



The Effect of Inoculation of Growth-Stimulating Bacteria on Some Leaf Growth Traits and Nutritional Elements of Hazelnut Seedlings Under Field Conditions

Y. Rostamikia^{1*}, A. Rahmani² and M. Teimouri³

(Received: 18 October 2023; Accepted: 10 January 2024)

Abstract

Growth-promoting bacteria are among the beneficial soil microorganisms, and by improving the soil quality, they increase the growth and nutritional traits of the plant. Therefore, in order to investigate the effect of growth-promoting bacteria on the leaf surface, specific leaf surface and absorption of nutritional elements of hazelnut seedlings, a factorial experiment was carried out in the form of a randomized complete block design in the field conditions. The main factor was the origin of the seedling (at two levels: Fandoglou and Makesh) and bacterial inoculation (at five levels: *P. putida*, *B. subtilis* and *E. cloaca*, combination of them and Control) with three replications. Twelve seedlings were planted at a distance of 3 × 3 m in holes with dimensions of 50 × 50 × 50 cm on an area of 3240 m² in the agricultural lands at the neighborhood of Fandoglou forest in Ardabil. The results after four years showed that the inoculated seedlings of both origins were superior in terms of all investigated traits compared to the control (un-inoculated) seedlings. The highest amount of traits was assigned to the seedlings of Fandoglou origin inoculated with the combination of all three bacteria (*P. putida*, *B. subtilis* and *E. cloaca*). The leaf area and specific leaf area were 53.1 and 37.7% more in the inoculated seedling compared to the control, respectively. The concentration of nitrogen, potassium, phosphorous, iron and zinc in the seedling leaf increased by 59.4, 89.5, 23.7, 45.4 and 60.6% compared to the control, respectively. Finally, it can be concluded that the planting of hazelnut seedlings inoculated with growth-stimulating bacteria (combination of the three mentioned bacteria) will have more vegetative growth.

Keywords: Bio-fertilizer, Hazelnut, Leaf area, Nitrogen.

Background and Objective: Hazelnut (*Corylus avellana* L.) is considered one of the most significant species of Ardabil Fandoglou forest in Iran. This species is ecologically and economically important and also is one of the most valuable medicinal plants in the traditional medicine. Hazelnut kernel is very important in human nutrition and health as it has different kind of vitamins, healthy oils (mostly oleic acid), protein, fiber and antioxidants. Unfortunately, in recent years, conversion of land use, animal grazing, fire, and excessive

1- Forests and Rangelands Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ardabil, Iran.

2- Forest Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

* Corresponding author, Email: younesrostamikia@gmail.com

cutting of trees (for charcoal production) are among the most important factors in destroying the habitats of this species. Therefore, it is necessary to restore and develop the habitats of hazelnut through the production of healthy and quality seedlings. To increase successful planting programs, the ability of seedlings against environmental stresses should be increased by improving the uptake of water and nutrients (Arias et al., 2007). One of the solutions that has been noticed in recent years, is the application of growth-promoting bacteria. Plant growth-stimulating bacteria are a group of free-living and non-symbiotic rhizosphere bacteria that could improve plant growth by one or more direct and indirect mechanisms (Backer et al., 2018). The present research was conducted to investigate the effect of these microorganisms on the leaf growth and nutrients concentration of hazelnut seedlings in order to provide practical solutions for the development of hazelnut nursery in the neighborhood of the Fandoglou forest of Ardabil.

Methods: In November, similar seedlings were transferred to the area adjacent to the nursery, located in the barren lands of the forest neighborhood. Experiment was carried in randomized complete block design with two main factors including the origin of seedlings (at two levels: Fandoglou and Makesh) and bacterial inoculation (at five levels: *P. putida*, *B. subtilis*, *E. cloaca* separately, the combination of three bacteria, and control). The seedlings were planted at a distance of 3 × 3 m in holes with dimensions of 50 × 50 × 50 cm in the agricultural lands at the neighborhood of Fandoglou forest of Ardabil. In the fourth year, the leaf area, specific leaf area, and leaf concentration of nutritional elements (nitrogen, phosphorous, potassium, iron and zinc) in the Hazelnut seedlings were measured.

Results: The results showed that inoculation of hazelnut seedlings (from both origins) with bacteria separately and in combination had a significant effect on the leaf growth traits and concentration of nutritional elements. The maximum leaf area (24.5 cm²) and specific leaf area (135.3 cm²/g) were observed in the seedlings (Fandoglou origin) inoculated with a combination of three bacteria. In addition, the highest concentrations of nitrogen (3.56 %), phosphorous (0.36 mg/g), potassium (135.3 mg/g), iron (1.35 mg/g) and zinc (26.10 mg/g) were obtained in the seedlings (Fandoglou origin) inoculated with a combination of three bacteria

Conclusions: With considering the positive effect of growth-stimulating bacteria on leaf growth traits and nutritional conditions of hazelnut seedlings, the combined inoculation of three bacteria (*P. putida*, *B. subtilis* and *E. cloacae*) is suggested for the successful planting of hazelnut seedlings in the nursery and also in the field.

References:

1. 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. *For. Ecol. Manage.* 247, 185–193.
2. Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., Smith, D.L., 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of bio-stimulants for sustainable agriculture. *Front. Plant Sci.* 9, 1473–1485.

اثر مایه‌زنی باکتری‌های محرک رشد بر برخی از صفات رشدی برگ و عناصر غذایی نهال‌های فندق در شرایط عرصه

یونس رستمی کیا^{۱*}، احمد رحمانی^۲ و مریم تیموری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰)

چکیده

باکتری‌های محرک رشد از جمله ریزجانداران مفید خاک هستند که از راه بهبود کیفیت خاک، سبب افزایش صفات رشدی و تغذیه‌ای گیاه می‌شوند. از این رو، به منظور بررسی تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر سطح برگ، سطح ویژه برگ و جذب عناصر غذایی نهال‌های فندق، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در شرایط عرصه اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی شامل مبدأ نهال در دو سطح (فندقلو و مکش) و مایه‌زنی باکتریایی در پنج سطح (*Pseudomonas putida*، *Bacillus subtilis* و *Enterobacter cloaca* به طور جداگانه، ترکیب سه باکتری و شاهد) با سه تکرار ۱۲ تایی با فاصله ۳×۳ متر در چاله‌هایی به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر در سطح ۳۲۴۰ مترمربع بود که در زمین‌های زراعی حاشیه جنگل فندقلوی اردبیل کاشته شدند. پس از گذشت چهار سال نتایج نشان داد که نهال‌های مایه‌زنی شده هر دو مبدأ، از لحاظ همه صفات مورد بررسی در مقایسه با نهال شاهد (مایه‌زنی نشده) برتر بودند. بیش‌ترین میزان صفات مورد بررسی به نهال‌های مبدأ فندقلو با مایه‌زنی ترکیبی هر سه باکتری (*P. putida*، *B. subtilis* و *E. cloaca*) اختصاص داشت. به‌طوری‌که در این نهال‌ها، سطح برگ و سطح ویژه برگ به ترتیب ۵۳/۱ و ۳۷/۷ درصد، جذب عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی به ترتیب ۵۹/۴، ۸۹/۵، ۲۳/۷، ۴۵/۴ و ۶۰/۶ درصد در مقایسه با نهال‌های شاهد افزایش یافت. در نهایت می‌توان نتیجه‌گیری کرد کاشت نهال‌های فندق مایه‌زنی شده با باکتری‌های محرک رشد (ترکیب سه باکتری مذکور) به دلیل افزایش صفات رشدی برگ و نیز بهبود وضعیت تغذیه‌ای، رشد رویشی بیش‌تری خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: نیتروژن، سطح برگ، فندق، کود زیستی.

