Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

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

Investigation of nano-iron and nano-zinc application on some qualitative and quantitative traits of *Lallemantia royleana* Benth

Aghil Madadi-Paein-Roudposhti[1], Vahid Akbarpour[*2], Mohammad Ali Bahmanyar[3], Mahboubeh Ashnavar[4]

1. M.Sc. Graduated of Medicinal Plants, Sana Institute of Higher Education, Sari, Iran. E-mail: madadiaghil283@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Horticultural Sciences and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: v.akbarpour@sanru.ac.ir
3. Professor, Dept. of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: mail.bahmanyar@gmail.com
4. Ph.D. in Medicinal Plants, Dept. of Horticultural Sciences, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: mahboobe.ashnavar@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 02.19.2023
Revised: 04.25.2023
Accepted: 05.10.2023

Keywords:
Antioxidant activity,
Flavonoid,
Lallemantia,
Nano-fertilizer,
Total phenol

ABSTRACT

Background and Objectives: One of the important needs in agricultural planning in order to achieve high yield and optimal quality, especially in the case of medicinal plants, is the evaluation of different methods of plant nutrition. Also, the use of nanofertilizers in agriculture is one of the most beneficial methods of feeding plants. The use of nanofertilizers leads to increasing the efficiency of nutrient consumption, reducing soil toxicity, minimizing the negative effects of excessive fertilizer consumption, and reducing the frequency of fertilizer application. Therefore, considering the medicinal importance of *Lallemantia*, a research was conducted to investigate the effect of iron nano-fertilizer and zinc nano-fertilizer on some traits of this medicinal plant.

Materials and Methods: Factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications at Shahid University of Tehran. The treatments consisted of nano-iron at four levels (0, 1.5, 3 and 4.5 $g.l^{-1}$) and nano-zinc at four levels (0, 1.5, 3 and 4.5 $g.l^{-1}$). The source of iron fertilizer used was 9% iron chelate nanofertilizer and the source of zinc fertilizer used was 12% zinc nanofertilizer, which was used as foliar spraying in the above concentrations. In this study, traits such as plant height, number of nuts per plant, leaf dry weight, chlorophyll *a*, *b* and carotenoid, total phenol, total flavonoid and antioxidant activity were evaluated.

Results: The results showed that the highest plant height (41.3 cm) was obtained using 4.5 $g.l^{-1}$ of nano-iron fertilizer. Application of 1.5 $g.l^{-1}$ nano-iron and 3 $g.l^{-1}$ nano-zinc increased the number of nuts in plant (593.3) and carotenoids in this plant. The highest leaf dry weight (3.6 g per plant) and chlorophyll *b* (3.7 $mg.g^{-1}$ fresh weight) concentration were obtained by using 4.5 $g.l^{-1}$ nano-iron and 4.5 $g.l^{-1}$ nano-zinc. The concentration of chlorophyll *a* was also increased by application of 3 $g.l^{-1}$ nano-iron and 1.5 $g.l^{-1}$ nano-zinc. The use of nano-iron improved total phenol production and the antioxidant activity. While the lowest amount of antioxidant activity (94.47%) was observed in the control treatment. Finally, the use of 4.5 $g.l^{-1}$ nano-iron and 3 $g.l^{-1}$ nano-zinc increased total flavonoid (81.6 $mg.g^{-1}$) in this plant.

Conclusion: In general, the use of higher levels of iron (4.5 $g.l^{-1}$) and zinc (3 $g.l^{-1}$ and 4.5 $g.l^{-1}$) resulted in the best results in the growth and phytochemical characteristics of *Lallemantia* compared to not using these fertilizers. Therefore, by using appropriate amounts of iron and zinc nano-fertilizers, in addition to reducing fertilizer consumption and reducing environmental pollution, it is possible to improve the quantitative and qualitative characteristics of *Lallemantia* medicinal plant.

Cite this article: Madadi-Paein-Roudposhti, Aghil, Akbarpour, Vahid, Bahmanyar, Mohammad Ali, Ashnavar, Mahboubeh. 2023. Investigation of nano-iron and nano-zinc application on some qualitative and quantitative traits of *Lallemantia royleana* Benth. *Journal of Plant Production Research*, 30 (3), 197-216.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JOPP.2023.21094.3018
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

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

بررسی کاربرد نانوکود آهن و روی بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه بالنگو (*Lallemantia royleana* Benth)

عقیل مددی پایین رودپشتی[۱]، وحید اکبرپور*[۲]، محمدعلی بهمنیار[۳]، محبوبه آشناور[٤]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گیاهان دارویی، مؤسسه آموزش عالی سنا، ساری، ایران. رایانامه: madadiaghil283@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: v.akbarpour@sanru.ac.ir
۳. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: mail.bahmanyar@gmail.com
٤. دکتری گیاهان دارویی، گروه علوم باغبانی، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: mahboobe.ashnavar@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۱۱/۳۰
تاریخ ویرایش: ۱٤۰۲/۰۲/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱٤۰۲/۰۲/۲۰

واژه‌های کلیدی:
بالنگو،
فعالیت آنتی‌اکسیدانی،
فلاونوئید،
فنل کل،
نانوکود

چکیده

سابقه و هدف: یکی از نیازهای مهم در برنامه‌ریزی زراعی به منظور دستیابی به عملکرد بالا و کیفیت مطلوب به‌ویژه در مورد گیاهان دارویی، ارزیابی روش‌های مختلف تغذیه گیاه است. هم‌چنین استفاده از نانوکودها در کشاورزی یکی از سودمندترین روش‌های تغذیه گیاهان می‌باشد. استفاده از نانوکودها منجر به افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن اثرات منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد کود می‌شود. بنابراین با توجه به اهمیت دارویی گیاه بالنگو، پژوهشی به‌منظور بررسی تأثیر نانوکود آهن و نانوکود روی برخی خصوصیات این گیاه دارویی صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها: آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایشی شامل نانوکود آهن در چهار سطح (صفر، ۱/۵، ۳ و ٤/۵ گرم در لیتر) و نانوکود روی در چهار سطح (صفر، ۱/۵، ۳ و ٤/۵ گرم در لیتر) بود. منبع کود آهن مورد استفاده، نانوکود کلات آهن نُه درصد و منبع کود روی مورد استفاده، نانوکود کلات روی ۱۲ درصد بود که به‌صورت محلول‌پاشی در غلظت‌های فوق مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش صفاتی مانند ارتفاع بوته، تعداد فندقه در بوته، وزن خشک برگ، میزان کلروفیل a، b و کاروتنوئید، میزان فنل کل، فلاوئید کل و درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که بیش‌ترین ارتفاع بوته (۴۱/۳ سانتی‌متر) در اثر کاربرد ٤/٥ گرم در لیتر نانو کود آهن به‌دست آمد. استفاده از تیمار ۱/۵ گرم در لیتر نانوکود آهن به همراه سه گرم در لیتر نانوکود روی، سبب افزایش تعداد فندقه در بوته (۵۹۳/۳) و غلظت کاروتنوئید در گیاه بالنگو شد. بالاترین میزان وزن خشک برگ (۳/٦ گرم در بوته) و غلظت کلروفیل b (۳/۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) نیز در اثر مصرف ٤/٥ گرم در لیتر نانوکود آهن به همراه ٤/٥ گرم در لیتر نانوکود روی به‌دست آمد. غلظت کلروفیل a نیز در اثر کاربرد سه گرم در لیتر نانوکود آهن به همراه ۱/۵ گرم در لیتر نانوکود روی افزایش یافت. هم‌چنین استفاده از نانوکود آهن به میزان ٤/٥ گرم در لیتر سبب بهبود تولید فنل کل و فعالیت آنتی‌اکسیدانی گیاه بالنگو شد؛ در حالی‌که کم‌ترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی (۹٤/٤۷ درصد) در تیمار شاهد مشاهده شد. در نهایت استفاده از ٤/٥ گرم در لیتر نانوکود آهن به‌اضافه سه گرم در لیتر نانوکود روی نیز سبب افزایش میزان فلاونوئید کل (۸۱/٦ میلی‌گرم بر گرم) در این گیاه شد.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی استفاده از سطوح بالاتر آهن (٤/٥ گرم در لیتر) و روی (۳ و ٤/٥ گرم در لیتر) سبب حصول بهترین نتیجه در صفات رشدی و فیتوشیمیایی بالنگو در مقایسه با عدم مصرف این کودها گردید. بنابراین با استفاده از مقادیر مناسب نانو کودهای آهن و روی علاوه بر کاهش مصرف کود و کاهش آلودگی محیط زیست، می‌توان سبب بهبود خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی بالنگو شد.

