور دو نوع قارچ میکوریزی (اندومیکوریز و اکتومیکوریز) در سیستم ریشه گیاه براساس سن گیاه، فصل، شرایط هیدرولوژیکی در خاک، pH یا سایر فاکتورهای خاک و حتی ژنوتیپ گیاه می‌تواند متفاوت باشد (Sanders *et al*., 1995). درنتیجه همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار، متغیرهای رشد و تولید زی‌توده گیاهی، جذب آب و عناصر غذایی و مقاومت صنوبرها به تنش‌های محیطی افزایش پیدا می‌کند (Cicatelli *et al*., 2010). با توجه به اینکه وجود نهال‌های قوی و سالم صنوبر برای رشد و نمو آنها در سال‌های آینده ضروری است، تولید نهال‌های میکوریزی می‌تواند به تولید نهال‌هایی با عملکرد رشد بهتر کمک کند. همچنین، در مواردی که هدف استفاده کمتر از کودهای شیمیایی باشد، با توجه به توانایی قارچ‌های میکوریزی در اکتساب عناصر غذایی به‌ویژه فسفر برای گیاه میزبان همزیست‌شده (Read & Perez-Moreno, 2003)، تولید نهال‌های میکوریزی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، با توجه به اهمیت تجاری و اقتصادی صنوبرها برای تولید چوب، خمیرچوب و کاغذ، درک اثر متقابل بین صنوبرها و قارچ‌های میکوریزی می‌تواند اهمیت ویژه اقتصادی- اجتماعی داشته باشد (Dinus *et al*., 2001). درواقع، درک روابط متقابل بین میکوریزا و گونه‌های گیاهی، نیل به توسعه پایدار در آینده را هموارتر می‌سازد (Nouri *et al*., 2018).

اگرچه صنوبر به‌عنوان یک گونه مهم مورد استفاده در زراعت چوب و همچنین به‌عنوان یک گیاه مدل برای مطالعه زیست‌شناسی گیاهان چوبی چندساله و فعل‌وانفعالات بین گیاه و جامعه میکروبی خاک مورد توجه بسیاری است (Beckers *et al*., 2017; Chifflot *et al*., 2009)، تحقیقات کمی در زمینه تأثیر قارچ‌های میکوریز آربسکولار بر رشد و جذب عناصر غذایی صنوبرها انجام شده است. همچنین گزارش‌های اندکی در مورد درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه گونه‌های مختلف صنوبر با قارچ‌های میکوریز آربسکولار و تأثیر همزیستی با قارچ‌های میکوریزی بر ویژگی‌های نهال‌های صنوبر در داخل کشور موجود است. بنابراین، در این مطالعه، درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه درختان صنوبر (هفت کلن از پنج گونه صنوبر) در شرایط طبیعی بررسی شد. همچنین با توجه به اهمیت صنوبر تبریزی- رقم سالاری (*P. nigra* "62/154") به‌عنوان یک رقم پرمحصول که به‌طور وسیع در نقاط مختلف کشور در زراعت چوب استفاده می‌شود، در شرایط کنترل‌شده طی یک مطالعه گلدانی پاسخ‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نهال‌های میکوریزی و غیرمیکوریزی یکساله صنوبر بررسی و مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا از کلکسیون تحقیقاتی صنوبر (واقع در ایستگاه تحقیقاتی البرز مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور) هفت کلن صنوبر از پنج گونه شامل *P. nigra* "62/154"، *P. nigra* "17/13"، *P. deltoides* "69/55"، *P. alba* "44/13"، *P. alba* "20/45"، *P. euphratica* و *P. euramericana* "92/40" انتخاب شد. کلن‌های انتخابی جزو کلن‌های پرمحصول هر گونه صنوبر بودند. در اواخر فصل رویش از ناحیه ریزوسفر کلن‌های صنوبر، خاک و قطعات ریشه‌ای برای تعیین درصد کلونیزاسیون ریشه با قارچ‌های میکوریز آربسکولار در سه تکرار برای هر کلن برداشت شد. در مرحله بعد، با توجه به اهمیت صنوبر تبریزی- رقم سالاری در زراعت چوب مناطق خارج از شمال و درصد بالای کلونیزاسیون میکوریزی ریشه، این رقم

صنوبر برای شناسایی قارچ‌های میکوریز آربسکولار همزیست‌شده و تأثیر تیمار میکوریزی بر ویژگی‌های نهال یکساله صنوبر انتخاب شد.

تعیین درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه با قارچ‌های میکوریز آربسکولار

ریشه‌های جمع‌آوری‌شده از عرصه، پس از انتقال سریع به آزمایشگاه شست‌وشو و تا شروع آزمایش‌ها در محلول تثبیت‌کننده نگهداری شدند. برای تعیین درصد کلونیزاسیون میکوریزی، ریشه‌ها براساس روش Phillips و Hayman (۱۹۷۰) رنگ‌آمیزی گردیدند. به‌طوری‌که برای هر نمونه، ریشه‌های فرعی با قطر کمتر از دو میلی‌متر که برای رنگ‌آمیزی دارای بهترین شرایط بودند، جدا و سه بار در آب مقطر شست‌وشو داده شدند. برای بی‌رنگ کردن و نرم شدن بافت‌ها، ابتدا ریشه‌ها در محلول هیدروکسیدپتاسیم ۱۰ درصد و درون بن‌ماری در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند. سپس ریشه‌ها از این محلول خارج و سه بار با آب مقطر شست‌وشو شدند. آنگاه ریشه‌ها برای بی‌رنگ شدن کامل بافت‌ها به محلول حاوی آب اکسیژنه قلیایی انتقال و به‌مدت ۲/۵ تا ۳ ساعت در این محلول نگهداری گردیدند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از محلول آب اکسیژنه قلیایی و شست‌وشو با آب مقطر، ریشه‌ها در محلول اسیدکلریدریک یک درصد قرار گرفتند تا آماده رنگ‌پذیری شوند. ریشه‌ها مستقیماً از محلول اسیدی به محلول رنگی آنیلین‌بلو ۰/۰۵ درصد منتقل و در این محلول به‌منظور رنگ‌پذیری ساختمان‌های قارچی نگهداری شدند. درنهایت درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه‌ها براساس روش خطوط متقاطع با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (Mcgonigles *et al*., 1990).

$$\text{درصد کلونیزاسیون} = \frac{\text{تعداد قطعه‌های میکوریزی}}{\text{کل قطعه‌های مشاهده‌شده}} \times ۱۰۰$$

جداسازی و شناسایی اسپور

برای جداسازی اسپور قارچ‌های میکوریز آربسکولار از روش الک مرطوب استفاده شد (Gerdemann & Nicolson, 1963). سپس اسپورهای جداسازی شده با استفاده از استریومیکروسکوپ (Olympus model DP73) براساس ویژگی‌های مورفولوژیکی مانند شکل، رنگ و اندازه به دسته‌های مشخص تقسیم شدند. اسپورهای مربوط به هر گروه بر لام‌هایی که در یک طرف آن یک قطره پلی‌ونیل‌الکل‌لاکتیک‌اسیدگلسیرین (PVLG) همراه با مخلوط ملزر و در طرف دیگر آن یک قطره (PVLG) قرار داده شده بود، چسبانده شدند. سپس رنگ اسپورها با استفاده از جدول رنگ موجود در سایت INVAM مشخص شد. واکنش اسپورها در معرف ملزر نیز در شناسایی گونه‌ها مورد توجه قرار گرفت. درنهایت با توجه به مشخصات ثبت‌شده هر اسپور و با استفاده از کلیدهای شناسایی، نام علمی هر گونه مشخص شد (Redecker *et al*., 2013). اساس شناسایی قارچ‌های میکوریزی در این روش از طریق ویژگی‌های مورفولوژیکی مانند وجود یا عدم وجود اسپوروکارپ و نیز ابعاد، رنگ، شکل، طرح روی اسپور و تعداد لایه‌های دیواره اسپور است.

