Publisher: Soil Science Society of Iran

Soil Biology Journal

https://sbj.areeo.ac.ir/

Research Article

Evaluation of physiological traits of hazelnut seedlings inoculated with *trichoderma harzianum* rifai under field conditions

Younes Rostamikia[1], Mohammad Matinizadeh[2] and Ahmad Rahmani[2]

[1] Assist., Prof., Forests and Rangelands Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, I.R. Iran. E-mail: **younesrostamikia@gmial.com**

[2] Assoc., Prof., Forest Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: **mohamadmatinizadeh@yahoo.com , arahmani39@gmail.com**

Article Info

Received:
November 15, 2023

Accepted:
September 18, 2024

Keywords:
Arasbaran,Corylus avellana,Stomatal conductance,Specific leaf area

Corresponding author's email:
younesrostamikia@gmial.com

DOI:
10.22092/SBJ.2024.363916.258

Extended Abstract

Background and Objectives: Hazelnut (*Corylus avellana* L.) is one of the most prominent species in the Ardabil Fandoghlou forest. This species holds significant ecological and economic importance and is highly valued in traditional medicine and the pharmaceutical industry. Unfortunately, in recent years, factors such as land conversion, livestock grazing, fire, and deforestation have contributed to the decline of this valuable species. Given the ecological and economic significance of hazelnut trees, it is crucial to restore their habitats through the use of seedlings. The success of planting efforts largely depends on the establishment and survival of the seedlings (Espahbodi, 2019), which traditionally rely on chemical fertilizers. However, the use of these fertilizers has adverse effects on the soil ecosystem. They can destroy beneficial soil microorganisms, hinder seedling growth, and lead to various negative impacts on the environment and human health. To address these issues, the application of growth-promoting microorganisms is considered one of the biological methods to enhance plant yield and reduce reliance on chemical fertilizers. *Trichoderma* species, particularly *Trichoderma harzianum*, have been recognized not only as plant growth promoters but also for their primary role as pathogen inhibitors. This research aims to investigate the effects of *T. harzianum* on the physiological properties of hazelnut seedlings under field condition.

Materials and Methods: In early May 2016, potted hazelnut seedlings were inoculated with *Trichoderma harzianum* at the Ardabil Hazelnut Nursery. These seedlings were sourced from three different locations: Fandoglou (Ardabil Hazelnut Forest), Makesh (Guilan), and Makidi (Arasbaran). By November 2017, the one-year-old hazelnut seedlings were transferred to a field adjacent to the nursery, situated on the forest edge, covering an area of 4,050 m². The seedlings were planted in a factorial arrangement using a randomized complete block design, which included two factors: three seed sources and *T. harzianum* inoculation (with control seedlings receiving no inoculation). Each treatment was replicated three times, with a total of 25 seedlings per replication, resulting in 450 seedlings planted at a spacing of 3 × 3 m under rain-fed conditions. The following physiological properties were measured: leaf area, specific leaf area, photosynthesis rate, stomatal conductance, transpiration rate, water use efficiency (WUE), and

chlorophyll content. For these measurements, three seedlings from each treatment were randomly selected. The fourth and fifth healthy, fully mature leaves from the tips of the plants were analyzed using a photosynthesis meter on a sunny day in mid-September. Measurements were conducted in natural conditions of temperature, light, and relative humidity between 9:30 and 11:30 a.m., ensuring that leaf temperatures remained constant between 20 and 25°C

Results: After four years, all measured properties were significantly influenced by fungal inoculation. Inoculated seedlings from all three origins exhibited higher values for all investigated traits compared to the control group. The seedlings of Fandoglou origin inoculated with *T. harzianum* showed the highest leaf area (22.4 cm^2), specific leaf area (119.2 $cm^2\ g^{-1}$), photosynthesis rate (18.45 µmol CO_2 $m^2\ s^{-1}$), stomatal conductance (0.198 mmol $m^2\ s^{-1}$), transpiration rate (mmol $H_2O\ m^2\ s^{-1}$), and water use efficiency (7.69 µmol CO_2 mol H_2O^{-1}). Furthermore, chlorophyll content increased by 26.49% compared to the control (non-inoculated seedlings). In contrast, the lowest measurements for leaf area (12.4 cm^2), specific leaf area (85.5 $cm^2\ g^{-1}$), photosynthesis rate (8.01 µmol CO_2 $m^2\ s^{-1}$), stomatal conductance (0.101 mmol $m^2\ s^{-1}$), water use efficiency (2.41 µmol CO_2 mol H_2O^{-1}), and chlorophyll content, which increased by 14.15%, were observed in non-inoculated seedlings from the Makidi origin.

Conclusion: The present study demonstrated that hazelnut seedlings of Fandoghlou origin, when inoculated with *T. harzianum*, exhibited superior traits compared to the seedlings from the other two origins, Makseh and Makidi. Therefore, for the production of healthy and robust hazelnut seedlings in nurseries, the Fandoghlou origin is recommended. A notable finding was the significant increase in water use efficiency (WUE) among the Fandoghlou-origin hazelnut seedlings, which showed a 150% increase compared to the control seedlings. This improvement can be attributed to the enhanced rate of photosynthesis and reduced transpiration rate in the inoculated seedlings, leading to increased water use efficiency. Consequently, this results in greater vegetative growth and improved physiological traits, which are beneficial for reforestation efforts or the establishment of hazelnut gardens in the susceptible areas of the Fandoghlou forest.

Cite this article: Rostamikia, Y., Matinizadeh, M., Rahmani, A.2024. Evaluation of physiological traits of hazelnut seedlings inoculated with *Trichoderma harzianum* Rifai Under field conditions. *Soil Biology Journal*, 12 (1), 89-104.

DOI: 10.22092/SBJ.2024.363916.258
Publisher: Soil Science Society of Iran

دو فصل‌نامه

نشریه زیست‌شناسی خاک

https://sbj.areeo.ac.ir/

مقاله پژوهشی

ارزیابی صفات فیزیویولوژیک نهال‌های مایه‌زنی شده فندق با قارچ *Trichoderma harzianum* Rifai در شرایط عرصه

یونس رستمی‌کیا [۱*]، محمد متینی‌زاده [۲] و احمد رحمانی [۲]

[۱] استادیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل ایران نویسنده مسئول: younesrostamikia@gmail.com

[۲] دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
mohamadmatinizadeh@yahoo.com, arahmani39@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۲/۸/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۲۸

چکیده

استفاده از ریزجانداران افزاینده رشد، یکی از روش‌های زیستی به منظور افزایش عملکرد گیاهان و کاهش مصرف کودهای شیمیایی محسوب می‌شود. بر این اساس، به منظور بررسی اثر بخشی *Trichoderma harzianum* بر برخی از صفات رویشی برگ و مشخصه‌های فیزیولوژیک نهال‌های فندق، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در شرایط عرصه اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل مبداء نهال در سه سطح (فندقلو، مکش و مکیدی) و مایه‌زنی قارچ در دو سطح (*T. harzianum* و شاهد) با سه تکرار ۲۵ تایی با فاصله ۳ × ۳ متر، در اراضی زراعی حاشیه جنگل فندقلوی اردبیل کاشته شدند. نتایج پس از چهار سال نشان داد نهال‌های مایه‌زنی شده در هر سه مبدأ، از لحاظ همه مشخصه‌های مورد بررسی در مقایسه با نهال شاهد (مایه‌زنی نشده) برتر بودند. بیشترین مقدار صفات مورد بررسی به نهال‌های مبداء فندقلو تعلق داشت. به‌طوری که در این نهال‌ها، سطح برگ و سطح ویژه برگ به‌ترتیب ۴۰/۹ و ۲۱/۳ درصد و مشخصه‌های فیزیولوژیک شامل فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، کلروفیل و کارایی مصرف آب به‌ترتیب ۶۶/۸، ۶۵، ۴۰/۸ و ۱۴۶/۵ درصد در مقایسه با نهال‌های شاهد افزایش داشت. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد کاشت نهال‌های فندق مایه‌زنی شده با قارچ *T. harzianum* رشد رویشی بیشتری بدنبال خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: سطح برگ، فتوسنتز، فندق، کود زیستی