استناد: مددی پایین رودپشتی، عقیل، اکبرپور، وحید، بهمنیار، محمدعلی، آشناور، محبوبه (۱۴۰۲). بررسی کاربرد نانوکود آهن و روی بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه بالنگو (*Lallemantia royleana* Benth). *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۰ (۳)، ۲۱۶-۱۹۷.
DOI: 10.22069/JOPP.2023.21094.3018

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

گیاه بالنگو (*Lallemantia royleana* Benth) گیاهی دارویی و یک‌ساله از تیره نعناعیان[1] می‌باشد که حاوی اسانس و موسیلاژ است. بذرهای این گیاه منبع خوبی از فیبر، روغن و پروتئین هستند و خصوصیات دارویی و غذایی برای انسان دارند. این دانه‌ها در طبّ سنتی به عنوان یکی از چهارتخم، به‌علت دارا بودن موسیلاژ به عنوان نرم‌کننده در رفع سرفه‌های ناشی از سرماخوردگی و نیز به عنوان تقویت‌کننده، مدر و محرک، مصرف سنتی دارند (۱). از روغن این گیاه هم‌چنین در چرم‌سازی، رنگ‌سازی، روان‌کننده، به‌عنوان ماده جلوگیری کننده از فسادچوب، واکس مبل، جوهر چاپگر، تهیه صابون، دباغی و در کارخانه‌های لینولئوم استفاده می‌شود (۲).

عملکرد پایین محصولات کشاورزی در بسیاری از کشورها، در درجه اول مربوط به کمبود عناصر غذایی است. تغذیه گیاهان شاید یکی از بهترین امیدهای حل بحران غذایی جهان بوده است. مقدار عناصر ضروری مختلف مورد نیاز برای رشد مطلوب گیاه متنوع بوده و بستگی به نوع محصول، میزان عملکرد و نوع موجودی خاک دارد. در این میان عناصر غذایی کم‌مصرف برای رشد طبیعی گیاهان ضروری هستند و در واکنش‌های بیوشیمیایی گیاه دخالت دارند. به‌عنوان مثال عنصر روی (Zn) برای تولید هورمون رشد اکسین و انجام فتوسنتز و عنصر آهن (Fe) در تشکیل کلروفیل گیاهی نقش دارند و تأمین این عناصر غذایی در خاک می‌تواند موجب توازن عناصر غذایی در گیاه و در نهایت افزایش تولید و کیفیت محصول گردد (۳).

فناوری نانو، در زمره فناوری‌های جدیدی است که امروزه در حال رشد و توسعه می‌باشد. یکی از مهم‌ترین کاربردهای فناوری نانو در کشاورزی (در بخش آب و خاک)، استفاده از نانوکودها برای تغذیه گیاهان است. استفاده از نانوکودها منجر به افزایش کارایی مصرفی عناصر غذایی، کاهش سمیت خاک، به حداقل رسیدن اثرات منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و کاهش تعداد دفعات کاربرد کود می‌شود (٤).

در پژوهشی که به منظور بررسی تأثیر کاربرد سطوح مختلف آهن (از منابع نانوکود کلات آهن و سکوسترین آهن ۱۳۸) بر پارامترهای رشد، غلظت و جذب آهن و برخی عناصر غذایی در گیاه لوبیا چشم‌بلبلی صورت گرفت؛ مشخص شد که با افزایش سطح آهن در هر دو نوع کود، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، تعداد غلاف در بوته، وزن غلاف و دانه در بوته، وزن دانه در گلدان، غلظت و جذب آهن اندام هوایی و ریشه در مقایسه با شاهد افزایش یافت (۵). هم‌چنین مقادیر و زمان کاربرد نانوکود آهن بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا مورد بررسی قرارگرفت؛ نتایج این آزمایش بیانگر آن بود که کاربرد نانوکود آهن و زمان مصرف آن اثرات معنی‌دار و مثبتی بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا داشت (٦).

در آزمایشی دیگر، اثر محلول‌پاشی نانوکودهای آهن و روی بر عملکرد کمی گیاه دارویی کاسنی تحت تراکم‌های مختلف بوته، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد استفاده از محلول‌پاشی توأم نانوکودهای آهن و روی ضمن افزایش عملکرد گیاه، با کاهش اثرات منفی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی، راهی مؤثر جهت دست‌یابی به کشاورزی پایدار می‌باشد (۷). استفاده از نانوذرات اکسیدروی در گیاه گلرنگ سبب افزایش مالون دی‌آلدیید و آنزیم‌های گایاکول پراکسیداز، پلی‌فنل اکسیداز و دهیدروژناز شد (۸).

یکی از نیازهای مهم در برنامه‌ریزی زراعی به‌منظور حصول عملکرد بالا و با کیفیت مطلوب

1- Lamiaceae

به‌ویژه در مورد گیاهان دارویی، ارزیابی روش‌های مختلف تغذیه گیاه است. بنابراین با توجه به اهمیت دارویی گیاه بالنگو، پژوهشی به‌منظور بررسی تأثیر نانوکود آهن و روی بر میزان عملکرد کمی و کیفی این گیاه دارویی صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی و آزمایشگاه گیاهان دارویی دانشگاه شاهد تهران و ساری انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل نانوکود آهن (از منبع نانوکود کلات آهن ۹ درصد خریداری شده از شرکت خضراء) در چهار سطح (صفر، ۱/۵، ۳ و ٤/۵ گرم در لیتر) و نانوکود روی (از منبع نانوکود کلات روی ۱۲ درصد خریداری شده از شرکت خضراء) در چهار سطح (صفر، ۱/۵، ۳ و ٤/۵ گرم در لیتر)، در سه تکرار اجرا گردید.

عملیات تهیه و آماده‌سازی زمین با مناسب شدن شرایط اقلیمی در بهمن‌ماه و کاشت بذر به‌صورت مستقیم در کرت‌هایی به مساحت ۳ مترمربع (۳×۱) در هفته آخر اسفندماه انجام شد. فاصله بین بلوک‌ها یک متر و فاصله کرت‌ها در هر بلوک ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. کشت به‌صورت جوی و پشته‌ای انجام گرفت. منبع کودآهن مورد استفاده، نانوکود کلات آهن نُه درصد و منبع کود روی مورد استفاده، نانوکودکلات روی ۱۲ درصد بود که به‌صورت محلول‌پاشی در غلظت‌های فوق مورد استفاده قرار گرفت. محلول‌پاشی‌ها در سه مرحله (قبل از گلدهی، زمانی‌که ٤۰ درصد بوته‌ها به گلدهی رسیدند و زمانی‌که ۹۰ درصد بوته‌ها به گلدهی رسیدند) انجام پذیرفت (۲). برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش.

Table 1. Some physicochemical parameters of the soil used in the experiment.

عمق Depth (cm)	بافت Texture	pH	EC ($dS.m^{-1}$)	کربن آلی (٪) Organic carbon (%)	نیتروژن (٪) N (%)	P	K	Fe	Zn	Cu	Mn
						($mgkg^{-1}$)					
0-30	لومی شنی Sandy loam	8.10	1.51	1.11	0.11	26.60	383.67	6.63	2.70	3.08	26.48
30-60	لومی شنی Sandy loam	8.31	1.41	0.41	0.04	12.45	246.69	7.41	0.96	1.50	6.42

در این آزمایش برخی از صفات کمی و کیفی گیاه دارویی بالنگو مانند ارتفاع بوته، تعداد فندقه در بوته، غلظت کلروفیل a، غلظت کلروفیل b، غلظت کاروتنوئید، میزان فنل کل، فلاونوئید کل و درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. در پایان فصل رشد (اوایل تیرماه) و پس از رسیدگی کامل دانه‌ها، تعداد پنج بوته از هر کرت به صورت تصادفی و با حذف اثر حاشیه، برداشت و اجزای عملکرد هر بوته اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری رنگدانه‌های فتوسنتزی ابتدا ۱۰۰ میلی‌گرم برگ تازه را جدا کرده، سپس با هاون چینی ساییده و با متانول به حجم پنج میلی‌لیتر رسانده شد. پس از آن، غلظت کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید در طول موج‌های ٦٦٦، ٦٥٣ و ٤٧۰

نانومتر با استفاده از دستگاه الایزا (Biotek.power wrae xs2, America) محاسبه شد. جهت کالیبراسیون دستگاه در هر طول موج، از اتانول ۹۶ درصد استفاده شد. مقادیر جذب به‌دست آمده در معادله‌های ذیل قرار گرفت و براساس آن، غلظت کلروفیل‌های a، b و کاروتنوئیدها به‌دست آمد (۹).

$$Chl_a = 15.65\times A_{666} - 7.34\times A_{653} \quad (۱)$$

$$Chl_b = 27.05\times A_{653} - 11.21\times A_{666} \quad (۲)$$

$$C(x+c) = (1000\times A_{470} - 1.63\times Chl_a - 104.96\times Chl_b) / 221 \quad (۳)$$

