

## ارزیابی برخی شاخص‌های رشدی و توانایی تجمع کادمیوم در بخش‌های هوایی و ریشه‌ای پنیرک (*Malva parviflora* L.) در شرایط هیدروپونیک

پرژک ذوفن<sup>۱\*</sup>، الهام نیسی<sup>۱</sup> و سعادت رستگارزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم، گروه زیست‌شناسی

<sup>۲</sup>اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم، گروه شیمی

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۷

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۹



### چکیده

در این مطالعه جذب و تجمع کادمیوم و برخی شاخص‌های رشدی در پنیرک در شرایط کشت هیدروپونیک بررسی شد. به دنبال جمع‌آوری بذر از منطقه صنعتی شرکت فولاد خوزستان، بذرها در گلدان‌های حاوی خاک هوموس کشت و در شرایط کنترل شده اتاق کشت نگهداری شدند. گیاهان ۴۷ روزه به محیط کشت‌های غذایی مایع حاوی ۰ (شاهد)، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم منتقل شدند و برداشت گیاهان در زمان‌های ۰، ۱، ۲، ۶، ۱۰ و ۱۴ روز پس از اعمال تیمارهای کادمیوم انجام گردید. بر اساس این نتایج، با افزایش غلظت کادمیوم در محیط، غلظت آن در اندام‌های هوایی و ریشه‌ای افزایش یافت. با وجود این، هم غلظت و هم جذب کادمیوم در ریشه‌ها مقادیر بالاتری را در مقایسه با بخش‌های هوایی نشان داد. حداکثر غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه‌ای به ترتیب ۲۲۴ و ۱۵۴۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک در غلظت ۱۰۰ میکرومولار سنجش شد. در هر برداشت زمانی با افزایش غلظت کادمیوم، طول، وزن تر و خشک اندام‌های هوایی و ریشه‌ای و سطح پهنک و شاخص تحمل کاهش معنی‌داری را نسبت به شاهد نشان دادند. با توجه به فاکتور انتقال کمتر از یک، به نظر می‌رسد که ریشه‌های پنیرک اساساً از توانمندی بالاتری برای تجمع کادمیوم در قیاس با بخش‌های هوایی برخوردار هستند. بر اساس این نتایج، احتمالاً پنیرک با کاهش انتقال بیشتر کادمیوم به بخش‌های هوایی از بروز اثرات سمی این فلز ممانعت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: کادمیوم، جذب، تغلیظ زیستی، رشد

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۶۱۳۳۳۳۱۰۴۵، پست الکترونیکی: p.zoufan@scu.ac.ir

### مقدمه

طولانی همراه با جریان هوا کمک می‌کند (۳). کادمیوم به علت تحرک بالا و ویژگی آب دوستی اش به سهولت توسط ریشه گیاهان جذب و از طریق آوندهای چوبی با کمک جریان تعرق به بخش‌های هوایی منتقل می‌شود و به‌ویژه در برگ‌ها تجمع می‌یابد که این می‌تواند باعث ورود آن به زنجیره‌های غذایی شده، سلامت و حیات موجودات زنده را تهدید نماید (۱۷). بنابراین، افزایش غلظت کادمیوم در خاک منجر به افزایش غلظت آن در بافت‌های گیاهی می‌گردد. برخی مطالعات حاکی از آن

کادمیوم یک فلز سنگین به شدت سمی و جزو عناصر غیر ضروری برای رشد و نمو گیاهی است که استفاده از کودهای فسفاته و انجام فعالیت‌های صنعتی منجر به آزادسازی آن در خاک می‌شود (۲۴). کادمیوم حاصل از فعالیت‌های انسانی دارای قابلیت تحرک بالاتری نسبت به کادمیوم ایجاد شده در اثر فعالیت‌های طبیعی زمین در خاک می‌باشد. تجمع کادمیوم در خاک نامطلوب است، زیرا توسط میکروارگانیزم‌های خاک تجزیه نمی‌شود، علاوه بر این، فرار بودن این فلز به انتقال آن در فواصل