مقدمه

جنگل فندقلوی اردبیل، مهم‌ترین ذخیره‌گاه ژنتیکی گونه فندق در کشور محسوب می‌شود. متاسفانه در سال‌های اخیر عوامل مختلف از قبیل تغییر کاربری، چرای دام، آتش‌سوزی و قطع بی‌رویه درختان (تهیه زغال) از مهم-ترین عوامل تاثیرگذار در تخریب این جنگل با ارزش می-باشد (رستمی‌کیا و شریفی، ۱۳۹۷). با توجه به اهمیت بوم شناختی و اقتصادی گونه فندق، بازسازی رویشگاه‌های این گونه از طریق نهال کاری از اهمیت زیادی برخوردار است. از طرفی موفقیت نهالکاری به استقرار و زنده‌مانی نهال‌های کاشته شده بستگی زیادی دارد (اسپهبدی، ۱۳۹۹) که در بیشتر مواقع از کودهای شیمیایی استفاده می‌شود. استفاده از این کودها اثرات نامطلوب بر اکوسیستم خاک داشته و علاوه بر از بین بردن ریزجانداران مفید خاک و رشد ضعیف نهال‌ها، اثرات نامطلوب متعددی بر محیط‌زیست و سلامت انسان را در پی داشته است (بای و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از راهکارهای مناسب برای کاهش اثرات نامطلوب کودهای شیمیایی بر مشخصه‌های فیزیکو- شیمیایی خاک و رشد گیاهان، استفاده از ریزجانداران مفید خاک به عنوان مکمل و یا جایگزین می‌باشد (محمدی‌فر و مقدم، ۱۳۹۹؛ جین و همکاران، ۲۰۲۲). روش زیستی استفاده از ریزجانداران مفید خاک، از جمله ***Trichoderma spp.*** و متابولیت‌های میکروبی، یک روش جدید مدیریت بهینه و سازگار با محیط زیست در مقایسه با استفاده از کودهای شیمیایی است . این رویکرد دارای مزیت‌هایی از قبیل کاهش خسارت‌های ناشی از تنش‌های محیطی (ایزدی دربندی و همکاران، ۱۳۹۸)، بهبود خواص خاک و حفظ حاصلخیزی خاک، بدون آلودگی و سازگار با محیط زیست، ایمن بودن برای سلامت انسان و مقرون به صرفه است (زین و بدل الدین، ۲۰۲۰).

اغلب جدایه‌های ***Trichoderma*** به عنوان قارچ‌های گیاهی افزاینده رشد و اصلاح کننده‌های خاک محسوب می‌شوند (وو و همکاران، ۲۰۲۳). که به‌وسیله مکانیسم‌های مختلف مانند پارازیتیسم[1] و آنتی‌بیوز[2]، رقابت در جذب مواد غذایی، تغییر شرایط محیطی ریشه و فرا ریشه[3] (نیو و همکاران، ۲۰۲۰؛ آندرژاک و یانووسکا ، ۲۰۲۲) و افزایش حلالیت عناصر معدنی جهت جذب آنها توسط گیاه، تحریک رشد (نیتو – جاکوبو و همکاران، ۲۰۱۷)، و افزایش مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های زنده و غیر زنده را سبب می‌شوند (رجالی و همکاران، ۱۴۰۱) . قارچ ***Trichoderma*** یک پارازیت طبیعی است یعنی اگر در خاک عوامل بیماری‌زای قارچی یا نماتد وجود داشته باشند، قارچ ***Trichoderma*** باعث کاهش جمعیت آن‌ها می‌شود (تامبوگالا و همکاران، ۲۰۲۰) و با افزایش حجم خاک قابل استفاده از طریق ریسه‌های[4] قارچ، افزایش رشد ریشه گیاه و ایجاد مسیرهایی با مقاومت کم برای عبور آب به سمت ریشه باعث تسهیل در جذب آب و عناصر غذایی مانند فسفر و عناصر میکرو می‌شوند و مواد معدنی را به مواد قابل استفاده تبدیل می‌کنند (تسکویچ و همکاران، ۲۰۲۲) و با تولید هورمون‌های رشد بویژه اکسین و جیبرلین و سیتوکنین رشد گیاه را سبب می شوند (یاراشوک – سایست و همکاران، ۲۰۱۴ ؛ فو و همکاران، ۲۰۱۵).

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در مورد استفاده از قارچ‌های محرک رشد روی گونه‌های چوبی گزارش شده است از جمله در تحقیقی تاثیر قارچ ***Trichoderma harzianum*** Rifai در استقرار و میزان رشد نهال‌های بید (***Salix fragilis*** L.) روی خاک‌های

[1]. Parasitism
[2]. Antibios
[3]. Rhizospheric Zone
[4]. Hyphae

آلوده به فلزات سنگین بعد از ۱۲ هفته نشان داد که خصوصیات رشدی شامل درصد زنده‌مانی، درصد استقرار، زی‌توده ریشه و تعداد برگ در نهال‌های مایه‌زنی شده در مقایسه با نهال‌های شاهد افزایش داشتند (آدامز و همکاران، ۲۰۰۷).

تالبی و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی دیگر کاربرد کاربرد *T.* harzianum بر نهال‌های خرنوب (*Ceratonia siliqua*) سبب افزایش صفات مورفولوژیک نهال قطر یقه (۷۵ درصد) و ارتفاع نهال‌ها (۵۶ درصد) در مقایسه با نهال‌های شاهد شد. در تحقیقی دیگر تاثیر مایه‌زنی قارچ‌های *T. harzianum* روی صفات رویشی ریشه نهال‌های *Pinus sylvestris* var. *mongol-ica* بعد از ۱۲ماه در ایالت لیائونینگ[5] چین نشان داد طول ریشه، سطح ریشه، میانگین قطر ریشه و تعداد شاخه به ترتیب ۴۳٪، ۱۸/۲۱، ۳/۷۷ و ۳۱/۴۰ درصد در مقایسه با نهال‌های شاهد (بدون مایه‌زنی) افزایش داشتند (هالی‌فو و همکاران، ۲۰۱۹). در داخل کشور تحقیقات چندی در زمینه تاثیر قارچ *T. harzianum* بر رشد و بهبود صفات رویشی گونه‌های جنگلی در شرایط عرصه طبیعی گزارش شده است. حسین زینعلی و همکاران (۱۳۹۹) با مطالعه اثر بخشی قارچ‌های *T. harzianum* و *T. viride* را بر مشخصه‌های رویشی نهال‌های پسته (*Pistacia vera* L.) در شرایط خاک نسبتاً شور و خشک باغ‌های پسته اطراف رفسنجان نشان دادند طول شاخه به ترتیب ۵۵/۸ و ۴۲ درصد، تعداد جوانه رویشی به‌ترتیب ۳۷/۴ و ۴۵/۶ درصد، سطح برگ به‌ترتیب ۷/۱ و ۱۲/۶ درصد و شاخص کلروفیل به‌ترتیب ۷۳/۲ و ۱۷۱/۸ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داشتند. نظری و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی تاثیر تلقیح قارچ *T. harzianum* بر خصوصیات رشدی برگ و میوه n پیوندی هلو (*Prunus persica*) در باغ تحقیقاتی دانشگاه شاهد تهران طی سه سال نتیجه گرفتند مایه‌زنی با قارچ *T. harzianum* سبب افزایش وزن‌تر، ماده خشک و محتوی نسبی آب برگ به‌ترتیب ۲۳، ۱۹/۲ و ۳۸/۶ درصد نسبت به نهال‌های شاهد شد.

