Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Soil Management and Sustainable Production

Print ISSN: 2322-1267
Online ISSN: 2322-1275

Investigation of the Translocation and Biological Accumulation Factor of Cadmium in Different Cultivars of Bread and Durum Wheat in a Contaminated Calcareous Soil

Narges Abedinzadeh[1], Amir Fotovat[*2], Basir Atarodi[3]

1. M.Sc. Student, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: abedinzadeh.narges@mail.um.ac.ir
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: afotovat@um.ac.ir
3. Member of Scientific Board, Soil and Water Research Division, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Mashhad, Iran. E-mail: basir.atarodi@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 08.17.2022
Revised: 04.16.2023
Accepted: 04.18.2023

Keywords:
Bread wheat,
Cadmium,
Durum wheat,
Soil pollution

ABSTRACT

Background and Objectives: With the progressive increase in industrial and agricultural activities leading to an increase in pollutants, the soil has received attention as an environmental component and recipient of many of these contaminants. Due to the direct relationship between soil, plants, and humans, pollution in one area may strongly have a negative impact on another. Heavy metals are considered one type of soil pollutant that can enter the food chain in several ways. Cadmium (Cd) is a heavy metal that has particular importance among others because it is easily absorbed by plants and causes toxicity. Its detrimental effects on the plant are higher than the other heavy metals. It is crucial to study the uptake and transfer of Cd in the cultivars of wheat which accumulate less amount of Cd. This study aimed to compare the susceptibility of different bread (*Triticum aestivum*) and durum (*Triticum turgidum* L. *var. durum)* wheat cultivars to absorb Cd in Cd-spiked soil.

Materials and Methods: This study was conducted to investigate the effect of different levels of soil Cd (0 and 10 mg kg^{-1}) on its concentration in the roots and shoots of four cultivars (Sirvan, Rakhshan, Talaei, and Parsi) of spring bread wheat and five cultivars (Behrang, Hana, Aran, Shabrang, and Sana) of spring durum wheat. The experiment was set up in a completely randomized factorial design with three replications as a pot experiment in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad. After harvesting, to determine the soil total concentration of Cd used *Aqua Regia* method (36). The amount of cadmium in plant organs was also measured by the wet digestion method (nitric acid and hydrogen peroxide) (37). The translocation and biological accumulation factors were calculated for cultivars of both species.

Results: Based on the results, the application of different levels of soil Cd had a statistically significant increasing effect on the concentration of this element in roots and shoots of the study wheat cultivars ($P<0.01$). The Cd concentration in root was estimated more than shoot Cd levels in both wheat species. Among bread wheat cultivars, the highest and lowest shoot Cd content was observed in Sirvan and Rakhshan, respectively. On the other hand, in Rakhshan and Talaei, the most and lowest root Cd content, respectively. According to the Cd levels in aerial organs, translocation, and

biological accumulation factor, Sirvan had a high ability to accumulate cadmium and Rakhshan was more efficient in absorbing cadmium than other cultivars and stored and transported the least amount of this element. Furthermore, according to the information obtained, among durum wheat cultivars, Sana tended to have the lowest Cd concentration of shoot and Behrang tended to have the highest content. In contrast, the highest and lowest amount of Cd in the root was related to Sana and Hana, respectively. According to translocation and biological accumulation factors, Sana had less ability to accumulate Cd rather than durum cultivars and Behrang had the highest amount of translocation factors and absorption of this element. Parsi from bread species and Shabrang from durum species had the highest dry weight of shoot in both Cd_0 (Control sample) and Cd_{10} (10 mg kg^{-1}) treatments. In general, bread wheat accumulated a higher amount of Cd in root and shoot than durum wheat.

Conclusion: In general, the concentration of Cd in the shoots and roots of both bread and durum wheat species, as well as different their cultivars, was influenced by Cd-spiked soil. Transfer of cadmium from soil and root to aerial organs was an effective factor in the accumulation of this element in plants. According to the results, each wheat cultivar had different abilities to absorb and translocate Cd. Moreover, for the identification of permissible exposure limits of Cd in soil and wheat, some standards should be considered.

Cite this article: Abedinzadeh, Narges, Fotovat, Amir, Atarodi, Basir. 2023. Investigation of the Translocation and Biological Accumulation Factor of Cadmium in Different Cultivars of Bread and Durum Wheat in a Contaminated Calcareous Soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 13 (2), 1-26.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20521.2069
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

شاپا چاپی: ۱۲۶۷-۲۳۲۲

شاپا آنلاین: ۱۲۷۵-۲۳۲۲

بررسی فاکتور انتقال و تجمع زیستی کادمیم در ارقام مختلف گندم نان و دوروم در یک خاک آهکی آلوده

نرگس عابدین‌زاده[۱]، امیر فتوت[*۲]، بصیر عطاردی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: abedinzadeh.narges@mail.um.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: afotovat@um.ac.ir

۳. عضو هیأت علمی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی خراسان رضوی، مشهد، ایران. رایانامه: basir.atarodi@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۹

واژه‌های کلیدی:
آلودگی خاک،
کادمیم،
گندم دوروم،
گندم نان

چکیده

سابقه و هدف: امروزه با افزایش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و در نتیجه آن افزایش آلاینده‌ها، خاک به عنوان یکی از اجزای مهم محیط زیست و دریافت‌کننده بسیاری از این تولیدات مورد توجه قرارگرفته است. با وجود ارتباط مستقیم میان خاک، گیاه و انسان، آلودگی در هر یک از این اجزا می‌تواند اثر متقابلی در محیط دیگر داشته باشد. نوعی از آلودگی در خاک، آلودگی فلزات سنگین است که از راه‌های مختلف، وارد چرخه غذایی انسان می‌شود. کادمیم فلزی است که در میان عناصر سنگین دارای اهمیت ویژه‌ای است، زیرا این فلز توسط گیاهان به آسانی جذب و باعث سمیت می‌شود و تأثیر منفی آن برای گیاه، بیش‌تر از سایر فلزات سنگین می‌باشد. در همین راستا بررسی جذب و انتقال کادمیم در ارقام مختلف گندم، به‌منظور معرفی ارقامی که قابلیت جذب کم‌تری از این عنصر را دارند، ضروری به نظر می‌رسد. از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف مقایسه توانایی جذب کادمیم در چندین رقم مختلف گندم نان و دوروم تحت‌تأثیر کادمیم خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به منظور مطالعه تأثیر سطوح کادمیم خاک (صفر و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بر غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی چهار رقم گندم نان بهاره (*Triticum aestivum*) (سیروان، رخشان، طلایی و پارسی) و پنج رقم گندم دوروم بهاره (*Triticum turgidum* L. *var. durum*) (بهرنگ، هانا، آران، شبرنگ و ثنا)، به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. غلظت کادمیم کل در خاک با روش تیزاب سلطانی (۳۶) و غلظت کادمیم در اندام گیاهی با روش هضم تر (نیتریک اسید و آب اکسیژنه) اندازه‌گیری شد (۳۷). هم‌چنین، فاکتور انتقال و تجمع زیستی برای ارقام هر دو گونه محاسبه شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج، اثر آلودگی خاک بر غلظت کادمیم ریشه و اندام هوایی ارقام نان و ارقام دوروم از لحاظ آماری معنی‌دار بود (P<۰/۰۱). غلظت کادمیم ریشه در تمام ارقام از غلظت کادمیم اندام هوایی بیش‌تر به دست آمد. در گندم نان، بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت کادمیم اندام هوایی به ترتیب در ارقام سیروان و رخشان مشاهده شد. هم‌چنین بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت کادمیم ریشه در ارقام رخشان و طلایی به ترتیب محاسبه گردید. با توجه به غلظت کادمیم اندام هوایی و فاکتور انتقال و تجمع زیستی، رقم سیروان در میان ارقام نان توانایی زیادی در انباشت کادمیم داشت و رقم رخشان کم‌ترین غلظت این عنصر را در خود ذخیره و منتقل نمود. در گندم دوروم، با توجه به اطلاعات به‌دست آمده، رقم ثنا دارای کم‌ترین غلظت کادمیم اندام هوایی و رقم بهرنگ دارای بیش‌ترین غلظت کادمیم اندام هوایی بودند. بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت کادمیم ریشه به ترتیب در ارقام ثنا و هانا مشاهده شد. باتوجه به نتایج فاکتور انتقال و تجمع زیستی محاسبه شده، رقم ثنا توانایی کمی در جذب و انتقال کادمیم داشت و رقم بهرنگ بیش‌ترین میزان جذب و فاکتورهای انتقال این عنصر را به خود اختصاص داد. در میان تمام ارقام، پارسی در هر دو سطح کادمیم دارای بیش‌ترین زیست‌توده اندام هوایی بود. بر اساس نتایج میانگین کل غلظت کادمیم در دو بخش ریشه و اندام هوایی، ارقام نان نسبت به ارقام دوروم، مقدار بیش‌تری از این عنصر را در اندام هوایی و ریشه خود انباشت نمودند.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی غلظت کادمیم اندام گیاهی و ریشه ارقام نان و دوروم تحت‌تأثیر کادمیم خاک قرار گرفت. انتقال کادمیم از خاک به اندام هوایی و از ریشه به اندام هوایی عامل مؤثری در انباشت این عنصر در گیاه بود. با توجه به نتایج، هر رقم گندم، رفتار متفاوتی در جذب و انتقال کادمیم از خود نشان داد. بنابراین برای تعیین حدود مجاز آلودگی خاک و گیاه، باید با توجه به رقم گندم و خصوصیات خاک، استانداردهایی تعریف شود.

استناد: عابدین‌زاده، نرگس، فتوت، امیر، عطاردی، بصیر (۱۴۰۲). بررسی فاکتور انتقال و تجمع زیستی کادمیم در ارقام مختلف گندم نان و دوروم در یک خاک آهکی آلوده. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۳ (۲)، ۲۶-۱.
DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20521.2069

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

در سراسر جهان، آلودگی خاک‌های کشاورزی به فلزات سنگین تبدیل به یک نگرانی همگانی در زمینه امنیت و سلامت محصولات غذایی شده است. در بین این عناصر، کادمیم در محیط خاک با غلظت بسیار پایین‌تر از میزانی که برای گیاهان و میکروارگانیسم‌ها علائم ظاهری ایجاد کند، در ارتباط با سلامت انسان، به عنوان عنصری غیرضروری و سمی محسوب می‌گردد (۱). تحرک کادمیم در خاک بالا می‌باشد که این موضوع نیز به عوامل زیادی مانند خصوصیات خاک (از جمله: pH، شوری، میزان مواد آلی، درصد آهک و...) بستگی دارد. تحرک زیاد این عنصر در خاک باعث می‌شود به راحتی جذب گیاه شود. بنابراین یکی از دلایل اهمیت بررسی کادمیم در گیاهان و خطر اکولوژیکی آن، دسترسی و جذب آسان این عنصر توسط گیاه است (۲). با توجه به این‌که یکی از منابع اصلی ورود کادمیم به بدن انسان زنجیره غذایی می‌باشد (۳ و ٤)، انجام مطالعاتی در ارتباط با میزان تجمع و توزیع این فلز، به‌عنوان آلاینده شیمیایی در خاک و گیاه، در حفظ سلامت جامعه بشری اهمیت زیادی خواهد داشت (۵).

امروزه کاربرد سموم و کودهای شیمیایی که حاوی کادمیم می‌باشند، با توجه به رشد سریع جمعیت و تولید محصولات زراعی، نسبت به گذشته افزایش یافته است. مصرف کودهای فسفاته و لجن فاضلاب در مزارع (به دلیل تمایل کشاورزان برای بالا بردن سطح تولیدات کشاورزی)، از منابع اصلی ورود و انباشت کادمیم در خاک و در نتیجه گیاه کاشت شده به شمار می‌رود (٦). بنابراین به‌منظور بالا بردن بازده بیش‌تر تولید محصول و در عین‌حال حفظ محیط زیست، منابع موجود و سلامت مصرف‌کنندگان، می‌بایست هم‌راستا با محدود کردن مناطق تولید و کاربرد نهاده‌های کشاورزی، تمرکز اصلی بر روی انتخاب ارقام سازگارتر در شرایط آلودگی احتمالی بستر کاشت باشد.

