Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Effect of moisture regime on cadmium toxicity in spinach and lettuce

Hadi Koohkan[1*] |Manoochehr Maftoun[2] |Ramin Karimzadeh[3] |Maryam Salimizadeh[4] | Mohammad Seddiq Mortazavi[5] |

1. Corresponding author, Persian Gulf and Oman Sea Ecological Research Institute, Iranian fisheries science Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Bandar Abbas, Hormozgan, Iran. Email: Koohkan_7001@yahoo.com
2. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Siraz University, Shiraz, Iran. Email: mmaftoun@yahoo.com
3. Persian Gulf and Oman Sea Ecological Research Institute, Iranian fisheries science Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Bandar Abbas, Hormozgan, Iran. Email: Rkarimzadeh11@yahoo.com
4. Hormozgan Environment, Bandar Abbas, Iran. Email: msalimizadeh@yahoo.com
5. Persian Gulf and Oman Sea Ecological Research Institute, Iranian fisheries science Research Institute, Agricultural Education and Extension Research Organization, Bandar Abbas, Hormozgan, Iran. Email: msmortazavi@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 6, 2022

Revised: Apr. 23, 2023

Accepted: May. 8, 2023

Published online: June. 22, 2023

Keywords:
Spinach,
Drought stress,
Leaf surface,
Cadmium,
Lettuce.

ABSTRACT

Today, by increasing industrial and agricultural activities and the subsequent increase in pollutants, soil and water pollution has become a serious environmental problem. The increase of pollutants in the soil in the conditions of dry climate and drought stress have adverse effects on the biological indicators. In this study the combined effect of cadmium at six levels (0, 5, 10, 20, 40 and 80 mg kg-1 soil) in the form of cadmium sulfate (CdSO4) and three irrigation intervals (2, 4 and 7 days) as a factorial experiment in the form of a completely random basic design with three replications was investigated on spinach (Spinosa oleracea) and lettuce (Lactuca sativa) in calcareous soil with silty clay texture. The obtained results showed that increasing the concentration of cadmium in the soil caused a significant decrease in the average dry weight of leaves and stems of lettuce and spinach. The average dry weight reduction percentage compared to the control at the highest level of cadmium was observed in lettuce leaves and stems as 63 and 46% and in spinach leaves and stems as 54 and 38%, respectively. Increasing the irrigation intervals decreased the dry weight of lettuce and spinach plants significantly compared to the control. The percentage of mean dry weight reduction in 4 and 7 days irrigation intervals compared to 2 days irrigation interval in lettuce leaf and stem was 23, 41, 31 and 63% and in spinach was 19, 39, 24 and 49%, respectively. The increase in cadmium levels increased the concentration of this element in the stem and leaves of lettuce and spinach plants, and by increasing irrigation intervals, the concentration and uptake of cadmium in the leaves and stems of spinach and lettuce decreased. The results of this research showed that the spinach plant absorb and transport cadmium metal more than the lettuce. The stress sensitivity index showed that the moisture stress has reduced the crop tolerance to cadmium. Based on the decrease in dry weight at different levels of cadmium, it can be said that the stem of two plants is more tolerant to cadmium than the leaf.

Cite this article: Koohkan, H., Maftoun, M., Karimzadeh, R., Salimizadeh, M., & Seddiq Mortazavi, M. (2023) Effect of moisture regime on cadmium toxicity in spinach and lettuce, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (4), 613- 636. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350290.669389

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350290.669389

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۴، شماره ۴ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

تأثیر رژیم رطوبتی بر سمیت کادمیوم در اسفناج و کاهو

هادی کوهکن[1]✉| منوچهر مفتون[2]| رامین کریم‌زاده[3]| مریم سلیمی‌زاده[4]| محمد صدیق مرتضوی[5]

۱. نویسنده مسئول، پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران، رایانامه: koohkan_7001@yahoo.com

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، رایانامه: mmaftoun@yahoo.com

۳. پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران. رایانامه: rkarimzadeh11@yahoo.com

۴. محیطزیست هرمزگان، بندرعباس، ایران، رایانامه: msalimizadeh@yahoo.com

۵. پژوهشکده اکولوژی خلیج فارس و دریای عمان، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور ،سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بندرعباس، ایران، رایانامه: msmortazavi@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۴/۱

واژه‌های کلیدی:
اسفناج،
تنش خشکی،
سطح برگ،
کادمیوم،
کاهو.

چکیده

امروزه با افزایش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و به دنبال آن افزایش آلاینده‌ها، آلودگی خاک و آب به مشکل زیست محیطی مبدل شده است. افزایش آلاینده‌ها در خاک در شرایط اقلیم خشک و تنش‌های خشکی اثرات سوء بر شاخصه‌های زیستی دارد. در این پژوهش اثر توأم کادمیوم در شش سطح (۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) به صورت سولفات کادمیوم و سه دورآبیاری (۲، ۴ و ۷ روزه) بصورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملا تصادفی با ۳ تکرار روی اسفناج (Spinosa oleracea) رقم Viroflay و کاهو (Lactuca sativa) در خاک آهکی با بافت رسی سیلتی انجام گرفت. نتایج نشان داد افزایش غلظت کادمیوم در خاک موجب کاهش معنی دار وزن خشک برگ و ساقه کاهو و اسفناج شد. درصد کاهش میانگین وزن خشک نسبت به شاهد در بالاترین سطح کادمیوم، در برگ و ساقه کاهو ۶۳ و ۴۶ درصد و در برگ و ساقه اسفناج ۵۴ و ۳۸ درصد مشاهده گردید. افزایش دور آبیاری وزن خشک هر دو گیاه را به طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش داد. درصد کاهش وزن خشک در دور آبیاری ۴ و ۷ روزه نسبت به ۲ روزه در برگ و ساقه کاهو ۲۳ و ۴۱، ۳۱ و ۶۳ درصد و در اسفناج ۱۹ و ۳۹، ۲۴ و ۴۹ درصد بود. افزایش سطوح کادمیوم غلظت این عنصر را در ساقه و برگ گیاهان افزایش داد و با افزایش دور آبیاری غلظت و جذب کادمیوم در برگ و ساقه اسفناج و کاهو کاهش یافت. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده این مطلب بود که گیاه اسفناج دارای قدرت جذب و انتقال بیشتر فلز کادمیوم نسبت به کاهو بود. براساس شاخص حساسیت به تنش، تنش رطوبتی باعث کاهش تحمل به کادمیوم گردیده است و کاهش وزن خشک در سطوح مختلف کادمیوم نشان داد که تحمل ساقه دو گیاه به کادمیوم بیشتر از برگ است.

استناد: کوهکن؛ هادی، مفتون؛ منوچهر، کریم زاده؛ رامین، سلیمی‌زاده؛ مریم، صدیق مرتضوی؛ محمد، (۱۴۰۲) تاثیر رژیم رطوبتی بر سمیت کادمیوم در اسفناج و کاهو، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۴ (۴)، ۶۳۶-۶۱۳. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350290.669389

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.350290.669389

مقدمه

با گذشت زمان، توسعه صنایع و استفاده روز افزون از فلزات و استخراج کانسارها آلودگی محیط افزوده می‌گردد. فلزات معمولاً پس از استفاده در صنعت به همراه ضایعات کارخانه‌ها به پیکره‌های آبی و خاک اضافه گردیده و اثرات سمی خود را بر گیاهان، جانوران و ریزجانداران خاک تحمیل می‌نمایند. غلظت فلزات سنگین در شرایط طبیعی نسبتاً کم است اما به علت افزودن پسماندهای صنعتی و آلاینده‌ها به محیط به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد می‌شود (Zhao et al., 2010).

در بین فلزات سنگین کادمیوم و سرب جز فلزات خطرناک هستند. سوزاندن زغال سنگ و زباله‌های خانگی، استخراج کانسار فلزی و خالص‌سازی فلزات باعث افزودن این عناصر به محیط می‌گردد. منبع اصلی آلودگی محیط به کادمیوم، کارخانه‌های ذوب فلزات سنگین مخصوصاً روی هستند. بعلاوه خاک‌های طرفین جاده به کادمیوم لاستیک و روغن اتومبیل آغشته می‌شوند (Ma et al., 2022). کادمیوم از منابع مختلف وارد خاک می‌شود اما در زمین‌های کشاورزی، کادمیوم موجود در کودهای کشاورزی (از جمله، سوپرفسفات‌ها و فسفات آمونیوم) از مهمترین منابع آلوده کننده خاک به این عنصر سمی است (Noor et al., 2022). فاضلاب خانگی و صنعتی کادمیوم را وارد آب‌های جاری و زیرزمینی می‌کند (Dharma-wardana, 2018، 2009 ;Ngayila et al., 2008).

یکی از راه‌هایی که این عناصر سلامتی بشر را مورد تهدید قرار می‌دهند، ورود آنها به زنجیره غذایی است (Grant, 2018). با توجه به اینکه خاک زیستگاه گیاه محسوب می‌گردد فلزات سنگین تجمع یافته در آن توسط گیاه جذب می‌شود. قابلیت استفاده فلزات سنگین در خاک توسط گیاه به میزان کل این فلزات در خاک بستگی ندارد بلکه به برهمکنش فاکتورهای گیاهی و خصوصیات خاک از قبیل پ‌هاش خاک، مواد آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی بستگی دارد (Grant, 2018).

محصولات غذایی و تنباکوی رشد یافته در خاک‌های آلوده به کادمیوم، منابع اصلی ورود کادمیوم به انسان در نظر گرفته می‌شوند. آلودگی با کادمیوم سبزیجات برگی مانند کاهو و اسفناج در مقایسه با سایر محصولات (به غیر از برنج) از اهمیت بیشتری برخوردار است، زیرا سبزیجات برگ‌دار دارای بالاترین گرادیان انباشتگی کادمیوم (۱/۷۲) هستند (Chaney et al., 2000). دسترسی گیاهان به کادمیوم در خاک تحت تأثیر چندین ویژگی گیاهی و خاکی مانند pH، محتوای مواد آلی (قربانی و همکاران، ۱۳۹۶) ، غلظت کلرید در محلول خاک، اکسیدهای آبدار آهن و منگنز، نسبت Cd:Zn (Tran and Popova, 2013) و رقم گیاهی (Ahmad et al., 2013) است.

به طور کلی، فلزات سنگین می‌تواند اثرات سمی آشکاری بر رشد گیاه ایجاد کند (Zou et al., 2019; Yu et al., 2020).Wang et al. (2020) گزارش دادند که دلیل اصلی سمیت فلزات سنگین مس و کادمیوم بر رشد *Amaranthus tricolor* L. ممکن است به (I) اختلال در نفوذپذیری غشا سیتوپلاسمی (II) گونه‌های اکسیژن فعال، و/یا (III) ممانعت جذب آب و مواد مغذی نسبت داده شود (Shi et al., 2014; Motesharezadeh et al., 2017). علاوه بر این، فلزات سنگین حتی در غلظت‌های بالا در بافت‌های گیاه جذب و/یا رسوب (به‌ویژه در سیستم ریشه) می‌کنند (Zou et al., 2018; Yu et al., 2020). Wang et al. (2020)گزارش دادند که فلزات سنگین هیچ اثر آشکاری بر رشد *Amaranthus retroflexus* L. ایجاد نکرده است. علاوه بر این، مقادیر شاخص شدت تنش فلزات سنگین بر *Amaranthus tricolor* L. به وضوح بالاتر از *Amaranthus retroflexus* L. بود. بنابراین، فلزات سنگین شدت تنش بیشتری را در رشد *Amaranthus tricolor* L. نسبت به رشد *Amaranthus retroflexus* L. ایجاد می‌کند.

Eissa and Negim (2018) از فاضلاب شهری جهت آبیاری کاهو و اسفناج استفاده کردند و نتایج نشان داد که غلظت کادمیوم در شاخساره کاهو و اسفناج ۱/۵۰ و ۳/۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. آنها گزارش دادند که ریشه و شاخساره بوته‌های اسفناج به طور معنی‌داری ($P<0/05$) نسبت به کاهو حاوی مقادیر بالاتری از کادمیوم بود.

Ahmed et al. (2013) بیان کردند که شلغم و کاهو هر دو کاهش قابل توجهی در سطح برگ، وزن تر و وزن خشک اندام هوایی و ریشه و همچنین تمام اجزای عملکرد اندازه‌گیری شده در پاسخ به آبیاری پساب نشان دادند. Bhardwaj et al. (2009) گزارش دادند که در گیاه لوبیا درصد جوانه زنی در غلظت کم کادمیوم در مقایسه با شاهد تحت تاثیر قرار نگرفت. اما در غلظت بالاتر کادمیوم (۳ گرم در کیلوگرم خاک) سبب ممانعت جوانه‌زنی گردید. وجود فلزات سنگین در محیط جوانه‌زنی به دلیل نفوذ سریع به داخل بذر همراه با آب از طریق تأثیر بر فرایندهای فیزیولوژیکی مهم از جمله تنفس و ممانعت از تقسیم سلول‌ها، سبب اختلال در رشد گیاهان می‌شود (Marquez Garsia et al., 2013).

تنش خشکی به طور قابل ملاحظه‌ای رشد گیاه را به طور معمول مهار می‌کند (Xu et al., 2015; Chavoushi et al., 2020).

Wang et al. (2020) گزارش دادند که تنش خشکی به طور قابل توجهی رقابت‌پذیری برای خورشید، جذب نور، توانایی حمایت از

گیاه، سطح فتوسنتزی برگ، رشد برگ، ظرفیت فتوسنتزی برگ و میزان رطوبت خاک (صرف نظر از الگوی کشت) را کاهش می‌دهد.

در همین حال، تنش خشکی باعث کاهش میزان رطوبت سطحی و زیر سطحی خاک می‌شود. ثانیا، کاهش رقابت پذیری برای جذب نور خورشید، سطح فتوسنتزی برگ و ظرفیت فتوسنتزی برگ تحت تنش خشکی نیز ممکن است منجر به کاهش عملکرد گیاهان شود (Meng et al., 2014; Huang et al., 2018). ثالثاً، اندازه برگ فشرده و سطح برگ سبز گیاهان تحت تنش خشکی نیز ممکن است باعث کاهش شدت تعرق از طریق کاهش آشکار سطح برگ شود (Geng et al., 2012; Cheng et al., 2020). با این حال، کاهش شدت تعرق می‌تواند کارایی و شدت انتقال مواد مغذی را از ریشه به قسمت شاخساره که عمدتاً توسط شدت تعرق محدود می‌شود، تضعیف کند (Yates et al., 2010; Xiong et al., 2018).