تولید مایه تلقیح میکوریزی

برای تهیه مایه تلقیح میکوریزی، قارچ‌های شناسایی و جداسازی شده به روش کشت تله‌ای در مجاورت گیاه ذرت در یک محیط کشت استریل شامل خاک، ماسه و پرلیت طی یک دوره رویشی چهار ماهه در شرایط گلخانه تکثیر شدند (Chellappan *et al*., 2002). پس از چهار ماه از آغشتگی و همزیستی ریشه گیاه ذرت با قارچ‌ها، از ریزوسفر آن شامل اسپور، هیف و قطعه‌های ریشه به‌عنوان مایه تلقیح استفاده شد.

تولیدی نهال‌های میکوریزی و غیرمیکوریزی صنوبر

در اواسط اسفندماه، قلمه‌های صنوبر مورد مطالعه (قلمه‌های همگن به طول ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱ تا ۱/۵سانتی‌متر و حداقل سه تا چهار جوانه جانبی) از خزانه تحقیقاتی صنوبر در ایستگاه تحقیقاتی البرز تهیه و تا زمان

کشت در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. خاک مورد نیاز برای کشت قلمه‌های صنوبر در آزمایشگاه بخش تحقیقات جنگل در دستگاه اتوکلاو استریل شد. قبل از کاشت، قلمه‌های صنوبر به مدت ۲۴ ساعت در آب غوطه‌ور گردیدند. سپس قلمه‌های صنوبر در گلدان‌های نایلونی (با ابعاد ۲۵×۲۰ سانتی‌متر و حجم تقریبی ۷/۵ لیتر یا کیلوگرم) پرشده با خاک استریل با بافت لومی- رسی کاشته شدند. در زمان کاشت قلمه‌ها، مایه تلقیح میکوریزی به میزان ۱۰۰ گرم در اطراف هر قلمه اضافه شد (تعداد اسپور قارچی در هر گرم مایه تلقیح میکوریزی به‌طور متوسط ۲۵ عدد بود).

مشخصات فیزیکی- شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آمده است. در این پژوهش، بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، اسیدیته (pH) به روش گل اشباع (Mclean,1982)، هدایت الکتریکی (EC) به روش عصاره گل اشباع (Rhoades, 1982)، ماده آلی به روش والکلی- بلاک (Nelson & Sommers, 1996)، نیتروژن کل به روش کجلدال (Bremner, 1996) و غلظت کل سایر عناصر غذایی شامل فسفر، پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم، سولفور، آهن، روی، منگنز و مس پس از هضم اسیدی با استفاده از دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری شد.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک
Table 1. Physico-chemical properties of soil

Parameter	pH	EC	OC	N	P	K	Na
Unit	-	$ds\ m^{-1}$	%	%	$g\ kg^{-1}$	$g\ kg^{-1}$	$g\ kg^{-1}$
Quantity	7.6	1.6	0.97	0.08	1.08	20.14	14.45
Parameter	**Ca**	**Mg**	**S**	**Fe**	**Zn**	**Cu**	**Mn**
Unit	$g\ kg^{-1}$	$g\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$	$g\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$
Quantity	53.03	13.62	489.1	28.71	98.6	57.2	860.3

تحقیق پیش‌رو در قالب طرح کاملاً تصادفی با تیمارهای میکوریزی (تلقیح با قارچ‌های میکوریزی همزیست با درختان صنوبر تبریزی) و غیرمیکوریزی (فاقد تلقیح قارچی) طی یک دوره رویشی هشت‌ماهه انجام شد. در این مطالعه، برای هر سطح تیمار قارچی پنج نهال در سه تکرار در نظر گرفته شد. گلدان‌ها در طول انجام آزمایش در فضای باز نگهداری شدند.

اندازه‌گیری زنده‌مانی و متغیرهای رشد، زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ

در اواخر فصل رویش، میزان زنده‌مانی نهال‌ها در هر تیمار ثبت و درصد زنده‌مانی محاسبه شد. ویژگی‌های رویشی (قطر و طول ساقه) و تولید زی‌توده (ریشه، ساقه و برگ) با انتخاب تصادفی شش نهال از هر تیمار اندازه‌گیری شد. برای تعیین زی‌توده خشک، پس از شست‌وشوی نهال‌ها، اندام‌های مختلف (ریشه، ساقه و برگ) از هم جدا شدند. سپس وزن خشک اندام‌های گیاهی پس از خشک شدن آنها در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. محتوای نسبی آب برگ (RWC) با استفاده از فرمول زیر برحسب درصد محاسبه شد. در این فرمول از وزن تر (FW)، وزن در حالت تورژسانس (TW) و وزن خشک (DW) نمونه‌های برگ استفاده گردید (Sánchez *et al*., 1998).

$$RWC = [(FW-DW) / (TW-DW)] \times 100$$

اندازه‌گیری عناصر غذایی اصلی و کمیاب در اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ)

نمونه‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) از نظر عناصر

غذایی با سه تکرار در هر تیمار قارچی بررسی شدند. در نمونه‌های گیاهی، نیتروژن به‌روش کجلدال (Bremner, 1996) و غلظت سایر عناصر غذایی شامل فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، سولفور، آهن، روی، منگنز و مس پس از هضم اسیدی با استفاده از دستگاه ICP-MS تعیین شدند. در این پژوهش، برای کنترل کیفیت آزمایش و ارزیابی صحت داده‌های عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های گیاهی از دو ماده مرجع استاندارد گیاهی با کدهای GSB-11 و ERM-CD281 استفاده شد.

اندازه‌گیری برخی متغیرهای فیزیولوژی

در این مطالعه، غلظت مالون‌دی‌آلدئید برگ براساس روش Robbert و همکاران (۱۹۸۰) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر، قندهای محلول با استفاده از معرف آنترون با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۶۲۵ نانومتر (Irigoyen *et al*., 1992)، استخراج و سنجش محتوای پرولین براساس روش Bates و همکاران (۱۹۷۳)، سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش Siminis و همکاران (۱۹۹۴) و آنزیم پراکسیداز براساس روش Chance و Maehly (۱۹۵۵) با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر با سه تکرار در هر تیمار انجام شد.

تجزیه‌وتحلیل‌های آماری

تجزیه‌وتحلیل داده‌های این پژوهش با نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. بدین ترتیب که در ابتدا توسط آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌ها بررسی گردید. با توجه به نرمال و همگن بودن داده‌ها، مقایسه ویژگی‌های مورد بررسی نهال‌های میکوریزی و غیرمیکوریزی صنوبر با استفاده از آزمون t مستقل انجام شد.

نتایج

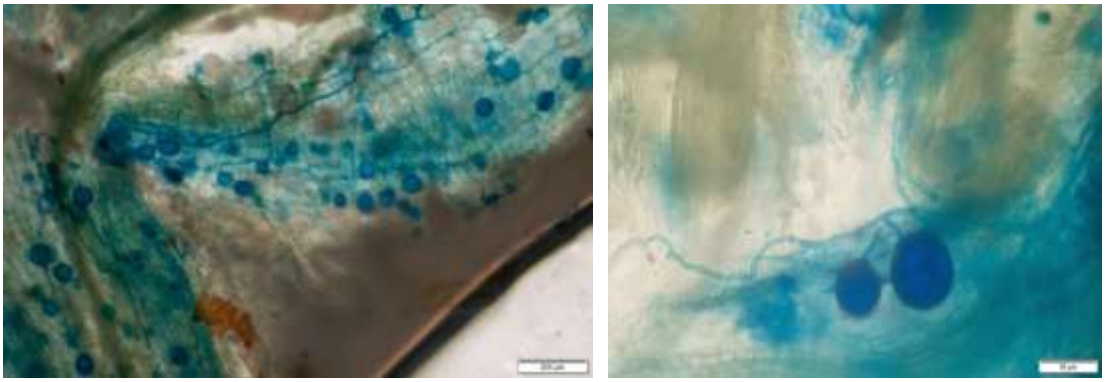
درصد همزیستی ریشه برخی گونه‌ها و کلن‌های صنوبر با قارچ‌های میکوریز آربسکولار

درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه درختان صنوبر ۸ ساله با قارچ‌های میکوریز آربسکولار (هفت کلن صنوبر از پنج گونه) در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طورکه نتایج نشان می‌دهد، بیشترین درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه مربوط به گونه‌های تبریزی- رقم سالاری (*P. nigra* "62/154") و پده (*P. euphratica*) و کمترین درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه مربوط به گونه *P. deltoides* "69/55" بود. در شکل ۱ اندام‌های قارچ‌های میکوریز آربسکولار در ریشه درختان صنوبر مشاهده می‌گردد.

