University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 17, No. 3, pp. 583-602 (Fall 2024)

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6281.2202

Original article

Effect of jasmonate and vermicompost on chlorophyll fluorescence and photosynthetic yield in *Dracocephalum moldavica* L. under lead stress condition

R. Rahbarian[1*], E. Azizi[2], A. Behdad[3], A. Mirbolook[4]

1. Department of Biology, Faculty of Science, Payame Noor University, Tehran, Iran
2. Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran
3. Postdoc of Plant Physiology, Department of Biology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
4. PhD in Soil Science and Plant Nutrition, Soil Science Department, Urmia University, Iran

Received 11 April 2023; Accepted 25 June 2023

Extended abstract

Introduction

Dracocephalum moldavica L. is a herbaceous, annual plant from the Lamiaceae family that is native to Central Asia and domesticated in Central and Eastern Europe. Essential oil of this plant has antimicrobial and bacterial properties and has many uses in the pharmaceutical, cosmetic, food and perfumery industries. Lead stress in plants causes disturbances in mitosis, leaf chlorosis, decreasing of the vegetative and productive growth stages and reduces photosynthesis and enzyme activities. One of the effects of lead toxicity is due to the similarity of the structure of calcium ions and lead, and for this reason, lead ions disrupt many mechanisms related to calcium ions and prevent the activity of key enzymes.Photosynthesis is one of the most sensitive metabolic processes to lead toxicity, and several studies have reported the inhibition of photosynthesis under lead stress in various plants. Lead prevents the absorption of elements such as magnesium and iron. These elements play a role in the structure of chlorophyll and the oxygen-releasing complex in photosystem II. Heavy metals such as lead inhibit chlorophyll biosynthesis by inhibiting the enzymes gamma-aminolevalonic acid dehydrogenase and protochlorophyll reductase. Also the availability of different nutrients in the soil changes significantly under the influence of environmental stress so that using of vermicompost can be useful in stress condition as well as Jasmonate. Jasmonate is the final oxidation product of unsaturated fatty acids such as linolenic acid, that is effective in increasing the activity of plant defense systems under environmental stress conditions such as lead stress. In order to study the effect of pb (0, 100, 200, 300, 400 mg kg^{-1} soil) and jasmonate (0, 50, 100, 150 mmol l^{-1}) on *Dracocephalum moldavica* L. under controlled conditions in soil enriched with vermicompost and without vermicompost an experiment designed and it was done under greenhouse conditions.

Materials and methods

This test was done in a random factorial design with 4 repeats and indices including CO_2 assimilation rate, transpiration rate, stomatal conductance, water use efficiency(WUE), PSII photochemical efficiency (Fv/Fm), photosynthesis quantum performance, electron transfer rate (ETR), were measured in vegetative and reproductive growth stages.

*Corresponding author:Saeideh Maleki Rahbarian; E-Mail: a_rahbarian@pnu.ac.ir

© 2024, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Results and discussion

In the conducted study, it was found that CO_2 assimilation rate, water use efficienty, stomatal conductance and Fv/Fm were significantly decreased as lead concentration was increased. Also jasmonate treatment significantly increased CO_2 assimilation rate, water use efficienty, stomatal conductance and Fv/Fm in lead stress condition. So that plant treated with 400 mg kg^{-1} soil pb and 0 mmol l^{-1} jasmonate showed the lowest CO_2 assimilation rate, water use efficienty, stomatal conductance and Fv/Fm while plant treated with 0 mg kg^{-1} soil pb and 150 mmol l^{-1} jasmonate showed the highest CO_2 assimilation rate, water use efficienty, stomatal conductance and Fv/Fm. transpiration rate was significantly increased as well as increasing pb concentration so that plant treated with 400 mg kg^{-1} soil pb showed the highest transpiration rate. Also jasmonate treatment significantly decreased transpiration rate in lead stress condition. Vermicompost increased CO_2 assimilation rate, water use efficienty, electron transfer rate (ETR) and significantly decreased transpiration rate in lead stress condition.

Jasmonate reduces the destructive effects caused by stress on photosynthetic indicators such as the amount of chlorophyll and carotenoids and also increases the performance of photosystem II and consequently increases plant photosynthesis under stress conditions. It has been reported that methyl jasmonate can maintain the concentration of chlorophyll in the reaction center, thereby improving the speed of electron transfer and increasing the efficiency of photosystem II. In addition, jasmonate can prevent the severe reduction of stomatal conductance under stress conditions and increase the quantum efficiency of photosynthesis.

In the response of plants to stress, jasmonates act as genes encoding inhibitory proteins such as theonine, hydroxyproline and proline, and in general, by activating defense mechanisms, they help the plant in reducing the absorption and accumulation of heavy metals. Organic fertilizers can also improve plant performance under environmental stress conditions. Vermicompost fertilizer increases porosity, increases absorption and retention of nutrients, improves ventilation, drainage and microbial activity in the soil.

Conclusion

Having nutritious mineral elements and plant growth hormones can improve plant growth in the presence of environmental pollutants such as heavy metals by influencing the physiological characteristics. It can be said based on the results obtained lead stress decreased photosynthesis index through effect on electron transport chain and photosynthetic pigments while jasmonate treatment and Soil enriched with vermicompost can reduce the destructive effects of lead stress. So that using of jasmonate and vermicompost in lead stress condition Recommended.

Keywords: CO2 assimilation rate, *Dracocephalum moldavica* L, Fertilizer, Fv/Fm, Heavy metal stress

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هفدهم، شماره سوم، پائیز ۱۴۰۳

https://doi.org/10.22077/ESCS.2024.6281.2202

مقاله پژوهشی

بررسی اثر محافظتی جاسمونات و ورمی‌کمپوست بر عملکرد فتوسنتزی و فلورسانس کلروفیل گیاه بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) تحت تنش سرب

راهله رهباریان[1*]، الهام عزیزی[2]، آسیه بهداد[3]، آتنا میربلوک[4]

۱. استادیار، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۲. دانشیار، گروه کشاورزی، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
۳. پسادکترای فیزیولوژی گیاهی، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۴. دکترای علوم خاک و تغذیه گیاهان، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن
بادرشبو
فلز سنگین
کود
Fv/Fm

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۴/۰۴

تاریخ انتشار:
پائیز ۱۴۰۳

۱۷(۳): ۵۸۳-۶۰۲

چکیده

به‌منظور بررسی اثرات سرب و جاسمونات بر شاخص‌های فتوسنتزی بادرشبو، آزمایشی در شرایط گلخانه با پنج سطح سرب (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و چهار سطح جاسمونات (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مول بر لیتر) در خاک غنی‌شده با ورمی‌کمپوست و بدون آن انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد و میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن، تعرق و کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای، نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی (ETR)، عملکرد کوانتومی فتوسنتز (Y) و عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) گیاهان در دو مرحله رشد رویشی و زایشی موردسنجش قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که افزایش غلظت سرب اثر کاهشی بر میزان اسیمیلاسیون، کارایی مصرف آب، عملکرد فتوسیستم II و هدایت روزنه‌ای داشت. جاسمونات میزان اسیمیلاسیون، کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای و عملکرد فتوسیستم II را به‌طور معنی‌داری افزایش داد. به‌طوری‌که گیاهان در تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک سرب و صفر میلی مول بر لیتر جاسمونات، کم‌ترین میزان اسیمیلاسیون، کارایی مصرف آب و عملکرد فتوسیستم II و در تیمار با غلظت صفر سرب و ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات بیش‌ترین میزان اسیمیلاسیون، کارایی مصرف آب و عملکرد فتوسیستم II را به خود اختصاص دادند ($P\leq0.05$). میزان تعرق نیز با افزایش سرب افزایش یافت به‌طوری‌که گیاهان با سرب ۴۰۰ بیش‌ترین تعرق را در هر دو مرحله رشد نشان دادند ($P\leq0.05$). جاسمونات روند تغییرات تعرق ناشی از سرب را کاهشی نمود. اعمال کود سبب افزایش معنی‌دار اسیمیلاسیون، نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی و کارایی مصرف آب و کاهش معنی‌دار تعرق در شرایط تنش سرب گردید. بر این اساس می‌توان گفت که سرب احتمالاً با تأثیر بر مسیر نوری فتوسنتزی و اختلال در مسیر انتقال الکترون فتوسنتزی سبب کاهش اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن و کارایی مصرف آب گشته است و همچنین تیمار جاسمونات و ورمی‌کمپوست اثرات تخریبی سرب را جبران نموده است.

مقدمه

بادرشبو که با نام علمی (*Dracocephalum moldavica* L.) شناخته می‌شود، گیاهی علفی، یک‌ساله از خانواده Lamiaceae که بومی آسیای مرکزی و اهلی‌شده در مرکز و شرق اروپاست. این گیاه به دلیل دارا بودن ترکیبات معطر به‌عنوان مقوی قلب و آرام‌بخش مصرف سنتی دارد. وجود فلاونوئید لوتئولین در این گیاه آن را نامزد مناسب برای استفاده در برونشیت‌های مزمن می‌نماید. بادرشبو به‌عنوان چاشنی غذا، در دردهای معده و کبد، دندان‌درد و انعقاد خون مورداستفاده قرار می‌گیرد. عصاره این گیاه علیه تومورها مؤثر بوده و از آن به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان و ضد جهش‌های ژنتیکی استفاده می‌شود (Asghari et al., 2015). اسانس بادرشبو دارای خاصیت ضدمیکروبی و باکتریایی بوده و در

* نگارنده پاسخگو: راهله رهباریان. پست الکترونیک: a_rahbarian@pnu.ac.ir

صنایع داروسازی، آرایشی و بهداشتی، غذایی و عطرسازی کاربردهای فراوانی دارد (Fatahi et al., 2013).

سرب رایج‌ترین فلز سنگین آلاینده در محیط محسوب می‌شود. سرب در گیاهان باعث اختلال در میتوز، کلروز برگ، توقف رشد ریشه و ساقه و کاهش فتوسنتز می‌گردد و بر روی فعالیت‌های آنزیمی تأثیرگذار است. سرب نه‌تنها بر روی رشد گیاهان اثرگذاراست، بلکه با وارد شدن به چرخه غذایی سبب ایجاد خطرات برای انسان و دام‌ها می‌گردد (Mosavi et al., 2013). متوسط غلظت کل سرب در خاک‌های مناطق مرکزی ایران را ۲۵/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش و مهم‌ترین مسیر ورود سرب به خاک‌های زراعی این مناطق را استفاده از کودهای دامی گزارش نموده‌اند (Molaei et al., 2016). فلزات سنگین بر روی کمپلکس جذب‌کننده نور، فرگشت اکسیژن و ساختمان سیتوکروم کلروپلاست‌های برگ تأثیر می‌گذارند و از این طریق سبب کاهش میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن و نیز کاهش بازده فتوسنتز کل می‌گردند (Mosavi et al., 2013). فتوسنتز از حساس‌ترین فرآیندهای متابولیکی نسبت به سمیت سرب است و مطالعات متعددی بازدارندگی فتوسنتز تحت تنش سرب را در گیاهان مختلف گزارش کرده‌اند (Asadi et al., 2019).