به‌منظور اندازه‌گیری فنل کل، ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره متانولی (۰/۵ گرم در پنج میلی‌لیتر متانول۸۰ درصد) را با پنج میلی‌لیتر فولین سیوکالتیو[1] (یک به ۱۰ رقیق شده با آب مقطر) مخلوط کرده سپس چهار میلی‌لیتر کربنات سدیم یک مولار (۱۰/٦ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر) به آن اضافه شد. برای کالیبره کردن دستگاه اسپکتروفتومتر نیز از محلول متانول، فولین سیوکالتیو و کربنات سدیم استفاده شد. محلول فوق ۱۵ دقیقه در تاریکی قرار گرفته و سپس جذب آن در طول موج ۷٦۵ نانومتر قرائت شد. برای رسم منحنی کالیبراسیون از غلظت‌های متفاوت استاندارد اسید گالیک[2] (صفر، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر)، در متانول ۸۰ درصد استفاده گردید. سپس با استفاده از معادله حاصل از آن (y=۰/۰۰٦۳ x) میزان فنل عصاره محاسبه گردید. در اینجا y همان عددی است که در مقابل شاهد خوانده می‌شود و از این طریق x به‌دست می‌آید. چون غلظت عصاره، حاصل از ۰/۵ گرم پودر خشک در پنج میلی‌لیتر متانول بود، در نتیجه مقدار فنل برای یک گرم در لیتر محاسبه شده و فنل کل به‌صورت محتوای فنلی و بر حسب میلی‌گرم گالیک اسید در یک گرم عصاره خشک به‌دست آمد (۱۰).

برای محاسبه محتوای فلاونوئیدی، ابتدا ۰/۵ میلی‌لیتر از عصاره متانولی تهیه شده با ۱/۵ میلی‌لیتر متانول، ۰/۱ میلی‌لیتر کلرید آلومینیوم ۱۰ درصد در اتانول (۱۰ گرم کلرید آلومینیوم در ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول و آب مقطر)، ۰/۱ میلی‌لیتر استات پتاسیم یک مولار (۲/٤۱ گرم در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر) و ۲/۸ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شد. برای تهیه شاهد، تنها از متانول خالص استفاده گردید. سپس مخلوط فوق، نیم ساعت در تاریکی قرار داده شده و بلافاصله در طول موج ٤۱۵ نانومتر قرائت شد. به‌منظور رسم منحنی استاندارد، غلظت‌های مختلف از استاندارد کوئرستین ساخته شده و بعد از خواندن عدد جذب، منحنی استاندارد رسم شد. از معادله خط به‌دست آمده از منحنی استاندارد برای تعیین غلظت فلاونوئید کل استفاده شد (y = ۰/۰۰٦۷ x +۰/۰۱۳۲). فلاونوئید کل براساس میلی‌گرم کوئرستین در یک گرم عصاره گزارش شد (۱۱).

فعالیت آنتی‌اکسیدانی به روش درصد مهار رادیکال DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) انجام شد. به این منظور مقدار یک میلی‌لیتر از DPPH با غلظت ۰/۱ میلی‌مولار به لوله آزمایش اضافه و سپس یک میلی‌لیتر از عصاره متانولی تهیه شده از سرشاخه‌های بالنگو به آن اضافه شد. محلول‌های تهیه شده ۱۵ دقیقه پس از استراحت در تاریکی با دستگاه

1- Folinciocalteu
2- Gallic acid

اسپکتروفتومتر (مدل uv-1800) در طول موج ۵۱۷ نانومتر قرائت شد. برای نمونه شاهد نیز از DPPH با غلظت ۰/۱ میلی‌مولار استفاده شد. در نهایت درصد مهار رادیکال‌های آزاد با استفاده از رابطه زیر به‌دست می‌آید (۱۱).

(٤) درصد مهار رادیکال‌های آزاد = [(عدد جذب شاهد – عدد جذب نمونه) / (عدد جذب شاهد)] × ۱۰۰

آنالیز آماری توسط نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و مقایسه میانگین‌ها با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. ترسیم نمودارها در نرم‌افزار Excel 2013 صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از جدول تجزیه واریانس نشان داد که اثر ساده نانو کود آهن بر ارتفاع بوته، تعداد فندقه در بوته، وزن خشک برگ، غلظت کلروفیل a، کاروتنوئید، میزان فلاونوئید کل و درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی در سطح احتمال یک درصد و میزان فنل کل در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. اثر ساده نانوکود روی نیز بر ارتفاع بوته، وزن خشک برگ، غلظت کلروفیل a، کاروتنوئید و درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی در سطح احتمال یک درصد و بر تعداد فندقه در بوته و میزان فلاونوئید کل در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار گردید. هم‌چنین اثرات متقابل نانوکود آهن و روی بر تعداد فندقه در بوته، وزن خشک برگ، غلظت کلروفیل a، غلظت کلروفیل b، کاروتنوئید و میزان فلانوئید کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای نانوکود آهن و نانوکود روی بر برخی صفات گیاه دارویی بالنگو.

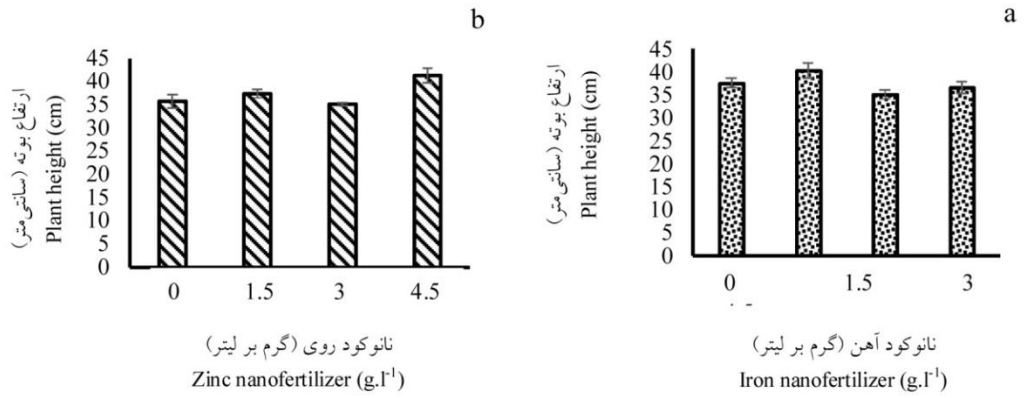
Table 2. Variance analysis (mean squares) of the effect of iron nanofertilizer and zinc nanofertilizer treatments on some traits of *Lallemantia royleana* Benth.

منابع تغییرات S.O.V.	ارتفاع بوته Plant height	تعداد فندقه در بوته Number of capsules per plant	وزن خشک برگ Leaf dry weight	غلظت کلروفیل a Chlorophyll *a* concentration	غلظت کلروفیل b Chlorophyll *b* concentration	غلظت کاروتنوئید concentration Carotenoid	فنل کل Total phenol	فلاونوئید کل Total flavonoid	فعالیت آنتی اکسیدانی Antioxidant activity
تکرار Replication	14.33^{ns}	$76.7.52^{ns}$	0.02^{ns}	0.81^{ns}	0.44^{ns}	0.11^{ns}	0.17^{ns}	0.01^{ns}	0.29^{ns}
نانوکود آهن Iron nanofertilizer	57.39^{**}	13948.58^{**}	0.18^{**}	7.6^{**}	0.05^{ns}	0.79^{**}	0.24^{*}	0.74^{**}	3.48^{**}
نانوکود روی Zinc nanofertilizer	90.81^{**}	7851.91^{*}	0.25^{**}	8.03^{**}	0.23^{ns}	1.09^{**}	0.06^{ns}	0.35^{*}	2.30^{*}
اثر متقابل Interaction	23.48^{ns}	32417.47^{**}	0.06^{**}	5.57^{**}	1.66^{**}	0.47^{**}	0.11^{ns}	0.43^{**}	0.88^{ns}
خطا Error	10.77	2575.14	0.03	1.66	0.41	0.14	0.08	0.12	0.41
ضریب تغییرات (درصد) CV (%)	8.77	13.15	18.30	20.86	21.53	20.59	11.56	11.85	0.67

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی‌دار

**, * and ns are significant at 1% and 5% probability level and non-significant, respectively

ارتفاع بوته: نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده نانود کود روی و آهن بر ارتفاع بوته (شکل ۱) نشان می‌دهد که بیش‌ترین ارتفاع گیاه با مقدار ٤١/٣ سانتی‌متر در نتیجه تیمار محلول‌پاشی ٤/٥ گرم در لیتر نانوکود روی به‌دست آمد که با تیمار ۱/٥ گرم در لیتر نانوکود آهن در یک سطح آماری قرار داشت در نتیجه با مصرف بالاترین میزان نانوکود روی و نیز مصرف میزان متوسط نانوکود آهن، بر میزان ارتفاع گیاه افزوده خواهد شد. در پژوهشی دیگر در مورد بررسی تأثیر کودهای شیمیایی و نانوکود، بر عملکرد کمی و کیفی گیاه دارویی بالنگو مشخص شد که ارتفاع گیاه به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت (۱۲) که با یافته‌های این آزمایش مطابقت دارد. هم‌چنین با بررسی اثر نانو کود روی و هیومیک اسید بر رشد و عملکرد مرزه نتایج مشابهی از افزایش طول ساقه گزارش شد (۱۳). در پژوهشی دیگر، ارتفاع گیاه آویشن دنایی نیز در اثر کاربرد میکروکلات آهن و سولفات آهن افزایش یافت (١٤). در یک مطالعه، قرار دادن نخود در معرض نانواکسید روی، سطوح بالاتری از هورمون رشد گیاه (ایندول استیک اسید) را به دنبال داشت (١٥).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر ساده (a) نانوکود آهن و (b) نانوکود روی بر ارتفاع بوته.