مقدمه

گونه‌های جنگل فندقلوی اردبیل در ایران محسوب می‌شود

(Rostamikia and Sharifi, 2019). این گونه به لحاظ

فندق با نام علمی (*Corylus avellana* L.) از شاخص‌ترین

۱- بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، اردبیل، ایران

۲- بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: younesrostamikia@gmail.com

محرك رشد گیاه شامل مجموعه متنوع و نامتجانسی از باکتری-های مختلف شامل باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن غیرهمزیست (آزادزی یا همیار) محیط ریشه، محلول‌کننده‌های فسفر، پتاسیم، گوگرد و سلیکات می‌باشند (Basu et al., 2021). طیف وسیعی از این باکتری‌ها، باکتری‌های محلول‌کننده فسفات، تثبیت‌کننده‌های نیتروژن و ترسیب‌کننده‌های آهن هستند که جذب آن‌ها را توسط گیاه میزبان تسهیل می‌کنند. استفاده از این باکتری‌ها تحت عنوان کود زیستی در کاشت گیاهان زراعی، باغی و جنگلی رو به افزایش است زیرا باعث کاهش استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و مواد شیمیایی می‌شوند (Gamalero and Glick, 2015). باکتری‌های جنس *Enterobacter*، *Bacillus*، *Pseudomonas* از راه تولید سیدروفورها، هورمون‌های گیاهی اکسین، جیبرلین، ساخت آنتی بیوتیک‌ها، انحلال ترکیبات فسفر و افزایش جذب آن توسط گیاه، تثبیت نیتروژن، تنظیم میزان اتیلن در گیاه و تولید ترکیبات فرار سبب تحریک رشد گیاه می‌شوند (Backer et al., 2018 ; Basu et al., 2021; Silva et al., 2023; de Andrade et al., 2023). در واقع باکتری‌های محرك رشد علاوه بر توانایی مبارزه با عوامل بیماری‌زایی گیاهی از راه تولید آنتی‌بیوتیک‌ها، آنزیم‌ها و قارچ‌کش‌ها، افزایش حلالیت فسفر و فراهمی آب و عناصر غذایی نقش مهمی در افزایش رشد گونه‌های جنگلی، باغی و زراعی دارند (Du Jardin, 2015; Kumar et al., 2019; Gao et al., 2022). به‌طور کلی، توان رقابتی زیاد در ریزوسفر، توانایی بهبود صفات رویشی و فیزیولوژیک بدون خطر برای سلامتی انسان و محیط زیست و تحمل‌پذیری زیاد در برابر تنش‌های محیطی موجود در خاک و گیاه، از شاخص‌ترین ویژگی‌های باکتری‌های محرك رشد هستند (Gamalero and Glick, 2015). در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در مورد تأثیر باکتری‌های محرك رشد بر غلظت عناصرغذایی برگ گونه‌های چوبی انجام شده است. از جمله در پژوهشی کاربرد باکتری *Pseudomonas fluorescens* بر بهبود صفات رویشی نهال‌های بلوط (*Quercus coccifera*) و کاج حلب (*Pinus*

اکولوژیک و اقتصادی اهمیت زیادی دارد و یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی با ارزش در طب سنتی و صنایع دارویی است. مغز فندق به دلیل دارا بودن انواع ویتامین‌ها، مواد مغذی، چربی‌های سالم (غالباً اسید اولئیک)، پروتئین، فیبر و آنتی-اکسیدان‌ها نقش بسیار مهمی در تغذیه و سلامت انسان دارد (Delgado et al., 2010; Esposito et al., 2017; Ivanović et al., 2020). قسمت‌های مختلف این گیاه دارای متابولیت‌های ثانویه متعددی است که خواص دارویی، ضدسرطانی و ضد میکروبی دارند و برگ‌های آن به دلیل دارا بودن عناصر مهم تغذیه‌ای، کمک فراوانی به بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌نماید (Esposito et al., 2017). در سال‌های اخیر تبدیل کاربری، چرای دام، آتش‌سوزی و قطع بی‌رویه درختان (تهیه زغال) از مهم‌ترین عوامل تخریب رویشگاه‌های این گونه بوده است (Rostamikia and Sharifi, 2019). در این مناطق همگام با تخریب پوشش گیاهی، تخریب خاک نیز صورت گرفته است که در نتیجه، فقر عناصر غذایی و شرایط ریزاقليم نامساعد، باعث شده استقرار نهال‌های کاشته شده در این جنگل‌ها بسیار محدود و با دشواری مواجه شود. برای غلبه بر دشواری‌های موجود، راهکارهایی لازم است تا توانایی نهال‌ها را در برابر تنش‌های محیطی از راه بهبود جذب آب و مواد غذایی افزایش دهد و بدین ترتیب برنامه‌های نهال‌کاری را با موفقیت روبه‌رو سازد (Rostamikia and Sharifi, 2019; Rostamikia et al., 2023). از این‌رو ضرورت دارد از راه تولید نهال‌های سالم و با کیفیت نسبت به احیاء و توسعه رویشگاه‌های این گونه اقدام کرد.

یکی از راهکارهایی که در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده، استفاده از کودهای زیستی (باکتری‌های محرك رشد) است (Besharati, 2022). باکتری‌های محرك رشد گیاه گروهی از باکتری‌های ریزوسفری آزادزی و غیرهمزیست خاک هستند که می‌توانند با یک یا چند مکانیسم به‌طور مستقیم و غیرمستقیم رشد گیاهان را بهبود بخشند (Compant et al., 2021; Cipriano et al., 2021; de Andrade et al., 2023). باکتری‌های

BA-8 *putida* افزایش غلظت عناصر نیتروژن و فسفر در برگ را در پی داشت ولی تأثیری در افزایش غلظت کلسیم و سدیم برگ نسبت به شاهد نداشت (Karakurt and Aslantas, 2010). در پژوهشی دیگر کاربرد ترکیبی باکتری‌های حل‌کننده نیتروژن و فسفر (*Bacillus megaterium* M3 و *Azospirillum* sp-245) روی ارقام باغی سیب پس از دو سال، سبب افزایش نیتروژن (۴ درصد)، فسفر (۱۴/۱ درصد)، پتاسیم (۹/۸۷ تا ۶/۷۰)، منیزیم (۸/۶ درصد)، کلسیم (۴/۴ درصد)، آهن (۱۲ درصد)، روی (۷/۱ درصد)، منگنز (۹/۶ درصد) و بر (۳/۱ درصد) در برگ‌های آن‌ها گردید (Yildiz et al., 2022). ریزوباکتری‌های *B. subtilis* و *P. putida* جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی هستند (Besharati, 2022) که می‌توانند از راه تولید سیدروفورها، ساخت آنتی‌بیوتیک‌ها، تولید و تنظیم میزان هورمون‌های گیاهی با افزایش جذب فسفر و تثبیت نیتروژن موجب بهبود رشد گیاه شوند (Vejan et al., 2016; Basu et al., 2021).