یکی از آثار سمیت سرب به علت تشابه ساختار یونی کلسیم و سرب است. این تشابه ساختاری سبب شده است که سرب بتواند در بسیاری از مسیرهای ترارسانی علامت جایگزین کلسیم گردد و بنابراین این مسیرهای ترارسانی علامت را مختل نماید (Ranjbar et al., 2011).

در سال‌های اخیر استفاده از روش فلورسانس کلروفیل به‌طور گسترده در بسیاری از مطالعات اکوفیزیولوژی بکار گرفته شده است. اثرات تنش‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت و آسیب به اجزای فتوسنتز کننده را می‌توان از طریق فلورسانس کلروفیل تشخیص داد و به‌محض اینکه عامل تنش‌زا از روی گیاه برداشته شود، فلورسانس کلروفیل به حالت اولیه بازمی‌گردد (Poonam et al., 2013). کم بودن مقدار عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) نشان‌دهنده این است که بخشی از مراکز واکنش فتوسیستم دو آسیب دیده است و پدیده مهارسازی نوری (Photoinhibition) رخ داده است (Poonam et al., 2013; Parvaiz et al., 2017).

در پژوهش‌های اخیر به نقش کود ورمی‌کمپوست در بهبود رشد گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین اشاره شده است (Pirzadah et al., 2019). دسترسی عناصر غذایی مختلف در خاک تحت تأثیر تنش‌های محیطی تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد. گیاهی که خوب تغذیه‌شده و مقدار کافی عناصر غذایی را دریافت کرده باشد، مقاومت بهتری به تنش‌های محیطی ازجمله فلزات سنگین خواهد داشت و در این راستا کمیت و کیفیت محصول نیز تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (Pirzadah et al., 2019). شناخت بهتر نقش عناصر غذایی در مقاومت گیاهان به تنش، با مدیریت کود در مناطق مختلف در ارتباط است.

یکی از تکنیک‌های متداول برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، تثبیت فلزات سنگین در خاک است. این تکنیک با استفاده از مواد طبیعی با سطح ویژه زیاد و تمایل شدید جذب برای فلزات سنگین انجام می‌گیرد. در پژوهش انجام‌شده توسط مولایی و همکاران (Molaei et al., 2016) مشخص گردید که با افزودن ورمی‌کمپوست و پوست پسته به خاک به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های آلی خاک، غلظت کادمیوم، سرب و روی در ریشه و اندام هوایی گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و همچنین افزودن ورمی‌کمپوست به خاک توانست شاخص‌های مورفولوژیکی و فتوسنتزی گیاه را در خاک آلوده به فلزات سنگین بهبود بخشد. همچنین در این پژوهش گزارش شده است که تیمار ورمی‌کمپوست می‌تواند در تثبیت فلزات سنگین در خاک بسیار مؤثر باشد؛ بنابراین استفاده از کود ورمی‌کمپوست می‌تواند کاندیدای مناسبی جهت کاهش اثرات تخریبی ناشی از تنش فلزات سنگین باشد.

جاسمونات نیز که فراورده نهایی اکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع همانند لینولنیک است، در افزایش فعالیت سیستم‌های دفاعی گیاهان تحت شرایط تنش‌های محیطی تأثیرگذار است (Kim et al., 2021). امروزه نتایج بررسی‌ها در مورد کاربرد جاسمونات نشان داده است که جاسمونات تأثیر مثبتی بر افزایش قدرت تحمل گیاه به تنش نشان می‌دهد. افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب، وزن تر و خشک اندام هوایی و میزان کلروفیل در گیاهان تحت تیمار با غلظت ۶۰ میکرومولار جاسمونات تحت تنش شوری گزارش شده است (Vatankhah et al., 2015). این هورمون گیاهی با فعالیت آنزیم لیپوکسیژناز و از پراکسیدهای لیپیدی تشکیل می‌شود. گزارش‌هایی وجود دارد که این هورمون در نتیجه تنش اکسیداتیو القاء شده با فلزات سنگین نیز تولید می‌شود. در واکنش گیاهان به تنش، جاسمونات به‌عنوان کدکننده ژن‌های پروتئین‌های بازدارنده نظیر تئونین، هیدروکسی پرولین

و پرولین عمل می‌کند و به‌طورکلی با فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی، گیاه را در کاهش جذب و تجمع فلزات سنگین یاری می‌رساند (Chavoushi et al., 2019).

با توجه به اینکه بررسی منابع نشان داد تاکنون پژوهشی در زمینه اثر متقابل فلز سنگین سرب و جاسمونات روی گیاه بادرشبو انجام نشده است و با توجه به مشخص شدن نقش کود ورمی‌کمپوست در تثبیت فلز سنگین در خاک و جلوگیری از انتقال آن به اندام هوایی گیاه و همچنین بهبود رشد گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین، این کار تحقیقی با هدف بررسی تأثیر مقادیر مختلف جاسمونات و ورمی-کمپوست و همچنین بررسی اثر توأم این دو تیمار بر شاخص-های فتوسنتزی، زنجیره انتقال الکترون و فلورسانس کلروفیل گیاه دارویی بادرشبو تحت تنش فلز سنگین سرب انجام شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. هر واحد آزمایشی در این آزمایش از یک گلدان به حجم ۲/۵ لیتر تشکیل شد که از خاک مزرعه پر گردید. این تحقیق در بهار و تابستان سال ۱۴۰۱ در گلخانه دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. خاک گلدان‌ها تحت تیمار نیترات سرب [$Pb(NO_3)_2$] با غلظت‌های (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) قرار گرفت (Asadi et al., 2019). (محاسبه میزان سرب بر اساس غلظت سرب موجود در ترکیب بوده و به همین میزان به خاک نمونه‌های شاهد نیتروژن افزوده شد). سپس بذر گیاه در خاک گلدان‌ها کاشته شد و چهار سطح متیل جاسمونات (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مول بر لیتر) در طول مدت رشد بر روی اندام هوایی محلول‌پاشی شد.

بستر کشت گیاه حاوی خاکی بود که از قبل به عنصر سنگین سرب آلوده شده بود. نحوه آلوده‌سازی خاک این‌گونه بود که نیترات سرب در غلظت‌های ذکرشده در آب حل‌شده (میزان انحلال‌پذیری این ماده در آب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس ۵۲ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب است) و خاک زراعی (جدول ۱) (لومی رسی با pH=۷/۷۵ و هدایت الکتریکی ۱/۱۴ دسی زیمنس بر متر) به ضخامت ۱ یا ۲ سانتیمتر روی پلاستیک پهن‌شده و اسپری غلظت‌های مختلف نیترات سرب روی خاک جهت آلوده سازی آن انجام شد. برای اینکه شرایط آلودگی خاک به عنصر سنگین تا حدی شبیه شرایط طبیعی موجود در زمین‌های آلوده گردد، نمونه‌های تیمار شده تا حد ظرفیت زراعی مرطوب شده و به مدت ۳۰ روز در این حد رطوبتی ثابت جهت به تعادل رسیدن خاک با فلز سنگین سرب نگه‌داشته شدند (Asadi et al., 2021). پس‌ازاین مدت نمونه‌ها هوا خشک گردید و پس از نرم کردن کلوخه‌ها خاک‌آلوده شده در هر گلدان ریخته شد. خصوصیت فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده در جدول ۱ آورده شده است.

گیاهان تحت خاک غنی‌شده با کود ورمی‌کمپوست به میزان ۱۰۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و بدون کود ورمی‌کمپوست کشت داده شدند. قبل از کاشت گیاهان، خاک ابتدا با کود ورمی‌کمپوست (جدول ۱) مخلوط شده (به ازای هر ده کیلوگرم خاک ۱۰۰ گرم کود به خاک اضافه شد) و پس از گذشت یک دوره ۳۰ روزه استراحت جهت به تعادل رسیدن خاک با ماده آلی، سپس خاک به گلدان‌ها اضافه گردید (Kabosi and Nodehi, 2017).

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و ورمی‌کمپوست

Table1. Physicochemical characteristics of soil and vermicompost

ویژگی‌های ورمی‌کمپوست Vermicompost characteristics			ویژگی‌های خاک Soil characteristics		
pH		7.5	pH		7.75
EC	$dS.m^{-1}$	1.2	EC	$dS.m^{-1}$	1.14
C	%	25	K	ppm	118
N	%	2	P	ppm	7.1
P	%	1.5	N	ppm	298
Zn	ppm	150	Pb	ppm	ND
Fe	ppm	8000	Soil texture		لوم- سیلتی
Cu	ppm	20	Cu	ppm	ND
Mn	ppm	650	Mn	ppm	ND
B	ppm	30	B	ppm	ND

ND:none detected

درصد رطوبت خاک از طریق اندازه‌گیری درصد وزنی روزانه رطوبت خاک و اضافه نمودن آب مصرفی توسط هر گلدان، تنظیم شد. گلدان‌ها در گلخانه با درجه‌حرارت روز و شب به ترتیب ۲۱ و ۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۲/۵ ساعت روشنایی و ۱۱/۵ ساعت تاریکی قرار گرفتند. محلول متیل جاسمونات با غلظت‌های ۵۰،۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مول بر لیتر (Sigma–Aldrich) تهیه گردید و برگ‌های گیاه با این محلول‌ها اسپری شدند. پس از استقرار گیاهان در گلدان (۴ تا ۶ برگی)، محلول‌پاشی تیمارهای متیل جاسمونات هر ده روز یک‌بار انجام شد. محلول‌پاشی با اسپری و تا حدی که پشت و روی تمام برگ‌های گیاه کاملاً خیس شود اعمال شد. نمونه‌برداری برای مرحله رویشی، پس از گذشت یک هفته از دومین بار محلول‌پاشی و نمونه‌برداری برای مرحله زایشی در مرحله گلدهی پس از گذشت یک هفته از چهارمین بار محلول‌پاشی (۷۰ روز پس از کاشت گیاهان) اعمال شد.

تعیین پارامترهای تثبیت کربن

میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن و میزان تعرق در ۱ سانتی‌متر مربع از سطح برگ جوان با دستگاه Infra red - Gas Analyzer IRGA, LCA4 (ADC Bio. Scientific Ltd., Herfordshire, UK) اندازه‌گیری شد. کارایی لحظه‌ای مصرف آب نیز از نسبت میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن به میزان تعرق محاسبه شد (Ahmed et al., 2002).

تعیین شاخص‌های فتوسنتزی

میزان کارایی فتوسیستم II ژنوتیپ‌ها به‌وسیله دستگاه کلروفیل فلورومتر اندازه‌گیری و ثبت شد. برای اندازه‌گیری میزان کارایی فتوسیستم II، ابتدا سطح برگ‌های جوان توسعه یافته با قرار گرفتن گیره بر روی آن‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در شرایط تاریکی قرار گرفت و سپس با اتصال رابط دستگاه به برگ و تنظیم دستگاه، کارایی فتوسیستم II به‌وسیله دستگاه کلروفیل فلورومتر مدل OS5-FI اندازه‌گیری شد. نسبت F_v (تفاوت حداکثر فلورسانس با حداقل فلورسانس $[F_m-F_0]$) به F_m (حداکثر فلورسانس) توسط دستگاه اندازه‌گیری شد. F_0: کارایی فلورسانس در غیاب نور فتوسنتزی است که همان حداقل فلورسانس است که با استفاده از یک نور ضعیف (m^- ۰/۴ $\mu mol.^2.s^{-1}$) اندازه‌گیری شد. F_m (حداکثر فلورسانس) با استفاده از یک نور اشباع ($۸۰۰۰ m^{-2}.s^{-1}.\mu mol$) به مدت ۰/۸ ثانیه اندازه‌گیری شد. نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی (ETR) و عملکرد کوانتومی فتوسنتز (Y) نیز در گیاهان بدون تیمار تاریکی، با دستگاه کلروفیل فلورومتر مدل OS5-FI اندازه‌گیری شد (Maxwell and Johnson, 2000).

