J. Soil Plant Interact. 2024; 15(3): 35–51. https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21351

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Effect of Mycorrhiza Fungus, Humic Acid, and Salicylic Acid on Morphological and Biochemical Characteristics and Nutrient Uptake of Lemon Balm (*Melissa officinalis* L. cv Citronella)

Mehdi Hamzeh Mohamadabadi[1], Alireza Ladan Moghaddam[1*], Elham Danaee[2] and Vahid Abdossi[3]

1- Medicinal Plants, Department of Horticultural Sciences, Aliabad Katoul Branch, Islamic Azad University, Aliabad Katoul, Iran
2- Department of Horticultural Sciences, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran
3- Department of Horticulture and Agronomy, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* Corresponding author, Email: ladanmoghadam.alireza@gmail.com

(Received: 25 May 2024; Revised: 12 August 2024; Accepted: 28 August 2024)

Abstract

Many efforts have been made to find suitable ways to improve the quality of soil and agricultural products, among which are biofertilizers and organic fertilizers. This study was performed to investigate the effect of mycorrhiza fungus (M) (*Funneliformis mosseae*), different levels of humic acid (HA) (0, 200, and 400 mg pot^{-1}) and salicylic acid (SA) (0, 100, and 200 mg L^{-1}) on the growth indices, biochemical characteristics and nutrient levels of lemon balm (*Melissa officinalis* L. cv Citronella) in a greenhouse in northern Iran. The experiment was performed in a completely randomized design with three replications. The results showed that all treatments had a significant effect on the measured variables. The highest fresh and dry weights of shoot, phenol and flavonoid, nitrogen, phosphorous and potassium contents were observed in the M + HA 400 + SA 200 treatment and the highest fresh and dry weights of shoot and root volume were obtained in the M + HA 400 + SA 100 treatment. Also, the maximum total chlorophyll content and essential oil yield were obtained in the M + HA 200 + SA 200 treatment. In general, mycorrhizal fungus with humic acid 400 mg pot^{-1} and salicylic acid 200 mg L^{-1} treatment is effective to improve vegetative growth, essential oil and nutrient uptake in lemon balm.

Keywords: Biofertilizer, Citronella, Essential oil, Phenol, Total chlorophyll.

Background and Objective: Today, due to environmental considerations, the organic fertilizers have been widely used to enhance crop yield and soil properties. An approach to achieve sustainable agriculture is to apply microorganisms including mycorrhiza fungi that play an important role in meeting the nutritional demand of plants. Mycorrhiza fungi improve plant nutrient uptake and transport (e.g., phosphorus and nitrogen, potassium, copper and zinc) and ultimately plant growth by expanding the hyphae network and increasing plant root. Humic acid is a weak organic acid that improves soil fertility, provides nutrients and affects quantitative and qualitative characteristics of plants by affecting plant growth-regulating hormones and benefit plant growth by chelating unavailable nutrients to overcome nutrient deficiencies (Nejati Sini et al., 2023). Salicylic acid is a phenolic compound that can increase plant growth, chlorophyll content andabsorption and co-transport of ions (Kakaei et al., 2023). This study aimed to investigate the effect of mycorrhizal fungi and different levels of humic acid and salicylic acid on morphological and biochemical characteristics and nutrients value of lemon balm (*Melissa officinalis* L. cv Citronella).

Methods: This research was conducted as completely randomized design with three replications. The experimental

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

treatments consisted of mycorrhizal fungi and humic acid (0, 200, and 400 mg pot^{-1}) and salicylic acid (0, 100, and 200 mg L^{-1}). Seeds of lemon balm (Citronella cultivar) were planted directly in pots. For each kilogram of soil, 100 grams of inoculums was placed at a depth of 3 cm in the pots. Humic acid (HA) treatment was applied by irrigation at the time of seed sowing and foliar application of salicylic acid (SA) in two stages (second and third weeks after cultivation). Sampling was done two weeks after the last treatment to evaluate the traits of fresh and dry weights of shoot and root, root volume, total chlorophyll, phenol, flavonoid, nitrogen, potassium and phosphorus contents, and essential oil yield.

Results: The results showed that the highest fresh and dry weights of shoot, phenol and flavonoid, nitrogen, phosphorous and potassium contents were observed in the M + HA 400 + SA 200 treatment and the highest fresh and dry weights of shoot and root volume were obtained in the M + HA 400 + SA 100 treatment. Also, the maximum total chlorophyll content and essential oil yield were obtained in the M + HA 200 + SA 200 treatment, while the lowest level of evaluated traits was observed in the control.

Conclusions: In general, mycorrhizal fungus with humic acid 400 mg pot^{-1} and salicylic acid 200 mg L^{-1} treatment is effective to improve vegetative growth, essential oil and nutrient uptake in lemon balm (*Melissa officinalis* L. cv Citronella).

References:

1. Nejati Sini, H., Barzegar, R., Soodaee Mashaee, S., Ghasemi Ghahsare, M., 2023. Mycorrhizal fungi and *Bacillus sp.* along with organic fertilizer on the growth and nutrient uptake of bell pepper (*Capsicum annum* L.). J. Soil Plant Interact. 13(4), 89–104. https://doi.org/10.47176/jspi.13.4.20821. (In Persian with English abstract)
2. Kakaei, H., Amirinejad, A.A., Ghobadi, M., 2023. Effect of salicylic acid foliar application on growth characteristics in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) under lead stress conditions. J. Soil Plant Interact. 14(3), 73–85. https://doi.org/10.47176/jspi.14.3.20162. (In Persian with English abstract)

How to Cite: Hamzeh Mohamadabadi, M., Ladan Moghaddam, A., Danaee, E., Abdossi, V., 2024. Effect of mycorrhiza fungus, humic acid, and salicylic acid on morphological and biochemical characteristics and nutrient uptake of lemon balm (*Melissa officinalis* L. cv Citronella). J. Soil Plant Interact. 15(3), 35–51 (In Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21351

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۳؛ (۳)۱۵: ۵۱-۳۵، https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21351

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۵۰۱۴-۲۷۸۳ شاپا الکترونیکی: ۵۲۸۶-۲۷۸۳

مقاله پژوهشی

تأثیر قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک بر صفات مورفولوژیک و بیوشیمیایی و میزان جذب عناصر غذایی در گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L. cv Citronella)

مهدی حمزه محمدآبادی[۱]، علیرضا لادن‌مقدم[۲*]، الهام دانائی[۲] و وحید عبدوسی[۳]

۱- گیاهان دارویی ادویه‌ای و نوشابه‌ای، گروه علوم باغبانی، واحد علی آباد کتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آباد کتول، ایران

۲- گروه علوم باغبانی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

۳- گروه علوم باغی و زراعی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ladanmoghadam.alireza@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۷)

چکیده

امروزه تلاش‌های زیادی به‌منظور یافتن راه‌های مناسب برای ارتقاء کیفیت خاک و محصولات کشاورزی انجام گرفته است، که یکی از این راهکارها به‌کار بردن کودهای زیستی و کودهای آلی است. این پژوهش به‌منظور بررسی اثر قارچ مایکوریزا (M) (*Funneliformis mosseae*) و سطوح مختلف اسید هیومیک (HA) (صفر، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در هر گلدان) و اسید سالیسلیک (SA) (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) بر شاخص‌های رشدی، صفات بیوشیمیایی و میزان عناصر غذایی در گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L. cv. Citronella) در گلخانه‌ای در شمال ایران اجرا شد. آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد، تمام تیمارها بر صفات مورد بررسی اثر معنی‌دار داشتند. بیش‌ترین مقادیر وزن تازه و خشک شاخساره، فنل کل، فلاونوئید، نیتروژن، فسفر و پتاسیم در تیمار M + 400 HA + 200 SA مشاهده شد و بیش‌ترین وزن تازه و خشک ریشه و حجم ریشه در تیمار M + 400 HA + 100 SA به‌دست آمد. همچنین بیش‌ترین محتوای کلروفیل کل و عملکرد اسانس در تیمار M + 200 HA + 200 SA به‌دست آمد. به‌طور کلی تیمار قارچ مایکوریزا به همراه اسید هیومیک ۴۰۰ میلی‌گرم در هر گلدان و اسید سالیسیلیک ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر تیمار مؤثری برای بهبود رشد رویشی، صفات بیوشیمیایی و جذب عناصر غذایی در گیاه بادرنجبویه است.