با توجه به این‌که در کشور پژوهش‌های اندکی در زمینه تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر بهبود عناصر غذایی نهال‌های جنگلی در شرایط عرصه (طبیعت) گزارش شده است، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر این ریزجانداران بر صفات مذکور در عرصه به‌منظور ارائه راهکارهای اجرایی برای توسعه نهال-کاری فندق انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در حاشیه جنگل فندقلو (زمین‌های زارعی دیم واقع در روستای خانقاه سفلی) با مختصات ۳۸ درجه و ۲۴ دقیقه و ۱ ثانیه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۲ دقیقه و ۲۷ ثانیه طول شرقی و ارتفاع ۱۴۵۰ متر از سطح دریا انجام گرفت. میانگین دمای سالانه ۹/۱ سلسیوس، میانگین دمای بیشینه ۲۰/۸ درجه سلسیوس، میانگین دمای کمینه ۴/۵ درجه سلسیوس، میانگین بارش سالانه ۳۷۸/۹ میلی‌متر و اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب با زمستان‌های سرد است (Rostamikia and Sharifi, 2019).

halepensis) نشان داد شاخص‌های رویشی گیاه مانند سطح برگ، جرم خشک برگ، غلظت نیتروژن برگ، نرخ فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای و پتانسیل آبی نهال‌های مایه‌زنی شده با باکتری در مقایسه با شاهد بیش‌تر است (Esitken et al., 2006). ارزیابی اثربخشی مایه‌زنی باکتری‌های *Pseudomonas putida* BA-8 و *Bacillus* OSU-142 به‌طور مجزا و ترکیبی بر عملکرد و ترکیبات عناصر غذایی برگ رقم باغی گیلان *Prunus avium* cv. 0900 Ziraat در استان قونیه ترکیه نشان داد بیش‌ترین غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌ترتیب با ۲/۴۳، ۰/۲۲ و ۰/۵۱ درصد در تیمار مایه‌زنی ترکیبی باکتری‌ها افزایش یافت. همچنین بیش‌ترین غلظت آهن و روی برگ به‌ترتیب ۵/۵ و ۳۵/۵ درصد در تلقیح ترکیبی هر دو باکتری نسبت به شاهد مشاهده شد (Rincón et al., 2008). اورهان و همکاران نشان دادند مایه‌زنی بوته‌های تمشک (*L. Rubus idaeus*) با دو سویه (*OSU-142* و *M3*) در منطقه ارزروم ترکیه سبب افزایش رشد رویشی ساقه، تعداد خوشه در ساقه و غلظت فسفر و نیتروژن برگ شد (Orhan et al., 2006). بررسی تأثیر مایه‌زنی سویه‌های *Bacillus* M3، *Bacillus* OSU-142 و *Microbacterium* FS01 بر عناصر تغذیه‌ای برگ پایه‌های سیب گرنی اسمیت (*Malus domestica* L. cv Granny Smith) در منطقه Malatya ترکیه در سال پنجم نشان داد همه عناصر برگ به‌جز منیزیم تحت تأثیر مایه‌زنی باکتری‌ها قرار گرفت. به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان نیتروژن (۳/۳۸ درصد) و فسفر (۰/۴۲ درصد) برگ در مایه‌زنی ترکیبی هر سه باکتری به‌دست آمد (Karlidag et al., 2007). کاربرد ترکیبی و مجزای باکتری‌های *Pseudomonas chlororaphis*، *P. extremaustralis* و *Acinetobacter lwoffii* A07 در نهال‌های کاج جنگلی (*Pinus sylvestris* var. Mongolica) علاوه بر بهبود ساختار میکروبی خاک، افزایش سطح برگ و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم نهال‌های مایه‌زنی شده را در پی داشت (Song et al., 2022). بررسی تأثیر چهار جدایه از باکتری‌های محرک رشد بر رشد رویشی و غلظت عناصر غذایی برگ در ۵ رقم سیب باغی نشان داد *P.*

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و رویشگاهی مکان جمع‌آوری بذرهای فندق

Table 1. Geographical and habitat characteristics of the place where hazelnut seeds were collected

رویشگاه Habitat	ارتفاع از سطح دریا (متر) Above sea level (m)	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	جهت جغرافیایی Geographical direction	اقلیم Climate
فندقلو Fandoglou	1430-1470	38° 19' 16"	48° 36' 28"	Southern	نیمه‌مرطوب سرد با چهار ماه فصل خشک Semi-humid cold with four months of dry season
مکش Makesh	1550-1620	37° 43' 02"	47° 53' 10"	Southern and Southwest	مرطوب سرد با دو ماه فصل خشک Humid cold with two months of dry season

روش پژوهش

۳ × ۳ متر در چاله‌هایی به ابعاد ۵۰ × ۵۰ × ۵۰ سانتی‌متر در سطح ۳۲۴۰ مترمربع در زمین‌های زراعی حاشیه جنگل فندقلوی اردبیل کاشته شدند. مراقبت و نگهداری نهال‌ها شامل حذف علف‌های هرز و سله‌شکنی پای نهال‌ها، در صورت لزوم، انجام شد. پیش از کاشت نهال‌ها، از لایه‌های ۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری خاک، چهار نمونه برداشت شده و پس از مخلوط کردن، نمونه‌ها برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (بافت، واکنش یا pH و رسانایی الکتریکی در عصاره اشباع، درصد ماده آلی و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی) به آزمایشگاه مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل منتقل شدند (جدول ۲).

اندازه‌گیری صفات رشدی برگ

در مردادماه ۱۴۰۰، برای تعیین سطح برگ ابتدا سه برگ سالم و کاملاً توسعه‌یافته از بالاترین قسمت هر نهال در مردادماه برداشته شد و سطح آن‌ها با دستگاه اسکنر CRLA1 Leaf Area Meter اندازه‌گیری شد. سطح ویژه برگ با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SLA = \frac{LA(cm^2)}{LW(g)} \quad (1)$$

در این رابطه SLA سطح ویژه برگ (سانتی‌متر مربع بر گرم)، LA سطح برگ (سانتی‌متر مربع) و LW جرم خشک برگ (گرم) است (Arias et al., 2007). برای اندازه‌گیری جرم خشک برگ نهال‌ها، نمونه‌ها به مدت زمان ۴۸ ساعت به آون با

در اوایل مهرماه ۱۳۹۵ میوه‌های فندق از درختان مادری سالم با مشخصه‌های یکسان (قطر و ارتفاع) از دو رویشگاه جنگلی فندقلو و مکش جمع‌آوری شدند (جدول ۱). بذرهای پس از ضد عفونی با قارچ‌کش کاربوکسین تیرام (۲ در ۱۰۰۰) برای شکست خواب بذر به مدت چهارماه در دمای ۴±۱ درجه سلسیوس (یخچال) نگهداری شدند (Rostamikia et al., 2018). سپس در اوایل اردیبهشت در گلدان‌های پلاستیکی (به ابعاد ۱۵×۱۵×۲۰ سانتی‌متر) حاوی خاک استریل (برداشت شده از رویشگاه طبیعی) در نهالستان فندقلوی اردبیل کاشته شدند. پس از یک ماه، عمق پنج سانتی‌متری خاک اطراف ریشه نهال‌ها با ۳۰ میلی‌لیتر از باکتری‌های DSM291 *Bacillus subtilis* FzB24، *Pseudomonas putida* و *Enterobacter cloaca* با جمعیت ۱۰^۸ واحد کلنی سلول در هر میلی‌لیتر به‌طور جداگانه و ترکیبی از سه باکتری مایه‌زنی شد.

انتقال نهال‌ها به عرصه

در آبان ماه ۱۳۹۶، نهال‌های تولیدشده همگن (به طول ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر)، به عرصه مجاور نهالستان، واقع در زمین‌های بایر حاشیه جنگل منتقل شدند. سپس نهال‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو فاکتور شامل مبدأ نهال در دو سطح (فندقلو و مکش) و مایه‌زنی باکتری در پنج سطح (P. *B. subtilis putida* و *E. cloaca* به‌طور جداگانه، ترکیب سه باکتری و شاهد یا بدون مایه‌زنی) با سه تکرار ۱۲ تایی با فاصله

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد بررسی

Table 2. Physical and chemical properties of the soil in the study area

عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	واکنش pH	رسانایی الکتریکی Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	ماده آلی Organic matter (%)	نیتروژن N (%)	فسفر P (mg kg ⁻¹)	پتاسیم K (mg kg ⁻¹)	آهن Fe (mg kg ⁻¹)	روی Zn (mg kg ⁻¹)
0-20	لوم رسی Clay loam	6.45	0.433	1.36	0.12	11,22	111	20.22	1.52
20-40	لوم شنی Sandy loam	7.16	0.266	0.98	0.10	16.07	158	16.80	0.92

دمای ۷۰ درجه سلسیوس انتقال داده شده و سپس جرم آن‌ها اندازه‌گیری شد (Yang et al., 2007).