گندم یکی از محصولاتی است که پس از ذرت، بیش‌ترین غله تولید شده در جهان و نیاز عمده غذایی اکثر مناطق دنیا را تشکیل می‌دهد، به‌طوری‌که در سال ۲۰۲۱ تولید جهانی گندم ۷۷٦/۵ میلیون تن تخمین زده شده است (۷). بنابراین جذب و تجمع کادمیم در محصول پرمصرفی مانند گندم و انتقال آن به زنجیره غذایی را می‌توان موضوع مهم زیست محیطی به شمار آورد. مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است، به عنوان مثال لیو و همکارن (۲۰۰۹) گزارش کردند که در گیاهانی که به تنش کادمیم مقاوم هستند، انتقال این عنصر از ریشه به اندام هوایی آن‌ها، کم‌تر از گیاهان حساس به تنش است (۸). این نتیجه نشان می‌دهد که جذب و تجمع کم کادمیم در بعضی از ارقام گندم، ممکن است مکانیسمی به منظور تحمل تنش این عنصر توسط گیاه باشد. به این ترتیب شناخت و مدیریت این واکنش‌ها در گندم، با توجه به تأثیر کادمیم بر برخی از شاخص‌های رشدی این گیاه (۹)، به رشد و کیفیت دانه آن نیز کمک خواهد کرد (۸). خیرآبادی و همکاران (۲۰۱٦) در مطالعه‌ای که بر روی محصولات عمده (گندم، سیب‌زمینی و ذرت) استان همدان انجام دادند، به بررسی غلظت فلزات سنگین و تعیین شاخص خطر در مصرف این گیاهان پرداختند. نتایج نشان داد که مهم‌ترین راه ورود فلزات سنگین به بدن انسان در استان همدان از طریق مصرف گندم می‌باشد (۱۰). هم‌چنین هاشمی‌نسب و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی از مزارع گندم سراسر کشور، تعداد ٤۱۹ نمونه گیاهی برداشت کردند و میزان غلظت کادمیم، سرب و روی آن‌ها را مورد آنالیز قرار دادند. بر اساس نتایج، مقدار میانگین کادمیم موجود در ۸/۵۹ درصد از نمونه‌های گندم کشور بالاتر از حد غلظت مجاز استاندارد ایران (۰/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (۱۱) بود (۱۲).

غلظت عناصر موجود در ماده خشک گیاهان نشان‌دهنده میزان عناصر خاک و بستری است که در

آن رشد کرده‌اند. بنابراین انباشت فلزات سنگین در گیاه زمانی اهمیت پیدا می‌کند که مقدار زیادی از این عناصر از خاک توسط گیاه جذب شود. به منظور ارزیابی توانایی هر گیاه در جذب عناصر از خاک و انتقال آن‌ها در میان اندام‌های مختلف از نسبت غلظت عناصر در قسمت‌های گیاه به غلظت مربوطه در خاک و یا نسبت غلظت عناصر در دو قسمت مجزای گیاه استفاده می‌گردد. قابل به ذکر است بسیاری از مطالعات گذشته با کاربرد انواع این نسبت‌ها تحت عناوینی مانند فاکتور انتقال و یا شاخص‌های ارزیابی آلودگی اقدام به مقایسه گیاهان مختلف نموده‌اند (۱۳). به عنوان مثال هارت و همکاران (۲۰۰۶) تفاوت میان غلظت کادمیم اندام هوایی ارقام گندم را که میزان یکسانی از این عنصر را توسط ریشه جذب نمودند، عامل انتقال این عنصر از ریشه به اندام هوایی[1] بیان کردند (۱۴). بیکر و بروکس (۱۹۸۹) در مطالعه‌ای به معرفی گونه‌های انباشتگر پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها، توانایی گیاه در جذب و انتقال عنصر از خاک به اندام هوایی توسط فاکتور تجمع زیستی[2] مقایسه می‌شود (۱۵). با توجه به این‌که مقدار این فاکتور از نسبت غلظت عنصر در گیاه به غلظت آن در خاک به‌دست می‌آید، یکسان بودن آن برای بعضی از گونه‌های گیاهی در محیط‌های کشت مختلف، نشان‌دهنده توانایی یکسان آن‌ها در جذب عنصر نیست. ولی در یک خاک با آلودگی مشخص، این شاخص می‌تواند معیار مناسبی برای مقایسه قابلیت هر گیاه باشد (۱۶). فاکتور تجمع زیستی در میان ارقام گیاهی و عناصر مختلف، متفاوت می‌باشد. نتایج مطالعات گذشته نشان داده است که بیش‌ترین فاکتور تجمع زیستی در گیاهانی که بیش‌ترین مقدار عنصر را جذب کرده‌اند محاسبه شده است (۱۷ و ۱۸). کای و سانگ (۲۰۱۹) به منظور ارزیابی خطر آلودگی فلزات سنگین در منطقه‌ای، به آنالیز نمونه خاک و گیاه ذرت و گندم پرداختند. بر اساس نتایج، غلظت کادمیم خاک بالاتر از حد مجاز به‌دست آمد و فاکتور تجمع زیستی کادمیم در گیاه گندم از ذرت بیش‌تر محاسبه شد (۱۹). مطالعات دیگر نیز به بیش‌تر بودن فاکتور تجمع زیستی گندم در میان غلات و کادمیم در میان فلزات سنگین، اشاره کرده‌اند (۲۰ و ۲۱). بنابراین بسته به هدف عملیات کاشت، محاسبه فاکتور تجمع زیستی دارای اهمیت می‌باشد.

قابل به ذکر است کلمه انباشتگر[3] به گیاهانی اطلاق می‌گردد که در روش‌های پاکسازی آلودگی خاک، کاربرد دارند و طبق تعریف قادر به انباشت ≤۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فلز سنگین در خود می‌باشند (۱۵). اما در برخی از مطالعات به‌منظور بررسی سلامت محصول مصرفی از دو عبارت کم و بیش‌انباشت[4] استفاده می‌گردد. در این زمینه گیاهان مورد مطالعه نسبت به یک گیاه شاخص و یا استاندارد، که از نظر جذب فلز، کم و یا بیش‌انباشتگر بودن آن‌ها تعریف شده است، مقایسه می‌شوند (۲۲).

توزیع کادمیم نه تنها در میان گونه‌های گیاهی، بلکه در یک گونه بین ارقام و در یک رقم، میان اندام‌های مختلف، متفاوت است (۲۳). شیوه‌های مدیریت می‌تواند تحمل گندم نسبت به تنش کادمیم را افزایش و انتقال این عنصر به زنجیره مواد غذایی را کاهش دهد (۳). یکی از راه‌های کنترل تجمع کادمیم در محصولات گیاهی، اصلاح‌نژاد است. مقایسه و انتخاب ارقام کم‌انباشتگر، روش مناسبی برای رسیدن به این هدف می‌باشد (۲۴).

با توجه به مصرف زیاد گندم و تأثیر آن بر سلامت و بهداشت جامعه و احتمال آلودگی بعضی از مناطق سطح زیر کشت این محصول به فلزات سنگین از جمله کادمیم، انجام مطالعاتی به منظور مقایسه میزان جذب این عنصر توسط ارقام مختلف گندم در خاک آلوده به کادمیم، ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهش

1- Translocation Factor
2- Biological Accumulation Factor
3- Hyperaccumulator
4- Low and High accumulator of Cd

حاضر، تأثیر کادمیم خاک بر میزان انتقال و جذب کادمیم در ریشه و اندام هوایی چهار رقم گندم نان بهاره (*Triticum aestivum*) (سیروان، رخشان، طلایی و پارسی) و پنج رقم گندم دوروم بهاره (*Triticum turgidum* L. *var. durum*) (بهرنگ، هانا، آران، شبرنگ و ثنا) که در در حال حاضر در استان خراسان بطور عمده کشت می‌شوند، بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک: به منظور اجرای پژوهش حاضر، خاک مورد مطالعه در مهر ماه سال ۱۳۹۹ از مزرعه مرکز تحقیقات آب و خاک مشهد از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد (میزان کادمیم خاک از مقدار حد مجاز اعلام شده برای کشاورزی در خاک‌های قلیایی توسط سازمان محیط زیست ایران (۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) پایین‌تر بود (۲۵). نمونه خاک بعد از هوا خشک شدن و عبور از الک ٤ میلی‌متری، جهت تجزیه شیمیایی اولیه و آماده‌سازی گلدان‌ها به گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی منتقل گردید. این مطالعه در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل شامل دو سطح کادمیم با مقادیر صفر و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (به ترتیب تیمارهای شاهد= Cd_0 و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم= Cd_{10}) و نه رقم گندم با ۳ تکرار انجام شد.

اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک: برخی خصوصیات خاک به این شرح اندازه‌گیری شدند: قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (۲٦)، با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی مدل JENWAY 4310 و pH خاک در گل اشباع (۲۷) توسط pHمتر مدل METROHM 632، بافت خاک به روش هیدرومتری (۲۸)، نیتروژن کل خاک به روش کجلدال (۲۹) و میزان کربن آلی به روش اکسایش با دی‌کرومات به دست آمد (۳۰). پتاسیم قابل‌استفاده به روش چپمن و برات (۳۱)، فسفر قابل‌استفاده به روش اولسن، با روش رنگ‌سنجی مورفی و رایلی (۳۲)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با اسید (۳۳) و ظرفیت زراعی خاک (۳٤) نیز محاسبه گردید. خصوصیات به‌دست آمده در جدول ۱ تنظیم شده است.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Selected physical and chemical properties of studied soil.

مقدار Amount	خصوصیت خاک Soil properties	مقدار Amount	خصوصیت خاک Soil properties
208.90	پتاسیم قابل‌استفاده Available K (mg kg^{-1})	لوم Loam	بافت خاک Soil Texture
ND*	کادمیم کل Total Cd (mg kg^{-1})	7.37	pH
1.58	روی قابل‌استفاده Available Zn (mg kg^{-1})	1.72	EC (dS m^{-1})
10.28	منگنز قابل‌استفاده Available Mn (mg kg^{-1})	0.87	کربن آلی Organic carbon (%)
4.43	آهن قابل‌استفاده Available iron Fe (mg kg^{-1})	20.56	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (%)
0.70	مس قابل‌استفاده Available Cu (mg kg^{-1})	0.07	نیتروژن کل Total N (%)
		12.69	فسفر قابل‌استفاده Available P (mg kg^{-1})

* کم‌تر از حد اندازه‌گیری

* Not Detectable

آماده‌سازی گلدان‌ها: ابتدا به منظور تامین مواد غذایی گیاهان در طول دوره رشد و با توجه به توصیه کودی خاک مورد مطالعه (۳۵)، عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، روی، منگنز و آهن به ترتیب با مقادیر ۱۵۰، ۵۰، ۱۰۰، ۱۰، ۵ و ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منابع کودی اوره (CH_4N_2O)، فسفات آمونیم ($NH_4H_2PO_4$)، نیترات پتاسیم (KNO_3)، سولفات روی ($ZnSO_4.7H_2O$)، سولفات منگنز ($MnSO_4.H_2O$) و سکوسترین آهن ($Fe-EDDHA$) تهیه و به‌صورت پودری و جامد با خاک به خوبی مخلوط گردیدند. به‌جز اوره که در این مرحله یک سوم از میزان مورد نظر آن و با احتساب نیتروژن سایر کودها و نیترات نمک نیترات کادمیم مورد استفاده، به مخلوط اضافه و باقی‌مانده آن به صورت دو قسط در مراحل پنجه‌زنی و خوشه‌دهی همراه با آب آبیاری به گیاه داده شد. بعد از آماده شدن خاک شاهد، به منظور تهیه سطح ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، ابتدا مقدار مورد نیاز از این عنصر از منبع نمک نیترات کادمیم ($Cd(NO_3)_2.4H_2O$) به‌صورت پودر جامد در حجم کم و سپس با کل خاک مخلوط شد. قبل از انتقال خاک به گلدان‌ها به منظور زهکشی و تهویه بهتر، از ۱۵۰ گرم پوکه معدنی شسته شده و کاغذ به‌عنوان نگهدارنده خاک در ته ظروف استفاده گردید. بعد از آن، هر گلدان دارای مشخصات، با پنج کیلوگرم از خاک مورد نظر پر شد. برای جلوگیری از هدررفت آب زهکش شده، در ته گلدان‌ها زیر گلدانی قرار گرفت.

