University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

Feasibility Study on Phytoremediation of Growth Substrates Contaminated with Cadmium Nitrate by Common Purslane (*Portulaca oleracea*), White Goosefoot (*Chenopodium album*), and Common Amaranth (*Amaranthus retroflexus*) Weeds

Mohammad Hadi Tardasti[1] | Mehdi Madandoust[2]✉

1. Department of Agronomy, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: mhtardasti@iau.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Agronomy, Fasa Branch, Islamic Azad University, Fasa, Iran. E-mail: mehdi.madandoust@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 24 December 2022
Received in revised form
8 March 2024
Accepted 24 April 2024
Published online 12 June 2024

Keywords:
Ascorbate peroxidase
Cadmium nitrate
Chlorophyll
Phytoremediation
Weeds

ABSTRACT

Objective: In order to investigate the feasibility of phytoremediation of cadmium nitrate-contaminated growth substrates with weeds, a factorial experiment was conducted in the form of a completely randomized design in the spring of 2021-22.

Methods: The experimental factors included weeds (*Portulaca oleracea*, *Chenopodium album*, and *Amaranthus retroflexus*) and the gowth substrate contamination with cadmium nitrate comprising levels of zero (control), 25, 50, and 75 miligrams per kilogram of soil.

Results: The results showed that with increasing consumption of cadmium nitrate, the amount of cadmium in the shoots, roots and biological factors exhibited an increasing trend. The amount of root cadmium was higher in *P.oleracea*, but the concnetration of shoot cadmium in *Ch.album* and *A.retroflexus* showed a significant increase compared to that of *P.oleracea*. Therefore, in purslane, the transfer of cadmium from the roots to the shoots was probably less than that of *Ch.album* and *A.retroflexus*. With the increase in cadmium nitrate concentration, ion leakage displayed an increasing trend, and leaf relative water content and chlorophyll content displayed declining trends. On the other hand, the catalase and ascorbate peroxidase enzymes in leaves showed an increasing trend with increasing cadmium nitrate consumption. Also, the highest activity of antioxidant enzymes was observed in *A.retroflexus* weeds.

Conclusion: Generally, with the mentioned characteristics, ther *P.oleracea* plant can be considered as a hyperaccumulator, and *Ch.album* and *A.retroflexus* can be considered as moderate accumulators of cadmium metal.

Cite this article: Tardasti, M. H., & Madandoust, M. (2024). Feasibility Study on Phytoremediation of Growth Substrates Contaminated with Cadmium Nitrate by Common Purslane (*Portulaca oleracea*), White Goosefoot (*Chenopodium album*), and Common Amaranth (*Amaranthus retroflexus*) Weeds. *Journal of Crops Improvement*, 26 (2), 455-470. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2024.352875.2774

© The Authors.
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2024.352875.2774

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

شاپا الکترونیکی: ۶۹۵۷-۲۳۴۵

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

امکان‌سنجی گیاه‌پالایی بستر کاشت آلوده به نیترات‌کادمیوم با علف‌های هرز خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی

محمدهادی تردستی[۱] | مهدی مدن‌دوست[۲]✉

۱. گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: mhtardasti@iau.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، واحد فسا، دانشگاه آزاد اسلامی، فسا، ایران. رایانامه: mehdi.madandoust@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۲۳

کلیدواژه‌ها:

آسکوربات پراکسیداز

علف‌های هرز

کلروفیل

گیاه‌پالایی

نیترات‌کادمیوم

چکیده

هدف: به‌منظور بررسی امکان‌سنجی گیاه‌پالایی بستر کاشت آلوده به نیترات‌کادمیوم با علف‌های هرز آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در بهار سال ۱۴۰۱–۱۴۰۰ انجام گردید.

روش پژوهش: عوامل آزمایش شامل علف‌های هرز (خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی) و آلودگی بستر کاشت با نیترات‌کادمیوم در سطوح شامل صفر (شاهد) و غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش مصرف نیترات‌کادمیوم، میزان غلظت کادمیوم اندام هوایی و ریشه و فاکتور غلظت زیستی روند افزایشی نشان داد. میزان کادمیوم ریشه در علف هرز خرفه بیش‌تر بود، اما غلظت کادمیوم اندام هوایی در سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی نسبت به خرفه افزایش معنی‌داری نشان داد. بنابراین در گیاه خرفه احتمالاً انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی نسبت به گیاه سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی کم‌تر بوده است. با افزایش غلظت نیترات‌کادمیوم نشت یونی روند افزایشی و محتوای نسبی آب برگ و محتوای کلروفیل روند کاهش نشان داد. از سوی دیگر آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز برگ با افزایش مصرف نیترات‌کادمیوم روند افزایشی نشان داد. هم‌چنین بیش‌ترین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در علف‌های هرز تاج‌خروس وحشی مشاهده شد.

نتیجه‌گیری: در مجموع با معیارهای ذکرشده، می‌توان گیاه خرفه را بیش انباشت‌گر و سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی را میان انباشت‌گر برای فلز کادمیوم تلقی کرد.

استناد: تردستی، محمدهادی و مدن‌دوست، مهدی (۱۴۰۳). امکان‌سنجی گیاه‌پالایی بستر کاشت آلوده به نیترات‌کادمیوم با علف‌های هرز خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۶ (۲)، ۴۷۰-۴۵۵. DOI: https://doi.org/10.22059/jci.2024.352875.2774

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

منابع مهم انسانی شامل استفاده از نهاده‌های کشاورزی و امور شهری، حمل و نقل و صنایع و منابع طبیعی می‌توانند باعث تجمع غلظت‌های بالایی از عناصر سنگین شوند (شل[1] و همکاران، ۲۰۲۰). عناصر سنگین خاک شامل عناصر نیکل (جرم اتمی ۵۸/۶۹)، سرب (جرم اتمی ۲۰۷/۲)، جیوه (جرم اتمی ۲۰۰/۵۹)، مس (جرم اتمی ۶۳/۵۵)، کروم (جرم اتمی ۵۱/۹۹) و کادمیوم (جرم اتمی ۱۱۲/۴۱) هستند (جورجیوا آکووا[2]، ۲۰۱۸). هنگامی‌که یون‌های عناصر سنگین در غلظت‌های بالا در خاک وجود داشته باشد، با جذب و انباشته‌شدن توسط ریشه گیاه و تا حدودی انتقال آن‌ها به اندام‌های هوایی، منجر به صدمات متابولیسمی و کاهش رشد و عملکرد گیاه می‌گردد (استرکمن[3] و تومین[4]، ۲۰۲۰). از منابع آلودگی فلزات سنگین در کشاورزی می‌توان به مصرف کودهای آلی و معدنی، کاربرد آهک برای افزایش pH خاک، لجن فاضلاب، آب آبیاری و آفت‌کش‌ها به‌ویژه قارچ‌کش‌ها اشاره کرد. کودهای معدنی به‌ویژه کودهای فسفاته بسته به منبع آن دارای مقادیر متفاوتی از روی، سرب، نیکل، کروم و کادمیوم می‌باشند. تخمین زده شده که سالانه حدود ۹۶۰ تن کادمیوم در دنیا از طریق کودهای فسفاته به خاک‌ها اضافه می‌شود. لجن فاضلاب دارای غلظت بالایی از کروم، سرب، نیکل، کادمیوم، مس و روی می‌باشد (فرایزوا[5] و همکاران، ۲۰۱۷).

