



Effect of Lead Nitrate Exposure on Growth, Some Biochemical Traits, and Secondary Metabolites in *Capsella bursa-pastoris* under Hydroponic Conditions

Seydeh Parisa Mortazavi¹ | Ahmad Mohtadi² | Athar Sadat Javanmard³ | Robabeh Shahi Shavvon⁴

1. Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: parisa.mortazavi@stu.yu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: a.mohtadi@yu.ac.ir
3. Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: a.javanmard@yu.ac.ir
4. Department of Biology, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: r.shahi@yu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: June 08, 2025

Revised: December 14, 2025

Accepted: December 15, 2025

Keywords:

Capsella bursa-pastoris,
heavy metal,
phenolic compounds,
phytoremediation,
stress.

Extended Abstract

Introduction. Human activities, including industrial development, agriculture, and urbanization, have significantly increased environmental pollution, especially from heavy metals such as lead. Lead as one of the most hazardous heavy metals, poses a serious threat to biological sustainability. It directly disrupts plant physiological processes, including photosynthesis, nutrient uptake, growth, and the production of secondary metabolites. Lead affects not only plant growth and biomass, but also the production of secondary metabolites and phytochemical properties by causing changes in enzyme activity, reducing stomatal conductance, and disrupting the ionic balance of cells. Plants use mechanisms such as avoidance, changing root growth patterns, and secretion of defense compounds to cope with heavy metal stress. Among them, secondary metabolites play a key role in protecting plants against biotic and abiotic stresses. Brassicaceae species such as *Capsella bursa-pastoris*, exhibit a high capacity to tolerate abiotic stresses, largely due to production of secondary metabolites such as phenols, flavonoids, and terpenes. Investigating the responses of this plant to lead stress may uncover key resistance mechanisms, providing insights into adaptive strategies against heavy metal toxicity. Therefore, the present study was conducted to determine the effects of lead nitrate on growth, physiological indices, and secondary metabolites of the *C. bursa-pastoris* plant under hydroponic conditions.

Materials and Methods. This study was conducted as a pot experiment using a completely randomized design (CRD) with four replications at Yasouj University, Iran, in 2024. After sterilizing the seeds of *C. bursa-pastoris*, they were sown in perlite-filled pots and subjected to lead nitrate treatments at concentrations of 0, 5, 10, 25, 50, and 100 μM . The pH of half-strength Hoagland nutrient solution was adjusted to 5.5 using MES buffer. Following three weeks of treatment application, measurements were recorded for: Growth parameters (root/shoot length and dry weight), physiological markers (total chlorophyll, anthocyanin, soluble sugars, and protein content), and biochemical traits (total phenols and flavonoids). To measure the lead content of roots and shoots, 0.1 g of the dried and powdered aerial parts and roots of the plant were transferred to test tubes, and three ml of 65% nitric acid were added to them and kept under the hood for 12 h. In the next step, they were placed in a boiling water bath at 90°C for two h. After the solution cooled in the laboratory, one ml of hydrogen peroxide was added to it and they were placed in a boiling water bath at 90°C for one hour. Finally, the volume of the samples was brought to 10 ml by adding distilled water. The lead concentration was determined on a flame atomic absorption spectrophotometer (Hitachi, Z-2000, Japan). Data were analyzed using one-way ANOVA, and post-hoc mean comparisons were conducted using the LSD test at a significance level of $p < 0.05$.

Results and Discussion. The study revealed that lead nitrate exposure significantly influenced lead accumulation and key biochemical parameters including chlorophyll, anthocyanins, soluble sugars, and protein content in *C. bursa-pastoris*. Elevated lead nitrate concentrations resulted in progressively higher lead accumulation in both roots and shoots, peaking at 100 μM . Exposure to highest concentration (100 μM), lead nitrate significantly increased anthocyanin accumulation, and levels of soluble sugars, proteins, and flavonoids in the leaves. Elevated lead nitrate concentrations also caused significant reductions in both root and shoot dry weights. The findings demonstrated that the plant's root plays a major role in the lead absorption and accumulation. While roots effectively prevent the lead translocation to the shoots at low concentrations (up to 10 μM), this ability diminishes at higher concentrations. To counteract the lead-induced oxidative stress, the plant utilized phenolic compounds (including anthocyanins and flavonoids) as well as soluble sugars and proteins.

Conclusion. The study revealed that lead nitrate exposure significantly impaired growth and physiological performance in *C. bursa-pastoris*, causing marked reductions in both root and shoot dry weight. These effects were likely caused by lead toxicity, the induction of oxidative stress, and disruptions in nutrient uptake. At lower concentrations, plants trigger defense mechanisms-like boosting soluble sugars and anthocyanins-to counteract lead toxicity. However, under elevated levels, these protective responses diminish as oxidative damage overwhelms the plant's biochemical pathways. While elevated flavonoid production under high-stress conditions reflects the plant's adaptive response to oxidative damage, this protective mechanism fails to fully mitigate the observed decline in growth. These findings indicate that *C. bursa-pastoris* exhibits tolerance to lead stress at lower concentrations ($\leq 50 \mu\text{M}$), but exposure to higher levels ($> 100 \mu\text{M}$) induce severe physiological damage, compromising plant viability. Additionally, investigating the effects of other heavy metals could help determine the plant's overall tolerance capacity.

Cite this article: Mortazavi, S.P., Mohtadi, A., Javanmard, A.S., & Shahi Shavvon, R. (2026). Effect of lead nitrate exposure on growth, some biochemical traits, and secondary metabolites in *Capsella bursa-pastoris* under hydroponic conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 57(2), 29-42. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.396466.655145.





اثر نیترات سرب بر رشد، برخی صفات بیوشیمیایی و متابولیت‌های ثانویه در گیاه کیسه‌کشیش (*Capsella bursa-pastoris*) در شرایط آبکشت

سیده پرینا مرتضوی^۱ | احمد مهتدی^۲ | اطهرالسادات جوانمرد^۳ | ربابه شاهی شاوون^۴

۱. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: parisa.mortazavi@stu.yu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: a.mohtadi@yu.ac.ir
۳. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: a.javanmard@yu.ac.ir
۴. گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران. رایانامه: r.shahi@yu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴</p>	<p>به‌منظور ارزیابی اثر نیترات سرب بر گیاه کیسه‌کشیش، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج در سال ۱۴۰۳ انجام شد. تنش سرب از منبع نیترات سرب در غلظت‌های صفر، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار در شرایط آبکشت اعمال شد. نتایج نشان داد که سطوح کم سرب به‌ویژه تا ۵۰ میکرومولار تأثیر منفی قابل توجهی بر صفات مورد بررسی نداشت و گیاه تحمل نسبی از خود نشان داد. با این حال، در غلظت ۱۰۰ میکرومولار نیترات سرب، تجمع سرب در ریشه (۶۲۴ میکروگرم بر گرم وزن خشک) و اندام هوایی (۱۵ میکروگرم بر گرم وزن خشک) افزایش یافت و رشد گیاه به‌ویژه وزن خشک ریشه و اندام‌های هوایی به ترتیب کاهش ۶۷ و ۶۲ درصدی یافت. همچنین، سطح ۱۰۰ میکرومولار نیترات سرب باعث افزایش محتوای قندهای محلول (۵۰ درصد)، آنتوسیانین (۲۹۳ درصد)، فلاونوئید کل (۴۱ درصد) و پروتئین محلول برگ (۶۵ درصد) نسبت به شاهد شد. افزایش سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی از جمله آنتوسیانین‌ها و فلاونوئیدها بیانگر فعال شدن مکانیسم‌های دفاعی برای مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از حضور سرب است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که گیاه کیسه‌کشیش تا سطح معینی از آلودگی سرب (۵۰ میکرومولار) قادر به تحمل تنش است، اما در غلظت‌های بالاتر رشد آن مختل می‌شود. بنابراین، این گیاه می‌تواند به‌عنوان گونه نسبتاً مقاوم برای مطالعات آبی در زمینه گیاه‌پالایی فلزات سنگین مورد توجه قرار گیرد.</p>
<p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>ترکیبات فنلی، تنش، فلز سنگین، کیسه‌کشیش، گیاه‌پالایی.</p>	

استناد: مرتضوی، س. پ.، مهتدی، ا.، جوانمرد، ا. س.، و شاهی شاوون، ر. (۱۴۰۵). اثر نیترات سرب بر رشد، برخی صفات بیوشیمیایی و متابولیت‌های ثانویه در گیاه کیسه‌کشیش (*Capsella bursa-pastoris*) در شرایط آبکشت. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۷(۲)، ۲۹-۴۲.

