

# بررسی مقدار جذب و تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف چهار گیاه زراعی (گندم، اسفناج، خیار و هویج)

بهمن یارقلی<sup>۱</sup>

۱- عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران  
(نویسنده مسئول) ۲۷۰۵۳۵۹ (۰۲۶۱) yar\_bahman@yahoo.com

(دریافت ۹۲/۸/۱۳ پذیرش ۹۳/۳/۲۲)

## چکیده

استفاده غیر اصولی از فاضلاب‌های صنعتی باعث آلودگی محیط زیست به فلزات سنگین شده است. تجمع فلزات سنگین در خاک و انتقال آن به محصولات زراعی به‌عنوان یکی از عوارض مهم بهداشتی و محیط زیستی استفاده غیر اصولی از پساب‌ها و فاضلاب‌های صنعتی در مناطقی از کشور مطرح است. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف غلظت کادمیم خاک بر مقدار جذب و تجمع آن در اندام‌های مختلف چهار گیاه زراعی رایج در کشور (گندم، اسفناج، خیار و هویج)، به‌صورت یک طرح آزمایشی فاکتوریل در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تیمار کادمیم در خاک شامل غلظت‌های صفر (تیمار شاهد)، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، در چهار تکرار به اجرا در آمد. خاک مورد استفاده از مزرعه چهارصد هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) انتخاب و بعد از دوبار الک کردن با مش دو میلی‌متر و افزودن نیترات کادمیم و مخلوط نمودن کامل تهیه شد. برای کاشت از گلدان‌های پلاستیکی استوانه‌ای به قطر ۴۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد. مقدار آب مورد نیاز با استفاده از روش پنمن مانیتیت برآورد شد. در پایان فصل زراعی از بخش‌های مختلف گیاهان برای سنجش مقدار تجمع کادمیم نمونه‌برداری و آزمایش به‌عمل آمد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار تجمع کادمیم با افزایش غلظت کادمیم در محیط ریشه نسبت مستقیم داشته و به جز تیمار شاهد، در سایر تیمارها بیش از حد استاندارد مصارف انسانی بود. ترتیب تجمع کادمیم در بخش‌های مختلف گیاهان مورد بررسی به شرح زیر بود: ریشه: خیار، هویج، گندم، اسفناج، برگ و ساقه: هویج، خیار، گندم، اسفناج، میوه یا محصول: گندم، خیار، هویج، اسفناج، پوست میوه: گندم، اسفناج، هویج، خیار.

**واژه‌های کلیدی:** کادمیم، محصولات زراعی، فاضلاب صنعتی

## ۱- مقدمه

۰/۰۶ تا ۱/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، یکی از مهم‌ترین و متحرک‌ترین فلزات سنگین خاک است. مسمومیت با این فلز باعث آسیب جدی به کلیه‌ها، استخوان و سیستم عصبی می‌شود [۶ و ۷]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که به‌طور میانگین بیش از ۶ متر مکعب در ثانیه فاضلاب و رواناب سطحی تهران، از طریق مسیل‌ها با دریافت آلاینده‌های مختلف شهری و صنعتی، صرف آبیاری اراضی جنوب تهران می‌شوند [۸]. کاربرد دراز مدت این پساب‌ها که عمدتاً برای کشت سبزی و صیفی به‌کار می‌روند، منجر به تجمع فلزات سنگین در خاک و انتقال آنها به گیاه‌های زراعی با غلظتی بیش از حد مجاز شده است [۹]. استفاده از فاضلاب در اراضی زراعی قزوین باعث افزایش غلظت سرب، مس، کادمیم و روی به مقدار چندین برابر حد مجاز شده است [۱۰]. این حالت برای بخش مهمی از اراضی کشور، به‌ویژه اراضی حاشیه‌ای شهرهای بزرگ به‌وجود آمده و در حال گسترش است. بررسی آلودگی اراضی

آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین به‌عنوان یک مشکل جهانی در حال گسترش مطرح است. دفع فلزات سنگین طی فعالیت‌های انسانی، آلودگی بسیاری از خاک‌ها را به‌همراه داشته است. به‌طوری که شدت آلودگی این خاک‌ها یا بیش از حد طبیعی بوده و یا به زودی به آن حد خواهد رسید [۱، ۲، ۳]. منبع اصلی فلزات سنگین، مصرف پساب‌های شهری و صنعتی، کودهای شیمیایی، لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب و معادن استخراج فلزات می‌باشد. مهم‌ترین فلزات سنگین موجود در فاضلاب‌ها شامل روی، مس، سرب، کادمیم، نیکل، کروم، قلع و آرسنیک است. اکثر فلزات سنگین در لایه سطحی خاک رسوب نموده و تجمع می‌یابند. تجمع فلزات سنگین در خاک تدریجی بوده و در دراز مدت منجر به افزایش غلظت آنها می‌شود؛ این غلظت می‌تواند به حدی برسد که امنیت غذایی بشر را تهدید نماید [۴ و ۵]. کادمیم با مقدار معمول

زراعی کشور نشان می‌دهد که مقدار کادمیم و سرب در بخشی از اراضی زراعی آلوده استان‌های گیلان، زنجان، اصفهان و چهارمحال بختیاری به ترتیب معادل ۱/۹ تا ۱۸۰/۵ و ۸۹/۴ تا ۲۶۱/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک است [۱۱ و ۱۲].