گیاهی بیش‌انباشتگر کادمیوم، بیشتر آنها به دلیل داشتن بیوماس پایین، میزان رشد آهسته، محدودیت‌های جغرافیایی و آب و هوایی و عدم تحمل غلظت‌های بالای کادمیوم برای اهداف گیاه‌پالایی (Phytoremediation) در سطح وسیع مناسب نمی‌باشند (۱۷). تعداد محدودی از بیش‌انباشتگرهای کادمیوم برای پاکسازی محیط در شرایط میدانی انتخاب شده‌اند که از آنها می‌توان به *Thlaspi caerulescens* (۲۲)، *Arabidopsis halleri* (۳۰)، *Phytolacca americana* (۱۹)، *Picris divaricata* (۱۲) و *Gnaphalium affine* (۱۶) اشاره نمود. در بیشتر گیاهان غلظت کادمیوم در ریشه‌ها بالاتر از بخش‌های هوایی است و تنها در گیاهان بیش‌انباشتگر که تحمل فوق‌العاده بالایی به تجمع برگی فلزات سنگین دارند، عکس این وضعیت صادق است (۱۱). برای کاهش جذب کادمیوم توسط سلول‌های ریشه، گیاهان از راهکارهایی مانند خروج کادمیوم و غیر متحرک‌سازی آن توسط اسیدهای آلی آزاد شده در ریزوسفر استفاده می‌کنند. با ورود کادمیوم به سلول، مکانیسم‌های داخل سلولی مانند ورود به واکوئل و کلاته کردن با کمپلکس‌های فلزی و فعالیت آنتی‌اکسیدان‌ها منجر به افزایش تحمل در برابر آسیب‌های ناشی از این فلز می‌گردد (۱۳).

مطالعات فراوانی برای بررسی توانایی گونه‌های مختلف گیاهی در جذب و تجمع کادمیوم انجام و نتایج متفاوتی در این رابطه ارائه شده است. کشت گیاهان *Lactuca sativa*، *T. arvensis* و *T. caerulescens* در غلظت ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم مشخص کرد که ریشه‌ها از توان بیشتری در تجمع کادمیوم نسبت به برگ‌ها برخوردار هستند (۲۱). کمترین تجمع را به ترتیب در برگ‌ها و ریشه‌ها نشان داد (۲۴). مطالعات جذب در *Juncus maritimus* و *Phragmites australis* نشان داد که کادمیوم اساساً در اندام‌های زیرزمینی تجمع بالاتری را نسبت به اندام‌های هوایی دارد (۷). تیمار کادمیوم در آفتابگردان نشان داد که