DOI: 10.22059/ijfcs.2025.396466.655145



۱. مقدمه

فعالیت‌های انسانی نظیر صنعتی شدن، توسعه کشاورزی، استخراج معادن و رشد بی‌رویه جمعیت و شهرنشینی، نه تنها منابع طبیعی را با تهدید مواجه کرده‌اند، بلکه منجر به افزایش چشم‌گیر آلودگی‌های محیطی، به‌ویژه آلودگی فلزات سنگین شده‌اند. این اختلالات باعث برهم‌خوردن چرخه‌های بیوژئوشیمیایی طبیعی شده و به انباشت فلزات سنگین در محیط زیست منجر گردیده است؛ امری که از جنبه‌های بوم‌شناسی، تغذیه‌ای و زیست‌محیطی حائز اهمیت است (Lashkari Sanami et al., 2022).

فلزات سنگین به دو دسته ضروری و غیرضروری تقسیم می‌شوند. عناصر ضروری همچون آهن، منگنز، روی، مس، کبالت، مولیبدن و نیکل که برای رشد طبیعی گیاه حیاتی هستند، اما فلزات غیرضروری مانند سرب، جیوه، کروم و کادمیوم که اغلب اثرات سمی دارند. میزان و نوع این فلزات در خاک نقش مهمی در رشد و عملکرد فیزیولوژیکی گیاهان دارد، چراکه غلظت‌های بالا از هر دو نوع فلزات سنگین می‌تواند موجب کاهش یا توقف رشد گیاهان شود (Abtahi et al., 2017).

در این میان، سرب یکی از رایج‌ترین و خطرناک‌ترین فلزات سنگین محسوب می‌شود که حدود ۱۰ درصد از کل آلودگی فلزات سنگین را شامل می‌شود (Collin et al., 2022). سرب به علت حضور در هر سه بخش خاک، آب و هوا دارای اهمیت ویژه‌ای است، علاوه بر این سرب به راحتی توسط سامانه ریشه‌ای گیاه جذب می‌شود و سمیت آن برای گیاه بین ۲ تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین است، از این رو به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدات برای گیاهان و سایر موجودات زنده در نظر گرفته می‌شود (Ma et al., 2016). میانگین غلظت سرب در خاک‌های کشاورزی ایران ۳۹/۸۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Jahandari & Abbasnejad, 2024). دامنه طبیعی غلظت سرب در گیاهان از ۰/۲ تا ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و حد بحرانی آن ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Lin et al., 2009). حضور سرب در گیاهان موجب اختلال در فرآیندهای فیزیولوژیکی مهم از جمله فتوسنتز، متابولیسم قندها، ساخت کلروفیل و رشد اندام‌های مختلف گیاه می‌شود. سرب با ایجاد تغییراتی در فعالیت آنزیم‌ها، کاهش هدایت روزنه‌ای و برهم‌زدن تعادل یونی سلول‌ها، نه تنها رشد و زیست‌توده گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه بر تولید متابولیت‌های ثانویه و ویژگی‌های فیتوشیمیایی نیز اثرگذار است (Collin et al., 2022; Gupta et al., 2024). از آنجایی که سرب معمولاً در واکوئل‌های سلولی ریشه رسوب می‌کند، در این بخش بیشترین تجمع را نشان می‌دهد و از انتقال آن به اندام‌های هوایی تا حدی جلوگیری می‌شود (Mohammadi et al., 2020). گیاهان برای مقابله با تنش ناشی از فلزات سنگین، سازوکارهایی چون اجتناب، تغییر الگوی رشد ریشه و ترشح ترکیبات دفاعی را به کار می‌گیرند. در این میان، متابولیت‌های ثانویه نقش کلیدی در محافظت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی دارند (Mattosinhos et al., 2022).

گیاه کیسه‌کشیش (*Capsella bursa-pastoris*) یکی از گیاهان خانواده شب‌بو (Brassicaceae) است که در بسیاری از مناطق جهان، از جمله آسیا، اروپای مرکزی، اروپای شرقی و آفریقا وجود دارد. اندام‌های هوایی این گیاه حاوی فلاونوئیدها، پلی‌پتیدها، کولین، استیل کولین، هیستامین، تیرامین، مواد معدنی و ویتامین‌ها هستند (Grosso et al., 2011). در برخی کشورها از این گیاه به‌عنوان سبزی خوراکی و همچنین به‌عنوان تب‌بر، برای درمان فشارخون بالا و بیماری‌های کلیوی استفاده می‌شود (Al-Sanfi, 2015). در گیاهان خانواده شب‌بو، سرب سبب اثرات فیزیولوژیکی از جمله کاهش فتوسنتز و کاهش مقدار کلروفیل می‌شود (Collin et al., 2022). همچنین سبب افزایش تولید متابولیت‌های ثانویه (فنل‌ها، فلاونوئیدها و تریپن‌ها) با خواص آنتی‌اکسیدانی برای مقابله با اثرات سمی این فلز می‌شود (Asare et al., 2023). با توجه به ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی خاص گیاه کیسه‌کشیش و توانایی آن در تولید ترکیبات دفاعی، بررسی اثر تنش سرب بر این گیاه، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در زمینه تحمل به فلزات سنگین و سازوکارهای دفاعی گیاهان فراهم آورد. بنابراین تحقیق حاضر، به منظور تعیین اثرات نیترات سرب بر رشد، شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کیسه‌کشیش در شرایط آب‌کشت انجام شد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. شرایط کشت و اعمال تنش سرب

به منظور بررسی رشد و انواع پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه کیسه‌کشیش تحت تنش نیترات سرب، آزمایشی گلدانی در اردیبهشت سال ۱۴۰۳ در آزمایشگاه فیزیولوژی گیاهی دانشکده علوم پایه دانشگاه یاسوج انجام شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار بود. تنش سرب از منبع نیترات سرب $(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2)$ در غلظت‌های صفر، پنج، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار اعمال شد. بذر گیاه کیسه‌کشیش از مؤسسه پاکان بذر اصفهان تهیه شد.

واحدهای آزمایشی شامل گلدان‌هایی با قطر ۱۴ و ارتفاع ۱۳ سانتی‌متر بودند. گلدان‌ها توسط پرلیت که از قبل با دستگاه اتوکلاو ضدعفونی و سپس با آب مقطر شسته شده بودند، به نحوی پر شدند که سطح پرلیت هر گلدان تا دهانه آن پنج سانتی‌متر فاصله داشت. بذرها ابتدا با آب مقطر شستشو شدند. سپس با محلول هیپوکلریت سدیم پنج درصد به مدت پنج دقیقه، ضدعفونی و در ظروف کاشت شدند. در هر گلدان، ۱۵ عدد بذر با عمق حدود دو سانتی‌متر قرار گرفت. از مرحله کاشت تا جوانه‌زنی، آبیاری با آب مقطر و سپس با استفاده از محلول غذایی یک‌دوم هوگلند انجام شد. محلول غذایی به صورت هر پنج روز یکبار با محلول تازه تعویض و عمل هوادهی با پمپ انجام می‌شد. دو هفته بعد از استقرار بوته‌ها در گلدان، تنک شدند و هشت بوته در هر گلدان باقی ماند. در مرحله چهار برگی گیاهان، تیمارهای نیترات سرب به مدت سه هفته در محلول غذایی اعمال شد. pH محلول غذایی با محلول دو میلی‌مولار بافر MES و با استفاده از KOH در محدوده pH برابر ۵/۵ ثابت نگه داشته شد. گیاهان در اتاق کشت با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در روز و ۱۶ درجه سانتی‌گراد در شب و تناوب نوری ۱۴ ساعت نور و ۱۰ ساعت تاریکی و رطوبت نسبی ۷۰ درصد نگه‌داری شدند.

۲-۲. اندازه‌گیری شاخص‌های رشد

سه هفته پس از اعمال تیمارها، گیاهان برداشت شدند. بعد از قطع ریشه از یقه و با استفاده از کاغذ شطرنجی، بزرگ‌ترین طول ریشه و بخش هوایی چهار بوته از چهار تکرار اندازه‌گیری شدند. ریشه‌ها و بخش هوایی گیاهان مربوط به هر گلدان، جداگانه درون آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت به‌طور کامل خشک شدند. سپس وزن خشک آن‌ها با ترازوی مدل TE153S بر حسب گرم اندازه‌گیری شد.