نتایج پژوهش‌های ترابیان و مهجوری نشان می‌دهد که دامنه آلودگی اراضی زراعی جنوب تهران به کادمیم ۰/۱۰۱ تا ۷/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و در گیاهان زراعی در محدوده ۰/۳۴ تا ۱/۴۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک محصول است که بیش از حد مجاز برای مصارف انسانی است [۹]. نتایج تحقیقات یارقلی و همکاران در زمینه بررسی تأثیر غلظت کادمیم خاک بر جذب و تجمع آن در گونه‌های جالیزی نشان داد که میزان تجمع کادمیم تابع غلظت آن در خاک بوده و میزان تجمع در بخش‌های مختلف گونه‌های مورد مطالعه از الگوی متفاوتی برخوردار است [۱۳]. در پژوهش خسروی و همکاران که در خاک آلوده به کادمیم منطقه انگوران زنجان اجرا شد، نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار کلرید پتاسیم در افزایش جذب کادمیم در گونه‌های کلزا و آفتابگردان و تجمع بیشتر کادمیم در کلزا نسبت به آفتابگردان بود [۱۴]. نتایج تحقیقات محمدی و همکاران بیانگر توانایی بیشتر یونجه در جذب و انتقال کادمیم به اندام هوایی و افزایش جذب و تجمع آن در اندام هوایی و ریشه متناسب با افزایش غلظت کادمیم خاک بوده است [۱۵]. یارقلی و همکاران در تحقیقات خود بر روی چهار نوع از محصولات غده‌ای، آنها را از نظر قابلیت تجمع کادمیم به ترتیب سیب زمینی، هویج، چغندر قند و تربچه رده بندی نمودند [۱۶]. گیویان راد و همکاران طی پژوهش‌های خود در بررسی میزان تجمع کادمیم و سرب در سبزیجات کشت شده در جنوب تهران به این نتیجه رسیدند که بیشترین آلودگی در نمونه تره به ترتیب معادل ۰/۱۴ و ۰/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که از حد مجاز مصارف خوراکی بیشتر است [۱۷].

مروری بر تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مقدار تجمع فلزات سنگین بسته به نوع فلز، شرایط خاک و گیاه متفاوت بوده ولی عمده‌تاً میزان تجمع در اندام‌های هوایی به‌ویژه برگ و ساقه بیشتر از سایر اندام‌ها بوده و در دانه بسیار کمتر از برگ و ساقه است [۱۸، ۱۹ و ۲۰].

رفتار کادمیم خاک متأثر از ویژگی‌های کیفی خاک از جمله درصد رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و pH است. حلالیت و فراهمی زیستی آن با ورود به خاک، با گذشت زمان و ایجاد تعادل بین فلز و خاک بر اثر واکنش‌هایی همچون جذب سطحی، تبادل یونی، کلاته شدن، رسوب، اکسایش و کاهش، واکنش با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز و ورود به شبکه کانی‌های رسی کاسته شده و به شکل‌های کم محلول‌تر تبدیل می‌شوند. میزان

تحرك این فلز به شدت بستگی به شرایط اسیدی و قلیائیت خاک داشته و با توجه به آهکی بودن و حاکم بودن شرایط قلیایی بر خاک‌های کشور، انتظار می‌رود به دنبال ورود کادمیم به خاک، از میزان حلالیت و قابلیت جذب و تجمع آن کاسته شود [۲۱ و ۲۲].

بر اساس استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا<sup>۱</sup> میانگین مجاز ماهانه افزایش یون کادمیم در خاک معادل ۳۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اعلام شده و مقدار کل کادمیم اضافه شده در هر هکتار خاک در سال نباید از ۱/۹ کیلوگرم تجاوز نماید. سازمان بهداشت جهانی مقدار مجاز کادمیم در رژیم غذایی هفتگی انسان را معادل ۷ میکروگرم در کیلوگرم وزن بدن و حداکثر مقدار مجاز در خوراک انسانی را معادل ۰/۱ قسمت در میلیون اعلام کرده است [۷]. برای تغذیه دام نیز مقدار مجاز بین ۱۰ تا ۲۰ قسمت در میلیون گزارش شده است [۲].

با توجه به روند رو به رشد جمعیت و توسعه صنعتی کشور و به تبع آن افزایش ضایعات کارخانجات و معادن، پیش‌بینی می‌شود که آلودگی‌های ناشی از این عناصر و ورود آن به زنجیره غذایی رو به افزایش باشد. علی‌رغم انجام تحقیقات مختلف در زمینه اثرات فاضلاب‌های شهری و صنعتی بر خصوصیات خاک و گیاه، اطلاع دقیقی از مقدار انتقال فلزات سنگین از محیط ریشه به گیاهان زراعی، به‌ویژه مقدار تجمع فلزات مذکور در بخش‌های مختلف گیاهان زراعی در شرایط یکسان در دست نبوده و برای حفظ سلامت جامعه، انجام تحقیقات مختلف پیرامون موضوع، ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش با هدف بررسی مقدار جذب و تجمع فلز کادمیم از محیط ریشه به اندام‌های مختلف گیاهان زراعی رایج در کشور تحت شرایط یکسان و کنترل شده، انجام شد. نتایج مهم‌ترین بخش این تحقیق که شامل چهار گیاه زراعی مهم رایج در کشور یعنی گندم، اسفناج، خیار و هویج بود، در این مقاله ارائه شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف غلظت کادمیم محیط ریشه بر مقدار جذب و تجمع در اندام‌های گونه‌های مورد مطالعه، به‌صورت یک طرح آزمایشی فاکتوریل در قالب بلوک‌های کاملاً تصادفی در سه تیمار و سه تکرار در محل مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج به اجرا در آمد. تیمارها شامل غلظت کادمیم در سه سطح به شرح زیر بودند:

- خاک شاهد (بدون افزودن کادمیم)؛
- خاک با غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کادمیم؛
- خاک با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کادمیم؛

<sup>1</sup> U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)

بررسی منابع مشابه نشان می‌دهد که مقدار آب مصرفی علی‌رغم اهمیت و تأثیر زیاد در مقدار جذب فلزات توسط گیاه، مورد توجه بسیاری از محققان قرار نگرفته است. در این تحقیق مقدار آب مورد نیاز گیاهان مورد مطالعه با استفاده از روش پنمن مانیتث<sup>۳</sup> برآورد شد [۱۱]. میزان آب محاسبه شده با توجه به فصل و مراحل رشد گیاه، به صورت یک تا دو روز در میان به محصولات داده شد. پارامترهای هواشناسی مورد نیاز معادله به صورت روزانه از ایستگاه هواشناسی مشکین آباد کرج جمع‌آوری شد. در تعیین آب مورد نیاز از ضریب گیاهی (Kc) برای مراحل مختلف رشد گیاهان مورد مطالعه، مطابق روش ارائه شده توسط فرشی و همکاران عمل شد [۱۱]. طول دوره رشد و میزان نیاز خالص و ناخالص آبیاری به شرح جدول ۲ در طول دوره رشد به تیمارها اعمال شد. در مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت از سم، کود و علف‌کش استفاده نشد.

جدول ۲- طول دوره رشد، کل نیاز خالص و ناخالص آبیاری گیاهان مورد مطالعه [۶]

نوع گیاه	کل نیاز آبی خالص سالانه به میلی‌متر (ETc)*	کل نیاز آبی ناخالص سالانه به میلی‌متر	تفاضل نیاز آبی ناخالص و خالص سالانه به میلی‌متر
اسفناج	۶۰۴	۷۹۰	۱۸۶
خیار	۵۸۵	۷۶۰	۱۷۵
هویج	۷۴۵	۹۱۰	۱۶۵
گندم	۳۶۵۰	۴۵۰۰	۸۵۰

\*در محاسبه نیاز آبیاری، مقدار آب مورد استفاده برای آبیاری اولیه (خاک آب) منظور نشده است. برای این منظور با توجه به شرایط خاک زراعت بین ۳۰ تا ۵۰ میلی‌متر استفاده شده که باید به مقدار نیاز آبیاری افزوده شود.

برای اندازه‌گیری کادمیم خاک از روش<sup>۴</sup> DTPA استفاده شد. در این روش مقدار ۱۰ گرم خاک توزین و در ارلن مایر ۱۲۵ میلی‌لیتر ریخته شد و ۲۰ میلی‌لیتر از محلول DTPA به آن اضافه شد، سپس در ظرف بسته شد و به مدت دو ساعت با دمای ۱۴۵ درجه سلسیوس با شیکر دورانی دوران داده شد و در نهایت با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف و مقدار آن با دستگاه اتمیک قرائت شد [۲۳]. در پایان فصل زراعی از بخش‌های مختلف (ریشه، برگ و ساقه، میوه و پوست) گیاهان، برای سنجش مقدار تجمع کادمیم نمونه‌برداری به عمل آمد. در این مقاله منظور از پوست گندم همان پوسته دانه گندم و منظور از میوه و پوست اسفناج به ترتیب غده (ریشه غده‌ای) و پوست غده است. بخش‌های مختلف نمونه‌های

که با افزودن نیترات کادمیم<sup>۱</sup> پودری شکل به خاک طی چند مرحله و تهیه مخلوط یکنواخت، حاصل شد. به این صورت که نیترات کادمیم مورد نیاز برای ۲۰۰۰ کیلوگرم معادل ۲۷۵ گرم محاسبه شد و ابتدا در ۵ کیلوگرم خاک نرم و کاملاً خشک مخلوط شد، سپس مخلوط حاصل با افزودن خاک، به وزن ۵۰ کیلوگرم درآمد و پس از آن، با افزودن خاک و اختلاط به وزن ۲۰۰ کیلوگرم رسانده شد و این عمل طی چند مرحله، تا رسیدن خاک به وزن ۲۰۰۰ کیلوگرم ادامه پیدا کرد. عمل اختلاط در اول پاییز صورت گرفت و عملیات کاشت، داشت و برداشت از فروردین تا شهریور به طول انجامید. قبل از مرحله کاشت در دو نوبت به فاصله دو ماه خاک تیمارها با افزودن آب به حالت اشباع در آمد. فاکتور گیاه یعنی چهار گیاه زراعی رایج در ایران شامل گندم، اسفناج، خیار و هویج بود. مراحل کاشت، داشت و برداشت محصولات در این تحقیق به ترتیب اوایل اسفند تا اواخر خرداد برای گندم، اواسط فروردین تا اواسط تیر برای خیار، اوایل فروردین تا اواخر خرداد برای اسفناج و اواسط اردیبهشت تا اواخر شهریور برای هویج بود. خاک مورد استفاده بعد از بررسی خاک‌های مختلف، از اراضی مزرعه چهارصد هکتاری مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر (کرج) بعد از دوبار الک کردن با مش ۲ میلی‌متر انتخاب شد. قبل از شروع عملیات زراعی از خاک مورد نظر نمونه‌برداری و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد (جدول ۱). به منظور جلوگیری از آلودگی محیط به کادمیم، برای کاشت از گلدان‌های پلاستیکی استوانه‌ای به قطر ۴۰ و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