تحلیل داده‌ها

پس از اندازه‌گیری صفات موردبررسی، تجزیه‌وتحلیل آماری شامل آنالیز واریانس به‌وسیله نرم‌افزارهای JMP و MSTAT-C صورت گرفتند. اثرات ساده، اثرات متقابل جاسمونات/ورمی‌کمپوست، جاسمونات/ سرب و سرب ورمی‌کمپوست و درنهایت اثرات سه‌گانه جاسمونات/ورمی‌کمپوست/سرب بررسی گردید. سپس مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح ۵ درصد انجام شد و جداول ترسیم شدند. لازم به ذکر است که با توجه به معنی‌دار شدن آنالیز واریانس اثرات متقابل جاسمونات/ورمی‌کمپوست/سرب، جدول مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه ارائه گردید و جداول مربوط به اثرات ساده و متقابل جاسمونات/ورمی‌کمپوست، جاسمونات/ سرب و سرب ورمی‌کمپوست در متن مقاله آورده نشده است.

نتایج و بحث

تجزیه واریانس میانگین شاخص‌های مورد ارزیابی نشان داد که اثر جاسمونات، سرب و ورمی‌کمپوست و اثرات متقابل آن‌ها بر اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن، تعرق، کارایی مصرف آب و هدایت روزنه‌ای در مرحله رویشی و زایشی (به‌استثناء اثر ورمی‌کمپوست بر هدایت روزنه‌ای در مرحله رویشی و اثر ورمی‌کمپوست بر تعرق در مرحله زایشی) معنی‌دار است (جدول ۲).

اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن

در بررسی اثر سرب بر میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن در هر دو مرحله رویشی و زایشی مشخص شد که با افزایش غلظت سرب میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن کاهش معنی‌داری نشان داد به‌طوری‌که غلظت صفر و ۴۰۰ سرب به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان اسیمیلاسیون را در هر دو مرحله رویشی و زایشی به خود اختصاص دادند (جدول ۳).

در بررسی اثر جاسمونات نیز بر میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن در هر دو مرحله رویشی و زایشی مشخص شد

که با افزایش غلظت جاسمونات، میزان اسیمیلاسیون دی-اکسید کربن افزایش معنی‌داری داشت (جدول ۲)، به‌طوری‌که غلظت صفر و ۱۵۰ جاسمونات به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین میزان اسیمیلاسیون را در هر دو مرحله رویشی و زایشی به خود اختصاص دادند ($p\leq0.05$). با افزایش غلظت جاسمونات افزایش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در میزان اسیمیلاسیون دی-اکسید کربن نسبت به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات در مرحله رویشی و زایشی مشاهده شد (جدول ۳).

جدول ۲. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر جاسمونات، سرب و ورمی‌کمپوست بر برخی صفات فیزیولوژیکی بادرشبو

Table 2. MANOVA (mean squares) for the effects of jasmonate levels and vermicompost treatments on Dracocephalum moldavica L.physiological characteristics under lead stress

		Vegetative growth	رشد رویشی				
S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی Df	اسیمیلاسیون A	تعرق E	کارایی مصرف آب WUE	هدایت روزنه‌ای gs	اختلاف غلظت CO_2 ΔC
Jasmonate (J)	جاسمونات	3	21.30**	0.007**	2327.53**	0.001**	12.00**
Lead (L)	سرب	4	6.95**	0.014**	1094.50**	0.0005**	48.36**
Jasmonate×lead	جاسمونات×سرب	12	23.37**	0.015**	929.04**	0.0005**	19.30**
Vermicompost (V)	ورمی‌کمپوست	1	20.80**	0.002**	55.91**	0.000^{ns}	18.73**
J× V	جاسمونات ×ورمی‌کمپوست	3	20.09**	0.004**	1877.93**	0.001**	22.2**
L× V	سرب× ورمی‌کمپوست	4	6.86**	0.013**	1735.26**	0.0005**	51.65**
J× L × V	جاسمونات ×سرب×ورمی‌کمپوست	12	21.21**	0.021**	1530.79**	0.002**	39.3**
Error	خطا	80	0.13	0.0003	6.84	0.00002	0.61
C.V (%)	ضریب تغییرات (درصد)		*16.14*	*14.590*	*11.56*	*17.650*	*20.07*

		Reproductive growth	رشد زایشی				
S.O.V	منابع تغییر	درجه آزادی Df	اسیمیلاسیون A	تعرق E	کارایی مصرف آب WUE	هدایت روزنه‌ای gs	اختلاف غلظت CO_2 ΔC
Jasmonate (J)	جاسمونات	3	2.86**	0.030**	1521.23**	0.019**	79.29**
Lead (L)	سرب	4	14.78**	0.069**	593.51**	0.007**	252.22**
J× L	جاسمونات×سرب	12	14.86**	0.073**	1466.57**	0.019**	181.33**
Vermicompost (V)	ورمی‌کمپوست	1	15.43**	0.002^{ns}	93.45**	0.008**	340.05**
J× V	جاسمونات× ورمی‌کمپوست	3	1.61**	0.090**	253.27**	0.025**	138.53**
L× V	سرب ×ورمی‌کمپوست	4	23.23**	0.076**	1673.92**	0.043**	258.08**
J× L × V	جاسمونات×سرب × ورمی‌کمپوست	12	5.15**	0.0330**	1036.78**	0.014**	315.85**
Error	خطا	80	0.19	0.002	0.982	0.001	1.56
C.V (%)	ضریب تغییرات (درصد)		*20.47*	*14.250*	*7.022*	*20.12*	*13.49*

** and * significant at $p\leq0.01$ and $p\leq0.05$, respectively

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

جدول ۳. مقایسه میانگین شاخص‌های فیزیولوژیکی بادرشبو تحت اثر متقابلجاسمونات، سرب و ورمی‌کمپوست

Table 3.effects of interaction between jasmonate levels, Lead levels and vermicompost treatments on *Dracocephalum moldavica* L.on physiological characteristics

			Vegetative growth			رشد رویشی	
					کارایی مصرف	هدایت	اختلاف
ورمی‌کمپوست	جاسمونات	سرب	اسیمیلاسیون	تعرق	آب	روزنه‌ای	غلظت Co_2
Vermicompost	Jasmonate	Lead	A	E	WUE	gs	ΔC
t.ha^{-1}	mmol.l^{-1}	mg.kg^{-1}	µmol m^{-2}s^{-1}	µmol.m^{-2}s^{-1}	%	µmol m^{-2}s^{-1}	
0	0	0	2.540^{fg}	0.045^{t-w}	5.720^{s-w}	0.050^{d}	5.250^{g}
		100	1.210^{j-n}	0.065^{q-u}	18.730^{kl}	0.020^{hi}	2.675^{j-o}
		200	0.880^{m-p}	0.055^{r-u}	16.020 ^{wx}	0.015^{ij}	7.100^{f}
		300	0.230^{q-t}	0.080^{n-r}	2.930^{v-x}	0.010^{j}	2.800^{j-n}
		400	0.160st	0.367^{a}	0.430 ^{x}	0.010^{j}	4.125^{g-i}
		Mean	1.004	0.122	8.766	0.021	4.390
	50	0	2.960^{f}	0.098^{k-o}	30.200^{f-h}	0.060^{c}	4.095^{g-i}
		100	1.580 $^{h-k}$	0.110 $^{j-m}$	14.360^{m-p}	0.040^{e}	4.325^{gh}
		200	0.790 $^{m-q}$	0.125 $^{h-k}$	6.360^{r-u}	0.025^{gh}	3.000^{i-m}
		300	0.640^{n-t}	0.140^{g-i}	4.480^{t-w}	0.020^{hi}	1.500^{o-s}
		400	0.190^{r-t}	0.180^{ef}	1.080^{wx}	0.020^{hi}	1.200^{p-s}
		Mean	1.232	0.131	11.296	0.033	2.824
	100	0	5.140^{d}	0.025^{vw}	205.830^{b}	0.060^{c}	1.000^{q-s}
		100	2.040^{gh}	0.055^{r-u}	37.180^{f}	0.027^{gh}	1.425^{o-s}
		200	1.850^{hi}	0.085^{m-q}	21.720^{jk}	0.025^{gh}	11.075^{b}
		300	0.880^{m-p}	0.090^{l-p}	9.780^{q-t}	0.015^{ij}	0.500^{s}
		400	0.32^{0} $^{p-t}$	0.095^{l-p}	3.420^{u-x}	0.011^{j}	0.750^{rs}
		Mean	2.046	0.070	277.930	0.028	2.950
	150	0	6.640^{c}	0.065 $^{p-u}$	102.150^{d}	0.070^{b}	3.550^{h-l}
		100	5.400^{d}	0.080^{n-r}	67.500^{ef}	0.057^{cd}	8.600^{de}
		200	2.450^{fg}	0.105^{k-n}	23.340^{ij}	0.030^{fg}	0.450^{s}
		300	1.090^{k-o}	0.168^{fg}	6.480^{r-u}	0.015^{ij}	0.750^{rs}
		400	0.780^{m-r}	0.200^{c-e}	3.920^{u-x}	0.017^{ijk}	5.250^{g}
		Mean	3.272	0.108	40.678	0.038	3.720
10	0	0	2.080^{gh}	0.060^{q-u}	34.750^{f}	0.040^{e}	7.350^{ef}
		100	1.700^{h-j}	0.110^{j-m}	15.450^{l-o}	0.037^{ef}	3.800^{h-j}
		200	1.300^{i-m}	0.120^{i-l}	10.830^{p-r}	0.034^{ef}	13.450^{a}
		300	0.950^{l-o}	0.125^{h-k}	7.620^{r-u}	0.030^{fg}	1.600^{n-s}
		400	0.160st	0.245^{b}	0.670^{wxy}	0.015^{ij}	1.600^{n-s}
		Mean	1.238	0.132	13.864	0.031	5.560
	50	0	4.310^{e}	0.040^{u-w}	107.150^{cd}	0.050^{d}	2.800^{j-n}
		100	0.950^{l-o}	0.073^{o-s}	13.020^{m-p}	0.037^{ef}	3.625^{h-k}
		200	0.560^{o-t}	0.078^{n-s}	7.250^{r-u}	0.015^{ij}	1.850^{m-r}
		300	0.500^{o-t}	0.120^{i-l}	4.210^{-w}	0.020^{hi}	2.150^{m-q}
		400	0.350^{p-t}	0.190^{d-f}	1.830^{wx}	0.010^{j}	9.675^{cd}
		Mean	1.334	0.100	26.692	0.026	4.020
	100	0	8.490^{b}	0.050^{sv}	169.830^{c}	0.050^{d}	3.750^{h-j}
		100	4.000^{e}	0.060^{q-u}	66.930^{e}	0.035^{ef}	6.775^{f}
		200	2.080^{gh}	0.070^{o-t}	29.720^{fg}	0.027^{gh}	10.100^{bc}
		300	1.500^{h-l}	0.070^{o-t}	21.430^{jk}	0.025^{gh}	2.400^{k-p}
		400	0.500^{o-t}	0.215^{cd}	2.340^{v-x}	0.015^{ij}	0.767^{rs}
		Mean	3.314	0.093	58.050	0.030	4.758
	150	0	9.590^{a}	0.025^{vw}	383.630^{a}	0.080^{a}	1.450^{o-s}
		100	9.270^{a}	0.057 $^{q-u}$	162.830^{cd}	0.037^{ef}	1.250^{p-s}
		200	2.500^{fg}	0.059 $^{q-u}$	41.110^{e}	0.037^{ef}	2.100^{m-q}
		300	1.160^{j-n}	0.061 $^{r-t}$	3.130^{u-x}	0.020^{hi}	7.500^{ef}
		400	0.730^{m-s}	0.220^{bc}	3.130^{u-x}	0.015^{ij}	1.450^{o-s}
		Mean	4.650	0.084	118.766	0.038	2.750
LSD			*0.590*	*0.028*	*4.250*	*0.007*	*1.269*