با رسم منحنی واسنجی با دستگاه جذب اتمی مدل فیلیپین P.U.9400 قرائت شدند (Emami, 1996).

تعیین غلظت عناصر غذایی برگ

در سال چهارم، برای تعیین غلظت عناصر غذایی، نمونه‌برداری برگ در مردادماه (اوج رشد برگ) انجام شد. از هر تکرار سه نهال انتخاب شده و از برگ‌های یک سوم پایینی نهال سه برگ، برداشت شد. نمونه‌ها در دستگاه آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس حداقل به مدت ۴۸ ساعت خشک شده، سپس با دستگاه آسیاب پودر شدند، و غلظت عناصر غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) در آنها تعیین شد. یک گرم از نمونه در اسید سولفوریک غلیظ هضم شده و سپس میزان نیتروژن به روش کج‌لدال (Jackson, 1958) اندازه‌گیری شد. برای تعیین فسفر برگ، ۴ سی‌سی عصاره برگ را به محلول آمونیوم مولیبدات، آمونیوم وانادات و اسید نیتریک افزوده و سپس با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۰۷ نانومتر اندازه‌گیری شد (Jackson, 1958). پتاسیم به روش تهیه خاکستر و عصاره‌گیری با اسید نیتریک غلیظ و با استفاده از دستگاه فلیم فتومتری اندازه‌گیری شد (Isaac and Johnson, 1975). برای تعیین غلظت آهن و روی، یک گرم از برگ را در لوله‌های مخصوص هضم ریخته، ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک به آن افزوده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس برای خشک شدن در آون قرار داده شدند. پس از سرد شدن، محلول را صاف کرده و به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. سپس

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.1 انجام شد. نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو-ویلک و همگن بودن واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون لون تعیین شد. بررسی اثر معنی‌داری تیمارهای اصلی و تأثیر برهمکنش آن‌ها بر صفات رشدی برگ و عناصر تغذیه‌ای نهال‌ها از راه آزمون تجزیه واریانس دوطرفه و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، در سطوح آماری پنج و یک درصد و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج

صفات رشدی برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد صفات رشدی برگ مورد بررسی (سطح برگ و سطح ویژه برگ) تحت تأثیر تیمارها قرار گرفتند به طوری که آثار اصلی مبدأ نهال و باکتری در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بود. اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر سطح برگ در سطح احتمال یک درصد و بر سطح ویژه برگ نهال‌های فندق در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

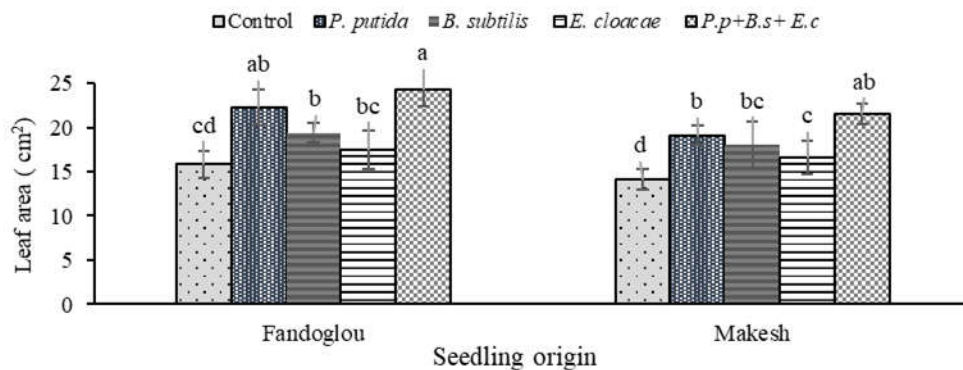
با توجه شکل (۱)، بیش‌ترین میانگین سطح برگ با ۲۴/۵ سانتی‌متر مربع در مایه‌زنی ترکیبی سه باکتری (*P. putida*،

جدول ۳. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر مبدأ نهال و باکتری بر صفات رشدی برگ نهال‌های فندق در سال چهارم
Table 3. Analysis of variance (mean squares) of the effect of seedling origin and bacteria on the leaf growth characteristics of hazelnut seedlings in the fourth year

منبع تغییر	درجه آزادی	سطح برگ	سطح ویژه برگ
Source of variation	Degree of freedom	(Leaf area)	(Specific leaf area)
مبدأ نهال	1	55.05*	95.10 **
Seedling origin			
باکتری	4	47.12*	100.15 *
Bacteria			
مبدأ نهال × باکتری	4	33.09**	81.10 *
Seedling origin × Bacteria			
خطا	18	10.20	14.35
Error			
خطای کل	29	6.45	10.52
Total error			
ضریب تغییرات	–	15.27	12.3
(Coefficient of variation, %)			

* و **: به ترتیب معنی‌داری در سطوح یک و پنج درصد.

**and * significant at 1 and 5%, respectively.

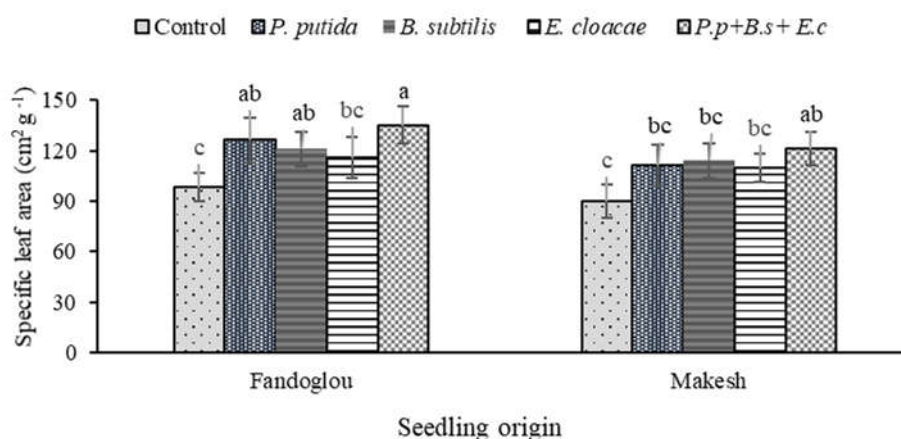


شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر سطح برگ نهال‌های فندق؛ حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 1. Mean comparison of interaction effect of seedling origin × bacteria on leaf area of hazelnut seedling; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

سانتی مترمربع در نهال‌های با مبدأ فندقلو به دست آمد (شکل ۱). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیش‌ترین سطح ویژه برگ با ۱۳۵/۲۵ سانتی مترمربع بر گرم در مایه‌زنی ترکیبی سه باکتری (*P. putida*، *B. subtilis* و *E. cloacae*) در نهال‌های با مبدأ فندقلو) و کم‌ترین مقدار آن با ۹۰/۲۴ سانتی مترمربع بر گرم در

در نهال‌های با مبدأ فندقلو و کم‌ترین میزان آن با ۱۵/۱ سانتی مترمربع در نهال‌های شاهد (بدون مایه‌زنی) با مبدأ مکش مشاهده شد. همچنین مقادیر میانگین سطح برگ به ترتیب در تیمار مایه‌زنی مجزا باکتری‌های *P. putida* و *B. subtilis* با ۲۲/۲۵، ۱۹/۴۰ و ۱۷/۵



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر سطح ویژه برگ نهال‌های فندق؛ حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 2. Mean comparison of interaction effect of seedling origin × bacteria on specific leaf area of hazelnut seedlings; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

فندق (مبدأ فندقلو) و کم‌ترین غلظت این عناصر به‌ترتیب با ۲/۱، ۵/۱۵ و ۸/۸۱ درصد در نهال‌های شاهد (مایه‌زنی نشده) مبدأ مکش به‌دست آمد (شکل‌های ۳ تا ۵).