واژه‌های کلیدی: اسانس، سیترونلا، فنل، کود زیستی، کلروفیل کل.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) یکی از مهم‌ترین گونه‌های گیاهان دارویی است که اهمیت اقتصادی زیادی دارد. بادرنجبویه گیاهی معطر و علفی از خانواده نعنائیان است، که سرشاخه‌های هوایی آن حدود ۰/۱ تا ۰/۵ درصد اسانس دارد و مهم‌ترین ماده مؤثره آن سیترونلال است. گزارش‌های Salamon et al. (2019) نشان داده است که اسانس رقم Citronella آن دارای خاصیت ضد قارچی زیادی بوده و برای درمان ناراحتی‌های اعصاب و مداوای بیماری‌های معده، قلبی و روده‌ای که منشأ عصبی دارند استفاده می‌شود (Świąder et al., 2019).

امروزه باتوجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از انواع اسیدهای آلی و کودهای زیستی برای بهبود صفات کمّی و کیفی محصولات زراعی و باغی رواج پیدا کرده است. بنابراین یکی از راه‌های دستیابی به کشاورزی پایدار، استفاده از ریزجانداران است که نقش مهمی در تأمین نیاز غذایی گیاهان دارند. همزیستی گیاه و قارچ مایکوریزا یکی از راهکارهای مفید به‌منظور افزایش مواد آلی خاک، تقویت ریزجانداران خاک و افزایش کارایی مصرف نهاده‌های کشاورزی و آب است. ریزجانداران با گسترش شبکه هیفی و افزایش سطح ریشه گیاهان، جذب و انتقال مواد غذایی (فسفر و نیتروژن، پتاسیم، مس و روی) و در نهایت رشد گیاهان را بهبود می‌بخشند (Nejati Sini et al., 2023). در گیاه شوید (*Anethum graveolens* L.) کاربرد قارچ مایکوریزا (*Glomus mosseae*) موجب افزایش کلروفیل کل و عملکرد اسانس شد (Weisany et al., 2015). همچنین در گیاه کاسنی (*Cichorium intybus*)، کاربرد قارچ مایکوریزا (*Glomus mosseae*) طول ریشه، وزن خشک ریشه، ارتفاع گیاه، رنگدانه‌های فتوسنتزی و جذب عناصر فسفر، پتاسیم، آهن و روی را افزایش داد (Yazdan Panah Gohari et al., 2020).

اسید هیومیک یک اسید ضعیف آلی است که حاصلخیزی خاک و فراهمی عناصر غذایی را بهبود بخشیده و همچنین با تأثیر بر هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد گیاهی و افزایش فتوسنتز گیاه عملکرد کمّی و کیفی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از مزایای مهم اسید هیومیک می‌توان به کلات‌کنندگی عناصر غذایی مختلف مانند منیزیم، روی، کلسیم، آهن و مس اشاره کرد (Abedi and Pakniat, 2010). پژوهش‌های Bettonia et al. (2014) نشان داد کاربرد قارچ مایکوریزا (*Rhizophagus intraradices*) به همراه محلول ۲۰ درصد اسید هیومیک وزن تازه شاخساره و ریشه، ارتفاع گیاه، محتوای کلروفیل a، b و کل، قند محلول، پروتئین و پرولین را در گیاه پیاز (*Allium cepa* L.) افزایش داد. همچنین در گیاه شنبلیله (*Trigonella foenum-graecum* L.) نیز کاربرد محلول ۱۵ درصد اسیدهیومیک وزن تازه و خشک گیاه، ارتفاع گیاه، میزان کلروفیل کل، کاروتنوئید و اسانس را افزایش داد (Mafakheri and Asghari, 2018).

اسید سالیسیلیک یا ارتوهیدروکسی بنزوئیک اسید یک ترکیب فنلی است که به وسیله سلول‌های ریشه گیاهان در مقادیر کم تولید شده و به‌عنوان ماده‌ای شبه‌هورمون شناخته می‌شود. این ماده متناسب با گونه گیاه، غلظت به‌کار رفته، دوره رشد و شرایط محیطی بر طیف وسیعی از واکنش‌های متابولیک و فیزیولوژیک در گیاهان مؤثر است (Neisi et al., 2019). با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده، کاربرد غلظت‌های کم اسید سالیسیلیک و همزیستی گیاه با قارچ مایکوریزا موجب افزایش کولونیزاسیون ریشه و گسترش سامانه ریشه‌ای شده و در نتیجه موجب افزایش جذب آب و عناصر غذایی و عملکرد گیاه می‌شود (Garg and Bharti, 2018). همچنین کاربرد اسید سالیسیلیک موجب افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ایجاد مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌شود (Kakaei et al., 2023). در گیاه آویشن باغی (*Thymus vulgaris* L.)، کاربرد قارچ اندوفیت (*Piriformospora indica*) به همراه اسید سالیسیلیک ۳۰۰ میکرومولار، ارتفاع گیاه، طول ریشه و کلونیزاسیون ریشه را افزایش داد (Mirzaei et al., 2021). همچنین در گیاه استویا (*Achillea millefolium* L.)، کاربرد اسید سالیسیلیک ۳۰۰ میکرومولار وزن خشک شاخه، برگ و بوته، ارتفاع و تعداد شاخه‌های فرعی را افزایش داد (Jalilvand Shirkhanitabar et al., 2020).

با توجه به اهمیت اقتصادی و ارزش دارویی گیاه بادرنجبویه، کاربرد قارچ مایکوریزا و همچنین اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک به دلیل تأثیر مثبت بر رشد گیاه با سیاست‌های کشاورزی پایدارو تولید محصولات ارگانیک هم‌راستا است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی اثر قارچ مایکوریزا و سطوح مختلف اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک بر صفات مورفولوژیک، بیوشیمیایی و میزان عناصر غذایی پرمصرف در گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک بر صفات موفولوژیک، بیوشیمیایی و جذب عناصر غذایی در گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L. cv. Citronella)، آزمایشی به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه‌ای واقع در شمال ایران (طول جغرافیایی ۵۴/۵۴۳۸، عرض جغرافیایی ۳۶/۷۹۳۲ و ارتفاع از سطح دریا ۲۷۳ متر) انجام شد. میانگین دمای گلخانه در دامنه ۱۸ تا ۲۳ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی در دامنه ۵۰ تا ۶۰ درصد و شدت نور حدود ۶۰ تا ۷۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه بود. بذرها مستقیماً در گلدان‌هایی با قطر دهانه ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر که حاوی ۲ کیلوگرم خاک بودند، کشت شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. مایه تلقیح قارچ مایکوریزا *Funneliformis mosseae* (*Glomus mosseae*) از بانک میکروبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب ایران تهیه شد. به‌ازای هر کیلوگرم خاک، ۱۰۰ گرم مایه تلقیح (۲۰ عدد اسپور در گرم) در عمق سه سانتی‌متری از سطح خاک گلدان قرارگرفت و بذرهای ضدعفونی‌شده توسط هیپوکلریت سدیم (۲ درصد) در عمق یک سانتی‌متری از سطح خاک کاشته شدند. تیمار اسید هیومیک (صفر، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در هر گلدان) به‌صورت کود-آبیاری به میزان ۲۵۰ میلی‌لیتر برای هر گلدان در زمان کاشت بذور اعمال شد. محلول‌پاشی برگی اسیدسالیسیلیک (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در طی دو مرحله (هفته دوم و سوم کشت در گلدان) هر مرحله ۵۰۰ میلی‌لیتر بر پایه آب مقطر، انجام شد (جدول ۲). آبیاری گلدان‌ها دو بار در هفته و در حد ۹۰ درصد گنجایش مزرعه‌ای (FC) خاک انجام شد. ارزیابی صفات دو هفته پس از آخرین تیمار در مرحله گل‌دهی صورت گرفت.

صفات مورفولوژیک مورد بررسی

اندازه‌گیری وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه توسط ترازوی دیجیتالی با دقت صدم گرم انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک شاخساره و ریشه، ابتدا نمونه‌ها در آون ۶۰ درجه سلسیوس خشک شده و سپس توزین شدند. حجم ریشه با استفاده از تغییر حجم آب پس از قرار گرفتن ریشه گیاه درون استوانه مدرج، اندازه‌گیری شد (Shabani Fard et al., 2024).

صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی

کلروفیل کل: محتوای کلروفیل کل برگ با استفاده از استون استخراج شد. جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (UV Visible مدل Spectro Flex 6600) در طول‌موج‌های ۶۶۳ نانومتر برای کلروفیل a و ۶۴۵ نانومتر برای کلروفیل b خوانده شد. در نهایت محتوای کلروفیل کل برگ بر حسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه، محاسبه شد (Danaee and Abdossi, 2016).

فنل کل: میزان فنل کل با استفاده از روش Hosseinzadeh Rostam Kalaei et al. (2022) اندازه‌گیری شد. میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۶۰ نانومتر قرائت شده و فنل کل برحسب میلی‌گرم (گالیک اسید) بر گرم وزن خشک برگ محاسبه شد.

فلاونوئید: میزان فلاونوئید با استفاده از روش Soroori et al. (2021)، اندازه‌گیری شده و جذب نمونه‌ها در طول موج ۴۱۵ نانومتر توسط اسپکتروفتومتر قرائت شده و در نهایت برحسب میلی‌گرم (کوئرستین) بر گرم وزن خشک برگ بیان شد.

نیتروژن: نیتروژن برگ با استفاده از دستگاه کجلدال اندازه‌گیری شده و بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک محاسبه شد (Jurgiel-Małecka et al., 2017).

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1. Physical and chemical characteristics of the used soil

بافت Texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	رسانایی الکتریکی عصاره اشباع Electrical conductivity of saturated extract, EC_e (dS/m)	واکنش pH	نیتروژن Nitrogen (%)	پتاسیم قابل دسترس Available potassium (mg kg^{-1})	فسفر قابل دسترس Available phosphorus (mg kg^{-1})	کربن آلی Organic carbon (%)
Loam	41	48	11	0.53	7.39	0.082	210	25.5	0.50

جدول ۲. نام تیمارهای آزمایش

Table 2. Name of experiment treatments

NO ردیف	Treatments تیمارها
1	Control شاهد
2	M قارچ مایکوریزا
3	M + HA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰
4	M + HA400 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰
5	M + SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰
6	M + SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید سالیسیلیک ۲۰۰
7	M + HA200+SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰
8	M + HA400+SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰
9	M + HA200+SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰

پتاسیم: میزان پتاسیم برگ بر اساس روش You (2015) توسط دستگاه فلیم‌فتومتر (Jenway انگلستان) اندازه‌گیری شده و بر حسب میلی‌گرم در گرم وزن خشک بیان شد.

فسفر: برای اندازه‌گیری میزان فسفر برگ به روش Jurgiel-Małecka et al. (2017) اندازه‌گیری شد. میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ۴۳۰ نانومتر قرائت شده و در نهایت برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن خشک بیان شد.

عملکرد اسانس: استخراج اسانس توسط دستگاه کلونجر (Shimadzu modelQP5050A) انجام شد و بر حسب درصد محاسبه شد (Danaee and Abdossi, 2019).

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزار آماری SPSS (نسخه ۲۳) و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد، انجام شد. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel (نسخه ۱۶) استفاده شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد، اثر تیمارهای قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک بر وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه، حجم ریشه، کلروفیل کل، فنل کل، فلاونوئید، میزان نیتروژن، پتاسیم و فسفر برگ، و عملکرد اسانس در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۳).

وزن تازه و خشک شاخساره: نتایج نشان داد بیش‌ترین وزن تازه و خشک شاخساره (به‌ترتیب ۱۳/۲۵ و ۸/۴۶ گرم در گیاه) در تیمار 200 SA + 400 HA + M و کم‌ترین وزن تازه و خشک شاخساره (به‌ترتیب ۱۶/۲۳ و ۵/۹۲ گرم در گیاه) در شاهد مشاهده شد (جدول ۴).

وزن تازه و خشک ریشه: نتایج نشان داد بیش‌ترین وزن تازه و خشک ریشه (به‌ترتیب ۴/۴۶ و ۲/۰۱ گرم در گیاه) در تیمار 100 SA + 400 HA + M و کم‌ترین مقادیر آن‌ها (به‌ترتیب ۲/۴۷ و ۰/۷۸ گرم در گیاه) مربوط به شاهد بود (جدول ۴).

حجم ریشه: نتایج نشان داد بیش‌ترین حجم ریشه با ۶/۲۰ سانتی‌متر مکعب در گیاه، در تیمار 100 SA + 400 HA + M و کم‌ترین آن با ۳/۴۰ سانتی‌متر مکعب در گیاه، در شاهد مشاهده شد (جدول ۴).

کلروفیل کل: نتایج بررسی‌ها نشان داد، ترکیب قارچ مایکوریزا به همراه اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک موجب بهبود محتوای کلروفیل کل برگ شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار آن (۱۸/۹۴ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) در تیمار 200 HA + M + 200 SA و کم‌ترین مقدار آن (۱۳/۴۲ میلی‌گرم در گرم وزن تازه) در شاهد به‌دست آمد (شکل ۱).

فنل کل: نتایج نشان داد، کاربرد قارچ مایکوریزا به همراه بالاترین غلظت اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک نقش مثبتی در افزایش میزان فنل کل گیاه داشت. بیش‌ترین محتوای فنل با ۱۳/۸۶ میلی‌گرم در گرم وزن خشک در تیمار 400 HA + M + 200 SA و کم‌ترین با ۹/۳۴ میلی گرم در گرم وزن خشک در شاهد بود (شکل ۲).

فلاونوئید: افزودن قارچ مایکوریزا به خاک و کاربرد غلظت‌های زیاد اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک میزان فلاونوئید گیاه را افزایش داد. بیش‌ترین و کم‌ترین میزان فلاونوئید (به‌ترتیب با ۲۲/۷۴ و ۱۷/۱۲ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) در تیمار M + ۲۰۰ SA + 400 HA و شاهد مشاهده شد (شکل ۳).

نیتروژن: بررسی‌ها نشان داد، کاربرد قارچ مایکوریزا و افزایش غلظت اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک سبب افزایش جذب عناصر غذایی شد. بیش‌ترین (۰/۳۲ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) و کم‌ترین (۰/۲۱ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) مقادیر نیتروژن برگ به‌ترتیب در تیمارهای 200 SA + 400 HA + M و شاهد مشاهده شد (جدول ۵).

پتاسیم: نتایج نشان داد، بیش‌ترین میزان پتاسیم با ۰/۳۶ میلی‌گرم در گرم وزن خشک، در تیمار 200 SA + 400 HA + M و کم‌ترین مقدار آن با ۰/۲۳ میلی‌گرم در شاهد به‌دست آمد (جدول ۵).

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک بر صفات مورفولوژیک و بیوشیمیایی و جذب عناصر توسط بادرنجبویه (*Melissa officinalis L.* cv Citronella)

Table 3. Analysis of variance of the effects of mycorrhizal fungus, humic acid and salicylic acid on morphological and biochemical characteristics and nutrient uptake of *Melissa officinalis L.* cv Citronella.

		Mean Squares میانگین مربعات											
	DF درجه آزادی	Shoot fresh weight وزن تازه شاخساره	Shoot dry weight وزن خشک شاخساره	Roots fresh weight وزن تازه ریشه	Roots dry weight وزن خشک ریشه	Root volume حجم ریشه	Total chlorophyll کلروفیل کل	Total phenol فنل کل	Flavonoid فلاونوئید	Nitrogen نیتروژن	Potassium پتاسیم	Phosphorus فسفر	Essential oil اسانس
Treatment تیمار	9	9.90**	11. 51**	6.91**	2.42**	12.82**	11.460**	18.022**	14.56**	3.019**	2.017**	4.153**	3.020**
Error خطا	20	0.082	0.012	0.024	0.005	0.02	0.050	0.045	0.076	0.011	0.017	0.023	0.021
CV (%) ضریب تغییرات	---	10.9	10.0	12.2	9.3	11.1	9.8	10.9	11.0	10.6	9.6	11.2	13.7