۲-۳. اندازه‌گیری میزان سرب، قند محلول، پروتئین محلول و متابولیت‌های ثانویه

برای اندازه‌گیری محتوای سرب ریشه و اندام هوایی ابتدا به منظور حذف سرب سطحی، ریشه گیاهان برداشت شده به مدت ۱۵ دقیقه در محلول ۲۰ میلی‌مولار Na_2EDTA قرار داده شد. سپس ۰/۱ گرم از بخش هوایی و ریشه گیاه خشک شده و پودر شده به لوله‌های آزمایش منتقل و به آن‌ها سه میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۶۵ درصد اضافه شد و به مدت ۱۲ ساعت زیر هود نگهداری شدند. در مرحله بعد، به مدت دو ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد در حمام آب جوش قرار داده شدند. پس از سرد شدن محلول در محیط آزمایشگاه، یک میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن به آنها اضافه و مجدداً در حمام آب جوش به مدت یک ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. در نهایت حجم نمونه‌ها با افزودن آب مقطر به ۱۰ میلی‌لیتر رسانده شد (Heidari Dehno & Mohtadi, 2018). مقدار سرب موجود در ریشه و اندام هوایی گیاهان با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی مدل HITACHI-Z-2000 اندازه‌گیری شد. نسبت محتوای سرب اندام هوایی به سرب ریشه نیز محاسبه شد. به منظور اندازه‌گیری مقدار کلروفیل کل از روش Arnon (1949) استفاده شد. بدین منظور از برگ‌های میانی تازه گیاه، ۰/۰۵ گرم وزن شد و در هاون چینی همراه با هفت میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد (حجمی/حجمی) سائیده شد. مخلوط حاصل با استفاده از کاغذ صافی فیلتر شد و جذب محلول عبوری با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل Philler Scientific SU-6100 در طول موج‌های ۶۴۶، ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر خوانده شد.

برای اندازه‌گیری قندهای محلول از روش فنل-سولفوریک اسید استفاده شد. سپس میزان جذب محلول در طول موج ۴۸۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری و محاسبه شد (Chapin & Kennedy, 1994). اندازه‌گیری پروتئین محلول با استفاده از روش

برادفورد صورت گرفت و میزان جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۹۵ نانومتر اندازه‌گیری شد (Bradford, 1976). برای اندازه‌گیری مقدار آنتوسیانین‌های برگ گیاهان از روش Wagner (1979) استفاده شد و میزان جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۵۰ نانومتر قرائت شد. مقدار فنل کل با روش فولین-سیوکالتو اندازه‌گیری و میزان جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۶۵ نانومتر قرائت شد (Hajimehdipoor et al., 2009). تعیین مقدار فلاونوئید با روش رنگ‌سنجی کلرید آلومینیوم صورت گرفت و جذب مخلوط واکنش در طول موج ۴۱۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Chang et al., 2002).

۲-۴. محاسبه‌های آماری

نرمال‌بودن داده‌ها با استفاده از روش Shapiro-Wilk بررسی شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از روش آماری One-way ANOVA و مقایسه میانگین داده‌ها براساس آزمون LSD در سطح احتمال خطای پنج درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. داده‌ها به صورت میانگین \pm SEM بیان و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. محتوای سرب اندام‌های گیاهی و نسبت سرب اندام هوایی به سرب ریشه

براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از جدول ۱، اثر نیترات سرب بر محتوای سرب ریشه، اندام هوایی و نسبت سرب اندام هوایی به سرب ریشه گیاه کیسه‌کشیش در شرایط آب‌کشت، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همان‌طور که در شکل A-۱ مشاهده می‌شود، در گیاه کیسه‌کشیش به تدریج با افزایش غلظت نیترات سرب، محتوای سرب در ریشه افزایش یافت. کم‌ترین میزان سرب ریشه مربوط به تیمار شاهد (عدم کاربرد نیترات سرب) و بیشترین میزان سرب ریشه نیز مربوط به تیمار ۱۰۰ میکرومولار، به میزان ۶۲۴ میکروگرم بر گرم وزن خشک بود که با غلظت ۵۰ میکرومولار نیترات سرب اختلاف معنی‌داری نشان نداد. مقایسه میانگین اثر نیترات سرب بر محتوای سرب اندام هوایی گیاه کیسه‌کشیش، نشان داد با افزایش در سطوح تنش نیترات سرب، میزان سرب اندام هوایی تا غلظت ۱۰ میکرومولار مانند شاهد بود و هیچ‌گونه تجمعی در اندام هوایی صورت نگرفت و پس از آن، از غلظت ۲۵ میکرومولار به تدریج میزان سرب در اندام هوایی گیاه کیسه‌کشیش افزایش یافت. در غلظت ۱۰۰ میکرومولار نیترات سرب با میانگین ۱۵/۳۳ میکروگرم بر گرم وزن خشک بیشترین محتوای سرب اندام هوایی مشاهده شد. همچنین بین غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میکرومولار نیترات سرب نیز اختلاف آماری مشاهده نشد (شکل B-۱). نکته قابل توجه در این پژوهش این بود که در غلظت‌های پایین‌تر از ۱۰ میکرومولار نیترات سرب، از انتقال سرب به اندام هوایی به شدت ممانعت می‌شود و تا غلظت ۵۰ میکرومولار نیترات سرب نیز میزان سرب تجمع‌یافته در اندام هوایی بسیار ناچیز است.

مقایسه میانگین اثر تنش نیترات سرب بر نسبت محتوای سرب اندام هوایی به ریشه (فاکتور انتقال) نشان داد به‌طور کلی تا سطح ۱۰ میکرومولار سرب این نسبت صفر بود و سپس در سطح ۲۵ میکرومولار افزایش یافت که با سطح ۵۰ میکرومولار (۰/۰۰۷۲) در یک گروه آماری قرار گرفت و در سطح ۱۰۰ میکرومولار (۰/۰۲۴) بیشترین این نسبت حاصل شد (شکل C-۱).

۳-۲. اثر نیترات سرب بر محتوای کلروفیل کل برگ و محتوای آنتوسیانین برگ

اثر نیترات سرب بر محتوای کلروفیل کل برگ و محتوای آنتوسیانین برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین نیترات سرب نشان داد که بیشترین و کم‌ترین محتوای کلروفیل کل برگ، به ترتیب با میانگین‌های ۲/۴۳ و ۱/۷۳ میلی‌گرم بر گرم بافت تر برگ، از تیمارهای ۵۰ میکرومولار نیترات سرب و عدم کاربرد نیترات سرب حاصل شد (شکل A-۲). بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که آنتوسیانین در برگ‌های گیاه کیسه‌کشیش با افزایش غلظت‌های مختلف نیترات سرب، افزایش یافت. بیشترین میزان آنتوسیانین مربوط به تیمار ۱۰۰ میکرومولار با مقدار ۱۰/۶۰ میکروگرم بر گرم وزن تر است. همچنین نتایج نشان

داد تا غلظت ۲۵ میکرومولار نیترات سرب، افزایشی در محتوای آنتوسیانین برگ صورت نگرفت و با افزایش غلظت نیترات سرب از ۲۵ به ۵۰ و سپس ۱۰۰ میکرومولار محتوای آنتوسیانین نیز افزایش قابل توجهی نشان داد (شکل ۲-B).

۳-۳. محتوای قندهای محلول و پروتئین محلول برگ

نتایج حاصل از تجزیه واریانس میانگین داده‌ها نشان داد که اثر نیترات سرب بر محتوای قندهای محلول و پروتئین محلول برگ گیاه کیسه کشیش در سطح احتمال یک درصد معنی دار است (جدول ۱). افزایش نیترات سرب به کار برده شده تا غلظت ۵۰ میکرومولار، تغییری در محتوای قندهای محلول برگ نسبت به گیاهان شاهد ایجاد نکرد؛ ولی تیمار ۱۰۰ میکرومولار نیترات سرب منجر به افزایش معنی دار محتوای قندهای محلول شد. بیشترین محتوای قندهای محلول برگ (۸۵/۷۲ میکروگرم بر گرم وزن خشک)، در شرایط کاربرد ۱۰۰ میکرومولار نیترات سرب به دست آمد (شکل ۳-A).

بر اساس نتایج حاصل مشخص شد افزایش غلظت نیترات سرب اثر افزایشی بر محتوای پروتئین محلول گیاه کیسه کشیش داشت. بیشترین محتوای پروتئین محلول برگ با میانگین‌های ۵/۹۶ میلی گرم بر گرم بافت تر برگ مربوط به غلظت ۱۰۰ میکرومولار نیترات سرب بود که اختلاف ۴۹/۶۶ درصدی با کمترین محتوای پروتئین محلول برگ نشان می‌دهد. تفاوت معنی داری بین غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار وجود نداشت. همچنین غلظت‌های صفر، ۵ و ۱۰ میکرومولار نیز در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۳-B).

جدول ۱. تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر نیترات سرب بر صفات مورد بررسی در گیاه کیسه کشیش در شرایط آبکشت.