است که انتقال کادمیوم در گیاه شامل دو مرحله اساسی است (۱۷). در مرحله اول که وابسته به صرف انرژی است کادمیوم از محیط جذب ریشه می‌شود و در مرحله دوم که با نیروی تعرق تحریک می‌گردد، کادمیوم از طریق آوندهای چوبی ریشه به برگ‌ها انتقال می‌یابد. در گیاهان پیشنهاد شده است که بسیاری از ناقلان کاتیون‌های ریز مغذی دو ظرفیتی قادر به انتقال کادمیوم می‌باشند. به نظر می‌رسد که جذب کادمیوم از محیط به درون سلول‌های ریشه بواسطه ناقلانی از خانواده پروتئین‌های ZIP بنام IRT (Iron-regulated transporter) و همچنین ناقلانی از خانواده پروتئین‌های Nrap (Natural resistance-associated macrophage protein) می‌شود (۳۰). انتقال کادمیوم از ریشه‌ها به بخش‌های هوایی توسط آوندهای چوبی یک عامل تعیین‌کننده در تجمع این فلز در برگ‌هاست. در بارگیری کادمیوم به آوندهای چوبی برای انتقال از ریشه به بخش‌های هوایی ناقلان HMA مشارکت دارند که نوعی پمپ محسوب می‌شوند. برخی از این ناقلان در حجره بندی و احتباس واکوئلی کادمیوم در سلول‌های ریشه نقش مهمی ایفا می‌نمایند (۳۲). با توجه به اثرات سمی کادمیوم برای موجودات زنده، تلاش‌های فراوانی برای حذف یا کاهش این فلز از محیط با استفاده از روش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام شده است. در سال‌های اخیر به استفاده از گیاهان به عنوان یک ابزار بیولوژیک ارزان قیمت و دوستدار محیط زیست برای حذف فلزات سنگین از محیط توجه فراوانی شده است. در راستای این هدف، بسیاری از گونه‌های گیاهی برای بررسی توانایی تجمع کادمیوم مورد مطالعه قرار گرفته و تعداد کثیری از آنها به عنوان بیش‌انباشتگر (Hyperaccumulator) این فلز شناسایی شده‌اند (۱۷). بطور مشخص، گیاهان بیش‌انباشتگر توانایی تغلیظ بیش از ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در هر کیلوگرم وزن خشک اندام‌های هوایی را با فاکتور انتقال بالاتر از یک و بدون بروز علائم سمیت دارند (۶). علی‌رغم شناسایی بسیاری از گونه‌های

فلزات سنگین در ریشه‌ها و بخش‌های هوایی نسبت به خاک می‌باشد (۳۶)، علاوه بر این، نتایج حاصل از بررسی‌های میدانی در منطقه فوق مشخص نمود که ریشه‌های این گیاه تجمع بالاتری از کادمیوم را در مقایسه با بخش‌های هوایی نشان می‌دهند (نتایج چاپ نشده). بنابراین، این تحقیق به عنوان یک کار مقدماتی و با هدف درک بیشتر در توزیع و تجمع کادمیوم در بخش‌های هوایی و ریشه‌ای گونه *M. parviflora* (جمع‌آوری شده از منطقه صنعتی فولاد خوزستان) در شرایط کنترل شده رشدی انجام شد تا توانایی این گونه در تجمع و تغلیظ کادمیوم مورد ارزیابی قرار گیرد.

### مواد و روشها

**شرایط کشت گیاهان:** بذرهای پنی‌ریک (*Malva parviflora* L.) در اواسط اردیبهشت از منطقه صنعتی شرکت فولاد خوزستان، واقع در جنوب شرقی اهواز، جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم ۲۰ درصد و سه مرتبه شستشو با آب مقطر، برای جذب آب کافی ۲۴ ساعت در دمای اتاق در آب مقطر خیسانده شدند. برای کشت گلدانی (در سینی‌های نشاء)، بذرها در سطح خاک تجاری هوموس همراه با مقداری کود NPK (۱۴/۷:۴/۵:۱۲/۴) و در شرایط اتاق کشت با دوره نوری ۸ ساعت روشنایی/۱۶ ساعت تاریکی، میانگین شدت نور ۱۵۰ میکرومول فوتون بر متر مربع بر ثانیه و دمای شبانه‌روزی  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  قرار گرفتند. سینی‌های نشاء سه بار در هفته با آب شهری آبیاری شدند. با گذشت ۴۰ روز در حالی که گیاهان در مرحله ۴ برگی بودند به کشت هیدروپونیک با ترکیب غذایی کامل و فرمول اصلاح شده جانسون (۲۴)، pH برابر با ۵-۶ و شرایط رشدی ذکر شده به مدت یک هفته برای سازگاری انتقال یافتند. سپس با انتقال گیاهان به تانک‌های ۱۰ لیتری دارای محلول‌های غذایی جدید و حاوی غلظت‌های مختلف نیترات کادمیوم شامل ۰

ریشه‌ها قابلیت بالاتری در تجمع این فلز در مقایسه با بخش‌های هوایی دارند (۱۰). Zhang و همکاران (۲۰۱۵) با اعمال غلظت‌های مختلف کادمیوم در دو رقم *Ricinus communis* گزارش نمودند که ریشه‌ها بطور معنی‌داری توانایی بالاتری در تجمع کادمیوم در مقایسه با برگ‌ها و ساقه‌ها دارند.