** shows significant effect at 1% probability level.

** بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد است.

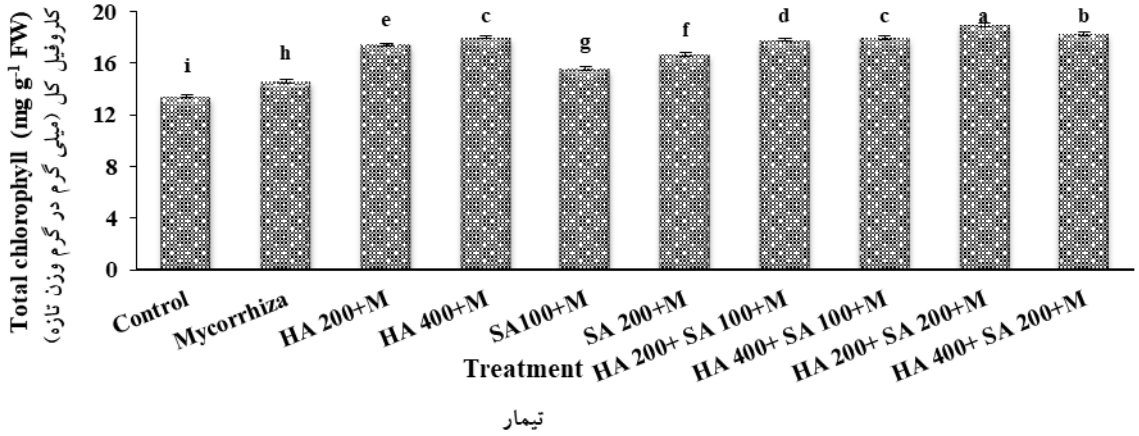
جدول ۴. اثر قارچ مایکوریزا (M)، اسید هیومیک (HA) و اسید سالیسیلیک (SA) بر صفات مورفولوژیک بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L. cv Citronella)

Table 4. Effect of mycorrhizal fungus (M), humic acid (HA) and salicylic acid (SA) on morphological traits of *Melissa officinalis* L. cv Citronella

Treatment تیمار	Fresh weight of shoot (g plant $^{-1}$) وزن تازه شاخساره (گرم در گیاه)	Dry weight of shoot (g plant $^{-1}$) وزن خشک شاخساره (گرم در گیاه)	Fresh weight of root (g plant $^{-1}$) وزن تازه ریشه (گرم در گیاه)	Dry weight of root (g plant $^{-1}$) وزن خشک ریشه (گرم در گیاه)	Root volume (cm^3 plant $^{-1}$) حجم ریشه (سانتی‌متر مکعب در گیاه)
Control شاهد	16.32^{h}	5.92^{h}	2.47^{h}	0.78^{h}	3.40^{i}
M قارچ مایکوریزا	19.26^{g}	6.25^{fg}	2.78^{g}	1.02^{g}	3.80^{h}
M + HA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰	21.65^{d}	6.59^{ij}	3.24^{e}	1.38^{e}	4.40^{f}
M + HA400 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰	22.04^{d}	7.12^{e}	3.65^{d}	1.54^{d}	4.70^{e}
M + SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	19.87^{g}	6.33^{fg}	3.06^{f}	1.31^{f}	4.00^{g}
M + SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید سالیسیلیک ۲۰۰	20.45^{f}	6.95^{f}	3.41^{e}	1.47^{de}	4.30^{fg}
M + HA200+SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	22.73^{d}	7.38^{cd}	3.87^{d}	1.66^{c}	5.10^{d}
M + HA400+SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	24.36^{b}	8.05^{b}	4.46^{a}	2.01^{a}	6.20^{a}
M + HA200+SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	23.53^{c}	7.67^{c}	4.11^{b}	1.93^{b}	5.40^{c}
M + HA400+SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰+ اسید سالیسیلیک ۲۰۰	25.13^{a}	8.46^{a}	4.37^{c}	1.76^{c}	5.90^{b}

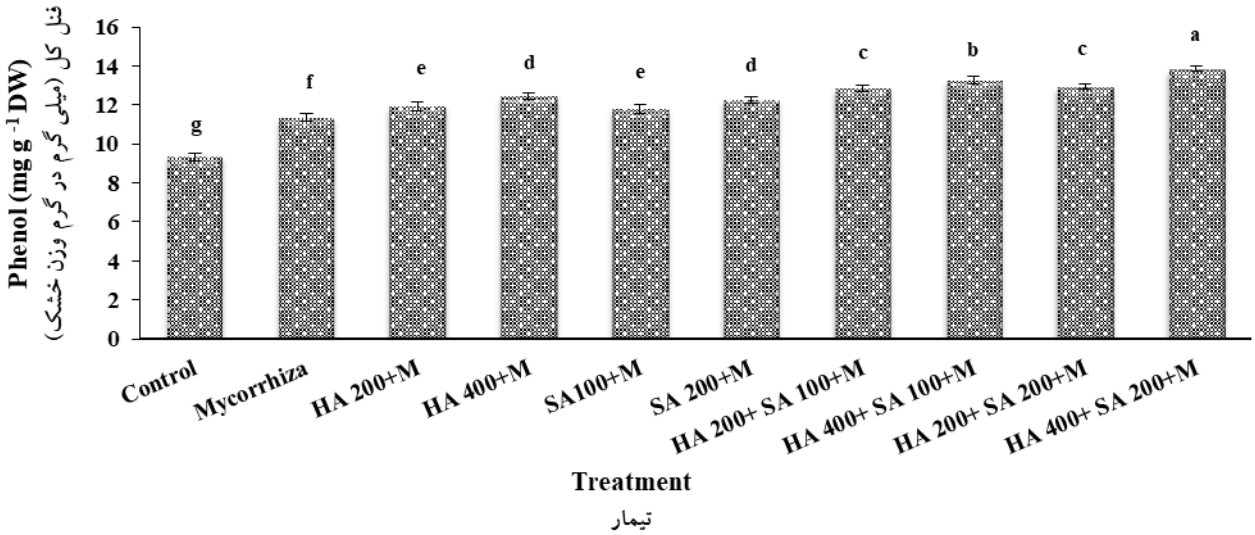
In each column, values marked by similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

در هر ستون، حروف یکسان بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار است (دانکن، $p <$ ۰/۰۵).



شکل ۱. اثر قارچ مایکوریزا (M)، اسید هیومیک (HA) و اسید سالیسیلیک (SA) بر محتوای کلروفیل کل بادرنجبویه (*Melissa* .cv Citronella *officinalis* L). حروف یکسان بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار است (دانکن، $p < ۰/۰۵$).

Fig. 1. Effect of mycorrhizal fungus (M), humic acid (HA) and salicylic acid (SA) on total chlorophyll content of *Melissa officinalis* L cv. Citronella. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

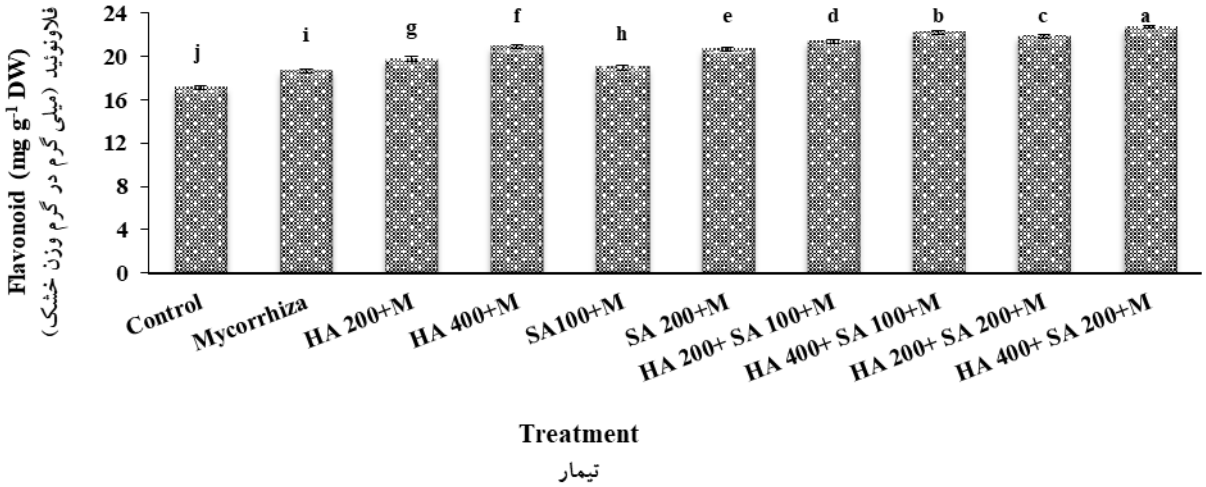


شکل ۲. اثر قارچ مایکوریزا (M)، اسید هیومیک (HA) و اسید سالیسیلیک (SA) بر محتوای فنل کل بادرنجبویه (*Melissa* .cv Citronella *officinalis* L). حروف یکسان بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار است (دانکن، $p < ۰/۰۵$).