ایده استفاده از گیاهان جذب‌کننده و ذخیره‌کننده فلزات برای حذف فلزات سنگین و دیگر ترکیبات ابتدا در سال ۱۹۸۳ معرفی شد، اما در واقع مفهوم آن ۳۰۵ سال قبل به‌کار برده شده است. اصطلاح پالایش گیاهی مرکب از پسوند یونانی فیتو (گیاه) در ترکیب با ریشه لاتین پالایش (از بین‌بردن شیطان) می‌باشد. این فناوری را می‌توان در رابطه با آلودگی‌های آلی و معدنی موجود در خاک (مواد جامد)، آب (مواد مایع) یا هوا به‌کار برد. هزینه روش‌های معمول برای پالایش ممکن است به ده دلار در مترمکعب برسد. در حالی‌که هزینه‌های گیاه‌پالایی برای هر مترمکعب کم‌تر از ۰/۵۰ دلار تخمین زده شده است. پنج فرایند اصلی گیاه‌پالایی شامل فیلتر ریشه، تثبیت گیاه، خارج‌کردن گیاهی، تبخیر گیاهی و تغییر شکل در گیاه می‌باشد (کافی و همکاران، ۱۴۰۰).

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی امکان‌سنجی گیاه‌پالایی بستر کاشت آلوده به نیترات‌کادمیوم با علف‌های هرز خرفه[6]، سلمه‌تره[7] و تاج‌خروس وحشی[8] انجام گرفت تا پاسخ فیزیولوژیک و مورفولوژیک علف‌های هرز به غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم تعیین شود.

۲. پیشینهٔ تحقیق

۲. ۱. پیشینهٔ نظری

گیاه‌پالایی یک تکنیک سازگار با محیط زیست، از نظر اقتصادی امکان‌پذیر و نوظهور برای احیای محیط آلوده به فلزات سنگین است. مطالعه‌ای به‌منظور تعیین پتانسیل تجمع فلزات سنگین دوازده گونه علف‌هرز بومی انجام شد. تجمع ناهمگن فلزات در بین علف‌های هرز مختلف مشاهده شد. علاوه بر این، تجمع فلز در بافت‌های گیاهی، یعنی ریشه‌ها و اندام‌های هوایی متفاوت بود. غلظت کروم، مس، نیکل، سرب و کادمیوم در بافت‌های ریشه در محدوده ۶۷/۷۲–۳/۹۷،

1. Shall
2. Gjorgieva Ackova
3. Sterckeman
4. Thomine
5. Fryzova
6. Portulaca oleracea
7. Chenopodium album
8. Amaranthus retroflexus

۳/۴۴-۴۵/۴۷، ۲/۵۲-۱۴/۱۹، ۶/۱۳-۵۸/۲۸ و ۰/۳۲-۳/۹۶ میکروگرم در گرم یافت شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که گونه‌های علف‌های هرز موردمطالعه ممکن است برای گیاه‌پالایی مورداستفاده قرار گیرند (کومار[1] و همکاران، ۲۰۱۳). در حال حاضر به‌طور تقریبی ۴۰۰ گونه گیاهی بیش‌انباشت‌گر شناسایی شده است که بخش عمده‌ای از این گونه‌ها در نواحی آلوده‌شده اروپا، ایالات متحده آمریکا، نیوزلند و استرالیا یافت می‌شوند (کرامر[2] و همکاران، ۱۹۹۷).

۲. ۲. پیشینهٔ تجربی

گیاه‌پالایی، که به‌طور عمده از تجمع بیش از حد برای حذف فلزات سنگین از خاک‌های آلوده استفاده می‌کند، در سراسر جهان توجه بیش‌تری را به خود جلب کرده است. در آزمایشی، ویژگی‌های انباشت کادمیوم، سرب، مس و روی با ۱۳ گونه علف‌هرز موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که قاصدک[3] و ترتیزک زرد[4] خاصیت تجمع بیش از حد کادمیوم را نشان می‌دهند. غلظت کادمیم در ساقه و برگ ترتیزک زرد در شرایط خاک‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم بیش‌تر از ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. فاکتورهای تجمع کادمیوم و فاکتورهای جابه‌جایی در اندام هوایی ترتیزک زرد نیز بالاتر از ۱ بود و زیست‌توده گیاهی نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری نداشت (وی[5] و همکاران، ۲۰۰۸).

ارزیابی توان گیاه‌پالایی آب‌تره[6] در رفع آلودگی کادمیوم موردبررسی قرار گرفت. در این پژوهش اثر سطوح مختلف کلرید کادمیوم (صفر، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میکرومولار) بر خصوصیات فیزیولوژیکی و توان جذب گیاه آب‌تره انجام شد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که اثر سطوح مختلف تیمار کادمیوم بر خصوصیات فیزیولوژیکی و میزان کادمیوم در گیاه معنی‌دار بود. به‌طوری‌که وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی، ارتفاع ریشه و اندام هوایی، میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه با افزایش سطوح کادمیوم روند کاهشی داشتند. هم‌چنین هرچه سطوح کادمیوم در محیط کشت افزایش یافت، غلظت کادمیوم در ریشه و اندام هوایی گیاه افزایش یافت. بیش‌ترین محتوای کادمیوم در هر دو اندام ریشه و ساقه گیاه آب‌تره در غلظت ۵۰۰ میکرومولار کادمیوم مشاهده شده است. نتایج حاضر نشان داد که گیاه آب‌تره توانایی پالایش کادمیوم از آب‌های آلوده به این فلز را دارد (جعفرزاده رزمی و همکاران، ۱۳۹۹).

مطالعات صورت‌گرفته در گیاهان قدومه کوهی[7]، تاج‌خروس وحشی و علف‌مرغ[8] نشان داد که غلظت سرب و کادمیم در ریشه هر سه گیاه بیش از ساقه و برگ بوده و هم‌چنین غلظت سرب در اندام‌های زیرزمینی و روی در اندام‌های هوایی بالاتر بوده است. نتایج به‌دست‌آمده بالاترین غلظت روی را در اندام هوایی علف‌هرز مرغ به میزان ۲۶۲ میلی‌گرم در کیلوگرم و بیش‌ترین غلظت سرب را در اندام‌های زیرزمینی گیاه تاج‌خروس وحشی به میزان ۷۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از خاک نشان داد (اکبرپور سراسکانرود و همکاران، ۱۳۹۱).

۳. روش‌شناسی پژوهش

این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار در بهار سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به‌صورت

1. Kumar
2. Kramer
3. *Rorippa globosa*
4. *Taraxacum mongolicum*
5. Wei
6. *Nasturium officinale* L.
7. Arabis arenosa
8. Agropyron repens

گلدانی در هوای آزاد در شهر شیراز با عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۳ دقیقه شرقی و ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر از سطح دریا انجام گردید. عوامل آزمایش شامل علف‌های هرز (خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی) و آلودگی بستر کاشت با نیترات‌کادمیوم در سطوح صفر (شاهد) و غلظت‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود. نیترات‌کادمیوم از ساخت شرکت مرک آلمان استفاده شد.

بذرهای علف‌های هرز از مزارع اطراف شیراز تهیه شد. برای شکستن خواب فیزیولوژیکی به‌مدت ۳۰ روز در دمای ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس در مدت ۱۲ ساعت با اسیدجیبرلیک ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد پیش تیمار شد. بذرها پس از ضدعفونی با محلول هیپوکلریت سدیم پنج درصد به‌مدت ۳۰ ثانیه، درون گلدان کشت گردید.

