



Investigating the effect of vermicompost on the morpho-physiological characteristics of the dragon's head (*Lallemantia iberica* L.) plant under arsenic stress

Parastoo Shokati¹ | Yousef Sohrabi^{2,5} | Teimour Javadi^{3,5} | Behrooz Sarabi^{4,5}

1. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: parasto.shokatiuok@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: y.sohrabi@uok.ac.ir
3. Department of Horticultural Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: T.javadi@uok.ac.ir
4. Department of Horticultural Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: b.sarabi@uok.ac.ir
5. Research Center of Medicinal Plants Breeding and Development, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 17 February 2025
Received in revised form
17 July 2025
Accepted 2 September 2025
Published online 29 September 2025

Keywords:

Arsenic
Dragon's head
Elements
Membrane stability index
Vermicompost

ABSTRACT

Objective: The excessive use of chemical fertilizers and agricultural pesticides has led to the accumulation of heavy metals in the soil, raising significant environmental concerns. Consequently, the adoption of biocompatible fertilizers to mitigate these risks is essential, particularly in low-yielding soils contaminated with heavy metals. Therefore, the present study aimed to investigate vermicompost's effect on alleviating arsenic's negative impacts on the morpho-physiological characteristics, yield and elemental content of the dragon's head. Therefore, the present experiment was designed and conducted to investigate the effects of vermicompost application in mitigating the adverse effects of arsenic on the growth and physiological traits of the medicinal plant *Lallemantia iberica* (dragon's head).

Methods: This pot experiment was conducted during the 2023–2024 growing season in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, University of Kurdistan. The study was arranged as a factorial based on a completely randomized design with three replications. The treatments included two levels of arsenic (0 and 25 mg/kg soil) and four levels of vermicompost (0, 5, 10, and 15% of soil weight). Sodium arsenate salt (NaH_2AsO_4) was employed to contaminate the growing medium. Morpho-physiological and biochemical traits, including stem and root length, shoot dry weight, chlorophyll and carotenoid content, membrane stability index, proline and soluble protein content, peroxidase enzyme activity, as well as macro- and micronutrient concentrations, were evaluated at the flowering stage.

Results: The results of the variance analysis of traits indicated the significant effect of different concentrations of vermicompost and arsenic application on most of the examined traits. The findings indicated that increasing arsenic levels in the soil, negatively affected growth characteristics (stem length 35%, root length 103% and plant dry weight 39%), photosynthetic pigment content (chlorophyll a 33%, chlorophyll b 40% and carotenoids 51%), and membrane stability index (23%), while proline content (33%), peroxidase enzyme activity (37%), and the concentrations of copper (36%), nitrogen (25%), and zinc (3%) increased. Application of vermicompost, particularly at a concentration of 15% by soil weight, significantly improved growth parameters (Stem length 47%, root length 86% and plant dry weight 12%). It also enhanced photosynthetic pigment levels (total chlorophyll 87%, chlorophyll b 65% and carotenoid content 67%), increased soluble protein content by 40%, and promoted nutrient uptake by the plants under both arsenic stress and control conditions.

Conclusion: Vermicompost (up to 15% of soil weight) reduces the negative arsenic application (concentration of 25 mg/kg soil) by improving the physicochemical conditions of the soil, improving its preservation and providing nutrients to the plant. The results also showed that, while in arsenic-contaminated soil, the plant has high arsenic absorption, but the application of vermicompost in the soil improves the growth and development of dragon's head plant by increasing the absorption of other mineral elements compared to arsenic and reducing its toxicity in the plant.

Cite this article: Shokati, P., Sohrabi, Y., Javadi, T., & Sarabi, B. (2025). Investigating the effect of vermicompost on the morpho-physiological characteristics of the dragon's head (*Lallemantia iberica* L.) plant under arsenic stress. *Journal of Crops Improvement*, 27 (3), 563-590. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.390133.2920>





بررسی تأثیر ورمی کمپوست بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه بالنگو شهری (*Lallemantia iberica* L.) تحت تنش آرسنیک

پرستو شوکتی^۱ | یوسف سهرابی^۲ و^۳ | تیمور جوادی^۳ | بهروز سرابی^۴ و^۵

۱. گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: parasto.shokatiuok@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: y.sohrabi@uok.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: T.javadi@uok.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: b.sarabi@uok.ac.ir

۵. مرکز پژوهشی اصلاح و توسعه گیاهان دارویی، دانشگاه کردستان، سنندج، کردستان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

هدف: با توجه به مصرف بیش از حد کودهای شیمیایی و سموم کشاورزی، تجمع فلزات سنگین در خاک به مسئله نگران‌کننده‌ای تبدیل شده است. از این‌رو، مصرف کودهای آلی سازگار به‌منظور تقلیل این خطرات محیطی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد. لذا آزمایش حاضر با هدف بررسی میزان تأثیر کاربرد کود آلی ورمی کمپوست در کاهش اثرات منفی آرسنیک بر رشد و خصوصیات فیزیولوژیک گیاه دارویی بالنگوی شهری طراحی و اجرا شد. **روش پژوهش:** این آزمایش به‌صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان در سال‌های زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ اجرا گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل آرسنیک (صفر و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و ورمی کمپوست (صفر، پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی خاک) بودند. به‌منظور آلوده‌سازی خاک به آرسنیک، از نمک آرسنات سدیم (NaH_2AsO_4) استفاده شد. بررسی برخی صفات مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی (ازجمله طول ساقه و ریشه، وزن خشک بوته، محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها، شاخص پایداری غشا، محتوای پروتئین و پروتئین‌های محلول، فعالیت آنزیم پراکسیداز، عناصر ماکرو و میکرو) در مرحله گلدهی انجام گرفت.

یافته‌ها: براساس نتایج آزمایش حاضر، آرسنیک موجب کاهش رشد گیاه (طول ساقه ۳۵ درصد طول ریشه ۱۰۳ درصد و وزن خشک بوته ۳۹ درصد)، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a، ۳۳ درصد، کلروفیل b، ۴۰ درصد و کاروتنوئیدها ۵۱ درصد و پایداری غشای سلولی (۳۳ درصد) در مقایسه با شاهد گردید، درحالی‌که میزان پروتئین (۳۳ درصد)، فعالیت آنزیم پراکسیداز (۳۷ درصد) و محتوای عناصر مس (۳۶ درصد)، نیتروژن (۲۵ درصد) و روی (۳ درصد) در گیاه افزایش یافت. کاربرد ورمی کمپوست و افزایش میزان مصرف آن تا غلظت ۱۵ درصد وزنی خاک، موجب بهبود خصوصیات رشدی (طول ساقه ۴۷ درصد، طول ریشه ۸۶ درصد و وزن خشک بوته ۱۲۲ درصد)، افزایش محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل کل ۸۷ درصد، کلروفیل b ۶۵ درصد و کاروتنوئیدها ۶۷ درصد)، محتوای پروتئین‌های محلول (۴۰ درصد) و جذب عناصر غذایی توسط گیاه در شرایط تنش آرسنیک و شاهد گردید. **نتیجه‌گیری:** کاربرد ورمی کمپوست (تا غلظت ۱۵ درصد وزنی خاک) توانست اثرات منفی آرسنیک (غلظت ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) را از طریق بهبود شرایط فیزیوکوشیمیایی خاک، بهبود نگهداری آب و در اختیار قراردادن آهسته عناصر غذایی برای گیاه، تقلیل بخشد. همچنین نتایج نشان داد که اگرچه در خاک آلوده به آرسنیک، گیاه جذب آرسنیک بالایی داشت، اما کاربرد ورمی کمپوست در خاک به‌واسطه افزایش جذب سایر عناصر معدنی نسبت به آرسنیک و کاهش اثر سمیت آن در گیاه، توانست رشدونمو گیاه بالنگو شهری را بهبود دهد.

کلیدواژه‌ها:

آرسنیک

بالنگو شهری

شاخص پایداری غشا

عناصر

ورمی کمپوست

استناد: شوکتی، پرستو؛ سهرابی، یوسف؛ جوادی، تیمور و سرابی، بهروز (۱۴۰۴). بررسی تأثیر ورمی کمپوست بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه بالنگو شهری (*Lallemantia iberica* L.) تحت تنش آرسنیک. به‌زراعی کشاورزی، ۲۷ (۳)، ۵۹۰-۵۶۳.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.390133.2920>



۱. مقدمه

استفاده روزافزون از گیاهان دارویی و فرآورده‌های دارویی حاصل از آن‌ها نقش این گیاهان را در چرخه اقتصادی جهانی بسیار پررنگ کرده است، به طوری که مصرف رو به افزایش آن‌ها به کشورهای در حال توسعه محدود نبوده و در کشورهای پیشرفته نیز توسعه فراوانی یافته است. صرف نظر از ارزش اقتصادی گیاهان دارویی، این گیاهان قابل تطبیق با روش‌های کشت ارگانیک هستند که تمایل تولیدکننده‌ها و مصرف کنندگان را به همراه دارد (احمدی^۱ و امیدي^۲، ۲۰۱۸؛ آراکون^۳ و همکاران، ۲۰۰۳).

بالنگو شهری^۴ با نام انگلیسی *Lallemantia* یا *Dragon's Head*، گیاهی دارویی متعلق به خانواده نعنائیان^۵ است که دارای خواص دارویی قابل توجه است و منبع سرشار از روغن، فیبر و پروتئین می‌باشد. موسیلاژ حاصل از بالنگو شهری برای ناراحتی‌های گوارشی مؤثر است و در درمان بیماری‌های کبدی، کلیوی و عصبی استفاده می‌شود (رشید^۶ و همکاران، ۲۰۱۹؛ فتاحی^۷ و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر خواص درمانی، از این گیاه در صنایع داروسازی، عطرسازی، فرآورده‌های آرایشی-بهداشتی و نیز از روغن آن به عنوان جلادهنده در صنایع رنگ‌سازی و صنایع چوب استفاده می‌شود (کوهدار^۸ و همکاران، ۲۰۱۵). بالنگو شهری گیاهی علفی یک‌ساله با نیاز زراعی پایین (نیازمند آب، کود و مراقبت کم) و سازگار با مناطق مختلف کشورهای اروپایی، خاورمیانه و به ویژه ایران است (عبداللهی^۹ و مالکی فراهانی^{۱۰}، ۲۰۱۹). امروزه یکی از مسائل زیست‌محیطی، آلوده شدن منابع آب، خاک و گیاهان با فلزات سنگین نظیر آرسنیک می‌باشد (اصغری پور^{۱۱} و بیژنی^{۱۲}، ۲۰۱۶). اگرچه آلودگی آرسنیک بیش‌تر متعلق به کشورهای جنوب شرقی آسیا می‌باشد، اما در مناطقی از ایران نیز آلودگی منابع خاک و آب به این آلاینده گزارش شده است (حیدرپور^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۷). از بین ۳۱ استان کشور، در ۱۳ استان آلودگی به آرسنیک گزارش شده و نه استان آلوده به آرسنیک بر روی کمر بند آتش‌فشانی ارومیه- دختر واقع شده‌اند که یک سازند زمین‌شناسی مس پورفیری حاوی فلزات سنگین به ویژه آرسنیک است (خادم مقدم ایگده‌لو^{۱۴} و گلچین^{۱۵}، ۲۰۱۹). آرسنیک یکی از آلاینده‌های سمی محیط است و موجودات زنده بی‌شماری در جهان در معرض خطر آن قرار دارند و به دلیل ماندگاری بالایی که در خاک دارد یکی از خطرناک‌ترین فلزات سنگین می‌باشد و از عناصر غیر ضروری و نامحلول در آب می‌باشد (اسدی کرام^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۷). فعالیت‌های انسانی و صنعتی، استفاده از کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات به افزایش روز افزون آرسنیک در خاک و انباشت آن‌ها در گیاهان منجر شده که رشد آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ساندپ^{۱۷} و همکاران، ۲۰۱۹؛ چائو^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۸). آلودگی ناشی از آرسنیک

1. Ahmadi
2. Omid
3. Arancon
4. *Lallemantia iberica* L.
5. *Lamiaceae*
6. Rashid
7. Fattahi
8. Koohdar
9. Abdollahi
10. Maleki Farahani
11. Asgharipour
12. Bijeni
13. Haydarpoor
14. Khadem Moghadam Igdelou
15. Golchin
16. Asadi Karam
17. Sandeep
18. Chaoua

در مناطق آلوده اغلب به حضور غلظت‌های بالای آرسنیک در آب‌های زیرزمینی مرتبط است. این آب‌های آلوده به آرسنیک نه تنها برای آشامیدن و اهداف خانگی بلکه برای آبیاری محصولات کشاورزی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. آرسنیک موجود در خاک و آب‌های زیرزمینی مناطق تحت کاشت، در گیاهان تجمع یافته و آن‌ها را آلوده می‌سازد که این آلودگی در گیاهان مختلف گزارش شده است (داس^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ لی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). جذب آرسنیک در حالت معمول در گیاهان به شکل‌های سه ظرفیتی^۳ و پنج ظرفیتی^۴ می‌باشد (عمر^۵ و همکاران، ۲۰۲۲)، وجود آرسنیک جذب فسفر توسط گیاه را کاهش می‌دهد و با اثر متقابل با گروه‌های سولفیدریل، باعث اختلال در تولید انرژی سلولی می‌گردد (اسدی کرام و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین با کاهش برخی از آنزیم‌های حیاتی مانند گلوتامین سینتتاز، گلوتامات سینتتاز و نیترات ردوکتاز، باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال یا رادیکال‌های آزاد اکسیژن می‌شود. افزایش بیش از حد رادیکال‌های آزاد سبب تخریب اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدهای غشای سلولی و در نتیجه، تغییر فعالیت غشای سلولی و در نهایت توقف رشد گیاه می‌شوند (حیدری^۶ و همکاران، ۲۰۱۵).

از آنجاکه مدیریت خاک از عوامل اصلی در رسیدن به کشاورزی پایدار محسوب می‌گردد، لذا جایگزینی تدریجی کودهای شیمیایی به‌ویژه کودهای نیتروژنی با کودهای آلی، بشر را در دستیابی به این هدف و تولید پایدار محصولات کشاورزی یاری می‌کند. آشنایی با بهترین شیوه کوددهی (کاربرد کودهای شیمیایی یا آلی)، یکی از عوامل مهم دستیابی به موفقیت در کشت گیاهان مختلف از جمله بالنگو شهری است (کریمی‌جلیلوندی^۷ و همکاران، ۲۰۱۷). مصرف کود آلی بدون نگرانی از اثرات سوء زیست‌محیطی غالباً موجب بهبود شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌ها شده و حاصلخیزی خاک را افزایش می‌دهد. استفاده از کودهای آلی و بیولوژیک نه تنها مقدار مصرف کودهای شیمیایی را کاهش می‌دهد بلکه به ذخیره انرژی و کاهش آلودگی محیط زیست نیز کمک خواهد کرد و باعث افزایش کیفیت و پایداری عملکرد به‌ویژه در تولید گیاهان دارویی خواهد شد (براتی‌رشوانلو^۸، ۲۰۱۳). همچنین مواد ساده و قابل‌دسترسی که کودهای آلی در خاک قرار می‌دهند باعث تحریک فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی خاک می‌گردند (یان^۹ و همکاران، ۲۰۲۰؛ سرور^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷).