Table 1. Analysis of variance (mean squares) for the effect of lead nitrate on *Capsella bursa-pastoris* parameters under hydroponic conditions.

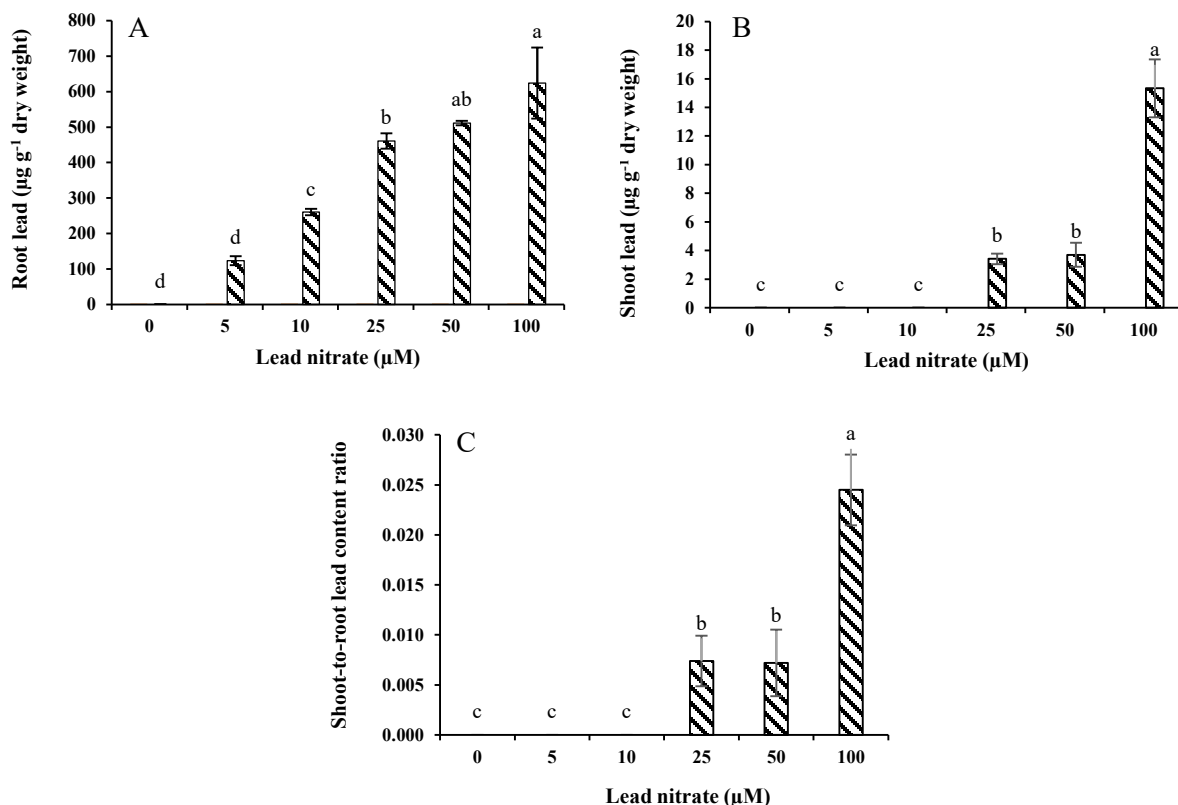
Source of variation	df	Mean Squares					
		Root lead	Shoot lead	Shoot-to-root lead ratio	Total chlorophyll	Leaf antocyanin	Total soluble sugars
Lead nitrate	5	175578**	98.27**	0.0002**	0.324**	41.90**	359**
Error	12	5414	2.508	1.816	0.0001	0.17	24.73
C.V. (%)		22.29	42.05	15.34	0.46	7.94	7.74

ادامه جدول ۱

Source of variation	df	Soluble leaf protein	Total phenolic compounds	Total flavonoids	Root length	Shoot length	Root dry weight	Shoot dry weight
Lead nitrate	5	4.12**	26126 ^{ns}	581183**	2.309*	4.18*	0.0012**	0.013**
Error	12	0.35	27489	79630	0.5904	1.03	0.00006	0.001
C.V. (%)		13.3	4.12	7.09	13.48	8.09	25.28	18.47

^{ns} و ^{**} به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطوح پنج و یک درصد را نشان می‌دهند.

^{ns}, * and ** indicate non-significant, and significant at $p \leq 0.05$, and $p \leq 0.01$, respectively.

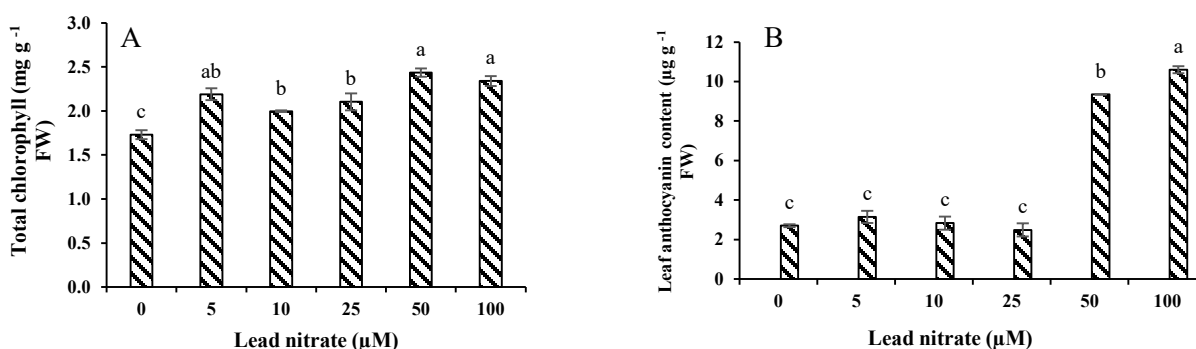


شکل ۱. مقایسه میانگین اثر نیترات سرب بر محتوای سرب ریشه (A)، سرب اندام هوایی (B) و نسبت سرب اندام هوایی به سرب ریشه (C) گیاه کیسه‌کشیش. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است. بارها، نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 1. Comparison of the mean effects of lead nitrate on root lead content (A), shoot lead content (B), and the shoot-to-root lead content ratio (C) in *Capsella bursa-pastoris*. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level. Error bars represent the standard error of the mean.

۳-۴. محتوای متابولیت‌های ثانویه

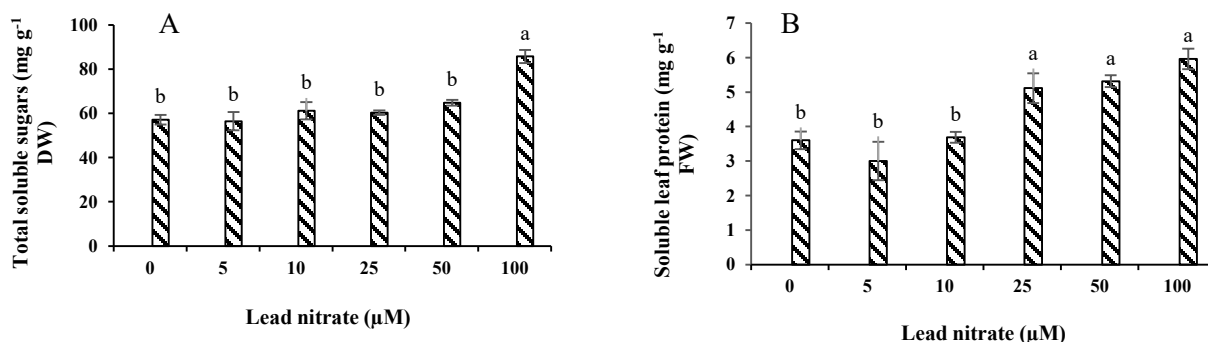
نتایج حاصل از تجزیه واریانس میانگین داده‌ها نشان داد که اثر نیترات سرب بر محتوای فنل کل برگ معنی‌دار نبود ولی بر محتوای فلاونوئید کل برگ در سطح احتمال یک درصد در گیاه کیسه‌کشیش معنی‌دار است (جدول ۱). بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که کم‌ترین میزان فنل کل برگ‌های گیاه کیسه‌کشیش تحت تیمار غلظت‌های مختلف نیترات سرب مربوط به غلظت پنج میکرومولار با مقدار ۳۸۱۶ میکروگرم بر گرم وزن تر برگ بود (شکل A-۴). بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که میزان فلاونوئید کل گیاه کیسه‌کشیش با افزایش غلظت نیترات سرب افزایش یافت. بیشترین فلاونوئید برگ در غلظت ۱۰۰ میکرومولار با مقدار ۳۸۴۸ میکروگرم بر گرم حاصل شد. به‌طور کلی تا غلظت ۵۰ میکرومولار نیترات سرب تفاوت معنی‌داری در محتوای فلاونوئید برگ وجود نداشت (شکل B-۴).