Azizian et al. (2011) گزارش دادند که غلظت کادمیوم در کاهو و برداشت آن توسط گیاه با افزایش دور آبیاری و سطوح کادمیوم به ترتیب کاهش و افزایش یافت. غلظت کادمیوم با غلظت نهایی آن در خاک همبستگی مثبت معنی دار داشت و با رابطه ای خطی بیان شد. همچنین غلظت آن با غلظت عناصر منگنز، مس و آهن همبستگی مثبت معنی دار نشان داد.

Xia et al. (2015) گزارش دادند که اثر خشکسالی بر تجمع کادمیوم در بادام زمینی با رقم و مرحله رشد متفاوت است. محققان گزارش کردند که در مرحله گیاهچه، تنش خشکی باعث کاهش جذب کادمیوم توسط ریشه در ارقام بادام زمینی با تجمع زیاد Cd می‌شود، در حالی که در گیاهان بالغ، خشکی غلظت Cd را در ریشه و دانه افزایش می‌دهد. به احتمال زیاد به دلیل کاهش زیست توده گیاهی در شرایط خشکسالی است.

بخش وسیعی از اراضی کشاورزی ایران در مناطق خشک و نیمه خشک واقع شده است. در اغلب مناطق خشک، کشاورزی کم و بیش با مشکل تنش رطوبت مواجه می‌باشد. متاسفانه کمبود آب تنها منحصر به این نواحی نمی‌شود، بلکه حتی در شرایط آب و هوای مرطوب توزیع نامنظم بارندگی منجر به محدود شدن آب قابل دسترس و در نتیجه کاهش رشد گیاه می‌شود (اسدی و همکارن، ۱۴۰۱). با کاهش میزان آب، فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه کاهش می‌یابد. مسلما" خشکی مهمترین عامل محیطی موثر بر رشد، در مناطق نیمه خشک دنیا می‌باشد (Hua et al., 2019). کاهش آب در بافت‌های گیاهی سبب کاهش رشد (Blum, 2011)، بسته شدن روزنه (Brodribb et al., 2017)، کاهش فتوسنتز (Zlatev et al., 2012) و اختلالات هورمونی از جمله افزایش اسید آبسزیک اسید (ABA) می‌گردد (Sharp, 2002). فرایندهای فیزیولوژی حساس به تنش رطوبتی شامل رشد قسمت هوایی و ریشه، حرکت روزنه‌ای، ساختن پروتئین و فعالیت بعضی از آنزیم‌ها می‌باشد (Razi et al., 2021).

با توجه به کمبود آب در ایران، بررسی تاثیر رژیم رطوبتی بر رشد و غلظت کادمیوم در گیاهان از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این راستا به منظور بررسی اثر کادمیوم تحت شرایط رطوبتی مختلف بر محصولات کشاورزی به خصوص روی سبزیجات برگی نظیر کاهو و اسفناج که جزء سبزیجات پر مصرف در کشور هستند، این پژوهش انجام گرفت. بنابراین هدف این تحقیق بطور کلی بررسی تاثیر سطوح کادمیوم بر رشد و ترکیبات شیمیایی اسفناج و کاهو تحت رژیم‌های مختلف رطوبتی خاک می‌باشد.

مواد و روش ها

جمع آوری خاک

جهت انجام این آزمایش، مقدار کافی خاک از افق سطحی (۰ تا ۳۰ سانتیمتری) سری Typic mesic (calcareous) mixed, Fine] Calcixerepts] واقع در ایستگاه زراعی تحقیقات دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز جمع‌آوری گردید. پس از خشک کردن خاک در هوا و عبور از الک دو میلی‌متری برخی خصوصیات فیزیکـــی و شیمیایی از جمله بافت خاک به روش هیدرومتر(Bouyoucos, 1962)، ماده آلی (Walkley and Black, 1934)، واکنش خاک در خمیر اشباع به وسیله الکترود شیشه‌ای (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع بوسیله هدایت‌سنج الکتریکی (Rhoades, 1996)، نیتروژن کل به روش کجلدال (Bremner, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به‌روش جانشینی کاتیون‌ها با استات سدیم (Chapman, 1965)، کربنات کلسیم معادل به‌روش خنثی‌سازی توسط اسید کلریدریک (Loeppert and Suarez, 1996) و فسفر قابل استفاده توسط عصاره‌گیر بی‌کربنات سدیم (Olsen *et al.* 1954) برآورد گردید. عناصر کم مصرف توسط DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و غلظت آنها بوسیله دستگاه جذب اتمی تعیین شد و نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

آزمایش گلخانه‌ای

آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه دورآبیاری (دو، چهار و هفت روزه) و شش سطح کادمیوم (۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) به صورت سولفات کادمیوم در سه تکرار روی اسفناج (*Spinosa (oleracea* رقم Viroflay و کاهو (*Lactuca sativa*) رقم محلی در گلدان‌های پلاستیکی چهار کیلوگرمی انجام شد. پیش از شروع آزمایش با توجه به آزمون‌های خاک، نیتروژن به صورت اوره، فسفر به صورت مونو پتاسیم فسفات و آهن از منبع کلات آهن Fe- EDDHA، روی، منگنز، مس از منبع سولفات آنها به ترتیب به میزان ۱۵۰، ۵۰، ۱۰، ۱۰، ۵، ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به طور یکنواخت به تمام گلدان‌ها اضافه گردید. در هر گلدان ۱۵ بذر کاشته شد و آبیاری اول تا حد ظرفیت زراعی تامین و گلدان‌ها روزانه توزین و رطوبت تا حد ظرفیت زراعی نگهداری گردید. در ابتدای هفته سوم گیاهان به پنج بوته در هر گلدان تنک و سپس رژیم‌های رطوبتی شروع شد.

برای هر تیمار رطوبتی تفاوت وزن گلدان در ابتدا و انتهای هر دوره به عنوان تبخیر– تعرق واقعی گلدان در نظر گرفته و حجم آب آبیاری در تیمار مورد نظر برای اعمال دور بعدی آبیاری محاسبه گردید. برای تخمین تبخیر از سطح خاک، گلدان‌هایی مشابه ولی بدون گیاه در بین گلدان‌ها قرار داده شد و در هر دور آبیاری بطور جداگانه با توزین آنها تبخیر از سطح خاک بدست آمد. از تفاضل میزان تبخیر از تبخیر–تعرق، مقدار تعرق تخمین زده شد میانگین رطوبت خاک در گلدان قبل از آبیاری در دوره رشد تعیین شد و با استفاده از معادله منحنی مشخصه آب خاک (عزیزیان، ۱۳۸۴) پتانسیل ماتریک آب خاک محاسبه گردید (جدول ۲). شکل این معادله به صورت زیر است:

$$\theta = 0.135 + \frac{0.03}{(1 + (5.62 * 1010^{-5}h)^{0.62})^{688}}$$

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

خصوصیت	مقدار
شن (درصد)	۱۴/۱۰
سیلت (درصد)	۴۵/۵۰
رس (درصد)	۴۰/۴۰
بافت خاک	رس سیلتی
ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	۲۹/۷۷
نقطه پژمردگی دائم (درصد حجمی)	۱۳/۰۴
چگالی ظاهری خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)	۱/۴۱۸
ماده آلی (درصد)	۱/۱۸
نیتروژن کل (درصد)	۰/۰۳۸
پ.اچ. خمیر خاک	۷/۸۴
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر)	۰/۴۹۵
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۴۰/۱۰
ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بار بر کیلوگرم)	۲۱/۳۵
فسفر محلول در سدیم بی کربنات (میلی گرم در کیلوگرم)	۱۳/۵
مس عصاره گیری شده با دی تی پی ا (میلی گرم در کیلوگرم)	۱/۸۳
روی عصاره گیری شده با دی تی پی ا (میلی گرم در کیلوگرم)	۰/۹۴
آهن عصاره گیری شده با دی تی پی ا (میلی گرم در کیلوگرم)	۶/۸
منگنز عصاره گیری شده با دی تی پی ا (میلی گرم درکیلوگرم)	۹/۴
کادمیوم عصاره گیری شده با دی تی پی ا (میلی گرم در کیلوگرم)	۰/۲۷
سرب عصاره گیری شده با دی تی پی ا (میلی گرم در کیلوگرم)	۰/۵۴

جدول۲. حداقل مقدار آب خاک ،کاهش رطوبت قابل استفاده و حداقل پتانسیل ماتریک در رژیم های مختلف آبیاری

گیاه	رژیم آبیاری (روز)	میانگین مقدار آب خاک قبل از آبیاری (نسبت حجمی)	کاهش رطوبت قابل استفاده (درصد)	پتانسیل ماتریک قبل از آبیاری (بار)
کاهو	۲	۰/۲۱۰	۵۲	-۱/۵۴
	۴	۰/۱۸۴	۶۷	-۲/۵۱
	۷	۰/۱۵۸	۸۳	-۴/۸۳
اسفناج	۲	۰/۲۰۷	۵۴	-۱/۶۳
	۴	۰/۱۷۶	۷۲	-۲/۹۸
	۷	۰/۱۴۹	۸۸	-۶/۸۳

پس از اتمام دوره رشد (پس از ده هفته) گیاهان هر گلدان برداشت شدند، سطح برگ هر بوته با دستگاه Leaf Area Meter اندازه‌گیری گردید. برگ و ساقه جدا گردیده در دمای ۶۵ درجه سلسیوس در آون تا رسیدن به وزن ثابت خشک و پس از تعیین وزن خشک تمام گیاهان هر گلدان، نمونه‌های گیاهی توسط آسیاب برقی پودر شده (Naik et al., 2013) و به روش خشک سوزانی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر و توسط اسیدکلریدریک دو نرمال به صورت محلول در آورده شد (Lee et al., 2015). میزان کادمیوم در ساقه و برگ با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

داده‌های جمع‌آوری شده در آزمایش تاثیر رژیم رطوبتی و سطوح کادمیوم بر پارامترهای رشد گیاه با استفاده از نرم افزارهای Excel و SAS 9.2 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و جداول تجزیه واریانس تشکیل شد. به منظور پی بردن به معنادار بودن یا نبودن تفاوت میانگین‌ها در تیمارهای مختلف از آزمونLSD (Least Significant Difference) در سطح احتمال۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

وزن خشک برگ و ساقه

رابطه وزن خشک برگ و ساقه با مقدار کادمیوم خاک و دور آبیاری (شکل‌های ۱ و ۲) به خوبی نشان می‌دهد که افزایش دور آبیاری و کادمیوم، وزن خشک اسفناج و کاهو را بطور معنی‌داری کاهش داد. با افزایش سطوح کادمیوم، میانگین وزن خشک برگ و ساقه هر دو گیاه کاهش معنی‌داری داشت. درصد کاهش میانگین وزن خشک نسبت به شاهد در بالاترین سطح کادمیوم (۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، در برگ و ساقه کاهو ۶۳ و ۴۶ درصد و در برگ و ساقه اسفناج ۵۴ و ۳۸ درصد مشاهده گردید. با افزایش غلظت کادمیوم، وزن خشک قسمت برگی و ساقه اسفناج و کاهو به دلیل اثر منفی کادمیوم بر مکانیسم تولید انرژی در میتوکندری و کلروپلاست کاهش یافت (Talatam et al., 2009; Ghorbani et al., 2017).

Latif et al. (2020) نشان دادند که وزن تر اسفناج در ۴۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک پس از ۵۰ روز تا ۵۲٪ کاهش یافت، در حالی که در همان سطح آلودگی و ۲۵ روز منجر به کاهش ۴۶٪ در مقایسه با شاهد تیمار مربوطه آنها شد. پاسخ مشابهی توسط Huang et al. (2017) مشاهده شد که کاهش وزن خشک وابسته به غلظت کادمیوم را در زیست توده و ویژگی‌های رشد اسفناج مشاهده کردند. کادمیوم در غلظت‌های پایین‌تر، رشد شاخساره را بدون اثرات سمی در برگ‌ها به تاخیر می‌اندازد و غلظت‌های نسبتاً بالاتر کادمیوم به شدت مانع رشد ریشه می‌گردد و منجر به تجمع بیشتر کادمیوم در برگ‌ها می‌شود (Baruah et al. 2017).

Rezakhani et al. (2013) نشان دادند که، کادمیوم موجود در خاک تأثیر معنی‌داری بر ماده خشک هوایی اسفناج دارد. با افزایش غلظت کادمیوم تا ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، وزن خشک نیز افزایش یافت. اما در غلظت‌های بالاتر کادمیوم (۴۰-۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) وزن خشک اندام هوایی اسفناج کاهش می‌یابد.

Adhikar et al. (2005) گزارش کردند که پاسخ تولید ماده خشک در اسفناج به کاربرد کادمیوم، به طور کلی با افزایش میزان کادمیوم اعمال شده در خاک کاهش می‌یابد و خاطر نشان کردند که تیمارهای بیش از ۱۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک منجر به کاهش قابل توجهی در عملکرد محصولات شد. محصول اسفناج که از سمیت شدید کادمیوم رنج می برد، دارای ریشه‌های کوچک و برگ‌های باریک مایل به زرد پوشیده از نقاط نکروزه کوچک بود. Deheri et al. (2007) و Mensah et al. (2008) به ترتیب در مورد اسفناج و کاهو به نتایج مشابهی دست یافتند.

کاهش رشد در اثر کادمیوم در اسفناج (Bautista et al.,2013)،کاهو (Bautista et al.,2013)، ذرت (Hasan et al., 2009) و خردل (Iqbal et al., 2010)، تربچه (Anuradha and Rao, 2007)، و گوجه فرنگی (Cherif et al., 2011) گزارش شده است.