فاکتور	واحد	مقدار
کادمیم	mg/kg	۰/۰۳
ظرفیت تبادل کاتیونی <sup>۲</sup>	meq/100gr	۱۱
بی کربنات		۳/۲
کلرور		۳/۳۲
سولفات		۳/۸
کلسیم	meq/L	۴/۱۲
منیزیم		۳/۳۱
سدیم		۲/۷۲
کربن آلی	%	۱/۲۵
رس	%	۲۳
سیلت	%	۴۲
ماسه	%	۳۵
pH	-	۷/۴

<sup>3</sup> Penman Monteith

<sup>4</sup> Diethylen Triamine Pentaacetic Acid (DTPA)

<sup>1</sup> Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

<sup>2</sup> Cation Exchange Capacity

برداشت شده بعد از شستشو با استفاده از یک چاقوی پلاستیکی از هم جدا و با آب مقطر شسته و سپس در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت سه روز خشک شدند. نمونه‌های خشک شده هر تکرار بعد از اختلاط کامل آسیاب و پودر شدند. سپس مقدار ۵ گرم از پودر حاصل با افزایش تدریجی دما از ۲۵ تا ۴۵۰ درجه سلسیوس طی ۱/۵ ساعت و نگهداری در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت، سوزانده و خاکستر شد. خاکستر حاصل در ۲۰ میلی لیتر محلول (HCL:HNO<sub>3</sub>, 3:1V/V) ریخته شد و با آب مقطر ۱:۲۰ رقیق شد و سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی با کوره گرافیت<sup>۱</sup> آنالیز شد [۲].

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری برای صفات مورد بررسی، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS، نخست آنالیز واریانس شدند و سپس میانگین‌های صفات در سطوح فاکتورهای آزمایشی از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح یک درصد مورد مقایسه آماری قرار گرفت. به این منظور در تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، ابتدا معنی دار بودن تفاوت منابع تغییرات (تیمارها، تکرارها و اثرات متقابل) بر اساس مقدار F سنجیده شد و در مرحله بعد برای تفکیک اجزای تیمارها و گروه‌بندی داده‌ها، آزمون معنی دار بودن میانگین داده‌ها به روش استاندارد دانکن انجام شد.

### ۳- نتایج و بحث

جدول تجزیه آنالیز واریانس تجمع فلز کادمیم در بخش‌های مختلف گیاهان مورد مطالعه نشان داد که در هر یک از چهار اندام ریشه، برگ و ساقه، میوه و پوست اثر گیاه، تیمار و نیز اثر متقابل گیاه و تیمار بر مقدار تجمع کادمیم در سطح یک درصد معنی دار شده است (جدول ۳).

جدول ۳- آنالیز واریانس صفات مورد بررسی در گیاهان مورد مطالعه

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)		
		پوست	میوه (محصول)	ساقه و برگ
گیاه	۳	۵.۳۷۳**	۳/۱۹**	۳/۳۱**
تیمار	۲	۱۵/۴۳۲	۱۲/۱۸**	۱۱/۲۳۸**
تیمار×گیاه	۶	۱/۰۲۴**	۰/۵۶۶**	۰/۴۲۹**
خطا	۳۲	۰/۰۲۳	۰/۰۴۲	۰/۰۰۴
ضریب تغییرات	۱۱/۲۶	۶/۸۳	۱۰/۰۶	۵/۷

\*\* معنی دار در سطح یک درصد

نتایج تأثیر گیاه بر میانگین تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف بر اساس آزمون دانکن در جدول ۴ نشان داده شده است. بررسی نتایج

<sup>1</sup> 4100ZL, Cupertion, Perkin Elmer

نشان می‌دهد که ریشه همه گیاهان از لحاظ مقدار تجمع کادمیم در گروه‌های آماری متمایزی قرار گرفته‌اند. بالاترین نرخ تجمع کادمیم در بخش ریشه معادل ۱/۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به گندم و کمترین آن معادل ۰/۳۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به خیار بوده است. سایر گیاهان به ترتیب اسفناج و هویج معادل ۱/۴۰۷ و ۰/۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بین این دو گونه قرار می‌گیرند. از نظر نرخ تجمع کادمیم در برگ و ساقه به ترتیب گونه‌های اسفناج و هویج با ۱/۸۴ و ۱/۳۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رده اول و آخر قرار گرفته و گیاهان خیار و گندم با میزان مساوی ۱/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مابین آنها قرار دارند. بررسی نتایج میانگین نرخ تجمع کادمیم در میوه نشان می‌دهد که میوه اسفناج با نرخ تجمع کادمیم معادل ۱/۱۰۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رده اول و سایر گیاهان به ترتیب هویج، خیار و گندم با نرخ تجمع ۰/۹۷۸، ۰/۹۰۲ و ۰/۵۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج نرخ تجمع کادمیم در پوست گیاه‌های مورد تحقیق نشان می‌دهد که خیار با نرخ تجمع ۲/۸۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم در پوست دارای بیشترین نرخ تجمع بوده و هویج، اسفناج و گندم به ترتیب با ۲/۳۹۹، ۱/۱۸۹ و ۰/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم رده‌های بعدی را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۴- میانگین تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف گیاهان مورد بررسی (mg/kg)