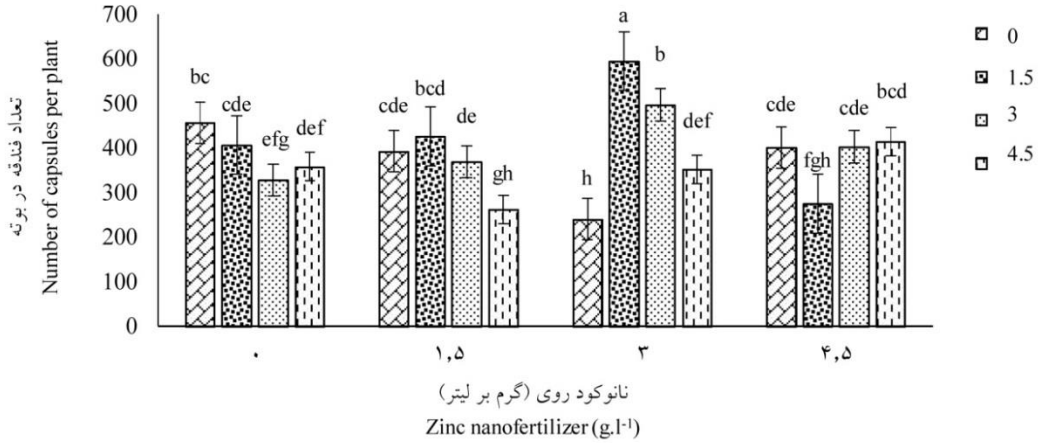
(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 1. Mean comparison of the simple effect of (a) iron nanofertilizer and (b) zinc nanofertilizer on plant height. (The means with at least one similar letter are not significantly different).

فعال شدن برخی از هورمون‌های رشد گیاهی مانند اکسین در آوندهای چوبی توسط یون Zn^{+2} صورت می‌گیرد. در نتیجه می‌توان افزایش ارتفاع گیاه را در اثر افزایش غلظت نانوکلات روی به تولید و فعالیت بیش‌تر هورمون‌های رشد مانند اکسین نسبت داد. کمبود روی باعث کاهش طول میانگره‌ها و کاربرد آن سبب افزایش در تولید ایندول اسید استیک و در نتیجه افزایش طول ساقه می‌گردد. هم‌چنین روی اثر هم‌افزایی با نیتروژن موجود در خاک دارد؛ بدین‌صورت که با افزایش جذب روی، میزان جذب نیتروژن نیز توسط گیاه از خاک، افزایش می‌یابد که در نتیجه جذب بیش‌تر نیتروژن، ارتفاع یا خصوصیات رشدی گیاه نیز بهبود خواهد یافت (١٦). بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته مشخص گردید که کاربرد کلات آهن سبب افزایش ارتفاع در گیاه آویشن دنایی شد (١٤). هم‌چنین با بررسی اثر محلول‌پاشی نانوکلات آهن و کلات آهن بر خصوصیات رشدی گیاه ریحان مقدس (*Ocimum sanctum*) گزارش

شد که استفاده از این کودها تا سطح مشخصی می‌تواند سبب افزایش ارتفاع گیاه گردد ولی افزایش بیش از حد آن‌ها ممکن است سبب ایجاد سمیت و کاهش ارتفاع شود (۱۷).

تعداد فندقه در بوته: بیش‌ترین تعداد فندقه در غلظت آهن ۱/۵ و روی سه گرم در لیتر به مقدار ۵۹۳/۳ و کم‌ترین تعداد فندقه در غلظت سه گرم در لیتر روی و عدم مصرف آهن به مقدار ۲۴۰/۳ به‌دست آمد (شکل ۲). بر اساس پژوهش‌های انجام شده، تأثیر نانوکود کلات آهن بر تعداد فندقه در بوته گیاه بالنگو معنی‌دار بوده است (۱۸). در آزمایش‌های دیگری که به منظور بررسی نانوکود آهن و روی بر خصوصیات رشدی گیاه لوبیا چشم‌بلبلی (۱۹) و کلزا (٦) صورت پذیرفت؛ مشخص شد که به ترتیب بیش‌ترین تعداد گره و گل در تیمار ترکیبی آهن و روی مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها نشان داد. این امر را می‌توان به فراهمی بیش‌تر عناصر غذایی و نقش ریزمغذی‌ها در افزایش عملکرد گیاهان نسبت داد. آهن از جمله عناصر ضروری برای رشد و تولیدمثل گیاهان بوده و بنابراین برای بقای گیاهان لازم است. این عنصر در فرایند فتوسنتز، تنفس، جذب و ساخت نیتروژن و کلروفیل در گیاهان نقش دارد. با این وجود، افزایش مقدار این عنصر نیز می‌تواند به ایجاد اکسیژن فعال و در نتیجه تنش اکسیداتیو منجر شود (۲۰). استفاده از ترکیبات نانو با خصوصیات مطلوب مانند غلظت مؤثر، قابلیت انحلال‌پذیری مناسب، ثبات و تأثیرگذاری بالا و رهایش کنترل شده سبب افزایش کارایی عناصر غذایی و در نتیجه سبب افزایش عملکرد خواهد شد (۲۱).



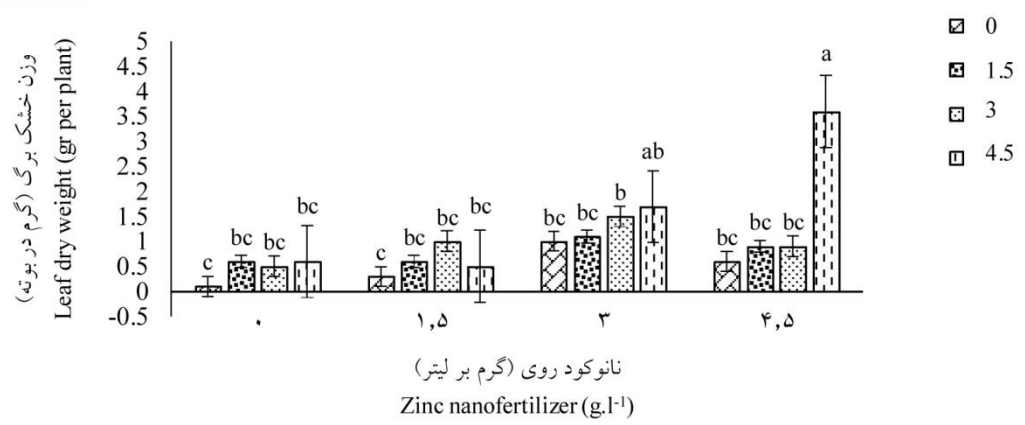
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود روی و نانوکود آهن بر تعداد فندقه در بوته.

(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 2. Mean comparison of the interaction effect of zinc nanofertilizer and iron nanofertilizer on the number of capsules per plant.
(The means with at least one similar letter are not significantly different).