Zhou and Qiu (2005) بیان نمودند تاثیر منفی کادمیوم روی رشد گیاه همراه با کاهش نسبت وزن خشک به تر در همه اندام‌های گیاه می‌باشد. کادمیوم باعث کاهش مقدار کلروفیل کل، کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئیدها در گیاهان می‌شود و همچنین اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌ها از اثرات کادمیوم در گیاه است (Gubrelay et al., 2013). اثرات چندگانه کادمیوم بر فرایندهای متابولیکی و فیزیولوژیکی گیاه ممکن است با تاثیر منفی بر فتوسنتز پدیدار شود (Muradoglu et al., 2015). این مساله نشان می‌دهد که ورود بخش کوچکی از کادمیوم به کلروپلاست ممکن است باعث خرابی و تغییرات ساختاری و عملکرد آن شود. جلوگیری از فتوسنتز می‌تواند بر مسیرهای متابولیکی زیادی که به متابولیسم اولیه کربن بستگی دارد اثر گذارد (Muradoglu et al., 2015).

جدول۳. تجزیه واریانس مربوط به وزن خشک، سطح برگ، تبخیر و تعرق، تعرق ، غلظت کادمیم در برگ و ساقه کاهو

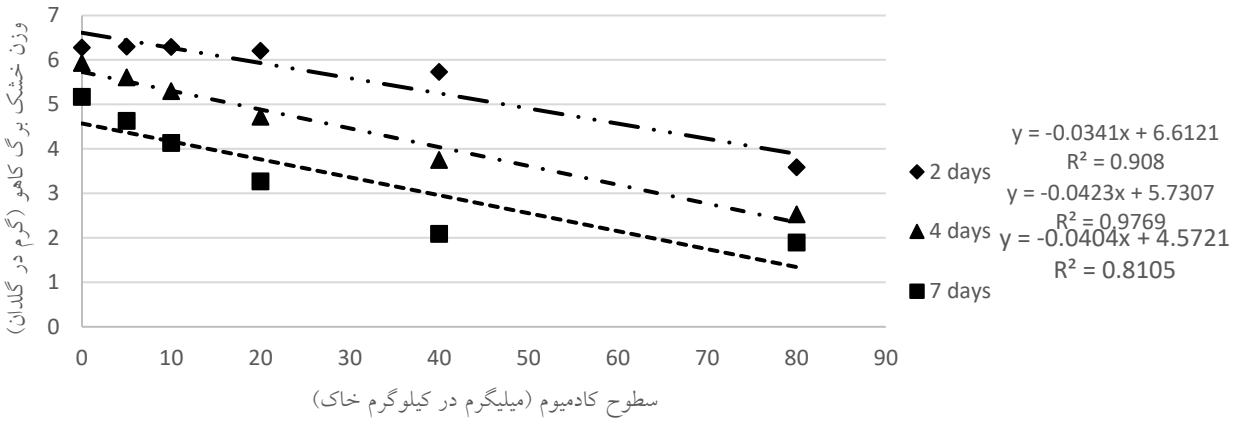
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن خشک	غلظت کادمیوم	جذب کادمیوم	سطح برگ	تبخیر وتعرق	تعرق
			برگ				
رژیم آبیاری	۲	۲***	۵۰۹***	۶۳۲۵۵ ***	۱۳۵۲۲۸۶***	*** ۱۱۸۲۸۱۲۱۷	۳۴۳۰۱۳۴**
کادمیم	۵	۲۰/۶**	۹۰۷۴***	۵۳۶۴۶***	۵۷۴۶۴۱***	*** ۴۷۹۹۱۱	۴۸۰۰۵۰***
برهمکنش کادمیوم و رژیم آبیاری	۱۰	۰/۱۸**	۱۵۴***	۸۱۹۴***	۲۲۵۶۶***	*** ۴۰۶۰۰	۴۰۶۰۹***
خطا	۳۶	۰/۰۱۱	۸/۹۹	۸۰/۰۷	۴۵۳	۷۱۰	۷۳۷
			ساقه				
رژیم آبیاری	۲	۸/۳۶***	۱۰۳۱***	۱۸۴۳۶***			
کادمیوم	۵	۰/۹۷***	۱۱۰۹۵***	۱۲۳۲۱***			
برهمکنش کادمیوم و رژیم آبیاری	۱۰	۰/۰۶***	۲۳۷۱***	۲۳۷۱***			
خطا	۳۶	۰/۰۰۶	۴۲	۴۲/۹۳			

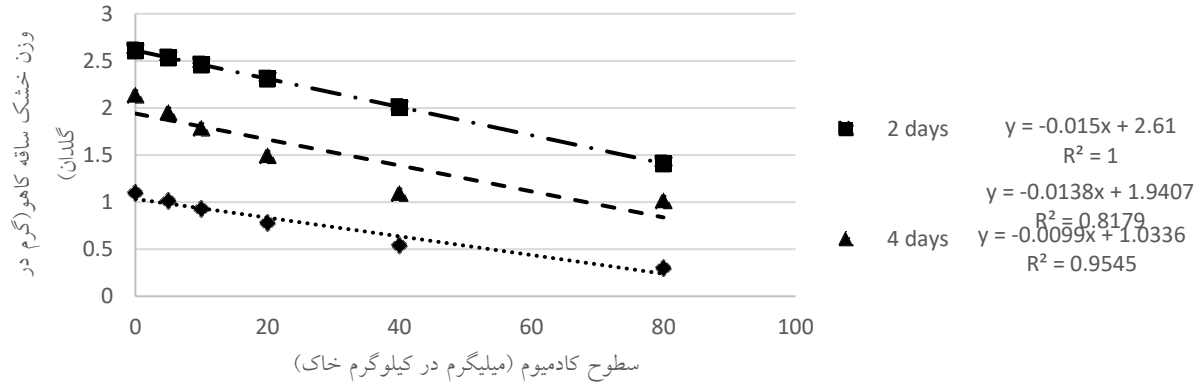
* و*** در سطح پنج ویکدهم درصد معنی دارند و ns معنی‌دار نمی‌باشد.

جدول٤. تجزیه واریانس مربوط به وزن خشک، سطح برگ، تبخیر و تعرق، تعرق ، غلظت کادمیم در برگ و ساقه اسفناج.

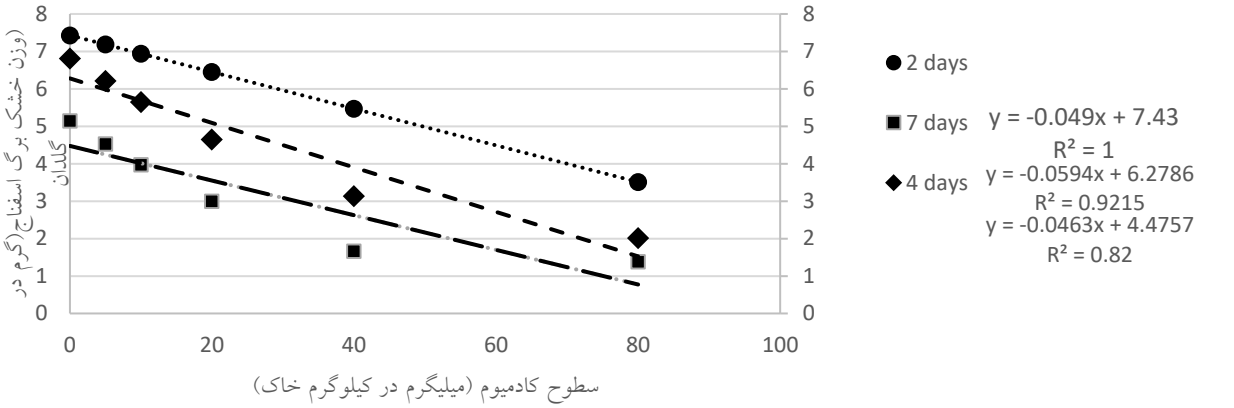
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		وزن خشک	غلظت کادمیوم	جذب کادمیوم	سطح برگ	تبخیر وتعرق	تعرق
			برگ				
رژیم آبیاری	۲	*** ۲۳	۵۶۵۵***	۳۹۱۸۷***	۵۶۲۴۹۸۳***	۱۱۱۴۰۶۲۱۹***	۲۹۶۷۵۵۴۰***
کادمیوم	۵	۱۲***	۱۷۱۹۲***	۲۰۰۲۷۸***	۶۳۱۹۹۸***	۱۷۹۰۲۲***	۱۷۹۰۲۲***
برهمکنش کادمیوم و رژیم آبیاری	۱۰	۰/۷۰۳***	۵۶۴***	۳۳۰۹۳***	۸۲۵۵***	۳۹۸۷۶***	۳۹۸۷۶***
خطا	۳۶	۰/۲۹	۳/۸۶۵	۱۷۶	۹۶۳	۸۹۲	۸۲۷
			ساقه				
رژیم آبیاری	۲	۵/۰***	۶۶۳۹***	۸۲۵۳۳***			
کادمیوم	۵	۰/۶۳***	۲۱۴۷۷***	۱۳۱۳۱۸***			
برهمکنش کادمیوم و رژیم آبیاری	۱۰	۰/۰۳*	۶۷۰***	۲۷۹۰۷***			
خطا	۳۶	۰/۰۱۶	۴/۲۷۸	۹۳۳			

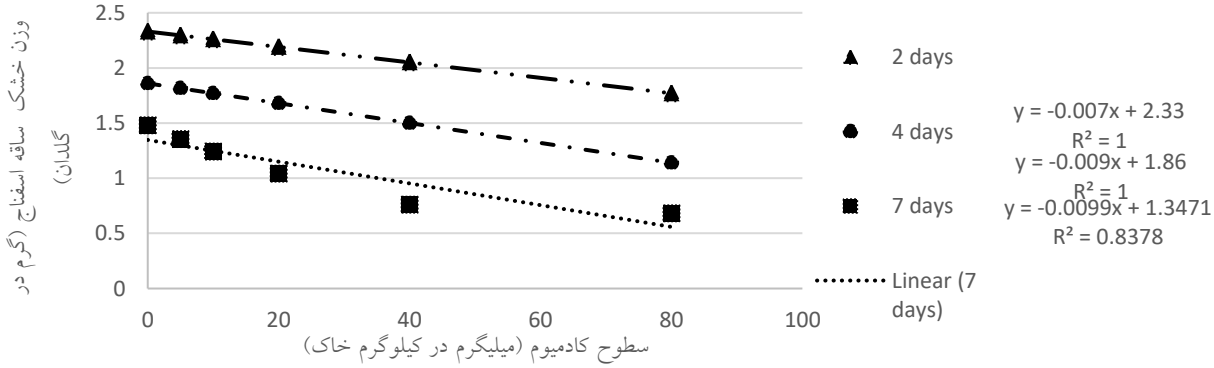
* و*** در سطح پنج ویکدهم درصد معنی دارند و ns معنی‌دار نمی‌باشد.





شکل ۱. تاثیر سطوح کادمیوم و رژیم آبیاری بر وزن خشک برگ و ساقه کاهو





شکل ۲. تاثیر سطوح کادمیوم و رژیم آبیاری بر وزن خشک برگ و ساقه اسفناج

کاهش میزان فتوسنتز نتیجه منفی کادمیوم بر واکنش بیوشیمیایی چرخه کلوین است (Vassilev and Yordanov, 1997; Linger et al., 2005). Sharma et al. (2012) گزارش کردند، کادمیوم موجب خسارات فیزیولوژیکی و ژنتیکی می‌گردد. آنها نتیجه گرفتند که این عنصر از تقسیم سلولی جلوگیری می‌کند. Jawad Hassan et al. (2020) اظهار کردند که سمیت کادمیوم عامل اصلی آسیب اکسیداتیو است که منجر به کاهش رشد گیاهان با ایجاد تغییرات در نفوذپذیری غشا و تولید گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود.

با افزایش دور آبیاری میانگین وزن خشک برگ و ساقه هر دو گیاه کاهش معنی‌داری داشت. درصد کاهش میانگین وزن خشک در دور آبیاری ۴ و ۷ روزه نسبت به ۲ روزه در برگ و ساقه کاهو به ترتیب ۲۳ و ۴۱، ۳۱ و ۶۳ درصد و در اسفناج به ترتیب ۱۹ و ۳۹، ۲۴ و ۴۹ درصد بود. نتایج حاکی از تاثیر تنش خشکی در کاهش وزن خشک برگ و ساقه گیاهان مورد بررسی است. کاهش رشد در اثر تنش خشکی به علت کاهش فعالیت فتوسنتزی و افزایش تنفس موجب کم شدن ذخیره کربن و کاهش عملکرد ماده خشک می‌باشد (Assah et al., 2016). در زمان تنش خشکی، سیتوکینین‌ها، جیبرلین‌ها و اکسین‌ها کاهش می‌یابد. در واقع کاهش رشد یک عامل حفاظتی گیاهان در برابر خشکی است (Javid et al., 2011).

Jabeen et al. (2019) رشد گیاه اسفناج را در رژیم‌های مختلف آبیاری بررسی کردند. نتایج نشان داد اعمال تیمارهای کم آبیاری به طور معنی‌داری وزن تر و خشک ساقه و ریشه، طول ریشه و میزان کلروفیل برگ را کاهش داده است. Pospisilova (2003) بیان کرد که تنش خشکی باعث برهم‌خوردن تعادل هورمون‌ها شامل افزایش ABA در برگ و یا کاهش مقدار سیتوکینین، اکسین و جیبرلین می‌شود.

Ma et al. (2022) نشان دادند که تنش خشکی (۳۵ و ۷۰ درصد ظرفیت نگهداری آب در خاک) باعث کاهش معنی‌دار رنگدانه‌های فتوسنتزی و وزن خشک گندم (۸۶ و ۱۱۵٪) نسبت به شاهد (بدون تنش خشکی) شد. کاهش رشد در اثر تنش خشکی در پسته (Saadatmand et al., 2007؛ Sepaskhah and Maftoun, 1981) و در گوجه فرنگی (Zhou et al., 2017) نشان داده شده است.