Liu و همکاران (۲۰۱۶) با تیمار غلظت‌های مختلف کادمیوم گزارش نمودند که حداکثر تجمع به ترتیب در برگ‌ها، ساقه‌ها و ریشه‌های *Nicotiana tabacum* برای همه تیمارها وجود دارد. رشد *Alternanthera bettzickiana* در غلظت‌های مختلف کادمیوم مشخص کرد که اگرچه با افزایش غلظت کادمیوم تجمع آن هم در ریشه و هم در بخش‌های هوایی نسبت به شاهد افزایش می‌یابد، اما این تجمع در بخش‌های هوایی بطور قابل توجهی بالاتر است (۲۹).

برخی گونه‌های پنی‌ریک مانند *Malva sinensis* با داشتن مقادیر بالایی از فاکتورهای انتقال و تغلیظ زیستی، به عنوان بیش‌انباشتگر کادمیوم گزارش شده‌اند (۳۵). فعالیت‌های صنعتی مانند ذوب فلز می‌توانند منجر به آزادسازی فلزاتی مانند کادمیوم در محیط و افزایش قابلیت دسترسی ریشه‌ها به آن شوند. بنابراین، بررسی توزیع و تجمع فلزات سنگین در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی توسط گونه‌های گیاهی رشد یافته در این مناطق که سازگار با شرایط محیطی آن هستند، می‌تواند اطلاعات مفیدی در این رابطه با توانایی جذب این فلزات به‌ویژه برای اهداف گیاه‌پالایی و مسائل زیست‌محیطی فراهم نماید. گونه *Malva parviflora* L. به عنوان یک گیاه علفی یکساله، توزیع وسیعی در ناحیه صنعتی شرکت فولاد خوزستان واقع در جنوب شرقی اهواز دارد و دارای مصارف دارویی و غذایی فراوانی است. مطالعات میدانی اولیه در این منطقه حاکی از آن است که این گیاه به عنوان یک گونه علفی غالب در منطقه قادر به تجمع مقادیر بالاتری از برخی

تقطیر به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده شد. برای تعیین میزان کادمیوم موجود در نمونه های گیاهی ریشه و بخش هوایی از دستگاه جذب اتمی شعله ای (مدل Avanta GBC، ساخت کشور استرالیا) استفاده و مقدار این فلز برحسب میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک در مقایسه با محلول های استاندارد  $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  بیان گردید. فاکتور انتقال (Translocation factor, TF) با تقسیم غلظت کادمیوم در بخش هوایی به بخش ریشه ای و فاکتور تغلیظ زیستی (Bioconcentration factor, BF) ریشه و بخش هوایی با تقسیم نسبت غلظت کادمیوم در بافت به محیط کشت غذایی محاسبه شد. شاخص تحمل ریشه (Index of tolerance, IT) بصورت نسبت طول ریشه در محیط حاوی کادمیوم به طول ریشه در محیط فاقد کادمیوم تعریف شد (۳۴). برای محاسبه شاخص جذب (Uptake index, UI)، از حاصلضرب وزن خشک گیاه (بر حسب کیلوگرم) در غلظت کادمیوم در گیاه مطابق با Aravind و Prasad (۲۰۰۵) استفاده شد.

نتایج ارائه شده در این تحقیق، میانگین سه تکرار هستند. انجام آنالیز واریانس یکطرفه ANOVA و بعد مقایسه میانگین ها با استفاده از آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح اطمینان  $p < 0.05$  با کمک نرم افزار آماری SPSS نسخه ۲۲ انجام شد.