وزن خشک برگ: بیش‌ترین میزان وزن خشک برگ (۳/٦ گرم در بوته) مربوط به بیش‌ترین غلظت استفاده از نانوکودهای آهن و روی (٤/۵ گرم در لیتر) و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار شاهد بود (شکل ۳). با استفاده از ترکیبات نانو به‌صورت محلول‌پاشی و به‌عنوان جایگزین کودهای مرسوم، عناصر غذای به‌راحتی در اختیار گیاه قرار می‌گیرند. استفاده از ترکیبات نانو منجر به افزایش کارایی مصرف عناصر

غذایی، کاهش سمیت خاک، کاهش اثرات منفی ناشی از مصرف بیش از حد کود و تعداد دفعات کاربرد کود می‌گردد. هم‌چنین جذب و انتقال ترکیبات نانو از طریق برگ به آسانی انجام می‌شود (۲۱). محلول‌پاشی آهن سبب افزایش جذب آن توسط برگ می‌شود و در نتیجه کمبود این عنصر رفع شده و تجمع ماده خشک در گیاه افزایش خواهد یافت (۲۲). با توجه به پی‌اچ زیاد خاک محل آزمایش، جذب آهن خاک توسط ریشه دچار مشکل شد و گیاه نسبت به جذب آهن از طریق محلول‌پاشی واکنش خوبی نشان داد که در نتیجه آن تجمع ماده خشک افزایش یافت. استفاده از عناصر روی و آهن در گیاه استویا نیز سبب افزایش وزن خشک برگ شد (۲۳). هم‌چنین استفاده از این عناصر سبب افزایش فتوسنتز و در نتیجه افزایش تولید و تجمع کربوهیدرات‌ها خواهد شد که در پی آن افزایش ماده خشک برگ نیز به‌دست خواهد آمد.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود روی و نانوکود آهن بر وزن خشک برگ.

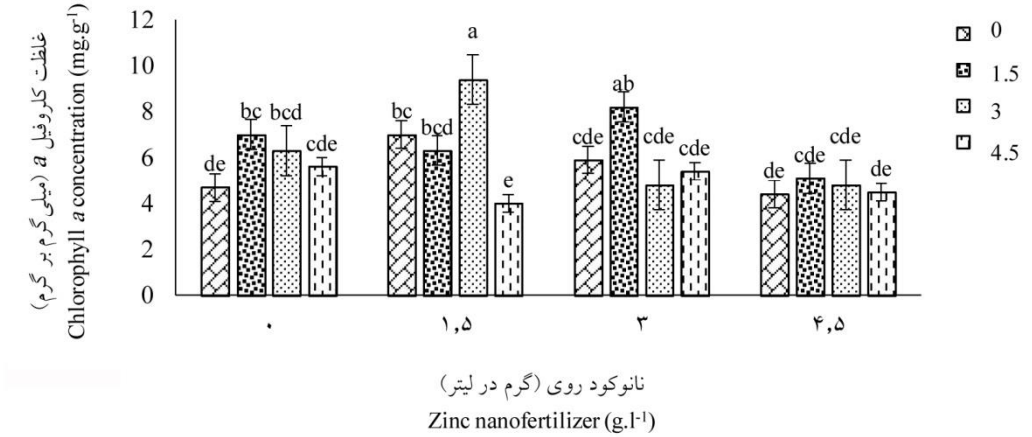
(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 3. Mean comparison of the interaction effect of zinc nanofertilizer and iron nanofertilizer on Leaf dry weight. (The means with at least one similar letter are not significantly different).

غلظت کلروفیل *a*: بیش‌ترین میزان کلروفیل a (۹/٤ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار آهن سه گرم در لیتر و روی ۱/۵ گرم در لیتر مشاهده شد. این در حالیست که تیمارهای ٤/۵ گرم در لیتر آهن و ۱/۵ گرم در لیتر روی کم‌ترین مقدار کلروفیل *a* را (٤ میلی‌گرم بر گرم) به خود اختصاص دادند (شکل ٤). در پژوهشی گزارش شده که محلول‌پاشی با آهن، روی و منگنز به تنهایی یا به‌صورت ترکیبی با یکدیگر باعث افزایش محصول گیاه پنبه می‌شود که این افزایش ناشی از افزایش مقدار کلروفیل و کاروتنویید برگ بیان گردید (۲٤). در بررسی پاسخ خصوصیات کمی و کیفی گیاه زعفران تحت‌تأثیر کاربرد کود آهن به صورت کلات معمولی و نانوکلات، مشخص شد که نانوکود کلات آهن می‌تواند تأثیر مثبتی بر افزایش کلروفیل *a* داشته باشد (۲۵). اثر نانوکود روی نیز بر رشد و عملکرد مرزه مؤثر دانسته شده و نانوکود مورد استفاده عاملی جهت افزایش میزان کلروفیل *a* تلقی گردید (۱۳).

آهن از جمله عناصر ضروری برای رشد و تولیدمثل گیاهان بوده و بنابراین برای بقای گیاهان لازم است. این عنصر در فرآیند فتوسنتز، تنفس، جذب و ساخت نیتروژن و کلروفیل در گیاهان نقش دارد. کاهش در میزان کلروفیل برگ‌های جوان به دلیل

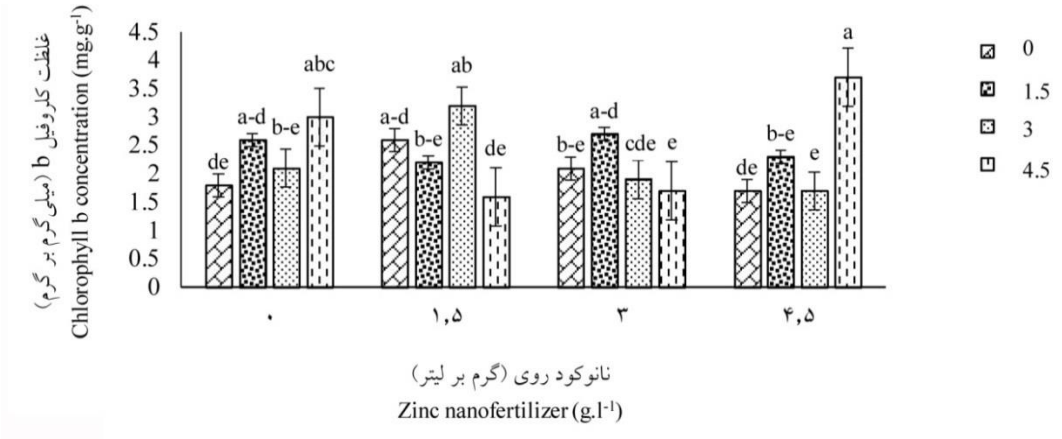
نقش آهن در ساخت کلروفیل، آشکارترین نشانه کمبود آهن است که به صورت زردی بین رگبرگی در برگ‌های جوان نمایان می‌شود (۳). هر چند وجود برخی فلزات از جمله آهن در خاک برای رشد طبیعی گیاهان ضروری است اما غلظت‌های بالای این عناصر از طریق افزایش رادیکال‌های آزاد سمی و القای تنش اکسیداتیو می‌تواند عاملی برای بازدارندگی رشد و ایجاد علائم سمیت باشد. بنابراین تعیین میزان مطلوب این عنصر از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. گیاهانی که از کمبود روی رنج می‌برند نیز اغلب در نواحی میان رگبرگ‌ها زردی نشان می‌دهند. این نواحی به رنگ سبز پریده، زرد، یا حتی سفید دیده می‌شود. روی نقش کلیدی در فتوسنتز ایفا نموده و غلظت کلروفیل و هدایت روزنه‌ای در برگ‌ها را تحت‌تأثیر قرار داده و باعث تأخیر فرایند پیری برگ‌ها می‌گردد (۲۰).



شکل ٤- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود روی و نانوکود آهن بر غلظت کلروفیل *a*.
(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 4. Mean comparison of the interaction effect of zinc nanofertilizer and iron nanofertilizer on chlorophyll *a* concentration.
(The means with at least one similar letter are not significantly different).

غلظت کلروفیل *b*: مقایسه میانگین‌ها نشان داد که گیاهان در تیمار ٤/٥ گرم در لیتر آهن و ٤/٥ گرم در لیتر روی (۳/۷ میلی‌گرم بر گرم) بیش‌ترین و در تیمار ۱/۵ گرم در لیتر روی و ٤/٥ گرم در لیتر آهن کم‌ترین مقدار کلروفیل *b* (۱/٦ میلی‌گرم بر گرم) را به خود اختصاص دادند (شکل ۵). محلول‌پاشی با کود آهن توانست باعث افزایش میزان کلروفیل برگ نعناع شود. در تیمار شاهد، تعداد رنگدانه‌های فتوسنتزکننده و مقدار کلروفیل برگ‌ها نیز کاهش یافت (٢٦). به نظر می‌رسد محلول‌پاشی با نانوکود آهن و روی با بهبود شرایط تغذیه‌ای، محتوای کلروفیل برگ را افزایش داده است. احتمالاً افزایش میزان کلروفیل به دلیل تأثیر نانوکودهای مورد استفاده در ساخت پیش‌سازهای سنتز کلروفیل می‌باشد.