برهمکنش کادمیوم و دور آبیاری در برگ و ساقه دو گیاه معنی‌دار می باشد، به طوری که در کاهو افزایش غلظت کادمیوم تا سطح ۵ میلی‌گرم در کیلو گرم به ترتیب در دور آبیاری ۲ روزه اختلاف معنی‌دار در وزن خشک برگ ایجاد نکرد، درصورتی که در دور آبیاری ۴ و ۷ روزه کاهش معنی‌داری در وزن خشک بین تمامی سطوح کادمیوم مشاهده گردید. اما در ساقه تا سطح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب در دور آبیاری ۲ و ۴ روزه اختلاف معنی‌داری در وزن خشک ایجاد نگردید. در مورد اسفناج در دور آبیاری ۲ روزه تا سطح ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و در دور آبیاری ۴ روزه تا سطح ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در وزن خشک برگ تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد، در ساقه اسفناج تا سطح ۱۰ و ۲۰ به ترتیب در دور آبیاری ۲ و ۴ روزه اختلاف معنی‌داری در رشد مشاهده نشد، در بیشترین میزان تنش خشکی یعنی دور آبیاری ۷ روزه کاهش معنی‌داری در وزن خشک بین تمامی سطوح کادمیوم مشاهده گردید. این موضوع نشان دهنده این مطلب است که تنش رطوبتی باعث کاهش تحمل به کادمیوم گردیده است. دور آبیاری تحمل دو گیاه در برگ و ساقه نسبت به شاهد کاهش یافت. جدول ۱ نشان می‌دهد، تحمل ساقه دو گیاه به کادمیوم بیشتر از برگ است.

عزیزیان (۱۳۸۴) با اعمال دور آبیاری ۱ و ۲ و ۴ روزه با افزودن ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر به آب آبیاری که بنا بر محاسبات این محقق معادل ۷۸ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک بود، نشان داد، در دور آبیاری چهار روزه در شاخسار کاهو ۴۰ درصد کاهش وزن خشک مشاهده شد. در حالی که در آزمایش حاضر کاهش وزن خشک برگ کاهو درسطح ۸۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و در دور آبیاری ۴ روزه، ۸۰ درصد بود. تفاوت مشاهده شده در این دو آزمایش به احتمال قوی به خاطر افزودن تدریجی کادمیوم در آزمایش عزیزیان (۱۳۸۴)در مقایسه با اضافه کردن یکباره کادمیوم به خاک در آزمایش اخیر است، همانطور که انتظار می‌رود کاهش رشد کمتر در حالت افزودن تدریجی از حالت یکباره افزودن کادمیوم به خاک مشاهده می‌شود بنابراین نحوهء مواجهه گیاه با آلاینده می‌تواند مورد بررسی بیشتر قرار گیرد.

Ginzburg et al. (2020) نشان داد، وزن خشک کاهو، با افزودن ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم به خاک ۶۰ درصد کاهش یافت. در آزمایش حاضر در شرایط رطوبتی مطلوب در سطح ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم حدود ۵۰ درصد کاهش رشد در برگ کاهو دیده شد. این اختلاف را می‌توان به تفاوت در ویژگی خاک‌های مورد مطالعه نسبت داد با توجه به بالا بودن رس و سیلت و کربنات کلسیم معادل بالاتر خاک در آزمایش حاضر این امر دور از انتظار نیست و نشان دهنده قابلیت دسترسی پایین‌تر کادمیوم در این خاک است.

Kohansal Vajargah et al. (2022) در تحقیقی که بر گیاهان شبدر، یونجه و کلزا تحت تنش رژیم‌های رطوبتی (۰، ۴۰ و ۶۰ تخلیه رطوبت قابل استفاده) و کادمیوم (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) انجام دادند، گزارش دادند که بیشترین وزن خشک

اندام هوایی مربوط به کلزا در سطح شاهد کادمیوم و بدون تنش خشکی با میانگین ۷۵/۱۱ گرم و کمترین میانگین مربوط به تیمار شبدر در تیمار ۳۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و تنش خشکی ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس با میانگین ۳۱/۲۰ گرم بود که نشاندهنده کاهش ۵۸/۴۶ درصدی نسبت به تیمار شاهد بود.

زمانی که یون‌های فلزات سنگین در محیط رشد گیاه به مقدار زیادی وجود داشته باشند به وسیله ریشه گیاه جذب و به اندام هوایی انتقال می‌یابند و باعث مختل شدن سوخت و ساز گیاه و در نتیجه کاهش رشد می‌شود (Li et al., 2010). تنش آبی باعث کاهش پتانسیل اسمزی و پتانسیل کل آب، همراه با از بین رفتن آماس و بسته شدن روزنه‌ها می‌شود و در نتیجه رشد گیاه کاهش می‌یابد (Hassan et al., 2017).

سطح برگ

جدول آنالیز واریانس (جدول ۳ و ۴) نشان می‌دهد که تاثیر سطوح کادمیوم، رژیم رطوبتی و اثر متقابل آنها بر سطح برگ معنی‌دار است. با افزایش سطوح کادمیوم، سطح برگ کاهو و اسفناج کاهش معنی‌داری داشت (جدول۵). درصد کاهش میانگین سطح برگ در بیشترین سطح کادمیوم (۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) نسبت به سطح صفر در کاهو و اسفناج به ترتیب ۶۰ و ۴۴ درصد بود. داده‌ها حاکی از تحمل بیشتر اسفناج نسبت به کاهو در برابر کادمیوم است. کاهش سطح برگ بر اثر کادمیوم می‌تواند به علت کاهش جذب آب و عناصر غذایی درنتیجه جلوگیری سریع از عمل ریشه است زیرا ریشه اولین بخش در تماس با صدمات کادمیوم است (Veselove et al., 2003).

Latif et al. (2020) گزارش دادند که شاخص‌های رشد با قرار گرفتن در معرض کادمیوم به شدت کاهش یافت. هر افزایش در میزان کادمیوم (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی‌گرم در کیوگرم خاک) کاهش قابل توجهی در ارتفاع بوته، طول ریشه و سطح برگ اسفناج بدون توجه به مدت زمان قرار گرفتن در معرض کادمیوم، داشت. Aravind and Prasad (2004) گزارش دادند که سمیت کادمیوم باعث کاهش تعداد برگ، کاهش سطح برگ و کاهش فتوسنتز خالص گیاه چنگال آبی[1] (*Ceratophyllum demersum* L.) می‌شود. Alzahrani et al. (2018) گزارش دادند که طول ساقه، سطح برگ و وزن خشک گندم در اثر خشکی و سمیت کادمیوم به ترتیب حدود ۴۲-۵۷٪، ۴۹- ۵۷٪ و ۵۶-۶۴٪ کاهش یافت. کاهش سطح برگ در اثر کادمیوم در ذرت و یولاف توسط عزیزیان (۱۳۸۴) و Khan and Frankland (1983) در تربچه گزارش شده است.

Naik et al. (2013) نشان دادند که تأثیر قابل توجهی از کادمیوم اعمال شده بر سطح برگ اسفناج و کلم در مراحل مختلف رشد در طول یک دوره ۶۰ روزه مشاهده شد. کمترین سطح برگ هر دو محصول با بیشترین سطح کاربرد کادمیوم (۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک) در تمام تاریخ‌های نمونه‌برداری همراه بود. علاوه بر این، استفاده از ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک منجر به سطح برگ ۱۷ سانتی‌متر مربع شد و بیشترین کاهش (۵۱٪) را در مقایسه با شاهد در اسفناج در ۶۰ روزه رشد محصول به ثبت رساند.

با افزایش دور آبیاری سطح برگ به طور معنی داری کاهش یافته است (جدول۲). درصد کاهش سطح برگ در دور آبیاری۴ و ۷ روزه نسبت به ۲ روزه در کاهو و اسفناج به ترتیب ۲۷ ، ۵۰ و ۳۱، ۶۳ درصد بود. کاهش سطح برگ در اثر تنش خشکی در گندم (Blum et al., 1990)، پسته (Saadatmand et al., 2007)، ذرت، یولاف و کاهو (عزیزیان، ۱۳۸۴) نشان داده شد. انعطاف‌پذیری سطح برگ امکان مهمی است که گیاه تنش دیده از طریق آن کنترل خود را بر مصرف آب حفظ می‌کند (امام و زواره، ۱۳۸۴). تنش آب از فعالیت کلروفیل جلوگیری می‌کند، چون فعالیت کلروفیل به انرژی فتوسنتز که توسط الکترون‌ها و عدم استفاده از پروتون که توسط نور ایجاد می‌گردد بستگی دارد. به رغم تخریب عوامل انتقال الکترون در فتوسیستم I، عامل اصلی جریان الکترون پس از پلاستوکینون اثر تنش خشکی می‌باشد (Zhuang et al., 2020). خشکی علاوه بر اینکه فتوسنتز را تحت تاثیر قرار می‌دهد، انتقال شیره پرورده را به دیگر قسمت‌های گیاه کاهش می‌دهد. کاهش سنتز ATP در روند فتوسنتز و تنفس کاهش میزان ATP را در سلول باعث می‌گردد. خشکی رشد گیاه را کاهش می‌دهد و موجب کوچک شدن اندازه برگ می گردد (Drake et al., 2017; Salmon et al., 2020).

کم آبیاری بر روابط آب و گیاه در همه مراحل از مولکولی، سلولی و بافتی تا کل سطح گیاه تأثیر می‌گذارد (Muscolo et al. 2015) در شرایط کمبود آب، گیاهان تمایل دارند که روزنه‌های خود را ببندند که در نتیجه باعث کاهش میزان تعرق و تنفس گیاه می‌شود (Diaz-Lopez et al. 2012). نتایج مطالعه Sahin et al. (2018) در شرایط شوری و خشکی نشان داد سطح برگ گیاه کلم در همه تیمارها به طورمعنی‌داری پایین‌تر از تیمار شاهد است.

---

[1] coontail

اثر متقابل دور آبیاری و کادمیوم معنی‌دار بود به طوری که با افزایش دور آبیاری، تاثیر سوء کادمیوم بر کاهش سطح برگ بیشتر شد. در کاهو در شرایط بدون تنش رطوبتی، مصرف ۸۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک، موجب ۴۷ درصد کاهش سطح برگ شد معذالک با افزایش دور آبیاری به ۴ و ۷ روزه، درصد کاهش سطح برگ، به ترتیب ۶۳ و ۷۴ درصد رسید. در اسفناج در شرایط رطوبتی مطلوب، درصد کاهش سطح برگ در بیشترین سطح کادمیوم در مقایسه با شاهد ۳۲ درصد بوده درحالی که در دور آبیاری ۴ و ۷ روزه به ترتیب ۴۳ و ۶۷ درصد شد. رگرسیون خطی نشان می‌دهد که تغییرات وزن خشک و سطح برگ را می‌توان با معادله‌ای با R^2 بزرگ برآورد نمود (شکل ۳).

جدول ۵- تأثیر سطوح کادمیوم و رژیم آبیاری بر سطح برگ کاهو و اسفناج (سانتیمتر مربع در گلدان)

سطوح کادمیوم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز) ۲	٤	۷	میانگین
		کاهو		
۰	۱۲۵۹	۱۰۶۲	۹۱۵	۱۰۷۹
۵	۱۲۵۳	۱۰۴۸	۷۳۴	۱۰۱۲
۱۰	۱۲۵۴	۹۸۷	۶۵۴	۳۶۵
۲۰	۱۱۶۹	۸۴۷	۴۳۵	۸۱۷
۴۰	۹۳۴	۵۰۶	۳۳۵	۶۱۲
۸۰	۶۶۸	۳۸۸	۲۳۶	۴۳۱
میانگین	۱۱۰۰	۸۰۶	۵۵۱	
		اسفناج		
۰	۲۰۲۹	۱۵۱۴	۱۰۲۰	۱۵۲۱
۵	۱۹۹۷	۱۴۳۶	۸۷۷	۱۴۳۷
۱۰	۱۹۵۴	۱۳۷۳	۷۴۳	۱۳۵۷
۲۰	۱۸۵۱	۱۲۲۱	۵۸۶	۱۲۱۹
۴۰	۱۴۸۲	۱۰۰۴	۴۱۸	۹۶۸
۸۰	۱۳۷۶	۸۶۰	۳۳۵	۸۵۷
میانگین	۱۷۸۲	۱۲۳۵	۶۶۳	

LSD (0.05)	کاهو	اسفناج
کادمیوم	۲۰	۳۰
رژیم آبیاری	۱۴	۲۰
کادمیوم× رژیم آبیاری	۳۵	۵۱

شاخص تنش رطوبتی

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود میانگین شاخص حساسیت به تنش رطوبتی (فیشر و موور) در برگ کاهو با افزایش تنش رطوبتی بطور معنی داری افزایش یافت اما در ساقه حساسیت به تنش رطوبتی با افزایش تنش رطوبتی کاهش یافت ولی این کاهش معنی‌دار نبود. میانگین این شاخص با افزایش غلظت کادمیوم روند افزایشی داشت به طوری که بالاترین و کمترین این شاخص در برگ در سطح ۸۰ (۳/۳۵) و ۰ (۰/۸۵) بدست آمد. اثر متقابل تنش رطوبتی و سطوح کادمیوم بر این شاخص در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. به طوری که در هر سطح تنش رطوبتی (۴ و ۸ روزه) با افزایش غلظت کادمیوم در خاک حساسیت به تنش رطوبتی در برگ و ساقه افزایش یافت. اما حساسیت به تنش در برگ نسبت به ساقه بیشتر بودبه عبارتی دیگر ساقه کاهو نسبت به برگ در برابر تنش رطوبتی مقاومتر بود. به عنوان مثال در تنش رطوبتی ۸ روز و کاربرد ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک این شاخص در برگ و ساقه به ترتیب ۱/۶۳ و ۰/۵۲ نسبت به تیمار تنش رطوبتی ۸ روز و بدون کاربرد کادمیوم افزایش یافت.

جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت کادمیوم در خاک میانگین شاخص حساسیت به تنش رطوبتی در برگ و ساقه اسفناج بطور معنی داری افزایش یافت بطوریکه که با کاربرد ۸۰ میلی‌گرم کادمیوم در خاک این شاخص در برگ از ۰/۶۱ به ۳/۳۸ و در ساقه از ۰/۷۹ به ۱/۷۷ رسید. تاثیر تیمار تنش رطوبتی بر شاخص حساسیت برگ اسفناج معنی‌دار بود. اما تاثیر تنش رطوبتی بر این شاخص در ساقه تفاوت معنی‌داری را سبب نشد.

جدول ٦. شاخص حساسیت کاهو به تنش رطوبتی در سطوح مختلف کادمیوم

سطوح کادمیم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز)		میانگین
	٤	٨	
	برگ		
٠	٠/٣٦	١/٣٤	٠/٨٥
٥	٠/٧١	١/٦٩	١/٢٠
١٠	١/٠٤	٢/٠٢	١/٥٣
٢٠	١/٦٢	٢/٥٩	٢/١٠
٤٠	٢/٥١	٣/٣٧	٢/٩٤
٨٠	٣/١٦	٣/٥٣	٣/٣٥
میانگین	١/٥٧	٢/٤٢	
	ساقه		
٠	٠/٦٢	٠/٨٩	٠/٧٦
٥	٠/٨٧	٠/٩٤	٠/٩٠
١٠	١/٠٩	٠/٩٩	١/٠٤
٢٠	١/٤٨	١/٠٧	١/٢٧
٤٠	٢/٠١	١/٢١	١/٦١
٨٠	٢/١١	١/٣٦	١/٧٣
میانگین	١/٣٦	١/٠٨	
LSD	برگ	ساقه	
کادمیوم	٠/٧٩	٠/٨٩	
رژیم آبیاری	٠/٢٨	٠/٧٠	
کادمیم× رژیم آبیاری	٢/١٥	٢/٦٥	

جدول ٧. شاخص حساسیت اسفناج به تنش رطوبتی در سطوح مختلف کادمیوم

سطوح کادمیم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز)		میانگین
	٤	٨	
	برگ		
٠	٠/٢٩	٠/٩٢	٠/٦١
٥	٠/٥٦	١/٣٧	٠/٩٧
١٠	٠/٨٢	١/٧٨	١/٣٠
٢٠	١/٢٩	٢/٥٠	١/٩٠
٤٠	٢/١٠	٣/٤٨	٢/٧٩
٨٠	٣/١١	٣/٦٤	٣/٣٨
میانگین	١/٣٦	٢/٢٨	
	ساقه		
٠	٠/٨٣	٠/٧٤	٠/٧٩
٥	٠/٩١	٠/٨٥	٠/٨٨
١٠	٠/٩٩	٠/٩٥	٠/٩٧
٢٠	١/١٥	١/١٣	١/١٤
٤٠	١/٤٧	١/٣٧	١/٤٢
٨٠	٢/١٠	١/٤٤	١/٧٧
میانگین	١/٢٤	١/٠٨	
LSD	برگ	ساقه	
کادمیوم	٠/٥١	٠/٤٠	
رژیم آبیاری	٠/٧٦	٠/٢١	
کادمیم× رژیم آبیاری	١/٩٦	١/٩٠	

اثر متقابل تنش رطوبتی و سطوح مختلف کادمیوم بر شاخص حساسیت به تنش رطوبتی معنی‌دار بود. بطوریکه در هر تیمار رطوبتی

با افزایش سطح کادمیوم در خاک، شاخص حساسیت به تنش رطوبتی بطور معنی داری افزایش یافت به عنوان مثال در تیمار ۴ روز با کاربرد ۲۰ و ۸۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک این شاخص حدود ۴/۴۴ و ۱۰/۷۲ برابر نسبت به تیمار بدون کاربرد کادمیوم و ۴ روز تنش رطوبتی بود. در اسفناج نیز همانند کاهو حساسیت به تنش رطوبتی در برگ بیشتر از ساقه بود.

مروتی و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که تنش رطوبتی باعث افزایش شاخص حساسیت به تنش رطوبتی در گونه‌های سویا می‌شود.

یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۹) بیان کردند که عملکرد گندم در شرایط تنش رطوبتی بطور معنی‌داری نسبت به شرایط نرمال کاهش یافت. تنش رطوبتی شاخص حساسیت به تنش را در ژنوتیپ‌های مختلف گندم افزایش داد.

غلظت و جذب کادمیوم در گیاه

تاثیر سطوح مختلف کادمیوم بر غلظت کادمیوم در برگ وساقه هر دو گیاه مورد مطالعه معنی دار است (جدول ۲ و ۳). با مصرف کادمیوم میانگین غلظت کادمیوم در برگ و ساقه هر دو گیاه افزایش یافت (جدول‌های۸ و ۹). میزان معمول کادمیوم در گیاهان ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گزارش شده است (هودجی و و جلالیان، ۱۳۸۲) در حالیکه در این پژوهش در تمام شرایط (به جز تیمار صفر کادمیوم) غلظت کادمیوم کاهو و اسفناج بیش از حد معمول بود. که این مساله با توجه به مشاهده نشدن آثار ظاهری سمیت کادمیوم اهمیت توجه به خطر کشت کاهو و اسفناج در خاک‌های آلوده را نشان می‌دهد. در مقایسه برگ و ساقه در دو گیاه ساقه از غلظت بالاتری از کادمیوم برخوردار است. بالاتر بودن غلظت کادمیوم ساقه نسبت به برگ می‌تواند ناشی از کمتر بودن وزن ماده خشک ساقه باشد . به طوری که جذب کادمیوم در برگ بیش از ساقه است.

جدول ۸- تأثیر سطوح کادمیوم و رژیم آبیاری بر غلظت کادمیوم برگ و ساقه کاهو (میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک)

سطوح کادمیوم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز)			میانگین
	۲	٤	۷	
		برگ		
۰	۰/۲۷۷	۰/۳۱۹	۰/۲۸۲	۰/۲۹۳
۵	۹/۶۸۱	۹/۸۳۳	۶/۷۴۵	۸/۷۵۳
۱۰	۱۵/۹۸	۱۳/۷۰	۱۰/۴۸	۱۳/۳۹
۲۰	۳۰/۵۱	۲۵/۲۷	۲۲/۶۶	۲۶/۱۵
۴۰	۴۹/۴۹	۴۳/۳۳	۴۰/۵۰	۴۴/۴۳
۸۰	۱۰۳/۶	۹۰/۵۸	۶۵/۳۳	۸۶/۵۱
میانگین	۳۴/۹۳	۳۰/۵۱	۲۴/۳۳	
		ساقه		
۰	۰/۲۷۰	۰/۲۸۸	۰/۲۸۰	۰/۲۷۹
۵	۱۳/۳۵	۱۰/۵۰	۱۰/۰۲	۱۱/۲۹
۱۰	۲۴/۶۵	۱۹/۳۸	۲۰/۴۸	۲۱/۵۰
۲۰	۳۳/۸۵	۲۲/۲۷	۳۱/۲۹	۲۹/۱۴
۴۰	۷۳/۸۲	۵۲/۶۷	۵۶/۴۰	۶۰/۹۶
۸۰	۱۲۴/۰	۸۴/۵۸	۷۴/۳۴	۹۴/۲۹
میانگین	۴۴/۹۸	۳۱/۶۱	۳۲/۱۳	
LSD (0.05)	برگ	ساقه		
کادمیوم	۲/۸۶	۳/۴۰		
رژیم آبیاری	۲/۰۲	۲/۴۰		
کادمیوم× رژیم آبیاری	۴/۹۶	۵/۹۰		

جدول ۹- تأثیر سطوح کادمیوم و رژیم آبیاری بر غلظت کادمیوم برگ و ساقه اسفناج (میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک)

سطوح کادمیوم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز)			میانگین
	۲	٤	۷	

		برگ		
۰	۰/۱۴۱	۰/۱۴۴	۰/۱۴۶	۰/۱۴۴
۵	۲۴/۸۹	۱۴/۴۷	۷/۵۴۸	۱۵/۶۴
۱۰	۵۷/۲۸	۳۹/۹۱	۳۵/۰۳	۴۴/۰۸
۲۰	۹۷/۹۳	۵۴/۴۸	۴۷/۳۶	۶۶/۵۹
۴۰	۱۰۷/۹	۷۴/۷۸	۶۸/۲۱	۸۳/۶۲
۸۰	۱۶۰/۳	۱۰۳/۰	۸۹/۵۸	۱۱۷/۶
میانگین	۷۴/۷۰	۴۷/۷۹	۴۱/۳۱	
		ساقه		
۰	۰/۱۵۰	۰/۱۳۷	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳
۵	۳۳/۷۴	۱۹/۴۰	۱۳/۸۰	۲۲/۳۱
۱۰	۶۶/۹۵	۵۰/۳۷	۳۹/۴۰	۵۲/۲۴
۲۰	۱۰۴/۵	۶۵/۲۸	۵۵/۴۳	۷۵/۰۷
۴۰	۱۲۷/۸	۹۵/۱۰	۸۴/۸۲	۱۰۲/۶
۸۰	۱۸۰/۴	۱۱۲/۸	۱۰۰/۴	۱۳۱/۲
میانگین	۸۵/۵۹	۵۷/۱۸	۴۹/۰۰	

LSD (0.05)	برگ	ساقه
کادمیوم	۱/۸۷	۱/۹۷۷
رژیم آبیاری	۱/۳۲	۱/۳۹
کادمیوم× رژیم آبیاری	۳/۲۵	۳/۴۲

Eissa and Negim (2018) گزارش دادند که با افزایش میزان کادمیوم در خاک غلظت آن در اندام هوایی و ریشه کاهو و اسفناج بطور معنی‌داری افزایش یافت. آنها بیان کردند که در خاک‌های آلوده به کادمیوم (۱-۳/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، غلظت کادمیوم در شاخساره کاهو و اسفناج ۱/۵۰ و ۳/۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. در حالی که در ریشه به ترتیب ۱۵ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. ریشه و شاخساره بوته‌های اسفناج به طور معنی‌داری نسبت به کاهو حاوی مقادیر بالاتری از کادمیوم بود.

تحقیقات دیگر نشان داد که غلظت فلزات سنگین در گیاهانی که در خاک‌های آبیاری شده با فاضلاب رشد می‌کنند به طور قابل‌توجهی بالاتر از آنهایی است که در خاک‌های آبیاری شده با آب شیرین رشد می‌کنند (Singh et al., 2010). نتایج تحقیق حاضر با نتایج یافت شده در هیدروپونیک، کشت گلدان و در شرایط مزرعه مطابقت دارد (Zhang and Zhang, 2010; Ahmad et al., 2013) با این نتیجه که افزایش شدید غلظت کادمیوم در گیاه ناشی از افزایش غلظت کادمیوم در محیط خاک/آب است. با این حال، بیشتر مطالعات نشان می‌دهد که غلظت زیستی فلزات در محصولات زراعی وابسته به ژنوتیپ است. همچنین، ارقام مختلف به دلیل پتانسیل‌های ژنتیکی متفاوت، سطوح مختلف تحمل نسبت به فلزات را دارند (Bauddh and Singh 2011; Ahmad et al. 2013).

بین سه دور آبیاری از نظر غلظت کادمیوم تفاوت معنی‌داری وجود دارد به جز در مورد ساقه کاهو که بین دور آبیاری ۲ و ۷ روزه از نظر غلظت کادمیوم تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و علت آن می‌تواند به علت کاهش وزن خشک ناشی از خشکی در دور آبیاری ۷ روزه و افزایش غلظت کادمیوم باشد به طوری که بین جذب کادمیوم در ساقه کاهو در دورهای آبیاری یاد شده تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

با افزایش دور آبیاری غلظت و جذب کادمیوم در هردو بخش اسفناج و کاهو کاهش یافت. با توجه به انتقال بیشتر کادمیوم به شاخسار در شرایط تعرق بیشتر این موضوع طبیعی و دور از انتظار نیست به طوری که در برگ کاهو درصد کاهش غلظت کادمیوم در دور آبیاری ۴ و ۷ روزه به ترتیب۱۳ و۳۰ درصد و در ساقه ۳۰ و ۲۸ درصد بود و در برگ اسفناج ۳۶ و ۴۵ درصد و در ساقه ۳۳ و ۴۳ درصد بود. بیشترین میزان کادمیوم برگ و ساقه کاهو در دور آبیاری ۲ روزه به ترتیب به میزان ۱۰۳ و ۱۲۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و در اسفناج ۱۶۰ و ۱۸۰ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد.

جذب کادمیوم نیز با افزایش سطوح کادمیوم و دور آبیاری در هر دو بخش هر دو گیاه تفاوت معنی‌داری داشت (جدول‌های۱۰ و ۱۱) و با افزایش دور آبیاری از ۲ روزه به ۴ و ۷ روزه، جذب کادمیوم برگ و ساقه کاهو به ترتیب۴۳ و ۷۰ ،۵۳ و ۷۶ درصد در برگ و ساقه اسفناج به ترتیب۵۳ و ۷۳، ۵۱ و ۷۵ درصد کاهش یافت.

بیشترین میزان جذب در هر دو گیاه در برگ بود با توجه به وزن خشک بیشتر برگ این مساله علی رغم بالا بودن غلظت کادمیوم

در ساقه قابل توجیه است. در مقایسه دو گیاه غلظت کادمیوم در اسفناج بیش از کاهو است. چنین مشاهداتی با نتایج Torabian and Mahjori (2002) منطبق است به طوری که این محققین عنوان داشتند تجمع کادمیوم در تیره *Cruciferae* (اسفناج، تربچه و شاهی) به وضوح دیده می‌شود در حالی که در تیره *Liliaceae* و *Compositae* (تره و کاهو) تجمع متوسط بوده است در واقع ژنوتیپ گیاهی از عوامل مهم در جذب کادمیوم است. ژنوتیپ گیاهی نه تنها بر مقدار جذب بلکه بر توزیع کادمیوم از ریشه‌ها به اندام‌های هوایی و برگ‌ها نیز موثر است.