Fig. 2. Effect of mycorrhizal fungus (M), humic acid (HA) and salicylic acid (SA) on total phenol content of *Melissa officinalis* L. cv Citronella. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

فسفر: بیش‌ترین میزان فسفر با ۱/۰۹ میلی‌گرم در گرم وزن خشک مربوط به تیمار 200 SA + 400 HA + M و کم‌ترین میزان فسفر با ۰/۶۹ میلی‌گرم در گرم وزن خشک مربوط به شاهد است (جدول ۵).

عملکرد اسانس: بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر عملکرد اسانس با ۰/۳۲ و ۰/۲۳ درصد به‌ترتیب مربوط به تیمار 200 SA + 400 HA + M و شاهد بود (شکل ۴).



شکل ۳. اثر قارچ مایکوریزا (M)، اسید هیومیک (HA) و اسید سالیسیلیک (SA) بر محتوای فلاونوئید بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L. cv Citronella). حروف یکسان بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار است (دانکن، $p < ۰/۰۵$).

Fig. 3. Effect of mycorrhizal fungus (M), humic acid (HA) and salicylic acid (SA) on flavonoid content of *Melissa officinalis* L. cv Citronella. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

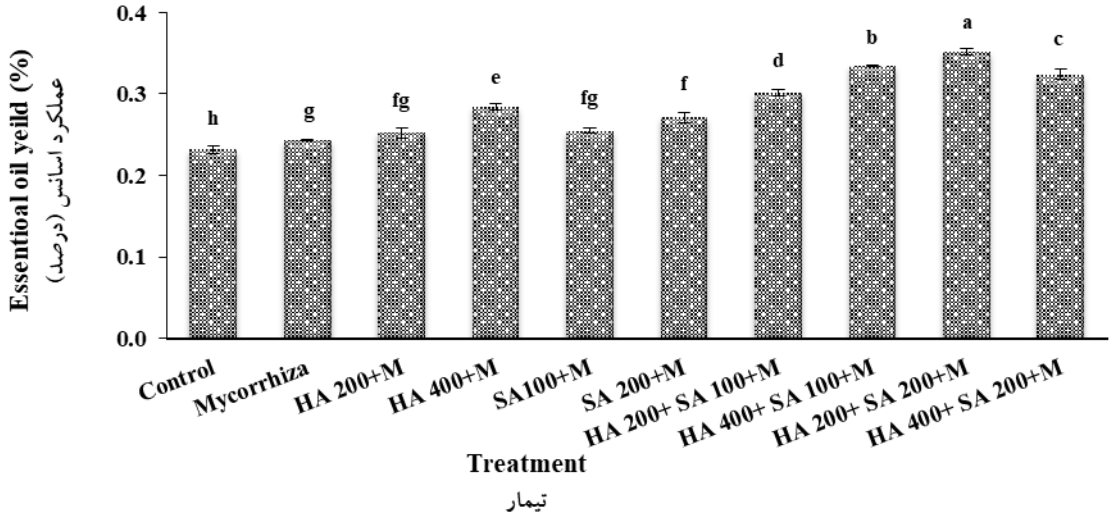
جدول ۵. اثر قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک بر جذب عناصر توسط بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L. cv Citronella)

Table 5. Effect of mycorrhizal fungus (M), humic acid (HA) and salicylic acid (SA) on nutrient uptake of *Melissa officinalis* L. cv Citronella

Treatment تیمار	Nitrogen (mg g^{-1}) نیتروژن (میلی گرم در گرم)	Potassium (mg g^{-1}) پتاسیم (میلی گرم در گرم)	Phosphorus (mg g^{-1}) فسفر (میلی گرم در گرم)
Control شاهد	0.21^{h}	0.23^{i}	0.69^{lm}
M قارچ مایکوریزا	0.23^{g}	0.25^{h}	0.75^{jk}
M + HA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰	0.25^{f}	0.28^{f}	0.82^{hi}
M + HA400 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰	0.27^{d}	0.31^{e}	0.87^{ef}
M + SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	0.24^{f}	0.26^{g}	0.78^{j}
M + SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید سالیسیلیک ۲۰۰	0.25^{e}	0.28^{f}	0.81^{hi}
M + HA200+SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	0.28^{d}	0.32^{d}	0.93^{de}
M + HA400+SA100 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	0.30^{b}	0.34^{b}	1.04^{bc}
M + HA200+SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۲۰۰+ اسید سالیسیلیک ۱۰۰	0.29^{c}	0.33^{c}	0.96^{cd}
M + HA400+SA200 قارچ مایکوریزا+ اسید هیومیک ۴۰۰+ اسید سالیسیلیک ۲۰۰	0.32^{a}	0.36^{a}	1.09^{a}

In each column, values marked by different letters are significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

در هر ستون، حروف یکسان بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار است (دانکن، $p < ۰/۰۵$).



شکل ۴. اثر قارچ مایکوریزا (M)، اسید هیومیک (HA) و اسید سالیسیلیک (SA) بر عملکرد اسانس بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L. cv Citronella). حروف یکسان بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار است (دانکن، $p < ۰/۰۵$).

Fig. 4. Effect of mycorrhizal fungus (M), humic acid (HA) and salicylic acid (SA) on essential oil yield of *Melissa officinalis* L. cv Citronella. Bars with similar letters are not significantly different (Duncan, $p < 0.05$).

بحث

در این پژوهش همزیستی گیاه با قارچ میکوریزا رشد گیاه بادرنجبویه را بهبود بخشید، زیرا قارچ مایکوریزا آثار سوء ناشی از فقر عناصر غذایی را کاهش داده و رشد گیاه را به‌دلیل جذب و انتقال عناصرغذایی مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم افزایش می‌دهد که در نتیجه منجر به افزایش شاخص‌های رشدی در گیاه می‌شود (Franken, 2012). نتایج نشان داد کاربرد اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک وزن تازه و خشک گیاه را افزایش داد (جدول ۴). اسید هیومیک از راه آثار هورمونی و با تأثیر بر متابولیسم سلول‌های گیاهی و همچنین با قدرت کلات‌کنندگی و افزایش جذب عناصرغذایی موجب افزایش رشد و در نتیجه وزن تازه و خشک شاخساره گیاه می‌شود (Nardi et al., 2002). اسید سالیسیلیک نیز به‌دلیل تولید هورمون‌هایی چون ایندول استیک اسید و آبسزیک اسید و همچنین افزایش جذب یون‌ها و فتوسنتز نقش مثبتی در افزایش وزن تازه و خشک شاخساره گیاه دارد (Karami Chame et al., 2016). Zolfaghari et al. (2013) نیز تأثیر مثبت قارچ مایکوریزا (*G.mosseae*) را بر وزن تازه و خشک شاخساره ریحان (*Ocimum basilicum* L.) گزارش نمودند. همچنین کاربرد اسید هیومیک با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر و اسید سالیسیلیک با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب در گیاه بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) (Gorgini Shabankareh et al., 2017) و مرزه خوزستانی (*Satureja khuzistanica* Jamzad) موجب افزایش وزن تازه و خشک گیاه شد (Sadeghian et al., 2013).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد کاربرد قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک موجب افزایش وزن تازه و خشک و حجم ریشه شد. قارچ‌های مایکوریزا جذب عناصر غذایی را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش رشد و گسترش ریشه‌های جانبی می‌گردد و از این راه به جذب آب و مواد معدنی توسط گیاه کمک می‌کند (Safari Motlagh et al., 2021). اسید هیومیک به‌دلیل افزایش فعالیت ریزجانداران خاک، تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های ریشه، کاهش pH و بهبود چرخه عناصر غذایی نقش مثبتی در رشد ریشه دارد (García et al., 2012). همچنین اسید سالیسیلیک با کمک اکسین تقسیم سلولی را تنظیم می‌کند و با افزایش فعالیت آنزیم روبیسکو و بهبود