گیاه	پوست	میوه (محصول)	ساقه و برگ	ریشه
هویج	۲/۳۹۹ <sup>b</sup>	۰/۹۷۸ <sup>b</sup>	۱/۳۵۴ <sup>c</sup>	۰/۵۵ <sup>c</sup>
اسفناج	۱/۱۸۹ <sup>c</sup>	۱/۱۰۵ <sup>a</sup>	۱/۸۴ <sup>a</sup>	۱/۴۰۷ <sup>b</sup>
خیار	۲/۸۹۷ <sup>a</sup>	۰/۹۰۲ <sup>b</sup>	۱/۵۲ <sup>b</sup>	۰/۳۰۶ <sup>d</sup>
گندم	۰/۷۵ <sup>d</sup>	۰/۵۳ <sup>c</sup>	۱/۵۲ <sup>b</sup>	۱/۵۳ <sup>a</sup>

اعداد دارای حروف یکسان در هر ستون، در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی داری ندارند.

بررسی نتایج تأثیر تیمارها (سطوح مختلف غلظت کادمیم) بر مقدار تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف در جدول ۵ نشان می‌دهد که در هر چهار اندام، مقدار تجمع کادمیم در تیمار سوم نسبت به سایر تیمارها در سطح یک درصد دارای افزایش معنی دار بوده است. در این تیمار مقدار تجمع کادمیم در پوست، میوه (محصول)، ساقه و برگ و ریشه به ترتیب معادل ۳/۴۴۵، ۲/۱۰۹۸۸/۷۵۷، ۱/۵۰۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک محصول بوده و پس از آن به ترتیب تیمار دوم و اول قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در تمام گیاهان، میزان تجمع کادمیم در ریشه حداقل و در پوست حداکثر است.

جدول ۵- مقایسه میانگین تجمع کادمیم در اندام‌های مختلف در

تیمارهای مورد بررسی (mg/kg)

تیمار	پوست	میوه (محصول)	ساقه و برگ	ریشه
شاهد	۰/۰۸۰ <sup>c</sup>	۰/۰۴۱ <sup>c</sup>	۰/۰۸۲ <sup>c</sup>	۰/۰۴۶ <sup>c</sup>
۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک کادمیم	۲/۱۸۳ <sup>b</sup>	۰/۹۳۳ <sup>b</sup>	۱/۸۶۷ <sup>b</sup>	۰/۷۰۶ <sup>b</sup>
۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک کادمیم	۳/۴۴۵ <sup>a</sup>	۱/۷۵۷ <sup>a</sup>	۲/۹۸۸ <sup>a</sup>	۱/۵۰۸ <sup>a</sup>

اعداد دارای حروف یکسان در هر ستون، در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی داری ندارند.

بررسی اثر متقابل تیمارهای آزمایشی و گیاهان مورد بررسی در جدول ۶ نشان می‌دهد که در سطح یک درصد در تمام گیاهان مقدار تجمع کادمیم در اندام‌های پوست، میوه (محصول)، ساقه و برگ و ریشه در تیمار سوم نسبت به سایر تیمارها دارای افزایش معنی دار بوده و در رده‌های بعدی گروه‌بندی به ترتیب تیمارهای دوم و اول قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که وضعیت ارتباط بین تیمارها در گیاهان مختلف متفاوت است. به این مفهوم که روند تغییرات بین سطوح مختلف تیمارهای آزمایشی در گیاهان مورد بررسی یکسان نبوده و در بعضی گیاهان از تغییرات زیاد و در گروه دیگر از تغییر کمی برخوردار می‌باشند (جدول ۶). نتایج پژوهش نشان می‌دهد، مقدار تجمع کادمیم در اسفناج بیشتر از سایر گیاهان مورد مطالعه است. این مطلب در مورد سه بخش از اندام اسفناج از جمله ریشه، برگ و ساقه و میوه صادق بوده و نشانگر توان بالای این گیاه در جذب و تجمع کادمیم، در مقایسه با سایر گیاهان مورد

مطالعه است. بررسی نتایج مربوط به پوست محصولات نشان می‌دهد که میزان جذب و تجمع کادمیم در پوست میوه خیار از بیشترین میزان در بین گیاهان مورد مطالعه برخوردار است. این نتیجه با نتایج حاصل از پژوهش سایر محققان همخوانی دارد [۹].

۲۴ و ۲۵]. به طور کلی مقدار تجمع کادمیم در بخش‌های مختلف گیاهان مورد مطالعه به ترتیب زیر بود:

ریشه: خیار، هویج، گندم، اسفناج

برگ و ساقه: هویج، خیار، گندم، اسفناج

میوه یا محصول: گندم، خیار، هویج، اسفناج

پوست میوه: گندم، اسفناج، هویج، خیار.

نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که میزان تجمع کادمیم در بین گیاهان مورد بررسی به ترتیب شامل کاهو، اسفناج و تربچه است [۲۵]. بر اساس تحقیقات شریعت و فرشی مقدار تجمع کادمیم در گیاهان به ترتیب در کاهو، تربچه، چغندر قند و اسفناج بوده است [۲۶]. نتایج تحقیقات ترابیان و مهجوری نشان می‌دهد که ترتیب مقدار تجمع کادمیم در محصولات زراعی جنوب تهران که با فاضلاب آبیاری می‌شوند به صورت اسفناج، شاهی، تربچه، گشنیز، کاهو، جعفری و نعناع بوده است [۹].

بررسی نتایج این تحقیق، نشان می‌دهد که در گیاهان مورد مطالعه، میزان تجمع کادمیم در اندام هوایی (ساقه و برگ) بیشتر از اندام زمینی (ریشه) است. این نتیجه با نتایج اغلب پژوهش‌های قبلی همخوانی دارد. در این تحقیقات کادمیم فلزی با تحرک بالا و قابلیت جذب راحت در گیاه معرفی شده و گزارش شده که به راحتی

جدول ۶- اثرات متقابل گیاه و تیمار بر مقدار تجمع کادمیم (mg/kg)

گیاه	تیمار	پوست	میوه	ساقه و برگ	ریشه
شاهد	شاهد	۰/۰۶۹ <sup>i</sup>	۰/۰۳۷ <sup>i</sup>	۰/۰۶ <sup>h</sup>	۰/۰۳۱ <sup>ij</sup>
هویج	۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم در خاک	۲/۵۰۷ <sup>d</sup>	۰/۶۴ <sup>g</sup>	۱/۸۷۵ <sup>e</sup>	۰/۴۶ <sup>fg</sup>
	۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم	۴/۶۲۳ <sup>b</sup>	۱/۵۹۳ <sup>b</sup>	۲/۷۴۷ <sup>c</sup>	۱/۱۶ <sup>d</sup>
شاهد	شاهد	۰/۰۳۹ <sup>i</sup>	۰/۰۳ <sup>ij</sup>	۰/۱ <sup>g</sup>	۰/۰۴۸ <sup>b</sup>
اسفناج	۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم	۱/۲۴۷ <sup>g</sup>	۱/۴۷۷ <sup>cd</sup>	۱/۸۶۳ <sup>e</sup>	۱/۳۳۳ <sup>c</sup>
	۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم	۲/۲۸۳ <sup>c</sup>	۲/۸۱ <sup>a</sup>	۳/۵۷۵ <sup>a</sup>	۲/۸۴ <sup>a</sup>
شاهد	شاهد	۰/۱ <sup>h</sup>	۰/۰۳ <sup>ij</sup>	۰/۰۴۲ <sup>hi</sup>	۰/۰۳۲ <sup>i</sup>
خیار	۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم	۳/۴۱ <sup>c</sup>	۱/۱۸ <sup>e</sup>	۰/۲۱۷ <sup>d</sup>	۰/۳۹۳ <sup>g</sup>
	۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم	۵/۱۸۳ <sup>a</sup>	۱/۴۹۷ <sup>c</sup>	۲/۷۲ <sup>c</sup>	۰/۴۹۳ <sup>f</sup>
شاهد	شاهد	۰/۰۳۳ <sup>i</sup>	۰/۰۲۵ <sup>j</sup>	۰/۰۴۵ <sup>hi</sup>	۰/۰۲۸ <sup>j</sup>
گندم	۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم	۱/۵۷۴ <sup>g</sup>	۰/۴۳۷ <sup>h</sup>	۱/۵۸۵ <sup>f</sup>	۰/۶۴ <sup>e</sup>
	۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیم	۱/۶۹ <sup>f</sup>	۱/۱۲۷ <sup>e</sup>	۲/۹۳ <sup>b</sup>	۱/۵۴ <sup>b</sup>

اعداد دارای حروف یکسان در هر ستون، در سطح احتمال یک درصد فاقد تفاوت معنی داری می‌باشند.

از طریق پوست ریشه جذب و سپس از راه سیمپلاستی و یا آپوپلاستی وارد بافت چوب شده و به اندام‌های فوقانی گیاهان منتقل می‌شود [۲۴ و ۲۷].

نتایج مربوط به تیمارهای مختلف غلظت کادمیم و مقایسه آن با نتایج تحقیقات قبلی، نشان می‌دهد که مطابق نتایج اکثر محققان، مقدار جذب و تجمع کادمیم در تمام گیاهان مورد مطالعه، نسبت مستقیم با غلظت کادمیم در محیط ریشه داشته و با افزایش غلظت، مقدار جذب و تجمع در گیاه‌های مورد بررسی افزایش می‌یابد [۲۸ و ۲۹].

بررسی نتایج مربوط به اثر متقابل تیمارهای آزمایشی و گیاهان مورد بررسی، نشان می‌دهد که در سطح یک درصد، در تمام گیاهان مقدار تجمع کادمیم تمام اندام‌ها در تیمار سوم نسبت به سایر تیمارها از مقدار بالایی برخوردار بوده و در رده‌های بعدی گروه‌بندی به ترتیب تیمارهای دوم و اول قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که به جز در تیمار شاهد، در سایر تیمارها مقدار تجمع کادمیم در تمام بخش‌های گیاهان مورد مطالعه بیش از حد مجاز برای مصارف انسانی است.

نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مقدار تجمع کادمیم در گیاهان مورد مطالعه، نسبت مستقیم با غلظت آن در محیط ریشه داشته و با افزایش غلظت کادمیم خاک میزان تجمع آن در اندام مختلف گیاهان مورد مطالعه افزایش می‌یابد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که میزان افزایش در جذب و تجمع کادمیم در گیاهان مختلف، به‌ویژه در اندام مختلف گیاهان مورد مطالعه یکسان و متناسب با افزایش میزان کادمیم خاک نیست. در بعضی گیاهان مانند اسفناج این افزایش حداقل و در گیاه هویج حداکثر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که میزان جذب در بخش‌های مختلف هر یک از گیاهان مورد بررسی از دامنه تغییرات وسیع‌تری در مقایسه با میانگین جذب در هر یک از گونه‌ها برخوردار است.

این اختلاف در اسفناج حداقل و در هویج و گندم از حداکثر میزان در بین گیاهان مورد مطالعه برخوردار است. بررسی میزان تجمع کادمیم در اندام مختلف گیاهان مورد مطالعه نشان می‌دهد در بخش ریشه، بیشترین تجمع مربوط به گیاه اسفناج است که در مورد این گیاه، ریشه فاقد ارزش خوراکی است ولی در میزان پالایش و حذف کادمیم از خاک آلوده حائز اهمیت است. در این بخش گندم، هویج و خیار در درجات اهمیت بعدی قرار دارند. در برگ و ساقه به ترتیب اسفناج و گندم در مقام اول و دوم میزان تجمع کادمیم قرار دارند. برگ و ساقه این دو گیاه با توجه به نوع مصارفشان (مصارف انسانی و خوراک دام) دارای اهمیت بوده و نتایج حاصل می‌تواند در برنامه‌ریزی برای کاشت این محصولات در خاک‌های آلوده و یا استفاده از آب‌های آلوده به کادمیم در آبیاری آن‌ها و همچنین در

مصرف محصولات کشت شده در مناطق آلوده مفید باشد. نتایج مربوط به جذب و تجمع کادمیم در میوه و محصولات نشان می‌دهد که میزان جذب در میوه اسفناج از حداکثر و در محصول گندم (دانه گندم) از حداقل میزان برخوردار است، نتایج نشان می‌دهد که میزان تجمع کادمیم در میوه خیار در مقایسه با گیاهان دیگر از میزان کمی برخوردار است.

بررسی نرخ تجمع کادمیم در پوست محصولات نشان می‌دهد که میزان تجمع در پوست خیار از حداکثر میزان برخوردار بوده و در مرحله دوم پوست هویج دارای بیشترین نرخ تجمع کادمیم است. با توجه به سهم این دو محصول در سبد غذایی مردم، برای کاهش میزان انتقال کادمیم از خیار و هویج حاصل از آب و خاک آلوده به کادمیم، کندن پوست این دو محصول قبل از مصرف می‌تواند مانع از ورود بخش قابل توجهی از کادمیم تجمع یافته در این دو محصول باشد.

با توجه به تمایل سبزی و صیفی‌جات به تجمع کادمیم در ساقه و برگ و نقش آن در زنجیره غذایی انسان توصیه می‌شود در حد امکان از کاشت این محصولات در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و همچنین استفاده از آب‌های آلوده به فلزات سنگین در آبیاری این محصولات خودداری شود. این محدودیت به‌ویژه در مورد اسفناج با توجه به تمایل شدید آن در جذب و تجمع کادمیم از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین توصیه می‌شود برای اطمینان از کاهش انتقال کادمیم از محصولاتی مثل خیار و هویج که در مناطق مشکوک به آلودگی کشت شده‌اند، مصرف آنها به‌صورت بدون پوست صورت گیرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی میزان تجمع کادمیم در ساقه و برگ گیاهان مورد تحقیق که دارای ارزش علوفه‌ای می‌باشند، نشان می‌دهد که این میزان در ساقه و برگ اسفناج از حداکثر میزان (۱/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و گندم، خیار و هویج به ترتیب ۱/۵۳، ۱/۵۲ و ۱/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم در رده‌های بعدی می‌باشد. با توجه به نرخ بالای تجمع در ساقه و برگ گیاهان مورد بررسی، استفاده از این بخش از محصولات پرورش یافته در آب و خاک آلوده به کادمیم به‌عنوان علوفه توصیه نمی‌شود.

#### ۵- قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی شماره ۸۹/۱۲۳۸ است که در مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی اجرا شده است. به این وسیله از همکاری عوامل مربوطه صمیمانه قدردانی می‌شود.