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین ها در هر شاخص موردبررسیمی‌باشد

Values with the same letter within an index are not significantly different ($p \leq 0.05$)

Table 3. Continued

جدول ۳. ادامه

			Reproductive growth			رشد زایشی	
ورمی‌کمپوست Vermicompost	جاسمونات Jasmonate	سرب Lead	اسیمیلاسیون A	تعرق E	کارایی مصرف آب WUE	هدایت روزنه‌ای Gs	اختلاف غلظت Co_2 ΔC
$t.ha^{-1}$	$mmol.l^{-1}$	$mg.kg^{-1}$	$\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$	$\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$	%	$\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$	
0	0	0	2.680^{e}	0.190^{l-o}	17.764^{g}	0.143^{d-g}	40.600^{a}
		100	1.870^{f-j}	0.200^{l-n}	4.219^{l-p}	0.070^{k-o}	3.000^{n-q}
		200	1.450^{h-k}	0.420^{c-f}	7.267^{ij}	0.065^{k-o}	7.383^{ij}
		300	1.000^{k-m}	0.435^{cde}	5.254^{kl}	0.058^{l-p}	8.450^{ij}
		400	0.450^{m-o}	0.571^{a}	2.254^{q-s}	0.055^{l-p}	9.025^{hi}
		Mean	1.490	0.363	7.352	0.078	13.692
	50	0	3.430^{d}	0.165 $^{l-k}$	24.742^{d}	0.235^{b}	20.150^{d}
		100	1.940^{f-i}	0.188 $^{l-o}$	6.374^{jk}	0.170^{cd}	8.150^{ij}
		200	1.280^{i-l}	0.360 $^{e-h}$	3.108^{m-q}	0.155^{d-f}	5.150^{k-m}
		300	1.260^{i-l}	0.387 $^{e-h}$	2.720^{p-r}	0.125^{d-i}	6.525^{j-l}
		400	0.170^{o}	0.530^{ab}	0.322^{t}	0.035^{n-p}	6.800^{jk}
		Mean	1.616	0.326	7.453	0.144	9.355
	100	0	4.490^{c}	0.125^{op}	20.170^{f}	0.170^{cd}	34.400^{b}
		100	1.510^{g-k}	0.135^{n-p}	2.682^{p-r}	0.137^{d-h}	8.200^{ij}
		200	1.470^{h-k}	0.343^{g-}	4.630^{lm}	0.065^{k-o}	4.650^{l-n}
		300	0.880^{ko}	0.370^{e-h}	2.382^{qr}	0.045^{m-p}	7.025^{i-k}
		400	0.590^{l-o}	0.445^{cd}	4.718^{lm}	0.040^{m-p}	2.400^{o-r}
		Mean	1.788	0.284	6.916	0.091	11.335
	150	0	5.000^{c}	0.123 ^{op}	37.883^{c}	0.120^{d-j}	11.383^{g}
		100	2.580^{ef}	0.155^{l-o}	7.404^{ij}	0.120^{d-j}	4.450^{mn}
		200	1.230^{i-l}	0.320^{hii}	8.121^{i}	0.090^{h-m}	21.350^{d}
		300	0.400^{m-o}	0.355^{fghi}	1.180^{r-t}	0.040^{mp}	10.600^{gh}
		400	0.270^{no}	0.423^{c-f}	0.656st	0.027^{op}	2.800^{n-q}
		Mean	1.896	0.275	11.049	0.079	10.117
10	0	0	4.640^{c}	0.145^{m-o}	20.990^{f}	0.127^{d-i}	10.800^{gh}
		100	2.150^{e-h}	0.213^{lm}	13.754^{h}	0.110^{e-k}	7.950^{ij}
		200	1.430^{i-k}	0.290^{i-k}	4.342^{l-o}	0.063^{k-p}	1.525^{p-s}
		300	1.270^{i-l}	0.333^{g-i}	4.459^{l-n}	0.070^{k-p}	3.475^{m-p}
		400	1.250^{i-l}	0.418 $^{c-f}$	2.656^{p-r}	0.025^{op}	0.767^{rs}
		Mean	2.148	0.280	9.240	0.079	4.903
	50	0	4.950^{c}	0.137 $^{n-p}$	22.682^{e}	0.433^{a}	4.250^{m-o}
		100	2.210^{e-g}	0.205 $^{l-n}$	5.271^{kl}	0.220^{bc}	15.000^{ef}
		200	1.380^{i-k}	0.270^{ij}	4.670^{lm}	0.105^{f-l}	0.315^{s}
		300	1.230^{i-l}	0.313 $^{g-i}$	2.804^{o-q}	0.133 $^{d-i}$	4.450^{mn}
		400	0.980^{k-n}	0.410^{cd}	2.721^{p-r}	0.090^{h-m}	1.267^{q-s}
		Mean	2.150	0.267	7.630	0.196	5.056
	100	0	9.270^{a}	0.130 $^{n-p}$	19.791^{f}	0.233^{b}	15.500^{ef}
		100	2.760^{de}	0.200^{j-l}	12.917^{h}	0.160^{de}	14.450^{f}
		200	1.490^{h-k}	0.202^{l-n}	7.466^{ij}	0.130^{d-i}	1.500^{p-s}
		300	1.450^{h-k}	0.245^{ijk}	7.380^{ij}	0.125^{d-i}	7.900^{ij}
		400	1.430^{i-k}	0.353^{fghi}	4.076^{l-p}	0.065^{k-o}	4.575^{l-n}
		Mean	3.280	0.226	10.326	0.143	8.785
	150	0	7.350^{b}	0.125^{op}	59.195^{b}	0.157^{de}	23.925^{c}
		100	2.820^{de}	0.128 ^{opq}	109.365^{a}	0.112 $^{g-l}$	2.400^{o-r}
		200	1.340^{i-k}	0.167^{pq}	20.067^{f}	0.025^{op}	8.075^{ij}
		300	1.190^{j-l}	0.203 $^{l-n}$	2.980^{n-q}	0.035^{n-p}	3.125^{m-q}
		400	0.990^{k-m}	0.332 $^{g-i}$	2.057^{q-s}	0.012^{p}	16.675^{e}
		Mean	2.738	0.191	38.733	0.068	10.840
LSD			*0.71*	*0.073*	*1.160*	*0.051*	*2.029*

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین ها در هر شاخص موردبررسی می‌باشد

Values with the same letter within an index are not significantly different ($p \leq 0.05$)

افزایش غلظت سرب تا ۴۰۰ نیز در هر دو مرحله رویشی و زایشی سبب کاهش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در میزان اسیمیلاسیون نسبت به سطوح پایین‌تر سرب و شاهد شد (جدول ۲). بدین ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن در گیاهان تحت تیمار با سرب در هر دو مرحله موردبررسی به ترتیب به گروه شاهد (۱/۹۳ $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) و گروه تحت تیمار با غلظت ۴۰۰ سرب (۱/۱۱ $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) اختصاص یافت (جدول ۳). اعمال کود ورمی‌کمپوست به میزان ۱۰ تن در هکتار در هر دو مرحله رویشی و زایشی به‌طور معنی‌داری ($p\leq0.05$) میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن را نسبت به شرایط عدم اعمال کود افزایش داد (جدول ۳).

در بررسی اثرات متقابل جاسمونات/سرب/ورمی‌کمپوست بر میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن در هر دو مرحله رویشی و زایشی مشخص شد که با افزایش غلظت سرب در هر دو گروه تحت تیمار با کود ورمی‌کمپوست و بدون اعمال کود، میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن روند کاهشی داشت که این روند با اعمال جاسمونات تعدیل شد. به‌طوری‌که در هر گروه افزایش غلظت جاسمونات سبب ایجاد روند افزایشی در اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن شد. در مرحله رویشی در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست بیش-ترین میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت (۶/۶۴ $mol.m^{-2}.s^{-1}$). در گروه تحت اعمال کود نیز بیشترین میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب ($\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ ۹/۵۹) اختصاص یافت (جدول ۳). در گروه تیمار کود ورمی-کمپوست، میزان اسیمیلاسیون در گروه تحت تیمار با غلظت ۲۰۰ سرب و ۱۵۰ جاسمونات تفاوت معنی‌داری با گروه تحت اعمال غلظت صفر جاسمونات و غلظت صفر سرب نشان نداد بر این اساس می‌توان گفت که در شرایط اعمال کود، تیمار جاسمونات با غلظت ۱۵۰ می‌تواند به‌خوبی اثرات تخریبی ناشی از تنش سرب تا غلظت ۲۰۰ را تعدیل نماید و سطح اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن را تا محدوده میزان اسیمیلاسیون گیاه بدون تنش بالا ببرد (جدول ۳).

نتایج اسیمیلاسیون در مرحله زایشی

در مرحله زایشی نیز با افزایش در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست بیش‌ترین میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب (۵ $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) اختصاص یافت که تفاوت معنی‌داری با گروه تحت اعمال با غلظت ۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب (۴/۴۹ $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) نداشت. در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت (۷/۳۵ $\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$) که به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از مقدار اسیمیلاسیون در شرایط مشابه اما بدون کود بود بنابراین تأثیر معنی‌دار ($p\leq0.05$) اعمال کود بر افزایش میزان اسیمیلاسیون در شرایط تنش سرب قابل نتیجه‌گیری است (جدول ۳).