فتوسنتز و جذب بیش‌تر عناصر غذایی، سبب بهبود رشد ریشه می‌شود (Popova et al., 2009). نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های Gholami et al. (2018) در گیاه کاسنی (*Cichorium intybus* L.) و Darvizheh et al. (2019) در گیاه سرخار گل (*Echinacea purpurea* L.) همخوانی دارد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد کاربرد قارچ مایکوریزا به همراه اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک محتوای کلروفیل کل را بهبود بخشید. در اثر همزیستی قارچ مایکوریزا با گیاه میزبان، میزان هورمون‌های سیتوکنین و جیبرلین افزایش می‌یابد که بر محتوای کلروفیل مؤثر است. از طرفی، قارچ میکوریزا به جذب منیزیم در گیاه کمک می‌کند و می‌تواند سنتز کلروفیل را افزایش دهد (Hashem et al., 2018). همچنین اسید هیومیک با در دسترس قرار دادن آب و مواد غذایی و افزایش انتقال مواد فتوسنتزی به برگ، میزان ساخت رنگیزه‌ها را افزایش می‌دهد. کاربرد اسید سالیسیلیک نیز فعالیت آنزیم کلروفیل اکسیداز را کاهش داده و از این راه سبب افزایش کلروفیل و فعالیت آنزیم روبیسکو شده و در نتیجه میزان فتوسنتز کل را افزایش می‌دهد (Chamani et al., 2016). در گیاه بادرشبی نیز کاربرد اسید هیومیک با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، میزان کلروفیل کل بادرشبی (*Dracocephalum moldavica*) را نسبت به شاهد افزایش داد (Samadimatin and Hani, 2017). همچنین Safari Kamal Abadi et al. (2023) نیز گزارش نمودند کاربرد ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر اسید سالیسیلیک، محتوای کلروفیل بادرنجبویه (*Melissa officinalis* L.) را افزایش داده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از در پژوهش حاضر (شکل‌های ۲ و ۳)، برهمکنش قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک تأثیر مثبتی بر میزان فنل کل و فلاونوئید بادرنجبویه داشت. با توجه به نقش قارچ مایکوریزا در افزایش فراهمی عناصر غذایی مانند کربن و نیتروژن، به‌نظر می‌رسد که قارچ مایکوریزا با تأثیر مثبت بر مسیرهای متابولیکی اولیه گیاه به‌صورت غیرمستقیم بر تولید متابولیت‌های ثانویه مانند فنل و فلاونوئیدها تأثیرگذار است (Kheiri et al., 2020). همچنین بررسی‌ها نشان داد، ترکیبات فنولی مانند فنل‌ها و فلاونوئیدها که مرتبط با مسیر شیکمیک هستند به وسیله مواد هیومیکی تحریک می‌شوند (Schiavon et al., 2010). اسید سالیسیلیک نیز با بیان ژن‌های مربوط به آنزیم فنیل آلانین آمونیالیاز در بیوسنتز فنیل پروپانوئید نقش داشته و القای این ژن موجب تجمع ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی در گیاه می‌شود (Canellas et al., 2015). یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج Mozaffari et al. (207) پیرامون تأثیر اسید هیومیک بر میزان فنل و فلاونوئید گیاه خرفه (*Portulaca oleracea* L.)، با همخوانی دارد.

بررسی داده‌ها نشان داد که برهمکنش قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک موجب افزایش جذب نیتروژن برگ شد. قارچ‌های میکوریزی از راه فعال‌سازی گلوتأمین سنتتاز، آرژیناز و اوره‌آز، غلظت نیتروژن را در گیاهان میزبان افزایش می‌دهند (Ashraf, 2010). اسید هیومیک با تحریک جذب NO_3^- توسط افزایش بیان پروتئین حامل نیتروژن در سطح غشایی سلولی و همچنین تغییر در میزان کاتیون‌ها جذب نیتروژن را افزایش می‌دهد (Alhverdizadeh and Danaee, 2023). همچنین می‌توان اثر هورمونی شبه‌جیبرلین این ماده را نیز در جذب نیتروژن مهم دانست، همچنین اسید سالیسیلیک با افزایش فعالیت نیترات ردوکتاز در برگ جذب نیتروژن توسط گیاه را افزایش می‌دهد (Khaled and Fawy, 2011). پژوهش‌های Noroozisharaf and Kaviani (2018)، در گیاه آویشن (*Thymus vulgaris* L.) همسو با نتایج آزمایش حاضر است.

دلیل افزایش جذب فسفر با کاربرد قارچ مایکوریزا می‌تواند به این دلیل باشد که هیف‌های قارچ‌های میکوریزا به‌دلیل ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز موجب انحلال فسفر خاک شده و با توسعه منطقه تخلیه فسفر در اطراف ریشه گیاه و افزایش سرعت جذب فسفر، مقدار آن را افزایش می‌دهند (Tavasoli and Aliasgharzade, 2009). اسید هیومیک از راه ترکیب و ایجاد کمپلکس با آنزیم فسفاتاز باعث افزایش جذب فسفر توسط گیاه می‌شود (Canellas et al., 2015). کاربرد اسید

سالیسیلیک برونزا در گیاه موجب فعال‌شدن H+-ATPase های غشای پلاسمایی شده و با فعال‌شدن آن‌ها جذب یون‌های معدنی تسریع می‌شود و تغذیه معدنی گیاه بهبود می‌یابد (Gunes et al., 2007). یافته‌های Aghaeifard et al. (2016) در گیاه توت فرنگی (*Fragaria* × *Ananassa duch. cv. Camarosa*) با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

در پژوهش حاضر، کاربرد قارچ مایکوریزا به همراه اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک میزان پتاسیم برگ را افزایش داد. قارچ‌های مایکوریزا قادرند سیلیکات را تجزیه کرده و عناصری چون پتاسیم، فسفر، آهن، روی و سیلیسیم را آزاد کنند (Imtiaz Rashid et al., 2016). اسید هیومیک نفوذپذیری غشای زیستی برای الکترولیت‌ها را افزایش می‌دهد به همین دلیل موجب افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه می‌شود (Ozfidan-Konakci et al., 2018). اسید سالیسیلیک نیز به‌دلیل افزایش فعالیت سیستم‌ها آنتی‌اکسیدانی و غیرآنتی‌اکسیدانی گیاه، میزان سلامت غشاء سلولی را افزایش داده و باعث افزایش انتقال بیش‌تر پتاسیم به درون سیتوپلاسم توسط انتقال‌دهنده‌های پتاسیم شده است (Zhu, 2003). نتایج Shafazadeh Shahrbabaki et al. (2020) نشان داد کاربرد اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک در شرایط تنش شوری، میزان جذب پتاسیم را در گیاه فلفل (*Capsicum annuum* L.) افزایش داد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، برهمکنش قارچ مایکوریزا، اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک میزان اسانس گیاه بادرنجبویه را افزایش داد. دلیل آن را می‌توان به همزیستی قارچ مایکوریزا و افزایش جذب کارآمد فسفر و تا حدودی نیتروژن توسط ریشه نسبت داد که در نتیجه موجب افزایش اسانس گیاه می‌شود (Kapoor et al., 2004). همچنین اسید هیومیک با افزایش فعالیت آنزیم رابیسکو و فراهم‌نمودن شرایط برای جذب بیش‌تر فسفر و نیتروژن موجب افزایش رشد رویشی و عملکرد اسانس می‌شود (Gorgini et al., 2017). اسید سالیسیلیک نیز به‌عنوان عامل انتقال‌دهنده سیگنال‌های دریافت تنش، سبب فعال‌شدن سیستم دفاعی گیاه و تحریک تولید اسانس می‌شود. در نتیجه کاربرد اسید سالیسیلیک با ایجاد تنش کاذب تولید اسانس را افزایش می‌دهد Malekian et al., (2014). در همین راستا، یافته‌های Sorkhi et al. (2018) مربوط به کاربرد اسید هیومیک در گیاه آویشن (*Thymus vulgaris*) و Sadeghian et al. (2013) درباره کاربرد اسید سالیسیلیک در گیاه مرزه خوزستانی (*Satureja khuzistanica* Jamzad)، نشان داد که هر دو موجب افزایش میزان اسانس شدند.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که کاربرد قارچ مایکوریزا به همراه اسید هیومیک و اسید سالیسیلیک موجب بهبود رشد رویشی، صفات بیوشیمیایی و میزان جذب عناصر غذایی بادرنجبویه شدند. بنابراین تیمار قارچ مایکوریزا به همراه اسید هیومیک ۴۰۰ میلی گرم در هر گلدان و اسید سالیسیلیک ۲۰۰ میلی گرم در لیتر تیمار ترکیبی مؤثری در راستای بهبود رشد و ویژگی‌های دارویی گیاه بادرنجبویه است.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

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

منابع مورد استفاده

References

1. Abedi, T., Pakniyat, H., 2010. Antioxidant enzyme changes in response to drought stress in ten cultivars of oilseed rape (*Brassica napus* L.). Czech. J. Gen. Plant Breed. 46(1), 27–34. https://doi.org/10.17221/67/2009-CJGPB.