برهمکنش دور آبیاری و کادمیوم بر غلظت و جذب کادمیوم در برگ و ساقه هر دو گیاه در سطح ۵ درصد معنی دار بوده است. این برهمکنش منفی بود به طوری که با افزایش دور آبیاری از تاثیر افزایشی سطوح کادمیوم بر غلظت وجذب کادمیوم در گیاه کاسته شد.

Adrees et al. (2020) گزارش دادند که غلظت کادمیوم دانه گندم در شرایط محدود آب نسبت به شرایط معمولی (۷۰٪ ظرفیت مزرعه ای) افزایش معنی‌داری داشت. همچنین غلظت کادمیوم در بافت گندم با وزن خشک همبستگی منفی داشت.

Ünyayar et al. (2005) بیان کردند که ترکیب خشکی و کادمیوم رشد اندام هوایی را در گوجه فرنگی به طور معنی‌داری کاهش داد. طول اندام هوایی گوجه فرنگی تحت شرایط خشکی و ترکیب خشکی–کادمیوم به طور معنی‌داری کاهش یافت. در حالی که رشد شاخساره گوجه‌فرنگی حساس به خشکی، به طور منفی از خشکی و ترکیبات خشکی–کادمیوم تحت‌تاثیر قرار گرفت، اما از تیمار کادمیوم تحت‌تاثیر قرار نگرفت.

جدول ۱۰- تأثیر سطوح کادمیوم و رژیم آبیاری بر جذب کادمیوم برگ و ساقه کاهو (میکرو گرم در گلدان).

سطوح کادمیوم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز)			میانگین
	۲	٤	۷	
		برگ		
۰	۱/۹۶	۲/۰۰۴	۱/۵۲۷	۱/۸۳۲
۵	۶۸/۵۰	۶۰/۹۴	۲۹/۵۶	۵۳/۰۰
۱۰	۱۱۲/۳	۷۷/۰۹	۴۱/۸۳	۷۷/۰۶
۲۰	۱۸۷/۸	۱۱۸/۴	۵۷/۵۹	۱۲۱/۳
۴۰	۲۸۴/۸	۱۳۵/۶	۸۳/۰۵	۱۶۷/۸
۸۰	۳۵۶/۷	۱۸۶/۶	۹۲/۹۶	۲۱۲/۱
میانگین	۱۶۸/۷	۹۶/۷۶	۵۱/۰۹	
		ساقه		
۰	۰/۶۵	۰/۵۱۷	۰/۳۴	۰/۵۰۵
۵	۳۲/۱۸	۱۸/۶۵	۹/۱۵	۲۰/۰۰
۱۰	۵۹/۹۶	۳۵/۳۸	۱۷/۹۸	۳۷/۷۷
۲۰	۸۰/۸۶	۳۱/۹۶	۲۴/۰۴	۴۵/۶۲
۴۰	۱۴۰/۵	۶۰/۰۸	۳۵/۳۹	۷۸/۶۶
۸۰	۱۸۰/۷	۸۷/۵۹	۳۳/۳۴	۱۰۰/۵
میانگین	۸۲/۴۷	۳۹/۰۳	۲۰/۰۴	
LSD (0.05)	برگ	ساقه		
کادمیوم	۸/۵۵	۶/۲۶		
رژیم آبیاری	۶/۰۴	۴/۴۳		
کادمیوم× رژیم آبیاری	۱۴/۸۲	۱۰/۸۵		

جدول ۱۱- تأثیر سطوح کادمیوم و رژیم آبیاری بر جذب کادمیوم برگ و ساقه اسفناج (میکروگرم در گلدان).

سطوح کادمیوم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز)			میانگین
	۲	٤	۷	
		برگ		
۰	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۸۳۱
۵	۱۶۵/۵	۸۳/۸۱	۳۴/۳۳	۹۱/۰۵

۱۰	۳۵۹/۳	۲۱۰/۴	۱۴۰/۳	۲۳۶/۷
۲۰	۶۰۹/۸	۲۵۲/۱	۱۴۷/۸	۳۳۶/۶
۴۰	۶۲۳/۳	۲۸۷/۶	۱۵۲/۲	۳۵۴/۴
۸۰	۵۹۵/۹	۲۷۷/۱	۱۵۵/۸	۳۴۲/۹
میانگین	۳۹۱	۱۸۵	۱۰۵	
		ساقه		
۰	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۷
۵	۷۷/۳۹	۳۵/۷	۱۸/۱۹	۴۳/۷۶
۱۰	۱۵۲/۱	۹۱/۶۰	۴۴/۶۳	۹۶/۱۲
۲۰	۲۳۵/۳	۱۰۷/۲	۵۳/۸۸	۱۳۲/۱
۴۰	۲۵۹/۳	۱۳۷/۸	۷۳/۲۳	۱۵۶/۸
۸۰	۳۱۵/۸	۱۳۱/۷	۶۷/۶۹	۱۷۱/۷
میانگین	۱۷۳/۴	۸۴/۰۳	۴۲/۹۸	

LSD (0.05)	برگ	ساقه
کادمیوم	۱۳	۱۱/۰۷
رژیم آبیاری	۹	۷/۸۲
کادمیوم× رژیم آبیاری	۲۲	۱۹/۱۷

Lamb et al. (2010) بیان کردند که تحمل گیاهان در برابر کادمیوم موجود در گیاه در گونه‌های گیاهی مختلف متفاوت است و همچنین در یک گونه گیاهی نیز در خاک‌های مختلف در میزان خاصی از کادمیوم موجود در گیاه کاهش رشد نشان می‌دهد.

Alexander et al. (2006) نشان دادند که تفاوت بسیار معنی‌داری در غلظت کادمیوم بین ارقام تعدادی از سبزیجات مشهود بود. آنها بیان کردند که حبوبات (Leguminosae) تمایل به تجمع کم دارند، سبزیجات ریشه (Umbelliferae و Liliaceae) تمایل به تجمع متوسط و سبزیجات برگدار (Compositae و Chenopodiaceae) تجمع‌دهنده بالایی هستند.

Mamun et al. (2016) اظهار کردند که غلظت کادمیوم در پیازهای در حال رشد در خاک‌های آلوده به کادمیوم به طور قابل توجهی کمتر از غلظت کادمیوم موجود در اسفناج یا کاهو بود. این با سایر یافته‌ها مطابقت دارد (Gartler et al., 2013) که همچنین جذب بالای کادمیوم توسط مواد شاخساره انواع سبزیجات تجاری از جمله کاهو و اسفناج را نشان دادند. علاوه بر این، تغییرات ژنتیکی بین ارقام می‌تواند منجر به تفاوت‌های قابل توجهی در جذب کادمیوم شود (Crews and Davies, 1985; McLaughlin et al., 1994; Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007; Grant et al., 2008).

در آزمایش حاضر در شرایط رطوبت مطلوب کاهو در ۱۰۳ و ۱۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب در برگ و ساقه و اسفناج در ۲۶۰ و ۴۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب در برگ و ساقه ۵۰ درصد کاهش رشد نسبی داشتند. در هر دو بخش هر دو گیاه با افزایش دور آبیاری تحمل گیاه به کادمیوم کاهش یافته است، بطوریکه ۵۰ درصد کاهش رشد در غلظت‌های کمتری از کادمیوم خاک روی می‌دهد.

عزیزیان (۱۳۸۴)نیز بیان نمود که مقاومت ساقه ذرت به کادمیوم بیش از برگ این گیاه است. Bingham (1975) عنوان داشت غلظت کادمیوم برگ کاهو برای کاهش ۵۰ درصد رشد نسبی در محلول آبکشتی ۳۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است که بالاتر از میزان بدست آمده از آزمایش حاضر است تفاوت در این مورد به احتمال قوی مربوط به تفاوت نوع کشت است، به طوری که در روش آبکشتی کادمیوم با سهولت بیشتری در اختیار گیاه قرار می‌گیرد.

تبخیر-تعرق و تعرق

با افزایش سطوح کادمیوم، میزان تبخیر-تعرق و تعرق به طور معنی‌داری کاهش یافته است (جدول‌های ۱۲ و ۱۳). بطوری‌که در بالاترین سطح کادمیوم نسبت به سطح صفر میانگین تعرق در اسفناج ۵ درصد و میانگین تبخیر-تعرق ۱۰ درصد کاهش یافته است.

وسیلو و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند کادمیوم در گندم باعث کاهش تعرق می‌گردد. کاهش در تعرق گیاهان تحت تیمار کادمیوم احتمالا به وسیله بسته شدن روزنه‌ها است (پیرسون و کرخام، ۱۹۸۱). اثر فیزیولوژیکی آن برای گیاهان جلوگیری از هدر دادن آب در زمانی که جذب آب توسط ریشه بوسیله کادمیوم کاهش یافته است می‌باشد. کاهش تعرق در اثر کادمیوم در درختان جنگلی توسط منون و

همکاران[1] (۲۰۰۵) و در نخود فرنگی بوسیله پاوک[2] (۲۰۰۲) و در *Brassica Juncea* توسط هاگ-کرور و همکاران[3] (۱۹۹۹) نیز بیان شده است. از آنجا که سطح برگ در اثر کادمیوم کاهش یافته است به نظر می‌رسد کاهش میزان تعرق نیز دور از انتظار نیست.

با افزایش دور آبیاری میزان تبخیر-تعرق و تعرق در هر دو گیاه به طور معنی‌داری کاهش یافته است (جدول ۱۲ و ۱۳). درصد کاهش تعرق در دور ۴ و ۷ روز نسبت به ۲ روز در اسفناج به ترتیب ۴۱ و۵۱ می‌باشد، همچنین درصد کاهش تبخیر و تعرق اسفناج در این دو دور آبیاری به ترتیب ۳۳ و ۵۳ مشاهده شد.

کاهش میزان تبخیر-تعرق با افزایش دور آبیاری توسط تاج آبادی (۱۳۸۳) ، عزیزیان (۱۳۸۴) و سپاسخواه و مفتون (۱۹۸۱) گزارش شده است. کاهش میزان تعرق احتمالا به افزایش کارایی مصرف آب، بهبود وضعیت آب گیاه، بهره‌وری بیشتر کربن، افزایش ماده خشک و میزان کمتر مصرف آب منجر می‌گردد (منسفیلد و همکاران، ۱۹۸۳؛ توبا و همکاران، ۱۹۹۴).

جدول ۱۲. تأثیر سطوح کادمیم و رژیم آبیاری بر تبخیر- تعرق برگ کاهو و اسفناج (سانتیمتر مکعب در گلدان)

سطوح کادمیم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز) ۲	٤	۷	میانگین
		کاهو		
۰	۹۲۶۶	۶۰۳۰	۴۲۱۴	۶۵۰۳
۵	۹۲۵۴	۶۰۵۳	۴۱۲۶	۶۴۷۸
۱۰	۹۲۴۸	۵۹۳۶	۴۱۰۸	۶۴۳۱
۲۰	۹۱۶۰	۵۸۳۰	۴۰۹۸	۶۱۷۰
۴۰	۹۰۳۷	۵۴۳۲	۴۰۳۹	۵۹۰۵
۸۰	۸۶۵۱	۵۲۵۳	۳۸۱۰	
میانگین	۹۱۰۳	۵۷۵۶	۴۰۶۶	
		اسفناج		
۰	۹۵۸۲	۶۴۴۰	۴۴۸۶	۶۸۳۶
۵	۹۵۴۰	۶۴۳۵	۴۴۷۲	۶۸۱۶
۱۰	۹۵۳۷	۶۲۹۰	۴۴۵۷	۶۷۶۱
۲۰	۹۴۵۰	۶۲۸۲	۴۴۴۷	۶۷۲۶
۴۰	۹۰۹۱	۶۲۱۷	۴۴۱۲	۶۵۷۳
۸۰	۸۹۶۵	۶۱۶۳	۴۳۲۱	۶۴۸۳
میانگین	۹۳۶۱	۶۳۰۵	۴۴۳۲	
LSD (0.05)	کاهو	اسفناج		
کادمیم	۲۵	۲۷		
رژیم آبیاری	۱۸	۱۹		
کادمیم× رژیم آبیاری	۴۴	۴۸		

جدول ۱۳. تأثیر سطوح کادمیم و رژیم آبیاری بر تعرق برگ کاهو و اسفناج (سانتیمتر مکعب در گلدان)

سطوح کادمیم (میلی‌گرم در کیلو گرم)	رژیم آبیاری (روز) ۲	٤	۷	میانگین
		کاهو		
۰	۴۶۶۰	۲۵۳۰	۲۱۱۴	۳۱۰۱
۵	۴۶۴۸	۲۵۵۳	۲۰۲۶	۳۰۷۶
۱۰	۴۶۴۲	۲۴۳۶	۲۰۰۸	۳۰۲۹

3- Menon et al.
4 -Paivoke
5- Haag-Kerwer et al.