غلظت آهن در برگ نهال‌های فندق با مبدأ فندقلو (۳۵/۰۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیش از نهال‌های فندق با مبدأ مکش (۲۹/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و اثر افزایشی ترکیب سه باکتری (*P. putida*، *B. subtilis* و *E. cloacae*) بیش از سایر تیمارها بود (شکل ۶). به‌طوری‌که نهال‌های فندق با مبدأ فندقلو ۴۵/۸ درصد و با مبدأ مکش ۳۸/۲ درصد آهن بیش‌تری در مقایسه با نهال‌های شاهد خود داشتند (شکل ۶).

غلظت روی در برگ نهال‌های فندق با مبدأ فندقلو (۲۶/۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیش از نهال‌های فندق با مبدأ مکش (۲۳/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و اثر افزایشی ترکیب سه باکتری (*P. putida*، *B. subtilis* و *E. cloacae*) بیش از سایر تیمارها بود (شکل ۷). به‌طوری‌که نهال‌های فندق با مبدأ فندقلو ۶۰/۶ درصد و با مبدأ مکش ۵۶/۴ درصد روی بیش‌تری در مقایسه با نهال‌های شاهد خود داشتند (شکل ۷).

بحث

در پژوهش پیش‌رو، اثر باکتری‌های محرک رشد بر برخی از

نهال شاهد مبدأ مکش مشاهده شد (شکل ۲). در واقع مایه‌زنی ترکیبی سه باکتری توانست سطح ویژه برگ نهال‌های فندق (از مبدأ فندقلو) را ۳۷/۶ درصد افزایش دهد. مایه‌زنی مجزای باکتری‌های *P. putida*، *B. subtilis* و *E. cloacae* به‌ترتیب با ۲۸/۱، ۲۳/۱ و ۱۷/۸ درصد سبب افزایش سطح ویژه برگ در نهال‌های فندق از مبدأ فندقلو شدند (شکل ۲).

تأثیر باکتری محرک رشد بر غلظت عناصر غذایی نهال‌های فندق

نتایج تجزیه واریانس نشان داد غلظت همه عناصر مورد بررسی تحت تأثیر تیمار باکتری قرار گرفتند به‌طوری‌که اثر اصلی مبدأ نهال بر غلظت عناصر نیتروژن و پتاسیم در سطح احتمال یک درصد و بر غلظت عناصر فسفر، آهن و روی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. اثر اصلی باکتری بر غلظت همه عناصر غذایی مورد بررسی (به‌جز روی) در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر غلظت عناصر فسفر و آهن در سطح احتمال یک درصد و برای نیتروژن، پتاسیم و روی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). بیش‌ترین غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌ترتیب با ۳/۵۶، ۳۶/۰ و ۱/۳۵ درصد در مایه‌زنی ترکیبی سه باکتری (*P. putida*، *B. subtilis* و *E. cloacae*) در نهال‌های

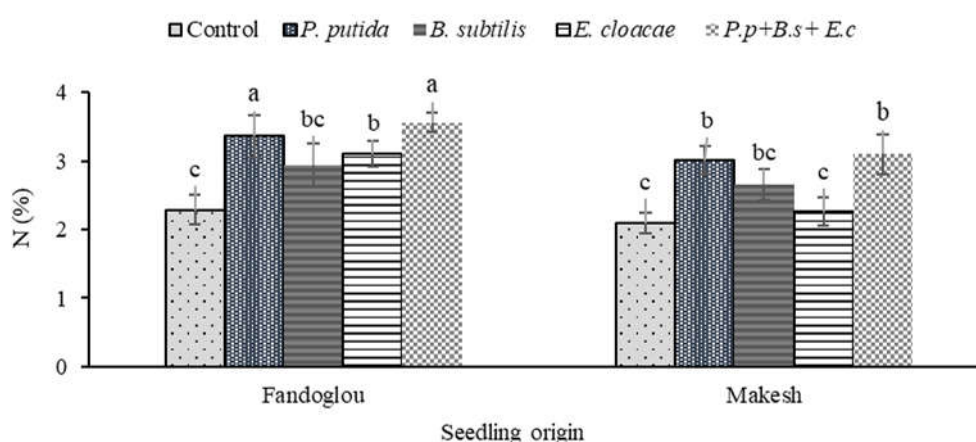
جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر مبدأ نهال و باکتری بر غلظت عناصر غذایی برگ در نهال‌های فندق در سال چهارم

Table 4. Analysis of variance (mean squares) of the effect of seedling origin and bacteria on the concentration of leaf nutrients in hazelnut seedlings in the fourth year

منبع تغییر	درجه آزادی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	روی
Source of variation	Degree of freedom	N	P	K	Fe	Z
مبدأ نهال Seedling origin	1	1.88**	2.02*	4.17**	5.04*	0.62*
باکتری Bacteria	4	0.93**	1.12**	8.61**	1.11**	2.29*
مبدأ نهال × باکتری Seedling origin × Bacteria	4	1.12*	7.01**	10.08*	1.54**	2.14*
خطا Error	18	14.35	10.20	8.09	6.78	13.47
خطای کل Total error	29	0.80	0.07	1.07	0.12	0.19
درصد ضریب تغییرات (Coefficient of variation, %)	-	15.06	10.41	11.79	10.17	13.32

* و **: به ترتیب معنی‌داری در سطوح یک و پنج درصد.

**and* significant at 1 and 5%, respectively.

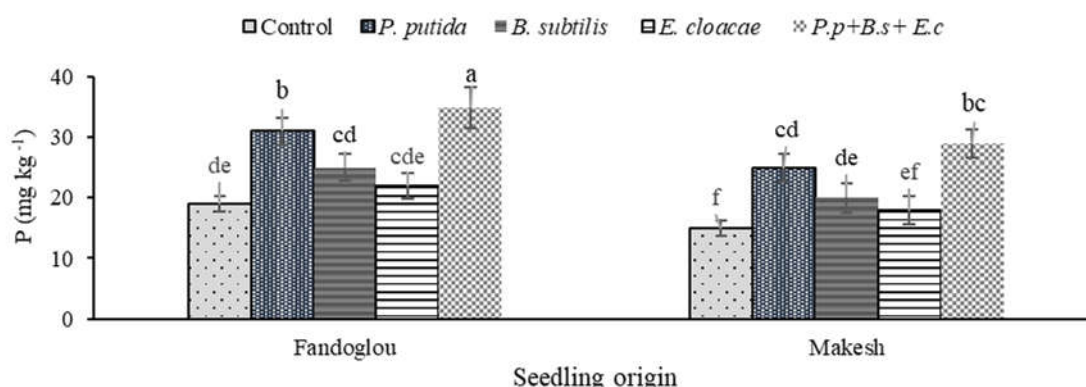


شکل ۳. مقایسه میانگین اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر غلظت نیتروژن (N) در برگ نهال‌های فندق؛ حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 3. Mean comparison of interaction effect of seedling origin × bacteria on nitrogen concentration (N) in the leaf of hazelnut seedlings; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