از آنجا که قارچ *T. harzianum* از مهم‌ترین قارچ‌های افزاینده رشد محسوب می‌شوند و تحقیقات اندکی در خصوص نقش این قارچ، در بهبود صفات رشدی برگ گونه‌های چوبی انجام شده است. تحقیق حاضر، با هدف بررسی اثربخشی قارچ در بهبود مشخصه‌های رشدی و فیزیولوژیک برگ نهال‌های فندق جهت افزایش موفقیت پروژه‌های نهالکاری در اراضی بایر حاشیه جنگل فندقلوی اردبیل انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در اراضی زراعی روستای خانقاه سفلی واقع در منطقه جنگلی فندقلو با مختصات "۱´۲۴°۳۸ عرض شمالی و "۲۷´۳۲ °۴۸ طول شرقی و ارتفاع ۱۴۵۰ متر از سطح دریا اجرا گردید. بر اساس آمار ۱۰ ساله (۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰) ایستگاه کلیماتولوژی شهرستان نمین، میانگین دمای بیشینه، کمینه و میانگین دمای سالانه به ترتیب ۳۷/۵، ۲۱/۱- و ۸/۹ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارندگی سالانه ۳۷۰/۹ میلی‌متر است. بر اساس فرمول آمبرژه اقلیم منطقه، نیمه مرطوب با زمستان‌های سرد است.

تهیه بذر، تولید نهال

اوایل مهرماه ۱۳۹۵، میوه‌های فندق از پایه‌های مادری سالم با ویژگی‌های یکسان از سه رویشگاه جنگلی (جدول ۱) جمع‌آوری شدند. و بعد از ضد عفونی با قارچ کاربوکسین تیرام با غلظت ۲ گرم در ۱۰۰۰ گرم جهت اعمال چینه‌سرمایی[6]، به مدت چهارماه در ماسه مرطوب در دمای ۱± ۴ درجه سانتی‌گراد (یخچال) نگهداری شدند

[5]. Liaoning

[6]. Stratification

(رستمی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۷). بعد از اعمال تیمار جوانه-زنی، اوایل اردیبهشت ماه ۱۳۹۶، بذرها در گلدان‌های پلی-اتیلنی (به ابعاد۲۰× ۱۵×۱۵ سانتی‌متر) حاوی خاک استریل در نهالستان فندقلوی اردبیل کاشته شدند.

جدول ۱- مشخصات رویشگاهی مناطق جمع‌آوری بذرهای فندق

رویشگاه	ارتفاع از سطح دریا (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	جهت جغرافیایی	اقلیم
فندقلو	۱۴۳۰ -۱۴۷۰	"۱۶ ´۱۹ °۳۸	"۲۸ ´۳۶ °۴۸	جنوبی	نیمه مرطوب سرد با سه ماه فصل خشک
مکش	۱۵۵۰ -۱۶۲۰	"۰۲ ´۴۳ °۳۷	"۱۰ ´۵۳ °۴۸	جنوبی- جنوب غربی	مرطوب سرد با دو ماه فصل خشک
مکیدی	۱۴۷۰ -۱۵۲۰	"۱۵ ´۵۱ °۳۸	"۱۷ ´۳۹ °۴۶	جنوب غربی	نیمه مرطوب سرد با سه ماه فصل خشک

انتخاب قارچ و مایه‌زنی نهال‌های فندق

در این پژوهش مایه تلقیح جامد قارچ *T. harzianum* T1 با جمعیت۱۰۰ پروپاگول[۷] در هرگرم و با مشخصه‌های رویشی اندازه‌گیری شده (جدول ۲) از شرکت زیست فناور پیشتاز، تحت نظارت بخش بیولوژی خاک موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. بر اساس جدول ۲ میزان اکسین تولید شده ۲۱/۸۰ میلی‌گرم در لیتر، توانایی حل‌کنندگی فسفات معدنی ۶۶/۳ میلی‌گرم در لیتر، کربنات روی ۱۰/۶ میلی‌گرم و توان تولید آنزیم ACC– دی آمیناز و استفاده از ACC برای تامین نیتروژن را داشت (جدول ۲).

جدول ۲- مشخصه‌های رویشی قارچ *T. harzianum* T1 مایه‌زنی شده به نهال‌های فندق

تولید اکسین (میلی‌گرم بر لیتر)	حل‌کنندگی فسفات معدنی (میلی‌گرم بر لیتر)	حل‌کنندگی کربنات روی (میلی‌گرم بر لیتر)	توان تولید آنزیم ACC -دی آمیناز
۲۱/۸۰	۶۶/۳	۱۰/۶	مثبت

جدول ۳- مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل مورد مطالعه

عمق خاک (سانتی متر)	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	بافت خاک	مواد آلی (درصد)	نیتروژن (درصد)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم)
۲۰-۰	۶/۱۵	۰/۴۲۲	۳۶	۳۱	۳۳	رسی لومی	۰/۹۵	۰/۱۱	۱۱/۲۳	۱۲۳
۴۰-۲۰	۶/۳۲	۰/۲۱۹	۱۷	۳۹	۴۴	شنی لومی	۰/۸۰	۰/۱۴	۱۲/۸۲	۱۴۷

بعد از یک ماه (اوایل خردادماه)، بر اساس دستورالعمل موسسه تحقیقات خاک و آب کشور در بستر کشت هر گلدان (اطراف ریشه نونهال‌ها) ۵۰ گرم پروپاگول قارچ *T.harzianum* در عمق ۵ سانتی‌متری خاک گلدان‌ها، قرار داده شد.

کاشت نهال در عرصه

اوایل آبان‌ماه ۱۳۹۶، نهال‌های تولید شده همگن، به عرصه مجاور نهالستان واقع در اراضی بایر حاشیه جنگل به

[۷]. Propagol

مساحت۴۰۵۰ مترمربع منتقل شدند. سپس بصورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (با دو فاکتور اشاره شده در بالا شامل سه مبداء بذر و مایه‌زنی قارچ *T. harzianum* و بدون مایه‌زنی یا شاهد در سه تکرار) کاشته شدند. تعداد نهال در هر تکرار ۲۵ اصله (در مجموع ۴۵۰ اصله نهال) بود که با فاصله ۳ × ۳ متر، کاشته شده در چاله‌هایی به ابعاد۵۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر، مورد بررسی قرار گرفتند. عملیات مراقبت از قبیل حذف علف-های هرز و سله‌شکنی پای نهال‌ها، در صورت لزوم، انجام شد. قبل از کاشت نهال‌ها، از عمق‌های ۰ تا ۲۰ و۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری نمونه‌های خاک از نقاط مختلف عرصه تهیه گردید و پس از اختلاط کردن، نمونه‌های یک کیلویی جهت تعیین مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به آزمایشگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل انتقال یافت (جدول۳).

اندازه‌گیری مشخصات رشدی برگ

در سال چهارم اجرای پروژه، برای تعیین سطح برگ ابتدا سه برگ سالم وکاملاً توسعه‌یافته از بالاترین قسمت هر نهال برداشت و با دستگاه اسکنر Leaf Area Meter (مدلCRLA1 ساخت انگلستان) اندازه‌گیری شد. سطح ویژه برگ با استفاده از رابطه $\mathrm{SLA} = \frac{\mathrm{LA(cm^2)}}{\mathrm{LW(g)}}$ محاسبه شد. در این رابطه SLA سطح ویژه برگ (سانتی-مترمربع برگرم)، LA سطح برگ و LW وزن خشک برگ است (آریاس و همکاران، ۲۰۰۷). برای اندازه‌گیری وزن خشک برگ، ابتدا نمونه‌ها به مدت زمان ۴۸ ساعت داخل آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند سپس با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۷).