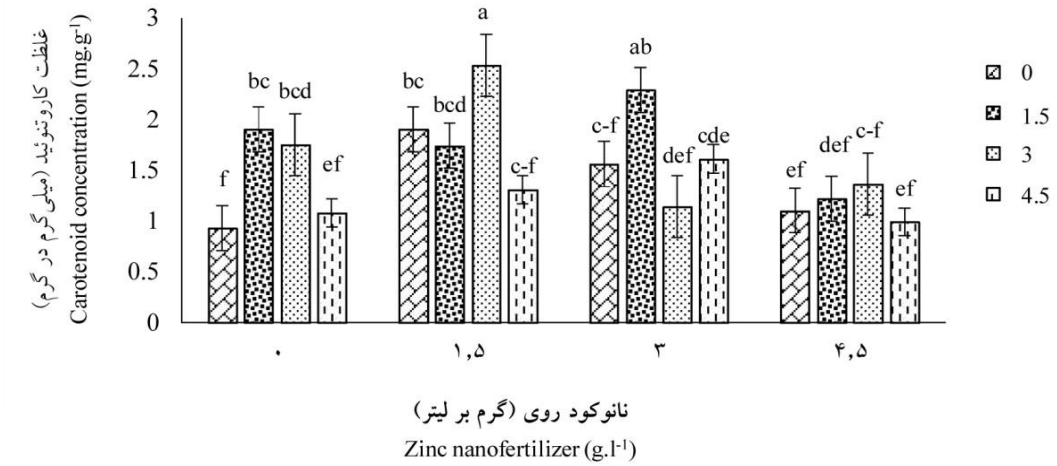
شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود روی و نانوکود آهن بر غلظت کلروفیل *b*

(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 5. Mean comparison of the interaction effect of zinc nanofertilizer and iron nanofertilizer on chlorophyll *b* concentration.
(The means with at least one similar letter are not significantly different).

غلظت کاروتنوئید: مقایسه میانگین‌ها نشان داد غلظت سه گرم در لیتر آهن و ۱/۵ گرم در لیتر روی بیش‌ترین میزان کاروتنوئید (۲/۵ میلی‌گرم در گرم) را به خود اختصاص داد؛ در حالی‌که کم‌ترین مقدار (۰/۹ میلی‌گرم در گرم) این ترکیب در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ٦). در پژوهشی مشابه، استفاده از نانوکود کلات آهن سبب افزایش میزان کاروتنوئید در گیاه زعفران گردید (۲۵). هم‌چنین کابرد نانوکود روی نیز باعث افزایش میزان کاروتنوئید در گیاه مرزه شد (۱۳). گزارش شده است که محلول‌پاشی با آهن، روی و منگنز به تنهایی یا به صورت ترکیبی با یکدیگر سبب افزایش محصول گیاه پنبه گردید که این افزایش ناشی از افزایش مقدار کلروفیل و کاروتنویید برگ بیان شده است (۲٤).

کاروتنوئیدها رنگدانه‌های کمکی هستند که در جذب و انتقال نور تأثیر دارند و حفاظت‌کننده‌های کلروفیلی در طی فرآیند اکسیداسیون نوری محسوب می‌شوند (۲۷). عناصری مانند آهن و روی برای سنتز کلروپلاست و کاروتنوئیدها لازم هستند (۲۸). کمبود آهن در گیاه می‌تواند علاوه‌بر کاهش سنتز کلروپلاست، با کاهش محسوس کاروتنوئید همراه شود؛ زیرا این رنگدانه‌ها در غشای کلروپلاست جای دارند و تحت‌تأثیر عناصر غذایی مورد نیاز قرار می‌گیرند.

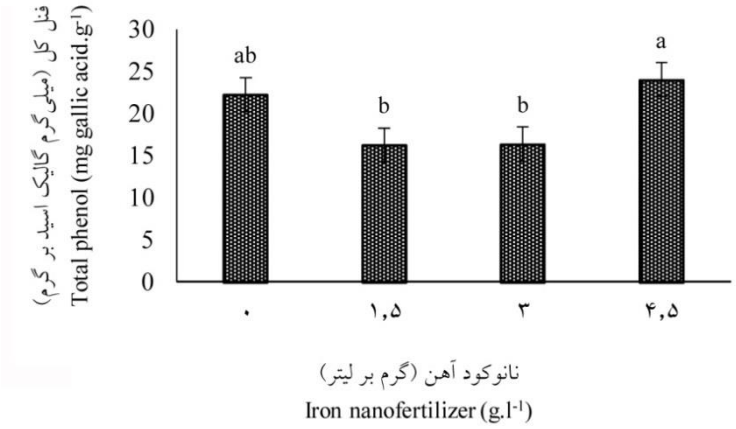


شکل ٦- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود روی و نانوکود آهن بر غلظت کاروتنوئید.

(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 6. Mean comparison of the interaction effect of zinc nanofertilizer and iron nanofertilizer on carotenoid concentration.
(The means with at least one similar letter are not significantly different).

میزان فنل کل: بیش‌ترین میزان فنل در تیمار ٤/٥ گرم در لیتر آهن به مقدار ٢٤/١ میلی‌گرم بر گرم مشاهده شد که با تیمار شاهد (٢٢/٣ میلی‌گرم اسید گالیک در گرم وزن خشک) در یک سطح آماری قرار داشت. هم‌چنین کم‌ترین میزان در تیمار ١/٥ گرم در لیتر به مقدار ١٦/٣ میلی‌گرم بر گرم مشاهده شد (شکل ٧). در پژوهشی، کاربرد سولفات روی به دو صورت خاکی و محلول‌پاشی در گیاه شاه‌اسپرم سبب افزایش محتوای فنل کل در برگ‌ها شد (٢٩). مطالعات بر روی گیاهان مانند بادرنجبویه، مریم‌گلی، شمعدانی عطری، کلم قرمز و گلرنگ نشان داده که تحت غلظت‌های بالای عناصر کم‌مصرف، فلانوئیدها، آنتوسیانین‌ها، ترکیبات فنلی و کاروتنوئیدها در گیاه تولید شده و از گیاه محافظت می‌کنند (٣٠، ٣١، ٣٢، ٣٣). منابع مورد نیاز برای متابولیسم اولیه گیاهان ارتباط تنگاتنگی با بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه در مسیرهای بیوشیمیایی داشته و افزایش رشد و نمو گیاهان همراه با بهبود کارایی فتوسنتز، عرضه متابولیت‌ها و سوبستراهای لازم برای مسیرهای متابولیسمی ثانویه را افزایش داده و منجر به تولید بهینه ترکیبات مذکور می‌گردد (٣٤).



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر ساده نانوکود آهن بر فنل کل.

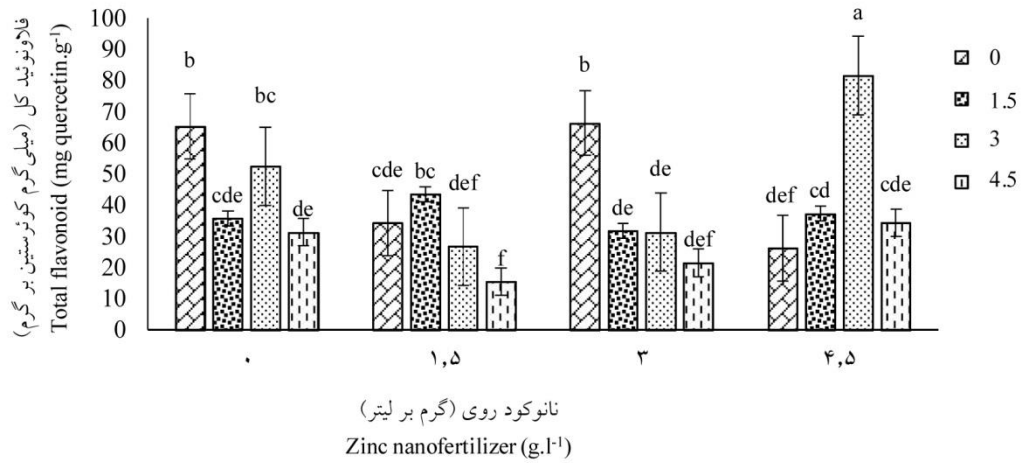
(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 7. Mean comparison of the simple effect of iron nanofertilizer on total phenol.
(The means with at least one similar letter are not significantly different).

میزان فلاونوئید کل: نتایج نشان داد اثر ساده تیمار نانوکود آهن و نانو کود روی بر میزان فلاونوئید به‌ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد؛ در حالی‌که اثر متقابل این دو تیمار در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). تیمار سه گرم در لیتر آهن و ٤/٥ گرم در لیتر روی بیش‌ترین میزان فلاونوئید (٨١/٦ میلی‌گرم کوئرستین بر گرم وزن خشک) را به خود اختصاص داد. کم‌ترین میزان این ترکیب (١٥/٥ میلی‌گرم کوئرستین بر گرم وزن خشک) نیز مربوط به تیمار ٤/٥ گرم در لیتر آهن و ١/٥ گرم در لیتر روی بود (شکل ٨).