جدول ۲. درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه برخی گونه‌ها وکلن‌های صنوبر

Table 2. Root mycorrhizal colonization (%) of some poplar species/clones

Number	Species/Clone	Mycorrhizal colonization (%)
1	*P. nigra* "62/154"	98.48
2	*P. nigra* "17/13"	90.12
3	*P. euphratica*	97.12
4	*P. alba* "44/13"	89.7
5	*P. alba* "20/45"	90.23
6	*P. deltoides* "69/55"	79.20
7	*P. euramericana* "92/40"	94.76

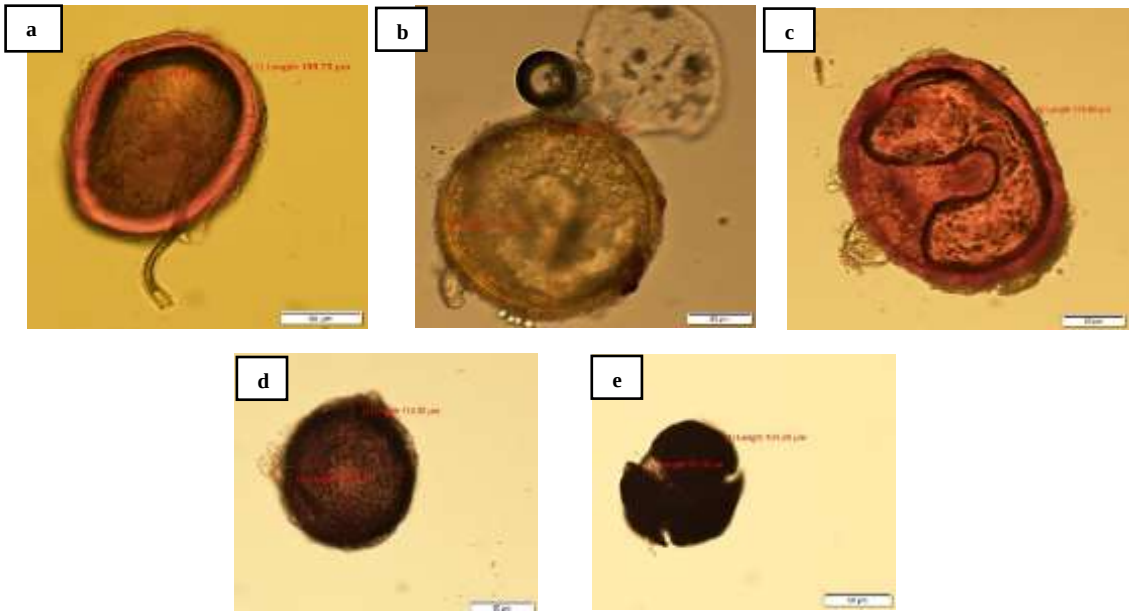


شکل ۱. اندام‌های قارچ‌های میکوریز آربسکولار در ریشه درختان صنوبر

Figure 1. Organs of arbuscular mycorrhizal fungi in roots of poplar trees

قارچ‌های شناسایی‌شده همزیست با ریشه درختان صنوبر تبریزی

در نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از ناحیه ریزوسفر درختان صنوبر تبریزی- رقم سالاری (*P. nigra* "62/154")، پنج گونه قارچ میکوریز آربسکولار شامل *Claroideoglomus luteum*، *Diversispora tortuosa*، *Scutellospora heterogama*، *Glomus aggregatum* و *Septoglomus constrictum* از طریق ویژگی‌های مربوط به رنگ اسپور و رنگ لایه‌های دیواره اسپور، شکل اسپور، دیواره اسپور، تعداد و ضخامت لایه‌های آن، نحوه اتصال هیف به اسپور و باز یا بسته بودن روزنه هیف در محل اتصال به اسپور شناسایی شد (شکل ۲).



شکل ۲. گونه‌های قارچ میکوریز آربسکولار همزیست با ریشه درختان صنوبر تبریزی (بزرگنمایی ۵۰ µm)

a: *Claroideoglomus luteum*, b: *Diversispora tortuosa*, c: *Glomus aggregatum*, d: *Septoglomus constrictum*, e: *Scutellospora heterogama*

Figure 1. Species of arbuscular mycorrhizal fungi associated with roots of black poplar trees a: *Claroideoglomus luteum*, b: *Diversispora tortuosa*, c: *Glomus aggregatum*, d: *Septoglomus constrictum*, e: *Scutellospora heterogama*

تأثیر تیمار میکوریزی بر زنده‌مانی، متغیرهای رشد، تولید زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ

نتایج نشان داد، درصد زنده‌مانی نهال‌های صنوبر میکوریزی و غیرمیکوریزی به‌ترتیب ۹۴/۵ و ۹۳/۶ درصد بود و از نظر زنده‌مانی تفاوت معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد. نتایج تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها نشان داد، تیمار میکوریزی تأثیر مثبت معنی‌داری ($P <$ ۰/۰۱) بر متغیرهای رشد (قطر و طول ساقه)، تولید زی‌توده (زی‌توده خشک ریشه، ساقه، برگ و کل گیاه) و محتوای نسبی آب برگ نهال‌های صنوبر داشت (جدول ۳). شایان ذکر است، درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه در نهال‌های میکوریزی صنوبر ۷۸/۳۸ درصد و در نهال‌های غیرمیکوریزی زیر ۱۰ درصد بود.

جدول ۳. تأثیر تیمار میکوریزی بر رشد، تولید زی‌توده و محتوای نسبی آب برگ نهال‌های یکساله صنوبر تبریزی (میانگین ± اشتباه معیار)

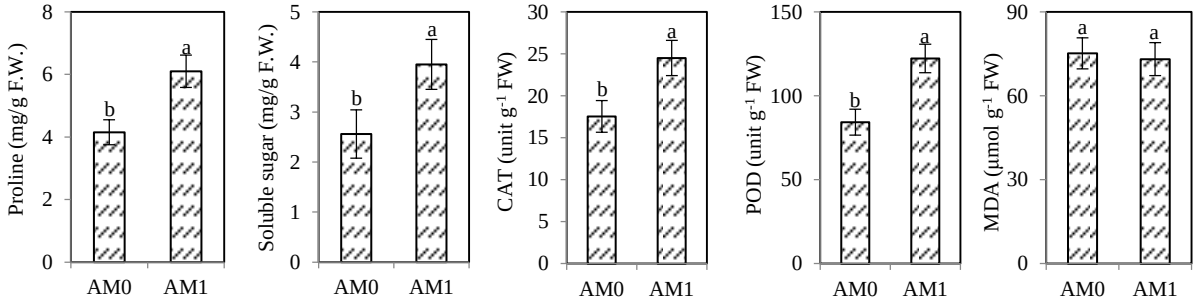
Table 3. Growth parameters, biomass production and RWC of one year old poplar plants affected by mycorrhizal inoculation (means ± SE)

Parameter	Non-mycorrhizal plants	Mycorrhizal plants	*P* value
Diameter (mm)	10.14 ± 0.163b	11.76 ± 0.279a	0.000**
Height (cm)	95.27 ± 1.08b	110.86 ± 2.60a	0.000**
Root biomass (g)	5.89 ± 0.110b	7.90 ± 0.216a	0.000**
Stem biomass (g)	14.16 ± 0.377b	17.39 ± 0.350a	0.000**
Leaf biomass (g)	6.07 ± 0.141b	8.15 ± 0.206a	0.000**
Total biomass (g)	26.07 ± 0.399b	33.53 ± 0.527a	0.000**
RWC (%)	83.88 ± 1.54b	92.07 ± 1.28a	0.000**

** $P < 0.01$; Different letters in each row indicate significant differences between treatments

تأثیر تیمار میکوریزی بر متغیرهای فیزیولوژیکی برگ

تیمار با قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش معنی‌دار ($P <$ ۰/۰۵) میزان پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز: POD و کاتالاز: CAT) برگ در نهال‌های میکوریزی نسبت به مقادیر مشابه آنها در نهال‌های غیرمیکوریزی شد. در مقابل، تیمار میکوریزی تأثیری بر غلظت مالون‌دی‌آلدهید برگ نداشت (شکل ۳).