تعیین صفات فیزیولوژیکی

مشخصه‌های فیزیولوژیک برگ شامل هدایت روزنه‌ای، نرخ فتوسنتز خالص و تعرق سلولی در واحد سطح برگ نهال‌های فندق اندازه‌گیری شدند. بدین منظور در هر تیمار، سه نهال به‌طور تصادفی انتخاب و اندازه‌گیری-ها روی چهارمین و پنجمین برگ بالغ سالم و کاملاً رشد یافته از نوک گیاه با استفاده از یک دستگاه فتوسنتز متر (مدل CI -۳۴۰ ساخت آمریکا) در یک روز آفتابی (اواسط ماه شهریور) و در هوای آزاد تحت شرایط طبیعی دما، نور و رطوبت نسبی هوا بین ساعت ۹:۳۰ تا ۱۱:۳۰ در حالی‌که دمای ثابت برگ بین۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود، انجام شد. کارایی مصرف آب گیاه نیز از طریق تقسیم نرخ فتوسنتز به مقدار تعرق محاسبه شد (زانگ و همکاران، ۲۰۰۵). محتوی کلروفیل با استفاده از دستگاه (Model SPAD 502 Minolta, Japan) از برگ‌های قسمت بالایی نهال (از هر نهال سه برگ از یک پنجم بالایی) اندازه-گیری شد (ملیکه و شفر، ۲۰۰۹).

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم-افزارSAS 9.1 انجام گرفت. نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو- ویلک و همگنی واریانس داده‌ها از طریق آزمون لون (Levene) تعیین شد. برای بررسی تأثیر معنی‌داری تیمارهای اصلی و تأثیر متقابل آنها بر ویژگی‌های مورد بررسی نهال‌ها از آزمون آنالیز واریانس دو طرفه و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطوح آماری پنج و یک درصد استفاده شد.

نتایج

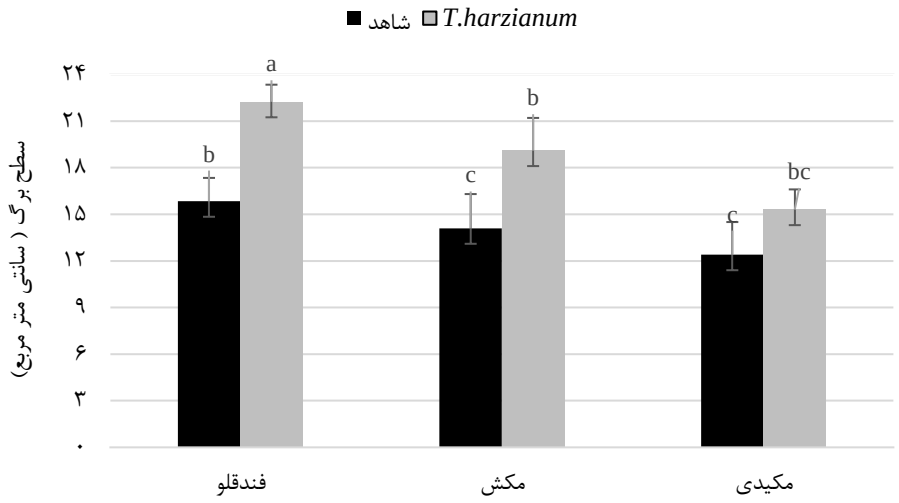
نتایج تجزیه واریانس نشان داد همه مشخصه‌های سطح برگ و سطح ویژه برگ تحت تاثیر تیمار مایه‌زنی قارچ قرار گرفتند. بطوریکه اثرات اصلی شامل مبداء نهال و قارچ و اثر متقابل مبداء نهال × قارچ بر صفات مورد بررسی نهال‌های فندق در سطح پنج و یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر مبدأ نهال و مایه‌زنی قارچ بر صفات رشدی برگ مورد مطالعه نهال‌های فندق

منبع تغییرات	درجه آزادی	سطح برگ	سطح ویژه برگ
مبداء نهال	۲	۴۳/۲۳*	۳۵/۴۵*
قارچ	۱	۱۳/۱۴**	۸۷/۴۰*
مبداء نهال × قارچ	۲	۱۰/۰۳*	۲۰/۳۸**
خطای آزمایشی	۱۲	۹/۱۹	۱۶/۱۲
خطای کل	۱۹	۷/۰۹	۱۲/۰۹
ضریب تغییرات	-	۱۰/۴۲	۱۴/۱۰

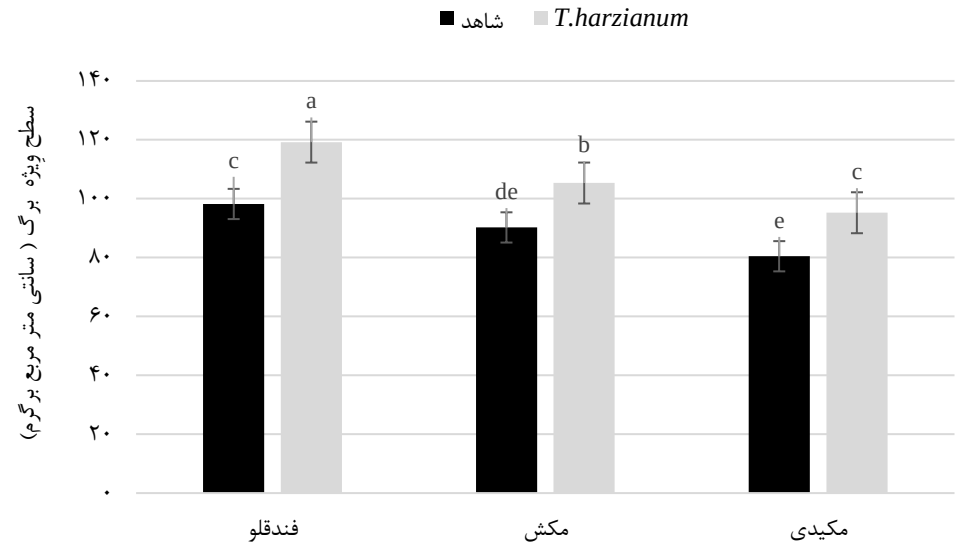
* و **: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد.

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین مقدار سطح برگ با ۲۲/۴ سانتی‌مترمربع به نهال‌های فندق (مبداء فندقلو) در تلقیح با قارچ *T. harzanium* و کمترین مقدار آن با ۱۲/۴ سانتی‌متر مربع به نهال‌های شاهد (بدون مایه‌زنی) با مبداء مکیدی تعلق دارد. نتایج نشان داد مایه‌زنی قارچ سبب افزایش ۴۰/۹، ۳۵/۴ و ۲۳/۳ درصدی سطح برگ به‌ترتیب در نهال‌های مبداء فندقلو، مکش و مکیدی در مقایسه با شاهد شد (شکل ۱).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل مبداء نهال و قارچ بر سطح برگ نهال‌های فندق

مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین مقدار سطح ویژه برگ با ۱۱۹/۲ سانتی‌مترمربع بر گرم به نهال‌های فندق (مبداء فندقلو) در تلقیح با قارچ *T. harzanium* و کمترین مقدار آن با ۸۵/۵ سانتی‌متر مربع بر گرم به نهال‌های شاهد (تلقیح نشده با قارچ) با مبداء مکیدی تعلق دارد. نتایج نشان داد مایه‌زنی قارچ سبب افزایش ۲۱/۳، ۱۶/۷ و ۱۱/۴ درصدی سطح ویژه برگ به‌ترتیب در نهال‌های مبداء فندقلو، مکش و مکیدی در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل مبداء نهال و قارچ بر سطح ویژه برگ نهال‌های فندق