ابتدا گلدان‌ها با خاک مزرعه پر شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده در آزمایش به شرح جدول (۱) بود. در مرحله بعد فلز سنگین نیترات‌کادمیوم با غلظت‌های مشخص صفر، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک توسط افشانه لایه‌لایه روی خاک گلدان پاشیده شد تا مخلوط یکنواختی حاصل شود. گلدان‌های استفاده‌شده از جنس پلاستیک، با ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر و قطر ۲۰ سانتی‌متر، با وزن یکسان (۶ کیلوگرم) بود. بعد از گذشت یک ماه (به‌دلیل یکنواخت‌شدن فلز سنگین با خاک) کاشت صورت گرفت. در هر گلدان ۱۰ بذر علف‌هرز کاشته شد و پس از سبزشدن به ۵ بوته تنک شد. لازم به ذکر است که قبل از کاشت ۰/۳ گرم کود فسفات‌آمونیوم در لایه یک سانتی‌متری زیر بذر قرار داده شد (معادل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و ۰/۵ گرم کود اوره (معادل ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) همراه با اولین آب آبیاری به هر گلدان داده شد، ۰/۵ گرم دیگر کود اوره (معادل ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) نیز به‌صورت سرک طی مرحله انتهای رشد همراه با آب آبیاری اضافه شد. طی دوره رشد، آبیاری گلدان‌ها تا حد ظرفیت زراعی انجام شد.

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی و فیزیکی خاک مورداستفاده آزمایش

کربن آلی (درصد)	N (درصد)	P	K	Mn	Zn	Fe	Cu	Cd	اسیدیته	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	بافت
		(میلی‌گرم بر کیلوگرم)									
۰/۴۱	۰/۱	۷	۱۸۲	۳/۱	۱/۵	۸/۹	۰/۵۸	۰/۱۲	۷/۱۱	۱/۳۵	لوم رسی

مقدار ۵۰ گرم از ریشه و اندام هوایی به‌طور مجزا در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت در آون خشک شده و پس از خردکردن از الک ۰/۸۴ میلی‌متری عبور داده و درون بشر یا لوله هضم ریخته و ۵ میلی‌لیتر اسیدنیتریک غلیظ به آن اضافه کرده و اجازه داده شد که یک شبانه‌روز بماند. بشر در پوشیده را روی هات‌پلیت قرار داده تا عمل هضم در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برای یک ساعت انجام گردید. سپس بشر را از روی هات‌پلیت برداشته و اجازه داده شد تا خنک شود. پس از آن ۳ میلی‌لیتر پراکسیدهیدروژن ۳۰ درصد به بشر اضافه گردید و عمل هضم در دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. اضافه‌نمودن پراکسیدهیدروژن ۳۰ درصد را تکرار نموده تا ماده هضم‌شده شفاف شود و در هنگام نیاز اسیدنیتریک اضافه گردید تا از خشک‌شدن جلوگیری شود. هنگامی‌که مخلوط هضم شفاف شد، قیف را برداشته تا دمای هات‌پلیت به ۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد، در غیر این صورت دوباره ۳ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد به بشر اضافه گردید و عمل هضم در دمای ۱۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. محلول‌های هضم‌شده با ۲۵ میلی‌لیتر آب دو بار تقطیر رقیق شدند و با کاغذ واتمن شماره ۴۲ صاف گردیدند. در انتها غلظت فلزات کادمیوم در محلول هضم‌شده با

دستگاه جذب اتمی (مدل VARIAN AAS-240) تعیین شد (منچ[1] و همکاران، ۱۹۹۴). جذب فلز کادمیوم در ریشه و اندام هوایی برای محاسبه فاکتور غلظت زیستی از طریق رابطه (۱) محاسبه گردید.

رابطه ۱) غلظت اضافه‌شده کادمیوم به خاک / غلظت کادمیوم در بافت گیاهی = فاکتور غلظت زیستی

اندازه‌های یکسان از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته از هر تیمار تهیه شد. پس از آن نمونه‌ها در ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر و به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس بعد از مدت ۲۴ ساعت، هدایت الکتریکی هر نمونه با استفاده از دستگاه ECمتر اندازه‌گیری شد (EC1). هم‌چنین لوله‌های آزمایش به‌مدت ۴۵ دقیقه در حمام آب جوش با دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد، جهت اندازه‌گیری میزان نشت الکترولیت برگ در اثر مرگ سلول قرار داده و پس از سردشدن در دمای آزمایشگاه دوباره هدایت الکتریکی نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید (EC2). در نهایت درصد نشت الکترولیت (EL) نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید (سایرام[2] و همکاران، ۲۰۰۲).

رابطه ۲) $EL=(EC1/EC2)\times 100$

جهت اندازه‌گیری محتوای آب نسبی برگ‌ها از هر تیمار سه برگ جوان کاملاً باز شده و شاداب انتخاب شد، هم‌چنین نمونه‌برداری اول صبح و قبل از طلوع آفتاب انجام گرفت. محتوای آب نسبی برگ‌ها با استفاده از رابطه (۳) مقدار آن محاسبه شد.

رابطه ۳) محتوای آب نسبی برگ = ((FW - DW) / (TW - DW)) × ۱۰۰

که در آن، FW وزن تازه بافت برگ، DW وزن خشک بافت برگ، TW وزن آماس‌یافته بافت برگ است. جهت نمونه‌برداری از برگ‌های جوان و سالم استفاده شد، به این صورت که در ابتدای روز توسط قیچی قطعاتی تقریباً به یک اندازه از برگ جدا و با ترازو (دقت ۰/۰۰۱ گرم) وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن آماس‌یافته برگ، برگ‌ها در ظروف پتری‌دیش سربسته و حاوی آب مقطر در محلی تاریک با دمای ثابت به‌مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. سپس رطوبت سطحی برگ‌ها با کاغذ واتمن شماره (۱) گرفته شد و وزن آماس محاسبه گردید. برای اندازه‌گیری وزن خشک، برگ‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و سپس وزن شد (جنسن[3] و همکاران، ۲۰۰۰).

میزان کلروفیل a و b با استفاده از روش آرنون۴ (۱۹۴۹) با نمونه‌گیری تصادفی از برگ‌های بالغ و عصاره‌گیری با استون اندازه‌گیری شد. جذب نور با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل Vis 2100 ساخت کشور آمریکا) در طول موج‌های ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر خوانده شد. در نهایت میزان آن‌ها با استفاده از معادلات (۴)، (۵) و (۶) محاسبه شد. در روابط زیر V حجم نمونه، OD میزان جذب، W وزن تر نمونه است.

رابطه ۴) کلروفیل a = [12.7 (OD663) - 2.69 (OD645)] × V/1000W

رابطه ۵) کلروفیل b = [22.9 (OD645) - 4.68 (OD663)] × V/1000W

رابطه ۶) کلروفیل کل= [20.2 (OD645) - 8.02 (OD663)] × V/1000W

برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز ۰/۱ گرم نمونه‌ی منجمد برگ در ۳ میلی‌لیتر بافر فسفات سدیم ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸ عصاره‌گیری گردید. همگن‌های حاصل با سرعت ۱۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژشده و از بخش شناور رویی برای سنجش فعالیت آنزیم کاتالاز استفاده گردید. مخلوط واکنش شامل ۲/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات‌سدیم ۲۵ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۸ هم‌چنین ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسیدهیدروژن ۱۰ میلی‌مولار و ۱۰۰

1. Mench
2. Sairam
3. Jensen
4. Arnon

میکرولیتر عصاره آنزیمی می‌باشد، سپس در طول موج ۲۴۰ نانومتر (کاکمک[1] و هورست[2]، ۱۹۹۱) و با اسپکتروفتومتر خوانده شد. در نهایت میزان فعالیت آنزیم کاتالاز براساس واحد میکرومول بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه و با استفاده از ضریب خاموشی (۳۹/۴ میکرومول بر متر در سانتی‌متر) گزارش گردید.

برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز ۱۰۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی، ۲ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم ۶۰ میلی‌مولار با اسیدیته ۶/۱ هم‌چنین ۰/۵ میلی‌لیتر گلیکول ۲۸ میلی‌مولار و ۰/۵ میلی‌لیتر پراکسیدهیدروژن ۵ میلی‌مولار اضافه نموده و جذب محلول در طول موج ۴۷۰ نانومتر (قناتی و همکاران ۲۰۰۲) با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد. میزان فعالیت آنزیم پراکسیداز براساس واحد میکرومول بر میلی‌گرم پروتئین در دقیقه و با استفاده از ضریب خاموشی (۶/۲۶ میکرومول بر متر در سانتی‌متر) گزارش شد.

جهت اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی نیز پس از شست‌و شو با آب مقطر و خشک‌شدن در آون در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم وزن شد.

تجزیه واریانس داده‌ها برای صفات مختلف با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) انجام گرفت. مقایسه میانگین داده‌ها نیز با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن[3] در سطح احتمال ۵ درصد صورت گرفت. در صورت معنی‌دار بودن برهمکنش، برش‌دهی انجام و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن انجام گردید. برش‌دهی به معنای این است که مقایسه میانگین در هر سطح از فاکتور اول برای سطوح مختلف فاکتور دوم به‌طور جداگانه انجام می‌شود. رسم نمودار و جدول‌ها نیز توسط نرم‌افزارهای Excel صورت گرفت.

۴. یافته‌های پژوهش

۴. ۱. غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی

نوع علف‌هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم و برهمکنش عوامل آزمایشی، روی صفت غلظت کادمیوم ریشه معنی‌دار بود، هم‌چنین غلظت کادمیوم اندام هوایی فقط تحت تأثیر غلظت های مختلف نیترات‌کادمیوم قرار گرفت (جدول ۲). بیش‌ترین غلظت کادمیوم ریشه در خرفه مشاهده شد، هم‌چنین غلظت کادمیوم ریشه در سلمه‌تره نسبت به تاج‌خروس وحشی افزایش معنی‌داری نشان داد. کم‌ترین غلظت کادمیوم ریشه با میزان ۳۱/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در تاج‌خروس وحشی به‌دست آمد (جدول ۳). از طرف دیگر، افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم اندام هوایی نسبت به شاهد با بالارفتن میزان استفاده از نیترات‌کادمیوم مشاهده شد (جدول ۴). برش‌دهی برهمکنش نیترات‌کادمیوم و ترکیبات اصلاح‌کننده نشان داد که در سه نوع علف‌هرز خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی با افزایش استفاده از نیترات‌کادمیوم غلظت کادمیوم ریشه روند افزایشی و معنی‌داری نشان داد (جدول ۵).

۴. ۲. فاکتور غلظت زیستی ریشه و اندام هوایی

نوع علف‌هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم، روی صفت فاکتور غلظت زیستی ریشه معنی‌دار بود، هم‌چنین فاکتور غلظت زیستی اندام هوایی فقط تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم قرار گرفت (جدول ۲). بیش‌ترین میزان فاکتور غلظت زیستی ریشه به‌ترتیب در علف‌های هرز خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی به‌ترتیب با میزان ۱/۸۲، ۱/۲۳ و ۰/۸۲۳ بود (جدول ۳). تیمار ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات‌کادمیوم دارای بیش‌ترین فاکتور غلظت زیستی ریشه و اندام هوایی بود

1. Cakmak
2. Horst
3. Duncan's multiple range test

پس از این تیمار، بالاترین فاکتور غلظت زیستی ریشه و اندام هوایی در غلظت ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات‌کادمیوم مشاهده شد که نسبت به ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اختلاف معنی‌داری نشان نداد (جدول ۴).

۴. ۳. نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ

نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ تحت تأثیر غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم قرار گرفت، هم‌چنین تأثیر نوع علف‌هرز و برهمکنش نوع علف‌هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم فقط روی نشت یونی معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین نشت یونی در تاج‌خروس وحشی مشاهده شد، هم‌چنین نشت یونی برگ در سلمه‌تره نسبت به خرفه افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). با بالارفتن میزان استفاده از نیترات‌کادمیوم نشت یونی روند افزایشی نشان داد. برش‌دهی برهمکنش نوع علف‌هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم نشان داد که در سه نوع علف‌هرز خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی با افزایش استفاده از نیترات‌کادمیوم نشت یونی برگ‌ها روند افزایشی و معنی‌داری نشان داد، به‌طوری‌که بیش‌ترین نشت یونی در هر سه علف‌هرز در تیمار ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات‌کادمیوم مشاهده شد. هم‌چنین کم‌ترین نشت یونی در تیمار شاهد بدون کادمیوم بود (جدول ۵).

بیش‌ترین محتوای نسبی آب برگ در تیمار شاهد مشاهده شد و تیمار ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات‌کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار محتوای نسبی آب برگ گردید. به‌طوری‌که تیمار ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات‌کادمیوم محتوای نسبی آب برگ را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش نشان دادند، اما بین تیمار ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات‌کادمیوم و شاهد اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۴).

۴. ۴. رنگدانه‌های فتوسنتزی

محتوای کلروفیل a، b و a+b برگ تحت تأثیر نیترات‌کادمیوم و برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم قرار گرفت، هم‌چنین نوع علف‌های هرز فقط روی محتوای کلروفیل a و a+b برگ معنی‌دار بود (جدول ۶). محتوای کلروفیل a برگ در علف‌هرز تاج‌خروس وحشی و سلمه‌تره نسبت به علف‌هرز خرفه به‌طور معنی‌داری کم‌تر بود (جدول ۳). از طرف دیگر، افزایش مصرف نیترات‌کادمیوم سبب کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل a برگ گردید. برش‌دهی برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم نشان داد که افزایش نیترات‌کادمیوم سبب کاهش محتوای کلروفیل a برگ در علف‌های هرز شده است، به‌طوری‌که کم‌ترین محتوای کلروفیل a برگ در غلظت ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات‌کادمیوم مشاهده شد (جدول ۷).

با افزایش مصرف نیترات‌کادمیوم محتوای کلروفیل b برگ روند کاهشی و معنی‌داری نشان داد. برش‌دهی برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم نشان داد که افزایش نیترات‌کادمیوم سبب کاهش محتوای کلروفیل b برگ در علف‌های هرز خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی شد. هم‌چنین در هر سه نوع علف‌هرز اختلاف معنی‌داری بین شاهد و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نیترات‌کادمیوم مشاهده نشد (جدول ۷).

علف‌هرز تاج‌خروس وحشی و سلمه‌تره محتوای کلروفیل a+b برگ کم‌تری نسبت به علف‌هرز خرفه نشان دادند (جدول ۳). افزایش مصرف نیترات‌کادمیوم نیز سبب کاهش معنی‌دار محتوای کلروفیل a+b برگ گردید. برش‌دهی برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم نشان داد که افزایش نیترات‌کادمیوم سبب کاهش محتوای کلروفیل a+b برگ در علف‌های هرز شده است، به‌طوری‌که کم‌ترین محتوای کلروفیل a+b برگ در غلظت ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات‌کادمیوم مشاهده شد (جدول ۷).

۴. ۵. آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز

آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات‌پراکسیداز برگ تحت تأثیر نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم قرار گرفت، هم‌چنین برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم، روی آنزیم کاتالاز و آسکوربات‌پراکسیداز معنی‌دار بود (جدول ۶). در علف‌هرز تاج‌خروس وحشی بیش‌ترین فعالیت آنزیم کاتالاز مشاهده شد و علف‌های هرز خرفه و سلمه‌تره میزان فعالیت آنزیم کاتالاز نسبت به علف‌هرز تاج‌خروس وحشی کم‌تر بود (جدول ۳). آنزیم کاتالاز برگ با افزایش مصرف نیترات‌کادمیوم نیز روند افزایشی نشان داد. برش‌دهی برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم نشان داد که افزایش نیترات‌کادمیوم سبب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز شد. هم‌چنین در علف‌هرز سلمه‌تره تفاوت معنی‌داری بین شاهد و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات‌کادمیوم مشاهده نگردید. در علف‌هرز خرفه سطح ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم نیترات‌کادمیوم با هم تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۷).