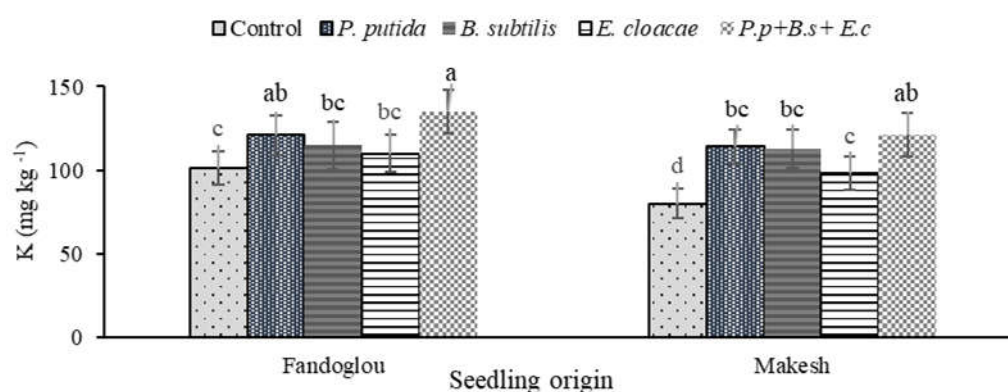
ترین مقادیر سطح برگ و سطح ویژه برگ با مایه‌زنی ترکیبی باکتری‌ها به دست آمد. در حقیقت، مایه‌زنی ترکیبی سه باکتری توانست مقادیر سطح برگ و سطح ویژه برگ نهال‌های فندق (مبدأ فندقلو) را به ترتیب ۵۳/۱ و ۳۷/۷ درصد در مقایسه

صفات رشدی و وضعیت تغذیه‌ای نهال‌های دو جمعیت فندق در شرایط عرصه بررسی شد. نتایج نشان داد که صفات رشدی برگ نهال هر دو مبدأ فندق (فندقلو و مکش) به طور معنی‌داری تحت تأثیر تیمار مایه‌زنی باکتری قرار گرفتند به طوری که بیش



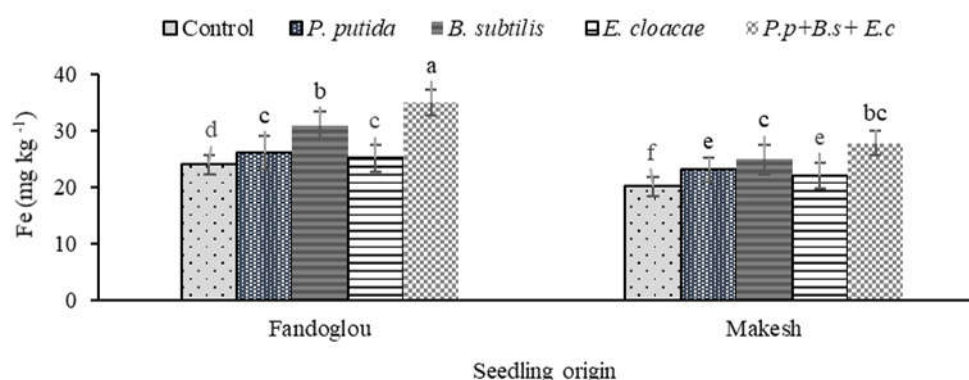
شکل ۴. مقایسه میانگین اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر غلظت فسفر (P) در برگ نهال‌های فندق؛ حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 4. Mean comparison of interaction effect of seedling origin × bacteria on phosphorous concentration (P) in the leaf of hazelnut seedlings; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).



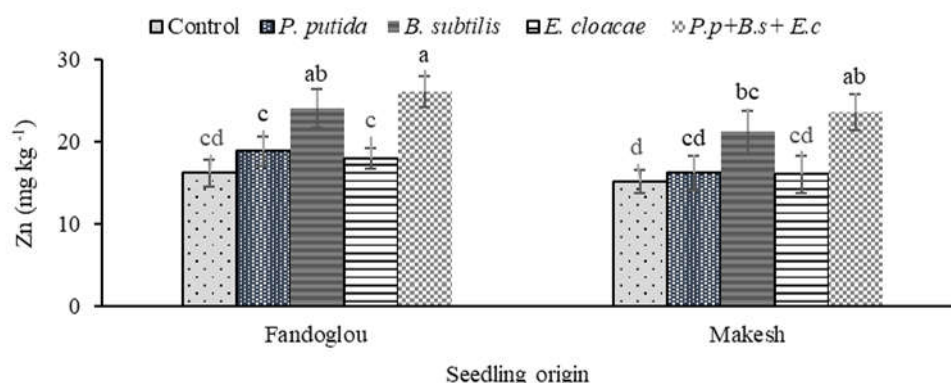
شکل ۵. مقایسه میانگین اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر غلظت پتاسیم (K) در برگ نهال‌های فندق؛ حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 5. Mean comparison of interaction effect of seedling origin × bacteria on potassium concentration (K) in the leaf of hazelnut seedlings; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر غلظت آهن (Fe) در برگ نهال‌های فندق؛ حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 6. Mean comparison of interaction effect of seedling origin × bacteria on iron concentration (Fe) in the leaf of hazelnut seedlings; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).



شکل ۷. مقایسه میانگین اثر برهمکنش مبدأ نهال × باکتری بر غلظت روی (Zn) در برگ نهال‌های فندق؛ حروف مشابه نشان‌دهنده نبود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

Fig. 7. Mean comparison of interaction effect of seedling origin × bacteria on zinc concentration (Zn) in the leaf of hazelnut seedlings; Bars with similar letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

و کاج حلب (*Pinus halepensis*) سبب افزایش شاخص‌های رویشی گیاه مانند سطح برگ، جرم خشک برگ و غلظت عناصر غذایی، شدت فتوستتوز، هدایت روزنه‌ای و پتانسیل آب برگ شد (Rincón et al., 2008). مایه‌زنی باکتری‌های *Acinetobacter* و *P. extremaustralis*، *P. chlororaphis* و *Pinus sylvestris* var. *lwoffii* A07 در نهال‌های کاج جنگلی (Mongolica) علاوه بر بهبود ساختار میکروبی خاک، سبب افزایش صفات رویشی به ویژه سطح برگ نهال‌های مایه‌زنی شده شد (Song et al., 2022). در حقیقت، افزایش سطح برگ سبب افزایش سطح تماس شده و به دلیل نازک بودن سطح برگ، نرخ فتوستتوز، جذب دی‌اکسید کربن، تعرق و در نتیجه میزان رشد گیاه افزایش می‌یابد (Close et al., 2005).