ورمی‌کمپوست منبعی غنی از میکروارگانیسم‌های مفید و مواد مغذی است که به‌عنوان کود یا جهت اصلاح ساختمان خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کود آلی از نظر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، ریزمغذی‌ها و میکروب‌های مفید خاک (باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و حل‌کننده فسفات‌های نامحلول و اکتینومیسیت‌ها)، یک محرک رشد و محافظ عالی برای گیاهان زراعی است (بوردونی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۸؛ پرامانیک^{۱۲} و چانگ^{۱۳}، ۲۰۱۱). تهیه ورمی‌کمپوست فرایندی است که در آن کرم‌های خاکی بقایای آلی را به کمپوست تبدیل می‌کنند که می‌تواند به‌عنوان بستی برای رشد گیاهان

1. Das
2. Li
3. AsIII
4. AsIV
5. Omer
6. Heidari
7. Karimi Jalilehvandi
8. Barati Rashvanloo
9. Yan
10. Sarwar
11. Bordoloi
12. Pramanik
13. Chung

استفاده شود (بلوین^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعات زیادی اثر ورمی کمپوست را بر رشد گیاهان ارزیابی و نتایج متفاوتی ارائه کرده‌اند. استفاده از ورمی کمپوست در کشاورزی پایدار، علاوه بر افزایش حمایت و فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید خاک، در جهت فراهمی عناصر غذایی موردنیاز گیاه مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز عمل نموده و سبب بهبود رشد و عملکرد گیاه زراعی می‌شود (میترا^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). ورمی کمپوست حاصلخیزی خاک را با تأمین مواد مغذی ضروری گیاه، بهبود ساختار خاک و ارتقای فعالیت میکروبی آن افزایش می‌دهد که می‌تواند به پویایی و ممانعت از تخریب خاک پس از برداشت محصول کمک کند. علاوه بر این، گزارش شده است که ورمی کمپوست می‌تواند فلزات سنگین از جمله آرسنیک را از خاک جذب کند و سطح آرسنیک را در خاک کاهش دهد (سنگپتا^۳ و همکاران، ۲۰۲۳).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاربرد گیاهان دارویی روز به روز در حال افزایش بوده و افزایش کمیت و کیفیت تولید این گیاهان امری ضروری است. از سوی دیگر، کاربرد بیش از حد سموم و کودهای شیمیایی به‌منظور افزایش بهره‌وری، افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی را در پی داشته است. علاوه بر این، افزایش استفاده از داروهای گیاهی و اهمیت اقتصادی گیاهان دارویی، توجه به راه‌کارهای افزایش تولید این گیاهان را در خاک‌های با بهره‌وری کم از جمله خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بیش از پیش آشکار ساخته است. لذا استفاده از کودهای زیست‌سازگار مانند ورمی کمپوست به‌دلیل اثرات مثبت بر خاک و جذب آب بیشتر و قراردادن عناصر غذایی بیش‌تر در اختیار گیاه و افزایش توان رویارویی گیاه با شرایط نامساعد محیطی مانند حضور فلزات سنگین در خاک، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد. پژوهش حاضر با هدف بررسی میزان تأثیر کاربرد کود ورمی کمپوست در تعدیل اثرات منفی تنش آرسنیک بر خصوصیات فیزیولوژیکی و در نهایت، رشد گیاه دارویی بالنگو شهری انجام شد.

۲. پیشینه پژوهش

سان^۴ و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی اثر آرسنیک بر گیاه علف‌بوری^۵ به این نتیجه رسیدند که قرار گرفتن گیاه در معرض آرسنیک، ناقل فسفات که مسئول جذب فسفات و آرسنیک است را به میزان بیش‌تری فعال می‌کند، همچنین مشخص گردید که آرسنیک اثرات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی متعددی بر گیاهان دارد و گیاهان با افزایش تولید آنزیم‌های ضد اکسایشی مانند سوپراکسید دیسموتاز^۶، آسکوربات پراکسیداز^۷ و یا پراکسیداز^۸ به تنش اکسایشی پاسخ می‌دهند. شابیر^۹ و همکاران (۲۰۲۱) نیز در پژوهشی نشان دادند که آرسنیک به‌طور قابل‌توجهی تنش اکسایشی را تشدید می‌کند و در نتیجه، موجب آسیب‌های قابل‌توجهی به ساختارهای غشایی می‌شود و مرگ سلولی را به‌دنبال دارد. اثرات فلزات سنگین از جمله آرسنیک بر عملکرد و فیزیولوژی گیاه شامل تخریب ساختار واکوئل، از بین رفتن دیواره‌های سلولی، کاهش توسعه و فعالیت میتوکندری، تأثیر منفی بر سیستم تعرق گیاهی، تخریب ساختار کلروفیل‌های a، b و کاهش تعادل یونی در سیتوپلاسم می‌باشد که باعث کاهش فعالیت سیستم فتوسنتزی و در نهایت، کاهش عملکرد گیاه می‌شود (علی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۵). از طرفی غلظت‌های بالای این عناصر سمی در گیاه، ممکن است به طرق مختلف از جمله کاهش

1. Blouin
2. Mitra
3. Sengupta
4. Sun
5. *Agrostis stolonifera*
6. Superoxide Dismutase
7. Ascorbate Peroxidase
8. Peroxidase
9. Shabbir
10. Ali

فعالیت‌های آنزیمی، اختلال در فتوسنتز، بسته‌شدن روزنه‌ها و ممانعت از جذب عناصر غذایی، در رشد گیاه تداخل ایجاد نماید (زیائولنگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). تنش ناشی از آرسنیک باعث کاهش مقدار کلروفیل‌های a و b می‌شود که این مسئله می‌تواند ناشی از کاهش کارایی به دام انداختن انرژی به علت آسیب به غشای تیلاکوئید و زنجیره انتقال الکترون فتوسیستم II و کاهش فعالیت آنزیم روبیسکو باشد (تشکری‌زاده^۲ و سعیدنژاد^۳، ۲۰۱۶) که می‌تواند باعث کاهش فتوسنتز و رشد گیاه شود. کرانر^۴ و کولویل^۵ (۲۰۱۱) نیز گزارش دادند که افزایش غلظت آرسنیک باعث تغییر شکل کلروپلاست، تو رفتگی، خمیدگی و تخریب غشا شده که در نتیجه، موجب کاهش محتوای کلروفیل برگ می‌گردد. سانال^۶ و همکاران (۲۰۱۴) عنوان کردند که افزایش آرسنیک در گیاه به دلیل آسیب وارده به غشاهای سلولی سبب کاهش محتوای پروتئین می‌شود. حکمتی^۷ و همکاران (۲۰۲۱) دریافتند که با افزایش غلظت آرسنیک، محتوای پرولین، فعالیت پراکسیداز، محتوای قندهای محلول و محتوای آرسنیک شاخساره و آرسنیک ریشه در نعنای سبز افزایش می‌یابد، درحالی‌که محتوای کلروفیل‌های a، b و کل کاهش پیدا می‌کند. همچنین عنوان کردند که عنصر سمی آرسنیک تا حد زیادی توسط گیاه جذب می‌شود که این مسئله می‌تواند اثرات سمی بر انسان و حیوانات داشته باشد.

فضلی^۸ و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی تیمارهای مختلف آبیاری و کودی بر گیاه دارویی بالنگو دریافتند که در میان تیمارهای کودی، کاربرد ورمی‌کمپوست در مقایسه با کاربرد کودهای شیمیایی و آلی عامل بیش‌ترین ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ، تعداد دانه در بوته، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، درصد و عملکرد روغن بود. رضایی‌چیان^۹ و همکاران (۲۰۱۸) عنوان کردند که ارتفاع گیاه و عملکرد گیاه اسانس‌دار شمعدانی^{۱۰} و عملکرد دو گونه از گیاه دارویی بارهنگ در اثر مصرف ورمی‌کمپوست بهبود یافت. افزایش ارتفاع گیاه در نتیجه کاربرد کودهای زیستی و آلی، ناشی از افزایش توسعه ریشه و جذب بهتر آب و مواد غذایی و همچنین تولید مواد تنظیم‌کننده رشد از جمله جیبرلین و اکسین‌ها بود که با تحریک رشد گیاه و افزایش طول میان‌گره‌ها در نهایت باعث افزایش ارتفاع گیاه شد. زاده‌دباغ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که کاربرد تلفیقی کودهای آلی و شیمیایی باعث بهبود خصوصیات خاک و قابل‌دسترس‌شدن عناصر غذایی آن و افزایش ارتفاع بوته گیاهان گل ختمی گردید. صادقی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که تعداد و وزن کپسول در بوته ختمی تحت تأثیر کاربرد ورمی‌کمپوست قرارگرفت، به‌طوری‌که کاربرد ورمی‌کمپوست باعث افزایش ۵۳ درصدی تعداد کپسول بوته ختمی نسبت به تیمار شاهد شد. این پژوهش‌گران نشان دادند که استفاده از کودهای ورمی‌کمپوست و زیستی به‌ویژه به‌صورت تلفیقی، با بهبود شرایط رشد و طولانی کردن دوره انتقال مواد فتوسنتزی به دانه و افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی، امکان تداوم بیش‌تر دوره پر شدن دانه را در شرایط کمبود آب فراهم ساخته است (جهانگیری‌نیا^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۷). حیدرپور^{۱۴} و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که استفاده از ۲ تن در هکتار ورمی‌کمپوست پارامترهای

1. Xiaolong
2. Tashakorizadeh
3. Saeidnejad
4. Kranner
5. Colville
6. Sanal
7. Hekmati
8. Fazli
9. Rezaei-Chiyaneh
10. *Plargonium graveolence* L.
11. Zadeh-dabbagh
12. Sadeghi
13. Jahangiri Nia
14. Heidarpour

مورفوفیزیولوژیکی مرزه تابستانی را بهبود بخشید. هم‌چنین اثرات مثبت استفاده از ورمی کمپوست بر گیاهان دارویی گشنیز (گودارا^۱ و همکاران، ۲۰۱۴) و ریحان (سیروس مهر^۲، ۲۰۱۴) نیز تأیید شده است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

آزمایش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر کاربرد ورمی کمپوست در کاهش اثرات منفی تنش آرسنیک بر رشد و عملکرد گیاه دارویی بالنگو شهری به‌صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان طی سال ۱۴۰۲ انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل با دو فاکتور بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار به اجرا درآمد. فاکتورهای مورد مطالعه، شامل آرسنیک در دو سطح (صفر و ۲۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک) و ورمی کمپوست در چهار سطح (صفر، پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی خاک) بودند. هر تیمار در هر تکرار شامل چهار گلدان بود. طی انجام آزمایش در گلخانه، دمای روزانه 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد، دمای شبانه 18 ± 2 درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۴ درصد و شدت نور ۲۵۰ تا ۳۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه بود.

از نمک آرسنات سدیم (NaH_2AsO_4)، مارک سیگما تهیه‌شده از شرکت اطلس شفا یاب غرب) برای آلوده‌سازی بستر کشت استفاده گردید. بستر کشت گیاهان هم از خاک باغچه بود که از عمق ۲۰ سانتی‌متری بالای خاک تهیه شده بود. جهت انکوبه‌شدن آرسنیک در خاک، بستر کاشت به‌مدت دو ماه در گلخانه نگهداری شد. بعد از این مدت، کود ورمی کمپوست براساس تیمارهای موردنظر (صفر، پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) به بستر کاشت اضافه شد. بذره‌های بالنگو شهری مورد استفاده، از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه گردید. تعداد ۱۵ عدد بذر در هر گلدان پلاستیکی چهار لیتری در اردیبهشت‌ماه سال ۱۴۰۲ کاشته شد. بعد از جوانه‌زنی بذرها و ظهور دو تا سه برگ حقیقی، بوته‌ها تنک شدند و پنج بوته در هر گلدان نگهداری گردید. نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

جدول ۱. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک گلخانه و کود ورمی کمپوست

مشخصات نمونه	هدایت الکتریکی	اسیدیته	نیترژن کل	کربن آلی	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	مس	روی	منگنز آهن	بافت
	دسی‌زیمنس بر متر		درصد			میلی گرم بر کیلوگرم				
خاک	۴/۱۳	۷/۶۵	۰/۱۲	۰/۷۶	۲۴/۹۴	۲۵۷	۳/۷۴	۲/۴۹	۱۲/۳	لومی شنی رسی
ورمی کمپوست	۳/۳۳	۷/۳۸	۱/۷۶	۴/۶۰	۰/۹۷	۲۶۴	۴۷	۰/۱۷	۵۵۸	-

در پایان آزمایش، برخی صفات رشدی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در گیاهان مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌برداری از برگ‌ها در مرحله گلدهی صورت گرفت. برای این کار شش برگ از گره‌های پنجم و ششم نمونه‌گیری شد. خصوصیات همچون طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک بوته، محتوای کلروفیل‌های a، b، کل و کاروتنوئیدها، محتوای نسبی آب برگ، شاخص پایداری غشا، محتوای پرولین، محتوای پروتئین‌های محلول، آهن، منیزیم، روی، منگنز، مس، فسفر، آرسنیک، نیترژن، پتاسیم و فعالیت آنزیم پراکسیداز مورد بررسی قرار گرفتند.

با هدف بررسی تیمارهای آزمایشی بر ارتفاع و وزن خشک بوته‌ها، از هر واحد آزمایشی دو بوته برداشت شد و پس از اندازه‌گیری طول ریشه و ساقه، نمونه‌ها برای خشک‌شدن در پاکت‌های کاغذی و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد

1. Godara

2. Sirousmehr

به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند. پس از گذشت این زمان، وزن خشک گیاه اندازه‌گیری شد. برای توزین از ترازوی دیجیتالی (Sartorius، ساخت کشور آلمان) با دقت ۰/۰۱ استفاده گردید.