## نتایج

پنیرک به مدت ۱۴ روز در شرایط کشت هیدروپونیک با غلظت های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم و محلول غذایی با ترکیب کامل بدون کادمیوم (شاهد) تیمار شد. نتایج حاصل از آنالیز واریانس بررسی تأثیر غلظت کادمیوم بر شاخص های مرتبط با جذب و رشد در سطح اطمینان  $p < 0.05$  در جدولهای ۱ و ۲ ارائه شده است. در هر برداشت، میانگین تأثیر غلظت های مختلف کادمیوم بر میزان تجمع کادمیوم و شاخص های مرتبط با جذب و

(شاهد)، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار، گیاهان در روزهای ۰، ۱، ۲، ۶، ۱۰ و ۱۴ روز پس از اعمال تیمار برداشت شدند (۲۷) تا توانایی جذب و تجمع غلظت های مختلف کادمیوم توسط پنیرک طی ۱۴ روز مورد ارزیابی قرار گیرد. در طی مدت آزمایش، به منظور ممانعت از کاهش غلظت عناصر غذایی تعویض محیط کشت هر سه روز یکبار انجام و همچنین برای دسترسی ریشه ها به اکسیژن کافی از پمپ های هوادهی استفاده گردید. در هر تانک ۳۵ گیاه بر روی صفحات یونولیتی شناور به نحوی تثبیت شدند که ریشه ها کاملا در محلول غذایی و بخش های هوایی در بالای سطح یونولیت ها قرار گرفتند. در هر برداشت زمانی برای هر تیمار کادمیوم، ۳۵ گیاه (کل گیاهان موجود در یک تانک) انتخاب و از محل طوقه قطع شدند و میانگین طول، وزن تر و وزن خشک ریشه و بخش هوایی و همچنین سطح پهنک اندازه گیری شد. برای محاسبه سطح پهنک سه برگ بخش میانی برای هر گیاه انتخاب و مساحت با استفاده از کاغذ شطرنجی بر حسب میلی متر مربع محاسبه گردید.

اندازه گیری میزان کادمیوم: بلافاصله در هر برداشت زمانی به منظور حذف کادمیوم از سطح ریشه، ریشه ها در محلول ۰/۱ مولار  $Na_2-EDTA$  به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته، سپس دومرتبه با آب دوبار تقطیر شستشو شدند (۳۳). بخش های هوایی (شامل ساقه و برگ) و ریشه ها بصورت جداگانه با کمک آون در دمای  $70^\circ C$  به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند و از آنها برای تهیه پودر استفاده گردید. عصاره گیری از پودر خشک بخش های هوایی و ریشه ای مطابق با روش Kovacs و همکاران (۱۹۹۶) انجام شد. ۱۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۶۵ درصد به یک گرم از پودر خشک گیاهی اضافه شد و نمونه ها در دمای آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفتند. سپس اسید نمونه ها با استفاده از حرارت هیتر تبخیر و ۱ میلی لیتر آب اکسیژنه ۳۰ درصد اضافه گردید و تا زمان شفاف شدن حرارت دهی ادامه یافت. در نهایت نمونه هضم شده با اسید با کاغذ واتمن شماره ۴۲ صاف و عصاره شفاف با آب دوبار

رشد با یکدیگر و با گروه کنترل در سطح  $p < 0.05$  مورد مقایسه قرار گرفتند.