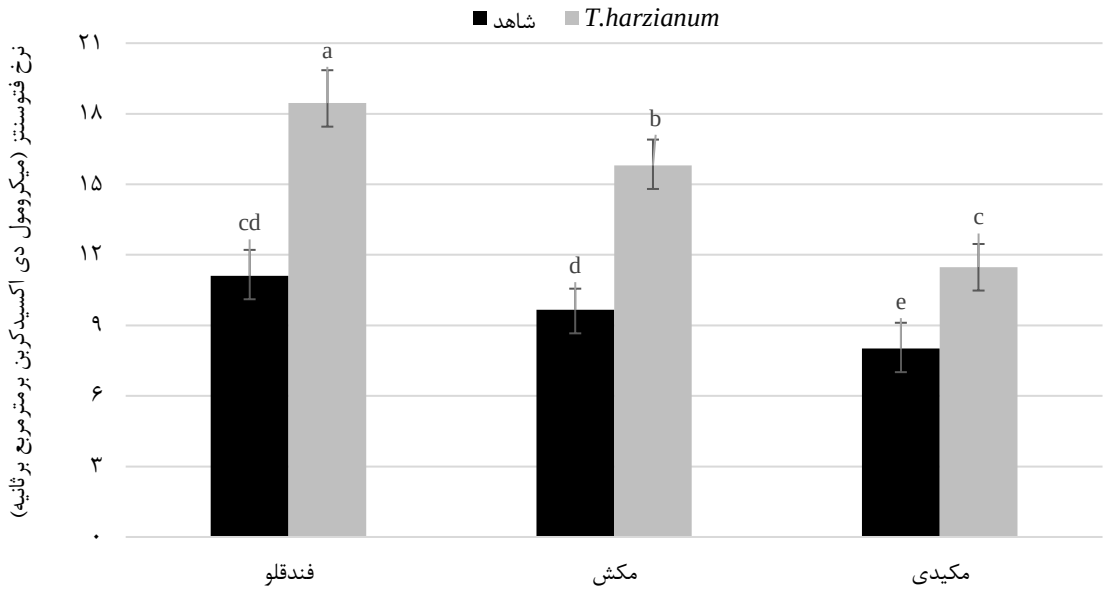
نتایج تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که اثرات اصلی مبداء نهال بر هدایت روزنه‌ای و کارآیی مصرف آب در سطح آماری یک درصد و بر فتوسنتز، تعرق و کلروفیل نهال‌های فندق در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار است. اثر اصلی قارچ بر فتوسنتز در سطح آماری یک درصد و بر سایر صفات مورد مطالعه در سطح آماری پنج درصد معنی دار است. اثر متقابل مبداء نهال× قارچ بر کلروفیل در سطح آماری یک درصد و بر سایر صفات مورد مطالعه در سطح آماری پنج درصد معنی‌دار است (جدول ۵).

جدول ۵-تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر مبداء نهال و قارچ بر خصوصیات فیزیولوژیک برگ نهال‌های فندق

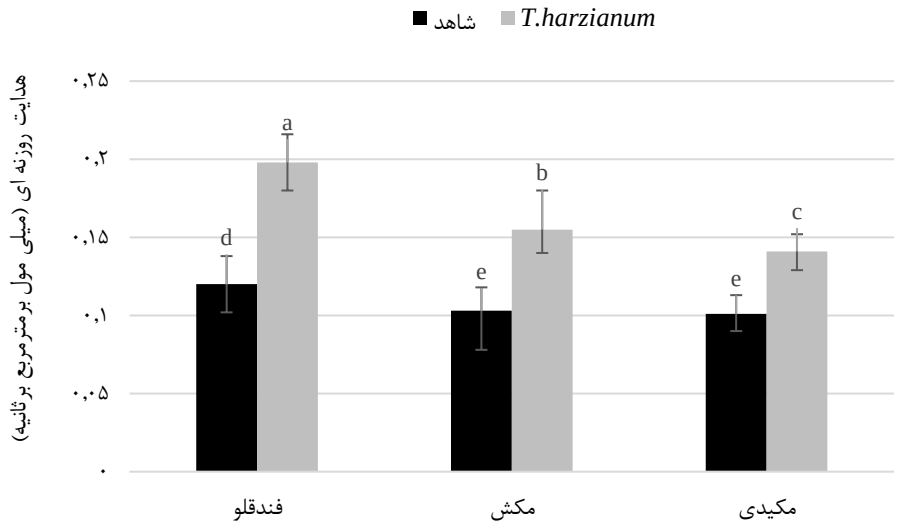
منبع تغییرات	درجه آزادی	فتوسنتز	تعرق	هدایت روزنه‌ای	کلروفیل	کارایی مصرف آب
مبداء نهال	۲	۲۷/۵۴*	۲۳/۱۵*	۳۷/۰۸**	۱۹/۱۲*	۱۲/۴۰**
قارچ	۱	۵۵/۶۷**	۴۴/۰۹*	۶/۹۰*	۳۰/۰۱*	۱۲/۱۰*
مبداء نهال × قارچ	۲	۲۲/۱۳*	۵۵/۴۰*	۳۱/۰۶*	۲۲/۲۵**	۳۵/۰۸*
خطای آزمایشی	۱۲	۱۵/۰۵	۱۹/۱۱	۱۷/۰۹	۱۱/۷۸	۱۰/۱۵
خطای کل	۱۹	۱۰۶/۱۱	۷۹/۱۲	۱۱۱/۶۵	۹۸/۵۰	۷۰/۰۲
ضریب تغییرات	-	۱۰/۱۸	۱۶/۸۸	۱۲/۳۴	۸/۸۸	۱۱/۴۵

* و **: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح یک و پنج درصد.

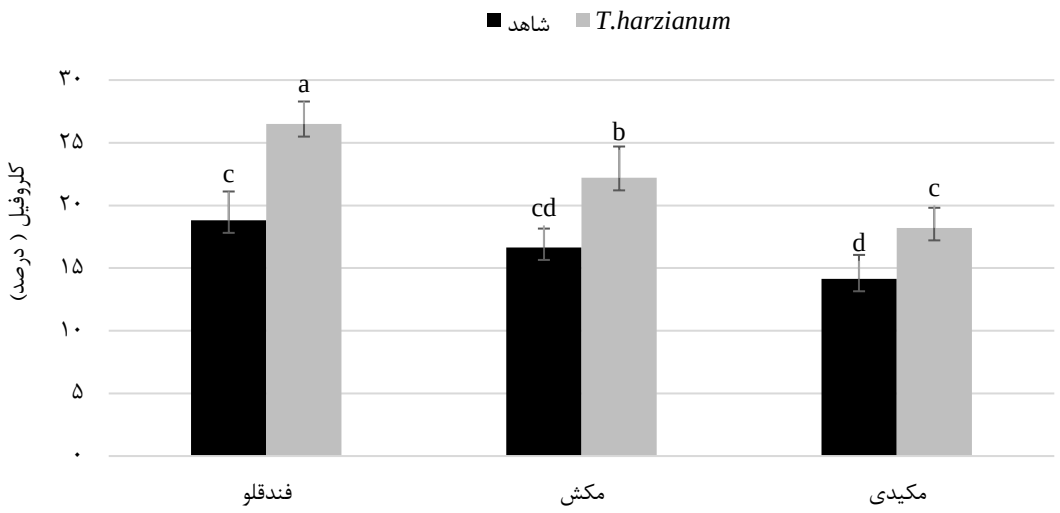
مقایسه میانگین داده نشان داد بیشترین مقدار فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، کلروفیل و کارآیی مصرف آب به‌ترتیب با ۱۸/۴۵ میکرومول دی اکسید کربن بر مترمربع برثانیه، ۰/۱۹۸ میلی‌مول بر مترمربع برثانیه، ۲۶/۴۹ درصد و ۷/۶۹ میکرومول دی‌اکسید کربن بر مول آب، به نهال‌های فندق با مبداء فندقلو در مایه‌زنی با قارچ *T. harzanium* اختصاص داشت (شکل‌های ۳ الی ۶). همچنین بیشترین مقدار تعرق با ۳/۵۶ میلی‌مول آب بر مترمربع در ثانیه به‌ترتیب به نهال‌های شاهد مبداء فندقلو تعلق داشت (شکل ۷).