بیش‌ترین فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در علف‌هرز تاج‌خروس وحشی مشاهده شد، و علف‌های هرز خرفه و سلمه‌تره میزان فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز آن‌ها کم‌تر بود (جدول ۳). با افزایش مصرف نیترات‌کادمیوم، آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز برگ روند افزایشی نشان داد. برش‌دهی برهمکنش نوع علف‌های‌هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم نشان داد که افزایش نیترات‌کادمیوم سبب افزایش فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز شد. هم‌چنین در علف‌هرز سلمه‌تره و خرفه تفاوت معنی‌داری بین شاهد و ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات‌کادمیوم مشاهده نگردید. در علف‌هرز تاج‌خروس وحشی سطح ۵۰ و ۷۵ میلی‌گرم نیترات‌کادمیوم با هم تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۷).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات کادمیوم ریشه و اندام هوایی، غلظت زیستی ریشه و اندام هوایی، نشت یونی و محتوای نسبی آب برگ

منابع تغییرات	درجه آزادی	کادمیوم ریشه	کادمیوم اندام هوایی	غلظت زیستی ریشه	غلظت زیستی اندام هوایی	نشت یونی	محتوای نسبی آب برگ
علف‌هرز	۲	۴۴۰۳/۲**	۱۸۹/۷*	۲/۲۵**	۰/۰۱۷^{ns}	۳۹۱/۳**	۶۴/۶^{ns}
نیترات‌کادمیوم	۳	۱۶۷۶۳/۱**	۵۵۲۲/۹**	۰/۰۳۲*	۰/۱۱۲*	۳۳۳۲/۴**	۹۶۰/۵**
علف‌هرز × نیترات‌کادمیوم	۶	۹۱۶/۹**	۴۷/۷^{ns}	۰/۰۰۸^{ns}	۰/۰۳۵^{ns}	۱۱۸/۹**	۰/۳۹^{ns}
خطا	۲۴	۳۹/۰	۸۸/۰	۰/۰۳۴	۰/۰۶۷	۱۱/۱۶	۲۱/۱۴
ضریب تغییرات (درصد)	_	۱۲/۷	۲۸/۰	۱۴/۳	۲۹/۱	۷/۶	۷/۲

*، ** و ns: به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داربودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم تفاوت معنی‌دار.

جدول ۳. صفات اندازه‌گیری‌شده در علف‌های هرز مختلف

	خرفه	سلمه‌تره	تاج‌خروس وحشی
کادمیوم اندام هوایی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	۲۴/۷۵b	۳۱/۰۸a	۳۲/۰۸a
غلظت زیستی ریشه (درصد)	۱/۸۲a	۱/۲۳b	۰/۸۲c
کلروفیل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) a	۲/۵۹a	۲/۴۸b	۲/۴۳b
کلروفیل (میلی‌گرم بر کیلوگرم) a+b	۳/۴۶a	۳/۳۰b	۳/۲۸b
کاتالاز (میکرومول بر دقیقه در میلی‌گرم)	۰/۳۶b	۰/۳۲b	۰/۴۲a
آسکوربات پراکسیداز (میکرومول بر دقیقه در میلی‌گرم)	۱/۰۵b	۱/۰۷ab	۱/۱۰a
وزن خشک اندام هوایی (گرم در بوته)	۱/۶۹c	۲/۹۰b	۴/۱۳a

در هر ردیف، میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

جدول ٤. غلظت‌های کادمیوم اندام هوایی و غلظت‌های زیستی ریشه و اندام هوایی و محتوای نسبی آب برگ در علف‌های هرز و غلظت‌های نیترات‌کادمیوم خاک

نیترات‌کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کادمیوم اندام هوایی (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	غلظت زیستی		محتوای نسبی آب برگ (درصد)
		ریشه (درصد)	اندام هوایی (درصد)	
شاهد	۰/۳۵d			۷۴/۳۰a
۲۵	۲۰/۴c	۰/۷۵۶b	۱/۲۳b	۷۰/۰۵a
۵۰	۳۷/۹b	۰/۷۷۸b	۱/۲۸ab	۵۳/۳۸b
۷۵	۵۸/۴a	۰/۸۱۷a	۱/۳۵a	۵۱/۹۰c

در هر ستون، میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.

جدول ۵. میانگین برش‌دهی غلظت‌های نیترات‌کادمیوم خاک بر غلظت کادمیوم ریشه و نشت یونی برگ‌های علف‌های هرز

علف‌هرز	نیترات‌کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کادمیوم ریشه (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	نشت یونی (درصد)
خرفه	شاهد	۰/۴۳d	۲۲/۷۶c
	۲۵	۴۴/۴۰c	۲۷/۳۶c
	۵۰	۸۶/۹۰b	۴۷/۶۶b
	۷۵	۱۴۵/۸۶a	۵۲/۹۶a
سلمه‌تره	شاهد	۰/۶۳d	۲۴/۶۰c
	۲۵	۳۱/۰۶c	۳۷/۰۰b
	۵۰	۶۰/۸۰b	۵۶/۸۰a
	۷۵	۹۳/۵۳a	۶۱/۴۰a
تاج‌خروس وحشی	شاهد	۰/۶۳d	۲۴/۴۰c
	۲۵	۲۰/۸۰c	۲۸/۹۰c
	۵۰	۳۷/۸۰b	۶۷/۵۰b
	۷۵	۶۶/۱۰a	۷۴/۹۰a

در هر ستون، میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

جدول ٦. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) محتوای کلروفیل a، b و a+b، آنزیم کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز و وزن خشک اندام هوایی

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل a+b	کاتالاز	آسکوربات پراکسیداز	وزن خشک اندام هوایی
علف‌هرز	۲	۰/۰۸۲**	۰/۰۰۵ns	۰/۱۱۱**	۰/۰۳۲**	۰/۰۰۸*	۱۷/۹۳**
نیترات‌کادمیوم	۳	۱/۰۱۷**	۰/۱۲۶**	۱/۸۲**	۰/۱۳۶**	۰/۵۰۵**	۰/۹۶۷**
علف‌هرز × نیترات‌کادمیوم	۶	۰/۰۲۹**	۰/۰۰۵*	۰/۰۵۲*	۰/۰۰۸**	۰/۰۰۴*	۰/۱۱۴*
خطا	۲۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۰۳۱
ضریب تغییرات (درصد)	_	۵/۱	۷/۴	۶/۳	۹/۶	۱۱/۶	۶/۰

*، ** و ns: به‌ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم تفاوت معنی‌دار.