میزان تعرق

در بررسی اثر جاسمونات بر میزان تعرق در مرحله رویشی مشخص شد که با افزایش غلظت جاسمونات، میزان تعرق کاهش معنی‌داری داشت ($p\leq0.05$)، به‌طوری‌که غلظت صفر و ۱۵۰ جاسمونات به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان تعرق را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). جاسمونات بر میزان تعرق در مرحله زایشی نیز روند کاهشی داشت ($p\leq0.05$). افزایش غلظت سرب در ۴۰۰ نسبت به شاهد در هر دو مرحله رویشی و زایشی افزایش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در میزان تعرق ایجاد نمود (جدول ۳). اعمال کود ورمی‌کمپوست به میزان ۱۰ تن در هکتار در مرحله رویشی به‌طور معنی‌داری ($p\leq0.05$) میزان تعرق را نسبت به شرایط عدم اعمال کود کاهش داد (جدول ۲)، اما در مرحله زایشی اثر اعمال کود ورمی‌کمپوست بر تغییرات میزان تعرق معنی‌دار نبود (جدول ۳).

در بررسی اثرات متقابل جاسمونات/سرب/ورمی‌کمپوست بر میزان تعرق در هر دو مرحله رویشی و زایشی مشخص شد که با افزایش غلظت سرب در هر دو گروه تحت تیمار با کود ورمی‌کمپوست و بدون اعمال کود، میزان تعرق روند افزایشی داشت که این روند با اعمال جاسمونات تعدیل شد به‌طوری‌که در هر گروه افزایش غلظت جاسمونات سبب ایجاد روند کاهشی در میزان تعرق شد ($p\leq0.05$). در مرحله رویشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست بیش‌ترین میزان تعرق به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب و کم‌ترین آن به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۰۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت (جدول ۴).

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر جاسمونات، سرب و ورمی‌کمپوست و اثرات متقابل آن‌ها بر برخی صفات فتوسنتزی بادرشبو

Table 4. MANOVA (mean squares) for the effects of jasmonate levels and vermicompost treatments on *Dracocephalum moldavica* L.photosynthetic characteristics under lead stress

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی df	mean squares میانگین مربعات					
		رشد رویشی Vegetative growth			رشد زایشی Reproductive growth		
		ETR	Y	FV/FM	ETR	Y	FV/FM
جاسمونات Jasmonate (J)	3	0.0120**	0.0080^{ns}	0.0010**	0.0060**	0.0020**	0.0030*
سرب Lead (L)	4	0.0040**	0.0270**	0.0100**	0.0080**	0.0050**	0.0030*
جاسمونات×سرب J×L	12	0.0050**	0.0090*	0.0030**	0.0130**	0.0050**	0.0020**
ورمی‌کمپوست Vermicompost (V)	1	0.0030**	0.0080^{ns}	0.0010^{ns}	0.0000^{ns}	0.0000^{ns}	0.0020^{ns}
جاسمونات×ورمی‌کمپوست J×V	3	0.0000*	0.0140*	0.0000^{ns}	0.0060**	0.0030**	0.0020*
سرب×ورمی‌کمپوست L×V	4	0.0100**	0.0040^{ns}	0.003**	0.0090**	0.0030**	0.0010^{ns}
جاسمونات×سرب×ورمی‌کمپوست J×L ×V	12	0.0060**	0.0130**	0.004**	0.0070**	0.0010**	0.0020^{ns}
خطا Error	80	0.0002	0.0040	0.0002	0.0010	0.0002	0.0010
ضریب تغییرات (درصد) CV%		*4.7200*	*8.4100*	*1.900*	*10.71*	*1.7500*	*3.8200*

ns،** و * به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns, ** and * showed non significant, significant at $p\leq0.01$ and $p\leq0.05$, respectively

در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین میزان تعرق به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب و کم‌ترین میزان تعرق به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت (جدول ۳)، بنابراین تیمار ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات توانسته است اثرات تنش سرب با غلظت ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک را بر میزان تعرق به‌طور معنی‌داری تعدیل نماید و میزان تعرق را نسبت به گروه بدون اعمال جاسمونات به‌طور معنی‌داری کاهش دهد ($p\leq0.05$).

در مرحله زایشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی-کمپوست بیش‌ترین میزان تعرق به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت.

در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین میزان تعرق به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت که تفاوت معنی‌داری با گروه‌های تحت اعمال غلظت (۵۰ جاسمونات و ۴۰۰ سرب) و غلظت (۱۰۰ جاسمونات و ۴۰۰ سرب)، نداشت (جدول ۴). کم‌ترین میزان تعرق در هر دو شرایط اعمال کود و بدون اعمال کود نیز به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت (جدول ۳). در گروه بدون کود ورمی-کمپوست، تیمار ۱۵۰ و ۱۰۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات توانسته است اثرات تنش سرب ۴۰۰ را بر میزان تعرق به‌طور معنی‌داری تعدیل نماید و میزان تعرق را نسبت به گروه بدون اعمال جاسمونات و تنش ۴۰۰ سرب، به‌طور معنی‌داری ($p\leq0.05$) کاهش دهد (جدول ۳). در گروه تحت اعمال کود نیز تیمار ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات توانسته است اثرات تنش سرب ۴۰۰ را بر میزان تعرق به‌طور معنی‌داری تعدیل نماید و میزان تعرق را نسبت به گروه بدون اعمال جاسمونات و تحت تنش ۴۰۰ سرب به‌طور معنی‌داری ($p\leq0.05$) کاهش دهد (جدول ۳).

هدایت روزنه‌ای

هدایت روزنه‌ای نیز در مرحله رویشی و زایشی تحت تأثیر جاسمونات قرار گرفت و با افزایش غلظت جاسمونات روند افزایشی ($p\leq0.05$) نشان داد (جدول ۳).

اعمال سرب نیز سبب کاهش هدایت روزنه‌ای در هر دو مرحله رویشی و زایشی گردید (جدول ۳)، به‌طوری‌که در

مرحله رویشی کم‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای به گروه تحت تیمار با غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۳). در مرحله زایشی نیز میزان هدایت روزنه‌ای در گروه تحت تیمار با غلظت ۴۰۰ سرب کاهش معنی‌داری ($p\leq0.05$) نسبت به سایر گروه‌ها نشان دادند (جدول ۳).

اعمال کود ورمی‌کمپوست در مرحله رویشی چندانی بر هدایت روزنه‌ای نداشت اما در مرحله زایشی سبب افزایش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در هدایت روزنه‌ای شد (جدول ۳).

در بررسی اثرات متقابل جاسمونات/سرب/ورمی‌کمپوست بر میزان هدایت روزنه‌ای در هر دو مرحله موردبررسی مشخص شد که با افزایش غلظت سرب در هر دو گروه تحت تیمار با کود ورمی‌کمپوست و بدون اعمال کود، میزان هدایت روزنه‌ای روند کاهشی داشت که این روند با اعمال جاسمونات افزایشی شد. به‌طوری‌که در هر گروه افزایش غلظت جاسمونات سبب ایجاد روند افزایشی در میزان هدایت روزنه-ای شد. در مرحله رویشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی-کمپوست کم‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ سرب و بیش‌ترین میزان آن به گروه تحت تیمار با غلظت صفر سرب و غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات اختصاص یافت (جدول ۳). در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت و کم-ترین میزان هدایت روزنه‌ای به گروه تحت تیمار با غلظت ۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۳).

در مرحله زایشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای به گروه تحت تیمار با غلظت ۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت ($p\leq0.05$). در گروه تحت اعمال کود نیز بیشترین میزان هدایت روزنه‌ای به گروه تحت تیمار با غلظت ۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت و کمترین میزان هدایت روزنه‌ای به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۴).

کارایی مصرف آب

کارایی مصرف آب نیز در هر دو مرحله رویشی و زایشی تحت تأثیر جاسمونات قرار گرفت و با افزایش غلظت جاسمونات روند افزایشی ($p\leq0.05$) نشان داد (جدول ۳)، به‌طوری‌که در غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات، بیش‌ترین میزان کارایی مصرف آب مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با غلظت‌های کم‌تر جاسمونات نشان داد ($p\leq0.05$).

اعمال سرب نیز در همه غلظت‌ها سبب کاهش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در میزان کارایی مصرف آب در مرحله رویشی و زایشی گردید (جدول ۳)، به‌طوری‌که کم‌ترین میزان کارایی مصرف آب در مرحله رویشی و زایشی به گروه تحت تیمار با غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک سرب اختصاص یافت ($p\leq0.05$).

اعمال کود ورمی‌کمپوست در هر دو مرحله رویشی و زایشی افزایش معنی‌داری ($p\leq0.05$) بر کارایی مصرف آب داشت (جدول ۳). در بررسی اثرات متقابل جاسمونات/سرب/ورمی‌کمپوست بر میزان کارایی مصرف آب در هر دو مرحله موردبررسی مشخص شد که با افزایش غلظت سرب در هر دو گروه تحت تیمار با کود ورمی‌کمپوست و بدون اعمال کود، میزان کارایی مصرف آب روند کاهشی داشت که این روند با اعمال جاسمونات افزایشی شد. در مرحله رویشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست بیش‌ترین میزان کارایی مصرف آب به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۰۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت. در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین میزان کارایی مصرف آب به گروه تحت تیمار با غلظت‌های ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و صفر سرب اختصاص یافت و کم‌ترین میزان کارایی مصرف آب به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت که با گروه تحت تیمار با غلظت ۳۰۰ و ۴۰۰ سرب در سایر غلظت‌های جاسمونات (۵۰ و ۱۰۰ میلی مول بر لیتر) اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۳). در مرحله زایشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست، کم‌ترین میزان کارایی مصرف آب به گروه تحت تیمار با غلظت ۵۰ جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت که تفاوت معنی‌داری با گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب نشان نداد، درحالی‌که این تفاوت با سایر گروه‌های موردبررسی معنی‌دار ($p\leq0.05$)، بود (جدول ۳). در این گروه، بیش‌ترین میزان کارایی مصرف آب نیز به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت. در گروه تحت اعمال کود و مرحله زایشی نیز بیش‌ترین میزان کارایی مصرف آب به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت

۱۰۰ سرب اختصاص یافت و کم‌ترین میزان کارایی مصرف آب نیز به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت که تفاوت معنی‌داری با گروه‌های تحت اعمال جاسمونات و سرب {(۱۵۰ جاسمونات و ۳۰۰ سرب)، گروه (۵۰ جاسمونات و ۳۰۰ سرب)، گروه (۵۰ جاسمونات و ۴۰۰ سرب) و گروه (صفر جاسمونات و ۴۰۰ سرب)} نداشت (جدول ۳).

میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm)

تجزیه واریانس میانگین شاخص‌های مورد ارزیابی نشان داد که اثر جاسمونات، سرب و اثرات متقابل آن‌ها بر میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) در مرحله رویشی معنی‌دار $p\leq0.05$ است (به‌استثناء اثر متقابل جاسمونات/ورمی-کمپوست) (جدول ۴). همچنین مشخص شد که اثر جاسمونات و سرب و اثرات متقابل جاسمونات/سرب، جاسمونات/ورمی‌کمپوست بر میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) در مرحله زایشی نیز معنی‌دار است ($p\leq0.05$).

در بررسی اثر جاسمونات بر میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) در مرحله رویشی مشخص شد که با افزایش غلظت جاسمونات، میزان عملکرد فتوسیستمII (Fv/Fm) افزایش معنی‌داری ($p\leq0.05$) داشت، به‌طوری‌که غلظت صفر و ۱۵۰ جاسمونات به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) را به خود اختصاص دادند (جدول ۵)، ولی بین سطوح ۵۰،۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات ازنظر میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴).