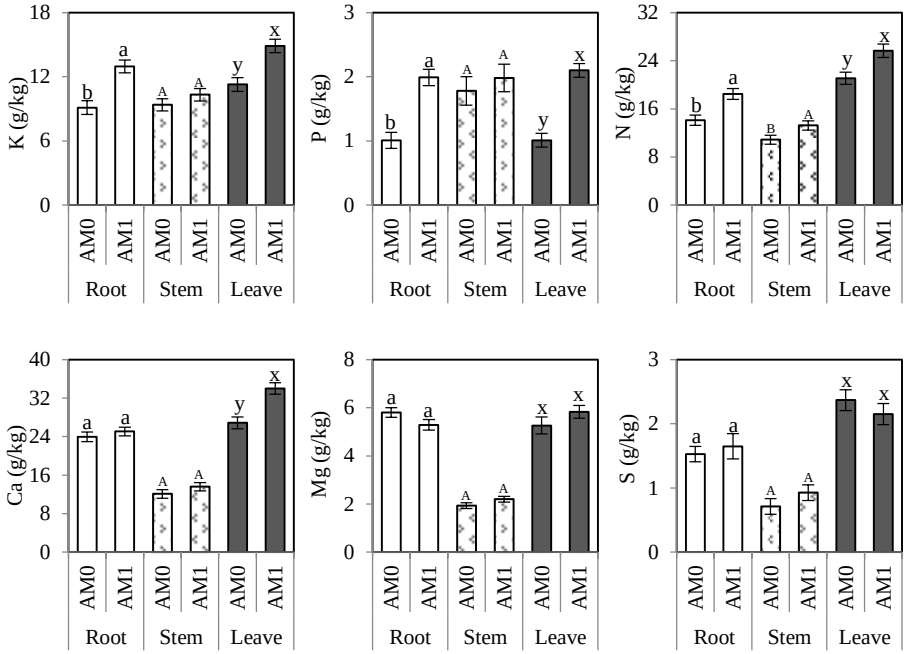


شکل ۳. میزان پرولین و قندهای محلول، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (پراکسیداز: POD و کاتالاز: CAT) و غلظت مالون‌دی‌آلدهید (MDA) برگ نهال‌های صنوبر تبریزی تحت تأثیر تیمارهای میکوریزی (میانگین ± اشتباه معیار)؛ AM0: تیمار غیرمیکوریزی، AM1: تیمار میکوریزی. حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌های مورد بررسی است.

Figure 3. Proline, Soluble sugar, CAT, POD and MDA of leaf in *P. nigra* affected by mycorrhizal inoculation (means ± SE); AM0: Non-mycorrhizal treatment, AM1: Mycorrhizal treatment; Different letters indicate significant differences between treatments.

تأثیر تیمار میکوریزی بر غلظت عناصر غذایی اصلی اندام‌های گیاهی

نتایج نشان داد، در نهال‌های میکوریزی، غلظت نیتروژن (N) ریشه، ساقه و برگ، فسفر (P) و پتاسیم (K) ریشه و برگ و کلسیم (Ca) برگ نسبت به مقادیر مشابه نهال‌های غیرمیکوریزی به‌طور معنی‌داری ($P <$ ۰/۰۱) بیشتر بود. در مقابل، تیمار میکوریزی تأثیر معنی‌داری بر غلظت عناصر منیزیم (Mg) و سولفور (S) اندام‌های گیاهی نداشت (شکل ۴).



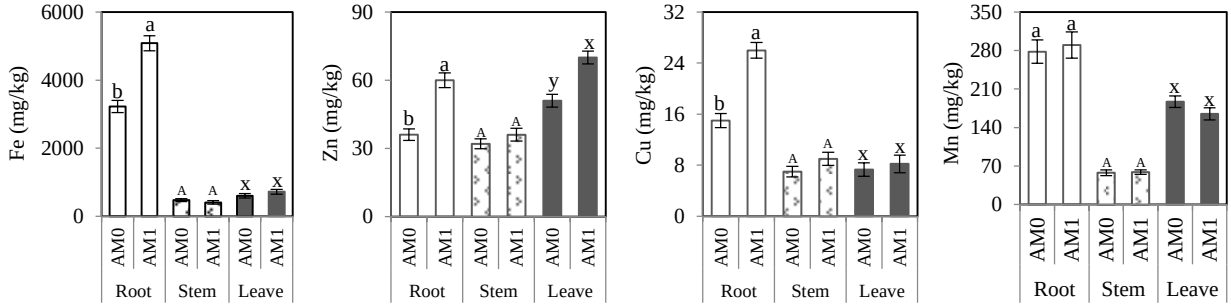
شکل ۴. غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سولفور در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ نهال‌های صنوبر تبریزی تحت تأثیر تیمار میکوریزی (میانگین ± اشتباه معیار). AM0: تیمار غیرمیکوریزی، AM1: تیمار میکوریزی

در هر اندام گیاهی حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌های مورد بررسی است.

Figure 4. N, P, K, Ca, Mg and S concentrations of plant tissues in *P. nigra* affected by mycorrhizal inoculation (means ± SE); AM0: Non-mycorrhizal treatment, AM1: Mycorrhizal treatment; In each tissue different letters indicate significant differences between treatments.

تأثیر تیمار میکوریزی بر غلظت عناصر غذایی کمیاب اندام‌های گیاهی

نتایج ارائه‌شده در شکل ۵ نشان می‌دهد، در نهال‌های میکوریزی غلظت آهن، روی و مس ریشه و غلظت روی برگ به‌طور معنی‌داری ($P <$ ۰/۰۵) بیشتر از مقادیر مشابه در نهال‌های غیرمیکوریزی بود. در مقابل، تیمار میکوریزی بر غلظت منگنز اندام گیاهی تأثیر معنی‌داری نداشت.



شکل ۵. غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز در اندام‌های ریشه، ساقه و برگ نهال‌های صنوبر تبریزی تحت تأثیر تیمار میکوریزی (میانگین ± اشتباه معیار). AM0: تیمار غیرمیکوریزی، AM1: تیمار میکوریزی

در هر اندام گیاهی حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آماری بین میانگین گروه‌های مورد بررسی است.

Figure 5. Fe, Zn, Cu and Mn concentrations of plant tissues in *P. nigra* affected by mycorrhizal inoculation (means ± SE); AM0: Non-mycorrhizal treatment, AM1: Mycorrhizal treatment; In each tissue different letters indicate significant differences between treatments.