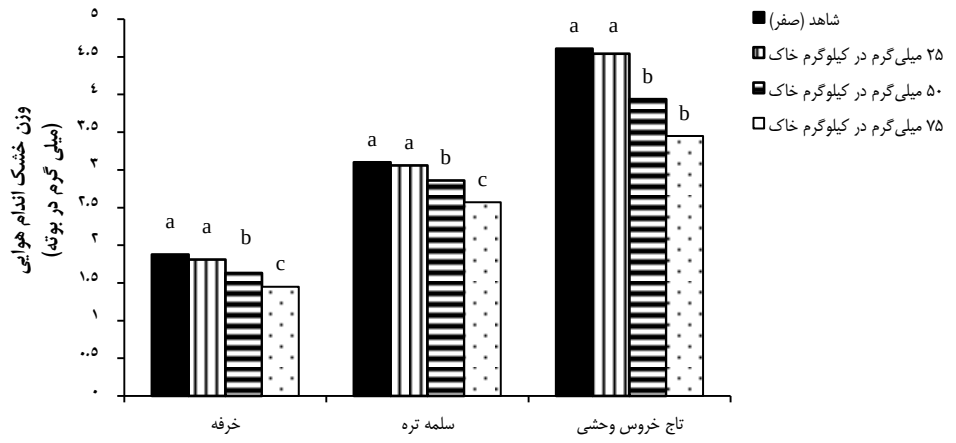
جدول ۷. میانگین برش‌دهی غلظت‌های نیترات‌کادمیوم خاک بر غلظت کلروفیل‌ها و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی علف‌های هرز

علف‌هرز	نیترات‌کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کلروفیل a (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کلروفیل b (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کلروفیلa+b (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	کاتالاز (میکرومول بر دقیقه در میلی‌گرم)	آسکوربات پراکسیداز (میکرومول بر دقیقه در میلی‌گرم)
خرفه	شاهد	۳/۰۶a	۱/۰۲a	۴/۰۹a	۰/۲۳c	۰/۸۶c
	۲۵	۲/۵۸b	۰/۹۰ab	۳/۴۸b	۰/۳۳b	۰/۸۸c
	۵۰	۲/۵۳b	۰/۷۹bc	۳/۳۲b	۰/۴۱ab	۱/۲۰b
	۷۵	۲/۲۱c	۰/۷۴c	۲/۹۵c	۰/۴۶a	۱/۲۸a
سلمه‌تره	شاهد	۲/۸۹a	۱/۰۰a	۳/۸۹a	۰/۲۱c	۰/۸۵c
	۲۵	۲/۵۹b	۰/۸۸a	۳/۴۸b	۰/۲۳c	۰/۹۱c
	۵۰	۲/۳۷c	۰/۷۳b	۳/۱۰c	۰/۳۰b	۱/۲۰b
	۷۵	۲/۰۶d	۰/۶۶b	۲/۷۳d	۰/۵۴a	۱/۳۲a
تاج‌خروس وحشی	شاهد	۲/۷۱a	۰/۹۲a	۳/۶۳a	۰/۲۴c	۰/۸۱c
	۲۵	۲/۵۸ab	۰/۹۰a	۳/۴۸ab	۰/۴۱b	۰/۹۵b
	۵۰	۲/۵۱b	۰/۸۲ab	۳/۳۴b	۰/۴۵b	۱/۳۰a
	۷۵	۱/۹۵c	۰/۷۵b	۲/۷۰c	۰/۵۷a	۱/۳۶a

در هر ستون، میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

۴. ۶. وزن خشک اندام هوایی

وزن خشک اندام هوایی تحت تأثیر نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم قرار گرفت، هم‌چنین برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم، روی وزن خشک اندام هوایی معنی‌دار بود (جدول ۶). وزن خشک اندام هوایی علف‌هرز تاج‌خروس وحشی نسبت به علف‌های هرز خرفه و سلمه‌تره بیش‌تر بود (جدول ۳). برهمکنش نوع علف‌های هرز و غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم نشان داد که در هر سه نوع علف‌هرز با افزایش نیترات‌کادمیوم وزن خشک اندام هوایی روند کاهشی نشان داد (شکل ۱). در هر سه نوع علف‌هرز، وزن خشک اندام هوایی در سطح شاهد با غلظت ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات‌کادمیوم تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. از سوی دیگر، در علف‌های هرز خرفه، سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی غلظت ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نیترات‌کادمیوم به‌ترتیب سبب کاهش ۲۳، ۱۷ و ۲۵ درصدی وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد شد (شکل ۱).



شکل ۱. میانگین برش‌دهی غلظت‌های مختلف نیترات‌کادمیوم خاک بر وزن خشک اندام هوایی علف‌های هرز.
میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ می‌باشد.

۵. بحث

کادمیم به‌دلیل تحرک زیاد در خاک به‌راحتی می‌تواند توسط گیاه جذب شود (عباس[1] و همکاران، ۲۰۱۸). میزان قابلیت دسترسی گیاهی به کادمیم و جذب توسط گیاه به‌طور معنی‌داری با افزایش غلظت کادمیم خاک افزایش می‌یابد (اسمولدرز[2]، ۲۰۰۱). بر طبق نتایج این پژوهش گزارش شده است که میزان تجمع کادمیوم در ریشه گیاهان بیش‌تر از اندام‌های هوایی است که این نشان‌دهنده این است که جابه جایی کادمیوم از ریشه به بخش هوایی ممکن است توسط موانع داخلی برای دفاع از بخش‌های هوایی گیاه محدود شده باشند (یوانجیه[3] و همکاران، ۲۰۱۷). گزارش شده است که ریشه گیاه جایگاه اصلی کادمیوم است که به‌طور عمده از طریق قراردادن یون‌های سمی در دیواره سلولی و ایجاد برخی موانع کارآمد برای محدودکردن ورود کادمیوم به آوند چوبی می‌باشد. بنابراین، ریشه می‌تواند تا حدودی سبب جلوگیری از انتقال کادمیوم به بخش هوایی شود. از سوی دیگر در گیاه خرفه احتمالاً انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی نسبت به گیاه سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی کم‌تر بوده است (لوکس[4] و همکاران، ۲۰۱۱).

براساس آنالیز فاکتور غلظت زیستی، با توجه به قابلیت گیاهان برای جذب فلزات سنگین و حساسیت به آلودگی بالای فلز سنگین می‌توان چهار گروه را برای گیاهان در نظر گرفت. گونه یا بخش گیاهی که دارای فاکتور غلظت زیستی بین ۱–۱۰، ۰/۱–۱، ۰/۰۱–۰/۱ و کم‌تر از ۰/۰۱ باشد به‌ترتیب بیش انباشت‌گر، میان انباشت‌گر، کم انباشت‌گر و غیرانباشت‌گر است (بینی[5] و همکاران، ۱۹۹۵). بنابراین، با معیارهای ذکرشده براساس نظر پژوهش‌گران، می‌توان خرفه را بیش‌انباشت‌گر و سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی را میان انباشت‌گر برای فلز کادمیوم تلقی کرد. به‌نظر می‌رسد که تعیین غلظت فلز در گیاه یا اندام مختلف می‌تواند برآورد بهتری از بازده استخراج فلزات سنگین در یک گونه گیاهی باشد. بنابراین، در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گیاهانی که خاصیت گیاه‌پالایی دارند می‌توانند فلزات سنگین را در اندام‌های مختلف انباشته کنند (جهانتاب و همکاران، ۱۳۹۵).

پژوهش‌گران گزارش نمودند که فلز کادمیوم میزان نشت الکترولیت‌ها را نسبت به سطح شاهد (بدون فلزات سنگین) افزایش داد، که تأییدی بر آزمایش فوق است. فلزات سنگین از عوامل بروز تنش اکسیداتیو در گیاهان محسوب می‌شوند، بنابراین اسیدهای چرب اشباع‌نشده در غشاهای سلولی مستعد تخریب‌های اکسیداتیو می‌باشند (اسکورزینسکا پولیت[6] و همکاران، ۲۰۰۵). هم‌چنین تنش فلزات سنگین سبب کمبود آب شده و اختلال در تعادل آبی گیاه رخ می‌دهد (بارسلو[7] و پوسکنریدر[8]، ۱۹۹۰). در گیاه لوبیا، کاهش محتوای نسبی آب برگ را در حضور فلز کادمیوم گزارش شده است که نتایج مطالعه فوق را تأیید می‌کند (هولادار[9]، ۲۰۱۴).