جاسمونات در مرحله زایشی، میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) را در غلظت ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مول بر لیتر نسبت به گروه شاهد افزایش معنی‌داری داد ($p\leq0.05$)، ولی غلظت ۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات با نمونه شاهد تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۵).

افزایش غلظت سرب نیز در مرحله رویشی سبب کاهش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) نسبت به شاهد شد به‌طوری‌که کم‌ترین میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) به غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۵). در مرحله زایشی با افزایش غلظت سرب به ۱۰۰ و ۲۰۰، تغییر معنی‌داری در میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) مشاهده نشد (جدول ۴)، ولی با افزایش بیش‌تر غلظت سرب به سطح ۳۰۰ و ۴۰۰ کاهش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) نسبت به شاهد مشاهده شد (جدول ۵).

میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) در گروه تحت تیمار با کود ورمی‌کمپوست در هر دو مرحله رویشی و زایشی نسبت به گروه کنترل افزایش نشان داد ولی این افزایش معنی‌دار نبود (جدول ۵).

در بررسی اثرات متقابل جاسمونات/سرب/ورمی‌کمپوست بر میزان عملکرد فتوسیستم II (Fv/Fm) در هر دو مرحله رویشی و زایشی، مشخص شد که با افزایش غلظت سرب در هر دو گروه تحت تیمار با کود ورمی‌کمپوست و بدون اعمال کود، میزان عملکرد فتوسیستم II روند کاهشی داشت که این روند با اعمال جاسمونات افزایشی شد. در مرحله رویشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست بیش‌ترین میزان عملکرد فتوسیستم II به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت که با گروه تحت تیمار با غلظت ۱۰۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۵).

در گروه تحت اعمال کود در مرحله رویشی، نیز بیش-ترین عملکرد فتوسیستم II به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۰۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و صفر سرب اختصاص یافت و کم‌ترین عملکرد فتوسیستم II به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۰۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت که با گروه تحت تیمار با غلظت صفر میلی مول بر لیتر جاسمونات و ۴۰۰ سرب اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۵).

در مرحله زایشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی کمپوست، کم‌ترین عملکرد فتوسیستم II به گروه تحت تیمار با غلظت ۵۰ جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۵). در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین عملکرد فتوسیستم II به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت ۲۰۰ سرب اختصاص یافت. شایان‌ذکر است که بین گروه‌های موردبررسی در مرحله زایشی ازنظر عملکرد فتوسیستم II تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، بااین‌حال کم‌ترین عملکرد فتوسیستم II نیز به گروه تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۵).

جدول ۵. مقایسه میانگین شاخص‌های فتوسنتزی بادرشبو تحت اثر متقابل جاسمونات، سرب و ورمی‌کمپوست

Table 5.effects of interaction between jasmonate levels, Lead levels and vermicompost treatments on *Dracocephalum moldavica* L. on photosynthetic characteristics

			رشد رویشی (Vegetative growth)		
ورمی‌کمپوست	جاسمونات	سرب	نرخ انتقال الکترون	عملکرد کوانتومی	عملکرد فتوسنتزی
Vermicompost	Jasmonate	Lead	ETR	Y	FV/FM
$t.ha^{-1}$	$mmol.l^{-1}$	$mg.kg^{-1}$	($\mu mol\ electron\ m^{-2}s^{-1}$)		
0	0	0	0.302^{b}	0.804^{a}	0.723^{op}
		100	0.305^{b}	0.791^{a}	0.762^{i-m}
		200	0.302^{b}	0.770^{a}	0.765^{h-l}
		300	0.298^{b}	0.738^{a}	0.794^{c-e}
		400	0.150^{e}	0.483^{b}	0.722^{op}
		Mean	0.271	0.717	0.753
	50	0	0.300^{b}	0.807^{a}	0.789^{c-g}
		100	0.300^{b}	0.787^{a}	0.775^{d-j}
		200	0.300^{b}	0.811^{a}	0.770^{f-l}
		300	0.208^{d}	0.783^{a}	0.766^{g-l}
		400	0.200^{d}	0.727^{a}	0.686^{qr}
		Mean	0.222	0.783	0.757
	100	0	0.300^{b}	0.794^{a}	0.828^{ab}
		100	0.300^{b}	0.785^{a}	0.769^{g-l}
		200	0.302^{b}	0.787^{a}	0.750^{l-n}
		300	0.300^{b}	0.766^{a}	0.740^{m-o}
		400	0.301^{b}	0.735^{a}	0.682^{r}
		Mean	0.301	0.773	0.754
	150	0	0.308^{b}	0.795^{a}	0.830^{a}
		100	0.304^{b}	0.789^{a}	0.795^{c-e}
		200	0.300^{b}	0.782^{a}	0.777^{d-j}
		300	0.302^{b}	0.770^{a}	0.757^{j-n}
		400	0.286^{b}	0.769^{a}	0.751^{k-n}
		Mean	0.300	0.781	0.782
10	0	0	0.306^{b}	0.800^{a}	0.797^{cd}
		100	0.304^{b}	0.774^{a}	0.786^{c-h}
		200	0.300^{b}	0.770^{a}	0.766^{g-l}
		300	0.298^{b}	0.717^{a}	0.765^{h-l}
		400	0.287^{b}	0.540^{b}	0.709^{pq}
		Mean	0.299	0.720	0.763
	50	0	0.310^{b}	0.783^{a}	0.792 $^{c-e}$
		100	0.308^{b}	0.788^{a}	0.782^{d-i}
		200	0.304^{b}	0.779^{a}	0.765^{h-l}
		300	0.300^{b}	0.791^{a}	0.748^{l-n}
		400	0.300^{b}	0.771^{a}	0.741^{m-o}
		Mean	0.304	0.474	0.766
	100	0	0.315^{b}	0.798^{a}	0.806^{bc}
		100	0.308^{b}	0.793^{a}	0.792^{c-f}
		200	0.303^{b}	0.781^{a}	0.775^{d-j}
		300	0.300^{b}	0.764^{a}	0.740^{m-o}
		400	0.250^{c}	0.735^{a}	0.692^{qr}
		Mean	0.295	0.774	0.761
	150	0	0.400^{b}	0.805^{a}	0.785^{c-i}
		100	0.350^{a}	0.795^{a}	0.782^{d-i}
		200	0.300^{b}	0.788^{a}	0.773^{e-k}
		300	0.300^{b}	0.778^{a}	0.775^{d-j}
		400	0.280^{b}	0.771^{a}	0.736^{no}
		Mean	0.326	0.787	0.770
LSD			*0.023*	*0.103*	*0.023*

Values with the same letter within an index are not significantly different ($p \leq 0.05$)

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین ها در هر شاخص موردبررسی می‌باشد

Table 5. Continued **جدول ۵. ادامه**

ورمی‌کمپوست Vermicompost	جاسمونات Jasmonate	سرب Lead	رشد زایشی (Reproductive growth) نرخ انتقال الکترون ETR	عملکرد کوانتومی Y	عملکرد فتوسنتزی FV/FM
$t.ha^{-1}$	$mmol.l^{-1}$	$mg.kg^{-1}$	(µmol electron $m^{-2}s^{-1}$)		
0	0	0	0.300^{bc}	0.744^{a-e}	0.785^{ab}
		100	0.250^{cd}	0.740^{a-g}	0.777^{ab}
		200	0.220^{cd}	0.741^{a-f}	0.756^{ab}
		300	0.200^{d}	0.705^{j-n}	0.744^{ab}
		400	0.120^{e}	0.636^{r}	0.787^{ab}
		Mean	0.218	0.713	0.770
	50	0	0.300^{bc}	0.756^{a-c}	0.775^{ab}
		100	0.300^{bc}	0.757^{ab}	0.758^{ab}
		200	0.250^{Cd}	0.726^{e-k}	0.741^{ab}
		300	0.250^{cd}	0.693^{m-o}	0.732^{ab}
		400	0.200^{d}	0.674^{op}	0.711^{b}
		Mean	0.260	0.721	0.743
	100	0	0.350^{b}	0.758^{ab}	0.791^{a}
		100	0.300^{bc}	0.736^{b-h}	0.784^{ab}
		200	0.300^{bc}	0.719^{f-l}	0.745^{ab}
		300	0.250^{cd}	0.716^{h-l}	0.742^{ab}
		400	0.200^{d}	0.704^{k-n}	0.737^{ab}
		Mean	0.280	0.727	0.760
	150	0	0.400^{ab}	0.743^{a-e}	0.818^{a}
		100	0.300^{bc}	0.731^{d-i}	0.811^{a}
		200	0.250^{cd}	0.734^{c-h}	0.791^{ab}
		300	0.250^{cd}	0.718^{g-l}	0.765^{ab}
		400	0.200^{d}	0.701^{l-n}	0.724^{b}
		Mean	0.280	0.725	0.782
10	0	0	0.300^{bc}	0.761^{a}	0.801^{a}
		100	0.300^{bc}	0.733^{d-i}	0.785^{ab}
		200	0.300^{bc}	0.722^{e-l}	0.771^{ab}
		300	0.250^{cd}	0.711^{i-n}	0.742^{ab}
		400	0.200^{d}	0.700^{l-n}	0.734^{ab}
		Mean	0.270	0.725	0.767
	50	0	0.350^{b}	0.727^{e-k}	0.794^{a}
		100	0.250^{cd}	0.725^{e-k}	0.786^{ab}
		200	0.250^{cd}	0.664^{pq}	0.788^{ab}
		300	0.200^{d}	0.664^{pq}	0.795^{a}
		400	0.200^{d}	0.641^{r}	0.755^{ab}
		Mean	0.250	0.684	0.784
	100	0	0.350^{b}	0.728^{e-j}	0.787^{ab}
		100	0.300^{bc}	0.722^{e-l}	0.776^{ab}
		200	0.250^{cd}	0.715^{h-m}	0.770^{ab}
		300	0.250^{cd}	0.688^{no}	0.766^{ab}
		400	0.250^{cd}	0.644^{qr}	0.756^{ab}
		Mean	0.280	0.699	0.771
	150	0	0.450^{a}	0.759^{a}	0.785^{ab}
		100	0.300^{bc}	0.753^{a-d}	0.770^{ab}
		200	0.250^{cd}	0.730^{d-i}	0.802^{a}
		300	0.200^{d}	0.726^{e-k}	0.787^{ab}
		400	0.200^{d}	0.729^{e-i}	0.766^{ab}
		Mean	0.280	0.739	0.782
LSD			*0.051*	*0.023*	*0.051*

حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین میانگین ها در هر شاخص موردبررسی می‌باشد

Values with the same letter within an index are not significantly different ($p \leq 0.05$)

نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی

تجزیه واریانس میانگین داده‌های مربوط به نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی نشان داد که اثر جاسمونات، سرب و ورمی‌کمپوست و اثرات متقابل آن‌ها بر نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی در مرحله رویشی معنی‌دار ($p\leq0.05$) است (جدول ۳). در مرحله زایشی نیز به‌جز اثر ورمی‌کمپوست، اثر سایر منابع تغییر بر نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی معنی‌دار ($p\leq0.05$) بود (جدول ۴).