در پژوهش حاضر، کاربرد هر سه تیمار میکروبی سبب افزایش معنی‌دار سطح ویژه برگ نهال (شاخص ضخامت برگ) نسبت به تیمار شاهد شد. ولی بیش‌ترین میزان این صفت به ترتیب در مایه‌زنی ترکیبی هر سه باکتری نهال‌های هر دو مبدأ فندقلو و مکش مشاهده شد. دلیل گسترش سطح برگ و کاهش ضخامت برگ را می‌توان به توانایی این باکتری‌ها در افزایش نرخ فتوستتوز و در ادامه افزایش آماس سلولی برگ مرتبط دانست (Singh et al., 2020). از سوی دیگر، این باکتری‌ها با تولید آنزیم ACC دآمیناز باعث افزایش رشد طولی ریشه‌ها و

با شاهد افزایش دهد. درحالی‌که مایه‌زنی مجزای باکتری‌های *P. putida* و *B. subtilis* سبب افزایش سطح برگ به اندازه به‌ترتیب ۴/۴۰، ۵/۲۲ و ۵/۱۶ درصد در نهال‌های فندق (مبدأ فندقلو) شدند. به عبارت دیگر، مایه‌زنی مجزای هر یک از باکتری‌ها بر بهبود صفات رویشی برگ تأثیر اندکی داشتند ولی کاربرد ترکیبی آن‌ها سبب افزایش معنی‌دار این دو صفت شد که این نتایج، اثر هم‌افزایی باکتری‌ها را تأیید می‌کند. با توجه به این که باکتری‌ها در طبیعت همراه گونه‌های دیگر وجود داشته و عمل می‌کنند، مایه‌زنی آن‌ها به صورت ترکیبی از مایه تلقیح‌های مختلف می‌تواند علاوه بر از بین بردن آثار منفی احتمالی سبب افزایش اثر تشدیدکنندگی آن‌ها در جذب عناصر تغذیه‌ای و بهبود رشد نهال‌ها شود (Kumar et al., 2019; Singh et al., 2020; Rincón et al., 2008; 2020).

سطح برگ گیاهان عامل مهم و تعیین‌کننده در بسیاری از فرآیندهای زیستی مانند فتوستتوز، تنفس، عبور نور از تاج پوشش، تبخیر و تعرق، چرخه کربن و نیتروژن است و گیاه برای سازگار شدن با شرایط محیطی موجود، آن را تغییر می‌دهد (Close et al., 2005). پژوهشگران زیادی، افزایش سطح برگ را در تعدادی از گونه‌ها با کاربرد باکتری‌های محرک رشد گزارش کرده‌اند که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. مایه-زنی *P. fluorescens* در نهال‌های بلوط (*Quercus coccifera*)

برگ)، غلظت عناصر پرمصرف و کم‌مصرف در برگ نهال‌های هر دو مبدأ در کاربرد جداگانه باکتری‌های *P. putida* و *B. subtilis* در مقایسه با *E. cloacae* به‌دست آمد. متفاوت بودن اثر باکتری‌ها بر جذب عناصر غذایی می‌تواند ناشی از توانایی‌های متفاوت آن‌ها باشد (Basu et al., 2021). پژوهشگران متعددی اثربخشی *سودوموناس* و *باسیلوس* بر غلظت عناصر غذایی برگ به‌ویژه آهن و روی را گزارش کرده‌اند (Karakurt; Esitken et al., Rincón et al., 2008 and Aslantas, 2010; 2006). این باکتری‌ها با ساخت و تولید آنزیم ACC دآمیناز باعث افزایش رشد طولی ریشه‌ها و بهبود جذب آب از لایه‌های زیرین خاک شده و کارایی مصرف آب را برای توسعه سطح برگ و رشد گیاه از راه افزایش فراهمی عناصر غذایی بیش‌تر می‌کنند (Kumar et al., 2019; Gao et al., 2022). باکتری‌های *سودوموناس* و *باسیلوس* از جمله باکتری‌های شناخته شده مفید در خاک هستند که قادرند با تولید سیدروفور به فراهمی آهن موجود در خاک و در نهایت جذب آن توسط گیاهان کمک نموده و کمبود آهن را که در مراحل اولیه رشد مهم است، جبران نمایند (Compant et al., 2021). باکتری‌های حل‌کننده فسفات (*سودوموناس* و *باسیلوس*) غلظت عناصر معدنی به‌ویژه عناصر کم‌مصرف را از راه تحریک پمپ پروتونی ATPase افزایش می‌دهند (Yang et al., 2007).

پژوهش حاضر نشان داد که عکس‌العمل نهال‌های فندق دو مبدأ تحت تأثیر مایه‌زنی باکتری متفاوت بود به‌طوری‌که نهال‌های مبدأ فندقلو در مقایسه با نهال‌های مبدأ مکش از نظر همه صفات مورد بررسی، وضعیت بهتری داشتند. دلیل این یافته را می‌توان به صفات ژنتیکی، وضعیت رویشگاهی و تغذیه‌ای پایه‌های مادری که بذر از آن‌ها جمع‌آوری شده است ارتباط داد (Rostamikia et al., 2023).

نتیجه‌گیری

با عنایت به آثار متفاوت باکتری‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، به نظر می‌رسد که اثر افزایشی مایه‌زنی ترکیبی هر سه

بهبود جذب آب توسط ریشه از لایه‌های زیرین خاک شده و کارایی مصرف آب را برای توسعه سطح برگ و رشد گیاه از راه بهبود فراهمی عناصر غذایی (به‌ویژه فسفر) برای گیاه افزایش می‌دهند (Ahemad and Kibret, Singh et al., 2020). مایه‌زنی باکتری‌ها در این پژوهش، نه تنها در افزایش صفات رشدی برگ نهال‌ها تأثیرگذار بود، بلکه وضعیت تغذیه‌ای برگ نهال‌ها را نیز تحت تأثیر قرار داد. به طوری که غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و روی در برگ نهال‌های فندق هر دو مبدأ با کاربرد مجزا و ترکیبی هر سه باکتری افزایش یافت و اثر کاربرد ترکیبی سه باکتری بیش‌تر بود. بنابر این هم‌افزایی باکتری‌ها نقش مؤثری در جذب این عناصر توسط برگ داشته است. پژوهش‌های زیادی در مورد اثربخشی مایه‌زنی ترکیبی قارچ باکتری‌ها در افزایش رشد رویشی و عناصر غذایی برگ در گونه‌های مختلف گیاهی گزارش شده است که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. مایه‌زنی ترکیبی باکتری‌های *Bacillus OSU-142* و *P. putida* BA-8 در مقایسه با کاربرد مجزای آن‌ها افزایش بیش‌تری در غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم به‌ترتیب با ۲/۰۰، ۱۷/۰ و ۴۳/۰ درصد در مقایسه با تیمار شاهد داشتند (Esitken et al., 2010). مایه‌زنی ترکیبی سویه‌های *Bacillus OSU-142*، *Bacillus M3* و *Microbacterium FS01* در درخت سیب (cv. Granny Smith) باعث افزایش غلظت عناصر (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آهن، منگنز و روی) در برگ در مقایسه با مایه‌زنی مجزای باکتری‌ها شد (Karlidag et al., 2007). در این راستا کاربرد ترکیبی (*Azospirillum* sp-245 و *Bacillus megaterium* M3) روی ارقام باغی سیب پس از دو سال، سبب افزایش نیتروژن (۴ درصد)، فسفر (۱۴/۱ درصد)، پتاسیم (۹/۸۷ تا ۶/۷۰)، منیزیم (۸/۶ درصد)، کلسیم (۴/۴ درصد)، آهن (۱۲ درصد)، روی (۷/۱ درصد)، منگنز (۹/۶ درصد) و بر (۳/۱ درصد) در برگ‌های آن‌ها شد (Yildiz et al., 2022).