2. Aghaeifard, F., Babalar, M., Fallahi, E., Ahmadi, A., 2016. Influence of humic acid and salicylic acid on yield, fruit quality, and leaf mineral elements of strawberry (*Fragaria × Ananassaduch*.) cv. Camarosa. J. Plant Nutr. 39(13), 1821–1829. https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1088023.
3. Alhverdizadeh, S., Danaee, E., 2023. Effect of humic acid and vermicompost on some vegetative indices and proline content of *Catharanthus roseous* under low water stress. Environ. Water Eng. 9(1), 141–152. https://doi.org/10.22034/EWE.2022.333951.1745.
4. Amanifar, S., Toghranegar, Z., 2020. The efficiency of arbuscular mycorrhiza for improving tolerance of *Valeriana officinalis* L. and enhancing valerenic acid accumulation under salinity stress. Ind. Crop Prod. 147, 112234. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112234.
5. Ashraf, M., 2010. Inducing drought tolerance in plants: recent advances. Biotechnol. Adv. 28, 169–183. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.11.005.
6. Bettonia, M., Mogora, A., Paulettia, V., Goicoecheab, N., 2014. Growth and metabolism of onion seedlings as affected by the application of humic substances, mycorrhizal inoculation, and elevated CO_2. Sci. Hortic. 180, 227–235. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.037.
7. Canellas, L.P., Olivares, F., Aguiar, N.O., Jones, D.L., Nebbioso, A., Mazzei, P., Piccolo, A., 2015. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. Sci. Hortic. 196, 15–27. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013.
8. Chamani, E., Bonyadi, M., Ghanbari, A., 2016. Effects of salicylic acid and humic acid on vegetative indices of periwinkle (*Catharanthus roseus* L.). J. Hortic. Sci. 29(4), 631–641. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v29i4.33521es. (In Persian with English abstract)
9. Danaee, E., Abdossi, V., 2016. Evaluation of the effect of plant growth substances on longevity of gerbera cut flowers cv. Sorbet. Iran. J. Plant Physiol. 6(3), 1665–379. https://doi.org/10.30495/ijpp.2016.532434.
10. Danaee, E., Abdossi, V., 2019. Phytochemical and morphophysiological responses in Basil (*Ocimum basilicum* L.) plant to application of polyamines. J. Med. Plant Res. 18(69), 125–133. https://doi.org/20.1001.1.2717204.2019.18.69.15.6. (In Persian with English abstract)
11. Darvizheh, H., Zahedi, M., Abayzadeh, B., 2019. The effect of foliar application of salicylic acid and spermine on the growth and root characteristics of *Echinacea purpurea* L. Plant Prod. Sci. 8(30), 225–242. https://doi.org/20.1001.1.23222727.1398.8.30.1.5. (In Persian with English abstract)
12. Franken, P., 2012. The plant strengthening root endophyte *Piriformospora indica*: potential application and the biology behind. Appl. Microbiol. Biotechnol. 96, 1455–1464. https://doi.org/10.1007/s00253-012-4506-1.
13. Garg, N., Bharti, A., 2018. Salicylic acid improves arbuscular mycorrhizal symbiosis, and chickpea growth and yield by modulating carbohydrate metabolism under salt stress. Mycorrhiza 28(8), 727–746. https://doi.org/10.1007/s00572-018-0856-6.
14. García, A.C., Santos, L.A., Izquierdo, F.G., Sperandio, M.L., Castro, R.N., Berbara, R., 2012. Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plants against oxidative stress. Ecol. Eng. 47, 203–208. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.011.
15. Gholami, H., Raouf Farda, F., Jamal, M., Khizab, S., Ghanic, A., 2018. Yield and physicochemical properties of inulin were obtained from Iranian chicory roots under vermicompost and humic acid treatments. Ind. Crop Prod. 123(1), 610–616. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.031.
16. Gorgini Shabankareh, H., Sabouri, F., Saedi, F., Fakheri, B.A., 2017. Effects of different levels of humic acid on growth indices and essential oil of lemon balm (*Melissa officinalis* L.) under different irrigation regimes. Crop Sci. Res. Arid Region. 1(2), 166–176. https://doi.org/10.22034/csrar.01.02.04. (In Persian with English abstract)
17. Gunes, A., Inal, A., Alpaslan, M., Eraslan, F., Bagci, E.G., Cicek, N., 2007. Salicylic acid-induced changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. J. Plant Physiol. 164, 728–736. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.12.009.
18. Hashem, A., Alqarawi, A., Radhakrishnan, R., Al-Arjani, A., AbdulazizAldehaish, H., Egamberdieva, D., Fathi Abd Allah, E., 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones, and ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumi ssativus* L. Saudi J. Biol. Sci. 25(6), 1102–1114. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.03.009.
19. Hosseinzadeh Rostam Kalaei, M., Abdossi, V., Danaee, E., 2022. Evaluation of foliar application of selenium and flowering stages on selected properties of Iranian Borage as a medicinal plant. Sci. Rep. 12, 12568. https://doi.org/10.1038/s41598-022-16241-z.
20. Imtiaz Rashid, M., Hamid Mujawar, L., Shahzade, T., Almeelbi, T., Ismail, I., Oves, M., 2016. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. Microbiol. Res. 183, 26–41. https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.007.
21. Jalilvand Shirkhanitabar, H., Tavakoli, A., Moradi, F., Shekari, F. 2020. Effect of salicylic acid foliar application on the morphological and biochemical traits of Stevia (*Stevia rebaudiana*). Plant Proc. Func. 9(39), 245–256.https://doi.org/20.1001.1.23222727.1399.9.39.19.8. (In Persian with English abstract)