به منظور اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ^۱ به روش جون^۲ و همکاران (۲۰۰۶)، ابتدا از برگ تمامی تیمارهای آزمایشی نمونه‌برداری (حدود ۴-۵ قطعه به طول ۲ سانتی‌متر از بخش میانی برگ) انجام گرفت. وزن تر نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی (Sartorius، ساخت کشور آلمان) با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد، سپس تمامی نمونه‌ها با آب مقطر شسته و به مدت چهار ساعت در پتری‌دیش در آب غوطه‌ور شدند. پس از آن، نمونه‌ها را با دستمال حوله‌ای خشک کرده و وزن اشباع برگ‌ها اندازه‌گیری شد و برگ‌ها به مدت ۲۴-۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و در ادامه، وزن خشک هر کدام اندازه‌گیری گردید. با قراردادن اعداد حاصل از توزین در فرمول زیر محتوای نسبی آب برگ برحسب درصد به دست آمد:

$$\text{رابطه ۱)} \quad \times 100 = \frac{(\text{وزن تر} - \text{وزن خشک})}{(\text{وزن اشباع} - \text{وزن خشک})} = \text{محتوای نسبی آب}$$

برای اندازه‌گیری شاخص پایداری غشا، به روش سایرام^۳ و همکاران (۲۰۰۱) عمل گردید. بدین صورت که قطعات برگ (آخرین برگ توسعه‌یافته) به اندازه حدود ۰/۱ گرم وزن تازه برگ جدا شد و در فالتکون‌های حاوی ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شد. پس از ۳۰ دقیقه نگهداری در حمام آب گرم و سرد شدن تا دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، هدایت الکتریکی (EC1) هر نمونه با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج (مدل HACH، ساخت کشور آمریکا) اندازه‌گیری گردید. نمونه‌ها ۲۰ دقیقه در حمام آب گرم (۱۰۰+ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شدند و پس از خنک شدن در دمای اتاق تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، EC2 نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پایداری غشایی با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$\text{رابطه ۲)} \quad \text{Membrane Stability Index (\%)} = 1 / ((\text{EC1} / \text{EC2}) \times 100)$$

به منظور اندازه‌گیری محتوای پرولین برحسب میلی‌گرم بر گرم با استفاده از ماده تر گیاهی، از روش بیتس^۴ و همکاران (۱۹۷۳) استفاده شد. ابتدا ۰/۵ گرم از بافت برگ، در هاون چینی با ۱۰ میلی‌لیتر محلول آبی اسیدسولفوریک سه درصد ساییده شده و پودر گردید. سپس، مخلوط به مدت پنج دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور سانتریفیوژ گردید. در ادامه، ۲ میلی‌لیتر از محلول رویی به لوله‌های درب‌دار منتقل شد و به تمام لوله‌ها دو میلی‌لیتر معرف ناین‌هیدرین و دو میلی‌لیتر اسیداستیک گلاسیال اضافه شد و به مدت یک ساعت در بن‌ماری با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. بعد از خارج کردن نمونه‌ها از بن‌ماری، به مدت پنج دقیقه در یخ قرار داده شدند و سپس چهار میلی‌لیتر تولوئن به آن‌ها اضافه شد و بعد از تکان دادن لوله‌آزمایش به مدت ۲۰-۱۵ ثانیه و قراردادن در محیط آزمایشگاه و تشکیل دو فاز در داخل لوله، فاز بالایی در دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-VIS، ساخت کشور کره جنوبی) قرار گرفت و میزان جذب آن در طول موج ۵۲۰ نانومتر قرائت شد. اندازه‌گیری محتوای پروتئین‌های محلول براساس روش برادفورد^۵ (۱۹۷۶) و اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پراکسیداز با استفاده از روش چنس^۶ و ماهلی^۷ (۱۹۹۵) صورت گرفت.

1. Relative Water Content

2. Jeon

3. Sairam

4. Bates

5. Bradford

6. Chance

7. Maechly

محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدهای برگ با استفاده از روش آرنون^۱ (۱۹۶۷) اندازه‌گیری گردید. برای عصاره‌گیری و اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئیدها برگ‌ها مقدار ۰/۱ گرم از نمونه برگ تازه در هاون چینی ساییده (توسط ازت مایع) شد و سپس مقدار ۰/۰۱ گرم اکسیدمنیزیم به آن اضافه گردید و در ادامه با ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد خوب ساییده شد تا محلول، یک‌دست و یک‌رنگ گردد. عصاره به‌دست‌آمده، داخل لوله‌های فالدکون ریخته شد و به‌مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفت. پس از سانتریفیوژ، فاز رویی برای اندازه‌گیری رنگیزه‌های فتوسنتزی استفاده شد و میزان جذب نور در سه طول موج ۶۴۵، ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-VIS، ساخت کشور کره جنوبی) اندازه‌گیری گردید. در نهایت، میزان کلروفیل‌های a، b و کاروتنوئید با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه گردید. میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی به‌دست‌آمده برحسب میلی‌گرم بر گرم وزن تازه ثبت گردید.

$$\text{Chla} = 12.25A_{663} - 2.79A_{646} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\text{Chlb} = 21.21A_{646} - 5.1A_{663} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\text{Car} = (1000 A_{470} - 1.82 \text{Chla} - 85.02 \text{Chlb}) / 198 \quad \text{رابطه ۵}$$

Chla مقدار کلروفیل a، Chlb مقدار کلروفیل b، Car مقدار کاروتنوئید و A میزان جذب نور (عدد قرائت‌شده) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر می‌باشد.

برای اندازه‌گیری محتوای عناصر میکرو شامل آهن، منگنز، روی و مس، منیزیم و آرسنیک در برگ بالنگو شهری، ابتدا ۰/۳ گرم نمونه گیاهی پودر شد و ۸ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۶۵ درصد و دو میلی‌لیتر اسیدکلریدریک ۳۷ درصد به آن اضافه گردید. نمونه حاصل به‌مدت ۵۰ دقیقه در دستگاه هضم قرار گرفت. سپس، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی صاف شد و به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد و در یورین باتل نگهداری گردید. در نهایت، مقادیر مربوطه توسط دستگاه جذب اتمی (مدل AA-6200، ساخت کشور چین) قرائت شد. عناصر ماکرو از جمله نیتروژن توسط دستگاه کج‌لدال (برمیر^۲ و موالونی^۳، ۱۹۸۲)، پتاسیم توسط دستگاه فلیم‌فتومتر (مدل JenwayPFP7، ساخت کشور انگلستان)، فسفر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل UV-VIS، ساخت کشور کره جنوبی) با استفاده از معرف نیترو-وانادا-مولیبدات (گوپتا^۴، ۲۰۰۴) مورد بررسی قرار گرفتند.

داده‌های حاصل از این آزمایش با نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۴) تجزیه واریانس گردید و مقایسه میانگین‌ها در سطح احتمال یک و ۵ درصد با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار^۵ انجام شد. رسم شکل‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار اکسل (نسخه ۲۰۱۳) صورت گرفت.

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. طول ساقه و ریشه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس صفات، اثر ورمی کمپوست بر طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک بوته و شاخص پایداری غشا دارای اختلاف آماری معنی‌دار (در سطح یک درصد) بود. اثر آرسنیک بر صفات طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک

1. Arnon
2. Bremner
3. Mulvaney
4. Gupta
5. LSD

بوته و پایداری غشایی نیز اختلاف آماری معنی‌دار (در سطح یک درصد) نشان داد. اثر متقابل ورمی کمپوست و آرسنیک بر صفت پایداری غشا دارای اختلاف آماری معنی‌دار مشاهده شد (جدول ۲).

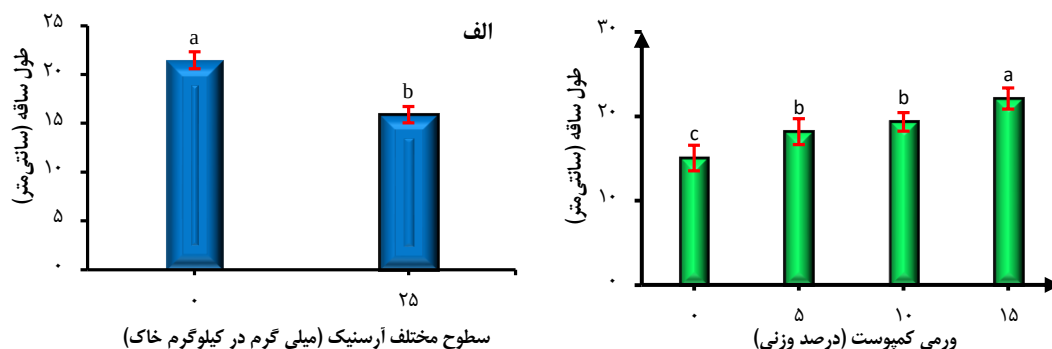
بررسی نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفت محتوای نسبی آب برگ نشان‌دهنده عدم اثرگذاری عوامل موردبررسی (سطوح ورمی کمپوست و آرسنیک) بر این صفت بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین صفات نشان داد که طول ساقه بالنگو شهری در حضور آرسنیک در خاک ۳۵ درصد کاهش یافت و با افزایش سطوح کاربرد ورمی کمپوست ۴۷ درصد افزایش نشان داد (۱۵ درصد وزنی در مقایسه با عدم کاربرد ورمی کمپوست). بیش‌ترین طول ساقه (۲۱/۴۵ سانتی‌متر) در شرایط عدم حضور آرسنیک و کم‌ترین طول ساقه (۱۵/۸۸ سانتی‌متر) در سطح آرسنیک ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به‌دست آمد. مقایسه میانگین مربوط به سطوح مختلف ورمی کمپوست نشان می‌دهد که کاربرد این ماده آلی، طول ساقه گیاه بالنگو شهری را افزایش داد، به‌طوری‌که بیش‌ترین طول ساقه به میزان ۲۲/۱۲ سانتی‌متر در سطح ۱۵ درصد وزنی کاربرد ورمی کمپوست حاصل گردید و کم‌ترین مقدار نیز به میزان ۱۵/۰۵ سانتی‌متر به عدم حضور ورمی کمپوست تعلق داشت (شکل ۱- الف و ب).

نتایج مقایسه میانگین مربوط به طول ریشه حاکی از این بود که بیش‌ترین طول ریشه به میزان ۴/۵۲ سانتی‌متر در نبود عنصر آرسنیک در خاک به‌دست آمد و کم‌ترین طول ریشه به میزان ۲/۲۳ سانتی‌متر به تیمار ۲۵ میلی‌گرم آرسنیک در کیلوگرم خاک تعلق داشت. در تیمار کاربرد ورمی کمپوست نیز کاربرد و افزایش استفاده از این کود در خاک طول ریشه گیاه بالنگو را ۸۶ درصد (۱۵ درصد وزنی در مقایسه با عدم کاربرد ورمی کمپوست) بهبود بخشید، به‌طوری‌که بیش‌ترین (۴/۴۵ سانتی‌متر) و کم‌ترین (۲/۳۹ سانتی‌متر) طول ریشه به‌ترتیب در تیمار کاربرد سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی کمپوست و کاربرد سطح صفر درصد وزنی ورمی کمپوست ثبت شد (شکل ۲- الف و ب).

جدول ۲. تجزیه واریانس مقادیر صفات طول ساقه، طول ریشه، وزن خشک بوته، محتوای نسبی آب برگ و پایداری غشایی گیاه بالنگوی شهری در شرایط کاربرد سطوح مختلف ورمی کمپوست و آرسنیک

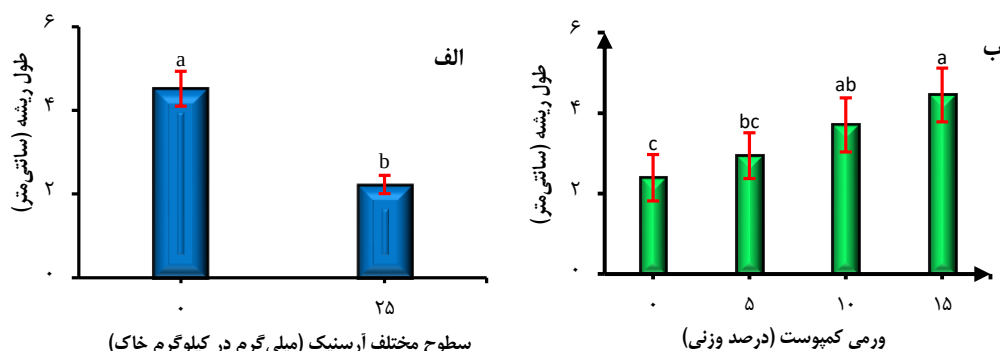
منابع تغییرات	درجه آزادی	طول ساقه	طول ریشه	وزن خشک بوته	محتوای نسبی آب برگ	پایداری غشایی
ورمی کمپوست (ا)	۳	۵۱/۳۵**	۴/۸۴**	۳/۹۸**	۱۲/۱۶ ^{ns}	۲۶۳/۲۰**
آرسنیک (ب)	۱	۱۸۵/۹۳**	۳۱/۳۹**	۴/۰۳**	۰/۳۴ ^{ns}	۱۲۴۸/۹۲**
(ا) × (ب)	۳	۰/۷۷ ^{ns}	۰/۱۸ ^{ns}	۰/۵۱ ^{ns}	۲۸/۱۳ ^{ns}	۲۸۲/۵۱**
خطا	۱۶	۲/۱۷	۰/۹۲	۰/۳۴	۴۲/۶۹	۵۳/۰۳
ضریب تغییرات (درصد)	-	۷/۸۹	۲۸/۴۱	۲۳/۲۳	۷/۶۵	۱۰/۴۷

*, ** و ^{ns} به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد و فاقد اختلاف آماری معنی‌دار.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح مختلف ورمی کمپوست و آرسنیک بر صفت طول ساقه گیاه بالنگوی شهری.

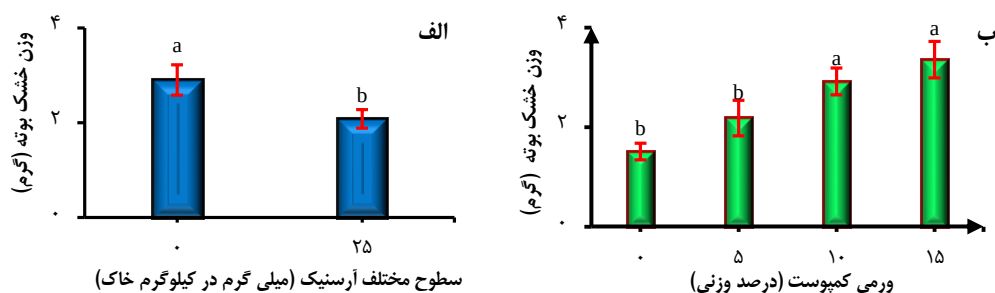
(حروف مشابه براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند و نشان‌گرهای میله‌ای، خطای استاندارد میانگین سه تکرار می‌باشند).



شکل ۲. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح مختلف ورمی کمپوست و آرسنیک بر صفت طول ریشه گیاه بالنگو شهری. (حروف مشابه براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند و نشان‌گرهای میله‌ای، خطای استاندارد میانگین سه تکرار می‌باشند).

۲.۴. وزن خشک بوته

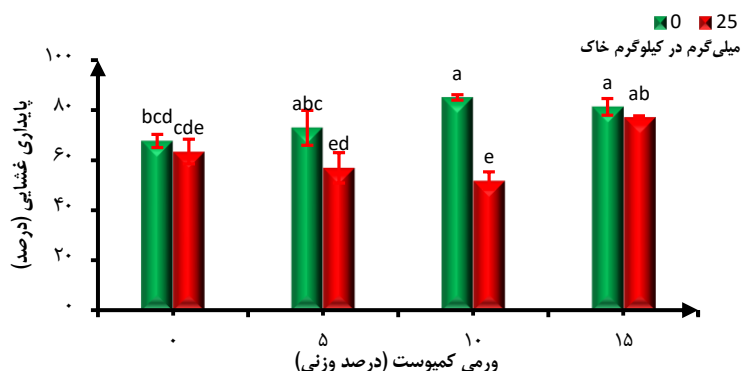
بیش‌ترین میانگین وزن خشک بوته (۲/۹۰ گرم) در شرایط عدم حضور آرسنیک در خاک و کم‌ترین آن (۲/۰۸ گرم) با کاربرد آرسنیک به میزان ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به‌دست آمد که نشان‌دهنده افزایش ۳۹ درصدی وزن خشک بوته در شرایط عدم کاربرد آرسنیک بود. مقایسه میانگین تیمارهای کود ورمی کمپوست نیز نشان داد که با کاربرد ورمی کمپوست و افزایش سطح کاربرد آن، وزن خشک گیاه ۱۲۳ درصد (۱۵ درصد وزنی در مقایسه با عدم کاربرد ورمی کمپوست) افزایش یافت، به‌طوری‌که بیش‌ترین وزن خشک بوته به میزان ۳/۳۶ گرم در شرایط کاربرد کود ورمی کمپوست به مقدار ۱۵ درصد وزنی حاصل گردید و کم‌ترین آن به میزان ۱/۵۱ گرم در شرایط عدم‌استفاده از ورمی کمپوست به‌دست آمد (شکل ۳-الف و ب).