ابتدا با احتساب رطوبت ۸۰ درصد از ظرفیت زراعی خاک، ۸۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر در دو مرحله (به‌منظور فرونشست آب و جلوگیری از سرریز شدن)، به گلدان‌ها اضافه گردید، به این ترتیب خاک در حد ظرفیت زراعی و بدون انجام عمل کشت در محیط گلخانه با محدوده دمایی ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد، به منظور به تعادل رسیدن و همانندسازی با شرایط طبیعی (انکوباسیون)، به‌مدت یک ماه نگه‌داری شد. آبیاری هر دو روز یک‌بار صورت گرفت و برای اطمینان از ثابت ماندن رطوبت نمونه‌های خاک از روش توزین استفاده گردید.

کاشت و برداشت گیاه: بعد از اتمام دوره انکوباسیون، در بهمن ماه ۱۳۹۹، تعداد ۱۰ عدد بذر از هر رقم گندم در گلدان‌های موردنظر کشت شد و سپس در مرحله دو برگی گیاه، پنج بوته تنک گردید. بذر ارقام گونه نان از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر و نهال مشهد و ارقام دوروم، از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر و نهال کرج، تهیه شدند. در طول دوره رشد، گلدان‌ها در شرایط گلخانه با دمای ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی هوا ۲۰ تا ۳۰ درصد، تا مرحله رسیدگی کامل دانه نگه‌داری گردیدند. آبیاری به روش توزین و هر دو روز یک بار، به میزان رطوبت ۸۰ درصد ظرفیت زراعی صورت می‌گرفت.

در انتهای فصل رشد، خرداد ماه ۱۴۰۰، برداشت گیاهان انجام شد و اندام هوایی و ریشه گیاهان، بعد از جداسازی با آب مقطر، طی چند مرحله شسته شدند. سپس نمونه‌ها در پاکت کاغذی و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند. در مرحله بعدی وزن خشک نمونه‌ها یادداشت گردید و سپس بافت‌های گیاهی، آسیاب و از الک ۰/۵ میلی‌متری، به منظور انجام تجزیه‌های شیمیایی، عبور داده شد. نمونه‌های خاک نیز بعد از جمع‌آوری از هر گلدان، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند تا برای تجزیه شیمیایی آماده گردند.

تعیین غلظت کادمیم در نمونه‌های خاک و گیاه: به‌منظور تعیین غلظت کادمیم کل خاک از روش تیزاب سلطانی (۳۶)؛ هضم با اسید کلریدریک و اسید نیتریک (نسبت ۳ به ۱)، استفاده گردید. به این منظور

۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ٦٥ درصد و ۷/۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۳۷ درصد به ۱ گرم نمونه از خاک برداشت شده از گلدان‌ها، در ظرف مخصوص هضم، اضافه شد و این مخلوط به مدت یک شبانه‌روز در درجه حرارت آزمایشگاه نگه‌داری گردید. بعد از گذشت ٢٤ ساعت، نمونه‌ها بر روی هیتر با دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ٤٠ دقیقه حرارت دیدند. محتویات پس از سرد شدن، به بالن ژوژه ۵۰ منتقل و با آب مقطر به حجم رسانده شد. با فیلتر کردن محلول توسط کاغذ واتمن ٤٢، عصاره‌ها به ظرف پلی‌اتیلنی منتقل گردیدند. مقدار کادمیم اندام‌های گیاهی با روش هضم تر (نیتریک اسید و آب اکسیژنه) اندازه‌گیری شد (۳۷). در این روش ابتدا ۰/۵ گرم از بافت گیاهی به ظرف هضم انتقال یافت. پس از اضافه نمودن ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ٦٥ درصد به آن، نمونه به مدت یک شبانه‌روز به همین حالت باقی ماند. با گذشت این زمان، نمونه حاوی اسید، بر روی هیتر با دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد حرارت دید و سپس ۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰ درصد به آن اضافه گردید و بار دیگر بر روی هیتر با دمای پایین‌تر گذاشته شد. این عمل تا یکدست شدن محلول ادامه پیدا کرد. سپس محلول شفاف به‌دست آمده با آب اسید رقیق (اسید نیتریک) به نسبت ۱۰ به ۱، در بالن ژوژه به حجم ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد. این محلول توسط کاغذ واتمن ٤٢ فیلتر و داخل ظرف پلی‌اتیلنی نگه‌داری گردید.

تعیین غلظت کادمیم در عصاره‌های گیاه و خاک توسط دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu, AA-670 با حد تشخیص کم‌تر از ۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم انجام شد. اندام هوایی شامل قسمت‌های دانه، برگ و ساقه هر رقم بود. تجزیه و تحلیل داده‌ها با کمک نرم‌افزار SAS 9.4، رسم نمودار در فضای Excel و مقایسه میانگین با آزمون توکی صورت گرفت.

فاکتور انتقال (Translocation Factor): که توانایی گیاه در انتقال یک فلز را از ریشه به اندام هوایی بررسی می‌نماید با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۳۸).

$$TF = \frac{Csh}{Cr} \qquad (۱)$$

که در آن، C_{sh} و C_r به ترتیب غلظت فلز در اندام هوایی و غلظت ریشه می‌باشد.

فاکتور تجمع زیستی (Biological Accumulation Factor): که توانایی گیاه در انتقال یک فلز از خاک به اندام هوایی را نشان می‌دهد با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (۳۹).

$$BAF = \frac{\mathrm{Csh}}{\mathrm{Cs}} \qquad (۲)$$

که در آن، C_{Sh} و C_S به ترتیب غلظت فلز در اندام هوایی و غلظت کل همان فلز در خاک می‌باشد.

نتایج و بحث

اثر آلودگی خاک بر غلظت کادمیم ریشه و اندام هوایی ارقام گونه نان: بر اساس نتایج تجزیه واریانس، غلظت کادمیم ریشه و اندام هوایی ارقام نان به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر کادمیم خاک قرار گرفت ($P<۰/۰۱$) (جدول ۲). میانگین غلظت کادمیم ریشه و اندام هوایی گونه نان از صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک در تیمار Cd_0 به ترتیب به ۵۸ و ۲/٦۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک در تیمار Cd_{10} افزایش یافت. هم‌چنین بیش‌ترین غلظت کادمیم ریشه از رقم رخشان (٦۹/۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کم‌ترین غلظت کادمیم ریشه از رقم طلایی (۵۰/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به دست آمد. بیش‌ترین میزان کادمیم اندام هوایی نیز در رقم سیروان و کم‌ترین مقدار در رقم رخشان مشاهده شد (به ترتیب ٤/۰۳ و ۱/۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک) (شکل ۱). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیم مصرفی و

ارقام گندم نان نشان داد که بیش‌ترین میزان کادمیم ریشه و اندام هوایی به ترتیب در ارقام رخشان و سیروان در تیمار Cd_{10} محاسبه گردید (به‌ترتیب ۶۹/۹۲ و ۴/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم). کم‌ترین غلظت ریشه و اندام هوایی این عنصر نیز در تمام ارقام و مربوط به تیمار Cd_0 بود. نتایج مطالعه جوادزرین و همکاران (۲۰۱۴) در خصوص بررسی جذب پتاسیم و کادمیم در ارقام مختلف گندم (*Triticum aestivum* L.) نشان داد که میان ارقام مختلف گندم در انباشت کادمیم اندام هوایی تفاوت وجود دارد. به‌طوری‌که در سطح ۴۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، بیش‌ترین مقدار جذب در رقم نیک‌نژاد (۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کم‌ترین مقدار نیز در رقم پارسی (۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شد. از طرفی در تیمار سطح ۸۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، با اندازه‌گیری میزان جذب اندام هوایی، بیش‌ترین مقدار این عنصر در رقم پیشگام (۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کم‌ترین در رقم نوید (۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. در مجموع، دو رقم نیک‌نژاد و پیشگام بیش‌ترین قابلیت برداشت کادمیم را داشتند. هم‌چنین کم‌ترین قابلیت برداشت کادمیم در دو رقم پارسی و نوید مشاهده شد (۴۰). این نتایج با اطلاعات پژوهش حاضر در ارتباط با رقم پارسی مشابه می‌باشد و دلیل تفاوت‌ها را می‌توان مربوط به دلیل اختلاف رفتار هر رقم در هر دوره رشدی و سطح کادمیم دانست. لو و همکاران (۲۰۲۱) با مطالعه دو نوع ژنوتیپ گندم نان، به بررسی اثر ویژگی خاک‌های مختلف بر سلامت محصول گندم پرداختند. در این پژوهش از ۶ سطح کادمیم (۴، ۲، ۱، ۰/۶، ۰/۳ و صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم) در خاک استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطح کادمیم خاک، میزان کادمیم در سه نوع خاک و دو نوع رقم، افزایش می‌یابد. هم‌چنین با توجه به ایجاد همبستگی بین پارامترهای خاک و غلظت کادمیم گیاه، دریافتند که انباشت کادمیم در هر دو نوع ژنوتیپ گندم، همبستگی مثبت با غلظت کادمیم کل و همبستگی منفی با pH خاک دارد (۴۱). بنابراین افزایش سطح و در نتیجه غلظت کل کادمیم خاک می‌تواند دلیلی بر زیاد شدن غلظت کادمیم اندام هوایی باشد.

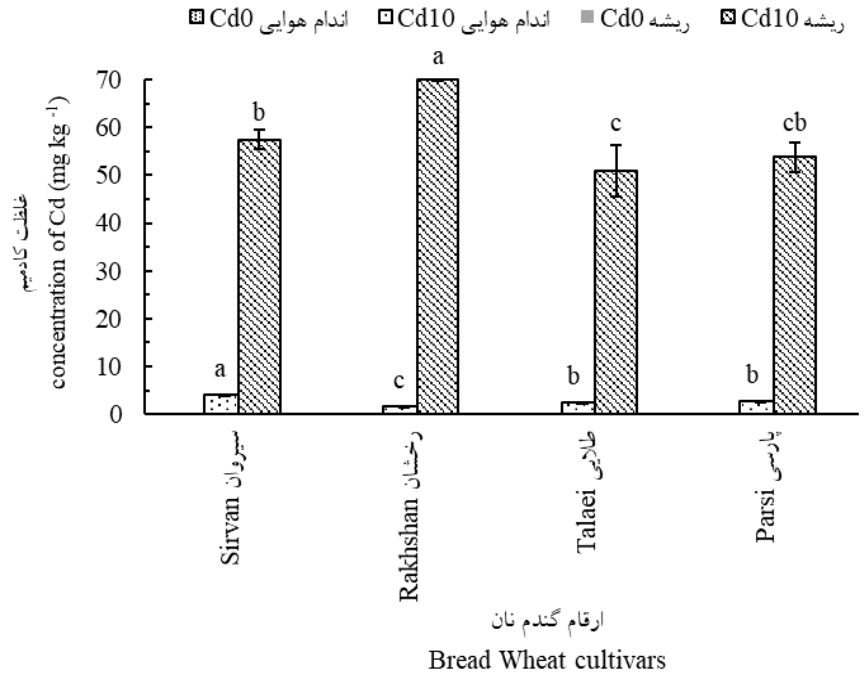
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه، وزن خشک اندام هوایی، فاکتور انتقال و تجمع زیستی ارقام نان.

Table 2. Analysis of Variance for Cd concentration in shoot and root, dry weight of shoot, TF, and BAF of bread cultivars.

منابع تغییر Sources of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares				
		کادمیم اندام هوایی Wheat shoot Cd ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم ریشه Wheat root Cd ($mg\ kg^{-1}$)	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of shoot ($g\ plot^{-1}$)	فاکتور انتقال TF	فاکتور تجمع زیستی BAF
رقم Cultivar	3	1.56^{**}	105.85^{**}	14.40^{**}	0.0006^{**}	0.03^{**}
کادمیم Cd	1	43.57^{**}	20184.58^{**}	16.09^{**}	0.014^{**}	0.95^{**}
رقم × کادمیم Cultivar × Cd	3	1.56^{**}	105.85^{**}	5.64^{**}	0.0006^{**}	0.03^{**}
خطا Error	16	0.003	5.20	0.32	0.00002	0.00008
کل Total	23					

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns غیرمعنی‌دار

** and * are significantly different at 1 and 5% level, respectively and ns is non significantly different



شکل ۱- غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه ارقام نان در سطح صفر و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک.

Figure 1. Cadmium concentration in shoot and root of bread cultivars in 0 and 10 mg Cd kg^{-1} soil levels.