بحث

با وجود اهمیت کلن‌های مختلف صنوبر در زراعت چوب از یکسو و قارچ‌های میکوریزی به‌عنوان جزو مهم جامعه میکروبی خاک از سوی دیگر، اطلاعات کمی در مورد درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه، گونه‌های قارچ میکوریزی همزیست با ریشه و همچنین نقش بالقوه همزیستی با قارچ‌های میکوریزی بر عملکرد کلن‌های مختلف صنوبر موجود است. نتایج این مطالعه نشان داد، درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه گونه‌ها و کلن‌های مختلف صنوبر (درختان ۸ ساله) با قارچ‌های میکوریز آربسکولار متفاوت بود. به‌طوری‌که بیشترین درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه مربوط به گونه‌های تبریزی- رقم سالاری و پده و کمترین درصد مربوط به گونه *P. deltoides* "69/55" بود. مطابق با نتایج پیش‌رو، Moradi Behbahani و همکاران (۲۰۱۷) با بررسی همزیستی درختان پده با قارچ‌های میکوریز آربسکولار در جنگل‌های کنار رودخانه‌ای نشان دادند، درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه درختان پده با قارچ‌های میکوریزی ۹۲ درصد بود که این میزان نشان‌دهنده وجود رابطه تنگاتنگ بین درختان پده و قارچ‌های میکوریزی است. همچنین، در مطالعه Gigloie و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه چهار کلن صنوبر شامل *P. euramericana* "I-214"، *P. euramericana* "45/51"، *P. deltoides* "77/51" و *P. deltoides* "69/55"، در صنوبرکاری‌های ایستگاه‌های تحقیقاتی صنوبر استان گیلان، کمترین میزان درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه در *P. deltoides* "69/55" گزارش شد. در مطالعه Khasa و همکاران (۲۰۰۲) نیز تفاوت‌های قابل‌توجهی در مورد وضعیت میکوریزی ریشه کلن‌های مختلف صنوبر با قارچ‌های اکتو و اندو میکوریز مشاهده شد. به‌طوری‌که در یک صنوبرکاری پنج‌ساله، درصد کلونیزاسیون ریشه با قارچ‌های میکوریز آربسکولار از ۲۰ تا ۵۰ درصد و با قارچ‌های اکتومیکوریزی از ۳۵ تا ۹۰ درصد متغیر بود. کلونیزاسیون میکوریزی فرایندی پویا در طول زمان است که ریشه و اندام‌های قارچی همزمان با هم رشد و نمو پیدا می‌کنند. درواقع، درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه متأثر از واحدهای میکوریزی تشکیل‌شده و رشد آنها و رشد سیستم ریشه‌ای گیاه می‌باشد (Khasa *et al*., 2002; Smith & Read, 1997).

در این مطالعه، در نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از ناحیه ریزوسفر درختان صنوبر تبریزی- رقم سالاری (*P. nigra* "62/154") پنج گونه قارچ میکوریز آربسکولار شامل

Diversispora tortuosa، *Glomus aggregatum*، *Claroideoglomus* ،*Scutellospora heterogama* *luteum* و *Septoglomus constrictum* از طریق ویژگی‌های مورفولوژیکی شناسایی شد. به‌طورکلی اطلاعات اندکی در مورد جمعیت قارچ میکوریزی همزیست‌شده با گونه‌های مختلف صنوبر منتشر شده است. مطالعه Gigloie و همکاران (۲۰۰۸) روی دو گونه صنوبر *P. euramericana* و *P. deltoides* در ایستگاه‌های صنوبر استان گیلان نشان داد، بیشتر اسپورهای موجود در ناحیه ریزوسفر این دو گونه صنوبر مربوط به دو گونه قارچ میکوریزی*Glomus mossaea* و *Glomus intraradices* بود. Liu و همکاران (۲۰۲۴) نیز با بررسی جوامع قارچ میکوریز آربسکولار شش گونه صنوبر نشان دادند، ترکیب و تنوع جامعه قارچی گونه‌های مختلف صنوبر متفاوت بود. درواقع، گونه گیاهی میزبان تأثیر مهمی بر تنوع قارچ‌های میکوریز آربسکولار همزیست‌شده دارد که در مطالعات قبلی نیز این مسئله اثبات شده است (Wang *et al*., 2017; Torrecillas *et al*., 2011). در مطالعه Hausmann و Hawkes (۲۰۱۰) نیز مشاهده شد، تغییر در گونه گیاهی میزبان به‌طور معنی‌داری ترکیب و تنوع جامعه قارچ میکوریز آربسکولار را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اساساً تنوع جامعه قارچ میکوریز آربسکولار تحت تأثیر عوامل زیستی و غیرزیستی به‌ویژه ویژگی‌های خاک و گیاه میزبان قرار می‌گیرد. عوامل زیستی و غیرزیستی مستقل از یکدیگر نبوده و با هم تنوع قارچ‌های میکوریز آربسکولار را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Jie *et al*., 2013). ازآنجایی‌که همزیستی قارچ‌های میکوریز آربسکولار با ریشه گیاهان از نوع همزیستی اجباری است (Matinizadeh *et al*., 2022; Smith & Read, 2008)، تنوع قارچ میکوریز آربسکولار در ناحیه ریزوسفر توسط گیاه میزبان تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Opik *et al*., 2009). تفاوت‌های موجود در مورفولوژی ریشه، ترشحات ریشه‌ای و متابولیسم فیزیولوژیکی گیاهان مختلف، تخصیص و میزان تلقیح میکوریزی گیاه میزبان و همچنین رشد، توسعه، تولید اسپور، توزیع، تنوع و ترکیب جامعه قارچ میکوریز آربسکولار را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zhang *et al*., 2021). درواقع، ساختار جامعه گیاهی و جامعه قارچ میکوریز آربسکولار با یکدیگر در تعامل بوده و نقش مهمی بر یکدیگر دارند (Henning *et al*., 2018). در همین رابطه بررسی‌ها نشان داده‌اند، ترکیب، تنوع و توزیع قارچ‌های میکوریز آربسکولار در زیستگاه‌های مختلف با تغییر فلور، غنای گونه گیاهی و جامعه گیاهی تغییر خواهد کرد (Weremijewicz *et al*., 2016). حتی گزارش شده است، در یک واریته گیاهی، تفاوت‌های مهم و معنی‌داری در واکنش ژنوتیپ‌های مختلف به قارچ‌های میکوریز آربسکولار وجود دارد (Taylor *et al*., 2015; Ortas & Akpinar 2011).

بررسی تأثیر همزیستی با قارچ‌های میکوریزی در مراحل اولیه رشد صنوبرها، می‌تواند زمینه‌ای برای تولید نهال‌های سالم‌تر و قوی‌تر با پیامدهای مطلوب احتمالی برای اکتساب و تبادل عناصر غذایی فراهم کند (Rooney *et al*., 2011). نتایج مطالعه پیش‌رو نشان داد، تیمار میکوریزی تأثیر مثبت معنی‌داری بر متغیرهای رشد، تولید زی‌توده (قطر و طول ساقه، زی‌توده خشک ریشه، اندام هوایی و کل گیاه) و محتوای نسبی آب برگ نهال‌های صنوبر داشت (جدول ۳). همچنین، نتایج تأثیر مثبت معنی‌دار تیمار میکوریزی بر غلظت برخی عناصر غذایی اصلی و کمیاب اندام‌های گیاهی (ریشه، ساقه و برگ) را نشان داد (شکل‌های ۴ و ۵). قارچ‌های میکوریز آربسکولار به‌عنوان جزو اصلی و مهم جامعه میکروبی خاک، کربن حاصل از فرایند فتوسنتز را از گیاه میزبان خود به‌دست آورده و در مقابل فواید مهمی مانند افزایش جذب عناصر غذایی و حفاظت در برابر تنش‌های محیطی و عوامل بیماری‌زا را برای گیاه میزبان فراهم می‌کنند (Gosling *et al*., 2006). تأثیر مثبت میکوریزی شدن بر متغیرهای رشد و تولید زی‌توده گونه‌های مختلف صنوبر در مطالعات پیشین بیان شده است (Wu *et al*., 2016; Lu *et al*., 2014). در مقابل، Hooker و همکاران (۱۹۹۲) نشان دادند، همزیستی صنوبر با سه گونه قارچ میکوریز آربسکولار، رشد گیاه را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار

نداد، البته درصد کلونیزاسیون میکوریزی ریشه پایین بود و تأثیر بر وضعیت تغذیه‌ای گیاه نیز در آن مطالعه بررسی نشده بود. همچنین، در بررسی دیگری که توسط Rooney و همکاران (۲۰۱۱) انجام شد، نتایج نشان داد، همزیستی میکوریزی تأثیر منفی معنی‌داری بر ریشه و وزن خشک کل نهال‌های صنوبر داشت، اگرچه بر طول ساقه و تعداد برگ‌ها تأثیر معنی‌داری نداشت.