شکل ۳. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح مختلف ورمی کمپوست و آرسنیک بر صفت وزن خشک بوته. (حروف مشابه براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند و نشان‌گرهای میله‌ای، خطای استاندارد میانگین سه تکرار می‌باشند).

۳.۴. پایداری غشایی

براساس نتایج مقایسه میانگین مربوط به صفت پایداری غشایی مشاهده شد که عدم وجود آرسنیک در خاک و سطح ۱۰ درصد وزنی ورمی کمپوست با میزان ۸۵/۰۹ درصد بیش‌ترین و کاربرد سطح ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک آرسنیک و سطح ۱۰ درصد وزنی ورمی کمپوست با میزان ۵۱/۸۵ درصد کم‌ترین پایداری غشا را دارا بودند (شکل ۴). تیمار عدم حضور آرسنیک و سطح ۱۰ درصد وزنی ورمی کمپوست در مقایسه با تیمار عدم کاربرد آرسنیک و کود ورمی کمپوست، افزایش ۲۶ درصدی پایداری غشا را نشان داد (شکل ۴).



شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل سطوح مختلف ورمی‌کمپوست و آرسنیک بر صفت پایداری غشایی. (حروف مشابه براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند و نشان‌گرهای میله‌ای، خطای استاندارد میانگین سه تکرار می‌باشند).

۴.۴. محتوای پرولین

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثر ورمی‌کمپوست بر صفات محتوای پرولین، محتوای پروتئین‌های محلول، محتوای کلروفیل b، محتوای کلروفیل کل و محتوای کاروتنوئیدها معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) بود. اثر آرسنیک نیز بر محتوای پرولین، فعالیت آنزیم پراکسیداز، محتوای کلروفیل‌های a، b و کل و محتوای کاروتنوئیدها معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) گردید. اثر متقابل ورمی‌کمپوست و آرسنیک نیز محتوای کاروتنوئیدها را به‌طور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) تحت تأثیر قرار داد (جدول ۳).

جدول ۳. تجزیه واریانس مقادیر صفات محتوای پرولین، محتوای پروتئین‌های محلول، فعالیت آنزیم پراکسیداز، محتوای کلروفیل‌های a، b، کل و محتوای کاروتنوئیدها در گیاه بالنگوی شهری تحت شرایط کاربرد سطوح مختلف ورمی‌کمپوست و آرسنیک

منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای پرولین	محتوای پروتئین‌های محلول	فعالیت آنزیم پراکسیداز	محتوای کلروفیل a	محتوای کلروفیل b	محتوای کلروفیل کل	محتوای کاروتنوئیدها
ورمی‌کمپوست (ا)	۳	۹/۳۰**	۵/۱۱**	۱/۷۷ ns	۰/۷۷ ns	۰/۲۷**	۷/۰۶**	۰/۴۲**
آرسنیک (ب)	۱	۱۲/۸۱**	۲/۱۰ ns	۱۲/۲۱**	۶/۴۵**	۰/۴۹**	۱۱/۴۴**	۰/۹۴**
(ا) × (ب)	۳	۰/۷۳ ns	۰/۸۸ ns	۰/۷۸ ns	۰/۰۴ ns	۰/۰۱ ns	۰/۲۳ ns	۰/۰۷*
خطا	۱۶	۱/۲۲	۰/۵۵	۰/۵۹	۰/۸۳	۰/۰۳	۰/۵۶	۰/۰۲
ضریب تغییرات (درصد)	—	۲۱/۱۷	۱۹/۰۴	۱۶/۷۶	۲۴/۹۹	۱۸/۵۱	۱۸/۷۵	۱۵/۴۷

ns، * و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد و فاقد اختلاف آماری معنی‌دار.

وجود آرسنیک در خاک نسبت به شاهد بدون آرسنیک محتوای پرولین در گیاه بالنگو شهری را به‌طور معنی‌داری (۳۳ درصد) افزایش داد. کاربرد سطوح مختلف ورمی‌کمپوست باعث افزایش غلظت پرولین در گیاه شد، اما تنها کاربرد سطح ۱۵ ورمی‌کمپوست موجب افزایش معنی‌دار محتوای پرولین (۵۶ درصدی) نسبت به شاهد بدون کود گردید (جدول ۴).

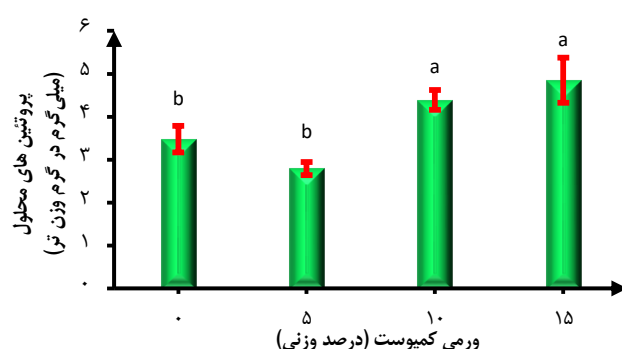
۴.۵. محتوای پروتئین‌های محلول

نتایج مقایسه میانگین صفت محتوای پروتئین‌های محلول حاکی از این است که بیش‌ترین مقدار این صفت به میزان ۴/۸۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست و کم‌ترین مقدار به میزان ۲/۷۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در شرایط کاربرد ۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست مشاهده شد که نشان‌دهنده تغییرات ۷۳ درصدی (۱۵ درصد وزنی در مقایسه با کاربرد ۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست) بود (شکل ۵). محتوای پروتئین‌های محلول در تیمار ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست در مقایسه با عدم کاربرد ورمی‌کمپوست، افزایش ۴۰ درصدی نشان داد (شکل ۵).

جدول ۴. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح مختلف ورمی کمپوست و آرسنیک بر صفات محتوای پروتئین و محتوای کلروفیل‌های a، b، کل در گیاه بالنگوی شهری

تیمار	غلظت	محتوای پروتئین	محتوای کلروفیل a	محتوای کلروفیل b	محتوای کلروفیل کل
		(میلی گرم بر گرم وزن تر)			
آرسنیک	صفر	۰/۴۳ ± ۰/۴۹	۰/۲۴ ± ۰/۱۶	۰/۰۶ ± ۱/۰۰	۰/۳۸ ± ۰/۶۷
(میلی گرم بر کیلوگرم خاک)	۲۵	۰/۴۳ ± ۰/۹۵	۰/۲۴ ± ۰/۱۲	۰/۰۶ ± ۰/۷۱	۰/۳۹ ± ۰/۲۹
ورمی کمپوست	صفر	۴/۴۲ ± ۰/۴۳ b	۳/۵۸ ± ۰/۳۳ a	۰/۷۱ ± ۰/۰۷ b	۲/۶۷ ± ۰/۳۹ c
(درصد وزنی)	۵	۴/۱۶ ± ۰/۶۱ b	۳/۳۸ ± ۰/۵۴ a	۰/۷۴ ± ۰/۰۸ b	۳/۸۶ ± ۰/۳۸ b
	۱۰	۵/۳۸ ± ۰/۶۶ b	۴/۱۶ ± ۰/۹۸ a	۰/۸ ± ۰/۰۸ b	۵/۰۰ ± ۰/۳۷ a
	۱۵	۶/۹۱ ± ۰/۳۶ a	۳/۴۴ ± ۰/۵۰ a	۱/۱۷ ± ۰/۱۰ a	۴/۰۵ ± ۰/۵۰ b

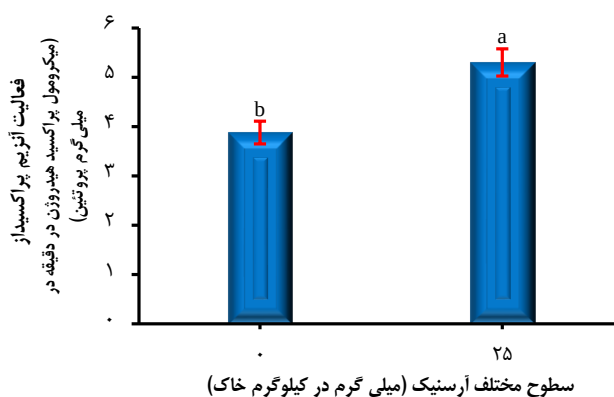
حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند.



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر اصلی سطوح مختلف ورمی کمپوست بر محتوای پروتئین‌های محلول در گیاه بالنگوی شهری. (حروف مشابه براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند و نشان‌گرهای میله‌ای، خطای استاندارد میانگین سه تکرار می‌باشند).

۴.۶. فعالیت آنزیم پراکسیداز

نتایج مقایسه میانگین‌ها میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز نشان داد که مقدار این صفت با آلودگی خاک به آرسنیک کاهش یافت، به‌طوری‌که فعالیت آنزیم پراکسیداز در حضور ۲۵ میلی‌گرم آرسنیک در هر کیلوگرم خاک با میزان ۵/۳۰ میکرومول پراکسیدهیدروژن در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین نسبت به شاهد بدون آرسنیک (۳/۸۸ میکرومول پراکسیدهیدروژن در دقیقه در میلی‌گرم پروتئین) حدود ۳۷ درصد افزایش یافت (شکل ۶).



شکل ۶. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح مختلف آرسنیک بر میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز در گیاه بالنگوی شهری. (حروف مشابه براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند و نشان‌گرهای میله‌ای، خطای استاندارد میانگین سه تکرار می‌باشند).

۷.۴. محتوای کلروفیل‌های a، b، کل و کاروتنوئیدها

نتایج مقایسه میانگین‌های صفات حاکی از آن است که بیش‌ترین میزان کلروفیل‌های a ($4/16$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، b ($1/3/12$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، کل ($4/67$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) به شاهد بدون آرسنیک و کم‌ترین مقدار کلروفیل‌های a ($3/12$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر)، b ($0/71$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) و کل ($3/29$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط حضور آرسنیک در خاک به‌دست آمد که به‌ترتیب تغییرات ۳۳، ۴۰ و ۴۲ درصدی نشان دادند (جدول ۴). هم‌چنین نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای کاربرد کود ورمی‌کمپوست نشان داد بیش‌ترین محتوای کلروفیل b ($1/17$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در کاربرد ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست و کم‌ترین میزان آن ($0/71$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) در شرایط عدم استفاده از این کود حاصل گردید که افزایش ۶۵ درصدی داشت (جدول ۴). کاربرد کود ورمی‌کمپوست در تمامی سطوح به‌ویژه کاربرد ۱۰ درصد وزنی، محتوای کلروفیل کل را نسبت به شاهد به‌طور معنی‌داری (۸۷ درصد) افزایش داد. بیش‌ترین محتوای کلروفیل کل به میزان ۵ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در کاربرد ۱۰ درصد وزنی و کم‌ترین مقدار به میزان $2/67$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر در تیمار شاهد حاصل گردید (جدول ۴). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها مشاهده شد که در تمامی سطوح کاربرد یا عدم کاربرد ورمی‌کمپوست، بالاترین محتوای کاروتنوئید در شرایط عدم وجود آرسنیک در خاک به‌دست آمد و در هر دو سطح وجود یا عدم وجود آرسنیک در خاک، کاربرد ورمی‌کمپوست باعث بهبود محتوای کاروتنوئید در گیاه بالنگوی شهری شد، اگرچه تنها در سطح کاربرد ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست نسبت به شاهد، معنی‌دار گردید (جدول ۵). بیش‌ترین محتوای کاروتنوئید به تیمار عدم وجود آرسنیک و کاربرد ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست ($1/71$ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) اختصاص داشت (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح مختلف ورمی‌کمپوست و آرسنیک بر صفت محتوای کاروتنوئیدها در گیاه بالنگو شهری

میزان آرسنیک (میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)	ورمی‌کمپوست (درصد وزنی)	محتوای کاروتنوئید (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)
صفر	صفر	$0/92 \pm 0/5$ b-d
	۵	$1/07 \pm 0/4$ b
	۱۰	$0/95 \pm 0/06$ b-d
	۱۵	$1/71 \pm 0/17$ a
۲۵	صفر	$0/70 \pm 0/3$ de
	۵	$0/75 \pm 0/07$ c-e
	۱۰	$0/62 \pm 0/10$ e
	۱۵	$1/00 \pm 0/02$ bc

حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشند.

۸.۴. محتوای نیتروژن

با توجه به نتایج تجزیه واریانس مقادیر عناصر معدنی برگ گیاه بالنگو شهری مشخص گردید که اثر ورمی‌کمپوست بر محتوای عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منیزیم، مس، منگنز، روی و آرسنیک معنی‌دار شد و اثر آرسنیک بر محتوای نیتروژن، مس، منگنز و آرسنیک معنی‌دار گردید. اثر متقابل کاربرد سطوح ورمی‌کمپوست و آرسنیک نیز بر محتوای عناصر فسفر، پتاسیم، منگنز، روی و آرسنیک برگ گیاه بالنگو شهری معنی‌دار شد (جدول ۶).

براساس نتایج مقایسه میانگین مقدار نیتروژن، بیش‌ترین ($54/41$ میلی‌گرم بر گرم) و کم‌ترین ($43/77$ میلی‌گرم بر گرم) میزان نیتروژن به‌ترتیب به سطح آرسنیک ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و شاهد اختصاص یافت که تغییر ۲۵ درصدی داشت. استفاده از کود ورمی‌کمپوست باعث افزایش محتوای نیتروژن برگ گردید. بیش‌ترین محتوای نیتروژن ($58/96$ میلی‌گرم بر

گرم) در کاربرد سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی کمپوست و کم‌ترین میزان آن (۳۸/۲۵ میلی گرم بر گرم) در تیمار شاهد مشاهده گردید که افزایش ۵۴ درصدی در شرایط کاربرد سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی کمپوست را نشان داد (جدول ۷).

جدول ۶. تجزیه واریانس مقادیر صفات محتوای عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منیزیم، مس، منگنز، روی و آرسنیک در شرایط کاربرد سطوح مختلف

ورمی کمپوست و آرسنیک										
منابع تغییرات	درجه آزادی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	منیزیم	مس	منگنز	روی	آرسنیک
ورمی کمپوست (ا)	۳	۴۴۳/۲۸*	۷/۲۲**	۱۱۳۱/۵۵**	۹۶۲/۲*	۲۳/۸۴**	۰/۶۷**	۱۸۱۶/۰۳ ns	۱۹/۱ ns	۰/۰۰۰۱۲**
آرسنیک (ب)	۱	۶۸۲/۶۷*	۰/۲۸ ns	۱۳/۸۹ ns	۱۵۹/۶ ns	۰/۳۷ ns	۲/۵۹**	۶۹۷۶/۳۱**	۱۳/۶ ns	۰/۰۰۰۲۰**
(ا) × (ب)	۳	۳۸/۶۷ ns	۱/۸۱**	۱۴۳/۶۶**	۲۹۱/۳ ns	۵/۸۴ ns	۰/۱۲ ns	۱۱۲۹۵/۵۰**	۱۴۹/۴*	۰/۰۰۰۰۳**
خطا	۱۶	۱۲۴/۶۳	۰/۳۵	۲۰/۸۹	۲۴۱/۶	۳/۹۱	۰/۰۵	۸۷۰/۳۲	۴۰/۲	۰/۰۰۰۰۰۲
ضریب تغییرات (درصد)	۲۲/۶۷	۱۱/۰۴	۶/۳۴	۱۸/۰۷	۱۰/۴۱	۱۰/۹۰	۲۰/۵۵	۱۱/۶۸	۱۸/۳۲	

ns و ** و *** به ترتیب معنی دار در سطح ۵ و ۱ درصد و فاقد اختلاف آماری معنی دار.