جدول ۱- تجزیه واریانس تاثیر غلظت های مختلف کادمیوم بر شاخص های مرتبط با جذب

میانگین مربعات										
منابع تغییرات	درجه آزادی	غلظت کادمیوم اندام	غلظت کادمیوم ریشه	تجمع کادمیوم	تجمع کادمیوم در	TF	ShBF	RBF	IT	UI
T1	غلظت کادمیوم	۲۴۸۴/۵*	۶۶۸۶/۸*	۲/۶۶*	۶/۸۵*	۰/۳۱۵*	۱۶۵۳/۸*	۴۱۱۷/۳۸*	۷۰۸۲/۴۹*	۱۷/۵۱*
	خطا	۴/۸۸	۳۴/۳۷	۰/۰۱	۰/۰۶۲	۰/۰۰۴	۸/۴۶۶	۷۸/۰۲	۱۶/۲۴	۰/۰۷۸
T2	غلظت کادمیوم	۳۱۹۰/۶۹*	۱۲۶۳۸/۵۵*	۲/۷۰۱*	۹/۹۲*	۰/۲۳۵*	۱۳۸۲/۲۹*	۵۳۴۶/۹۱*	۵۰۳۷/۲۱*	۲۲/۷۵*
	خطا	۵/۲۱۶	۷/۰۰۵	۰/۰۲۲	۰/۰۴۵	۰/۰۰	۴/۰۸۳	۲۱/۷۸	۷/۸۱	۰/۱۲۵
T6	غلظت کادمیوم	۵۸۷۸/۳۲*	۶۴۴۶۱۴/۵۳*	۲/۸۲*	۲۵۳/۵۵*	۰/۳۵۷*	۱۲۵۲/۸۳۷*	۱۰۲۵۳۶/۵*	۳۶۳۵/۷۹*	۲۸۸/۱۱*
	خطا	۳۸/۱۸	۲۳۰/۱۲	۰/۰۲۸	۰/۲۷۹	۰/۰۰۲	۱۱/۵۰	۳۶/۸۰	۱/۰۷۵	۰/۳۱۴
T10	غلظت کادمیوم	۹۳۵۶/۶۴*	۱۲۹۱۱۶۹/۵۴*	۲/۷۳*	۳۲۲/۲۲*	۰/۲۱*	۸۷۱/۱۱*	۸۵۰۴۰/۵۱*	۱۱۵۱/۰۶*	۳۶۳/۴۶*
	خطا	۶۴/۸۷	۲۷۰/۱۴	۰/۰۰۹	۱/۱۳۱	۰/۰۰	۲۸/۰۳	۱۲۸۶/۳۳	۳/۳۴	۱/۲۰
T14	غلظت کادمیوم	۲۶۰۱۸/۲۴*	۱۸۰۷۸۸/۲۶*	۳/۲۳*	۲۲۵/۸*	۰/۲۴۲*	۱۱۰۱/۴۹*	۶۴۶۸۸/۱۲*	۴۱۳/۸۰*	۲۶۷/۳۷*
	خطا	۴۸/۹۱	۴۲۵/۲۴	۰/۱۱۵	۳/۴۰	۰/۰۰	۷/۴۷	۸۹/۸۶	۴/۷۰	۴/۶۸

\* معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد. TF فاکتور انتقال، ShBF فاکتور تغلیظ زیستی اندام هوایی، RBF فاکتور تغلیظ زیستی ریشه، IT شاخص تحمل، UI شاخص جذب.