شکل ۲. مقایسه میانگین اثر نیترات سرب بر محتوای کلروفیل کل برگ (A) و محتوای آنتوسیانین برگ (B) گیاه کیسه کشیش.

میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است. بارها، نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 2. Comparison of the mean effects of lead nitrate on total leaf chlorophyll content (A) and leaf anthocyanin content (B) in *Capsella bursa-pastoris*. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level. Error bars represent the standard error of the mean.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر نیترات سرب بر محتوای قندهای محلول برگ (A) و محتوای پروتئین محلول برگ (B) گیاه کیسه کشیش.

میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است. بارها، نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 3. Comparison of the mean effects of lead nitrate on leaf soluble sugar content (A) and leaf soluble protein content (B) in *Capsella bursa-pastoris*. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level. Error bars represent the standard error of the mean.

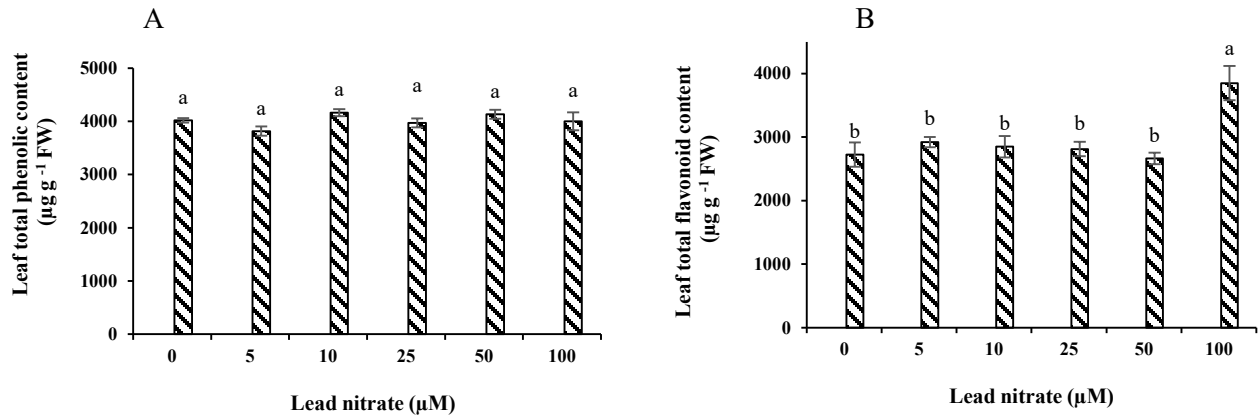
۳-۵. طول ریشه و اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد اثر نیترات سرب بر طول ریشه و طول اندام هوایی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار است (جدول ۱). مقایسه میانگین غلظت‌های نیترات سرب، نشان داد همراه با افزایش سطوح سرب، طول ریشه کاهش یافت. بیشترین طول ریشه (۱۲/۹۳ سانتی‌متر)، در شرایط عدم کاربرد نیترات سرب به‌دست آمد (شکل A-۵). البته بین اثر غلظت‌های مختلف نیترات سرب بر این شاخص، اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. نتایج مقایسه میانگین اثر نیترات سرب بر طول اندام هوایی نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین غلظت‌های مختلف نیترات سرب (۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار) بر این شاخص وجود نداشت. بیشترین طول اندام هوایی (۱۴/۷۰ سانتی‌متر) از سطح عدم کاربرد نیترات سرب به‌دست آمد (شکل B-۵).

۳-۶. وزن خشک ریشه و اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد اثر نیترات سرب بر وزن خشک ریشه و اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۱). نتایج نشان داد وزن خشک ریشه گیاه کیسه کشیش تحت تیمار غلظت‌های مختلف نیترات سرب نسبت به تیمار شاهد کاهش

یافت. بیشترین مقدار وزن خشک ریشه مربوط به تیمار شاهد به میزان ۰/۰۶۷ گرم بود. بین غلظت‌های ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار تفاوت معنی‌داری وجود نداشت (شکل C-۵).



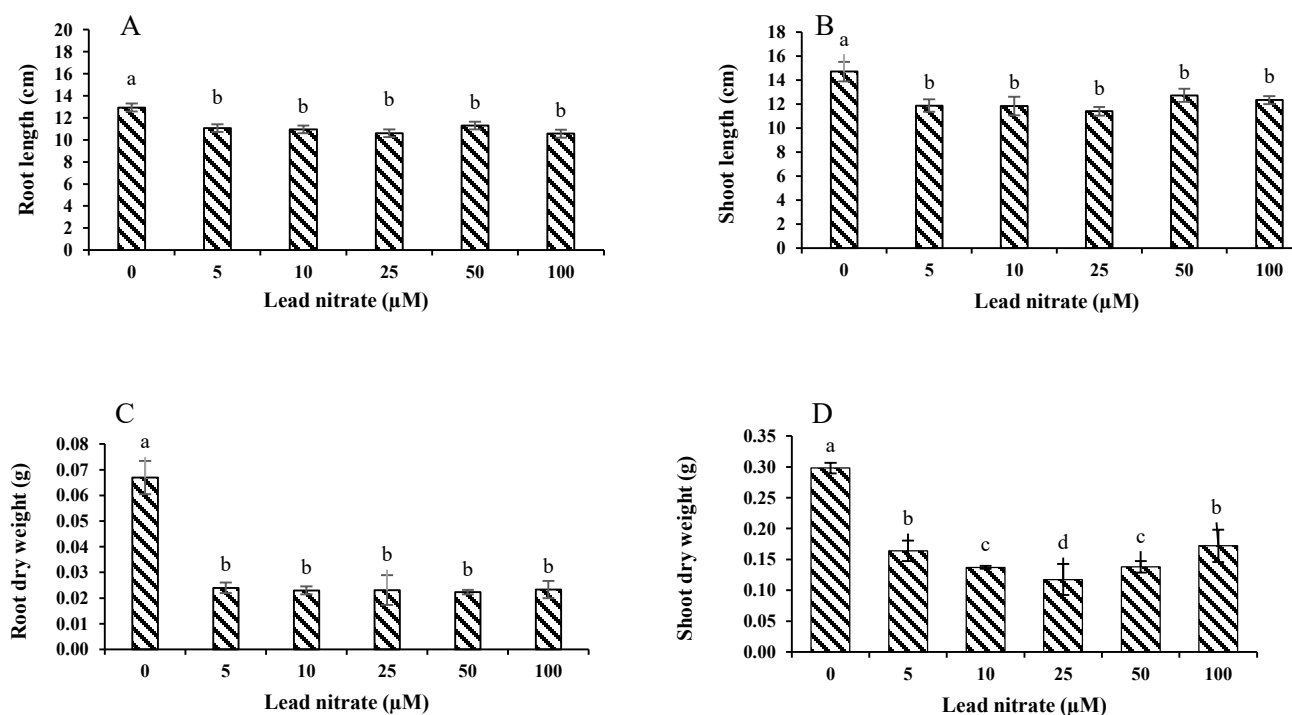
شکل ۴. مقایسه میانگین اثر نیترات سرب بر محتوای فنل کل برگ (A) و محتوای فلاونوئید برگ (B) گیاه کیسه‌کشیش.

میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است. بارها، نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 4. Comparison of the mean effects of lead nitrate on total leaf phenolic content (A) and leaf flavonoid content (B) in *Capsella bursa-pastoris*. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level. Error bars represent the standard error of the mean.