جدول ۷. مقایسه میانگین اثرات اصلی سطوح مختلف ورمی کمپوست و آرسنیک بر صفات محتوای نیتروژن، آهن، منیزیم و مس

تیمار	غلظت	نیتروژن (میلی گرم بر گرم)	آهن (میلی گرم بر گرم)	منیزیم (میلی گرم بر گرم)	مس (میلی گرم بر گرم)
آرسنیک	صفر	۴۳/۷۷±۲/۳۹b	۸۳/۴۴±۴/۴۹a	۱۸/۸۷±۰/۶۲a	۱/۸±۰/۰۷b
(میلی گرم بر کیلوگرم خاک)	۲۵	۵۴/۵۱±۴/۴۸a	۸۸/۶۰±۶/۵۹a	۱۹/۱۲±۰/۹۴a	۲/۴۵±۰/۱۳a
ورمی کمپوست	صفر	۳۸/۲۵±۱/۴۲b	۷۱/۱۴±۰/۵b ^۲	۱۶/۱۵±۰/۸b	۱/۷۶±۰/۱۵b
(درصد وزنی)	۵	۴۷/۷۱±۴/۱۵ab	۸۴/۴۶±۶/۷۵ab	۱۹/۱۱±۰/۶۵a	۱/۹۴±۰/۱۷b
	۱۰	۵۱/۶۴±۲/۶۶ab	۸۶/۳۹±۲/۴۷ab	۲۰/۰۶±۱/۲۱a	۲/۲۹±۰/۱۳a
	۱۵	۵۸/۹۶±۸/۱۶a	۱۰۲/۰۵±۶/۸۲a	۲۰/۶۲±۰/۳۶a	۲/۵۱±۰/۲۲a

حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی دار می باشند.

۹.۴. محتوای فسفر و پتاسیم

همان طوری که در جدول (۸) ملاحظه می گردد استفاده از کود ورمی کمپوست به ویژه در غلظت‌های بالاتر، مقادیر عناصر فسفر و پتاسیم را به طور معنی داری نسبت به شاهد افزایش داد. بیشترین میزان این عناصر به ترتیب به میزان ۶/۸۸ و ۸۷/۶۳ میلی گرم بر گرم به کاربرد سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی کمپوست (و ۲۵ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک) و کمترین مقدار عناصر فسفر و پتاسیم به ترتیب به میزان ۴/۰۱ و ۵۶/۸ میلی گرم بر گرم به شاهد (عدم وجود آرسنیک و کاربرد کود ورمی کمپوست) تعلق داشت که به ترتیب افزایش ۷۲ و ۴۸ درصدی داشتند (جدول ۸).

جدول ۸. مقایسه میانگین اثرات متقابل سطوح مختلف ورمی کمپوست و آرسنیک بر مقادیر عناصر فسفر، پتاسیم، منگنز، روی و آرسنیک گیاه بالنگوی شهری

میزان آرسنیک (میلی گرم بر کیلوگرم خاک)	ورمی کمپوست (درصد وزنی)	فسفر	پتاسیم	منگنز (میلی گرم بر گرم)	روی	آرسنیک
صفر	صفر	۴/۴۳±۰/۴bc	۵۶/۷۸± ۱/۵۹c	۱۲۰/۹۲±۳/۸۳bc	۴۹/۲۹±۳/۱۲bc	۰/۰۰۳۸±۰/۰۰۱۸c
	۵	۵/۲۲±۰/۲۲b	۶۹/۶۷± ۵/۷۱b	۱۲۹/۵۹±۳۰/۴۷bc	۶۱/۵±۱/۹۶a	۰/۰۰۲۵±۰/۰۰۰۷c
صفر	۱۰	۴/۷۹±۰/۵۶bc	۷۴/۱۲± ۱/۵۵b	۱۷۱/۶۵±۱۶/۸۴b	۵۱/۳۸±۲/۶۸ abc	۰/۰۰۲۷±۰/۰۰۰۵c
	۱۵	۶/۶۶±۰/۰۵a	۸۴/۶۷± ۲/۵۳a	۸۳/۸۵±۱۶/۸۷c	۵۷/۸۴±۰/۶۷abc	۰/۰۱۱۷±۰/۰۰۰b
ورمی کمپوست	صفر	۴/۰۱±۰/۱۰c	۵۶/۸± ۲/۰۶c	۱۲۲/۵۹±۱۱/۱۹bc	۵۵/۵۶±۵/۴۷ abc	۰/۰۰۲۷±۰/۰۰۰۵c
	۵	۴/۵۳±۰/۲۲bc	۵۹/۳۳± ۱/۸۲c	۱۴۹/۳۹±۱۷/۷۹b	۴۶/۱۶±۴/۱۴c	۰/۰۱۱۷±۰/۰۰۰b
۲۵	۱۰	۶/۵۵±۰/۲۷a	۸۷/۵۷± ۱/۴۹a	۱۲۸/۵±۱۸/۹۶cb	۵۶/۶۹±۲/۷۷ abc	۰/۰۱۰۵±۰/۰۰۰۲b
	۱۵	۶/۸۸±۰/۵۱a	۸۷/۶۳± ۱/۳۶a	۲۴۱/۹۲±۲/۷۵a	۵۵/۵۷±۵/۵۷abc	۰/۰۱۸۷±۰/۰۰۰۱a

حروف مشابه در هر ستون براساس آزمون LSD فاقد اختلاف آماری معنی دار می باشند.

۱۰.۴. محتوای آهن

براساس نتایج مقایسه میانگین، کاربرد همه سطوح کود ورمی‌کمپوست به‌ویژه ۱۵ درصد وزنی باعث افزایش محتوای آهن برگ گیاه بالنگو شهری شد. بیش‌ترین میزان آهن (۱۰۲/۰۵ میلی‌گرم بر گرم) به کاربرد سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست و کم‌ترین میزان آن (۷۱/۱۴ میلی‌گرم بر گرم) به شاهد بدون کاربرد ورمی‌کمپوست اختصاص داشت که تغییر ۴۳ درصدی داشت (جدول ۷).

۱۱.۴. محتوای منیزیم و مس

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین محتوای مس (۲/۴۵ میلی‌گرم بر گرم) در سطح ۲۵ میلی‌گرم آرسنیک در هر کیلوگرم خاک و کم‌ترین محتوای مس (۱/۸ میلی‌گرم بر گرم) در تیمار شاهد به‌دست آمد (جدول ۸). هم‌چنین نتایج بیانگر آن است که استفاده از کود ورمی‌کمپوست به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر، مقادیر عناصر منیزیم و مس را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد. بیش‌ترین میزان این عناصر به‌ترتیب به میزان ۲۰/۶۲ و ۲/۵۱ میلی‌گرم بر گرم به کاربرد سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست و کم‌ترین مقدار به‌ترتیب به میزان ۱۶/۱۵ و ۱/۷۶ میلی‌گرم بر گرم به شاهد تعلق داشت (جدول ۸).

۱۲.۴. محتوای منگنز

به‌طور کلی، کاربرد کود ورمی‌کمپوست در هر دو شرایط خاکی به‌ویژه در خاک آلوده به آرسنیک موجب افزایش محتوای منگنز برگ‌های گیاه بالنگو شهری شد، اگرچه در اغلب تیمارها این افزایش، معنی‌دار نگردید. بیش‌ترین محتوای منگنز (۲۴۱/۹۲ میلی‌گرم بر گرم) به خاک حاوی آرسنیک و تیمار کودی ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست و کم‌ترین مقدار این عنصر (۸۳/۸۵ میلی‌گرم بر گرم) به شاهد بدون آرسنیک و تیمار کودی ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست اختصاص یافت (جدول ۸). بیش‌ترین محتوای منگنز در تیمار خاک حاوی آرسنیک و تیمار کودی ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست مشاهده شد که در مقایسه با شاهد (عدم وجود آرسنیک در خاک و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست)، افزایش ۱/۹ برابری نشان داد (جدول ۸).

۱۳.۴. محتوای روی

کاربرد کود ورمی‌کمپوست در هر دو خاک آلوده و غیرآلوده به آرسنیک موجب افزایش محتوای روی در گیاه بالنگو شهری شد، اگرچه در اغلب تیمارها این افزایش، معنی‌دار نبود. بیش‌ترین و کم‌ترین محتوای روی به‌ترتیب در تیمار شاهد (عدم حضور آرسنیک) حاوی ۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست و خاک آلوده به آرسنیک حاوی ۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست به‌دست آمد (جدول ۸).

۱۴.۴. محتوای آرسنیک

همان‌طوری که در جدول (۸) ملاحظه می‌گردد استفاده از کود ورمی‌کمپوست به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر، مقدار عنصر آرسنیک را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد. بیش‌ترین میزان این عنصر ۰/۰۱۸۷ میلی‌گرم بر گرم به کاربرد سطح ۱۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست تعلق داشت. کم‌ترین میزان آرسنیک نیز به مقدار ۰/۰۰۲۵ میلی‌گرم بر گرم به کاربرد ۵ درصد وزنی ورمی‌کمپوست اختصاص پیدا کرد (جدول ۸).

۵. بحث

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش حاضر نشان داد که در شرایط وجود آرسنیک در خاک، محتوای نسبی آب برگ، صفات رشدی، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و پایداری غشا کاهش یافتند، درحالی‌که محتوای پروکلین، فعالیت آنزیم پراکسیداز و محتوای عناصر نیتروژن، مس، روی و آرسنیک افزایش نشان دادند. با استفاده از کود ورمی کمپوست در خاک نیز صفات رشدی گیاه، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌های محلول و عناصر غذایی جذب‌شده توسط گیاه افزایش یافت.

از اولین نشانه‌های بروز تنش (ازجمله حضور آرسنیک در محیط کشت) در گیاه ایجاد اختلال در روابط آبی گیاه است که سبب کاهش فشار آماس و در نتیجه، کاهش رشد و توسعه سلول به‌ویژه در ساقه و برگ‌ها می‌شود، با کاهش رشد سلول، اندازه اندام‌های گیاه محدود می‌شود و به همین دلیل اولین اثر محسوس تنش بر گیاهان را می‌توان از روی اندام کوچک‌تر برگ‌ها و ارتفاع کم‌تر گیاهان تشخیص داد (فضلی و همکاران، ۲۰۲۲). در نتایج آزمایش حاضر نیز به‌وضوح کاهش مقادیر صفات رشدی در حضور آرسنیک مشاهده شد (شکل‌های ۱ و ۲). درحالی‌که احتمالاً مصرف ورمی کمپوست توانست از طریق بهبود فعالیت‌های میکروبی خاک (ساندپ و همکاران، ۲۰۱۹) و تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه توسط این موجودات و جذب بیش‌تر عناصر غذایی سبب افزایش فتوسنتز و افزایش رشد ریشه و اندام هوایی و ارتفاع گیاه گردد (فضلی و همکاران، ۲۰۲۲). زیرا ورمی کمپوست منبعی غنی از میکروارگانیسم‌های مفید و مواد مغذی است و از نظر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، ریزمغذی‌ها و باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و حل‌کننده فسفات‌های نامحلول و اکتینومیست‌ها، یک محرک رشد و محافظ عالی برای گیاهان زراعی می‌باشد (بوردونی و همکاران، ۲۰۱۸؛ پرامانیک و چانگ، ۲۰۱۱). گیاهان پس از قرارگرفتن در معرض تنش فلزات سنگین، خصوصیات مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خود را برای سازگاری با شرایط تنش تغییر می‌دهند. یکی از سازوکارهای مورفولوژیکی ضروری گیاهان در برابر تنش فلزات سنگین، کندشدن رشد گیاه است. طول ریشه نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم رشد گیاه، در شرایط تنش برای کاهش سطح قرارگیری در معرض فلزات سنگین، کاهش می‌یابد (کوشواها^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کوشواها و سینگ^۲، ۲۰۲۰). همان‌طور که از نتایج بررسی طول ریشه و ساقه مشخص است (شکل‌های ۱ و ۲)، آرسنیک از رشد بوته‌ها جلوگیری کرد (شکل ۳). طول ریشه و ساقه نسبت به نمونه شاهد کاهش معنی‌داری داشت و ریشه‌ها بیش‌تر از ساقه تحت تأثیر آرسنیک قرار گرفتند، زیرا اولین اندامی هستند که با آرسنیک خاک در تماس می‌باشند. در مطالعه‌ای، حضور آرسنیک در محیط کاشت گیاه گشنیز سبب بروز نشانه‌های سمیت در گیاه، کاهش رشد و تجمع ماده خشک گیاه، کاهش جذب عناصر غذایی و تغییر در ترکیبات شیمیایی گیاه را موجب گردید که باعث کاهش بهره‌وری و کیفیت گیاه شد (فاطمی^۳ و اسماعیل‌پور^۴، ۲۰۲۱). گیاهان آرسنیک را به شکل‌های سه ظرفیتی و پنج ظرفیتی جذب می‌کنند (عمر و همکاران، ۲۰۲۲). این اشکال با فسفات در مسیرهای متابولیکی مختلف تداخل دارند و با گروه‌های سولفیدریل روی پروتئین‌ها تعامل داشته و رشد گیاه را متوقف می‌سازند (پاندی^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). کاهش وزن بوته با افزایش غلظت آرسنیک می‌تواند به‌دلیل سمیت یونی ناشی از حضور این عنصر سمی در خاک و جذب آن توسط گیاه و کاهش کارایی فتوسنتز به‌دلیل صرف انرژی برای حذف رادیکال‌های آزاد اکسیژن باشد (حکمتی و همکاران، ۲۰۲۱). یکی دیگر از علل اصلی کاهش تجمع ماده خشک در گیاهچه در طول بروز تنش آرسنیک پس از حضور رادیکال‌های آزاد اکسیژن،

1. Kushwaha

2. Singh

3. Fatemi

4. Esmaelpour

5. Pandey

تخصیص بیش‌تر زیست‌توده تولیدی گیاه به سمت ریشه‌ها، کاهش سطح برگ گیاه به‌دلیل ایجاد اختلال در فرایندهای فیزیولوژیک گیاه و کاهش میزان کلروفیل (کارایی فتوسنتز) است (بابایی^۱ و همکاران، ۲۰۱۰). برخی دیگر از پژوهش‌گران نیز بیان کردند که تنش آرسنیک سبب اختلال در روابط آبی گیاه شده و فعالیت سیستم‌های فتوسنتزی را از طریق کاهش بیوسنتز کلروفیل متوقف می‌سازد (نبی^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ مبارک^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ ایریل^۴ و همکاران، ۲۰۱۵). مصرف ورمی‌کمپوست در خاک در چنین شرایطی نه‌تنها ممکن است باعث فراهمی عناصر غذایی موردنیاز گیاه شود، بلکه با بهبود شرایط فیزیکی و حالت اسفنجی‌دادن به خاک، ضمن ایجاد یک محیط مناسب برای رشد و توسعه ریشه، موجبات افزایش رشد اندام هوایی گیاه نظیر افزایش ارتفاع و افزایش سطح برگ در بوته و متعاقب آن تولید ماده خشک را نیز فراهم می‌کند (اصولی^۵ و تالشی^۶، ۲۰۱۸). از سوی دیگر، دلیل این مسئله را می‌توان آزادسازی آهسته عناصر غذایی به‌همراه اکسین و جبریلین ناشی از کاربرد ورمی‌کمپوست دانست. سنگوپتا و همکاران (۲۰۲۳) نیز بیان کردند که ورمی‌کمپوست حاصلخیزی خاک را با تأمین مواد مغذی ضروری گیاه، بهبود ساختار خاک و ارتقای فعالیت میکروبی آن افزایش می‌دهد و می‌تواند فلزات سنگین ازجمله آرسنیک را از خاک جذب کند و سطح آرسنیک را در خاک کاهش دهد.