۲۰	۴۵۵۴	۲۳۳۰	۱۹۹۸	۲۹۶۰
۴۰	۴۴۳۱	۱۹۳۲	۱۹۳۹	۲۷۶۸
۸۰	۴۰۴۵	۱۷۵۳	۱۷۱۳	۲۵۰۳
میانگین	۴۴۹۷	۲۲۵۶	۱۹۶۶	
		اسفناج		
۰	۴۹۷۵	۲۹۴۰	۲۳۸۶	۳۴۳۴
۵	۴۹۳۴	۲۹۳۵	۲۳۷۲	۳۴۱۴
۱۰	۴۹۳۱	۲۷۹۰	۲۳۵۷	۳۳۵۹
۲۰	۴۸۴۳	۲۷۸۲	۲۳۴۷	۳۳۲۴
۴۰	۴۴۸۵	۲۷۱۷	۲۳۱۲	۳۱۱۷
۸۰	۴۳۵۹	۲۶۶۳	۲۲۲۱	۳۰۸۱
میانگین	۴۷۵۵	۲۸۰۵	۲۳۳۲	

LSD (0.05)	کاهو	اسفناج
کادمیم	۱۸	۲۷
رژیم آبیاری	۲۶	۱۹
کادمیم× رژیم آبیاری	۴۵	۴۸

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که افزایش غلظت کادمیوم در خاک موجب کاهش معنی‌دار میانگین وزن خشک برگ و ساقه کاهو و اسفناج می‌شود. در برگ و ساقه هر دو گیاه با افزایش دور آبیاری تحمل گیاه به کادمیوم کاهش یافته است. با افزایش دور آبیاری غلظت و جذب کادمیوم در برگ و ساقه اسفناج و کاهو کاهش یافت. در تمام شرایط غلظت کادمیوم کاهو و اسفناج بیش از حد مجاز در گیاه بود. که این مساله با توجه به مشاهده نشدن آثار ظاهری جذب کادمیوم اهمیت توجه به خطر کشت کاهو و اسفناج در خاک‌های آلوده را نشان می دهد. در مقایسه برگ و ساقه در دو گیاه، جذب کادمیوم در برگ بیش از ساقه است. همچنین جذب کادمیوم در اسفناج بیش از کاهو بود. با توجه به تاثیر مثبت میزان آب در جذب کادمیوم توسط سبزیجات برگی توصیه می شود که در صورت کشت این گیاهان به منظور تغذیه در خاک‌های آلوده دور آبیاری افزایش یابد. مساله همگن و ناهمگن بودن آلودگی کادمیوم در خاک در میزان جذب این عناصر در گیاه مورد بررسی قرار گیرد. در خاک‌های با آلودگی زیاد به کادمیوم به دلیل قدرت بالای جذب این گیاهان از کشت سبزیجات برگی نظیر کاهو و اسفناج ممانعت به عمل آید.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

فهرست منابع

اسدی، حسین؛ بشارتی، حسین و گرجی، منوچهر. (۱۴۰۱). چالش‌ها و محدودیت‌های منابع خاک و اراضی در ایران. *نشریه علمی مدیریت اراضی*. ۱۰:۱۱۱-۱۳۵.

عزیزیان، ابوالفضل. (۱۳۸۴). تاثیر سطوح کادمیوم پساب بر رشد و ترکیب شیمیایی ذرت، کاهو و یولاف. *پایان نامه کارشناسی ارشد*. به راهنمایی سیف اله امینی. شیراز: دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی.

قربانی، مریم؛ کریمیان، نجفعلی و زارعی، مهدی.(۱۳۹۶). تأثیر کود آلی مایع بر رشد و جذب عناصر پرمصرف وکادمیوم توسط اسفناج (*Spinacea oleracea* L.) در یک خاک آلوده به کادمیوم. *نشریه پژوهشهای حفاظت آب و خاک*، ۲۴، ۲۳۵-۲۴۹.

مروتی، ایرج، کردناییج علاالدین، بابایی حمیدرضا. (۱۴۰۰). بررسی شاخص های تحمل به تنش خشکی در سویا .پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی. ۱۳ (۳۷) :۱۰۹-۱۱۸.

یاراحمدی، سعید، نعمت زاده، قربانعلی، صبوری، حسین، و نجفی زرینی، حمید. (۱۳۹۹). ارتباط بین شاخص های تحمل به تنش خشکی و روش استفاده از آنها در برنامه های غربالگری گندم. پژوهشنامه اصلاح گیاهان زراعی، ۱۲(۳۳)، ۲۹-۴۱.

REFERENCES

Adrees, M., Khan, Z. S., Ali, S., Hafeez, M., Khalid, S., Rehman, M. Z., & Rizwan, M. (2020). Simultaneous mitigation of cadmium and drought stress in wheat by soil application of iron nanoparticles. *Chemosphere*, 238, 124681.

Ahmad, I., Akhtar, M. J., Asghar, H. N., & Zahir, Z. A. (2013). Comparative efficacy of growth media in causing cadmium toxicity to wheat at seed germination stage. *International Journal of Agriculture and Biology*, 15:517–522.

Ahmed, H.R., Ahmed, H.H., Hashem, E.D.M. &Ahmed, S. (2013). Soil contamination with heavy metals and its effect on growth, yield and physiological responses of vegetable crop plants (turnip and lettuce). *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *9*(4):145-162.

Al Mamun, S., Chanson, G., Benyas, E., Aktar, M., Lehto, N., McDowell, R., & Robinson, B. (2016). Municipal composts reduce the transfer of Cd from soil to vegetables. *Environmental Pollution*, 213, 8-15.

Alexander, P. D., Alloway, B. J., & Dourado, A. M. (2006). Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables. *Environmental pollution*, 144(3), 736-745.

Alzahrani, Y., Kuşvuran, A., Alharby, H. F., Kuşvuran, S., & Rady, M. M. (2018). The defensive role of silicon in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cadmium. *Ecotoxicology and environmental safety*, *154*, 187-196.

Anuradha, S., & Rao, S. S. R. (2007). The effect of brassinosteroids on radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings growing under cadmium stress. *Plant Soil and Environment*, *53*(11), 465.

Aravind, P. & Prasad, M.N.V. (2004). Zinc protects chloroplasts and associated photochemical functions in cadmium exposed Ceratophyllum demersum L.: a free floating freshwater macrophyte. *Plant Science*,166(5):1321-1327.

Asadi, H., Besharati, H. & Gorji, M. (2022). Challenges and Limitations of Soil and Land Resources in Iran. *Journal of land management* (Soil and Water science), 10:111-135. *(in Persian*)

Assaha, D. V., Ueda, A., & Saneoka, H. (2013). Comparison of growth and mineral accumulation of two solanaceous species, Solanum scabrum Mill.(huckleberry) and S. melongena L.(eggplant), under salinity stress. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(6), 912-920.

Azizian, A. (2005). The effect of effluent cadmium levels on the growth and chemical composition of corn, lettuce and oat (Master's degree, Shiraz University, Shiraz). Retrieved from Theses. (in Persian)

Azizian, A., Amini, S., Maftoun, M., & Nooshadi, M. (2011). Response of lettuce to Cd-enriched water and irrigationfrequencies. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5:884-893.

Bauddh, K., & Singh, R. P. (2011). Differential toxicity of cadmium to mustard (*Brassica juncia* L.) genotypes under higher metal levels. *Journal of Environmental Biology*, 32:355.

Bautista, O. V., Fischer, G., & Cárdenas, J. F. (2013). Cadmium and chromium effects on seed germination and root elongation in lettuce, spinach and Swiss chard. *Agronomía colombiana*, *31*(1), 48-57.

Bhardwaj, P., Chaturvedi, A.K. & Prasad, P. (2009). Effect of Enhanced Lead and Cadmium in soil on Physiological and Biochemical attributes of *Phaseolus vulgaris* L. Nature and Science, 7(8): 63-66.

Bingham, F. T., Page, A. L., Mahler, R. J. & Gaje, T. J. (1975). Growth and cadmium accumulation of plant grown on a soil treated with Cd-enriched sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 4: 207-211.

Blum, A. (2011). Plant water relations, plant stress and plant production. In *Plant breeding for water-limited environments* (pp. 11-52). Springer, New York, NY.

Blum, A., Ramaiah, S., Kanemasu, E. & Paulsen, G. (1990). Recovery of wheat from drought stress at the tillering development stage. *Field Crop Research*, 24: 67-85.

Bouyoucos, C. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*, 54: 446-466.

Bremner, J. M. (1996). Total nitrogen. p. 1085-1122. In Methods of Soil Analysis. edited by D. L. Sparks et al.. Part 3, SSSA, ASA, Madison,WI.

Brodribb, T. J., McAdam, S. A., & Carins Murphy, M. R. (2017). Xylem and stomata, coordinated through time and space. *Plant, Cell & Environment*, *40*(6), 872-880.

Chaney, R.L., Ryan, J.A., Kukier, U., Brown, S.L., Siebielec, G., Malik, M., & Angle, J.S. (2000). Heavy metal aspects of compost use. In:Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems. edited by Stofella, P.J., Kahn, B.A., CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 323–359.

Chapman, H. D. (1965). Cation exchange capacity. In Method of soil analysis edited by Black, C. A. Part 2, Am. Soc. Agron., Madison, WI. p. 891-901.

Chavoushi, M., Najafi, F., Salimi, A., & Angaji, S. A. (2020). Effect of salicylic acid and sodium nitroprusside on growth parameters, photosynthetic pigments and secondary metabolites of safflower under drought stress. *Scientia Horticulturae*, *259*, 108823.

Cheng, H., Wei, M., Wang, S., Wu, B., & Wang, C. (2020). Atmospheric N deposition alleviates the unfavorable effects of drought on wheat growth. *Brazilian Journal of Botany*, *43*(2), 229-238.

Cherif, J., Mediouni, C., Ammar, W. B., & Jemal, F. (2011). Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (Solarium lycopersicum). *Journal of Environmental Sciences*, *23*(5), 837-844.

Crews, H.M., & Davies, B.E., (1985). Heavy metal uptake from contaminated soils by six varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Agriculture Science*, 105: 591-595.

Deheri, G., Brar, M. S., & Malhi, S. S. (2007). Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmiumcontaminated soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170:495-499.

Dharma-wardana, M.W.C. (2018). Fertilizer usage and cadmium in soils, crops and food. *Environmental Geochemistry and Health*, 40: 2739–2759.

Díaz-López, L., Gimeno, I., Simón, V., Martínez, V., Rodríguez-Ortega, W.M. & García-Sánchez, F. (2012). Jatropha curcas seedlings show a water conservation strategy under drought conditions based on decreasing leaf growth and stomatal conductance. *Agricultural Water Management*, 105: 48-56.

Eissa, M. A., & Negim, O. E. (2018). Heavy metals uptake and translocation by lettuce and spinach grown on a metal-contaminated soil. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(4), 1097-1107.

Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. H. M. (2012). Drought stress in plants: an overview. *Plant responses to drought stress*, 1-33.

Gartler, J., Robinson, B., Burton, K., & Clucas, L. (2013). Carbonaceous soil amendments to biofortify crop plants with zinc. *Science of the Total Environment*, 465: 308-313.

Geng, Y., Wang, Z., Liang, C., Fang, J., Baumann, F., Kühn, P. & He, J. S. (2012). Effect of geographical range size on plant functional traits and the relationships between plant, soil and climate in Chinese grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, *21*(4), 416-427.

Ghorbani, M., Karimian, N. A. & Zarei, M. (2017). Influence of liquid organic fertilizer on growth, cadmium and macronutrients uptake of Spinach (Spinacea oleracea L.) in a cadmium polluted soil. *Journal of water and soil conservation*, 24(3), 235-249. *(in Persian*)

Ginzburg, D. N., & Klein, J. D. (2020). LED pre-exposure shines a new light on drought tolerance complexity in lettuce (Lactuca sativa) and rocket (Eruca sativa). *Environmental and Experimental Botany*, *180*, 104240.

Grant, C.A. (2018). Influence of phosphate fertilizer on cadmium in agricultural soils and crops. Phosphate in Soils. CRC Press, pp. 140–165.

Grant, C.A., Clarke, J.M., Duguid, S., and Chaney, R.L. (2008). Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of the Total Environment*, 390, 301-310.

Gubrelay, U., Agnihotri, R. K., Singh, G., Kaur, R. and Sharma, R. (2013) Effect of heavy metal Cd on some physiological and biochemical parameters of Barley (Hordeum vulgare L.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5: 2743-2751.

Hasan, S. A., Fariduddin, Q., Ali, B., Hayat, S., & Ahmad, A. (2009). Cadmium: toxicity and tolerance in plants. *J Environ Biol*, *30*(2), 165-174.

Hassan, M. U., Aamer, M., Chattha, M. U., Ullah, M. A., Sulaman, S., Nawaz, M., & Guoqin, H. (2017). The role of potassium in plants under drought stress: Mini review. *Journal of Basic and Applied Sciences*, *13*, 268-271.

Hua, L., Wang, H., Sui, H., Wardlow, B., Hayes, M. J., & Wang, J. (2019). Mapping the spatial-temporal dynamics of vegetation response lag to drought in a semi-arid region. *Remote Sensing*, *11*(16), 1873.

Huang, S., Sun, L., Hu, X., Wang, Y., Zhang, Y., Nevo, E. & Sun, D. (2018). Associations of canopy leaf traits with SNP markers in durum wheat (Triticum turgidum L. durum (Desf.)). *PloS one*, *13*(10), e0206226.

Huang, Y., He, C., Shen, C., Guo, J., Mubeen, S., Yuan, J., & Yang, Z. (2017). Toxicity of cadmium and its health risks from leafy vegetable consumption. *Food and Function*, 8:1373–1401.

Iqbal, N., Masood, A., Nazar, R., Syeed, S., & Khan, N. A. (2010). Photosynthesis, growth and antioxidant metabolism in mustard (Brassica juncea L.) cultivars differing in cadmium tolerance. *Agricultural sciences in China*, *9*(4), 519-527.

Jabeen, M., Akram, N. A. and Aziz, M. A. A. (2019). Assessment of Biochemical Changes in Spinach (Spinacea oleracea L.) Subjected to Varying Water Regimes. *Sains Malaysiana*, 48(3), 533-541.

Javid, M. G., Sorooshzadeh, A., Moradi, F., Modarres Sanavy, S. A. M. & Allahdadi, I. (2011). The role of phytohormones in alleviating salt stress in crop plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5:726-734.

Kabata-Pendias, A., and Mukherjee, A.B. (2007). Trace Elements from Soil to Human. Springer Verlag. 255 pp.

Khan, D. H., and Frankland, B. (1983). Effect of cadmium and lead on radish plant with particular reference to movement of metals through soil profile and plant. *Plant Soil*, 70: 335-345.

Khan, S., & Khan, N. N. (1983). Influence of lead and cadmium on growth and nutrient concentration of tomato and egg-plant. *Plant Soil* 74: 387-394.

Lamb, D. T., Ming, H., Megharaj, M., & Naidu, R. (2010). Relative tolerance of a range of Australian native plant species and lettuce to copper, zinc, cadmium, and lead. *Archives of environmental contamination and toxicology*, *59*(3), 424-432.

Latif, J., Akhtar, J., Ahmad, I., Mahmood-ur-Rehman, M., Shah, G.M., Zaman, Q., Javaid, T., Farooqi, Z.U.R., Shakar, M., Saleem, A. & Rizwan, M. (2020). Unraveling the effects of cadmium on growth, physiology and associated health risks of leafy vegetables. *Brazilian Journal of Botany*, 43(4):799-811.