اثر آلودگی خاک بر غلظت کادمیم ریشه و اندام هوایی ارقام گونه دوروم: بر اساس نتایج جدول ۳، میزان کادمیم ریشه و اندام هوایی ارقام دوروم به‌طور معنی‌داری تحت‌تأثیر کادمیم خاک قرار گرفتند ($P<0/01$). بدین ترتیب میانگین میزان کادمیم ریشه و اندام هوایی در تیمار Cd_0 با مقدار صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک به ترتیب به میزان ۵۱/۴۲ و ۲/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک در تیمار Cd_{10} افزایش یافت.

با مقایسه میانگین غلظت کادمیم ریشه ارقام دوروم، رقم ثنا با مقدار ۶۳/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بیش‌ترین و رقم هانا با مقدار ۳۲/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، کم‌ترین غلظت کادمیم ریشه را داشتند. بیش‌ترین میزان کادمیم اندام هوایی در رقم بهرنگ و کم‌ترین مقدار در رقم ثنا مشاهده شد (به ترتیب ۵/۴۷ و ۰/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (شکل ۲). بر اساس نتایج اثرات متقابل کادمیم مصرفی و ارقام دوروم، بیش‌ترین میزان کادمیم ریشه و اندام هوایی به ترتیب در ارقام ثنا و بهرنگ در تیمار Cd_{10} به‌دست آمد (به‌ترتیب ۶۳/۰۷ و ۵/۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم). کم‌ترین غلظت ریشه و اندام هوایی این عنصر در تمام ارقام و مربوط به تیمار Cd_0 بود.

به‌طورکلی تفاوت میانگین کل غلظت کادمیم اندام هوایی و تفاوت میانگین کل میزان کادمیم ریشه ارقام نان و دوروم معنی‌دار نبود. میزان کادمیم اندام هوایی و ریشه ارقام نان (به ترتیب ۲/۶۹ و ۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه ارقام دوروم (به‌ترتیب ۲/۵۰ و ۵۱/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیش‌تر محاسبه شد. گریگر و لوفستد (۲۰۰۴) در پژوهش خود، تفاوت معنی‌داری بین غلظت کادمیم ریشه گندم نان و دوروم پیدا نکردند و در مطالعه آن‌ها میزان کادمیم ریشه گندم نان از دو گندم دوروم بهاره و نان زمستانه بیش‌تر بود (۴۲).

در بین تمام ارقام مورد مطالعه، رقم بهرنگ دارای بیش‌ترین و ثنا کم‌ترین میزان کادمیم اندام هوایی بودند. هم‌چنین کم‌ترین تفاوت میان غلظت کادمیم ریشه و اندام هوایی در بهرنگ و بیش‌ترین مقدار در ثنا مشاهده گردید که قابل به ذکر است، هر دو رقم از گندم دوروم می‌باشند. صارمی‌راد و همکاران (۲۰۱۳) به مقایسه غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه سه رقم گندم نان و دو رقم گندم دوروم در سطوح مختلف کادمیم در محیط هیدروپونیک پرداختند. بر اساس نتایج، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار کادمیم اندام هوایی در میان ارقام دوروم مشاهده شد، که این اطلاعات مشابه با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد. اما در پژوهش آن‌ها میزان کادمیم بخش هوایی و ریشه ارقام دوروم بیش‌تر از ارقام نان به دست آمد، که این نتیجه مغایر با نتیجه پژوهش حاضر بود (۴۳). دلیل تفاوت در نتایج را می‌توان به ارقام انتخابی، طول دوره رشد و نوع محیط کشت ارتباط داد (۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷). از بین روش‌های اولیه مقاومت ریشه گیاه در برابر تنش کادمیم، می‌توان به ثابت نگهداشتن کادمیم به‌وسیله دیواره سلولی و کربوهیدرات‌های خارج سلولی اشاره کرد. بنابراین ارقام هر گونه ممکن است براساس غلظت کادمیم فراهم، گونه‌های عنصر موجود و مدت زمان قرارگیری در محیط آلوده و ... دارای رفتار متفاوتی باشند (۴۸). با توجه به تغییر رفتار هر گونه با افزایش سطح آلودگی، لزوم مطالعاتی در ارتباط با برررسی و مقایسه جذب وانتقال کادمیم در ارقام نان و دوروم در سطوح مختلف این عنصر در محیط کشت، ضروری به نظر می‌رسد.

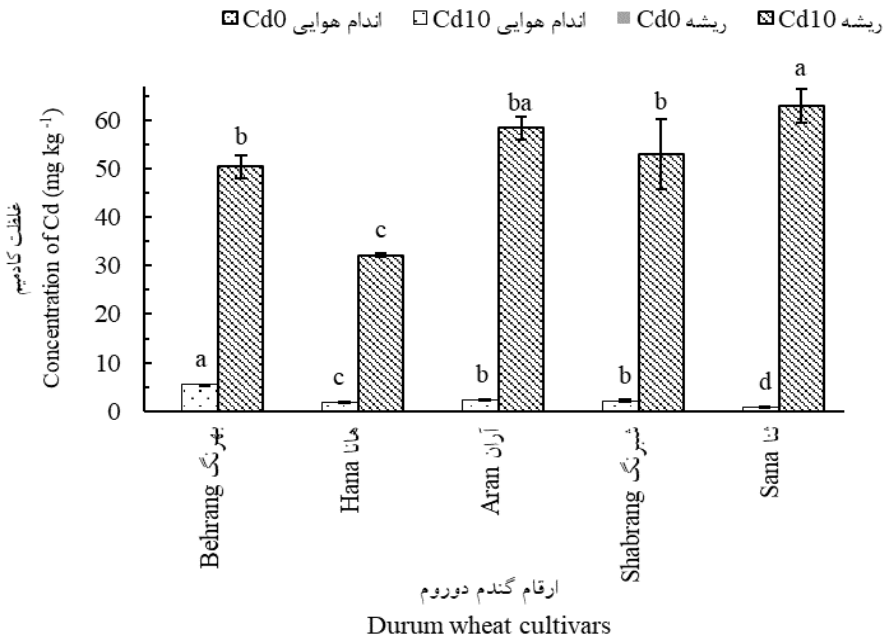
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه، وزن خشک اندام هوایی، فاکتور انتقال و تجمع زیستی ارقام دوروم.

Table 3. Analysis of Variance for Cd concentration in shoot and root, dry weight of shoot, TF, and BAF of durum cultivars.

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares				
		کادمیم اندام هوایی Wheat shoot Cd ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم ریشه Wheat root Cd ($mg\ kg^{-1}$)	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of shoot ($g\ plot^{-1}$)	فاکتور انتقال TF	فاکتور تجمع زیستی BAF
رقم Cultivar	4	4.60^{**}	209.09^{**}	15.73^{**}	0.0018^{**}	0.10^{**}
کادمیم Cd	1	46.90^{**}	19834.75^{**}	0.37^{ns}	0.019^{**}	1.02^{**}
رقم × کادمیم Cultivar × Cd	4	4.60^{**}	209.09^{**}	3.82^{**}	0.0018^{**}	0.10^{**}
خطا Error	20	0.005	7.72	0.12	0.00002	0.0001
کل Total	29					

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns غیرمعنی‌دار

** and * are significantly different at 1 and 5% level, respectively and ns is non significantly different

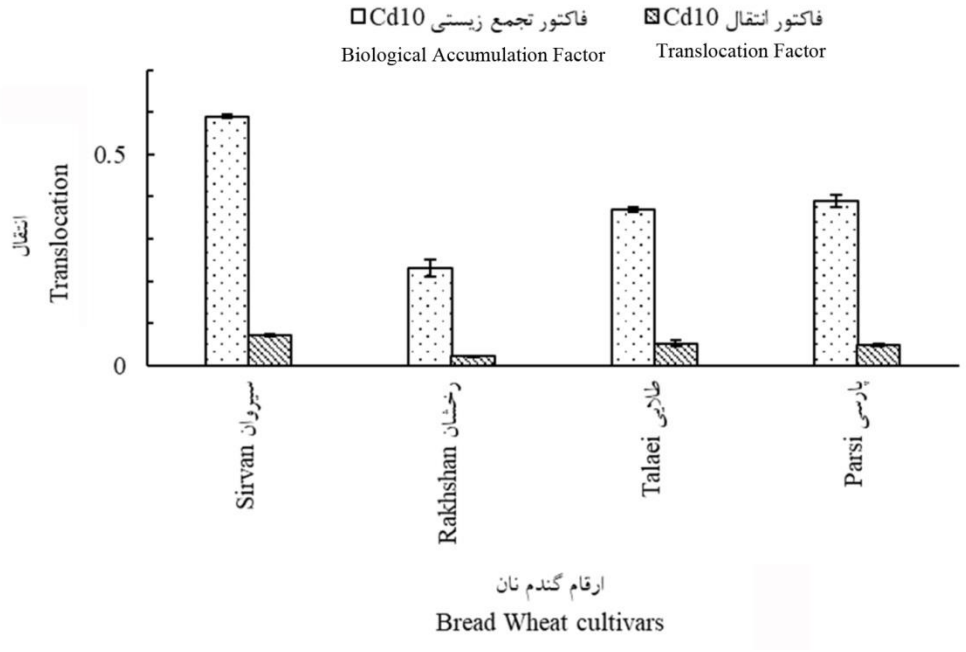


شکل ۲- غلظت کادمیم اندام هوایی و ریشه ارقام دوروم در سطح صفر و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک.

Figure 2. Cadmium concentration in the shoot and root of durum cultivars in 0 and 10 mg Cd kg^{-1} soil levels.

فاکتور انتقال و تجمع زیستی: نتایج نشان داد که آلودگی خاک بر فاکتور انتقال و فاکتور تجمع زیستی ارقام مختلف گندم نان تأثیر معنی‌دار داشت ($P<۰/۰۱$) (جدول ۲). مقدار فاکتور انتقال از صفر در تیمار Cd_0 به مقدار ۰/۰۵ در تیمار Cd_{10} افزایش پیدا کرد. رقم سیروان با مقدار ۰/۰۷ و رقم رخشان با مقدار ۰/۰۲ به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین فاکتور انتقال بودند (شکل ۳). میزان فاکتور تجمع زیستی نیز از صفر در تیمار Cd_0 به ۰/٤۰ در تیمار Cd_{10} افزایش یافت. رقم سیروان با مقدار ۰/۵۹ و رقم رخشان با مقدار ۰/۲۳، به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین فاکتور تجمع زیستی بودند (شکل ۳). بنابراین در ارقام نان، فاکتور تجمع زیستی از فاکتور انتقال بیش‌تر به‌دست آمد. رقم سیروان با داشتن بیش‌ترین غلظت کادمیم اندام هوایی و مقدار زیاد کادمیم ریشه در بین سایر ارقام، دارای بیش‌ترین مقدار فاکتور انتقال (۰/۰۷) و فاکتور تجمع زیستی (۰/۵۹) بود (شکل ۳). بنابراین سیروان را می‌توان رقمی با توانایی زیاد در جذب و انتقال کادمیم به شمار آورد. یکی از راه‌های انباشت کادمیم در گیاه، انتقال از طریق مسیر تعرق می‌باشد. به گونه‌ای که کادمیم توسط آوند چوبی از ریشه به اندام هوایی که در آن تعرق صورت می‌پذیرد، منتقل می‌شود (٤۹). ممکن است یکی از دلایل تجمع زیاد کادمیم در رقم سیروان انتقال توسط جریان تعرق از ریشه به اندام هوایی در این رقم باشد. ارقام طلایی و پارسی با وجود داشتن کم‌ترین غلظت کادمیم ریشه، میزان قابل‌توجهی از این عنصر را در اندام هوایی خود ذخیره کردند. این موضوع، اهمیت فاکتور انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی را نشان می‌دهد (۵۰). مطابق با نتایج مطالعات گذشته در تمام ارقام گندم نان، میزان کادمیم ریشه با اختلاف زیاد از مقدار کادمیم اندام هوایی بیش‌تر بود (۵۱). رقم رخشان با

داشتن بیش‌ترین میزان کادمیم ریشه، کم‌ترین مقدار کادمیم اندام هوایی را به خود اختصاص داد. غلظت کادمیم ریشه در این رقم ٤٤/٩٠ برابر غلظت این عنصر در اندام هوایی به دست آمد. به نظر می‌رسد مکانیسم محدودکننده کادمیم در این رقم، از طریق کاهش انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی می‌باشد. غلظت بالایی از کادمیم پس از جذب توسط ریشه در همین قسمت انباشته می‌شود و بسته به ارقام گندم، مقدار کم‌تری به شاخساره منتقل می‌گردد (۲۳، ۵۲، ۵۳). احتباس بیش‌تر کادمیم در ریشه‌ها ممکن است به دلیل کلاته شدن این عنصر با اسیدهای آلی باشد، موضوعی که توسط آدنیجی و همکاران (۲۰۱۰) بیان شده است (۵۲).