در پژوهش حاضر، صرف‌نظر از مایه‌زنی ترکیبی سه باکتری، بیش‌ترین مقادیر صفات رشدی برگ (سطح برگ و سطح ویژه

تشکر و سپاسگزاری

این مقاله از طرح پژوهشی با شماره مصوب ۰۸-۹۷۱۰۲۲-۰۹-۳۷-۰۹ در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور تهیه شده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

باکتری *E. cloacae* و *B. subtilis*، *P. putida* در افزایش شاخص‌های رشدی برگ و جذب عناصر غذایی در نهال‌های فندق (هر دو مبدأ) بیش‌تر است. بنابراین استفاده ترکیبی هر سه باکتری *E. cloacae* و *B. subtilis*، *P. putida* برای مایه‌زنی نهال‌های فندق در نهالستان و کاشت آن‌ها در عرصه پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

- Ahemad, M., Kibret, M., 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. J. King Saud Univ. 26, 1–20.
- Arias, D., Calvo-Alvarado, J., 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. For. Ecol. Manage. 247, 185–193.
- Backer, R., Rokem, J.S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., Smith, D.L., 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. Front. Plant Sci. 871, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S.N., Kalam, S., Sayyed, R.Z., Reddy, M.S., Enshasy, H. El, 2021. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. Sustainability 13, 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Besharati, H., 2022. Plant growth-promoting bacteria and their application in agriculture. J. Soil Biol. 10, 135–162.
- Cipriano, M.A.P., Freitas-Iório, R. de P., Dimitrov, M.R., de Andrade, S.A.L., Kuramae, E.E., da Silveira, A.P.D., 2021. Plant-growth endophytic bacteria improve nutrient use efficiency and modulate foliar n-metabolites in sugarcane seedling. Microorganisms 9, 1–19. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030479>
- Close, D.C., Beadle, C.L., Brown, P.H., 2005. The physiological basis of containerised tree seedling ‘transplant shock’: a review. Aust. For. 68, 112–120.
- Compant, S., Cambon, M.C., Vacher, C., Mitter, B., Samad, A., Sessitsch, A., 2021. The plant endosphere world – bacterial life within plants. Environ. Microbiol. 23, 1812–1829. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15240>
- de Andrade, L.A., Santos, C.H.B., Frezarín, E.T., Sales, L.R., Rigobelo, E.C., 2023. Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production. Microorganisms 11, 1088. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>
- Delgado, T., Malheiro, R., Pereira, J.A., Ramalhosa, E., 2010. Hazelnut (*Corylus avellana* L.) kernels as a source of antioxidants and their potential in relation to other nuts. Ind. Crops Prod. 32, 621–626. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.07.019>
- Du Jardin, P., 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Sci. Hortic. 196, 3–14.
- Emami, A., 1996. Description of Plant Analysis Method. Published by Soil Water Institute, Tehran, 113p (In Persian).
- Esitken, A., Pirlak, L., Turan, M., Sahin, F., 2006. Effects of floral and foliar application of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrition of sweet cherry. Sci. Hortic. 110, 324–327. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.07.023>
- Esitken, A., Yildiz, H.E., Ercisli, S., Figen Donmez, M., Turan, M., Gunes, A., 2010. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. Sci. Hortic. 124, 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.12.012>
- Esposito, T., Sansone, F., Franceschelli, S., Del Gaudio, P., Picerno, P., Aquino, R.P., Mencherini, T., 2017. Hazelnut (*Corylus avellana* L.) shells extract: Phenolic composition, antioxidant effect and cytotoxic activity on human cancer cell lines. Int. J. Mol. Sci. 18, 392. <https://doi.org/10.3390/ijms18020392>
- Gamalero, E., Glick, B.R., 2015. Bacterial modulation of plant ethylene levels. Plant Physiol. 169, 13–22.

<https://doi.org/10.1104/pp.15.00284>

17. Gao, B., Chai, X., Huang, Y., Wang, X., Han, Z., Xu, X., Wu, T., Zhang, X., Wang, Y., 2022. Siderophore production in *Pseudomonas* SP. strain SP3 enhances iron acquisition in apple rootstock. *J. Appl. Microbiol.* 133, 720–732.
18. Isaac, R.A., Johnson, W.C., 1975. Collaborative study of wet and dry ashing techniques for the elemental analysis of plant tissue by atomic absorption spectrophotometry. *J. AOAC Int.* 58, 436–440. <https://doi.org/10.1093/jaoac/58.3.436>
19. Ivanović, S., Avramović, N., Dojčinović, B., Trifunović, S., Novaković, M., Tešević, V., Mandić, B., 2020. Chemical composition, total phenols and flavonoids contents and antioxidant activity as nutritive potential of roasted hazelnut skins (*Corylus avellana* L.). *Foods* 9, 430. <https://doi.org/10.3390/foods9040430>
20. Jackson, M.L., 1958. *Soil Chemical Analysis*. Prentice Hall. Inc., Englewood Cliffs, NJ 498.
21. Karakurt, H., Aslantas, R., 2010. Effects of some plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) strains on plant growth and leaf nutrient content of apple. *J. Fruit Ornament. Plant Res.* 18, 101–110.
22. Karlidag, H., Esitken, A., Turan, M., Sahin, F., 2007. Effects of root inoculation of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient element contents of leaves of apple. *Sci. Hortic.* 114, 16–20. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.04.013>
23. Kumar, A., Patel, J.S., Meena, V.S., Ramteke, P.W., 2019. Plant growth-promoting rhizobacteria: strategies to improve abiotic stresses under sustainable agriculture. *J. Plant Nutr.* 42, 1402–1415.
24. Orhan, E., Esitken, A., Ercisli, S., Turan, M., Sahin, F., 2006. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient contents in organically growing raspberry. *Sci. Hortic.* 111, 38–43.
25. Rincón, A., Valladares, F., Gimeno, T.E., Pueyo, J.J., 2008. Water stress responses of two Mediterranean tree species influenced by native soil microorganisms and inoculation with a plant growth promoting rhizobacterium. *Tree Physiol.* 28, 1693–1701. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.11.1693>
26. Rostami Kia, Y., Sharifi, J., 2019. The Fandoglu Forest, the largest common hazel forest reserve in Iran. *Iran Nat.* 3, 90–99.
27. Rostamikia, Y., Rahmani, A., Teimouri, M., 2023. Improvement of growth and physiological traits of hazelnuts provenances inoculated with growth promoting bacteria under field conditions. *Iran. J. For.* 15, 211–225. <https://doi.org/10.22034/ijf.2022.344665.1872>
28. Rostamikia, Y., Tabari Kouchaksaraei, M., Asgharzadeh, A., Rahmani, A., 2018. Effect of cold stratification on seed germination traits in three ecotypes of hazelnut (*Corylus avellana* L.). *For. Wood Prod.* 71, 1–12.
29. Silva, L.I. da, Pereira, M.C., Carvalho, A.M.X. de, Buttrós, V.H., Pasqual, M., Dória, J., 2023. Phosphorus-solubilizing microorganisms: A key to sustainable agriculture. *Agric.* 13, 462. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>
30. Singh, T.B., Sahai, V., Goyal, D., Prasad, M., Yadav, A., Shrivastav, P., Ali, A., Dantu, P.K., 2020. Identification, characterization and evaluation of multifaceted traits of plant growth promoting rhizobacteria from soil for sustainable approach to agriculture. *Curr. Microbiol.* 77, 3633–3642.
31. Song, Q., Deng, X., Song, R., Song, X., 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria promote growth of seedlings, regulate soil microbial community, and alleviate damping-off disease caused by rhizoctonia solani on *Pinus sylvestris* var. Mongolica. *Plant Dis.* 106, 2730–2740. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-21-2562-RE>
32. Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., Nasrullah Boyce, A., 2016. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—a review. *Molecules* 21, 573.
33. Yang, Y., Liu, Q., Han, C., Qiao, Y.Z., Yao, X.Q., Yin, H.J., 2007. Influence of water stress and low irradiance on morphological and physiological characteristics of *Picea asperata* seedlings. *Photosynthetica* 45, 613–619.
34. Yildiz, E., Yaman, M., Ercisli, S., Sumbul, A., Sonmez, O., Gunes, A., Bozhuyuk, M.R., Kviklys, D., 2022. Effects of rhizobacteria application on leaf and fruit nutrient content of different apple scion–rootstock combinations. *Horticulturae* 8, 550.