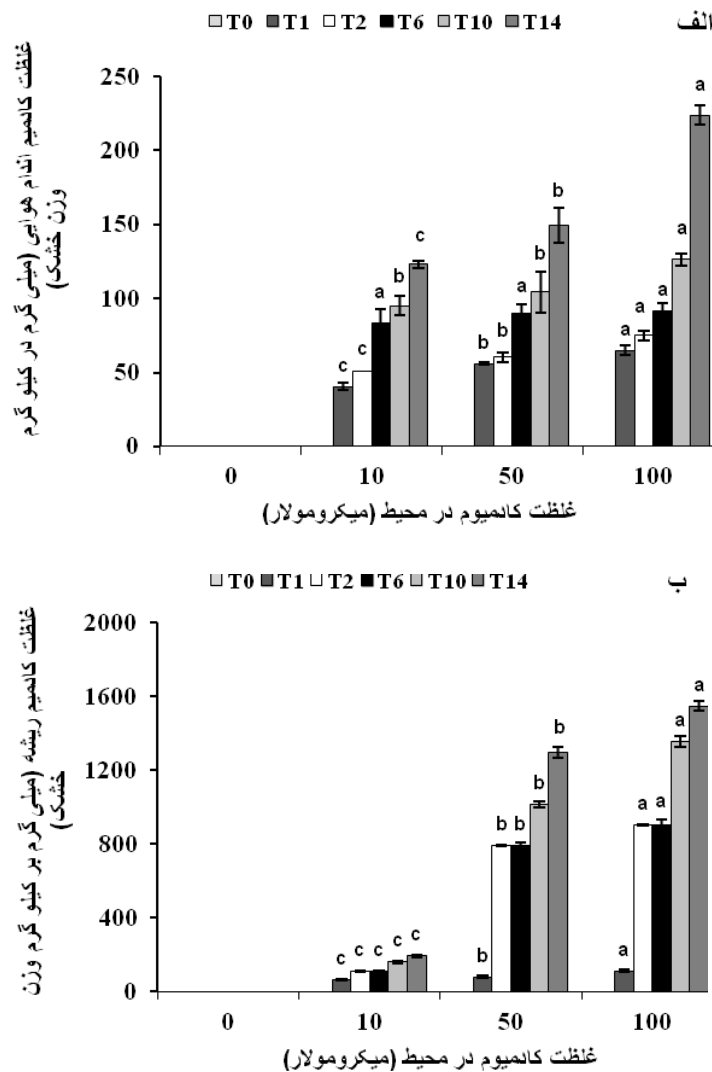
جدول ۲- تجزیه واریانس تاثیر غلظت های مختلف کادمیوم بر شاخص های رشدی