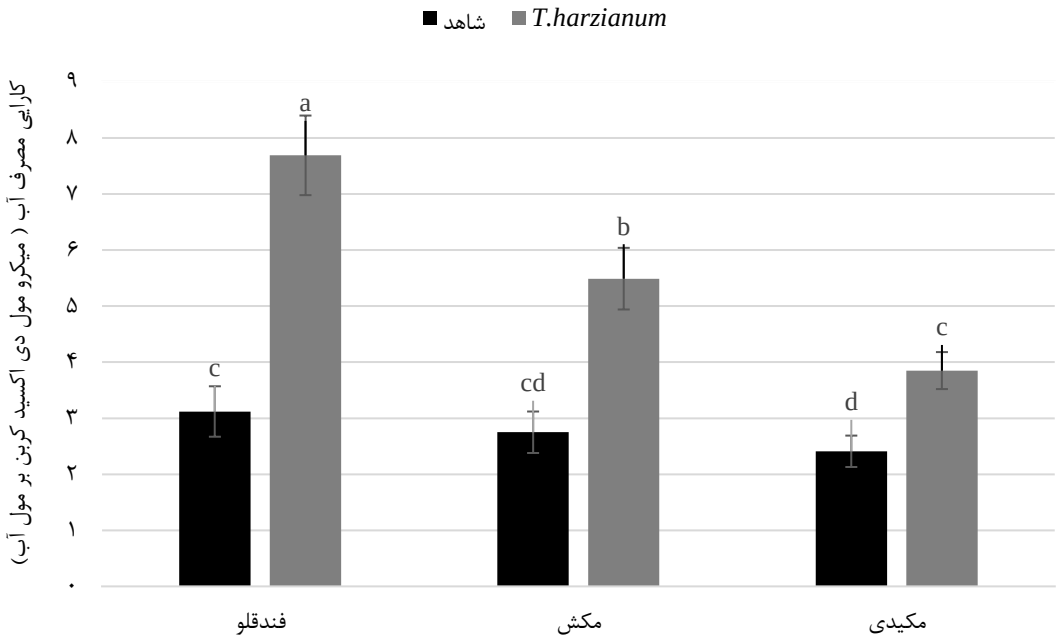
شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل مبداء نهال و تلقیح قارچ بر نرخ فتوسنتز نهال‌های فندق



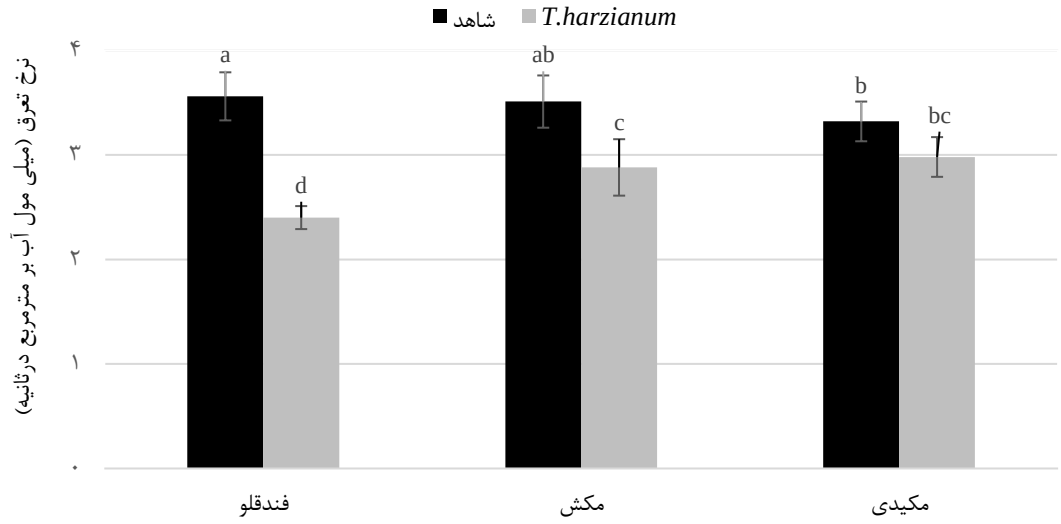
شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل مبداء نهال و تلقیح قارچ بر هدایت روزنه‌ای برگ نهال‌های فندق



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل مبداء نهال و تلقیح قارچ بر درصد کلروفیل برگ نهال‌های فندق



شکل ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل مبداء نهال و تلقیح قارچ بر کارایی مصرف آب نهال‌های فندق



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل مبداء نهال و تلقیح قارچ بر نرخ تعرق نهال‌های فندق

بحث

قارچ *Trichoderma* از مهم‌ترین قارچ‌های آزادزی خاک است که به‌طور گسترده در محیط های طبیعی پراکنش دارتد و با بسیاری از گیاهان همزیستی دارد و از طریق مکانسیم‌های مختلف تحریک رشد و توسعه گیاه را سبب می‌شوند (دروژینینا و همکاران، ۲۰۱۱). در پژوهش حاضر، اثر قارچ *T. harzanium* بر برخی از خصوصیات رشدی و صفات فیزیولوژیک برگ سه جمعیت فندق در شرایط عرصه بررسی شد. نتایج نشان داد که صفات رشدی برگ در نهال‌های هر سه مبداء، به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر تیمار مایه‌زنی قارچ قرار گرفتند. به‌طوری‌که سطح برگ نهال‌های مایه‌زنی شده از ۲۳/۴ تا ۴۰/۹ درصد و سطح ویژه برگ از ۱۱/۴تا ۲۱/۳ درصد در مقایسه با نهال‌های شاهد افزایش داشت. تاثیر مثبت کاربرد قارچ *T. harzianum* بر بهبود مشخصه‌های رویشی برگ در گونه‌های مختلف، توسط تعدادی از محققان نیز گزارش شده است که با یافته-های ما مطابقت دارد. آدامز و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند زی‌توده ریشه و تعداد برگ در نهال‌های مایه‌زنی شده بید (*Salix fragilis*) با قارچ *T. harzianum* در مقایسه با نهال‌های شاهد افزایش داشتند. هالی‌فو و همکاران (۲۰۱۹) همچنین نشان دادند مایه‌زنی قارچ *T. harzanium* روی نهال‌های کاج جنگلی (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) در طی یک سال سبب افزایش طول ریشه، سطح ریشه، میانگین قطر ریشه و تعداد شاخه به‌ترتیب ۰/۴۳، ۱۸/۲۱، ۳/۷۷ و ۳۱/۴۰ درصد در مقایسه با نهال‌های شاهد (بدون مایه‌زنی) شد. نتایج این پژوهش حاکی از اثر مثبت قارچ تریکودرما بر افزایش سطح برگ بوده است. سطح برگ گیاهان عامل مهم و تعیین کننده در بسیاری از فرآیندهای زیستی از قبیل فتوسنتز، تنفس، عبور نور از تاج پوشش، تبخیر و تعرق، چرخه کربن و ازت دارد و گیاه برای سازگار شدن با شرایط محیطی موجود، آن را تغییر می‌دهد (کلوز و همکاران، ۲۰۰۵). مکانیسم‌های پیچیده این افزایش رشد احتمالاً به دلیل تولید ترکیبات محرک رشد توسط قارچ *تریکودرما* است. در پژوهش حاضر سویه مورد استفاده قارچی توانایی نسبتاً بالایی در تولید اکسین، انحلال ترکیبات نامحلول فسفر و روی داشتند. توان تولید اکسین (کانتراس – کورنجو و همکاران، ۲۰۰۹) و حل کنندگی فسفات و روی (دونی و همکاران، ۲۰۱۴) از مهم‌ترین ویژگی‌های قارچ های محرک رشد گیاه می باشد. تغییرات ناشی از کاربرد قارچ *T. harzanium*بر سطح برگ نهال‌های پسته (*Pistacia vera* L.) توسط حسین زینعلی و همکاران (۱۳۹۹) مورد بررسی قرار گرفت و گزارش گردید سطح برگ نهال‌های مایه‌زنی شده ۷/۱ درصد در مقایسه با شاهد افزایش دارد. افزایش معنی‌دار

سطح برگ و سطح ویژه برگ نهال‌های فندق می‌تواند ناشی از ترشح هورمون‌های گیاهی بویژه اکسین توسط قارچ *Trichoderma* که نقش مهمی در رشد و توسعه گیاه دارد، باشد و به همین دلیل در گیاهان تیمار شده با *تریکودرما* سطح برگ افزایش می‌یابد. افزایش مقدار سطح برگ نهال-های فندق می‌تواند ناشی از همزیستی بین قارچ – گیاه و افـزایش جـذب مـواد غـذایی شبیه به آنچـه کـه بـرای میکـوریزا روی مـی‌دهـد، باشـد (یاراشوک – سایست و همکاران، ۲۰۱۴ ؛ فو و همکاران، ۲۰۱۵). قارچ‌های *Trichoderma* در حلالیت عناصر غذایی گیـاهی مانند فسفات، آهن، مس، منگنز و روی مؤثرند (تسکویچ و همکاران، ۲۰۲۲ ؛ آندرژاک و یانووسکا ، ۲۰۲۲).