شکل ۳- فاکتور انتقال و تجمع زیستی ارقام گندم نان در سطح ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک.

Figure 3. Translocation and Biological Accumulation Factor of bread wheat cultivars in 10 mg Cd kg^{-1} soil level.

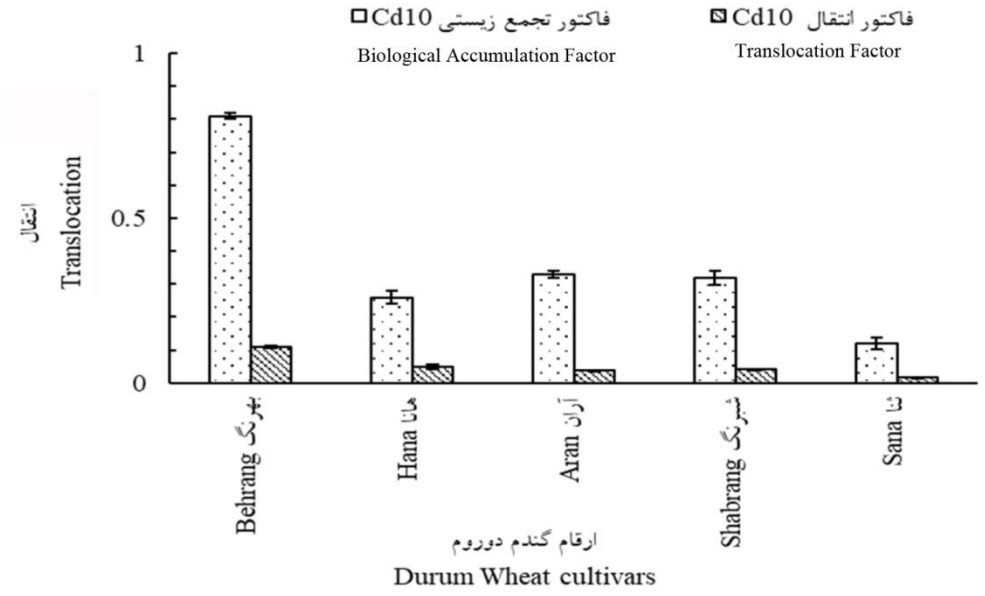
خانبلوکی و همکاران (۲۰۱٦) در مطالعه‌ای به بررسی واکنش گندم تحت‌تأثیر سطوح مختلف کادمیم پرداختند. در مطالعه آن‌ها میزان فاکتور تجمع زیستی در سطح ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، در رقم مرودشت، که از ارقام گندم نان می‌باشد، با میزان این فاکتور در ارقام پارسی و طلایی، از ارقام نان در پژوهش حاضر، تقریباً مشابه به‌دست آمد (به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۳٦) (٥٤).

لو و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی جذب و انتقال کادمیم در دو رقم گندم پرداختند. فاکتور انتقال از خاک به اندام هوایی نیز جزئی از پارامترهای اندازه‌گیری بود. همراستا با نتایج پژوهش حاضر، نتایج آنان نیز نشان داد که مقدار فاکتور تجمع زیستی در رقمی که مقدار کادمیم بیش‌تری را در خود ذخیره نموده، بالاتر از رقمی که مقدار کادمیم کم‌تری انباشت کرده بود، محاسبه شد (٤١). بر اساس این

نتایج، با توجه به این‌که در مطالعه حاضر، سیروان بیش‌ترین و رخشان، کم‌ترین غلظت کادمیم را در خود انباشت نمودند، به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار فاکتور تجمع زیستی نیز در آن‌ها محاسبه گردید.

با توجه به نتایج اثرات متقابل میزان کادمیم و نوع رقم بر فاکتور انتقال و تجمع زیستی، بیش‌ترین میزان این دو فاکتور در رقم سیروان (به‌ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۵۹) و تیمار Cd_{10} محاسبه شد و به دلیل قابل اندازه‌گیری نبودن کادمیم در اندام هوایی تیمار Cd_0 تمام ارقام، کم‌ترین شاخص مربوط به تیمار شاهد بود.

در خاک مورد مطالعه، تأثیر آلودگی بر فاکتور انتقال و تجمع زیستی ارقام دوروم نیز معنی‌دار بود ($P<0/01$) (جدول ۳). به این ترتیب فاکتور انتقال از مقدار صفر در تیمار Cd_0 به مقدار ۰/۰۵ در تیمار Cd_{10} تغییر کرد. بیش‌ترین میزان این فاکتور در رقم بهرنگ (۰/۱۱) و کم‌ترین میزان در رقم ثنا (۰/۰۲) محاسبه گردید (شکل ٤). هم‌چنین فاکتور تجمع زیستی از مقدار صفر در تیمار Cd_0 به مقدار ۰/۳۷ در تیمار Cd_{10} افزایش یافت. این شاخص از ۰/۱۲ در رقم ثنا تا ۰/۸۱ در رقم بهرنگ متغییر بود (شکل ٤). از آن‌جایی‌که ریشه به عنوان منبع اصلی ذخیره فلزات سنگین در گیاهان محسوب می‌شود و یون‌های فلزات سنگین موجود در آب خاک ابتدا وارد ریشه گیاه می‌شوند (۵۵)، دلیل این اختلاف را می‌توان به تفاوت توانایی ارقام در جذب این عنصر از خاک توسط ریشه مربوط دانست، به گونه‌ای که بعضی از ارقام در سطح یکسانی از آلودگی خاک، قدرت جذب بیش‌تری نسبت به سایر ارقام دارند (٥٦).



شکل ٤- فاکتور انتقال و تجمع زیستی ارقام گندم دوروم در سطح ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک.

Figure 4. Translocation and Biological Accumulation Factor of durum wheat cultivars in 10 mg Cd kg^{-1} soil level.

با توجه به فاکتور انتقال و تجمع زیستی در میان ارقام دوروم مورد مطالعه، ثنا و هانا مقدار کم‌تری از کادمیم خاک را جذب و منتقل کردند، ولی رقم بهرنگ را می‌توان جز ارقامی که غلظت بالاتری از کادمیم را در خود انباشت می‌نماید، به شمار آورد (شکل ٤). رقم بهرنگ با وجود داشتن بیش‌ترین میزان کادمیم اندام هوایی، انتظار می‌رفت بیش‌ترین میزان کادمیم ریشه را داشته باشد، ولی میزان کادمیم ریشه آن نسبت به سایر ارقام بالا نبود. بر اساس این مشاهده می‌توان نتیجه گرفت در رقم بهرنگ عامل فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی، در انباشت کادمیم نقش مهمی دارد. در پژوهش حاضر نیز ارقامی که دارای میزان کادمیم ریشه متوسطی بودند، کادمیم اندام هوایی بالاتری نسبت به سایر ارقام داشتند. این موضوع علاوه بر جذب کادمیم توسط ریشه از خاک، فاکتور انتقال را نیز به عنوان عاملی مؤثر در انباشت کادمیم گیاه بیان می‌کند (٤٢ و ٥٧). در مطالعه لرکی و همکاران (۲۰۱۵) که بر روی دو رقم گندم دوروم (بهرنگ و یاواروس) با تیمارهای پتاسیم و کادمیم در دو سطح شاهد و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (نمک کلرید کادمیم) انجام شد، نتایج نشان داد که بیش‌ترین میزان کادمیم در ریشه و کم‌ترین مقدار در اندام هوایی مشاهده شد. هم‌چنین آن‌ها بیان کردند که نسبت کادمیم ریشه به اندام هوایی رقم بهرنگ نسبت به رقم یاواروس کم‌تر بود. دلیل این امر به توانایی متفاوت هر رقم در انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی ذکر شده است (٥٨). قابل ذکر است که در پژوهش حاضر، رقم یاواروس به کار برده نشده است. براساس نتایج پژوهش هریس و تیلور (۲۰۱۳)، مهم‌ترین تفاوت ارقام دوروم در انباشت کادمیم اندام هوایی به توانایی آن‌ها در انتقال این عنصر از ریشه به بخش هوایی مرتبط می‌باشد (٤٥). در گندم دوروم، رقم هانا علی‌رغم داشتن کم‌ترین میزان کادمیم ریشه (۳۲/۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، میزان بیش‌تری از این عنصر را در اندام هوایی خود نسبت به رقم ثنا (به ترتیب ۱/۷۷ و ۰/۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) که دارای بیش‌ترین میزان کادمیم ریشه بود (٦۳/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، ذخیره کرد. این موضوع برتری رقم ثنا را نسبت به رقم هانا در عدم انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی نشان می‌دهد. هم‌چنین مکانیسم رقم هانا در برابر تنش کادمیم را می‌توان به کنترل محیط رایزوسفر توسط ریشه این رقم و در نتیجه جذب کم این عنصر نسبت داد. چنان‌چه در منابع ذکر شده است که آزادسازی کادمیم در اطراف ریشه به عوامل زیادی بستگی دارد، از جمله: کاهش یافتن pH توسط ترشحات ریشه به اندازه یک واحد در فاصله‌های میلی‌متری بین خاک و سطح ریشه، آزادسازی و ترشح مواد از نوک ریشه به داخل رایزوسفر، که خود شامل دو نوع از ترکیبات با وزن مولکولی کم و زیاد می‌شوند. در میان این ترکیبات اسیدهای آلی نیز بر آزادسازی و دسترسی فلزات تأثیر دارند (٥٩). بعنوان مثال نیگام و همکاران (۲۰۰۰) دریافتند که اسیدهای آلی مترشحه از گندم آزادسازی کادمیم از خاک را افزایش می‌دهند (٦٠). سیسلینسکی و همکاران (۱۹۹۷) نیز اثرات اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم[1] تراوش شده در رایزوسفر ارقام گندم دوروم را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اسیدهای آلی ترشح شده در تحمل گیاهان به تنش کادمیم و یا در تسهیل جذب فلزات توسط ریشه، نقش مهمی ایفا می‌کنند (٤٦).

1- Low Molecular Weight Organic Acids (LMWOA)

میزان فاکتور انتقال و تجمع زیستی در تمام ارقام کم‌تر از یک به دست آمد. میانگین کل فاکتور تجمع زیستی در گندم نان بیش‌تر از دوروم محاسبه گردید (به‌ترتیب ۰/٤۰ و ۰/۳۷) و تفاوت آن‌ها معنادار نبود. این موضوع نشان می‌دهد، به منظور انجام مطالعاتی در زمینه مقایسه ارقام مختلف گندم در برداشت کادمیم از خاک، انتخاب ارقام گندم به‌صورت درون گونه‌ای، از اهمیت بیش‌تری نسبت به انتخاب گونه گندم (نان و دوروم) برخوردار می‌باشد. این نتیجه مغایر با نتایج گریگر و لوفستد (۲۰۰٤) می‌باشد. آن‌ها توانایی بالای گونه دوروم در انتقال کادمیم از ریشه به اندام هوایی را دلیلی بر انباشت بیش‌تر کادمیم در دانه گونه دوروم بیان کردند (٤۲). در مطالعه دیگر، هارت و همکاران (۱۹۹۸) انتقال کادمیم از خاک به ریشه و ریشه به اندام هوایی ارقام نان را از دوروم بیش‌تر گزارش کردند (٦۱).

مطالعات قبلی نشان دادند که ارقام مختلف کاهو در جذب کادمیم از خاک، در شرایط رشدی و خاک یکسان، متفاوت عمل کردند. دلایل زیادی برای چنین تفاوت‌هایی وجود دارد، به عنوان مثال، توانایی مختلف ارقام در انتقال کادمیم از خاک به ریشه و یا از ریشه به اندام هوایی (٥٦). هم‌چنین ریشه با ترشح اسیدهای آلی، فراهمی عنصر کادمیم در خاک و در نتیجه میزان جذب آن را بیش‌تر می‌نماید (٤۲، ٦۰ و ٦۲).