به‌طورکلی، تأثیر تلقیح میکوریزی بر تولید زی‌توده گیاهی با توجه به ترکیب گونه گیاهی- قارچی، گونه قارچ میکوریز آربسکولار و شرایط محیط‌زیستی مثبت، خنثی یا منفی گزارش شده است (Grace *et al*., 2009; Johnson *et al*., 1997). بنابراین، نتایج متفاوت میکوریزی شدن بر گونه‌های مختلف صنوبر نمی‌تواند دور از انتظار باشد. تأثیر مثبت همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار بر رشد و تولید زی‌توده گیاهی به موارد متعددی مرتبط شده است. قارچ‌های میکوریزی با کمک هیف‌های خود می‌توانند به گیاه برای جذب آب بیشتر از خاک توسط ریشه کمک نمایند (Wu *et al*., 2015). درواقع، هیف‌های قارچی آب‌دوست بوده و در گیاهان میکوریزی آب می‌تواند با سهولت بیشتری از خاک جذب شود (Allen, 2007). بهبود وضعیت آبی گیاه در اثر تلقیح میکوریزی می‌تواند نقش غیرمستقیمی در افزایش ظرفیت فتوسنتزی و تولید زی‌توده گیاهی داشته باشد. بررسی‌های دیگر نیز نشان داده‌اند، تأثیر مثبت همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار بر رشد گیاه میزبان مربوط به افزایش جذب عناصر غذایی به‌ویژه فسفر (Nouri *et al*., 2020; Smith & Read, 2008)، حفاظت در برابر تنش‌های محیطی (Polle & Schützendübel, 2003) و دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه (Lu *et al*., 2014) است. از سوی دیگر، جامعه میکروبی زیرزمینی می‌تواند جامعه گیاهی روی زمینی را از طریق افزایش کارایی استفاده از عناصر غذایی خاک و تأثیر بر ترشحات ریشه‌ای تحت تأثیر قرار دهد (Bennett & Cahill, 2016; Bever *et al*., 2015). Zhang و همکاران (۲۰۱۴) نیز بیان کردند، قارچ‌های میکوریز آربسکولار از طریق تعادل در تخصیص منابع، تأثیر بر ارتباط‌های بین میکروارگانیسم‌های خاک، تنظیم ارتباط بین جوامع گیاهی و ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک و افزایش دسترسی به عناصر غذایی خاک نقش مهمی در افزایش رشد و تولید زی‌توده گیاهی ایفا می‌کنند.

در مطالعه پیش‌رو، تلقیح با قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش معنی‌دار متغیرهای فیزیولوژیکی برگ شامل میزان پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در نهال‌های صنوبر میکوریزی نسبت به مقادیر مشابه آنها در نهال‌های غیرمیکوریزی شد (شکل ۳). مطابق با نتایج پیش‌رو، افزایش میزان پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در نهال‌های صنوبر میکوریزی نسبت به نهال‌های غیرمیکوریزی توسط Lu و همکاران (۲۰۱۴) و Wu و همکاران (۲۰۱۶) نیز گزارش شده است. درواقع، افزایش جذب فسفر ایجادشده درنتیجه همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار، می‌تواند متغیرهای فیزیولوژیکی گیاه را تحت تأثیر قرار دهد (Paradi *et al*., 2003). از سوی دیگر، یکی از موارد مرتبط با تأثیر همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار بر گیاه میزبان، افزایش دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه بیان شده است (Lu *et al*., 2014).

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه پیش‌رو نشان داد، در شرایط طبیعی گونه‌های مختلف صنوبر درصد همزیستی بالایی با قارچ‌های میکوریز آربسکولار داشتند. بیشترین درصد همزیستی مربوط به گونه‌های تبریزی و پده و کمترین درصد در گونه *P. deltoides* مشاهده شد. از سوی دیگر، نتایج نشان داد، نهال‌های یکساله میکوریزی صنوبر تبریزی- رقم سالاری رشد، تولید زی‌توده و جذب و تجمع عناصر غذایی بالاتری نسبت به نهال‌های غیرمیکوریزی داشتند. همچنین، همزیستی میکوریزی افزایش متغیرهای فیزیولوژیکی برگ را به‌دنبال داشت. از آنجایی‌که تولید در هکتار و عملکرد صنوبرکاری‌ها می‌تواند با کاربرد کودهای معدنی افزایش

یابد، استفاده از کودها می‌تواند به‌صورت بالقوه با بهره‌گیری از مزایای ایجادشده توسط میکروارگانیسم‌های ضروری خاک از قبیل قارچ‌های میکوریزی یا باکتری‌ها برای رسیدن به تولید پایدار همراه با حداقل میزان کوددهی، حداقل کاربرد آفت‌کش‌ها و حداقل میزان خاک‌ورزی جایگزین شود (Rooney *et al*., 2009). درصد بالای همزیستی گونه‌های مختلف صنوبر با قارچ‌های میکوریزی در شرایط طبیعی و تأثیر مثبت همزیستی میکوریزی بر نهال‌های یکساله صنوبر تبریزی نشان می‌دهد، با توجه به اهمیت نقش جوامع میکروبی خاک بر تغذیه، رشد و حفاظت گیاه در برابر تنش‌های محیطی، با بررسی فعل‌وانفعالات زیستی بین میکروارگانیسم‌های خاک و صنوبرها در مراحل اولیه رشد، می‌توان برای تولید نهال‌های سالم و قوی در راستای برنامه‌های زراعت چوب بهره برد.

منابع مورد استفاده

- Allen, M.F., 2007. Mycorrhizal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. Vadose Zone Journal, 6: 291-297.
- Bates, I.S., Waldern, R.P. and Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. Plant and Soil, 39: 205-207.
- Baum, C. and Makeshin, F., 2000. Effects of nitrogen and phosphorus fertilisation on mycorrhizal formation of two poplar clones (*Populus trichocarpa* and *P. tremula* x *tremuloides*). Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163: 491e7.
- Beckers, B., De Beeck, M.O., Weyens, N., Boerjan, W. and Vangronsveld, J., 2017. Structural variability and niche differentiation in the rhizosphere and endosphere bacterial microbiome of field-grown poplar trees. Microbiome, 5(1): 25.
- Bennett, J.A. and Cahill Jr., J.F., 2016. Fungal effects on plant–plant interactions contribute to grassland plant abundances: evidence from the field. Journal of Ecology, 104: 755-764.
- Bever, J.D., Mangan, S.A. and Alexander, H.M., 2015. Maintenance of plant species diversity by pathogens. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 46: 305-325.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. Agronomy Journal, 54(5): 464-465.
- Bremner, J.M., 1996. Nitrogen-total: 1085-1121. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, 1390p.
- Chance, B. and Maehly, A.C., 1955. Assay of catalase and peroxidase. Methods in Enzymology, 2: 764-775.
- Chellappan, P., Anitha Christy, S.A. and Mahadevan, A., 2002. Multiplication of arbuscular mycorrhizal fungi on roots, In: Mukerji, K.G., Manoharachary, C., Chaloma, B.P., (eds), Techniques in mycorrhizal studies, Kluwer, Derdrecht, pp. 285-297.
- Chifflot, V., Rivest, D., Olivier, A., Cogliastro, A. and Khasa, D., 2009. Molecular analysis of arbuscular mycorrhizal community structure and spores distribution in tree-based intercropping and forest systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, 131: 32-39.
- Ciadamidaro, L., Madejón, E., Robinson, B. and Madejón, P., 2014. Soil plant interactions of *populus alba* in contrasting environment. Journal of Environmental Management, 132: 329-337.
- Cicatelli, A., Lingua, G., Todeschini, V., Biondi, S., Torrigiani, P. and Castiglione, S., 2010. Arbuscular mycorrhizal fungi restore normal growth in a white poplar clone grown on heavy metal-contaminated soil, and this is associated with upregulation of foliar metallothionein and polyamine biosynthetic gene expression. Annals of Botany, 106: 791-802.
- Dinus, R.J., Payne, P., Sewell, M.M., Chiang, V.L. and Tuskan, G.A., 2001. Genetic modification of short rotation popular wood: Properties for ethanol fuel and fiber productions. Critical Reviews in Plant Sciences, 20: 51-69.
- Domiínguez, M.T., Madrid, F., Maranon, T. and Murillo, J.M., 2009. Cadmium availability in soil and retention in oak roots: potential for phytostabilization. Chemosphere, 76: 480-486.
- Gehring, C.A., Mueller, R.C. and Whitham, T.G., 2006. Environmental and genetic effects on the formation of ectomycorrhizal and arbuscular mycorrhizal associations in cottonwoods. Oecologia, 149: 158e64.
- Gerdemann, J.W. and Nicolson, T.H., 1963. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. Transactions of the British Mycological Society, 46(2): 235-244.
- Gigloie, A., Forghani, A., Kahneh, E. and Karimi, Gh.H., 2008. The Arbuscular mycorrhizal fungi status of some poplar clones in Guilan. Iranian Journal of Biology, 21(1): 278-288 (In Persian).
- Gosling, P., Hodge, A., Goodlass, G. and Bending, G., 2006. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Organic Farming. Agriculture, Ecosystems & Environment, 113: 17-35.
- Grace, E.J., Cotsaftis, O., Tester, M., Smith, F.A. and