در مطالعه‌ای روی گیاه زولنگ^۷ بیش‌ترین وزن خشک گیاه در تیمار مصرف ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست و کم‌ترین میزان آن در تیمار کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود شیمیایی گزارش شد (کاشفی^۸ و همکاران، ۲۰۱۵). پژوهش‌گران اظهار داشتند مصرف ورمی‌کمپوست احتمالاً با بهبود ساختمان خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب خاک باعث بهبود زهکشی خاک شده و به‌دنبال آن رشد ریشه‌ها و در نتیجه، جذب مواد غذایی و رشد اندام هوایی افزایش می‌یابد. هم‌چنین سنگوپتا و همکاران (۲۰۲۳) بیان کردند که ورمی‌کمپوست از طریق تأمین مواد مغذی گیاه، بهبود ساختار خاک و ارتقای فعالیت میکروبی می‌تواند تأثیر مثبتی بر رشد ریشه و تولید ماده خشک داشته باشد. بلوین و همکاران (۲۰۱۹) اعلام کردند ورمی‌کمپوست حاوی تنظیم‌کننده‌های رشد مانند هورمون‌های گیاهی می‌باشد که باعث افزایش ۲۶ درصدی عملکرد اقتصادی و ۱۳ درصدی عملکرد بیولوژیک گیاهان می‌شوند. در مطالعه رحیمی^۹ و پورمحمدی^{۱۰} (۲۰۱۷) روی اسفرزه، بالاترین عملکرد دانه در تیمار کاربرد ۱۶ تن در هکتار ورمی‌کمپوست و کم‌ترین مقدار در تیمار شاهد گزارش شد.

در آزمایش حاضر، با تیمار آرسنیک میزان کلروفیل‌های a، b، کل و کاروتنوئیدها در گیاه بالنگوی شهری کاهش یافتند (جدول‌های ۴ و ۵)، زیرا زمانی که فلزات سنگین وارد برگ‌ها می‌شوند در برخی از قسمت‌های آن بیش از حد انباشته شده و با پایه SH- پروتئین ترکیب می‌شوند و در ادامه، ساختار و عملکرد کلروپلاست را از بین می‌برند (پاندی و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به نتایج آزمایش بیسواس^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۶) غلظت‌های بالای آرسنیک می‌تواند به تغییر شکل کلروپلاست منجر گردد که به‌صورت گرد و کوتاه‌شدن محور طولی سلول‌های گیاهی، تخریب جزئی همراه با تغییراتی در میزان محتویات موجود در برگ تا کاهش کلروفیل ظاهر می‌شود. کاهش عملکرد فتوسنتزی گیاهان تحت

1. Babaee
2. Nabi
3. Mubarak
4. Iriel
5. Osoli
6. Taleshi
7. *Eryngium caucasicum* Trautv
8. Kashefi
9. Rahimi
10. Pour Mohammadi
11. Biswas

تنش فلزات سنگین ممکن است ناشی از کاهش کارایی فتوسیستم^۲ باشد (نظیر^۱ و همکاران، ۲۰۱۹)، زیرا فلزات سنگین در رقابت با کلسیم، ساختار پلی پپتیدهای ۱۶ و ۲۴ کیلودالتون را در مجموعه فتوسیستم دو تغییر می‌دهند. این بازسازی منجر به آزادشدن یون‌های کلسیم از این مجموعه می‌شود و از انتقال الکترون جلوگیری می‌کند (بویسورت^۳ و همکاران، ۲۰۰۶). تنش فلزات سنگین همچنین ساختار پروتئین D2 در فتوسیستم دو را تغییر می‌دهد (نظیر و همکاران، ۲۰۱۹)، اندازه و تعداد کلروپلاست‌ها را کاهش، ترکیب لیپیدی غشای سلولی و فرایندهای متابولیک حیاتی را تغییر می‌دهد و باعث تنش اکسایشی می‌شود (سریکانت^۴ و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر این، مشخص شده است که فلزات سنگین سبب کاهش محتوا و فعالیت کلروفیل، کاروتنوئید و روبیسکو، افزایش فعالیت کلروفیل‌از یا مهار تشکیل اسید ۵-آمینولینیک به‌عنوان پیش‌ساز بیوسنتز کلروفیل می‌شوند (نظیر و همکاران، ۲۰۱۹).

گیاهان دارای مکانیسم‌های دفاعی ضد اکسایشی آنزیمی و ترکیبات غیر آنزیمی مانند کاروتنوئیدها هستند که به‌عنوان تعدیل‌کننده رادیکال‌های آزاد برای جلوگیری از تنش اکسایشی عمل می‌کنند (نجفی کاکاوند^۴ و همکاران، ۲۰۱۹). کاروتنوئیدها رنگدانه‌های محلول در چربی هستند و در فعالیت ضد اکسایشی مرتبط با جذب نور نقش دارند. کاهش محتوای کاروتنوئید ممکن است به‌دلیل کارایی آن‌ها در حذف رادیکال‌های آزاد و نقش حفاظتی آن‌ها در مقابل تنش اکسیداتیو و سمیت‌زدایی از کلروفیل باشد. گونه‌هایی که بتوانند محتوای کاروتنوئید بیش‌تری داشته باشند، در مقابل گونه‌های اکسیژن فعال دفاع موفق‌تری داشته و در شرایط تنش تحمل بیش‌تری از خود نشان می‌دهند (احمدی و امیدی، ۲۰۱۸). نتایج پژوهش ما نشان داد کاربرد ورمی کمپوست با بهبود شرایط رشد و تغذیه‌ای گیاه، اثر منفی حضور آرسنیک بر رنگیزه‌های فتوسنتزی را تقلیل می‌دهد. سالاری^۵ و همکاران (۲۰۲۳) با مقایسه اثر ورمی کمپوست بر آرسنیک قابل‌دسترس خاک، رشد و انباشت آرسنیک در گیاه گلرنگ بیان کردند که در شرایط بدون تنش و تحت تنش آرسنیک با افزایش میزان ورمی کمپوست، محتوای کلروفیل a و b برگ و وزن خشک گیاه افزایش یافت. همچنین ورمی کمپوست باعث کاهش آرسنیک قابل‌دسترس خاک و غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گلرنگ شد.

برای کاهش و ترمیم آسیب ناشی از گونه‌های اکسیژن فعال، گیاهان آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مختلفی مانند کاتالاز، پراکسیدازها و سوپراکسید دیسموتازها و جذب‌کننده‌های غیر آنزیمی مانند گلوتاتیون، کاروتنوئیدها و آسکوربات را تولید و آزاد می‌کنند (سان و همکاران، ۲۰۱۸). در مطالعه حاضر، با افزایش غلظت آرسنیک افزایش قابل‌توجهی در فعالیت پراکسیداز مشاهده شد (شکل ۶). از میان آنزیم‌های ضد اکسایشی، آنزیم پراکسیداز نقش مهمی برای از بین بردن رادیکال‌های آزاد اکسیژن به‌ویژه پراکسید هیدروژن دارد. تولید رادیکال‌های آزاد و گونه‌های اکسیژن فعال در حضور فلزات تحریک می‌شوند که می‌توانند به غشای سلولی، اسیدهای نوکلئیک و رنگدانه‌های کلروپلاست آسیب برسانند. حسن‌وزمان^۶ و فوجیتا^۷ (۲۰۱۳) عنوان کردند که گیاهان در واکنش به حضور آرسنیک در محیط رشد خود، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند پراکسیداز و کاتالاز را افزایش می‌دهند تا بتوانند پراکسید هیدروژن را به آب و اکسیژن تبدیل کنند. زیرا گونه‌های اکسیژن فعال می‌توانند به‌طور مستقیم به ساختارهای غشایی و اسیدهای نوکلئیک آسیب بزنند (شایبر و همکاران، ۲۰۲۱). درحالی‌که بیسواس و همکاران (۲۰۱۶) عنوان کردند که پراکسیداز، حاوی آنزیم Heam (Fe)

1. Nazir

2. Boisvert

3. Sreekanth

4. Najafi kakavand

5. Salari

6. Hasanuzzaman

7. Fujita

است و حضور فلزات سنگین، جذب آهن را متوقف می‌کند، بنابراین، ممکن است فعالیت پراکسیداز کاهش یابد. همچنین بیان کردند که کاهش فعالیت پراکسیداز می‌تواند به جایگزینی فلزات سنگین به جای یون‌های ضروری در ساختار آنزیم یا به دلیل افزایش تجمع گونه‌های اکسیژن فعال که بر مسیرهای انتقال سیگنال گیاه تأثیر می‌گذارد، مرتبط باشد. در پژوهش ما، اثر آرسنیک بر محتوای پروتئین‌های محلول گیاه معنی‌دار نگردید، اما سان و همکاران (۲۰۲۱) عنوان کردند که افزایش غلظت پروتئین‌های محلول در گیاه تحت تنش نیکل به دلیل افزایش تجمع پروتئین‌های تنش که نقش محافظت از پروتئین‌های دیگر در برابر تنش را بر عهده دارند، می‌باشد. اسدی نسب^۱ (۲۰۱۹) نیز اعلام داشت در شرایط تنش به‌جای پروتئین‌هایی که نقش فعال در بیوسنتز، متابولیسم و ذخیره‌سازی دارند، پروتئین‌هایی که در حفاظت از گیاهان در برابر تنش‌ها دخیل هستند، انباشته می‌شوند.

در شرایط تنش، گیاه با استفاده از سازوکارهای غیرآنزیمی نیز می‌تواند غلظت گونه‌های فعال اکسیژن و اثرات مخرب آن را کاهش دهد و افزایش غلظت پرولین در گیاه، نوعی سازگاری برای غلبه بر شرایط تنش است (کیران^۲، ۲۰۱۹). تحریک تجمع پرولین به‌عنوان یک ترکیب اسمولیت و محافظ غشا و آنزیم‌ها می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی اساسی برای بهبود تحمل به تنش در نظر گرفته شود و از طریق کاهش آسیب به سیستم انتقال آب در بافت‌های گیاه و پیش‌گیری از کاهش رشد ریشه در حضور آرسنیک به افزایش میزان آب و در نتیجه، افزایش آماس و توسعه و تقسیم سلول به‌ویژه در ساقه منجر شود (احمدی و امیدی، ۲۰۱۸). گزارش‌ها نشان می‌دهد که آسیب به غشا تحت تنش با افزایش میزان تولید گونه‌های اکسیژن فعال مرتبط است، بنابراین ثبات غشاهای زیستی نشانه‌ای از مقاومت به تنش است. تجمع رادیکال‌های آزاد اکسیژن تحت تنش باعث اکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع دارای چندین پیوند دوگانه در غشای پلاسمایی و ایجاد مالون‌دی‌آلدید می‌شود (خان^۳ و پاندا^۴، ۲۰۰۸؛ شایسته پاهنگه^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش پرولین در چنین شرایطی سبب حفظ یکپارچگی غشا در شرایط تنش می‌گردد. لی^۶ و همکاران (۲۰۲۱) نیز عنوان کردند که تجمع پرولین علامتی از سمیت فلزات سنگین است که تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهد، ساختار غشا و پروتئین و فعالیت آنزیمی را حفظ می‌کند و سنتز محافظت‌کننده‌های اسمزی را در سیتوپلاسم تنظیم می‌کند. بنابراین، محافظت‌کننده‌های اسمزی به کلات‌سازی فلزات در گیاهان کمک می‌کنند.

تغییرات تجمع عناصر غذایی در گیاه، فعل و انفعالات پیچیده بین فلزات سنگین و مواد معدنی در مکانیسم انتقال از ریشه به ساقه در گیاهان را نشان می‌دهد (مصطفی^۷ و همکاران، ۲۰۱۵). احتمالاً یکی از مکانیسم‌های ممکن برای کاهش جذب مواد معدنی با کاربرد آرسنیک، رقابت در محل‌های اتصال به دلیل شباهت شعاع یونی آن‌ها با یون‌های آرسنیک است. همچنین، این مسئله ممکن است بر ساختار و فعالیت‌های آنزیمی غشای سلولی به دلیل اختلالات متابولیکی ناشی از تنش آرسنیک تأثیر بگذارد. این تغییرات ممکن است بر پایداری غشا تأثیر گذاشته و در نتیجه، تعادل یونی سیتوپلاسم را تغییر دهد. در غلظت‌های بالای آرسنیک، به دلیل جذب و انتقال نامنظم مواد معدنی معمولاً غلظت آن‌ها در بافت‌های گیاهی کاهش می‌یابد (سریکانت و همکاران، ۲۰۱۳). در پژوهش حاضر، به نظر می‌رسد کاربرد ورمی‌کمپوست به دلیل افزایش قابلیت دسترسی گیاه به عناصر غذایی در شرایط سمیت آرسنیک سبب افزایش جذب