در ارقام دوروم مانند ارقام نان غلظت کادمیم اندام هوایی از غلظت کادمیم ریشه کم‌تر بود. با مقایسه اختلاف میزان کادمیم ریشه و اندام هوایی در میان ارقام دوروم، بیش‌ترین مقدار تفاوت در ثنا (۷٤/۲۰ برابر) و کم‌ترین مقدار در بهرنگ (۹/۲۲ برابر) مشاهده شد (شکل ۲).

ورجین و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای به مقایسه غلظت کادمیم در اندام هوایی و ریشه ۱۲ رقم گندم دوروم در محیط هیدروپونیک پرداختند. براساس نتایج ژنتیک، ارقامی که مقدار زیادی از کادمیم خاک را در ریشه ذخیره و از انتقال آن به اندام هوایی به‌خصوص دانه جلوگیری نمودند، ژن مربوط به صفت انباشتگر بودن کادمیم در آن‌ها نهفته بود (۲۲).

اثر آلودگی خاک بر وزن خشک اندام هوایی گندم نان و دوروم: با مقایسه ظاهر تمام ارقام کشت شده در تیمار Cd_0 و تیمار Cd_{10}، علائم سمیت کادمیم و کمبود مواد مغذی در هیچ‌یک از گیاهان دو تیمار مشاهده نشد. بر اساس نتایج جدول‌های ۲ و ۳ تفاوت میان وزن خشک اندام هوایی ارقام نان رشدیافته در خاک آلوده به کادمیم در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد ($P<۰/۰۱$). اما آلودگی خاک بر وزن خشک اندام هوایی ارقام دوروم اثر معنی‌داری نداشت. بدین ترتیب در گندم نان، وزن خشک اندام هوایی از مقدار ۲۳/۵۹ گرم در گلدان، در تیمار Cd_0 به ۲۱/۹٦ گرم در گلدان، در تیمار Cd_{10} کاهش یافت.

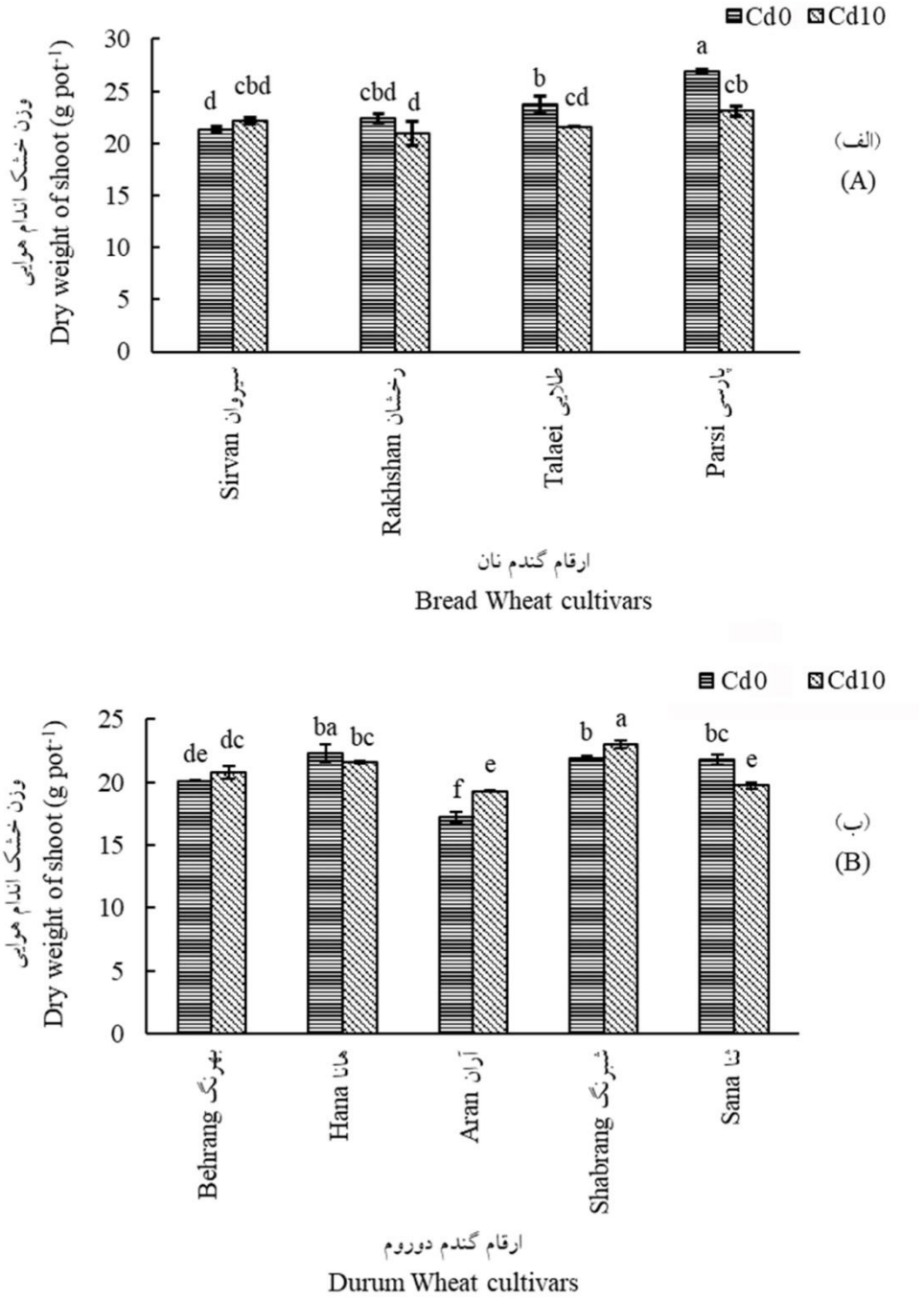
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر متقابل کادمیم خاک و نوع رقم گندم بر وزن خشک اندام هوایی ارقام نان و ارقام دوروم معنی‌دار شد ($P<۰/۰۱$) (جدول‌های ۲ و ۳). به طوری‌که در میان ارقام نان، بیش‌ترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در رقم پارسی (۲٦/۹۱ گرم در گلدان) و کم‌ترین مقدار در رقم رخشان (۲۰/۹۳ گرم در گلدان) مشاهده گردید (شکل ۵). در ارقام دوروم، رقم شبرنگ دارای بیش‌ترین میزان وزن خشک اندام هوایی بود (۲۲/۹۸ گرم در گلدان) و کم‌ترین مقدار در رقم آران به‌دست آمد (۱۷/۲۵ گرم در گلدان) (شکل ۵). هم‌چنین در میان

تمام ارقام مورد مطالعه بیش‌ترین میزان وزن خشک در رقم پارسی و کم‌ترین میزان در رقم آران و تیمار Cd_0 مشاهده شد (۲۶/۹۱ و ۱۷/۲۵ گرم در گلدان). این نتیجه می‌تواند به سازگارتر بودن رقم پارسی نسبت به سایر ارقام در شرایط تنش کادمیم اشاره داشته باشد. چنان‌چه جوادزرین و متشرع‌زاده (۲۰۱٤) در مطالعه‌ای ۱٤ رقم گندم نان را مورد مطالعه قرار دادند و در این مطالعه نیز رقم پارسی جز ارقام با زیست‌توده بالا بود (٤۰). بر اساس میانگین کل وزن خشک، ارقام نان دارای زیست‌توده بیش‌تری نسبت به دوروم بودند (به ترتیب ۲۲/۷۷ و ۲۰/۷٦ گرم در گلدان) (شکل ۵). بر این اساس، در شرایط تنش کادمیم، ارقام نان را می‌توان سازگارتر از ارقام دوروم معرفی نمود. همان‌طور که اکر و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای نشان دادند کاربرد کادمیم باعث کاهش محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، روی و مس در گندم نان و تمامی عناصر اندازه‌گیری‌شده در گندم دوروم شد. این برهمکنش‌های آنتاگونیستی[1] به‌ویژه در غلظت بالای کادمیم در ژنوتیپ گندم دوروم بیش‌تر از ژنوتیپ گندم نان بود. در این پژوهش این موضوع را به حساسیت بالاتر گندم دوروم در برابر سمیت کادمیم نسبت به گندم نان مربوط دانستند (٦۳).

در پژوهش حاضر، با مقایسه وزن خشک گندم نان و دوروم مشاهده گردید ارقامی که میزان کم‌تری از کادمیم خاک را در خود انباشت نمودند، با افزایش سطح آلودگی خاک، وزن خشک آن‌ها کاهش یافت. مطالعات گذشته نشان دادند که با افزایش سطح آلودگی خاک، زیست‌توده گیاه کاهش می‌یابد (۱۸، ۲۲، ٤۰، ٤۳ و ٦٤). با توجه به این موضوع، میزان زیست‌توده کم در این ارقام را می‌توان راهکاری به‌منظور کاهش انباشت کادمیم در گیاه در نظر گرفت. همان‌طور که ورجین و همکاران (۲۰۱۷) با مقایسه وزن خشک ریشه، اندام هوایی و دانه ۱۲ رقم گندم دوروم، دریافتند که وزن خشک تمام ژنوتیپ‌های مورد مطالعه در خاک با آلودگی کم کادمیم، کاهش نداشته است، به‌جز ژنوتیپ‌هایی که میزان کمی از این عنصر را در خود انباشت کردند (۲۲). رقم شبرنگ نیز با داشتن بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی در میان ارقام دوروم در تیمار Cd_{10}، مقدار کم‌تری از این عنصر را نسبت به رقم بهرنگ در خود ذخیره نمود. براساس این نتیجه می‌توان رقم شبرنگ را به عنوان رقمی سازگار در مطالعات آینده بیش‌تر مورد برررسی قرار داد.

مکانیسم‌های مختلفی در گیاهان برای مقابله با ورود و تجمع کادمیم وجود دارد. به‌عنوان مثال حذف، دفع فعال و محدود کردن انتقال فلز در بافت‌های حساس، اتصال فلز به دیواره سلولی، کلات شدن توسط مولکول‌های آلی و ذخیره‌سازی در واکوئل‌ها. روش دیگر گیاه به منظور مقاومت در برابر اثرات کادمیم، مدیریت عناصر مغذی تحت شرایط تنش است (٦۵). با این وجود می‌توان کاهش مصرف عناصر ضروری و در نتیجه کم شدن رشد زیست‌توده گیاهی را در شرایط آلودگی پیش‌بینی کرد.

1- Antagonistic



شکل ۵- وزن خشک (گرم بر گلدان) اندام هوایی ارقام گندم نان (الف) و دوروم (ب) در سطح صفر و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک.

Figure 5. Dry weight (g pot^{-1}) of shoot of bread (A) and durum (B) wheat cultivars in 0 and 10 mg Cd kg^{-1} soil levels.

همبستگی: با توجه به جدول ٤، همبستگی میان غلظت کادمیم اندام هوایی با فاکتور انتقال و تجمع زیستی در میان ارقام نان و ارقام دوروم از لحاظ آماری معنی‌دار شد ($P<۰/۰۱$). این موضوع نشان‌دهنده ارتباط بین غلظت کادمیم اندام هوایی با انتقال این عنصر از خاک به اندام هوایی و از ریشه به اندام هوایی گندم می‌باشد. با توجه به مطالعه خوش‌گفتارمنش و همکاران (۲۰۰٦) مقدار کادمیم اندام هوایی ارقام گندم نان و دوروم، همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح پنج درصد با میزان کادمیم خاک داشت (٦٦). نعیم و همکاران (۲۰۱٦) به ارتباط میان غلظت کادمیم اندام هوایی گندم و فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی اشاره کردند (٦۷). آن‌ها نشان دادند ارقامی که میزان کادمیم اندام هوایی بالایی دارند، دارای فاکتور انتقال از ریشه به اندام هوایی بالایی می‌باشند و یا بالعکس، که این نتیجه با داده‌های مطالعه حاضر مطابقت داشت.