رنگدانه‌های فتوسنتزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ظرفیت فتوسنتزی گیاهان هستند، زیرا به‌طور مستقیم بر سرعت و میزان فتوسنتز و در نهایت تولید زیست‌توده مؤثر هستند (سایجین[10] و همکاران، ۲۰۰۹). از سوی دیگر سطوح ۵۰ و ۱۰۰ نیترات‌کادمیوم میزان محتوای کلروفیل را نسبت به سطح شاهد کاهش دادند. کادمیوم به دستگاه‌های فتوسنتزی به‌ویژه

1. Abbas
2. Smolders
3. Yuanjie
4. Lux
5. Bini
6. Skorzynska polit
7. Barcelo
8. Poschenrieder
9. Howladar
10. Saijeen

به مجموعه برداشت نوری فتوسیستم I و II آسیب می‌رساند (عرفان[1] و همکاران، ۲۰۱۳). کادمیوم در ساخت کلروفیل، هیدرولیز آب در مراحل ابتدایی واکنش‌های نوری، تنفس نوری غیرچرخه‌ای و تثبیت کربن در چرخه کالوین اختلال ایجاد می‌کند (اورکوت[2] و همکاران، ۲۰۰۰).

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهان با افزایش غلظت کادمیوم افزایش می‌یابد و هم‌چنین تحمل به تنش کادمیوم در گیاهان بهتر از تنش اکسایشی توسط آنزیم‌های پاداکساینده حفظ می‌شود (میتوالی[3] و همکاران، ۲۰۰۳). بنابراین چنین استدلال می‌شود که افزایش سطوح آنزیم‌های پاداکساینده تحت تنش یک تأثیر بسیار مهم برای تحمل به تنش در گیاهان حساس می‌باشد. در آزمایشی مشاهده شد که افزایش در فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در شرایط تنش کادمیوم در رابطه با فعال‌شدن آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی از دیواره‌های سلولی می‌باشد (ژانگ[4] و همکاران، ۲۰۱۹). پژوهش‌گران افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم آسکوربات‌پراکسیداز را در حضور نیکل و کادمیوم در شاخساره گیاه گندم گزارش نمودند (گاجیوسکا[5] و اسکلودوسکا[6]، ۲۰۱۰).

فلزات سنگین با تجمع در دیواره سلول، ورود به سیتوپلاسم و ایجاد اختلال در متابولیسم طبیعی سلول منجر به کاهش رشد می‌شوند. البته فلزات سنگین با کاهش تورژسانس سلول موجبات کاهش تقسیم سلولی و مهار رشد سلول‌ها را فراهم می‌آورند (مظفری و همکاران، ۱۳۹۱). گیاه در مواجهه با تنش فلزات سنگین از جمله کادمیوم، روزنه‌های خود را به حالت بسته یا نیمه‌بسته نگه می‌دارد، بنابراین، به‌دلیل کاهش CO_2 درون سلول، تثبیت CO_2 کاهش می‌یابد (پوگووا[7] و همکاران، ۲۰۰۸). در نتیجه کاهش وزن خشک اندام هوایی تحت سمیت کلریدکادمیوم توسط پژوهش‌گران گزارش شده که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد (فایازن[8] و همکاران ۲۰۱۱؛ هولادار[9]، ۲۰۱۴).

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در مجموع نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک سبب افزایش میزان جذب و تجمع در اندام‌های مختلف گیاهان می‌شود، به‌طوری‌که افزایش تجمع فلز کادمیوم ریشه و اندام هوایی با افزایش روند غلظت این فلز در خاک مشاهده شد. از سوی دیگر، تنش نیترات‌کادمیوم باعث تداخل در پارامترهای فیزیولوژیکی و رشد علف‌های هرز شده است. تنش فلز کادمیوم باعث افزایش نشت الکترولیت‌ها و کاهش محتوای نسبی آب برگ شد. مشخص شد که هر سه علف‌هرز مورد نظر با وجود جذب مقدار قابل‌توجهی از کادمیوم، قادر به رشد در محیط‌های آلوده بوده، هر چند میزان تولید زیست‌توده آن‌ها براساس نوع علف‌هرز متفاوت بود. با توجه به عدم افزایش انتقال فلز سنگین بالاخص در علف‌هرز خرفه، به‌نظر می‌رسد ممانعت از انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی یکی از دلایل تحمل این گیاهان به غلظت‌های مختلف سمیت کادمیوم بوده است. احتمالاً این امر نشان‌دهنده نقش ریشه در نگهداری کادمیوم اضافی و مکانیسم‌های دفاعی ریشه بوده است. مقایسه سه علف‌هرز خرفه، تاج‌خروس وحشی و سلمه‌تره نشان می‌دهد که میزان جذب و تجمع کادمیوم در ریشه گیاه خرفه بیش‌تر است، اما در گیاه خرفه احتمالاً انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی

1. Irfan
2. Orcutt
3. Metwally
4. Zhang
5. Gajewska
6. Sklodowska
7. Popova
8. Faiazan
9. Howladar

نسبت به گیاه سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی کم‌تر بوده است. در مجموع با معیارهای ذکرشده، می‌توان گیاه خرفه را بیش انباشت‌گر و سلمه‌تره و تاج‌خروس وحشی را میان انباشت‌گر برای فلز کادمیوم تلقی کرد.

بررسی حضور سایر علف‌های هرز و هم‌زمان با گیاهان زراعی می‌تواند در عملیات پالایش فلزات سنگین در مطالعات آینده موردبررسی قرار گیرد و برهمکنش تیمارهای تنش فلزات سنگین و تنش‌های محیطی از جمله شوری و خشکی مطالعه‌شده و در نهایت پیشنهاد می‌گردد این آزمایش در مناطق صنعتی با میزان بالای فلزات سنگین به‌صورت مزرعه‌ای انجام شود.

۷. تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا می‌باشد که بدینوسیله از گروه زراعت تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

اکبرپور سراسکانرود، فاطمه؛ صدری، فرهاد و گل‌علیزاده، داریوش (۱۳۹۱). گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به برخی فلزات سنگین به‌وسیله چند گیاه بومی منطقه حفاظت‌شده ارسباران. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۱ (۵)، ۶۷-۵۳.

جعفرزاده رزمی، مریم؛ اقدسی، مهناز؛ عبدل زاده، احمد و صادقی پور، حمیدرضا (۱۳۹۹). ارزیابی توان گیاه‌پالایی آب‌تره (*Nasturium officinale* L.) در رفع آلودگی کادمیوم. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۲۲ (۴)، ۲۷۸- ۲۹۸.

کافی، محمد؛ برزویی، اعظم؛ صالحی، معصوم؛ کمندی، علی؛ معصومی، علی و نباتی، جعفر (۱۴۰۰). فیزیولوژی تنش‌های محیطی در گیاهان. مشهد: انتشارات جهاد دانشگاهی. ۵۰۴ صفحه.

جهانتاب، اسفندیار؛ جعفری، محمد؛ متشرع‌زاده، بابک؛ طویلی، علی و ضرغام، نصرت الله (۱۳۹۵)، ارزیابی گونه‌های گیاهی مقاوم به فلزات سنگین در مناطق نفت‌خیز (مطالعه موردی: پازنان گچساران). نشریه مرتع. ۱۰ (۴)، ۴۰۹-۴۲۵.

مظفری، افشین؛ حبیبی، داود؛ ملکی، عباس و بابایی، فرزاد (۱۳۹۱). ارزیابی توان چند گونه زراعی درکاهش آلودگی خاک به فلز سنگین کادمیوم. نشریه زراعت و اصلاح نباتات ایران. ۸ (۳)، ۱-۱۴.

References

Abbas, T., Rizwan, M., Shafaqat, A., Adrees, M, Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., & Murtaza, G. (2018). Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (Triticum aestivum L.) grown On Cd-contaminated saline soil. Environmental Science and Pollution Research, 25, 25668-25680. https://doi.org/10.1007/s11356-017-8987-4.