بر اساس نتایج حاصل از شکل D-۵ مشخص شد بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی گیاه کیسه‌کشیش تحت تیمار غلظت‌های مختلف نیترات سرب مربوط به تیمار شاهد به میزان ۰/۲۹ گرم است. بین تیمار غلظت‌های ۵ و ۱۰۰ میکرومولار و همچنین ۱۰ و ۵۰ میکرومولار نیترات سرب تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

نتایج حاصل از بررسی اثر نیترات سرب بر میزان تجمع این فلز در گیاه کیسه‌کشیش نشان داد که ریشه نقش اساسی در جذب و ذخیره‌سازی سرب دارد. با افزایش غلظت نیترات سرب، مقدار سرب در ریشه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت که نشان‌دهنده توان بالای ریشه در جذب و نگهداری این عنصر است. بر اساس این یافته‌ها، بیشترین میزان تجمع سرب در ریشه در غلظت ۱۰۰ میکرومولار مشاهده شد که با غلظت ۵۰ میکرومولار اختلاف معنی‌داری نداشت. این امر می‌تواند بیانگر اشباع نسبی مکان‌های اتصال سرب در ریشه باشد که از یک حد معین به بعد میزان جذب تفاوت چشمگیری نشان نمی‌دهد (Sayedmanesh Shiadeh *et al.*, 2015). در مقابل، بررسی محتوای سرب در اندام هوایی نشان داد که گیاه به شدت از انتقال سرب به بخش‌های هوایی جلوگیری می‌کند و تجمع این فلز در برگ‌ها و ساقه‌ها ناچیز است. این پدیده را می‌توان به سازوکارهای فیزیولوژیک گیاه، از جمله جداسازی فلزات سنگین در ریشه و یا افزایش بیان پروتئین‌های متصل‌کننده فلزات در این ناحیه نسبت داد (Aghaei *et al.*, 2019). غلظت بالای سرب در فرم آزاد برای سیتوزول سمی است و به همین دلیل، سلول‌های گیاهی با بهره‌گیری از سازوکارهایی همچون اتصال آن به دیواره سلولی، ذخیره در واکوئل و کلاته‌شدن توسط فیتوکلاتین، این عنصر را در ریشه تثبیت می‌کنند و بدین ترتیب، اثرات سمی آن را کاهش می‌دهند. در نتیجه، انتقال سرب به اندام‌های هوایی گیاه محدود می‌شود (Aslam *et al.*, 2021; Collin *et al.*, 2022). در بسیاری از گونه‌های گیاهی، بیشترین مقدار سرب جذب‌شده در ریشه انباشته می‌شود و تنها بخش کوچکی از آن به بخش‌های هوایی گیاه منتقل می‌شود (Rahman *et al.*, 2024).



شکل ۵. مقایسه میانگین اثر نیترات سرب بر طول ریشه (A)، طول اندام هوایی (B)، وزن خشک ریشه (C)، و وزن خشک اندام هوایی (D) گیاه کیسه کشیش. میانگین‌ها با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت آماری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد است. بارها، نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند.

Figure 5. Comparison of the mean effects of lead nitrate on root length (A), shoot length (B), root dry weight (C), and shoot dry weight (D) in *Capsella bursa-pastoris*. Means sharing at least one common letter are not significantly different according to the LSD test at the 5% probability level. Error bars represent the standard error of the mean.

نسبت محتوای سرب اندام هوایی به ریشه نشان‌دهنده میزان انتقال فلز سنگین از ریشه به بخش‌های هوایی گیاه است. اگر این نسبت پایین یا صفر باشد، بیانگر آن است که گیاه توانسته از انتقال سرب به اندام‌های حساس‌تر جلوگیری کند و سرب را عمدتاً در ریشه انباشته کرده است. اما اگر این نسبت افزایش یابد، به معنای آن است که مکانیسم‌های محدودکننده انتقال دیگر کارایی لازم را ندارند یا از کار افتاده‌اند، و سرب به میزان بیشتری وارد ساقه و برگ شده است (Collin *et al.*, 2022). در تحقیق حاضر بیشترین میزان سرب در ریشه تجمع یافته و از انتقال آن به بخش هوایی جلوگیری شده است. بررسی اثر نیترات سرب در گیاه *Matthiola flavida* نشان داد که غلظت سرب در ریشه و بخش هوایی گیاه عمدتاً به غلظت آن در محلول غذایی وابسته است (Heidari Dehno & Mohtadi, 2018). معمولاً در شرایط تنش، از جمله آلودگی‌های فلزات سنگین مانند سرب، میزان کلروفیل کاهش می‌یابد، زیرا این فلزات با ایجاد اختلال در سنتز رنگیزه‌های فتوسنتزی، موجب تخریب ساختار تیلاکوئیدی کلروپلاست و افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده کلروفیل مانند کلروفیل‌از می‌شوند (Gupta *et al.*, 2024). در پژوهشی بیشترین میزان کاهش کلروفیل در گیاه برنج (*Oryza sativa* L.) در تیمار ۳۰۰ میکرومولار سرب در محیط آبکشت مشاهده شد (Salavati *et al.*, 2021). برخلاف انتظار که معمولاً در شرایط تنش، کاهش شاخص کلروفیل مشاهده می‌شود، در تحقیق حاضر روند افزایشی در میزان کلروفیل دیده شد. یکی از دلایل احتمالی افزایش میزان کلروفیل در این شرایط، ویژگی‌های مقاومتی ذاتی گیاه کیسه کشیش است. این گیاه ممکن است با افزایش تراکم سلول‌های کلروفیل‌دار یا افزایش تعداد کلروپلاست‌ها در واحد سطح برگ، میزان جذب نور را افزایش داده و در نتیجه میزان کلروفیل را بالا ببرد. چنین سازوکاری می‌تواند به حفظ کارایی فتوسنتزی در شرایط تنش کمک کند (Rezaei *et al.*, 2022). یافته‌های مشابهی نیز در مطالعات

دیگر گزارش شده است که نشان می‌دهد برخی گیاهان مقاوم، در مواجهه با فلزات سنگین، با تعدیل مسیرهای فیزیولوژیکی و متابولیکی خود، از کاهش شدید کلروفیل جلوگیری می‌کنند (Malar *et al.*, 2014).

یکی از سازوکارهای حفاظتی غیرآنزیمی که در شرایط تنش‌های غیرزیستی تحریک می‌شود، بیوسنتز ترکیبات فنلی از جمله فلاونوئیدهاست (Mohagheghian *et al.*, 2025). آنتوسیانین‌ها دسته‌ای از فلاونوئیدها هستند که به‌طور گسترده‌ای در گیاهان وجود دارند. اتصال آنتوسیانین به برخی فلزات و کاهش اثرات سمی آن‌ها از طریق تشکیل کمپلکس‌های فلز-آنتوسیانین گزارش شده است (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2024). همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود در سطح ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار تنش نیترات سرب، محتوای آنتوسیانین افزایش یافته است. بنابراین می‌توان بیان کرد که گیاه کیسه‌کشیش توانسته است از این سازوکار دفاعی جهت مقابله با این سطح از تنش استفاده کند.

ترکیبات فنلی و فلاونوئیدها از جمله مهم‌ترین متابولیت‌های ثانویه در گیاهان هستند که نقش کلیدی در سازوکارهای دفاعی در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی، از جمله تنش فلزات سنگین ایفا می‌کنند. این ترکیبات به‌عنوان آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی قادرند از طریق مهار گونه‌های فعال اکسیژن و کلاته کردن یون‌های فلزی، اثرات مخرب تنش اکسیداتیو را کاهش دهند (Pourcel *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2022). نتایج تحقیق حاضر نشان داد که بیشترین میزان فنل کل در گیاه کیسه‌کشیش در غلظت ۱۰ میکرومولار نیترات سرب مشاهده شد و با افزایش غلظت نیترات سرب تغییر معنی‌داری در میزان فنل دیده نشد. همچنین نتایج پژوهش حاضر نشان داد که میزان فلاونوئید برگ گیاه کیسه‌کشیش تحت تأثیر نیترات سرب افزایش یافته است، به‌طوری‌که بیشترین مقدار در غلظت ۱۰۰ میکرومولار مشاهده شد. این افزایش در غلظت‌های پایین‌تر نیترات سرب (تا ۵۰ میکرومولار) چندان محسوس نبود، اما در غلظت‌های بالاتر، میزان فلاونوئیدها به‌طور چشمگیری افزایش یافت. این روند احتمالاً به دلیل نقش محافظتی فلاونوئیدها در برابر تنش فلزات سنگین و افزایش سنتز آن‌ها برای کاهش اثرات سمی سرب رخ داده است (Jańczak-Pieniżek *et al.*, 2022). افزایش فلاونوئیدها در حضور غلظت‌های بالای سرب ممکن است ناشی از القای بیان آنزیم‌های کلیدی در مسیر بیوسنتز فلاونوئیدها، مانند فنیل‌آلانین آمونیاکاز و کالکون سنتاز باشد. این آنزیم‌ها نقش مهمی در تنظیم تولید فلاونوئیدها دارند و معمولاً در پاسخ به تنش‌های محیطی فعال می‌شوند (Sharma & Dubey, 2007; Jańczak-Pieniżek *et al.*, 2022). بسیاری از گونه‌های گیاهی که در معرض فلزات سنگین، از جمله تحت تنش سرب در شرایط آب‌کشت قرار گرفته‌اند، ترکیبات فنلی و سایر متابولیت‌های ثانویه با ظرفیت آنتی‌اکسیدانی (مانند فلاونوئیدها) را افزایش می‌دهند که به کاهش آسیب اکسیداتیو کمک می‌کنند (McComb *et al.*, 2012).