1. Asadi Nasab

2. Kiran

3. Khan

4. Panda

5. Shayesteh Pahangeh

6. Li

7. Mostofa

فسفر و در نتیجه، افزایش تجمع آن در برگ شد (جدول ۸) که با نتایج پژوهش هاشم‌آبادی^۱ و همکاران (۲۰۱۲) مشابهت نشان داد. با توجه به نتایج، به نظر می‌رسد عنصر سمی آرسنیک تا حدودی جذب گیاه شده و نشان از احتمال وجود توان گیاه‌پالایی این گیاه دارویی (بالنگو شهری) دارد. در پژوهش ما، کاربرد ورمی کمپوست در غلظت‌های پایین سبب جذب کم‌تر آرسنیک از خاک شد، اما کاربرد ۱۵ درصد وزنی کود ورمی کمپوست در غلظت ۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک آرسنیک، اگرچه جذب آرسنیک بالایی داشت، اما توانست با افزایش جذب سایر عناصر توسط گیاه نسبت به آرسنیک و کاهش اثر سمیت آن در گیاه سبب بهبود رشد و نمو گیاه بالنگو شهری شود (جدول ۸). غلظت بالای فلزات سنگین با جلوگیری از جذب مواد مغذی مانند کلسیم و پتاسیم و آزادسازی مواد مغذی از آپوپلاست، رشد را کاهش می‌دهد (نجفی کاکاوند و همکاران، ۲۰۱۹). انصاری^۲ و همکاران (۲۰۲۱) بیان کردند که قسمت بیش‌تر آرسنیک جذب‌شده توسط گیاه در دیواره سلول‌های ریشه رسوب کرده و موجب ایجاد شکاف‌هایی در دیواره می‌شود و درنهایت از رشد طولی ریشه ممانعت می‌کند. بهبود خصوصیات رشدی در شرایط کاربرد ورمی کمپوست می‌تواند به افزایش جذب پتاسیم نسبت داده شود (جدول ۸)، زیرا پتاسیم نقش مهمی در تنظیم فشار تورژسانس و گسترش سلول‌های برگ در شرایط تنش‌های محیطی دارد (رسولی صادقانی^۳ و همکاران، ۲۰۱۶). پتاسیم در حفظ یکپارچگی غشا مؤثر بوده و سلول‌ها را در وضعیت آماس حفظ می‌کند (رادی^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج مطالعات مختلف نیز نشان داده است که آرسنیک از طریق جایگزین‌شدن با کاتیون‌های ضروری باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود که درنهایت پراکسیداسیون چربی، آسیب به غشای سلولی، افزایش نشت یونی و تنش اکسیداتیو را در پی دارد (کومار^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). درحالی‌که کاربرد ورمی کمپوست با افزایش جذب عناصر غذایی (جدول‌های ۷ و ۸) تا حدی از تولید گونه‌های اکسیژن فعال ناشی از تنش و آسیب غشای سلول جلوگیری می‌کند و درنهایت با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش نشت یونی می‌شود (گارگ^۶ و آگاروال^۷، ۲۰۱۲). کاهش رشد گیاه در شرایط افزایش غلظت آرسنیک می‌تواند به دلیل کاهش جذب عناصری مانند نیتروژن، فسفر، منیزیم و آهن باشد (کومار و همکاران، ۲۰۱۸؛ ژانگ^۸ و همکاران، ۲۰۱۸)، درحالی‌که در آزمایش ما محتوای فسفر و نیتروژن بالاتر در غلظت بیش‌تر آرسنیک مشاهده شد. با توجه بررسی‌های صورت گرفته، احتمالاً افزایش محتوای نیتروژن و فسفر در بافت برگ، بیش‌تر به دلیل تجزیه ترکیبات سلولی و آزادسازی این عناصر در بافت بوده است تا جذب این عناصر از خاک و بررسی محتوای این عناصر در خاک و مقایسه میزان آن با گیاه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. افزایش وزن بوته با کاربرد ورمی کمپوست در تنش آرسنیک نیز می‌تواند با جذب بالای فسفر، آهن و منگنز در گیاه و پتانسیل کلونیزاسیون مطلوب ریشه و گسترش سیستم ریشه گیاه توجیه شود (میرانصاری^۹، ۲۰۱۷).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر نشان داد که کاربرد ۲۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک آرسنیک رشد گیاه بالنگو شهری را کاهش داد و مشخص شد که صفات طول ریشه و ساقه و وزن بوته می‌توانند به عنوان شاخص‌های خوبی برای تشخیص اثرات سمی

1. Hashem Abadi
2. Ansari
3. Rasouli-Sadaghiani
4. Rady
5. Kumar
6. Garg
7. Aggarwal
8. Zhang
9. Miransari

آرسنیک استفاده شوند. سمیت آرسنیک محتوای کلروفیل و پروتئین‌های محلول گیاه را کاهش داد و باعث افزایش محتوای پرولین و فعالیت پراکسیداز گردید. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کاربرد کود ورمی‌کمپوست در خاک (تا ۱۵ درصد وزنی خاک) صفات رشدی گیاه، محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی، محتوای پروتئین‌های محلول و عناصر غذایی جذب‌شده توسط گیاه را افزایش داد. از سوی دیگر، کاربرد ورمی‌کمپوست توانست اثرات منفی حضور آرسنیک را احتمالاً از طریق بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، بهبود نگهداری آب و در اختیار قراردادن آهسته عناصر غذایی برای گیاه، تقلیل بخشد. همچنین جذب عنصر آرسنیک توسط گیاه، احتمال وجود توان گیاه‌پالایی در این گیاه دارویی را نشان داد و مشاهده گردید که اگرچه گیاه بالنگو شهری جذب آرسنیک بالایی داشت، اما کاربرد کود ورمی‌کمپوست احتمالاً از طریق نگهداری آرسنیک بر روی سطح خود و در نتیجه جلوگیری از ورود آن به گیاه و به‌واسطه افزایش جذب سایر عناصر نسبت به آرسنیک توانسته اثر سمیت آرسنیک بر رشد گیاه را کاهش دهد و سبب بهبود رشدونمو گیاه بالنگو شهری شود. به‌طور کلی، از نتایج این آزمایش مشخص شد که آرسنیک باعث تنش اکسیداتیو و اختلالات ناشی از آن در گیاه می‌شود و کاربرد ورمی‌کمپوست می‌تواند این اثرات منفی حضور آرسنیک در خاک را تا حدودی جبران نماید. لذا با توجه به اثرات مفید ورمی‌کمپوست بر رشد گیاه بالنگوی شهری در خاک‌های آلوده به فلز سنگین آرسنیک، کاربرد این کود جهت تعدیل اثرات منفی آرسنیک پیشنهاد می‌گردد.

۷. تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از دانشگاه کردستان جهت حمایت مالی ارائه شده در اجرای این آزمایش در قالب رساله دکتری، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

- احمدی، خدیجه و امیدی، حشمت (۱۳۹۷). تأثیر تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیک، فعالیت آنزیم پراکسیداز و عملکرد دانه پنج جمعیت گیاه دارویی بالنگو شیرازی (*Lallemantia royleana* Benth.). *تحقیقات گیاهان دارویی و معطر/ایران*، ۳۴(۳)، ۴۱۲-۴۲۹.
- اسدی نسب، نفیسه (۱۳۹۸). تأثیر کاربرد اسیدسالیسیلیک، اسیدآسبیزیک و کلریدکلسیم بر مقاومت به دمای بالا در گندم. رساله دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۳۵ صفحه.
- اسدی‌کرم، الهام؛ کرامت، بتول و مظفری، حسین (۱۳۹۴). اثر برهمکنش تریاکوتنانول و آرسنیک بر رشد و برخی خصوصیات بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی در گیاه سویا (*Glycine max* L.). *مجله پژوهش‌های گیاهی*، ۳۰(۳)، ۴۷۷-۴۸۷.
- اصغری پور، محمدرضا و بیژنی، مدینه (۱۳۹۵). تأثیر تلقیح میکوریزا و کود فسفر بر مقاومت گیاه شنبلله به آرسنیک. *مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای*، ۷(۲)، ۱۳۷-۱۵۰.
- اصولی، نوشین و طالشی، کاظم (۱۳۹۶). بررسی اثر کودهای بیولوژیک و ورمی‌کمپوست بر برخی از خصوصیات بیولوژیکی و کیفیت اسانس گیاه دارویی رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill) در خرم‌آباد. *تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی*، ۴(۲)، ۱۲۳-۱۳۸.
- انصاری، آیدا؛ عندلیبی، بابک؛ زارعی، مهدی و شکاری، فرید (۱۴۰۰). برهم‌کنش قارچ ریشه و پوترسین بر خصوصیات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد بالنگوی شهری (*Lallemantia iberica*) در شرایط تنش سرب. *فرایند و کارکرد گیاهی*، ۱۰(۴۴)، ۱۹۳-۲۱۸.

بابایی، کیوان؛ امینی دهقی، مجید؛ مدرس ثانوی، سید علی محمد و جباری، رضا (۱۳۸۹). اثر تنش خشکی بر صفات مورفولوژیکی، میزان پرولین و درصد تیمول در آویشن (*Thymus vulgaris* L.). تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۲۶(۲)، ۲۳۹-۲۵۱.

براتی رشوانلو، فهیمه (۱۳۹۲). اثر مصرف نیتروژن و کودهای آلی بر رشد و عملکرد گیاه دارویی بالنگو (*Lallemantia royleana*). پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی شاهرود. ۷۹ صفحه.

تشکری زاده، منصوره و سعیدنژاد، امیرحسین (۱۳۹۶). تأثیر غلظت‌های مختلف کروم (III) بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و ترکیب شیمیایی اسانس ریحان. دانش آب و خاک، ۲۷(۱)، ۱۳۵-۱۴۵.

جهانگیری نیا، الهام؛ سیادت، سید عطاءالله؛ کوچک زاده، احمد؛ سیاح فر، منوچهر و مرادی تلاوت، محمدرضا (۱۳۹۵). اثر ورمی کمپوست و تلقیح میکوریزا بر عملکرد دانه و برخی خصوصیات فیزیولوژیکی سویا (*Glycine max* L.) تحت شرایط تنش کم آبی. بوم‌شناسی کشاورزی، ۸(۴)، ۵۸۳-۵۹۷.

حکمتی، جمال؛ حمیداوغلی، یوسف؛ اسماعیل پور، بهروز و قاسم نژاد، محمود (۱۴۰۰). اثر آرسنیک و کود زیستی فسفات بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی توده بومی نعنا سبز (*Mentha spicata* L.). پژوهش‌های تولید گیاهی، ۲۸(۱)، ۱۲۷-۱۳۹.

حیدرپور، لیا؛ سلطانی طولارود، علی اشرف و گلی کلانپا، اسماعیل (۱۳۹۵). جداسازی، غربالگری و بررسی صفات محرک رشد گیاهی میکروارگانیسم‌های مقاوم به آرسنیک (III) و (V) و ارزیابی تأثیر جدایه‌های برتر بر خصوصیات مورفولوژیک گیاه پونه و گیاه پالایی خاک آلوده به آرسنیک. زیست‌شناسی خاک، ۲۴(۲)، ۱۳۵-۱۵۱.

حیدری، مصطفی؛ محمدی، سپیده؛ دهمرده، مهدی و اصغری، حمیدرضا (۱۳۹۴). تأثیر نیتروژن و آرسنیک بر رنگدانه‌های فتوسنتزی، فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان و مقادیر عناصر معدنی گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). نشریه تولید گیاهان زراعی، ۸(۴)، ۱۰۵-۱۲۰.

خادم مقدم ایگده لو، نادر و گلچین، احمد (۱۳۹۸). ارزیابی خطر آلودگی منابع آب و خاک کشور به آرسنیک. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۷)، ۱۵۹۵-۱۶۱۷.

رسولی صدقیانی، میرحسن؛ خداوردیلو، حبیب؛ برین، محسن و کاظم علیلو، سولماز (۱۳۹۵). تأثیر باکتری‌های PGPR و قارچ‌های میکوریزا-آربوسکولار بر رشد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک خازرن بابا در خاک آلوده به کادمیم. آب و خاک، ۳۰(۲)، ۵۴۲-۵۵۴.

رضائی چیا، اسماعیل؛ فریدوند، شاهین؛ امیرنیا، رضا؛ مهدوی کیا، حسن و رحیمی، امیر (۱۳۹۷). اثر کود آلی و زیستی بر عملکرد و برخی خصوصیات کیفی بالنگوی شهری (*Lallemantia iberica*) در شرایط دیم. دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۲۸(۴)، ۲۵-۴۰.

زاده دباغ، دانا؛ دانشور، محمدحسین؛ عازمی، محمدابراهیم و لطفی جلال ابادی، امین (۱۳۹۶). تأثیر کود زیستی فسفات و کود کامل NPK بر خصوصیات رویشی و میزان فسفر در گیاه همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.). دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۲۷(۱)، ۱۲۱-۱۳۱.

سالاری، حسن؛ عموآقایی، ریحانه و مظفری، حسین (۱۴۰۲). مقایسه اثر دو نوع ورمی کمپوست بر آرسنیک قابل دسترس خاک، رشد و انباشت آرسنیک در گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.). مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)، انتشار آنالین.

صادقی، امیرعلی؛ بخش کلارستانی، کیومرث و حاج محمدنیا قالیباف، کمال (۱۳۹۳). بررسی اثرات کودهای اوره و ورمی کمپوست بر عملکرد کمی و کیفی گل ختمی. بوم‌شناسی کشاورزی، ۶(۱)، ۴۲-۵۰.

References

- Abdollahi, M., & Maleki Farahani, S. (2019). Seed quality, water use efficiency and eco physiological characteristics of *Lallemantia* (*Lallemantia* sp.) species as effected by soil moisture content. *Acta Agriculturae Slovenica*, 113, 307-320.
- Ahmadi, K., & Omid, H. (2018). The effect of drought stress on physiological traits, peroxidase activity and grain yield of five populations of *Lallemantia royleana* Benth. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 34(3), 412-429. (In Persian).

- Ali, A., Deng, X., Hu, X., Gill, R. A., Ali, S., Wang, S., & Zhou W. (2015). Deteriorative effects of cadmium stress on antioxidant system and cellular structure in germinating seeds of *Brassica napus* L. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17, 63-74.
- Ansari, A., Andalibi, B., Zarei, M., & Shekari, F. (2021). Interaction of mycorrhizal fungi and putrescine on physiological characteristics, growth and yield of *Lallemantia iberica* under Pb stress conditions. *Plant Process and Function*, 10(44), 193-218. (In Persian).
- Arancon, N., Edwards, C., Bierman, P., Metzger, J., Lee, S., & Welch C. (2003). Effects of vermicompost on growth and marketable fruits of field grown tomatoes, peppers and strawberries. *Pedobiologia*, 47, 731-735.
- Arnon, A. N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy journal*, 23(1), 112-121.
- Asadi Karam, E., Keramat, B., & Mozaffari, H. (2017). Effect of interaction of triacontanol and arsenic on growth and some biochemical and physiological in soybean (*Glycine max*). *Journal of Plant Research*, 30(3), 477-487. (In Persian).
- Asadi Nasab, N. (2019). *Effect of salicylic acid, abscisic acid and calcium chloride on resistance to high temperature in wheat. PhD degree of Crops Physiology*. Shahid Chamran University of Ahvaz. 235 pp. (In Persian).
- Asgharipour, M. R., & Bijeni, M. (2016). Effect of mycorrhizal inoculation and phosphorus fertilizer on fenugreek resistance against arsenic. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 7(2), 137-150. (In Persian).
- Babaei, K., Amini Dehaghi, M., Modares Sanavi, S., & Jabbari, R. (2010). Water deficit effect on morphology, proline content and thymol percentage of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 26(2), 239-251. (In Persian).
- Barati Rashvanloo, F. (2013). The effect of nitrogen and organic fertilizer application on the growth and yield of the medicinal plant Balengu (*Lallemantia royleana* B.). Shahrood University of Technology. Master's thesis. 79 pages. (In Persian).
- Bates, L. S., Waldern, R. P., & Tear, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant Soil*, 39, 205-207.
- Biswas, P., Ali, Y., & Kumar Patra, P. (2016). Effect of Arsenic in germination, growth and biochemistry of Rice (*Oryza sativa*). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology (IJEAB)*, 1(3), 321-327.
- Blouin, M., Barrere, J., Meyer, N., Lartigue, S., & Barot, S. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 34-39.
- Boisvert, S., Joly, D., Leclerc, S., Govindachary, S., & Harnois, J. (2006). Inhibition of the oxygen-evolving complex of photosystem II and depletion of extrinsic polypeptides by nickel. *Biometals*, 20(6), 879-89.
- Bordoloi, L. J., Hazarika, S., Chatterjee, D., & Sarkar, D. (2018). Enriched Compost: A Boon for Nutrient Starved Agriculture in Northeast India. Recent Trends in Composting Technology. *IK International Publishing House Pvt. Ltd., New Delhi*, 84(1), 1-24.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1-2), 248-254.
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-Total. In: Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties, Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. Eds., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 595-624.
- Chance, B., & Maechly, A. C. (1995). Assay of catalase and peroxidases. *Methods in Enzymology*, 2, 764-765.
- Chaoua, S., Boussaa, S., Gharmali, A., & Boumezzough, A. (2019). Impact of irrigation with wastewater on accumulation of heavy metals in soil and crops in the region of Marrakech in Morocco. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 429-436.
- Das, U., Rahman, M. A., Ela, E. J., Lee, K. W., & Kabir, A. H. (2021). Sulfur triggers glutathione and phytochelatin accumulation causing excess Cd bound to the cell wall of roots in alleviating Cd-toxicity in alfalfa. *Chemosphere*, 262, 128361.
- Fatemi, H., & Esmaeelpour, B. (2021). Investigation of biological and non-biological interaction on enzymatic and non-enzymatic antioxidant of coriander (*Coriandrum sativum*) under Pb stress condition. *Journal of Plant Research, Iranian Journal of Biology*, 34(3), 687-705.

- Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M. K., & Barzegar, M. (2019). Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products*, 138, 111584.
- Fazli, M. A., Mir Mahmoodi, T., Rahimi, A., & Yazdan Seta, S. (2022). Investigate the different irrigation regimes and fertilizer treatments on morphophysiological characteristics of Balangu (*Lallemantia royleana* Benth). *Environmental Stresses In Crop Sciences*, 14(4), 1003-1015.
- Garg, N., & Aggarwal, N. (2012). Effect of mycorrhizal inoculations on heavy metal uptake and stress alleviation of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. genotypes grown in cadmium and lead contaminated soils. *Plant Growth Regulation*, 66, 9-26.
- Godara, A. S., Gupta, U. S., Lal, G., & Singh, R. (2014). Influence of organic and inorganic source of fertilizers on growth, yield and economics of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *International Journal Seed Spice*, 4(2), 77-80.
- Gupta, P. K. (2004). Soil, plant, water and fertilizer analysis. Published by Agrobios (India), Agro House, Behind Nasrani Cinema, Chopasani Road, Jodhpur 342002.
- Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2013). Exogenous sodium nitroprusside alleviates arsenic-induced oxidative stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings by enhancing antioxidant defense and glyoxalase system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 22, 584-596.
- Hashem Abadi, D., Zaredost, F., Barari Ziyabari, M., Zarchini, M., Kaviani, B., Jadid Solimandarabi, M., Torkashvand, A. M., & Zarchini, S. (2012). Influence of phosphot biofertilizer on quantity and quality features of marigold. *Australian Journal of Crop Sciences*, 6, 1101-1109.
- Haydarpoor, L. , Soltani Toolarood, A.A., & GoliKalanpa, E. (2017). Evaluation of plant growth promoting traits of arsenic resistant bacteria and their effect on morphological properties of *Origanum vulgare* plant in an arsenic-polluted soil. *Journal of Sol Biology*, 4(2), 135-151. (In Persian).
- Heidari, M., Muhammadi, S., Dehdarah, M., & Asgharipour, M. R. (2015). The effect of nitrogen and arsenic on photosynthetic pigments, enzyme activity Antioxidants and Minerals of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Crop Production*, 8(4), 105-120. (In Persian).
- Heidarpour, O., Esmailpour, B., Soltani, Toolarood, A., & Khorramdel, S. (2020). Effect of vermicompost on summer's morphophysiological, biochemical, and yield characteristics savory (*Satureja hortensis* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Agroecology*, 12(3), 507-522.
- Hekmati, J., Hamidoghli, Y., Esmailpour, B., & Ghasemnezhad, M. (2021). Effect of arsenic and phosphate Biofertilizer on physiological and Biochemical properties of green mint (*Mentha spicata* L.). *Journal of Plant Production Research*, 28(1), 127-139. (In Persian).
- Iriel, A., Dundas, G., Cirelli, A. F., & Lagorio, M. G. (2015). Effect of arsenic on reflectance spectra and chlorophyll fluorescence of aquatic plants. *Chemosphere*, 119, 697-703.
- Jahangiri Nia, E., Syyadat, S. A., Koochakzadeh, A., Sayyahfar, M., & Moradi Telavat, M. R. (2017). The Effect of vermicompost and Mycorrhizal inoculation on grain yield and some physiological characteristics of Soybean (*Glycine max* L.) under water stress condition. *Journal of Agroecology*, 8(4), 583-597. (In Persian).
- Jeon, M. W., Ali, M. B., Hahn, E. J., & Paek, K. Y. (2006). Photosynthetic pigments, morphology and leaf gas exchange during ex-vitro acclimatization of micropropagated CAM *Doritaenopsis* plantlets under relative humidity and air temperature. *Environmental and Experimental Botany*, 55, 183-194.
- Karimi Jalilehvandi, T., Maleki Farahani, S., & Rezazadeh, A. (2017). Effects of sowing date and chemical fertilizer on seed vigor and qualitative and quantitative characteristics of Lady's mantle (*Lallemantia royleana* Benth.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 33, 127-133.
- Kashefi, B., Booyeh, B., & Alipour, Z. (2015). The effect of compost and vermicompost on morphological and biochemical characteristics of Zolang. *Journal of Plant Process and Function*, 4, 145-151. (In Persian).
- Khadem Moghadam Igdellou, N., & Golchin, A. (2019). Risk Assessment of Contamination of the Country's Soil and Water Resources with Arsenic. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), 1595-1617. (In Persian).
- Khan, M. H., & Panda, S. K. (2008). Alterations in root lipid peroxidation and antioxidative responses in two rice cultivars under NaCl-salinity stress. *Acta Physiologia Plantarum*, 30, 81-89.
- Kiran, S. (2019). Effects of vermicompost on some morphological, physiological and biochemical parameters of Lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) under drought stress. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(2), 352-358.

- Koohdar, F., Sheidai, M., Talebi, S. M., & Noormohammadi, Z. (2015). Population genetic structure in medicinal plant *Lallemantia iberica* (Lamiaceae). *Biodiversitas*, 16, 139-144.
- Kranner, I., & Colville, L. (2011). Metals and seeds: Biochemical and molecular implication and their significance for seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 72, 93-105.
- Kumar, A., Narasimha, M., & Prasad, V. (2018). Plant-lead interactions: Transport, toxicity, tolerance, and detoxification mechanisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 166, 401-418.
- Kushwaha, B. K., & Singh, V.P. (2020). Glutathione and hydrogen sulfide are required for sulfur-mediated mitigation of Cr(VI) toxicity in tomato, pea and brinjal seedlings. *Physiology of Plant*, 168(2), 406-421.
- Kushwaha, B. K., Singh, S., Tripathi, D. K., Sharma, S., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., Kumar, V., & Singh, V. P. (2019). New adventitious root formation and primary root biomass accumulation are regulated by nitric oxide and reactive oxygen species in rice seedlings under arsenate stress. *Journal of Hazardous Materials*, 361, 134-140.
- Li, G., Shah, A. A., Khan, W. U., Yasin, N. A., Ahmad, A., Abbas, M., Ali, A., & Safdar, N. (2021). Hydrogen sulfide cadmium induced toxicity in *Brassica rapa* by modulating physiochemical attributes osmolyte metabolism and antioxidative machinery. *Chemosphere*, 263, 127999.
- Li, Y., Chu, Y., Sun, H., Bao, Q., & Huang, Y. (2023). Melatonin alleviates arsenite toxicity by decreasing the arsenic accumulation in cell protoplasts and increasing the antioxidant capacity in rice. *Chemosphere*, 312, 137292.
- Miransari, M. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants. In: *Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants* (ed. Wu, Q. S.) Pp. 147-161. Springer, Singapore.
- Mitra, D., Djebaili, R., Pellegrini, M., Mahakur, B., Sarker, A., Chaudhary, P., & Mohapatra, P. K. D. (2021). Arbuscular mycorrhizal symbiosis, plant growth improvement and induction of resistance under stressful conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 44(13), 1993-2028.
- Mostofa, M. G., Rahman, A., Ansary, M. M. U., Watanabe, A., Fujita, M., & Tran, L. S. P. (2015). Hydrogen sulfide modulates cadmium-induced physiological and biochemical responses to alleviate cadmium toxicity in rice. *Scientific Reports*, 5, 14078.
- Mubarak, H., Mirza, N., Chai, L. Y., Yang, Z. H., Yong, W., Tang, C. J., & Siddique, K. H. (2016). Biochemical and Metabolic Changes in Arsenic Contaminated *Boehmeria nivea* L. *BioMed Research International*, 1, 1423828.
- Nabi, A., Naeem, M., Aftab, T., Masroor, M., & Khan, A. (2019). Arsenic toxicity induced changes in growth, photosynthetic pigments, antioxidant machinery, essential oil, menthol and other active constituents of menthol mint (*Mentha arvensis* L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 22, 1333-1348.
- Najafi kakavand, Sh., Karimi, N., & Ghasempour, H. R. (2019). Salicylic acid and jasmonic acid restrains nickel toxicity by ameliorating antioxidant defense system in shoots of metalicolous and non-metallicolous *Alyssum inflatum* Náyrp population. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 450-459.
- Nazir, F., Hussain, A., & Fariduddin, Q. (2019). Interactive role of epibrassinolide and hydrogen peroxide in regulating stomatal physiology, root morphology, photosynthetic and growth traits in *Solanum lycopersicum* L. under nickel stress. *Environmental and Experimental Botany*, 3, 21.
- Omer, A. M., Dey, R., Eltaweil, A. S., Abd El-Monaem, E. M., & Ziora, Z. M. (2022). Insights into recent advances of chitosan-based adsorbents for sustainable removal of heavy metals and anions. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(2), 103543.
- Osoli, N., & Taleshi, K. (2018). Evaluation the effects of biological fertilizers and vermicompost on some of biological characteristics and essential oil quality of fennel plant (*Foeniculum vulgare* Mill) in Khoramabad. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology*, 4(2), 123-138. (In Persian).
- Pandey, C., Augustine, R., Panthri, M., Zia, I., Bisht, N. C., & Gupta, M. (2017). Arsenic affects the production of glucosinolate, thiol and phytochemical compounds: A comparison of two Brassica cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 111, 144-154.
- Pramanik, P., & Chung, Y. R. (2011). Changes in fungal population of fly ash and vinasse mixture during vermicomposting by *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida*: documentation of cellulase isozymes in vermicompost. *Waste Management*, 31, 1169-1175.
- Rady, M. M., El-Yazal, M. A. S., Taie, H. A. A., & Ahmad, S. M. A. (2016). Response of wheat growth and productivity to exogenous polyamines under lead stress. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 19, 363-371.

- Rahimi, A., & Pour Mohammadi, A. A. (2017). Effects of vermi-compost fertilizer application and foliar spraying on yield and yield component of isabgol (*Plantago ovate* L.) medicinal plant. *Journal of Agroecology*, 9, 834-847.
- Rashid, S., Zafar, M., & Ahmad, M. (2019). Authentication of herbal drug Tukhm-e-balango (*Lallemantia royleana* Benth.) using microscopic, pharmacognostic, and phytochemical characterization. *Microscopy Research and Technique*, 82(6), 731-740.
- Rasouli-Sadaghiani, M., Khodaverdiloo, H., Barin, M., & Kazemalilou, S. (2016). Influence of PGPR Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and some Physiological Parameters of *Onopordon acanthium* in a Cd-Contaminated Soil. *Water and Soil*, 30(2), 542-554. (In Persian).
- Rezaei-Chiyaneh, E., Faridvand, S., Amirnia, R., Mahdavia, H., & Rahimi, A. (2018). Effect of Organic and Biofertilizers on Yield and Some Qualitative Characteristics of the Dragon's Head (*Lallemantia iberica*) in Dryfarming Conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 28(4), 25-40. (In Persian).
- Sadeghi, A. A., Bakhsh Kelarestaghi, K., & Hajmohammadnia Ghalibaf, K. (2014). The effects of vermicompost and chemical fertilizers on yield and yield components of marshmallow (*Althea officinalis* L.). *Journal of Agroecology*, 6(1), 42-50. (In Persian).
- Sairam, R. K., Chandrasekhar, V., & Srivastava, G. C. (2001). Comparison of hexaploid and tetraploid wheat cultivars in their responses to water stress. *Biologia Plantarum*, 44(1), 89-94.
- Salari, H., Amooaghaie, R., & Mozafari, H. (2023). Comparison of the effect of two types of vermicompost on available arsenic in soil, growth and As accumulation in *Carthamus tinctorius* L.. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, (Online).
- Sanal, F., Şeren, G., & Güne, U. (2014). Effects of arsenate and arsenite on germination and some physiological attributes of barley *Hordeum vulgare* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92(4), 483-489.
- Sandeep, G., Vijayalatha, K. R., & Anitha, T. (2019). Heavy metals and its impact in vegetable crops. *International Journal Chemical Studies*, 7(1), 1612-21.
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710-721.
- Sengupta, S., Bhattacharyya, K., Mandal, J., Bhattacharya, P., & Chattopadhyay, A. P. (2023). Zinc and iron enrichment of vermicompost can reduce the arsenic load in rice grain: An investigation through pot and field experiments. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138267.
- Shabbir, A., Abbas, G., Asad, S. A., Razzaq, H., Anwar-ul-Haq, M., & Amjad, M. (2021). Effects of arsenite on physiological, biochemical and grain yield attributes of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): implications for phytoremediation and health risk assessment. *International Journal of Phytoremediation*, 23(9), 890-898.
- Shayesteh Pahangeh, E., Aliarab, A., Sadati, S.-E., Espahbodi, K., & Karimian, Z. (2022). Effect of soil moisture content on survival, growth, and physiological characteristics of wild cherry (*Prunus avium* L.) seedlings. *Iranian Journal of Forest*, 13, 57-69.
- Sirousmehr, A., Arabi, J., & Asgharipour, M. R. (2014). Effect of drought stress levels and organic manures on yield, essential oil content and some morphological characteristics of sweet basil (*Ocimum basilicum*). *Advances in Environmental Biology*, 8(4), 880-885.
- Sreekanth, T. V. M., Nagajyothi, P. C., Lee, K. D., & Prasad, T. N. V. K. V. (2013). Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology (IJEST)*, 10, 1129-1140.
- Sun, S. K., Chen, Y., Che, J., Konishi, N., Tang, Z., Miller, A. J., Ma, J. F., & Zhao, F. J. (2018). Decreasing arsenic accumulation in rice by overexpressing OsNIP 1;1 and OsNIP 3; 3 through disrupting arsenite radial transport in roots. *New Phytologist*, 219(2), 641-653.
- Sun, X., Huang, N., Li, X., Zhu, J., Bian, X., Li, H., Wang, L., Hu, Q., & Luo, H. (2021). A chloroplast heat shock protein modulates growth and abiotic stress response in creeping bentgrass. *Plant, Cell & Environment*, 2021, 1-19.
- Tashakorizadeh, M., & Saeidnejad, A. H. (2016). Effect of different concentrations of chromium (III) on morphological characteristics and essential oil chemical composition of basil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 27, 2-14. (In Persian).

- Xiaolong, H., Hang, H., Liping, C., Aiqin, L., Xiangqing, M., Chuifan, Z., Guo, W., & Fanrui, M. (2018). Pb stress effects on leaf chlorophyll fluorescence, antioxidative enzymeactivities, and organic acid contents of *Pogonatherum crinitum* seedlings. *Flora*, 240, 82-88.
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 11, 359.
- Zadeh-dabbagh, D., Daneshvar, M. H., Azemi, M. E., & Lotfi Jalal-abadi, A. (2017). The effects of phosphate bio-fertilizer and NPK fertilizer on vegetative growth and the amount of phosphorus in potmarigold (*Calendula officinalis* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 27(1), 121-131. (In Persian).
- Zhang, Y., Hu, J., Bai, J., Wang, J., Yin, R., Wang, J., & Lin, X. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate the heavy metal toxicity on sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants cultivated on a heavily contaminated field soil at a WEEE-recycling site. *Science of the Total Environment*, 628, 282-290.