Lee, P.-K., B.-Y. Choi & M.-J. Kang. (2015). Assessment of mobility and bio-availability of heavy metals in dry depositions of Asian dust and implications for environmental risk. *Chemosphere*, 119: 1411-1421.

Lindsay, W. L. & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 421-428.

Linger, P., Ostwald, A., & Haensler, J. (2005). Cannabis sativa L. growing on heavy metal contaminated soil: growth, cadmium uptake and photosynthesis. *Biologia plantarum*, *49*(4), 567-576.

Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. p. 437-474. In Method of Soil Analysis, edited by D. L. Sparks et al. Part III. 3rd Ed. Am. Soc. Agron., Madison,WI.

Ma, J., ur Rehman, M.Z., Saleem, M.H., Adrees, M, Rizwan, M., Javed, A., Rafique, M., Qayyum, M.F., & Ali, S. (2022). Effect of phosphorus sources on growth and cadmium accumulation in wheat under different soil moisture levels. *Environmental Pollution*, 17:119977.

Mahler, R. J, Bingham, F. T., & Page, A. L. (1978). Cadmium-Enriched sewage sludge application to acid and calcareous soils: Effect of yield and cadmium uptake by lettuce and chard. *Journal of Environmental Quality*,7(2): 247-281.

Marquez Garsia, B., Marquez, C., Sanjose, I., & Nieva, F.J.J., Rodriguez Rubio, P. and Munoz-Rodriguez, A.F. 2013. The effects of heavy metals on germination and seedling characteristics in two halophyte species in Mediterranean marshes. *Marine Pollution Bulletin*, 70: 119-124.

McLaughlin, M., Williams, C., McKay, A., Kirkham, R., Gunton, J., Jackson, K., Thompson, R., Dowling, B., Partington, D., Smart, M., & Tiller, K., (1994). Effect of cultivar on uptake of cadmium by potato tubers. *Australian Journal of Agricultural Research*, 45: 1483-1495.

Meng, F.Q., Cao, R., Yang, D.M., Niklas, K.J., Sun, S.C., 2014. Trade-offs between light interception and leaf water shedding: a comparison of shade- and sun-adapted species in a subtropical rainforest. *Oecologia*, 174, 13–22.

Mensah, E., Allen, H. E., Shoji, R., Odai, S. N., & Keyi-Baffour, N. (2008). Cadmium and lead concentrations effects on yields of some vegetables due to uptake from irrigation water in Ghana. *Journal of Agricultural Reaserch*, 3(4): 243-251.

Morovati, I., kordenaeej, A., Babaei, H, R. Evaluation of Drought Tolerance Indices in Soybeans. jcb 2021; 13 (37) :109-118.

Motesharezadeh, B., Kamal-Poor, S., Alikhani, H.A., Zarei, M., & Azimi, S., 2017. Investigating the effects of plant growth promoting bacteria and Glomus Mosseae oncadmium phytoremediation by *Eucalyptus camaldulensis* L. *Pollution*, 3: 575–588.

Muradoglu, F., Gundogdu, M., & Ercisli, S. (2015). Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b content, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry. *Biological research*, 48, 11.

Muradoglu, F., Gundogdu, M., Ercisli, S., Encu, T., Balta, F., Jaafar, H. and Haq, M. (2015) Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b content, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry. *Biological Research*, 48: 11.

Muscolo, A., Junker, A Klukas, C. Weigelt-Fischer, K. Riewe, D. & Altmann, T. (2015). Phenotypic and metabolic responses to drought and salinity of four contrasting lentil accessions. *Journal of Experimental Botany*, 66: 5467-5480.

Naik, S.K., Pandit, T.K., Patra, P.K. & Das, D.K. (2013). Effects of graded levels of cadmium on spinach and cabbage grown in an inceptisol. *Communications in soil science and plant analysis*, 44(10), pp.1629-

1642.
Nelson, D. W., and Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. p. 961-1010. In Methods of Soil Analysis. Edited by D. L. Sparks et al. Part 3, SSSA, ASA, Madison, WI.
Noor, I., Sohail, H., Hasanuzzaman, M., Hussain, S., Li, G., & Liu, J., (2022). Phosphorus confers tolerance against manganese toxicity in Prunus persica by reducing oxidative stress and improving chloroplast ultrastructure. *Chemosphere*, 291: 1–11.
Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Circ. 939. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
Pospisilova, J. (2003). Participation of phytohormones in the stomatal regulation of gas exchange during water stress. *Biologia plantarum*, 46(4): 491-506.
Razi, K., & Muneer, S. (2021). Drought stress-induced physiological mechanisms, signaling pathways and molecular response of chloroplasts in common vegetable crops. *Critical reviews in biotechnology*, *41*(5), 669-691.
Rezakhani, L., Golchin, A., & Samavat, S. (2013). Effect of different rates of Cd on growth and chemical composition of spinach. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 7: 1136-1140.
Rhoades, J. D. (1996). Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In Method of Soil Analysis edited by D. L. Sparks et al. Part 3, SSSA, Madison,WI.
Saadatmand, A. R., Banihashemi, Z., Maftoun, M., & Sepaskhah, A. R. (2007). Interactive effect of soil salinity and water stress on growth and chemical compositions of pistachio nut tree. *Journal of Plant Nutrition*, *30*(12), 2037-2050.
Sahin, U., Ekinci, M., Ors, S., Turan, M., Yildiz, S. &Yildirim, E. (2018). Effects of individual and combined effects of salinity and drought on physiological, nutritional and biochemical properties of cabbage (Brassica oleracea var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 240: 196-204.
Sepaskhah, A. R., & Maftoun, M. (1981). Growth and chemical composition of pistachio cultivars as influenced by irrigation regimes and salinity levels of irrigation water. I.Growth. *Journal of Horticultural Sciences*, 56: 277-284.
Sharma, P., Jha, A.B., Dubey, R.S. & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidant defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, 2012.
Sharp, R. E. (2002). Interaction with ethylene: changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. *Plant, cell & environment*, *25*(2), 211-222.
Shi, H. P., Zhu, Y. F., Wang, Y. L., & Tsang, P. K. E. (2014). Effect of cadmium on cytogenetic toxicity in hairy roots of Wedelia trilobata L. and their alleviation by exogenous CaCl2. *Environmental Science and Pollution Research*, *21*(2): 1436-1443.
Singh, A., Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. M. (2010). Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India. *Food* and *Chemical Toxicology*, 48:611–619.
Summer, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. In Methods of Soil Analysis edited by D. L. Sparks et al. Part 3, SSSA, ASA, Madison, WI.
Talatam, S., & Parida, B. (2009). Crop growth as influenced by Zinc and organic matter in Cadmium-rich polluted soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India - Section B: Biological Sciences*, 21:321-335.
Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. p. 475-490. In Methods of Soil Analysis, edit by D. L. Sparks et al. Part 3, SSSA, ASA, Madison, WI.
Torabian, A., & Mahjori, M. (2002). Heavy metals uptaqke by vegetable crops irrigated with wastewater in South Thehran. *Water and soil science*, 16:189-195.
Tran, T. A., & Popova, L. P. (2013). Functions and toxicity of cadmium in plants: recent advances and future prospects. *Turkish Journal of Botany*, 37:1–13.
Ünyayar, S., Keleş, Y., & Çekiç, F. Ö. (2005). The antioxidative response of two tomato species with different drought tolerances as a result of drought and cadmium stress combinations. *Plant, Soil and Environment*, 50: 57-64.
Vassilev, A., & Yordanov, I. (1997). Reduction analysis of factors limiting growth of cadmium-treated plants:A review. *Journal* of *Plant Physiology*, 23 (3-4): 114-133.
Walkley, A., & Black, T. A. (1934). An examination of the deligaref method for determination organic matter and a propose modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
Wang, S., Wei, M., Cheng, H., Wu, B., Du, D., & Wang, C. (2020). Indigenous plant species and invasive alien species tend to diverge functionally under heavy metal pollution and drought stress. *Ecotoxicology*

and Environmental Safety, *205*: 111160.

Xia, S., Wang, X., Su, G., & Shi, G. (2015). Effects of drought on cadmium accumulation in peanuts grown in a contaminated calcareous soil. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*(23), 18707-18717.

Xiong, X., Chang, L., Khalid, M., Zhang, J., & Huang, D. (2018). Alleviation of drought stress by nitrogen application in Brassica campestris ssp. Chinensis L. *Agronomy*, *8*(5), 66.

Xu, N., Guo, W., Liu, J., Du, N., & Wang, R. (2015). Increased nitrogen deposition alleviated the adverse effects of drought stress on Quercus variabilis and Quercus mongolica seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, *37*(6), 1-11.

Yarahmadi, S., Nematzade, Gh., Sabouri, H., & Najafi, H. (2020). Relationships between drought stress tolerance indices and their use in wheat screening programs. *Journal of Crop Breeding*, 12(33), 29-41.

Yates, M. J., Anthony Verboom, G., Rebelo, A. G., & Cramer, M. D. (2010). Ecophysiological significance of leaf size variation in Proteaceae from the Cape Floristic Region. *Functional Ecology*, *24*(3), 485-492.

Yu, S., Sheng, L., Mao, H., Huang, X., Luo, L., & Li, Y. (2020). Physiological response of Conyza Canadensis to cadmium stress monitored by Fourier transform infrared spectroscopy and cadmium accumulation. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 229: 118007.

Zhang, X., Zhang, S., Xu, X., Li, T., Gong, G., Jia, Y., Li, Y., & Deng, L. (2010). Tolerance and accumulation characteristics of cadmium in Amaranthus hybridus L. *Journal of Hazardous Materials*, 180:303–308.

Zhao, Y., Wang, Z., Sun, W., Huang, B., Shi, X., & Ji, J. (2010). Spatial interrelations and multi-scale sources of soil heavy metal variability in a typical urban–rural transition area in Yangtze River Delta region of China. *Geoderma*,156(3):216-27.

Zhou, R., Yu, X., Ottosen, C. O., Rosenqvist, E., Zhao, L., Wang, Y., & Wu, Z. (2017). Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. *BMC plant biology*, *17*(1), 1-13.

Zhou, W. B., & Qiu, B. S. (2005). Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of Sedum alfredii Hance (Crassulaceae). *Plant Science*, 169: 737-745.

Zhuang, J., Wang, Y., Chi, Y., Zhou, L., Chen, J., Zhou, W., ,Song, J., Zhao, N., & Ding, J. (2020). Drought stress strengthens the link between chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic traits. *PeerJ*, 8:124-144.

Zlatev, Z., & Lidon, F. C. (2012). An overview on drought induced changes in plant growth, water relationsand photosynthesis. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 57-72.

Zou, J., Shang, X., Li, C., Ouyang, J., Li, B., & Liu, X. (2018). Effects of cadmium on mineral metabolism and antioxidant enzyme activities in Salix matsudana Koidz. *Polish Journal of Environmental Studies*, *28*(2): 989-999.

Effect of moisture regime on cadmium toxicity in spinach and lettuce

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Heavy metals are added to water and soil along with waste from factories and impose their toxic effects on plants, animals and soil microorganisms. The concentration of heavy metals in natural conditions is relatively low, but due to the addition of industrial waste and pollutants to the environment, it increases significantly. A large part of Iran's agricultural land is located in arid and semi-arid areas. In most dry areas, agriculture is more or less faced with the problem of moisture stress. Undoubtedly, drought is the most important environmental factor affecting growth in semi-arid regions of the world. Considering the lack of water in Iran, investigating the effect of moisture regime on the growth and concentration of cadmium in plants is of particular importance. In this regard, a research was conducted to investigate the effect of cadmium in different humidity conditions on agricultural products, especially leafy vegetables such as lettuce and spinach.

Material and Methods

A greenhouse factorial experiment in the form of a randomized complete block design with three three irrigation intervals (2, 4 and 7 days) and six levels of cadmium (0, 5, 10, 20, 40 and 80 µg g^{-1}soil) in three replicates on the variety Local spinach (*Spinosa oleracea*) and lettuce (*Lactuca sativa*) were done. 15 seeds were planted in each pot and the first irrigation was done up to the field capacity and the pots were weighed daily and the humidity was maintained up to the field capacity. For each humidity treatment, the difference in the weight of the pot at the beginning and end of each period was considered as the actual evaporation-transpiration of the pot, and the volume of irrigation water in the desired treatment was calculated for applying the next round. The amount of transpiration was estimated from the difference between evaporation and transpiration. After the end of the growth period (after ten weeks), the leaves and stems were dried in the oven until reaching a constant weight. The concentration of cadmium in the stem and leaves was measured with an atomic absorption device.

Results and Discussion

The results showed that with the increase of cadmium level, the average dry weight of leaves and stems of both studied plants decreased significantly. The average index of sensitivity to moisture stress in lettuce leaves increased significantly with the increase of moisture stress, but in the stem, sensitivity to moisture stress decreased with the increase of moisture stress, but this decrease was not significant. The average of this index increased with the increase of cadmium concentration. So that at each moisture stress level, with the increase of cadmium concentration in the soil, the sensitivity to moisture stress in leaves and stems increased. But the sensitivity to stress was higher in the leaf than in the stem. Increasing irrigation intervals decreased the effect of increasing the cadmium level on the concentration and uptake of cadmium in the plant. With the increase of cadmium level, the rate of evapotranspiration and transpiration decreased significantly. The percentage of reduction of transpiration in 4 and 7 days compared to 2 days in spinach is 41 and 51, respectively, and the percentage of reduction in evaporation and transpiration of spinach in these two irrigation cycles was 33 and 53, respectively.

Conclusion

With the increase irrigation intervals, the concentration and uptake of cadmium in leaves and stems of spinach and lettuce decreased. Considering the positive effect of water on the uptake of cadmium by vegetables, it is recommended to increase the irrigation intervals if these plants are cultivated for nutrition in contaminated soils. In soils with high cadmium contamination, the cultivation of leafy vegetables such as lettuce and spinach is prohibited due to the high uptake power of these plants.

Keywords: Spinach, Drought stress, Leaf surface, Cadmium, Lettuce.