X.Y., Tang, D.Z. and Wang, E.T., 2017. Plants transfer lipids to sustain colonization by mutualistic mycorrhizal and parasitic fungi. Science, 356(6343): 1172-1175.
– Jie, W., Liu, X. and Cai, B., 2013. Diversity of rhizosphere soil arbuscular mycorrhizal fungi in various soybean cultivars under different continuous cropping regimes. PLoS One, 8(8): e72898.
– Johnson, N.C., Graham, J.H. and Smith, F.A., 1997. Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism-parasitism continuum. New Phytologist, 135: 575-585.
– Khasa, P.D., Chakravarty, P., Robertson, A., Thomas, B.R. and Dancik, B.P., 2002. The mycorrhizal status of selected poplar clones introduced in Alberta. Biomass Bioenergy, 22: 99-104.
– Li, L., Zhang, Y.B., Luo, J.X., Korpelainen, H. and Li, C.Y., 2013. Sex-specific responses of *Populus yunnanensis* exposed to elevated CO_2 and salinity. Physiologia Plantarum, 147: 477-488.
– Liu, J., Zhao, W., Huo, Y., Cong, X., Tian, Y., Liu, Y., Zhu, W., Su, X., Zhang, W. and Ding Ch., 2024. Arbuscular mycorrhizal fungi communities vary between poplar species in the same habitat. Rhizosphere, 29: 100827.
– Lu, Y., Wang, G., Meng, Q., Zhang, W. and Duan B., 2014. Growth and physiological responses to arbuscular mycorrhizal fungi and salt stress in dioecious plant *Populus tomentosa*. Canadian Journal of Forest Research, 44: 1020-1031.
– Maherali, H., 2014. Is there an association between root architecture and mycorrhizal growth response? New Phytologist, 204(1): 192-200.
– Matinizadeh, M., Nouri, E., Alizadeh, T. and Shirvany, A., 2022. Improving the survival, establishment and growth characteristics of Juniperus excelsa seedlings by inoculation of native mycorrhizal fungi. Forest and Wood Products, 74: 421-432 (In Persian).
– Mcgonigles, T.P., Millers, M.H., Evans, D.G., Fairchild, G.L. and Swan, J.A., 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist, 115(3): 495-501.
– Mclean, E.O., 1982. Soil pH and lime requirement: 199-224. In: Page, A.L. (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, 1159p.
– Mestre, M., Pastorino, M., Aparicio, A. and Fontenla, S., 2017. Natives helping foreigners? The effect of inoculation of poplar with patagonian beneficial microorganisms. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 17(4): 1028-1039.
– Moradi behbahani, S., Moradi, M., Basiri, R. and Smith, S.E., 2009. Arbuscular mycorrhizal inhibition of growth in barley cannot be attributed to extent of colonisation, fungal phosphorus uptake or effects on expression of plant phosphate transporter genes. New Phytologist, 181: 938-949.
– Han, S., Cheng, Y., Wu, G., He, X. and Zhao, G., 2024. Enhancing salt tolerance in poplar seedlings through arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis. Plants, 13(2): 233.
– Hao, Z.P., Xie, W., Jiang, X.L., Wu, Z.X., Zhang, X. and Chen, B.D., 2019. Arbuscular mycorrhizal fungus improves Rhizobium-Glycyrrhiza seedling symbiosis under drought stress. Agronomy, 9(10): 572.
– Hausmann, N.T. and Hawkes, C.V., 2010. Order of plant host establishment alters the composition of arbuscular mycorrhizal communities. Ecology, 91: 2333-2343.
– Henning, J.A., Weiher, E., Lee, T.D., Freund, D., Stefanski, A. and Bentivenga, S.P., 2018. Mycorrhizal fungal spore community structure in a manipulated prairie. Restoration Ecology, 26 (1): 124-133.
– Hoeksema, J.D., Chaudhary, V.B., Gehring, C.A., Johnson, N.C., Karst, J., Koide, R.T., Pringle, A., Zabinski, C., Bever, J.D., Moore, J.C.,Wilson, G.W.T., Klironomos, J.N. and Umbanhowar, J., 2010. A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi. Ecology Letters, 13(3): 394-407.
– Hooker, J.E., Munro, M. and Atkinson, D., 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi induced alteration in poplar root system morphology. Plant and Soil, 145: 207e14.
– Hu, Y.B. and Chen, B.D., 2020. Arbuscular mycorrhiza induced putrescine degradation into gamma aminobutyric acid, malic acid accumulation, and improvement of nitrogen assimilation in roots of water-stressed maize plants. Mycorrhiza, 30: 329-339.
– Hu, Y.J., Wu, S.L., Sun, Y.Q., Li, T., Zhang, X., Chen, C.Y., Lin, G. and Chen, B.D., 2015. Arbuscular mycorrhizal symbiosis can mitigate the negative effects of night warming on physiological traits of *Medicago truncatula* L. Mycorrhiza, 25(2): 131-142.
– Irigoyen, J.J., Einerich, D.W. and Sanchez-Diaz, M., 1992. Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. Physiologia Plantarum, 84: 55-60.
– Jansson, S. and Douglas, C.J., 2007. *Populus*: A model system for plant biology. Annual Review of Plant Biology, 58: 435-458.
– Jiang, Y.N., Wang, W.X., Xie, Q.J., Liu, N., Liu, L.X., Wang, D.P., Zhang, X.W., Yang, C., Chen,