با بررسی میانگین داده‌های نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی مشخص شد که نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی در هر دو مرحله رویشی و زایشی در گروه‌های تحت اعمال جاسمونات، افزایش معنی‌داری نسبت به گروه بدون اعمال جاسمونات دارد ($p\leq0.05$). در مرحله رشد رویشی بیش‌ترین نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی متعلق به غلظت ۱۵۰ جاسمونات بود درحالی‌که در مرحله رشد زایشی تفاوت معنی‌داری در نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی بین سه غلظت ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات مشاهده نشد (جدول ۵).

با افزایش غلظت سرب در هر دو مرحله موردبررسی، نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی روند کاهشی نشان داد به‌طوری‌که کم‌ترین میزان نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی به غلظت ۴۰۰ سرب تعلق گرفت که به‌طور معنی‌داری ($p\leq0.05$) کمتر از سایر غلظت‌های سرب بود (جدول ۵). اعمال کود ورمی-کمپوست در مرحله رویشی افزایش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی ایجاد نمود، ولی در مرحله زایشی تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۵).

در بررسی اثرات متقابل جاسمونات/سرب/ورمی‌کمپوست بر نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی در هر دو مرحله موردبررسی مشخص شد که با افزایش غلظت سرب در هر دو گروه تحت تیمار با کود ورمی‌کمپوست و بدون اعمال کود، نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی روند کاهشی داشت که این روند با اعمال جاسمونات افزایشی شد. در مرحله رویشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی‌کمپوست بیش‌ترین نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت که با گروه‌های تحت تیمار با غلظت (۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و ۳۰۰ سرب)، (۵۰ جاسمونات و ۴۰۰ سرب) و گروه تحت تیمار با غلظت (صفر جاسمونات و ۴۰۰ سرب) تفاوت معنی‌داری ($p\leq0.05$) داشت (جدول ۵). سایر گروه‌ها ازنظر نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۵). در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و صفر سرب اختصاص یافت و کم‌ترین نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی گروه تحت تیمار با غلظت ۱۰۰ جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۵).

در مرحله زایشی، در شرایط بدون اعمال کود ورمی کمپوست، بیش‌ترین نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت که با غلظت‌های ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ سرب تفاوت معنی‌داری ($p\leq0.05$) نشان داد (جدول ۵). در گروه تحت اعمال کود نیز بیش‌ترین نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی به گروه تحت تیمار با غلظت ۱۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و غلظت صفر سرب اختصاص یافت که تفاوت معنی‌داری ($p\leq0.05$) با همه گروه‌های موردبررسی داشت (جدول ۵). کم‌ترین نرخ انتقال الکترون فتوسنتزی نیز به گروه‌های تحت تیمار با غلظت صفر جاسمونات و غلظت ۴۰۰ سرب اختصاص یافت (جدول ۵).

عملکرد کوانتومی فتوسنتز

عملکرد کوانتومی فتوسنتز نیز در مرحله رویشی تحت اثر سرب و اثر متقابل جاسمونات و سرب قرار گرفت. آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که جاسمونات و کود ورمی‌کمپوست اثر معنی‌داری بر عملکرد کوانتومی فتوسنتز در مرحله رویشی نداشتند (جدول ۴)، بااین‌حال اثر سرب و اثر متقابل جاسمونات/سرب ($p\leq0.01$) و اثر سه‌گانه جاسمونات/ سرب/ کود ورمی‌کمپوست ($p\leq0.01$) بر عملکرد کوانتومی فتوسنتز در مرحله رشد رویشی معنی‌دار بود (جدول ۴). در مرحله رشد زایشی تجزیه واریانس داده‌ها در همه سطوح تغییر به‌جز اثر ورمی‌کمپوست تغییرات معنی‌داری ($p\leq0.05$) را نشان داد (جدول ۴).

مقایسه میانگین داده‌های مربوط به عملکرد کوانتومی فتوسنتز نشان داد که با افزایش جاسمونات تغییر معنی‌داری در میزان عملکرد کوانتومی فتوسنتز ایجاد نشده است بااین‌حال با افزایش غلظت سرب، کاهش معنی‌داری ($p\leq0.05$) در میزان عملکرد کوانتومی فتوسنتز مشاهده شد (جدول ۵). ورمی‌کمپوست نیز اثر معنی‌داری بر میزان عملکرد کوانتومی فتوسنتز نداشت (جدول ۵).

در بررسی اثر متقابل جاسمونات/ سرب/ کود بر میزان عملکرد کوانتومی فتوسنتز در مرحله رشد رویشی مشخص

شد که در سطح صفر جاسمونات و ۴۰۰ سرب کم‌ترین میزان عملکرد کوانتومی فتوسنتز وجود دارد که تفاوت معنی‌داری ($p\leq0.05$) با بقیه گروه‌ها نشان داد (جدول ۵). سایر گروه‌ها از این نظر تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۵).

در مرحله زایشی نیز کم‌ترین میزان عملکرد کوانتومی فتوسنتز به گروه صفر جاسمونات و ۴۰۰ سرب اختصاص یافت. با اعمال کود ورمی‌کمپوست گروه تحت تیمار غلظت ۵۰ میلی مول بر لیتر جاسمونات و ۴۰۰ سرب کم‌ترین میزان عملکرد کوانتومی فتوسنتز را به خود اختصاص داد که با سایر گروه‌ها تفاوت معنی‌داری ($p\leq0.05$) داشت (جدول ۵).

نتیجه‌گیری نهایی

بادرشبو با نام علمی *Dracocephalum moldavica* L. از نعناعیان بوده که شامل ۱۸۶ گونه است که ۸ گونه آن در ایران می‌روید. این گونه انحصاری با نام زرین گیاه و بادرنجبویه دنایی شناخته می‌شود (Fatahi et al., 2013). تحقیقات اخیر نشان داده است که این گیاه ازلحاظ دارویی ارزشمند بوده و حاوی اسانس، فلاونوئید، رزماریک اسید و گلیکوزیدهای مونوترپن است (Fatahi et al., 2013).

نتایج بررسی‌ها نشان داده است که تنش سرب سبب کاهش رشد رویشی و زایشی در گیاهان می‌گردد (Mosavi et al., 2013). سرب کاهش فتوسنتز را از طریق آسیب به سازمان‌دهی فراساختاری کلروپلاست، تغییر در متابولیت‌های فتوسنتزی، جایگزینی یون‌هایی مانند منیزیم ومنگنز و غیره با سرب در کلروپلاست و ممانعت از ساختن یا تجزیه رنگیزه-های فتوسنتزی القاء می‌کند (Sharma and Dubey, 2005). سمیت سرب همچنین تنش اکسیداتیو را از طریق تولید بیش‌ازحد گونه‌های فعال اکسیژن شامل رادیکال‌های سوپر اکسید، رادیکال‌های هیدروکسیل و هیدروژن پراکسید القاء می‌کند (Hulak et al., 2021; Ruley et al., 2006).

در بررسی حاضر نیز افزایش غلظت سرب اثر کاهشی بر میزان تعرق، کارایی مصرف آب و عملکرد فتوسیستم II داشت؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تنش سرب با اثر بر زنجیره انتقال الکترون فتوسنتزی و کاهش نرخ انتقال الکترون و همچنین افزایش فلورسانس کلروفیل، کارایی این زنجیره را کاهش داده و از این طریق راندمان فتوسنتزی گیاه را تحت تأثیر قرار داده است. از طرفی کاهش میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن تحت تنش سرب نیز مشاهده شد که بیانگر اثر سرب بر چرخه کالوین و جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین است در سایر مطالعات نیز گزارش شده است که در گیاهانی که در معرض سمیت یون سرب قرار داشته‌اند مقدار فتوسنتز به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است که علت آن می‌تواند به دلیل جلوگیری از سنتز کلروفیل، ممانعت از انتقال الکترون و همچنین جلوگیری از فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین باشد (Suresh Kumar et al., 2009).

سرب از جذب عناصری مانند منیزیم و آهن جلوگیری می‌کند. این عناصر در ساختار کلروفیل و کمپلکس آزادکننده اکسیژن در فتوسیستم II نقش دارند. جلوگیری از جذب این عناصر از طریق رقابت سرب با این عناصر صورت می‌گیرد. از طرفی سرب به LHCII متصل شده و ساختار این کمپلکس را از حالت طبیعی خارج می‌کند. به‌این‌ترتیب میزان فتوسنتز و قندهای حاصل از فعالیت فتوسنتزی نیز کاهش می‌یابد (Ranjbar et al., 2012).

فلزات سنگین به‌وسیله مهار آنزیم‌های گاما آمینو لوالونیک اسید دهیدوژناز و پروتوکلروفیلد رداکتاز سبب مهار بیوسنتز کلروفیل می‌شوند. این فلزات سنتز گاما آمینو لوالونیک اسید و تشکیل کمپلکس آنزیم پروتوکلروفیل ردوکتاز با سوبسترا را مهار می‌کنند. برهمکنش متقابل فلز سنگین با گروه سولفیدریل آنزیم‌ها مهم‌ترین مکانیسم این مهارها عنوان شده است (Karimi et al., 2013). در پژوهش حاضر نیز مشخص شد که سرب عملکرد فتوسیستم II را کاهش داده است که متعاقب آن میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن و کارایی مصرف آب نیز کاهش نشان داده‌اند.

در پژوهش حاضر تیمار جاسمونات اثرات تخریبی ناشی از تنش سرب را کاهش داده و میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن، کارایی مصرف آب، هدایت روزنه‌ای و نرخ انتقال الکترون را افزایش داد. در همین راستا در بررسی خالوندی و همکاران (Khalvandi et al., 2019) نیز مشخص شد که جاسمونات اثرات تخریبی ناشی از تنش بر شاخص‌های فتوسنتزی از قبیل میزان کلروفیل و کارتنوئیدها را کاهش داده و همچنین سبب افزایش عملکرد فتوسیستم II و بالطبع آن افزایش فتوسنتز گیاه در شرایط تنش می‌گردد (Khalvandi et al., 2019). گزارش شده است که متیل جاسمونات می‌تواند موجب حفظ غلظت کلروفیل و افزایش سنتز کلروفیل مرکز واکنش شود و از این طریق موجب بهبود سرعت انتقال الکترون و افزایش کارایی فتوسیستم II می-گردد (Khalvandi et al., 2019). علاوه بر این، جاسمونات می‌تواند از کاهش شدید هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش

جلوگیری نموده و عملکرد کوانتومی فتوسنتز را نیز افزایش می‌دهد (Thanh-Tam et al., 2020). تیمار جاسمونات در گیاه سبب افزایش میزان سیتوکینین فعال و افزایش میزان ترکیبات فنلی گشته که به دنبال آن افزایش محتوای کلروفیل برگ و افزایش تحمل به تنش نیز ایجاد می‌گردد (Poonam et al., 2013; Rezaei et al., 2018).