Akbarpour Saraskanroud, F., Sadri, F., & Golalizadeh, D. (2012). Phytoremediation of heavy metal (Lead, Zinc and Cadmium) from polluted soils by Arasbaran protected area native plants. Journal of Water and Soil Resources Conservation, 1, 53-66. https://doi.org/20.1001.1.22517480.1391.1.4.5.3. (In Persian).

Arnon, D. E. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase (Beta vulgaris). Plant Physiology, 24, 1-15. https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1.

Barcelo, J., & Poschenrieder, C. (1990). Plant water relations as affected by heavy metal stress. Plant Nutrition, 13, 1-37. https://doi.org/10.1080/01904169009364057.

Bini, C., Gentili, L., Maleci-Bini, L., & Vaselli, O. (1995). Trace elements in plants and soil of urban parks. Annexed to Contaminated soil prost, INRA, Paris.

Cakmak, I., & Horst, J. H. (1991). Effects of Aluminium on Lipid Peroxidation, Superoxide Dismutase, Catalase, and Peroxidase Activities in Root Tips of Soybean (Glycine max). Physiologia Plantarum, 83, 463-468. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x.

Faiazan, S., Kausar, S., & Perveen, R. (2011). Varietal differences for cadmium-induced seedling mortality, foliar toxicity symptoms, plant growth, proline and nitrate reductase activity in chickpea (Cicer arietinum L.). Biology and Medicine, 3, 196-206.

Fryzova, R., Pohanka, M., Martinkova, P., Cihlarova, H., Brtnicky, M., Hladky, J., & Kynicky, J. (2017). Oxidative stress and heavy metals in plants. Reviews of environmental contamination and toxicology volume, 245, 129-156. https://doi.org/10.1007/398_2017_7.

Gajewska, E., & Sklodowska, M. (2010). Differential effect of equal copper, cadmium and nickel concentration on biochemical reactions in wheat seedlings. Journal of Ecotoxic & Environ Safety, 73, 996-1003. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.02.013.

Gjorgieva Ackova, D. (2018). Heavy metals and their general toxicity on plants. Plant Science Today 5(1), 14-18. https://doi.org/10.14719/pst.2018.5.1.355.

Howladar, S.M., (2014). A novel moringa oleifera leaf extract can mitigate the stress effects of salinity and cadmium in bean (Phaseoulus vulgaris L.) plants. Ecotoxicology and Environmental Safety, 100, 69-75. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.11.022.

Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A., & Alyemeni, M.N. (2013). Soil cadmium enrichment: allocation and plant physiological manifestations. Saudi Journal of Biological Sciences, 20, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.11.004.

Jafarzadeh Razmi, M., Aghdasi, M., Abdolzadeh, A., & Sadeghipour, H. R. (2020). Evaluation of Phytoremediation Potential of Nasturtium officinal L. for Cadmium Contamination Elimination. Journal of Environmental Science and Technology, 22(4), 287-298. https://doi.org/10.22034/jest.2020.30580.3897. (In Persian).

Jahantab, E., Jafari, M., Motasharezadeh, B., Tavili, A., & Zargham, N. (2017). Evaluating tolerance of plants species to heavy metals in oil polluted region (Case study: Pazanan Gachsaran). Journal of Rangeland Science, 10(4), 409-425. (In Persian).

Jensen, C. R., Jacobsen, S. E., & Andersen, M. N. (2000). Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) during soil drying. European Journal of Agronomy, 13(1), 11-25. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00055-1.

Kafi, M., Borzoee, A., Salehi, M., Kamandi, A., Masoumi, A., & Nabati, J. (2021). Physiology of environmental stresses in plants. Mashhad: Jahad Daneshgahi Mashhad Publishers. (In Persian).

Kramer, U., Smith, R. D., Wenzel, W. W., Raskin, I., & Salt, D. E. (1997). The role of metal transport and tolerance in nickel hyper accumulation by Thelaspi Geosingenese Helacsy. Plant Physiology, 115, 1641-1650. https://doi.org/10.1104/pp.115.4.1641.

Kumar, N., Bauddh, K., Kumar, S., Dwivedi, N., Singh, D., & Barman, S. (2013). Accumulation of metals in weed species grown on the soil contaminated with industrial waste and their phytoremediation potential. Ecological engineering, 61, 491-495. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.004.

Lux, A., Martinka, M., Vaculik, M., & White, P. J. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. Journal of Experimental Botany, 62, 21-37. https://doi.org/10.1093/jxb/erq281.

Mench, M. J., Didier, V. L., Loffler, M., Gomez, A., & Masson, P. (1994). A mimicked 1n-situremediation study of metal contaminated soils with emphasis on cadmium and lead. Environmental Quality, 23, 58-63. https://doi.org/10.2134/jeq1994.00472425002300010010x.

Metwally, A., Finkermeier, I., Georgi, M., & Dietz, M. (2003). Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. Journal of Plant Physiology, 132, 272-281. https://doi.org/10.1104/pp.102.018457.

Mozaffari, A., Habibi, D., Maleki, A., & Babai, F. (2012). Evaluation Ability of Some Crop Species for Remedation of Heavy Metal Cadmium (Cd) In Contaminated Soils. Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding, 8(3), 1-14. (In Persian).

Orcutt, D. M., & Nilsen, E. T. (2000). The Physiology of Plants under Stress Soil and Biotic Factors. New York: JohnWiley and Sons Inc. 680 p.

Popova, L., Maslenkova, L., Yordanova, R., Krantev, A., Szalai, G., & Janda, T. (2008). Salicylic acid protects photosynthesis against cadmium toxicity in pea plants. Plant Physiology, 34, 133-148.

Saijeen, S., Kaewman, O., & Suksawat, M. (2009). Evaluation of media, organic and chemical fertilizer applications on growth of pot gerbera (Gerbera jamesonii). Asian Journal Food Agro-Industry, 2, S51–S56.

Sairam, R. K., Veerrabhadra, K., & Srivastava, G. C. (2002). Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, Antioxidant activity and osmolyte concentration. Plant Science, 163, 1037-1046.

Sall, M. L., Diaw, A. K. D., Gningue-Sall, D., Efremova Aaron, S., & Aaron, J. J. (2020). Toxic heavy metals: impact on the environment and human health, and treatment with conducting organic polymers, A review. Environmental Science and Pollution Research 27, 29927-29942. https://doi.org/10.1007/s11356-020-09354-3.

Skorzynska polit, E., Pawlikowska pawlega, B., Szczuka, E., Drazkiewicz, M., & Krupaz, Z. (2005). The activity and localization of lipoxygenases in Arabidopsis thaliana under cadmium and copper stresses. Plant Growth Regulation, 48, 29-39.

Smolders, E. (2001). Cadmium uptake by plants. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 14, 177-183.

Sterckeman, T., & Thomine, S. (2020). Mechanisms of cadmium accumulation in plants. Critical Reviews in Plant Sciences 39, 322-359.

Wei, S., Zhou, Q., & Saha, U. K. (2008). Hyperaccumulative characteristics of weed species to heavy metals. Water, air, and soil pollution, 192, 173-181. https://doi.org/10.1007/s11270-008-9644-9.

Yuanjie, D., Wei-feng, C., Xiaoying, B., Fengzhen, L., & Yongshan, W. (2017). Effects of exogenous nitric oxide and 24-epibrassinolide on physiological characteristics of peanut under cadmium stress. Pedosphere, 1-22.

Zhang, F., Zhang, H., Wang, G., Xu, L., & Shen, Z. (2019). Cadmium-induced accumulation of hydrojen peroxide in the leaf apoplast of Phaseolus aureus and Vicia sativa and the roles of different antioxidant enzymes. Hazardous Materials, 168, 76-84. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.002.