بر اساس نتایج همبستگی، ارتباط معنی‌داری میان غلظت کادمیم ریشه با غلظت کادمیم اندام هوایی و فاکتور انتقال و تجمع زیستی مشاهده نشد (جدول ٤). مطالعات زیادی به بررسی خصوصیات مورفولوژیکی و میزان بیومس ریشه بر غلظت کادمیم اندام هوایی پرداختند. آن‌ها ارتباط معنی‌داری میان برخی از خصوصیات ریشه و غلظت کادمیم اندام هوایی و میزان انتقال آن در گیاه مشاهده کردند (٦۸ و ٦۹). با توجه به این موضوع می‌توان پیش‌بینی کرد که به‌منظور مقایسه رفتار گیاهان در برابر تنش کادمیم، بررسی صفات ریشه در کنار غلظت کادمیم ریشه، دارای اهمیت می‌باشد. در مطالعاتی توانایی ریشه ارقام گندم در ارتباط با سازگاری در برابر آلودگی محیط مورد بحث قرار گرفته است. آدنیجی و همکاران (۲۰۱۰) با مقایسه اسیدهای آلی که توسط ریشه ارقام گندم دوروم در منطقه رایزوسفر ترشح شدند، دریافتند ارقامی که میزان کم‌تری از این عنصر را در خود انباشت می‌کنند با ترشح این نوع از اسیدها اقدام به جذب بیش‌تر کادمیم توسط ریشه می‌نمایند و از انتقال آن به اندام هوایی جلوگیری می‌نمایند (۵۲). براساس یافته‌های مکفی و همکاران (۲۰۱٦) این امکان وجود دارد که غلظت اسیدهای آلی و فیتوکلاتین[1]های درون سلولی در میان سلول‌های ریشه بعضی از ارقام گندم دوروم متفاوت باشد، یا این‌که فیتوکلاتین‌های سیتوزولی در ذخیره کادمیم درون واکوئل‌های سلول ریشه کارآمدتر عمل کرده و از انتقال آن به اندام هوایی جلوگیری کنند (۷۰).

همبستگی معنی‌دار میان وزن خشک ریشه و اندام هوایی ارقام گندم با غلظت کادمیم در این قسمت‌ها مشاهده نگردید. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت ارقام مختلف گندم در برابر تنش کادمیم راه‌کارهای متفاوتی به کار می‌گیرند. حدس زده می‌شود که در برخی از ارقام مانند رخشان و ثنا که دارای کم‌ترین میزان کادمیم اندام هوایی بودند، کم شدن وزن خشک، به سازگاری آن‌ها کمک نموده است.

1- Phytochelatin

جدول ٤- نتایج همبستگی میان غلظت کادمیم اندام هوایی، ریشه، وزن خشک اندام هوایی و فاکتور انتقال و تجمع زیستی ارقام نان و دوروم.

Table 4. Correlation between Cd concentration in shoot, root (mg kg^{-1}), dry weight of shoot (g plot^{-1}), TF, and BAF of bread and durum cultivars.

گندم wheat	پارامتر parameter	غلظت کادمیم اندام هوایی Shoot Con of Cd (mg kg^{-1})	غلظت کادمیم ریشه Root con of Cd (mg kg^{-1})	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of shoot (g plot^{-1})	فاکتور انتقال TF	فاکتور تجمع زیستی BAF
نان Bread	غلظت کادمیم اندام هوایی Shoot content of Cd (mg kg^{-1})	1				
	غلظت کادمیم ریشه Root content of Cd (mg kg^{-1})	-0.53^{ns}	1			
	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of shoot (g plot^{-1})	0.50^{ns}	-0.64^{ns}	1		
	فاکتور انتقال TF	0.96**	-0.69	0.57	1	
	فاکتور تجمع زیستی BAF	0.99**	-0.67^{ns}	0.53^{ns}	0.97**	1
دوروم Durum	غلظت کادمیم اندام هوایی Shoot content of Cd (mg kg^{-1})	1				
	غلظت کادمیم ریشه Root content of Cd (mg kg^{-1})	-0.06^{ns}	1			
	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of shoot (g plot^{-1})	0.04^{ns}	-0.5^{ns}	1		
	فاکتور انتقال TF	0.97**	-0.33	0.15	1	
	فاکتور تجمع زیستی BAF	0.99**	-0.12^{ns}	0.07^{ns}	0.97**	1

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns غیرمعنی‌دار

** and * are significantly different at 1 and 5% level, respectively and ns is non significantly different

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این مطالعه، در تمام ارقام، غلظت کادمیم ریشه از غلظت آن در اندام هوایی، بیش‌تر محاسبه گردید. میانگین کل غلظت کادمیم اندام هوایی، ریشه و فاکتور تجمع زیستی در ارقام نان بالاتر ولی نزدیک به گندم دوروم به‌دست آمد. ارقام سیروان و بهرنگ بیش‌ترین میزان کادمیم را در تیمار Cd_{10} در خود ذخیره نمودند و دارای بیش‌ترین میزان فاکتور انتقال و تجمع زیستی بودند ولی با افزایش سطح کادمیم خاک، وزن خشک اندام هوایی آن‌ها کاهش پیدا نکرد. در مقابل ارقام رخشان، ثنا و هانا کم‌ترین غلظت کادمیم اندام هوایی و فاکتورهای انتقال

را به خود اختصاص دادند و در هر سه رقم کاهش وزن خشک با افزایش سطح کادمیم خاک مشاهده گردید. با توجه به این‌که در تمام ارقام، میان غلظت کادمیم اندام هوایی، فاکتور انتقال و تجمع زیستی، همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت، می‌توان علاوه بر جذب کادمیم توسط ریشه، عمل انتقال را نیز عامل مؤثری در انباشت کادمیم گیاهان در نظر گرفت. در تیمار Cd_{10} میان ارقام نان، رقم پارسی و در گندم دوروم، رقم شبرنگ دارای بیش‌ترین مقدار وزن خشک بودند. می‌توان نتیجه گرفت ارقام پارسی و شبرنگ نسبت به سایر ارقام سازگاری بیش‌تری در برابر تنش کادمیم از خود نشان دادند. نتایج این پژوهش، تنها به صورت مقایسه بین ارقام انتخاب شده و براساس میزان جذب هر یک، صورت گرفت و الزاماً قابل تعمیم به ارقام مختلف گندم در خاک‌های مختلف نمی‌باشد. به‌نظر می‌رسد مطالعات بیش‌تری به‌منظور تعریف دقیق‌تر از توانایی یک رقم در جذب کادمیم، ضروری و مورد نیاز است. به‌عبارت دیگر، برای تعیین حد مجاز کادمیم برای ارقام گوناگون گندم در خاک، باید رفتار متفاوت ارقام مختلف نیز مورد توجه قرارگیرد. هم‌چنین با توجه به نبود مطالعات کافی در زمینه مقایسه کادمیم دانه میان ارقام مختلف گندم نان و دوروم، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده، به رفتار و میزان جذب کادمیم در دانه ارقام نان و دوروم در سطوح مختلف کادمیم تاکید و توجه شود.

منابع

1. Smolders, E., & Mertens, J. (2013). P. 283-311. In: B. J. Alloway. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, Chapter 10: Cadmium. Springer Dordrecht.
2. Fotovat, A. (2018). Heavy Metals in Soils. FerdowsiUniv of Mashhad, Press. 705p. [Translatedin in Persian]
3. Naidu, R., & Bolan, N. S. (2008). Contaminant chemistry in soils: Key concepts and bioavailability. P. 9-37. In: R. Naidu (ed). Chemical Bioavailability in Terrestrial Environment. Elsevier Science.
4. Loganathan, P., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Naidu, R. (2012). Cadmium Sorption and Desorption in Soils: A Review. *Journal of Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42 (5), 489-533. **DOI: 10.1080/10643389.2010.520234.**
5. Rizwan, M., Ali, Sh., Abbas, T., Zia ur Rehman, M., Hannan, F., Keller, C. I., Al-Wabel, M., & Ok, Y. S. (2016). Cadmium minimization in wheat: A critical review. *Journal of Ecotoxicology and Environmental Safety*, 130, 43-53. **http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.04.001.**
6. Jafarnejadi, A. R., Homaee, M., Sayyad, Gh. A., & Bybordi, M. (2011). Large Scale Spatial Variability of Accumulated Cadmium in the Wheat Farm Grains. *Journal of Soil and Sediment Contamination*, 20, 98-113. **http://dx.doi.org/10.1080/15320383.2011.528472.**
7. FAO. 2021. World cereal production, utilization, stocks, and trade all likely to contract in 2022/23. Rome.
8. Liu, W. X., Liu, J. W., Wu, M. Z., Li, Y., Zhao, Y., & Li, S. R. (2009). Accumulation and Translocation of Toxic Heavy Metals in Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Growing in Agricultural Soil of Zhengzhou, China. *Journal of Bull. Environ. Contam. Toxicol*. 82, 343-347. **DOI: 10.1007/s00128-008-9575-6.**
9. Tavakoli, A., Golchin, A., & Abdollahi, S. (2020). Effect of cadmium on some growth indices and nutrients concentrations of different wheat cultivars. *Journal of Soil Research*, 34, 359-372. **DOI: 10.22092/IJSR.2020.342706.525.** [In Persian]
10. Kheirabadi, H., Afyuni, M., Ayoubi, S., & Soffianian, A. (2016). Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Major Food Crops in the Province of Hamadan.

Journal of Water and Soil Science, 19 (74), 27-38. **DOI: 10.18869/ acadpub.jstnar.19.74.3.** [In Persian]

11. National Standard of Iran, No. 12968. (2009). Institute of Standards and Industrial Research of Iran, Food & Feed Maximum limit of heavy metals. [In Persian]
12. Hasheminasab, K. S., Shahbazi, K., & Bazargan, K. (2021). Investigation of the concentration of heavy metals, lead and cadmium, and zinc concentration in the wheat produced in Iran. *Journal of Env. Sci. Tech*. 9 (23), 165-174. **DOI: 10.30495/JEST.2022.48667.4877.** [In Persian]
13. Buscaroli, A. (2017). An overview of indexes to evaluate terrestrial plants for phytoremediation purposes (Review). *Journal of Ecological Indicators*, 82, 367-380. **DOI: 10.1016/ j.ecolind. 2017.07.003.**
14. Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A., & Kochian, L. V. (2006). Characterization of cadmium uptake, translocation, and storage in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration. *Journal of New Phytologist*, 172, 261-271. **DOI: 10.1111/ j.1469-8137.2006.01832.x.**
15. Baker, A. J. M., & Brooks, R. R. (1989). Terrestrial higher plants which Hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology, and phytochemistry. *Journal of Biorecovery*. 1, 81-126. **http://dx.doi.org/ 10.1080/ 01904168109362867.**
16. Ivani, R., Mirseyed Hosseini, H., Savaghebi, Gh. R., & Skandary, M. (2007). The effect of sewage sludge on accumulation of heavy metals in soil and different plants. 2nd National Congress of Ecological Agriculture. Gorgan. **https://civilica.com/doc/28162.** [In Persian]
17. Afshari, A., Khademi, H., & Ayoubi, Sh. (2015). Risk assessment of Heavy Metals contamination in soils and selected crops in Zanjan urban and industrial regions. *Journal of Water and Soil*, 29 (1), 151-163. **DOI: 10.22067/ JSW.V0I0.27750.** [In Persian]
18. Lu, M., Cao, X., Pan, J., Li, T., Bilal Khan, M., Gurajala, H. K., He, Zh., & Yang, X. (2019). Identification of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for food safety on two different cadmium contaminated soils. *Journal of Environmental Science and Pollution Research*, 27 (8), 7943-7956. **https:// doi.org/10.1007/s11356-019-07261-w.**
19. Cai, K., & Song, Z. (2019). Bioconcentration, potential health risks, and a receptor prediction model of metal (loid)s in a particular agro-Ecological area. *Journal of Appl. Sci*. 9, 1-20. **DOI: 10.3390/app9091902.**
20. Beigi Harchegani, H., & Banitalebi, G. (2013). The effect of twenty-three years of surface irrigation with treated municipality wastewater on soil loadings, transfer to wheat and corn grains, and related health risks of some Heavy Metals. *Journal of Water and Soil*, 27 (3), 570-580. **DOI: 10.22067/ JSW.V0I0.26085.** [In Persian]
21. Wang, Sh., Wu, W., Liu, F., Liao, R., & Hu, Y. (2017). Accumulation of heavy metals in soil-crop systems: a review for wheat and corn. *Journal of Environ. Sci. Pollut. Res.* 24 (18), 15209-15225. **DOI: 10.1007/s11356-017-8909-5.**
22. Vergine, M., Aprile, A., Sabella, E., Genga, A., Siciliano, M., Rampino, P., Lenucci, M. S., Luvisi, A., & Bellis, L. D. (2017). Cadmium concentration in grains of durum wheat (*Triticum turgidum* L. *subsp. durum*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65, 6240-6246. **DOI: 10.1021/acs.jafc. 7b01946.**
23. Cieslinski, G., Van Rees, K. C. J., Huang, P. M., Kozak, L. M., Rostad, H. P. W., & Knott, D. R. (1996). Cadmium uptake and bioaccumulation in selected cultivars of durum wheat and flax as affected by soil type. *Journal of Plant and Soil*, 182, 115-124. **DOI: 10.1007/BF00011000.**
24. Grant, C. A., Bailey, L. D., McLaughlin, M. J., & Singh, B. R. (1999). Management Factors which Influence Cadmium Concentrations in Crops: A Review. P. 151-198, In: M. J.