افزایش محتوای قندهای محلول در برگ گیاه کیسه‌کشیش تحت تیمار نیترات سرب نشان‌دهنده یک سازوکار تنظیمی در پاسخ به تنش فلزات سنگین است. قندهای محلول نقش مهمی در تحمل تنش‌های محیطی دارند و به‌عنوان اسمولیت‌های سازگار عمل می‌کنند که در حفظ تعادل اسمزی، تنظیم فشار تورگر و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو نقش دارند (Mohammadi *et al.*, 2016). نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در غلظت‌های پایین‌تر نیترات سرب (تا ۵۰ میکرومولار)، تغییر معنی‌داری در محتوای قندهای محلول مشاهده نشد، اما در غلظت ۱۰۰ میکرومولار نیترات سرب، میزان قندهای محلول به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. این روند می‌تواند بیانگر این باشد که در غلظت‌های پایین‌تر، سامانه‌های آنتی‌اکسیدانی و سازوکارهای تنظیمی دیگر برای مقابله با تنش کافی هستند، اما در غلظت‌های بالاتر، گیاه با افزایش تولید قندهای محلول، به‌عنوان یک پاسخ تطبیقی از خود محافظت می‌کند (Qi *et al.*, 2025). در پژوهشی گزارش شده است که حضور سرب در منطقه ریشه و ورود آن به گیاه، بر متابولیسم قندها اثر می‌گذارد و باعث افزایش میزان قندهای محلول در لوبیا می‌شود (Aldoobie & Beltagi, 2013). همچنین در مطالعه دیگری بیشترین میزان قندهای محلول در شاخساره گیاه آویشن (۰/۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) تحت تأثیر تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب مشاهده شد (Rezaei *et al.*, 2022).

افزایش محتوای پروتئین محلول در برگ گیاه کیسه‌کشیش در مواجهه با غلظت‌های بالای نیترات سرب می‌تواند نشان‌دهنده یک پاسخ سازگاری به تنش ناشی از فلزات سنگین باشد. یکی از اثرات اصلی سرب در گیاهان، القای تنش اکسیداتیو از طریق تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن است. در چنین شرایطی، گیاه برای کاهش اثرات مخرب تنش اکسیداتیو، سازوکارهای دفاعی خود را فعال

می‌کند و تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهد و در نتیجه میزان پروتئین محلول افزایش می‌یابد (Ranjbar et al., 2011). تجمع پروتئین‌ها می‌تواند به حفظ تنظیم اسمزی سلول‌ها کمک کند و از اثرات منفی سمیت سرب بر فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه بکاهد. اثرات اولیه سرب روی ریشه شامل مهار تقسیم سلولی در نوک ریشه، کاهش طول ریشه و اختلال در ساختار میکروتوبول و میکروفیبریل‌ها است (Fahr et al., 2013). کاهش رشد ریشه ناشی از تجمع سرب در دیواره سلولی ریشه است که سبب کاهش انعطاف‌پذیری دیواره سلولی و در نتیجه محدود شدن رشد ریشه می‌شود (Gupta et al., 2024). سرب همچنین تغییرات ساختاری در ریشه برخی گیاهان ایجاد می‌کند. برای مثال، در گیاه نخود سبز (*Pisum sativum* L.)، این عنصر موجب ضخیم شدن نامنظم ریشه‌چه، تغییر در دیواره سلولی آندودرم و افزایش لیگنین در پارانشیم می‌شود (Sengar et al., 2008). در پژوهشی اثر نیترات سرب در محیط کشت گیاه شوید (*Anethum graveolens* L.) باعث کاهش طول ریشه و اندام هوایی آن در بستر آبکشت شد (Ranjbar et al., 2020). همچنین تنش سرب در گیاه خلر (*Lathyrus sativus* L.) سبب کاهش رشد اندام‌های هوایی و ریشه شد (Baladi et al., 2010). فلزات سنگین از تقسیم سلول‌های منطقه مریستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد جلوگیری می‌کنند (Collin et al., 2022).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزایش غلظت نیترات سرب منجر به کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه کیسه‌کشیش شد. این کاهش احتمالاً به دلیل تأثیرات منفی سرب بر رشد و متابولیسم گیاهان است. سرب به‌عنوان یک فلز سنگین، در فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه اختلال ایجاد می‌کند (Gupta et al., 2024). کاهش وزن خشک ریشه ممکن است ناشی از تأثیر سرب بر دیواره سلولی ریشه و افزایش تجمع این عنصر در آن باشد. وزن خشک اندام هوایی نیز تحت تأثیر سطوح مختلف نیترات سرب کاهش یافت. این کاهش می‌تواند ناشی از اثرات سمیت سرب بر متابولیسم سلولی و کاهش تولید ترکیبات ضروری برای رشد گیاه باشد. سرب با تأثیر بر فتوسنتز و اختلال در تعادل هورمونی، رشد بخش هوایی گیاه را محدود می‌کند (Ghelich et al., 2015; Collin et al., 2022).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که گیاه کیسه‌کشیش قادر به تحمل نسبی تنش سرب تا سطح ۵۰ میکرومولار می‌باشد و سرب جذب‌شده را به‌صورت عمده در ریشه گیاه نگهداری کرده و از انتقال آن به اندام هوایی جلوگیری می‌کند. این میزان تحمل احتمالاً از طریق فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو از جمله افزایش سطح آنتی‌اکسیدان‌هایی مانند فلاونوئیدها و آنتوسیانین‌ها اعمال می‌شود. با این حال، سطوح بالاتر سرب منجر به کاهش معنی‌دار شاخص‌های رشد گیاه می‌شود. مشاهده مقاومت نسبی گیاه کیسه‌کشیش در برابر تنش سرب، می‌تواند این گیاه را برای مطالعه اثر سایر فلزات سنگین مورد توجه قرار دهد.

۵. منابع

- Abtahi, M., Fakhi, Y., Oliveri Conti, G., Keramati, H., Zandsalimi, Y., Bahmani, Z., Hosseini Pouya, R., Sarkhosh, M., Moradi, B., Amanidaz, N., & Ghasemi, S.M. (2017). Heavy metals (AS, Cr, Pb, Cd, and Ni) concentrations in rice (*Oryza sativa*) from Iran and associated risk assessment: A systematic review. *Toxin Reviews*, 36(4), 331-341. <https://doi.org/10.1080/15569543.2017.1354307>.
- Aghaei, K., Rahkhosravani, B., Moghanloo, L., & Ghotbi Rawandi, A.A. (2019). Analysis of cadmium accumulation and its effects on some biochemical and physiological characters of basil plants. *Journal of Plant Process and Function*, 8(33), 107-122. <http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1133-fa.html>. (In Persian).
- Aldoobie, N.F., & Beltagi, M.S. (2013). Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress. *African Journal of Biotechnology*, 12(29), 4614-4622. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.12387>.
- Al-Sanfi, A.E. (2015). The chemical constituents and pharmacological effects of *Capsella bursa-pastoris*-a review. *International Journal of Pharmacology and Toxicology*, 5(2), 76-81.
- Arnon, D.I. (1949). Copper enzyme in isolated chloroplast and polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>.