1. Ali-Ehyae, M. (1994). *Chemical analysis methods of soil*, Water and Soil Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian)
2. Chaney, R. L. (1980). "Health risk associated with toxic metals in municipal sludge." Bilton, G et al (Eds.) *Sludge-health-risk of land application*, Ann Arbor Sci. Pub., MI. 59-83.
3. Chaney, R. L., Malik, M., Li, Y. M., Brown, S. L., Angle, J. S., and Baker, A. J. M. (1997). "Phytoremediation of soil metals." *J. Current Opinions in Biotechnology*, 8, 279-284.
4. Cernik, M., Federer, P., Borkovec, M., and Sticher, H. (1994). "Modeling of heavy metal transport in a contaminated soil." *J. Environ. Qual.*, 23, 1239-1248.
5. Christensen, T. H. (1984). "Cadmium soil sorption at low concentration: I effect of time, cadmium load, pH, and calcium." *Water, Air and Soil Pollut.*, 21, 105-114.
6. Farshi, A. A., Shariati, M. R., Jarollahi, R., Shahabifar, M., and Tavallaei, M. M. (1999). *An estimate of water requirement of main field crops and orchards in Iran*, Vol. 1: Field Crops. Soil and Water Research Institute. (In Persian)
7. Fazeli, M. S. (1998). "Enrichment of heavy metal in paddy crops irrigated by paper mill effluents near Nanjangud, India Environmental." *J. Geology*, 4(34), 42-54.
8. Gardiner, D. T., Miller, R. W., Badamchian, B., Azzari, A. S., and Sisson, D. R. (1995). "Effects of repeated sewage sludge applications on plant accumulation of heavy metals." *J. Agri. Ecosystems and Env.*, 55, 1-6.
9. Gavi, F., Basta, N. T., and Raun, W. R. (1997). Wheat grain cadmium as affected by long term fertilization and soil acidity." *J. Environ. Qual.*, 26 (1), 265-271.
10. Giordano, P. M., and Mays, D. A. (1997). "Yield and heavy metal content of several vegetable species grown in soil amended with sewage sludge." *Biological Implications of Heavy Metals in the Environment, ERDA Rep. Conf. 750929*, Oak, Ridge, Tennessee.
11. Givianraad, M. H., Saadeghi, T., Laarijani, K., and Hosseini, E. (2011). "Determination of cadmium and lead in fresh vegetables such as lettuce and meant in different soils of southern Tehran." *J. Food Science and Nutrition*, 8 (2(30)), 38-43. (In Persian)
12. Hattori, H., Asari, E., and Chino, M. (2002). "Estimate of cadmium concentration in brown rice." *17<sup>th</sup> World Conference of Soil Science*, Thailand.
13. Jafarzadeh, N. (1997). "Assessment the wastewater use effects in Shiraz on heavy metals concentration on soil and plants." *Proceeding of the 6<sup>th</sup> Water and Soil Conference, Iranian Soc. of Irrig. and Water Eng.*, Kerman. (In Persian)
14. Kabatta, A., and Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants*, 3<sup>rd</sup> Ed., CRC Press, Boca Raton.
15. Khosravi, F., Savabeghi, G.H., and Farahbakhsh H. (2009). "The effect of potassium chloride on cadmium uptake by canola and sunflower in a contaminated soil." *J. Soil and Water*, 23(3), 28-35. (In Persian).
16. Lasat, M. M. (2003). "The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soil." *J. Env. Pollution*, 113, 12-27.
17. Lucho-Constantino, F., Prieto-García, C. A., Del Razo, L. M., Rodríguez-Vázquez, R., and Poggi-Varaldo, H. M. (2005). Chemical fractionation of heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico." *J. Agri, Ecosystems and Env.*, 108, 57-71.
18. Mostashari, M. (2002). "Investigation of Qazvin soils and plants pollution with heavy metals during irrigation with wastewater." *Proceeding of the 7<sup>th</sup> Water and Soil Conference, Iranian Soc. of Irrig. and Water Eng.*, Kerman. (In Persian).

19. Mohammadi, M., Habibi, D., Ardakani, M., and Asgharzade, A. (2010). "Investigation of Cd adsorption and accumulation from contaminated soil in annual Alfalfa (*medicago scutellata*)." *J. Crops Ecophysiology*, 2(3), 247-260. (In Persian).
20. Okoronkwo, N. E., Igwe, J. C., and Onwuchekwa, E. C. (2005). "Risk and health implications of polluted soils for crop production." *African Journal of Biotech.*, 4(13), 1521-1524.
21. Ramos, I., Esteban, E., Lucena, J. J., and Gárat, A. (2002). "Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *lactuca sp.* Ca-Mn interaction." *J. Plant Science*, 162(5), 761-767.
22. Sanita di Toppi, L., and Gabbrielli, R. (1999). "Response to cadmium in higher plants—review." *J. Env. and Experimental Botany*, 41, 105-130.
23. Sauerbeck, D. R. (1991). "Uptake and availability of heavy metals." *J. Water, Air and Soil Pollution*, 57, 227-237.
24. Shariat, M., and Farshi, S. (1997). "Heavy metal accumulation in South Tehran vegetable crops." *J. Soil and Water*, 5, 3-14. (In Persian).
25. Sparks, D.L., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., and Tabatabai, M. (1996). *Methods of soil analysis*, Madison pub., USA.
26. Torabian, A., and Mahjori, M. (2002). Heavy metals uptake by vegetable crops irrigated with wastewater in south tehran." *J. Environ. Study*, 16(2). (In Persian)
27. Yargholi, B. (2007). *Investigation of the Firozabad wastewater quality-quantity variation for agricultural use*, Final Research Report of AERI, Tehran, Iran. (In Persian)
28. Yargholi, B., Abbasi, F., and Liaghat, A.M. (2009). "Investigation of cadmium uptake in root region and accumulation in different parts of common summer crops in Iran." *J. Agricultural Engineering Research*, 10(2), 31-44. (In Persian).
29. Yargholi, B., Azimia, A. A., Baghvand, A., Abbasi, F., Liaghat, A.M., and Asadelahfardi, Gh.R. (2010). "Investigation of cd adsorption and accumulation from contaminated soil in different parts of root crops." *J. Water and Wastewater*, 20-4 (72), 60-70. (In Persian)