فلاونوئیدها، متابولیت‌های ثانویه‌ای هستند که به‌دلیل ایجاد مکانیسم دفاعی، گیاهان را در برابر اشعه ماوراءبنفش و عوامل بیماری‌زا و گیاه‌خواران محافظت می‌کنند. هم‌چنین دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی بوده و در تنظیم فعالیت‌های آنزیمی و تولید متابولیت‌های اولیه نقش دارند (٣٥). به‌طورکلی فلاونوئیدها از جمله اجزای غیرآنزیمی گیاهان برای کاستن آسیب‌های ناشی از گونه‌های اکسیژن فعال محسوب می‌شوند. استفاده از عناصر ریزمغذی مانند آهن و روی به‌ویژه به فرم نانو سبب فعال شدن آنزیم‌هایی مانند کاتالاز، پراکسیداز و غیره می‌شود که در نتیجه آن، میزان فلاونوئیدها و مهارکنندگی رادیکال‌های آزاد نیز افزایش خواهد یافت (٣٦).

در پژوهش حاضر، محلول‌پاشی نانوکلات آهن باعث افزایش میزان فلاونوئید شد. ولی با افزایش مقادیر مصرف در سطوح بالاتر این عنصر، مجدداً میزان فلاونوئید کاهش یافت. کاربرد این عناصر غذایی در گیاه بادرشبو نیز نتایج مشابهی را نشان داد (٣٧). پژوهش‌گران گزارش کردند در گیاه دارویی بادرنجبویه محلول‌پاشی آهن اثر مثبتی بر افزایش رزمارینیک اسید (نوعی فلاونوئید) داشت (٣٣). در بررسی دیگری کاربرد مقادیر زیاد کلات آهن، میزان فلاونوئیدها را در مقایسه با مقادیر کم‌تر در گیاه گلرنگ کاهش داد. به‌نظر می‌رسد تعیین سطح مطلوب آهن نقش مهمی در افزایش یا کاهش فلاونوئید در گیاهان دارد (٣١).



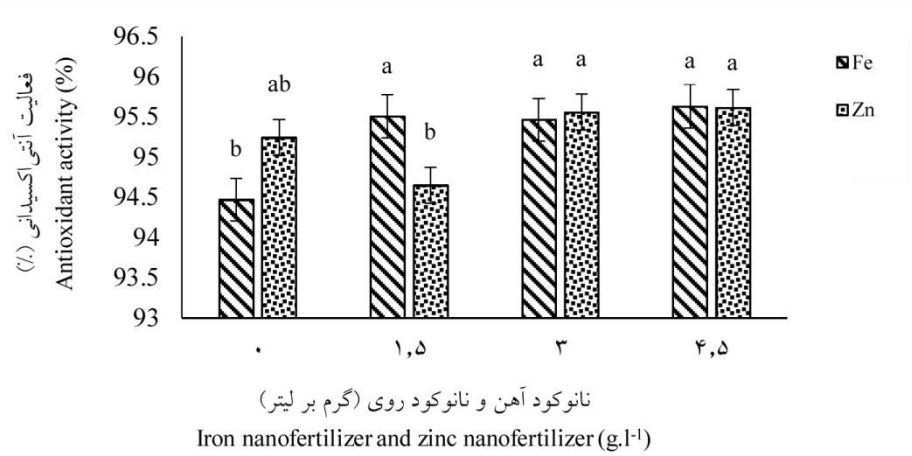
شکل ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل نانوکود روی و نانوکود آهن بر فلاونوئید کل.

(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Fig. 8. Mean comparison of the interaction effect of zinc nanofertilizer and iron nanofertilizer on total flavonoid.
(The means with at least one similar letter are not significantly different).

درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی: مقایسه میانگین‌ها نشان داد غلظت ٤/٥ گرم در لیتر آهن بیش‌ترین میزان فعالیت آنتی‌اکسیدانی را به میزان (٩٥/٦٣ درصد) خود اختصاص داد. در حالی‌که کم‌ترین مقدار فعالیت در تیمار شاهد (٩٤/٤٧ درصد) مشاهده شد (شکل ٩). مطالعات بر روی گیاهان مانند بادرنجبویه، مریم‌گلی، شمعدانی عطری، کلم قرمز و گلرنگ نشان داده که تحت غلظت‌های بالای عناصر کم‌مصرف، فلانوئیدها، آنتوسیانین‌ها، ترکیبات فنلی و کاروتنوئیدها در گیاه تولید شده و از گیاه محافظت می‌کنند (۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳).

گیاهان برای کاستن از آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن دارای سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی هستند که شامل اجزای غیرآنزیمی مانند آسکوربات، گلوتاتیون، توکوفرول‌ها، کاروتنوئیدها و فلاونوئیدها و آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT)، پراکسیداز (POX)، آسکوربات پراکسیداز (APX)، گلوتاتیون ردوکتاز (GR) و پلی‌فنل اکسیداز (PPO) هستند (٣٦). فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نقش مهمی را در پاکسازی گونه‌های اکسیژن فعال ایفا می‌کنند. آنزیم‌های کاتالاز، پراکسیداز و آسکوربات پراکسیداز، از مهم‌ترین آنزیم‌های خنثی‌کننده پراکسید هیدروژن در گیاهان هستند. زیرا آن‌ها حاوی آهن بوده و احتمالاً فعالیت‌شان تحت‌تأثیر کمبود آهن قرار می‌گیرد (۳۸). بنابراین استفاده از مقادیر مناسب آهن سبب افزایش فعالیت این آنزیم شده و در نتیجه درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۹- مقایسه میانگین اثر ساده نانوکود آهن و نانوکود روی بر فعالیت آنتی‌اکسیدانی.
(میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، تفاوت معنی‌داری با هم ندارند).

Figure 9. Mean comparison of the simple effect of iron nanofertilizer and zinc nanofertilizer on antioxidant activity.
(The means with at least one similar letter are not significantly different).

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش نشان داد که تمامی صفات مورد مطالعه تحت‌تأثیر تیمارهای کودی افزایش نشان دادند. به‌طوری‌که بیش‌ترین ارتفاع بوته در اثر کاربرد ٤/٥ گرم در لیتر نانو کود آهن به‌دست آمد. هم‌چنین استفاده از تیمار ١/٥ گرم در لیتر نانوکو آهن و سه گرم در لیتر نانوکود روی، سبب افزایش تعداد فندقه در بوته (٥٩٣/٣) و غلظت کاروتنوئید (٢/٥ میلی‌گرم در گرم) در این گیاه گردید. بالاترین میزان وزن خشک برگ (٣/٧ گرم در بوته) و غلظت کلروفیل b نیز در اثر مصرف ٤/٥ گرم در لیتر نانوکود آهن و ٤/٥ گرم در لیتر نانوکود روی حاصل شد. غلظت کلروفیل a نیز در اثر کاربرد ٣ گرم در لیتر نانوکود آهن و ١/٥ گرم در لیتر نانوکود روی افزایش یافت. استفاده از نانوکود آهن به میزان ٤/٥ گرم در لیتر سبب بهبود تولید فنل کل به میزان ٢٤/١ میلی‌گرم در گرم و درصد فعالیت آنتی‌اکسیدانی شد. هم‌چنین استفاده از ٤/٥ گرم در لیتر نانوکود آهن و سه گرم در لیتر نانوکود روی نیز سبب افزایش میزان فلاونوئید کل (٨١/٦٣ میلی‌گرم بر گرم) در گیاه بالنگو گردید. به‌طورکلی در این پژوهش با افزایش میزان نانوکود آهن و نانوکود روی از صفر به ٤/٥ گرم در لیتر، تمامی صفات کمی و کیفی گیاه بالنگو نیز به میزان قابل‌توجهی افزایش یافت. بنابراین با استفاده از مقادیر مناسب نانوکودهای آهن و روی علاوه بر کاهش مصرف کود و کاهش آلودگی محیط زیست، می‌توان سبب بهبود خصوصیات کمی و کیفی گیاه دارویی بالنگو شود.