Cherubini, P., Zeeman, S.C. and Frey, B., 2009. Drought tolerance of two black poplar (*Populus nigra* L.) clones: contribution of carbohydrates and oxidative stress defence. Plant, Cell & Environment, 32: 1724-1736.
– Rhoades, J.D., 1982. Soluble salts: 167-179. In: Page, A.L. (Ed.). Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties, Second Edition. American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, 1159p.
– Robbert, R., Stewart, C., Derek, J. and Bewley, D., 1980. Lipid peroxidation associated with accelerated aging of soybean axes. Plant Physiology, 65: 245-248.
– Rooney, D.C., Killham, K., Bending, G.D., Baggs, E., Weih, M. and Hodge, A., 2009. Mycorrhizas and biomass crops: opportunities for future sustainable development. Trends in Plant Science, 14: 542-549.
– Rooney, D.C., Prosser, J.I., Bending, G.D., Baggs, E.M., Killham, K. and Hodge, A., 2011. Effect of arbuscular mycorrhizal colonisation on the growth and phosphorus nutrition of *Populus euramericana* cv ghoy. Biomass and Bioenergy, 35: 4605–4612.
– Salehi, A. and Matinizadeh, M., 2017. Effect of symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi on phytoremediation processes in the soils contaminated with heavy metals. Iranian Journal of Biology, 1(1): 57-66 (In Persian).
– Salehi, A., Calagari, M. and Ahmadloo, F., 2018. Effect of some soil properties on growth of three-year black poplar (Populus nigra L.) trees in poplar plantations in south of Tehran. Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 26(3): 344-354 (In Persian).
– Salehi, A., Calagari, M., Ahmadloo, F., Sayadi, M.H.J. and Tafazoli, M., 2022. Productivity of *Populus nigra* L. in two different soils over five rotations. Acta Ecologica Sinica, 42(4):332-337.
– Sánchez, F.J., Manzanares, M., De Andres, E.F., Tenorio, J.L. and Ayerbe, L., 1998. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. Field Crops Research, 59: 225-235.
– Sanders, I.R., Alt, M., Groppe, K., Boller, T. and Wiemken, A., 1995. Identification of ribosomal DNA polymorphisms among and within spores of the Glomales: application to studies on the genetic diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities. New Phytologist, 130: 419-427.
– Siminis, C.I., Kanellis, A.K. and Roubelakis-Angelakis, K.A., 1994. Catalase is differentially expressed in dividing and nondividing protoplasts. Plant Physiology, 105(4): 1375-1383.
Mirzaei, J., 2017. Arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis with *Populus euphratica* Oliv in riparian forest and its correlation with soil physiochemical properties. Journal of Wood and Forest Science and Technology, 24(1): 17-28 (In Persian).
– Nelson, D.W. and Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter: 961-1010. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T. and Sumner, M.E., (Eds.). Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Science Society of America Inc., Madison, 961-1010.
– Nouri, E., Matinizadeh, M., Moshki, A., Zolfaghari A., Rajaei, S. and Janoušková, M., 2020. Arbuscular mycorrhizal fungi benefit drought-stressed *Salsola laricina*. Plant Ecology, 221: 683-694.
– Nouri, E., Moshki, A., Matinizadeh, M., Zolfaghari, A. and Rajaei, S., 2018. Symbiosis relationship between some arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and *Salsola laricina* and its effect on improving plant growth parameters. Rostaniha 19(2): 130-137 (In Persian).
– Opik, M., Metsis, M., Daniell, T.J., Zobel, M. and Moora, M., 2009. Large-scale parallel 454 sequencing reveals host ecological group specificity of arbuscular mycorrhizal fungi in a boreonemoral forest. New Phytologist, 184: 424-437.
– Ortas, I. and Akpinar, Ç., 2011. Response of maize genotypes to several mycorrhizal inoculums in terms of plant growth, nutrient uptake and spore production. Journal of Plant Nutrition, 34: 970-987.
– Paradi, I., Bratek, Z. and Láng, F., 2003. Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphorus supply on polymine content, growth and photosynthesis of *Plantago lanceolata*. Biologia Plantarum, 46: 563-569.
– Phillips, J.M. and 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): 158-161.
– Polle, A. and Schützendübel, A., 2003. Heavy metal signalling in plants: linking cellular and organismic responses. In Plant responses to abiotic stresses. Topics in current genetics, Vol. 4. Edited by H. Hirt and K. Shinozaki. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. pp. 167-215.
– Read, D.J. and Perez-Moreno, J., 2003. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems-a journey towards relevance? New Phytologist, 157: 475-492.
– Redecker, D., Schüßler, A., Stockinger, H., Stürmer, S. L., Morton, J. B. and Walker, C., 2013. An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomeromycota*). Mycorrhiza, 23(7): 515-531.
– Regier, N., Streb, S., Cocozza, C., Schaub, M.,

antioxidant responses in male and female *Populus cathayana* cuttings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under salt. Scientific Reports, 6: 37663.
- Xiao, X., Yang, F., Zhang, S., Korpelainen, H. and Li, C., 2009. Physiological and proteomic responses of two contrasting *Populus cathayana* populations to drought stress. Physiologia Plantarum, 136: 150-168.
- Yang, H.S., Xu, J.L., Guo, Y., Koide, R.T., Dai, Y.J., Xu, M.M., Bian, L.P., Bian, X.M. and Zhang, Q., 2016. Predicting plant response to arbuscular mycorrhizas: the role of host functional traits. Fungal Ecology, 20: 79 -83.
- Yang, H.S., Zhang, Q., Dai, Y.J., Liu, Q., Tang, J.J., Bian, X.M. and Chen, X., 2015. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth depend on root system: a meta-analysis. Plant and Soil, 389(1–2): 361-374.
- Yin, R., Hao, Z., Yuan, X., Wang, M., Li, S., Zhang, X. and Chen, B., 2023. Arbuscular mycorrhizal symbiosis alleviates ozone injury in ozone-tolerant poplar clone but not in ozone-sensitive poplar clone. Science of the Total Environment, 894: 165023.
- Zhang, S., Luo, P., Yang, J., Irfan, M., Dai, J., An, N., Li, N. and Han, X., 2021. Responses of arbuscular mycorrhizal fungi diversity and community to 41-year rotation fertilization in brown soil region of Northeast China. Frontiers in Microbiology, 12: 742651.
- Zhang, X., Chen, B.D. and Ohtomo, R., 2015. Mycorrhizal effects on growth, P uptake and Cd tolerance of the host plant vary among different AM fungal species. Soil Science and Plant Nutrition, 61(2): 359-368.
- Zhang, Y.H., Tian, Y., Ding, S.H., Lv, Y., Samjhana, W. and Fang, S.Z., 2020. Growth, carbon storage, and optimal rotation in poplar plantations: a case study on clone and planting spacing effects. Forests, 11: 842.
- Zhang, Z., Zhang, J. and Huang, Y., 2014. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the drought tolerance of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings under greenhouse conditions. New Forests, 45: 545-556.
- Sixto, H., Grau, J.M., Alba, N. and Alia, R., 2005. Response to sodium chloride in different species and clones of genus *Populus* L. Forestry, 78(1): 93-104.
- Smith, S.E. and Read, D., 1997. Mycorrhizal symbiosis, 2nd ed. London: Academic Press.
- Smith, S.E. and Read, D.J., 2008. Arbuscular mycorrhizas. In: Smith, S.E., Read, D.J. (ed.): Mycorrhizal Symbiosis. pp. 31-134. Academic Press, New York.
- Taylor, A., Pereira, N., Thomas, B., Pink, D.A.C., Jones, J.E. and Bending, G.D., 2015. Growth and nutritional responses to arbuscular mycorrhizal fungi are dependent on onion genotype and fungal species. Biology and Fertility of Soils, 51: 801-813.
- Torrecillas, E., del Mar Alguacil, M. and Roldán, A., 2011. Differences in the AMF diversity in soil and roots between two annual and perennial gramineous plants co-occurring in a Mediterranean, semiarid degraded area. Plant and Soil, 354: 97-106.
- Van Der Heijden, M.G.A. and Horton, T.R., 2009. Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems. Journal of Ecology, 97: 1139-1150.
- Wang, B. and Qiu, Y.L., 2006. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. Mycorrhiza, 16(5): 299-363.
- Wang, C., White, P.J. and Li, C., 2017. Colonization and community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in maize roots at different depths in the soil profile respond differently to phosphorus inputs on a long-term experimental site. Mycorrhiza, 27: 369-381.
- Weremijewicz, J., da Silveira Lobo O'Reilly Sternberg, L. and Janos, D.P., 2016. Common mycorrhizal networks amplify competition by preferential mineral nutrient allocation to large host plants. New Phytologist, 212: 461-471.
- Wu, N., Li, Z., Liu, H.G. and Tang, M., 2015. Influence of arbuscular mycorrhiza on photosynthesis and water status of *Populus cathayana* Rehder males and females under salt stress. Acta Physiologiae Plantarum, 37: 1-14.
- Wu, N., Li, Z., Wu, F. and Tang, M., 2016. Comparative photochemistry activity and