مایه‌زنی قارچ در این پژوهش، نه تنها در افزایش صفات رشدی برگ نهال‌ها تاثیرگذار بود، بلکه صفات فیزیولوژیک نهال‌ها را نیز تحت تاثیر قرار داد و تبادلات گازی در برگ نهال‌های فندق هر سه مبداء با کاربرد *T. harzianum* افزایش یافت به‌طوری‌که بیشترین مقدار فتوسنتز (۱۶/۴۵ میکرو مول مربع برثانیه) و هدایت روزنه‌ای (۰/۱۹۸ مول مترمربع برثانیه) به نهال‌های مایه‌زنی شده مبداء فندقلوی اردبیل اختصاص داشت. در میان شاخص‌های فیزیولوژیک، فتوسنتز یکی از مهم‌ترین فرآیندها در رشد و تولید محسوب شده و حفظ سرعت آسیمیلاسیون[8] کربن اهمیت اساسی در شکل‌گیری بیومس دارد. گیاهان با افزایش شاخص‌های رشد، باز کردن روزنه‌ها و افزایش فتوسنتز، باعث تغییر در فرآیندهای تنظیم‌کننده انتقال یون‌ها و افزایش فعالیت گیاه می‌شوند (آندرژاک و یانووسکا، ۲۰۲۲) و با افزایش سطح برگ و هدایت روزنه‌ای می‌تواند به‌طور مستقیم بر فرآیندهای بیوشیمیایی مربوط به فتوسنتز اثر گذاشته و با افزایش ورود دی اکسیدکربن به داخل روزنه‌ها منجر به افزایش نرخ فتوسنتز شود (ملیکه و شفر، ۲۰۰۹؛ فو و همکاران، ۲۰۱۵). قارچ *T. harzianum* با افزایش انحلال فسفر خاک امکان دسترسی گیاه را به فسفر معدنی را افزایش می‌دهد. این عنصر نقش مهمی را در فتوسنتز گیاهان ایفا می‌کند (درایزن و همکاران، ۲۰۲۰).

محتوای کلروفیل برگ می‌تواند باعث بهبود ساختار کلروپلاست و افزایش عملکرد مناسب دستگاه فتوسنتزی شود، بنابراین افزایش و یا حفظ محتوای کلروفیل برگ می-تواند به عنوان یک عامل زیستی استفاده قرار گیرد (تیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ لی و همکاران، ۲۰۱۸). در پژوهش حاضر، همزیستی قارچ باعث افزایش محتوای کلروفیل و کارایی مصرف آب در همه نهال‌های مایه‌زنی شده نسبت به نهال‌های شاهد شد. بطوری که محتوی کلروفیل نهال‌های مایه‌زنی شده فندق مبداء فندقلو، مکش و مکیدی به‌ترتیب ۴۰/۸، ۳۳/۳ و ۲۸/۷ درصد و کارایی مصرف آب به ترتیب ۱۴۶/۵، ۹۹/۶ و ۵۹/۷ درصد در مقایسه با نهال‌های شاهد افزایش داشت. در این راستا مطالعات حسین زینعلی و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد نهال‌های مایه‌زنی شده پسته (*Pistacia vera* L.) با قارچ *T. harzianum* محتوی کلروفیل نهال‌ها را تا ۷۳/۲ درصد در مقایسه با شاهد افزایش داد که با یافته‌های ما مطابقت دارد. در این زمینه می‌توان اظهار داشت قارچ با تأثیر بر پروتئین‌های دخیل در فرآیند فتوسنتز و چرخه کالوین و افزایش بیان آنها، نقش مؤثری در حفظ و پایداری فتوسنتز ایفا می‌کند. افزایش محتوی کلروفیل در گیاهان تلقیح شده با قارچ می‌تواند به علت بهبود بهره‌وری مصرف آب در گیاه باشد (لیجیرا و همکاران، ۲۰۲۰).

نتیجه گیری کلی

پژوهش حاضر نشان داد نهال‌های فندق مبدأ فندقلو تحت تاثیر مایه‌زنی قارچ، در مقایسه با دو مبداء مکش و مکیدی از لحاظ صفات مورد مطالعه، برتر بودند. بنابراین می‌توان برای تولید نهال سالم و قوی فندق در

[8]. Asimilation

نهالستان، از مبداء فندقلو استفاده کرد. نکته حائز اهمیت در مایه‌زنی نهال‌ها با قارچ ***T. harzianum*** افزایش کارآیی مصرف آب نهال‌های فندق با مبداء فندقلو تا حدود ۱/۵ برابر در مقایسه با نهال‌های شاهد بود. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد، نهال میکوریزی فندق با افزایش دادن سرعت فتوسنتز و کاهش تعرق موجب افزایش راندمان آب مصرفی شده و می‌تواند رشد رویشی و فیزیولوژیک بیشتری در نهالکاری و یا احداث باغات فندق در اراضی مستعد منطقه فندقلوی اردبیل را داشته باشد.

فهرست منابع

[۱] اسپهبدی، ک. ۱۳۹۹. لزوم توجه به محوطه‌های بذرگیری در برنامه توسعه جنگل. طبیعت ایران. ۵ (۲): ۲۱-۱۷.

[۲] ایزدی دربندی، ا.، نباتی، ج.، نظامی، ا.، اسکوئیان، ا. ۱۳۹۸. تأثیر کودهای زیستی بر بهبود رشد و عملکرد نخود (*Cicer arientinum* L.) با روش‌های مختلف کنترل علف‌های هرز. زیست شناسی خاک، ۷ (۲): ۱۹۵-۲۱۱.

[۳] رجالی، ف.، کاری دولت آباد، ح.، صفری،م.، فضلی‌خانی، ف. ۱۴۰۱. تأثیر قارچ‌کش‌های سیستمیک بر همزیستی قارچ میکوریزی *Rhizophagus irregularis* و صفات رویشی در دو گیاه گندم و ذرت. زیست شناسی خاک، ۱۰ (۱): ۸۱-۹۲.

[۴] رستمی‌کیا، ی. و شریفی، ج. ۱۳۹۷. جنگل فندقلو بزرگترین ذخیره‌گاه جنگلی فندق ایران. طبیعت ایران. ۳(۶): ۹۰-۹۹.

[۵] رستمی‌کیا، ی.، طبری کوچکسرایی، م.، اصغرزاده، ا. و رحمانی، ا. ۱۳۹۷. اثر چینه‌سرمایی بر صفات جوانه‌زنی بذر بدون پوسته و با پوسته سه اکوتیپ فندق جنگلی(*Corylus avellana* L.). جنگل و فرآورده‌های چوب. ۷۱(۱): ۱۲-۱.

[۶] حسین زینعلی، ع.، عباس‌زاده دهیجی، پ.، علایی، ح.، حسینی فرد، س.ج. و اخگر، ع.ر. ۱۳۹۹. بررسی تأثیر قارچ‌های تریکودرمای محرک رشد بر بهبود رشد و تغذیه درختان پسته در شرایط باغی. زیست شناسی خاک، ۸ (۲): ۱۱۵-۱۲۹.