22. Jurgiel-Małecka, G., Gibczyńska, M., Siwek, H., Buchwał, A., 2017. Comparison of fruits chemical composition of selected cultivars wild strawberry (*Fragaria vesca* L.). Eur. J. Hortic. Sci. 82(4), 204–210. https://doi.org/10.17660/eJHS.2017/82.4.6.
23. Kakaei, H., Amirinejad, A.A., Ghobadi, M., 2023. Effect of salicylic acid foliar application on growth characteristics in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) under lead stress conditions. J. Soil Plant Interact. 14(3), 73–85. https://doi.org/10.47176/jspi.14.3.20162. (In Persian with English abstract)
24. Kapoor, R., Giri, B., Mukerji, K.G., 2004. Improved growth and essential oil yield and quality in (*Foeniculum vulgare* Mill.) on mycorrhizal inoculation supplemented with P-fertilizer. Bioresour. Technol. 93, 307–311. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.028.
25. Karami Chame, S., Khalil-Tahmasbi, B., ShahMahmoodi, P., Abdollahi, A., Fathi, A., Seyed Mousavi, S.J., Hossein Abad, M., Ghoreishi, S., 2016. Effects of salinity stress, salicylic acid, and *Pseudomonas* on the physiological characteristics and yield of seed beans (*Phaseolus vulgaris*). Scientia. 14(2), 234–238. https://doi.org/10.15192/PSCP.SA.2016.14.2.234238.
26. Khaled, H., Fawy, H., 2011. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. Soil Water Res. 6(1), 21–29. https://doi.org/10.17221/4/2010-SWR.
27. Khalvandi, M., Amerian, M., Pirdashti, H., Baradaran Firoozabadi, M., Gholami, A., 2019. Study the physiological and biochemical properties of peppermint (*Mentha pipertis* L.) in response to salt stress and coexistence with *Piriformospora indica* fungi. J. Plant Prod. 26(1), 1–19. https://doi.org/10.22069/jopp.2018.11244.2041.
28. Kheiri, Z., Moghaddam, M., Moradi, M., 2020. Study the effect of different mycorrhizal fungi on some growth indices, photosynthetic pigments, flavonoids and carotenoid content of pot marigold flower. Hortic. Plant. Nutr. 3(1), 37–50. https://doi.org/10.22070/HPN.2020.5007.1061. (In Persian with English abstract)
29. Mafakheri, S., Asghari, B., 2018. Effect of seaweed extract, humic acid and chemical fertilizers on morphological, physiological and biochemical characteristics of *Trigonellafoenum-graecum* L. J. Agr. Sci. Tech. 20, 1505–1516. https://doi.org/20.1001.1.16807073.2018.20.7.2.6.
30. Malekian, M., Hemmati, K., Ghasemnezhad, A., Barzali, M., 2014. Effect of salicylic acid on quantitative and qualitative traits of German chamomile ecotypes. J. Crop Improv. 16(1), 185–196. https://doi.org/10.22059/jci.2014.51951. (In Persian with English abstract)
31. Mandal, Sh., Evelin, H., Giri, B., Singh, V., Kapoor, R., 2013. Arbuscular mycorrhiza enhances the production of stevioside and Rebaudioside-A in *Stevia rebaudiana* via nutritional and non-nutritional mechanisms. Appl. Soil Ecol. 72, 187–194. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.07.003.
32. Mirzaei, M.S., Siadat, S.A., Pakdaman Sardrod, B., Moradi Telavat, M., 2021. Effect of *Piriformospora indica* and foliar application of salicylic acid on morphological characteristics and antioxidant enzymes of thyme irrigation cut-off stress. J. Crop Improv. 23(4), 853–839. https://doi.org/10.22059/jci.2021.309204.2443. (In Persian with English abstract)
33. Mozaffari, S., Khorasaninejad, S., Gorgini Shabankareh, H., 2017. The effects of irrigation regimes and humic acid on some of physiological and biochemical traits of Common Purslane in greenhouse. J. Crop Improv. 19(2), 401–416. https://doi.org/10.22059/jci.2017.60423. (In Persian with English abstract)
34. Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., Vianello, A., 2002. Physiological effects of humic substances on higher plants. Soil Biol Biochem. 34, 1527–1536. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00174-8.
35. Neisi, A., Parsaeian, M., Gholami, A., baradaran Firoozabadi, M., Abbasdokht, H., 2019. Effects of tillage systems, salicylic acid and mycorrhizal fungi on photosynthetic pigments and some quality characteristics of maize. Iran. J. Field Crops Res. 50(1), 85–96. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.239089.654362. (In Persian with English abstract)
36. Nejati Sini, H., Barzegar, R., Soodaee Mashaee, S., Ghasemi Ghahsare, M. 2023. Mycorrhizal fungi and *Bacillus sp.* along with organic fertilizer on the growth and nutrient uptake of bell pepper (*Capsicum annum* L.). J. Soil Plant Interact. 13(4), 89–104. https://doi.org/10.47176/jspi.13.4.20821. (In Persian with English abstract)
37. Noroozisharaf, A., Kaviani, M., 2018. Effect of soil application of humic acid on nutrients uptake, essential oil, and chemical compositions of garden thyme (*Thymus vulgaris* L.) under greenhouse conditions. Physiol. Mol. Biol. Plants. 24(3), 423–431. https://doi.org/10.1007/s12298-018-0510-y.
38. Ozfidan-Konakci, C., Yildiztugay, E., Bahtiyar, M., Kucukoduk, M., 2018. The humic acid-induced changes in the water status, chlorophyll fluorescence, and antioxidant defense systems of wheat leaves with cadmium stress. Ecotoxicol. Environ. Saf. 155, 66–75. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.071.
39. Popova, L.P., Maslenkova, L.T., Yordanova, R.Y., Ivanova, A.P., Krantev, A.P., Szalai, G., Janda, T., 2009. Exogenous treatment with salicylic acid attenuates cadmium toxicity in pea seedlings. Bulgar. J. Plant Physiol. 47, 224–231. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.11.007.
40. Sadeghian, F., Hadian, J., Hadavi, M., Mohamadi, A., Ghorbanpour, M., Ghafarzadegan, R., 2013. Effects of exogenous salicylic acid application on growth, metabolic activities and essential oil composition of *Satureja khuzistanica* Jamzad. J. Med. Plants. 12(47), 70–82. https://doi.org/20.1001.1.2717204.2013.12.47.8.3. (In Persian with

English abstract)
41. Safari Kamal Abadi, N., Mohebalipour, N., Oraei, M., Nourafcan, H., Asadi, A., 2023. Effect of foliar application of chitosan and salicylic acid on morphological traits and essential oil quality of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). J. Crop Ecophysiol. 64, 475–492. https://doi.org/10.30495/JCEP.2021.1927610.1791. (In Persian with English abstract)
42. Safari Motlagh, M.R., Kaviani, B., Ansari, M.H., 2021. Effect of arbuscular mycorrhizal fungus species on some growth and biochemical traits and nutrients uptake in the rooting of cutting of olive cultivars. J. Plant Res. 34(2), 481–493. (In Persian with English abstract)
43. Salamon, I., Kryvtsova, M.V., Trush, K.I., Fandalyuk, A.I., Spivak, M.J., 2019. Agro-ecological cultivation, secondary metabolite characteristics and microbiological tests of lemon balm (*Melissa officinalis*) – the variety Citronella. Regul. Mech. Biosyst. 10(2), 265–269. https://doi.org/10.15421/021940.
44. Schiavon, M., Pizzeghello, D., Muscolo, A., Vaccaro, S., Francioso, O., Nardi, S., 2010. High molecular size humic substances enhance phenyl propanoid metabolism in maize (*Zea mays* L.). J. Chem. Ecol. 36, 662–669. https://doi.org/10.1007/s10886-010-9790-6.
45. Shabani Fard, R., Aghaee Hanjani, E., Danaee, E., 2024. Effects of polyamines on morphophysiological traits of *Calendula officinalis* L. under salinity stress caused by potassium chloride and sodium chloride salts. IJHST. 11(2), 189–200. https://doi.org/10.22059/ijhst.2023.357306.630.
46. Shafazadeh Shahrbabaki, M., HosseiniFarhi, M., Mohammadinia, Gh., 2020. Improving salinity tolerance and nutrient uptake in bell peppers using salicylic acid and humic acid. Int. J. Hortic. Sci. 34(1), 91–106. https://doi.org/10.22067/jhorts4.v34i1.80187.
47. Sorkhi, F., 2020. Effect of irrigation intervals and humic acid on physiological and biochemical characteristic on medicinal plant of *Thymus vulgaris*. Iran. J. Plant Physiol. 10(4), 3367–3378. https://doi.org/10.30495/ijpp.2020.1890199.1191.
48. Soroori, S., Danaee, E., Hemmati, Kh, Ladan Moghadam, A., 2021. The metabolic response and enzymatic activity of *Calendula officinalis* L. to foliar application of spermidine, citric acid and proline under drought stress and in a postharvest condition. J. Agri. Sci. Technol. 23(6), 1339–1353. https://doi.org/20.1001.1.16807073.2021.23.6.6.9.
49. Świąder, K., Startek, K., Wijaya, Ch., 2019. The therapeutic properties of lemon balm (*Melissa officinalis* L.): Reviewing novel findings and medical indications. J. Appl. Bot. Food Qual. 92, 327–335. https://doi.org/10.5073/JABFQ.2019.092.044.
50. Tavasoli, AR., Aliasgharzade, N., 2009. Effect of arbuscular mycorrhiza on nutrient uptake and onion yield in a saline soil at field conditions. Water Soil 35, 158–162. (In Persian with English abstract)
51. Weisany, W., Raei, Y., Pertot, I., 2015. Changes in the essential oil yield and composition of dill (*Anethum graveolens* L.) as response to arbuscular mycorrhiza colonization and cropping system. Ind. Crops Prod. 77, 295–306. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.003.
52. Yazdan Panah Gohari, A., Ghanbari Jahromi, M., Zarrinnia, V., 2021. Effect of some mycorrhizal fungi species on quantitative and qualitative properties of two landraces of Chicory in greenhouse conditions. J. Crop Improv. 24(2), 527–544. https://doi.org/10.22059/jci.2021.314730.2484. (In Persian with English abstract)
53. You, Z.J., Xing, Y., Guan, W., Ma, H.P., Liu, Z.E., 2015. Evaluation of the soil ecological measure for overcoming replant disorder of strawberry. Eur. J. Hort. Sci. 80(3), 128–133. https://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.3.5.
54. Zhu, J.K., 2003. Regulation of ion homeostasis under salt stress. Cur. Opinion Plant Biol. 6, 441–445. https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00085-2.
55. Zolfaghari, M., Nazeri, V., Sefidkon, F., Rejali, F., 2013. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and essential oil content and composition of *Ocimum basilicum* L., Iran. J. Plant Physiol. 3(2), 643–650. https://doi.org/10.30495/ijpp.2013.540674.