منابع

1. Naghibi, F., Mosaddegh, M., Mohammadi Motamed, S. & Gorbani, A. (2005). Labiatae family in folk medicine in Iran: from etnobotany to pharmacology. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 2, 63-79.
2. Omidbaigi, R. (2013). Production and Processing of Medicinal Plants. Mashhad, Iran, *Astan Guds Razavi Press*, 424p. [In Persian]
3. Kholdbarin, B. & Eslamzadeh, T. (2005). Mineral Nutrition of Higher Plants. Shiraz, Iran, *Shiraz University. Press*, 500p. [In Persian]
4. Rezaei, R., Hosseini, S. M., Shabanali, H. & Safa, L. (2009). Identification and analysis of barriers to nanotechnology development in Iran's agricultural sector from viewpoint of researchers. *Journal of Science and Technology Policy Management*, 2, 17-26. [In Persian]
5. Jokar, L., Ronaghi, A., Karimian, N. & Ghasemi-Fasaei, R. (2015). Effect of different Fe levels from Fe-nano-chelate and Fe-EDDHA sources on growth and some nutrients concentrations in cowpea in a calcareous soil. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 6, 9-19. [In Persian]
6. Bayati, F., Aynehband, B. & Fateh, A. (2014). Effect of different rates and application times of nano-iron on yield and yield components of canola (*Brassica napus* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research*, 12, 805-812. [In Persian]
7. Vaziri-Amjadi, Z. & Sepehri, A. (2013). Effect of iron and zinc nanofertilizer on yield of chicory leaves and root under different plant densities. *The 1st Electronic Conference on New Findings in the Environment and Agricultural Ecosystems*, Tehran, Iran. [In Persian]
8. Alizadeh, N., Majd, A., Mahmoudzadeh, H. & Jonoubi, P. (2015). The effect of zinc oxide nanoparticles on some biochemical properties of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *The 2nd National Conference on Medicinal Plants, Traditional Medicine and Organic Farming*, Hamedan, Iran. [In Persian]
9. Porra, R. J. (2002). The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophyllus *a* and *b*. *Photosynthesis Research*, 73, 149-156.
10. McDonald, S., Prenzler, P.D., Antolovich, M. & Robards, K. (2001). Phenolic content and antioxidant activity of olive extracts. *Food Chemistry*, 73, 73-84.
11. Ebrahimzadeh, M. A., Hosseinimehr, S. J., Hamidinia, A. & Jafari, M. (2010). Antioxidant and free radical scavenging activity of *Feijoa sallowiana* fruits peel and leaves. *Pharmacologyonline*, 1, 7-14.
12. Mafakheri, S., Asghari, B. & Shaltooki, M. (2016). Effect of biological and nano-fertilizers on quantitative and qualitative characteristics of *Lallemantia iberica* (M.B.) Fischer & Meyer. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 32, 667-677. [In Persian]
13. Najafi-Vafa, Z., Sirous-Mehr, A. R., Ghanbari, A. & Khamari, A. (2014). Effect of different levels of nano-zinc chelate and humic acid on growth and aerial organ of *Satureja hortensis*. *The 2nd Agricultural and Sustainable Natural Resources Conference*, Tehran, Iran. [In Persian]
14. Sharafaldin Shirazi, Sh. & Fazeli, F. (2015). Effect of nano iron chelate fertilizer and iron fertilizer on yield and yield components of Daenian thyme (*Thymus daenensis* Celak). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 31, 374-382. [In Persian]
15. Pandey, A. C., Sanjay, S. S. & Yadav, R. S. (2010). Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience*, 5, 488-497.
16. Salar-Dini, A. A. (1992). Soil Fertility. *Tehran University Press*, Tehran, Iran, 434p. (In Persian)
17. Moghadam, E., Mahmoodi Sourestani, M., Farrokhian Firozi, A., Ramazani, Z. & Eskandari, F. (2015). The effect of foliar application of iron chelate type on morphological traits and essential oil

content of holy basil. *Journal of Crop Improvement*, 17, 595-606. [In Persian]
18. Pishva, Z., Amini, M. & Talei, D. (2012). Effects of nano-iron fertilizer on quantitative and qualitative yield, germination and seed vigor of *Lallementia royeana* L. at different irrigation periods. M.Sc. thesis, *Shahed University*, Iran. [In Persian]
19. Varnaseri-Ghandali, V. & Nasiri-Dehsorkhi, A. (2017). Investigation of foliar application of zinc and iron elements in nano form on growth and yield of cowpea under water deficit stress. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology*, 4, 109-136. [In Persian]
20. Suh, H., Kim, C. H., Lee, J. & Jung, J. (2002). Photodynamic effect of iron on photosystem II function in pea plants. *Photochemistry and Photobiology*, 75, 513-518.
21. Naderi, M. R. & Danesh-Shahraki, A. (2013). Nanofertilizers and their role in sustainable agriculture. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5, 2229-2232.
22. Kouchaki, A. & Sarmadnia, Gh. (2013). Crops Physiology. Mashhad, Iran, *Mashhad University Press*. 400p. [In Persian]
23. Ali-Sadr, R., Manavi-Amri, S., Niknezhad, Y., Fallah-Amoli, F. & Sadati, Z. (2015). The effect of using Zn, Fe and organic fertilizers on the quantitative properties of Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni). *The 4th Agricultural and Sustainable Natural Resources Conference*, Tehran, Iran. [In Persian]
24. Noori-Hosseini, S. M. (2005). Effect of foliar application and soil consumption of Fe and Zn on yield and yield components of Cotton. *The 9th Iranian Soil Science Congress*, Tehran, Iran. [In Persian]
25. Maleki-Farahani, S. & Aghighi-Shahverdi, M. (2015). Evaluation the effect of nano-iron fertilizer in compare to iron chelate fertilizer on qualitative and quantitative yield of saffron (*Crocus sativus* L.). *Agricultural Crop Managemen*t, 17, 155-168. [In Persian]
26. Mohammadi, M., Majnoun-Hosseini, N., Dashtaki, M. & Sheikh-Beglou, R. (2010). Investigation of nano-iron-oxide and zinc sulfate spraying on the amount of chloroplast pigments of Peppermint (*Mentha piperita* L.) in field conditions. *National Conference on Medicinal Plants*, Sari, Iran. [In Persian]
27. Akbarian, M. M., Heidari Sharifabad, H., Noormohammadi, G. & Darvish Kojouri, F. (2012). The effect of potassium, zinc and iron foliar application on the production of saffron (*Crocus sativa*). *Annals of biological research*, 3, 5651-5658.
28. Shamloo, A. & Roozbahani, A. (2016). Effect of amino acids and microelements on the rate of photosynthetic pigments content and yield of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Ecophysiology*, 7, 136-150.
29. Derakhshani, Z., Hasani, A. & Rasouli-Sedghiani, H. (2010). The effect of Zn nutrition on growth parameters of Costmary under different irrigation. *The 4th Regional Conference on Agricultural Research Findings*. Kurdestan, Iran. [In Persian]
30. Dastmalchi, K., Dorman, H. G., Kosar, M. & Hiltunen, R. (2007). Chemical composition and in vitro antioxidant evaluation of a water soluble Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) extract. *The Journal of Food Science and Technology*, 240, 239-248.
31. Ghorbanpour, M. (2015). Major essential oil constituents, total phenolics and flavonoids content and antioxidant activity of *Salvia officinalis* plant in response to nano-titanium dioxide. *Indian journal of plant physiology*, 20, 249-256.
32. Ghorbanpour, M. & Hatami, M. (2015). Changes in growth, antioxidant defense system and major essential oils constituents of *Pelargonium graveolens* plant exposed to nano-scale silver and thidiazuron. *Indian journal of plant physiology*, 20, 116-123.
33. Posmyk, M. M., Kontek, R. & Janas, K. M. (2009). Antioxidant enzymes activity and phenolic compounds

content in red cabbage seedlings exposed to copper stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 596-602.

34. Vojodi-Mehrabani, L., Valizadeh-Kamran, R. and Hassanpour-Aghdam, M. B. (2017). The effect of relative substitution of organ fertilizers on elements content, some physiological traits and yield of *Lepidium sativum* L. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 27, 63-72. [In Persian]
35. Kalinova, J. & Vrchotova, N. (2011). The influence of organic and conventional crop management, variety and year on the yield and flavonoid level in common buckwheat groats. *Food Chemistry*. 127, 602-608.
36. Agarwal, S. & Pandey, V. (2004). Antioxidant enzyme resposes to NaCl stress in *Cassia angustifolia*. *Biologia Plantarum*. 48, 555-560.
37. Yousefzadeh, S., Naghdibadi, H., Sabbaghnia, N. & Janmohammadi, M. (2016). The effect of foliar application of nano-iron chelate on physiological and chemical traits of dragonhead (*Deracocephalum moldavica* L.). *Journal of Medicinal Plants*, 15, 152-160. [In Persian]
38. Sun, B., Jing, Y., Chen, K., Song, L., Chen, F. & Zhang, L. (2007). Protective effect of nitric oxide on iron deficiency-induced oxidative stress in maize (*Zea mays*). *Journal of Plant Physiology*, 164, 536-543.