[۷] محمدی فر، ف.، مقدم، م. ۱۳۹۹. تأثیر مایه‌زنی قارچ‌های مایکوریزا بر ویژگی‌های رشدی، پایداری غشاء، محتوای نسبی آب برگ و جذب عناصر گشنیز تحت تنش کادمیوم، زیست شناسی خاک، ۸ (۱): ۲۵-۴۰.

[۸] ناظری، م.، طباطبایی، س.ج. و شرفی، ی. ۱۴۰۲. ارزیابی عملکرد و کیفیت میوه هلو (*Prunus persics* var. red top) در کشت ریشه منقسم تلقیح شده با قارچ و سطوح مختلف آبیاری. علوم باغبانی، ۳۷ (۱): ۱۰۵-۱۱۹.

[9] Adams, P., De-Leij, F. A. and Lynch, J. 2007. Trichoderma harzianum Rifai 1295-22 mediates growth promotion of crack willow (Salix fragilis) saplings in both clean and metal-contaminated soil. Microbial ecology, 54, 306-313.

[10] Andrzejak, R. and Janowska, B. 2022. *Trichoderma* spp. Improves Flowering, Quality, and Nutritional Status of Ornamental Plants. International Journal of Molecular Sciences, 23, 15662. https://doi.org/10.3390/ijms232415662

[11] Arias, D., Calvo-Alvarado, J. and Dohrenbusch, A. 2007. Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. Forest Ecology Management, 247:185–193.

[12] Bai Y.C., Chang, Y., Hussain, M., Lu, B., Zhang, J.P., Song, X.B., Lei, X.S. and Pei. D. 2020. Soil Chemical and Microbiological Properties Are Changed by Long-Term Chemical Fertilizers That Limit Ecosystem Functioning. Microorganisms, 8, 8(5):694. doi: 10.3390/microorganisms8050694.

Combined with Bio-Organic Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Yield and Quality of Lettuce. Frontiers in Microbiology, doi: 10.3389/fmicb.2022. 863325.

[22] Li, Y., He, N., Hou, J., Xu, L., Liu, C., Zhang, J., Wang, Q., Zhang, X. and Wu, X. 2018. Factors Influencing Leaf Chlorophyll Content in Natural Forests at the Biome Scale. Frontiers in Ecology and Evolutio n. 6:64. doi: 10.3389/fevo.2018.00064

[23] Ljira, A.M., Hussain, T., Waghmode, T.R., Zhao, H., Sun, H., Liu, X., Wang, X. and Liu, B. 2020. *Trichoderma* Enhances Net Photosynthesis, Water Use Efficiency, and Growth of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under Salt Stress. Microorganisms. 11;8(10):1565. doi: 15.3390/microorganisms8101565.

[24] Mielke, M.S. and Schaffer, B. 2009. Photosynthetic and growth responses of Eugenia uniflora L. seedlings to soil floodingand light intensity. Environmental and Experimental Botany.12: 24-31 doi: 10.1016/j.envexpbot.

[25] Nieto-Jacobo, M. F., Steyaert, J. M., Salazar-Badillo, F. B., Nguyen, D. V., Rostás, M., Braithwaite, M., De Souza, J. T., Jimenez-Bremont, J. F., Ohkura, M., & Stewart, A. 2017. Environmental growth conditions of Trichoderma spp. affects indole acetic acid derivatives, volatile organic compounds, and plant growth promotion. Frontiers in plant science, 8, 102.

[26] Niu, B., Wang, W., Yuan, Z., Sederoff, R. R., Sederoff, H., Chiang, V. L. and Borriss, R. 2020. Microbial interactions within multiple-strain biological control agents impact soil-borne plant disease. Frontiers in Microbiology, 11, 585404.

[27] Tian, M., Yu, G., He, N. and Hou, J. 2016. Leaf morphological and anatomical traits from tropical to temperate coniferous forests: mechanisms and influencing factors. Scientific Reports, 6:19703. doi: 10.1038/srep19703

[28] Thambugala, K.M., Daranagama, D.A., Phillips, A.J.L., Kannangara, S.D. and Promputtha, I. 2020.Fungi vs. fungi in biocontrol: An overview of fungal

[13] Close, D. C., Beadle, C. L. and Brown, P. H. 2005. The physiological basis of containerized tree seedling 'transplant shock: a review. Australian Forestry, 68 (2): 112-120.

[14] Contreras-Cornejo, H.A., Macias-Rodriguez, L., CortesPenagos, C. and Lopez-Bucio, J. 2009. *Trichoderma* virens, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin dependent mechanism in Arabidopsis. Plant Physiology 149: 1579–1592.

[15] Doni, F., Isahak, A., Zain, C.R.C.M. and Yusoff, W.M.W. 2014. Physiological and growth response of rice plants (*Oryza sativa* L.) to *Trichoderma* spp. inoculants. AMB Express 4: 2-7.

[16] Driesen, E., Van den Ende, W., De Proft, M. and Saeys, W. 2020. Influence of Environmental Factors Light, CO2, Temperature, and Relative Humidity on Stomatal Opening and Development: A Review. Agronomy, 10,121. https://doi.org/10.3390/agronomy10121 975.

[17] Druzhinina, I.S., Seidl-Seiboth, V., Herrera-Estrella, A., Horwitz, B.A., Kenerley, C.M., Monte, E. and Kubicek, C.P. 2015. *Trichoderma*: The genomics of opportunistic success. Nature Reviews Microbiology, 9, 749–759.

[18] 18 Fu, S. F., Wei, J. Y., Chen, H. W., Liu, Y. Y., Lu, H. Y. and Chou, J. Y. 2015. Indole-3-acetic acid: A widespread physiological code in interactions of fungi with other organisms. Plant signaling & behavior, 10 (8), e1048052.

[19] Halifu, S., Deng, X., Song, X. and Song, R. 2019. Effects of two Trichoderma strains on plant growth, rhizosphere soil nutrients, and fungal community of Pinus sylvestris var. mongolica annual seedlings. Forests, 10(9), 758. doi:10.3390/f10090758

[20] Jaroszuk-Ściseł, J., Kurek, E. and Trytek, M. 2014. Efficiency of indoleacetic acid, gibberellic acid and ethylene synthesized in vitro by Fusarium culmorum strains with different effects on cereal growth. Biologia, 69, 281-292.

[21] Jin, N., Jin, L., Wang, S., Li, J., Liu, F., Liu, Z., Luo, S., Wu, Y., Lyu, J. and Yu J. 2022. Reduced Chemical Fertilizer

antagonists applied against fungal plant pathogens. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 10, 718, doi:10.3389/fcimb.2020.604923.

[29] Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E. and Jaroszuk-Ściseł, J. 2022. Trichoderma: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. International Journal of Molecular Sciences. 19, 23(4):2329. doi: 10.3390/ijms23042329.

[30] Woo, S.L., Hermosa, R., Lorito, M. and Monte, E. 2023. Trichoderma: a multipurpose, plant-beneficial microorganism for eco-sustainable agriculture. Nature Reviews Microbiology, 21(5):312-326. doi: 10.1038/s41579-022-00819-5.

[31] Yang, Y., Liu, Q., Han, C., Qiao, Y.Z., Yao, X.Q. and Yin, H.J. 2007. Influence of water stress and low irradiance on morphological and physiological characteristics of *Picea asperata* seedlings, Photosynthetica, 45: 613-619.

[32] Zhang, X., Wu, N. and Li, C. 2005. Physiological and growth responses of *Populus davidiana* ecotypes to different soil water contents. Arid Environment, 60: 567-579.

[33] Zin, N.A. and Badaluddin, N.A. 2022. Biological functions of Trichoderma spp. for agriculture applications. Annals of Agricultural Sciences 65: 168–178. doi.org/10.1016/j.aoas.2020.09.003.