- Asare, M., Száková, J., & Tlustoš, P. (2023). The fate of secondary metabolites in plant growing on Cd, As, and Pb contaminated soil – a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 11378-11398. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24776-x>.
- Aslam, M., Aslam, A., Sheraz, M., Ali, B., Ulhassan, Z., Najeeb, U., Zhou, W., & Gill, R.A. (2021). Lead toxicity in cereals: Mechanistic insight into toxicity, mode of action, and management. *Frontiers in Plant Science*, 11, 587785. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.587785>.
- Baladi, S.M., Kashani, A., Habibi, D., Paknejad, F., & Golshan, M. (2010). The effect of lead and copper on some physiological traits of *Lathyrus sativus*. *New Findings in Agriculture*, 5(1), 9-20. <https://sanad.iau.ir/Journal/nfa/Article/1086285>. (In Persian).
- Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram of protein utilizing of protein-day binding. *Annual Biochemistry*, 72, 248-254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).
- Chang, C.C., Yang, M.H., Wen, H.M., & Chern, J.C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 23-35. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>.
- Chapin, M.F., & Kennedy, G.F. (1994). *Carbohydrate Analysis: A Practical Approach*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199634491.001.0001>.
- Chen, D., Mubeen, B., Hasnain, A., Rizwan, M., Adrees, M., Naqvi, S.A., Iqbal, S., Kamran, M., El-Sabrout, A.M., Elansary, H.O., Mahmoud, E.A., Alaklabi, A., Sathish, M., & Din, G.M. (2022). Role of promising secondary metabolites to confer resistance against environmental stresses in crop plants: Current scenario and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 881032. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.881032>.
- Collin, S., Baskar, A., Geevarghese, D.M., Vellala, S.A., Bahubali, P., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G.I., Senatov, F., Koppala S., & Swaminappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 3, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2022.100064>.
- Fahr, M., Laplaze, L., Bendaou, N., Hocher, V., El Mzibri, M., Bogusz, D., & Smouni, A. (2013). Effect of lead on root growth. *Frontiers in Plant Science*, 4, 47559. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00175>.
- Ghelich, S., Zarinkamer, F., & Niknam, V. (2015). Lead accumulation and its effects on peroxidase activity, phenolic and flavonoid compounds in seedling stage of *Medicago sativa* (L.). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 28(1), 164-174. DOI: 20.1001.1.23832592.1394.28.1.15.0. (In Persian).
- Grosso, C., Vinholes, J., Silva, L.R., Guedes de Pinho, P., Goncalves, R.F., Valentao, P., Jäger, A.K., & Andrade, P.B. (2011). Chemical composition and biological screening of *Capsella bursa-pastoris*. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 21(4), 635-644. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000107>.
- Gupta, M., Dwivedi, V., Kumar, S., Patel, A., Niazi, P., & Yadav, V. K. (2024). Lead toxicity in plants: mechanistic insights into toxicity, physiological responses of plants and mitigation strategies. *Plant Signaling & Behavior*, 19(1), 2365576. <https://doi.org/10.1080/15592324.2024.2365576>.
- Hajimehdipoor, H., Khanavi, M., Shekarchi, M., Abedi, Z., & Pirali Hamedani, M. (2009). Investigation of the best method for extraction of phenolic compounds from *Echinaceae purpurea* (L.) Moench. *Journal of Medicinal Plants*, 8(32), 145-152. (In Persian).
- Heidari Dehno, A., & Mohtadi, A. (2018). The effect of different iron concentrations on lead accumulation in hydroponically grown *Matthiola flava* Boiss. *Ecological Research*, 33(4), 757-765. <https://doi.org/10.1007/s11284-018-1558-4>.
- Jahandari, A., & Abbasnejad, B. (2023). Environmental pollution status and health risk assessment of selective heavy metal(oid)s in Iran's agricultural soils: A review. *Journal of Geochemical Exploration*, 256, 107330. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107330>.
- Jańczak-Pieniżek, M., Cichoński, J., Michalik, P., & Chrzanowski, G. (2022). Effect of heavy metal stress on phenolic compounds accumulation in winter wheat plants. *Molecules*, 28(1), 241. <https://doi.org/10.3390/molecules28010241>.
- Lashkari Sanami, N., Ghorbani, J., Hojjati, S.M., Vahabzadeh, G., & Motesharezadeh, B. (2022). Effect of lead stress on growth and mineral elements of *Silybum marianum* (L.) Gaertn and *Artemisia absinthium* (L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2751-2762. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.329843.669063>. (In Persian).
- Lin, C.J., Liu, L., Liu, T., Zhu, L., Sheng, D., & Wang, D. (2009). Soil amendment application frequency contributes to phytoextraction of lead by sunflower at different nutrient levels. *Environmental and Experimental Botany*, 65, 410-416. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.12.003>.
- Ma, Y., Rajkumar, M., Zhang, C., & Freitas, H. (2016). Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, 174, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.047>.

- Malar, S., Vikram, S.S., Favas, P.J.C., & Perumal, V. (2014). Lead heavy metal toxicity induced changes on growth and antioxidative enzymes level in water hyacinths (*Eichhornia crassipes*). *Botanical Studies*, 55(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s40529-014-0054-6>.
- Mattosinhos, P., Sarandy, M., Novaes, R., Esposito, D., & Goncalves, R. (2022). Anti-inflammatory antioxidant and skin regenerative potential of secondary metabolites from plant of the Brassicaceae family: A systematic review of in vitro and in vivo preclinical evidence (biological activities Brassicaceae skin diseases). *Journal of Antioxidants*, 11(7), 1346. <https://doi.org/10.3390/antiox11071346>.
- McComb, J., Hentz, S., Miller, S.G., Begonia, M., & Begonia, G. (2012). Effects of lead on plant growth, lead accumulation and phytochelatin contents of hydroponically-grown *Sesbania Exaltata*. *World Environment*, 2(3), 38–43. <https://doi.org/10.5923/j.env.20120203.04>.
- Mohagheghian, B., Saeidi, G., & Arzani, A. (2025). Phenolic compounds, antioxidant enzymes, and oxidative stress in barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes under field drought-stress conditions. *BMC Plant Biology*, 25, 709. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06750-0>.
- Mohammadi, M., Ghassemi-Golezani, K., Zehtab-Salmasi, S., & Nasrollahzade, S. (2016). Assessment of some physiological traits in spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under water stress. *International Journal of Life Sciences*, 10(1), 58-64. <https://doi.org/10.3126/ijls.v10i1.14512>.
- Mohammadi, S., Shabani, Z., Khorram, B., Danekar, A., & Tanha Ziarati, M. (2020). Investigating of the mangrove ability (*Avicennia marina*) to reduce the heavy metals (lead, mercury, vanadium and cobalt) from aqua in Assaluyeh region. *Environmental Researches*, 11(21), 261-272. <https://doi.org/10.3126/ijls.v10i1.14512>. (In Persian).
- Pourcel, L., Routaboul, J.M., Cheynier, V., Lepiniec, L., & Debeaujon, I. (2007). Flavonoid oxidation in plants: From biochemical properties to physiological functions. *Trends in Plant Science*, 12(1), 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.11.006>.
- Qi, W., Bai, J., Yu, H., & Han, G. (2025). Physiological adaptations of *Vigna radiata* to heavy metal stress: Soluble sugar accumulation and biomass enhancement. *Plants*, 14(8), 1191. <https://doi.org/10.3390/plants14081191>.
- Rahman, S.U., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., Naveed, S., Ansari, M.J., Saeed, M., Ahmad, I., & Shehzad, M. (2024). Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. *Heliyon*, 10(6), e27724. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27724>.
- Ranjbar, M., Esmaili, S., & Moshtaghi, A.A. (2020). Lead and nickel effect on some physiological and biochemical characteristics of *Anethum graveolens* (L.). *Journal of Plant Biological Sciences*, 12(2), 1-22. <https://doi.org/10.22108/ijpb.2020.117860.1158>. (In Persian).
- Ranjbar, M., Lari Yazdi, H., & Boroumand Jazi, S. (2011). The effect of salicylic acid on photosynthetic pigments, contents of sugar and antioxidant enzymes under lead stress in *Brassica napus* (L.). *Journal of Plant Biological Sciences*, 3(9), 39-52. (In Persian).
- Rezaei, B., Amirnejad, A., & Ghobadi, M. (2022). Interactive effects of Pb (NO₃)₂, biochar and salicylic acid on growth characteristics of thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Water and Soil*, 36(1), 67-79. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.72977.1101>. (In Persian).
- Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2024). Antioxidant activity of anthocyanins and anthocyanidins: A critical review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22), 12001. <https://doi.org/10.3390/ijms252212001>.
- Salavati, J., Fallah, H., Niknejad, Y., & Barari Tari, D. (2021). Methyl jasmonate ameliorates lead toxicity in *Oryza sativa* by modulating chlorophyll metabolism, antioxidative capacity and metal translocation. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(5), 1089-1104. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00993-5>.
- Sayadmanesh Shiadeh, S.M., Qajar Sepanloo, M., & Bahmanyar, M.A. (2015). An investigation of heavy metals in canola and soil of farms irrigated with wastewater of the industrial city of Amol. *Water Research in Agriculture*, 29(2), 141-155. <https://doi.org/10.22092/jwra.2015.101655>. (In Persian).
- Sengar, R.S., Gautam, M., Sengar, R.S., Sengar, R.S., Garg, S.K., Sengar, K., & Chaudhary, R. (2008). Lead stress effects on physiobiochemical activities of higher plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 196, 73-93. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78444-1_3.
- Sharma, P., & Dubey, R.S. (2007). Involvement of oxidative stress and role of antioxidative defense system in growing rice seedlings exposed to toxic concentrations of aluminum. *Plant Cell Reports*, 26, 2027-2038. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0416-6>.
- Wagner, G.J. (1979). Content and vacuole/extra vacuole distribution of neutral sugars, free amino acids and anthocyanins in protoplast. *Plant Physiology*, 64, 88-93. <https://doi.org/10.1104/pp.64.1.88>.