در بررسی حاضر اعمال کود ورمی‌کمپوست نیز سبب افزایش معنی‌دار اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن و کارایی مصرف آب گردید. کودهای آلی می‌توانند عملکرد گیاه در شرایط تنش‌های محیطی را بهبود بخشند. زیاد بودن مواد آلی در خاک باعث تثبیت شدن فلزات سنگین به‌صورت شکل‌گیری کمپلکس آلی فلزی در خاک و درنهایت کاهش حرکت پذیری فلزات سنگین از خاک می‌شوند؛ بنابراین انتقال فلزات سنگین از خاک به اندام هوایی گیاه را کاهش می‌دهند (Mojdehi et al., 2022).

در بررسی بلوچی و همکاران (Balouchi et al., 2016) که اثر دو نوع کود دامی و ورمی‌کمپوست را بر رشد و میزان عملکرد لوبیاچیتی در شرایط تنش فلزات سنگین بررسی کردند مشخص گردید که استفاده از ورمی‌کمپوست تأثیر معنی‌داری بر بهبود شاخص‌های رشد گیاه در شرایط تنش فلزات سنگین داشته است و توانسته است خسارات ناشی از تنش فلزات سنگین را جبران نماید (Balouchi et al., 2016). این نتایج با نتایج پژوهش حاضر همخوانی داشت. نتایج پژوهش‌های قبلی نیز نشان داد که کود ورمی‌کمپوست با توجه به ویژگی‌های ساختاری، دارا بودن عناصر معدنی مغذی و هورمون‌های رشد گیاهی می‌تواند از طریق تأثیر بر خصوصیات فیزیولوژیکی، رشد گیاه را در شرایط وجود آلاینده محیطی از قبیل فلزات سنگین بهبود بخشد از سوئی، اثرات نامطلوب این فلزات را نیز را محدود نماید (Kabosi and Nodehi, 2018). افزودن مواد آلی به خاک از طریق افزودن کودهای آلی می‌تواند روشی مؤثر جهت رفع مسمومیت فلزات سنگین به شمار بیاید. کودهای آلی با افزایش مقدار کربن محلول در خاک و دسترسی بیشتر گیاه به آن امکان تحمل تنش فلزات سنگین را برای گیاه آسان‌تر می‌نمایند (Darzi et al., 2015). استفاده توأم از کود ورمی‌کمپوست و جاسمونات نیز اثر معنی‌داری بر کاهش خسارات ناشی از تنش سرب در گیاه بادرشبو گذاشت (Parvaiz et al., 2017). طی تحقیق دیگری مشخص گردید که گیاهانی که هم‌زمان تیمار جاسمونات و کود ورمی‌کمپوست را دریافت کرده بودند میزان اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن و عملکرد فتوسنتزی بالاتری داشتند. در همین راستا در پژوهش انجام‌شده توسط نریمانی و همکاران (Narimani et al., 2017)، اثرات توأم هیومیک اسید و آسکوربات بر روی گیاه بادرشبو تحت تنش شوری اثبات شده است. طبق نتایج این پژوهش کاربرد هم‌زمان اسید هیومیک و آسکوربات با تأثیر مثبت بر سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی گیاه و کاهش ترکیبات اکسیداتیو تولیدشده طی تنش و همچنین افزایش غلظت کلروفیل و افزایش اسیمیلاسیون دی‌اکسید کربن، به‌خوبی خسارات ناشی از تنش شوری را کاهش داده است (Narimani et al., 2017). با توجه به نتایج پژوهش حاضر نقش جاسمونات و ورمی-کمپوست در کاهش اثرات تخریبی ناشی از تنش سرب بر فرایند فتوسنتز و رشد گیاه بادرشبو تائید گردید، بنابراین استفاده از جاسمونات و ورمی‌کمپوست برای به حداقل رساندن اثرات تخریبی ناشی از تنش سرب برای گیاه بادرشبو پیشنهاد می‌گردد.

منابع

Ahmed, S., Nawata, E., Hosokawa, M., Domae, Y., Sakuratani, T., 2002. Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activity of mungbean subjected to waterlogging. Plant Science. 163, 117-123. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00080-8

Asadi, S., Moghaddam, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Fotovat, A., 2019. Evaluation of physiological characteristics and antioxidant activity of sweet basil (*Ocimum basilicum* cv.*Keshkeni luvelou*) under different levels of methyl jasmonate and lead toxicity. Jurnal of Plant Environmental Physiology. 51, 1-16. [In Persian with English summary]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.76712423.1397.13.51.1.8

Asadi, S., Moghaddam, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Fotovat, A., 2021. The effect of methyl jasmonate spraying on some morphophysiological characteristics and lead absorption of basil (*Ocimum basilicum* L.)

under lead stress. Environmental Stresses in Crop Sciences. 13, 1329-1344. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.2466.1648

Asghari, G., Nasr Esfahani, B., Paydar P., 2015. Evaluating the effect of *Dracocephalum kotschyi* methanol extract on *Mycobacterium tuberculosis*. Research Journal of Pharmacognosy. 2, 31-36.

Balouchi, H., Amini, F., Movahhedi Dehnavi, M., 2016. Effect of different growing organic substrates on growth and yield components of Pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under heavy metals stress. Agricultural Science and Sustainable Production. 26, 57-72.

Chavoushi, M., Manoochehri Kalantari, Kh., Arvin, M.J., 2019. Effect of salinity stress and exogenously applied methyl jasmonate on growth and physiological traits of two *Carthamus tinctorius* varieties. International Journal of Horticultural Science and Technology. 6, 39-49. https://doi.org/10.22059/ijhst.2019.277800.283

Darzi, M. T., Atarpoor, R., Haj Seyed Hadi, M.R., 2015. Effects of different manure and vermicompost rates on yield and essential oil contents of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.). Iranian Journal of Filed Crop Science. 46, 711-721. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22059/IJFCS.2015.56818

Fatahi, M., Nazeri, V., Sefidkon, F., Zamani, Z., 2013. Autecology of *Dracocephalum kotschyi* bioss. in Iran. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 29, 325-342. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2013.2859

Hulak, K., Tamer, E., Rüveyde, T., Murat, T., 2021. Effects of heavy metal (Pb) stress on some growth parameters and chemical changes in the soybean plant (*Glycine max* L.). Journal of Elementology. 6, 683-695. https://doi.org/10.5601/jelem.2021.26.3.2131

Kabosi, K., Nodehi, A., 2018. Effect of solt stress on quantitative and qualitative traits of different canola cultivars under vermicompost conditions. Crop Production. 9, 133-155. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.22069/EJCP.2016.9989.1783

Karimi, N., Khanahmadi, M., Moradi, B., 2013. The effects of lead on some physiological parameters of Artichoke. Journal of Plant Production. 20, 49-61. [In Persian with English summary].

Khalvandi, M., Amerian, M.R., Pirdashti, H., baradaran, M., Gholami, A., 2019. Effects of methyl jasmonate on some photosynthetic parameters of peppermint (*Mentha piperita*) in saline conditions. Journal of Plant Process and Function.7, 233-249. [In Persian with English summary]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1397.7.23.5.8

Kim, H., Seomun, S., Yoon, Y., Jang, G., 2021. Jasmonic acid in plant abiotic stress tolerance and interaction with abscisic acid. Agronomy. 11, 1-16. https://doi.org/10.3390/agronomy11091886

Maxwell, K., Johnson, G.N., 2000. Chlorophyll fluorescence a practical guide. Journal of Experimental Botany. 51, 659-668. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659

Molaei, S., Shirani, H., Hamidpour, M., Shekofteh, H., Besalatpour, A.A., 2016. Effect of vermicompost, pistachio kernel and shrimp shell on some growth parameters and availability of Cd, Pb and Zn in corn in a polluted soil. Journal of Water and Soil Science. 19, 113-124. [In Persian with English summary]. https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.74.10

Mosavi, M., Baghi zadeh, A., Aghayari, F., Afzali groh, D., Mohamadi, N., 2013. The investigation of lead accumulation in different parts of garlic (*Allium sativum* L.) and the response of plant to lead oxidative stress. Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding. 8,111-118. [In Persian with English summary].

Mojdehi, F., Taghizadeh, M., Baghaie, A. M., Changizi, M., Khaghani, SH., 2022. Effect of lead and cadmium on germination stage and application of vermicompost in concomitant pollution control by ornamental sunflower (*Helianthus annuus* "Sungold"). Journal of Plant Process and Function. 7, 298-312. [In Persian with English summary]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1401.11.47.22.1

Narimani, R., Moghaddam, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Nemati, S. H., 2017. Effect of humic acid and ascorbate on growth and biochemical traits of Moldavian balm

(*Dracocephalum moldavica* L.) under salinity stress. Journal of Plant Process and Function. 11, 110-128. [In Persian with English summary]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1397.7.23.23.6

Parvaiz, A., Saiema, R., Alvina, G., Subzar, A. Sh., Nudrat, A. A., Kazi, M. A., Salih, G., 2017. Jasmonates: Multifunctional Roles in Stress Tolerance. Frontiers in Plant Science. 7, 15. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00813

Pirzadah, T.B., Malik, B., Salam, Sh.T., Ahmad Dar, P., Rashid, S., 2019. Impact of heavy metal stress on plants and the role of various defense elements. Iranian Journal of Plant Physiology. 9(4), 2883-2900. https://doi.org/10.30495/ijpp.2019.668855

Poonam, Sh., Kaur, H., Geetika, S., 2013. Effect of Jasmonic acid on photosynthetic pigments and stress markers in *Cajanus cajan* L. Millsp. seedlings under copper stress. American Journal of Plant Sciences. 4, 817-823. https://doi.org/10.4236/ajps.2013.44100

Ranjbar, M., Lari Yazdi, H., Boroumand Jazi, Sh., 2012. The effect of Salicylic acid on photosynthetic pigments, contents of sugar and antioxidant enzymes under lead stress in *Brassica napus* L. Plant Biology. 9, 39-52. [In Persian with English summary]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20088264.1390.3.9.5.5

Rezaei, H., Saeidi-Sar, S., Ebadi, M., Abbaspour, H., 2018. The effect of spraying of methyl jasmonate and Epi-brassinolide on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and leaf stomatal traits in black mustard (*Brassica nigra* L.) under salinity. Journal of Plant Process and Function. 7, 53-62.

Ruley, A.T., Sharma, N. C., Sahi, S.V., Singh, S.R., Sajwan, K. S., 2006. Effects of lead and chelators on growth, photosynthetic activity and Pb uptake in *Sesbania drummondii* grown in soil. Environmental Pollution. 144, 11-18. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.016

Suresh Kumar, K., Han, Y.S., Choo, K.S., Kong, J.E., Han, T., 2009. Chlorophyll fluorescence based copper toxicity assessment of two algal species. Toxicology and Environmental Health Sciences. 1, 17-23. https://doi.org/10.1007/bf03216459

Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Lead toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology. 17(1), 35–52. https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004

Thanh-Tam, H., Niranjana Murthy, H., Park, S.Y., 2020. Methyl jasmonate induced oxidative stress and accumulation of secondary metabolites in plant cell and organ cultures. International Jornal of Molecular Science. 21, 716. https://doi.org/10.3390/ijms21030716

Vatankhah, E., Kalantari, B., Andalibi, B., 2015. Effect of methyl jasmonate on some physiological and biochemical responses of peppermint (*Mentha piperita* L.) under salt stress. Journal of Plant Process and Function. 5, 157-171. [In Persian with English summary]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1395.5.17.18.5