McLaughlin, B. R. Singh (eds) Cadmium in Soils and Plants. Springer, Dordrecht.
25. Department of environment. (2021). Pollution standards of soil resources and its guidelines. [In Persian]
26. Rhoades, J. D., Chanduvi, F., & Lesch, S. M. (1999). Soil Salinity Assessment Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements, FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 57, Rome, Italy, 152p.
27. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. P. 475-490, In: D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston & M. E. Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Soil Sciences Society of America and American Society of Agronomy, Madison.
28. Bouyoucos, C. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Journal of Agronomy*, 54, 464-465. **http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.**
29. Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-total, Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy. Book Series: Agronomy Monographs. 31, 595-624.
30. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Journal of Soil Science*, 37, 29-38. **DOI: 10.1097/00010694-193401000-00003.**
31. Chapman, H. D. (1965). Cation exchange capacity. P. 891-901, In: C.A. Black (ed.), Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
32. Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. P. 4013-430, In: A. Klute (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1: chemical and biological properties. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
33. Loeppert, R. H., & Sparks, D. L. (1996). Carbonate and gypsum. P. 437-474, In: D. L. Sparks (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3: chemical methods. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
34. Alizadeh, A. (2006). The Relationship between Water and Soil and Plant. Imam Reza University, Mashhad, 470p. [In Persian]
35. Atarodi, B., Fotovat, A., Khorassani, R., Keshavarz, P., & Hammami, H. (2018). Interaction of selenium and cadmium in wheat at different salinities. *Journal of Toxicological & Environmental Chemistry*, 100 (3), 348-360. **DOI: 10.1080/02772248.2018.1524472.**
36. Berrow, M. L., & Stein, W. M. (1983). Extraction of Metals from Soils and Sewage sludge by Refluxing with Aqua Regia. *Journal of Analyst*. 108, 277-285. **https://doi.org/10.1039/AN9830800277.**
37. J. Benton Jones, Jr. (2001). Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton. Pp: 206.
38. Rezapour, S., Atashpaz, B., Siavash Moghaddam, S., Kalavrouziotis, I. K., & Damalas, C. A. (2019). Cadmium accumulation, translocation factor, and health risk potential in a wastewater-irrigated soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system. *Journal of Chemosphere*, 231, 579-587. **DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.095.**
39. Fontem Lum, A., Ngwa, E. S. A., Chikoye, D., & Suh, C. E. (2014). Phytoremediation Potential of Weeds in Heavy Metal Contaminated Soils of the Bassa Industrial Zone of Douala, Cameroon. *International Journal of Phytoremediation*, 16, 302-319. **DOI: 10.1080/15226514.2013.773282.**
40. Javad Zarin, I., Motesharezadeh, B., & Tafvizi, M. (2014). Evaluation of potassium and cadmium uptake in different wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) under cadmium stress. *Journal of Environmental stresses in crop sciences*. 9 (2), 195-204. **https:// doi.org/10.22077/escs.2016.365.** [In Persian]
41. Lu, M., Cao, X., Lin, Q., Hussain, B., Feng, Y., He, Zh., Kang, K. J., & Yang, X. (2021). Phyto availability,

translocation, and soil thresholds derivation of cadmium for food safety through soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system. *Journal of Environ. Sci. Pollut. Res*. 28, 37716-37726. **https:// doi.org/10.1007/s11356-021-13385-9.**

42. Greger, M., & Lofstedt, M. (2004). Comparison of Uptake and Distribution of Cadmium in Different Cultivars of Bread and Durum Wheat. *Journal of Crop Science*, 44, 501-507. **DOI: 10.2135/cropsci2004.5010.**
43. Saremi Rad, B., Esfandiari, E.A., Shokrpour, M., Sofalian, O., Avanes, A., & Mousavi, S.B. 2013. Cadmium effects on some morphological and physiological parameters in wheat at seedling stage. *Journal of Plant Research*, 27, 1-11. **DOR: 20.1001.1. 23832592.1393.27.1.1.9.** [In Persian]
44. Shi, G. L., Li, D. J., Wang, Y. F., Liu, Ch. H., Hu, Zh. B., Lou, L. Q., Rengel, Z., & Ca, Q. Sh. (2019). Accumulation and distribution of arsenic and cadmium in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at different developmental stages. *Journal of Science of the Total Environment*, 667, 532-539. **DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.394.**
45. Harris, N. S., & Taylor, G. J. (2013). Cadmium uptake and partitioning in durum wheat during grain filling. *Journal of Plant Biology*. 13, 103. **DOI: 10.1186/1471-2229-13-103.**
46. Cieslinski, G., Van Rees, K. C. J., Szmigielska, A. M., & Huang, P. M. (1997). Low molecular-weight organic acids released from roots of durum wheat and flax into sterile nutrient solutions. *Journal of Plant Nutr*. 20, 753-764. **https://doi.org/10.1080/ 01904169709365291.**
47. Qin, Sh., Liu, H., Nie, Zh., Rengel, Z., Gao, W., Li, Ch., & Zhao, P. (2020). Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review. *Journal of Pedosphere*. 30 (2), 168-180. **DOI: 10.1016/S1002-0160(20)60002-9.**
48. Benavides, M. P., Gallego, S. M., & Tomaro, M. L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Journal of Plant Physiol*, 17 (1), 21-34. **DOI: 10.1590/ S1677-04202005000100003.**
49. Page, V., & Feller, U. (2015). Heavy Metals in Crop Plants: Transport and Redistribution Processes on the Whole Plant Level. *Journal of Agronomy*, 5 (3), 447-463. **DOI: 10.3390/ agronomy 5030447.**
50. Herren, Th., & Feller, U. R. S. (1997). Transport of Cadmium via Xylem and Phloem in Maturing Wheat Shoots: Comparison with the Translocation of Zinc, Strontium, and Rubidium. *Journal of Annals of Botany*, 80, 623-628. **DOI: 10.1006/anbo.1997.0492.**
51. Yargholi, B. (2014). Investigation of Cd Uptake and Transfer in Different Parts of Wheat, Spinach, Cucumber, and Carrot Crops. *Journal of Water and Wastewater*, 26 (6), 107-114. [In Persian]
52. Adeniji, B. A., Budimir-Hussey, M. T., & Macfie, S. M. (2010). Production of organic acids and adsorption of Cd on roots of durum wheat (*Triticum turgidum* L. *var. durum*). *Journal of Acta Physiol Plant*, 32, 1063-1072. **DOI: 10.1007/s11738-010-0498-6.**
53. Ci, D., Jiang, D., Wollenweber, B., Dai, T., Jing, Q., & Cao, W. (2010a). Cadmium stress in wheat seedlngs: growth, cadmium accumulation and photosynthesis. *Journal of Acta Physiol. Plant*. 32, 365-373. **https://doi.org/10. 1007/s11738-009-0414-0.**
54. Khanboluki, G., Mirseyed Hosseini, H., & Motesharezadeh, B. (2016). Effect of elevated atmospheric CO_2 on cadmium uptake by wheat and sorghum. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 5 (4), 97-113. **DOI: 10.1080/ 00103624.2018.1547388.** [In Persian]
55. McLaughlin, M. J., Smolders, E., Degryse, F., & Rietra, R. (2011). Uptake of Metals from Soil into Vegetables. P. 325-367, In: Swartjes, F. A. (ed). Dealing with Contaminated Sites: From Theory towards Practical Application. Springer. Dordrecht.
56. Tang, X., Yi, L., Song, Y., He, X., Fang, L., & Zhang, J. (2020). Changes in root exudates' Composition and their ability to release Cadmium adhered to soil in

four Lettuce varieties under Cadmium stress. *Journal of Environ. Studies*. 30 (2), 1809-1816. **DOI: 10.15244/ pjoes/126235.**

57. Harris, N. S., & Taylor, G. J. (2004). Cadmium uptake and translocation in seedlings of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation. *Journal of BMC Plant Biology*, 4, 1-12. **https://doi.org/ 10.1186/1471-2229-4-4.**
58. Larki, S., Rahnama, A., & Aynehband, A. (2015). The effect of potassium on cadmium distribution and accumulation in different organs of durum wheat. *Journal of Plant production*. 38(3), 79-92. **https://doi.org/10.22055/ppd.2015.11455**. [In Persian]
59. Greger, M., & Landberg, T. (2008). Role of rhizosphere mechanisms in Cd uptake by various wheat cultivars. *Journal of Plant and soil*, 312 (1-2), 195-205. **DOI: 10.1007/s11104-008-9725-y.**
60. Nigam, R., Srivastava, Sh., Prakash, S., & Srivastava, M. M. (2000). Effect of organic acids on the availability of cadmium in wheat. *Journal of Chemical Speciation & Bioavailability*, 12 (4), 125-132. **DOI: 10.3184/095422900782775481.**
61. Hart, J. J., Welch, R. M., Norvell, W. A., Sullivan, L. A., & Kochian, L. V. (1998). Characterization of zinc uptake, binding, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Journal of Plant Physiology*, 116, 1413-1420. **DOI: 10.1104/pp.118.1.219.**
62. Stolt, P., Asp, H., & Hultin, S. (2005). Genetic variation in wheat cadmium accumulation on soils with different cadmium concentrations. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192, 201-208. **DOI: 10.1111/j.1439-037X.2006.00202.x.**
63. Eker, S., Erdem, H., Atilla Yazici, M., Barut, H., & Heybet, E. H. (2013). Effects of cadmium on growth and nutrient composition of bread and durum wheat genotypes. *Journal of Fresenius Environmental Bulletin*. 22(6), 1779-1786.
64. Hasan, S. A., Fariduddin, Q., Ali, B., Hayat, S., & Ahmad, A. (2007). Cadmium: Toxicity and tolerance in plants. *Journal of Environmental Biology*, 30(2), 165-174. **DOI: 10.1016/ c2017-0-02050-5.**
65. Gallegoa, S. M., Penaa, L. B., Barciaa, R. A., Azpilicuetaa, C. E., Iannonea, M. F., Rosalesa, E. P., Zawoznika, M. S., Groppaa, M. D., & Benavidesa, M. P. (2012). Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms. *Journal of Environmental and Experimental Botany*, 83, 33-46. **http://dx.doi.org/ 10.1016/j.envexpbot.2012.04.006.**
66. Khoshgoftarmanesh, A. H., Shariatmadari, H., Karimian, N., Kalbasi, M., & Van der zee, S. E. A. T. M. (2006). Cadmium and Zinc in Saline Soil Solutions and their Concentrations in Wheat. *Journal of Soil Science Society of America*, 70 (2), 582-589. **DOI: 10.2136/sssaj 2005.0136.**
67. Naeem, A., Rehman, S., Zia ur, M., Akhtar, T., Ok, Y. S., & Rengel, Z. (2016). Genetic Variation in Cadmium Accumulation and Tolerance among Wheat Cultivars at Seedling Stage. *Journal of Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47 (5), 554-562. **DOI: 10.1080/00103624. 2016.1141918.**
68. Zhang, D., Zhou, H., Shao, L., Wang, H., Zhang, Y., Zhu, T., Ma, L., Ding, Q., & Ma, L. (2022). Root characteristics critical for cadmium tolerance and reduced accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Environmental Management*, 305, 114365. **https://doi. org/10.1016/j. jenvman. 2021.114365.**
69. Liang, X., Strawn, D. G., Chen, J., & Marshall, J. (2017). Variation in cadmium accumulation in spring wheat cultivars: uptake and redistribution to grain. *Journal of Plant Soil*, 421, 219-231. **DOI: 10.1007/s11104-017-3454-z.**
70. Macfie, S. M., Bahrami, Sh., & McGarvey, B. D. (2016). Differential accumulation of cadmium in near-isogenic lines of durum wheat: no role for phytochelatins. *Journal of Physiol Mol Biol Plants*, 22 (4), 461-472. **DOI: 10.1007/s12298-016-0383-x.**