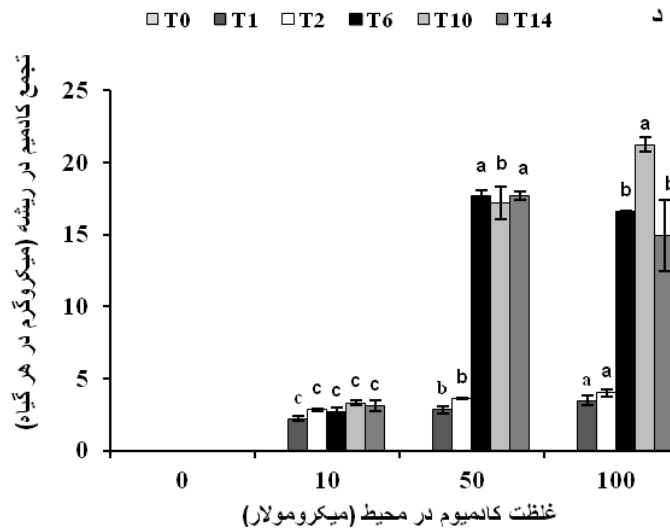
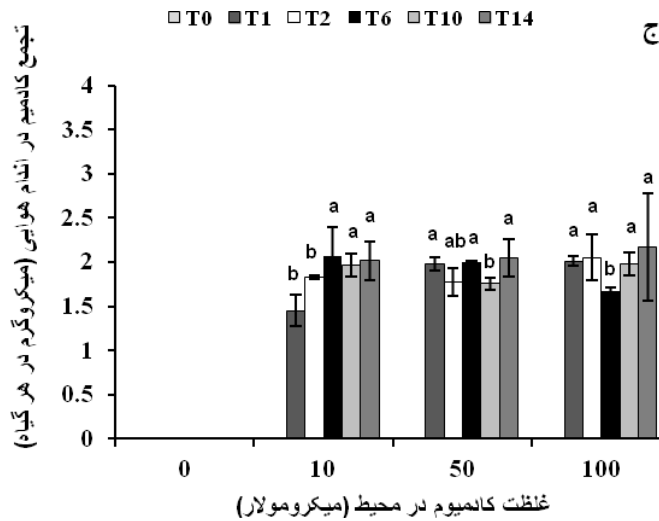
میانگین مربعات									
منابع تغییرات	درجه آزادی	طول اندام هوایی	طول ریشه	وزن تر اندام هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	سطح برگ	وزن
T1	غلظت کادمیوم	۰/۰۲۳	۰/۰۵۹	۵۳/۶۴	۷۰/۰۸*	۳۷/۴۱*	۴/۹۷*	۱۱/۸۱*	
	خطا	۰/۰۳۷	۰/۰۴۹	۲۰/۷۵	۴/۷۵	۱/۵۰	۰/۶۶۷	۳/۲۵	
T2	غلظت کادمیوم	۰/۲۱	۱/۶۱۶*	۳۹۲۹*	۴۰۶/۸۸*	۱۵۲/۰۸*	۱۳/۶۳*	۵۹۵/۶۵*	
	خطا	۰/۰۶	۰/۰۷۵	۱۴۲/۵۸	۵/۶۶	۱/۸۳	۲/۰۰	۲۲/۷۷	
T6	غلظت کادمیوم	۴/۰۴*	۱۳/۴۹*	۲۵۴۸۶/۸۸*	۸۷۳/۹۸*	۵۲۵/۱۱*	۹۳/۴۱*	۱۳۴۱/۲۱*	
	خطا	۰/۰۴۳	۰/۰۶۸	۳۲	۶/۰۵	۲/۰۸	۰/۸۳۳	۲۶/۸۴	
T10	غلظت کادمیوم	۲۸/۰۲*	۴۲/۲۱*	۹۷۸۲۸/۵۵*	۱۴۶۱/۴۴*	۶۸۸/۸۸*	۲۱۹/۶۴*	۱۶۰۵/۶۹*	
	خطا	۰/۱۰۸	۰/۱۵۱	۱۷۴/۵	۴/۳۳	۱/۱۶	۰/۵۰	۱۱/۹۶	
T14	غلظت کادمیوم	۶۳/۵۴*	۱۱۰/۱۳*	۱۳۹۳۴۵/۲۲*	۲۶۰۰/۵۲*	۱۳۸۳/۶۴*	۳۹۸/۷۵*	۳۴۷۷/۰۸*	
	خطا	۰/۱۲۴	۰/۱۳۸	۱۴۸/۷۵	۳/۰۸	۱/۵۰	۰/۷۵	۴/۴۵	

\* معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد.

غلظت‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم در طی دوره آزمایشی تغییرات قابل توجهی را نشان نداد (شکل ا.ج). مقادیر این شاخص بین  $0.17 \pm 1/44$  (در ۱۰ میکرومولار و برداشت روز یک) تا  $0.17 \pm 2/17$  میکروگرم (در ۱۰۰ میکرومولار و برداشت روز ۱۴) تغییر کرد. در ریشه‌ها تغییرات این شاخص قابل توجه بود، به طوری که حداقل میزان آن  $0.14 \pm 2/24$  (در ۱۰ میکرومولار و برداشت روز یک) و حداکثر میزان آن  $0.49 \pm 21/24$  (در ۱۰۰ میکرومولار و برداشت روز ۱۰) میکروگرم در هر گیاه محاسبه شد (شکل د).

هر زمان برداشت، هم در بخش هوایی و هم در ریشه با افزایش غلظت کادمیوم، میزان این فلز در اندام‌های ذکر شده در بیشتر موارد از خود افزایش نشان داد (شکل ۱ الف و ب). حداکثر غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه‌ای به ترتیب  $6/8 \pm 224$  و  $28/3 \pm 1548$  میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاهان رشد یافته در ۱۰۰ میکرومولار در برداشت روز ۱۴ اندازه‌گیری شد. غلظت کادمیوم در ریشه‌ها در این برداشت ۶/۹ برابر بیشتر از بخش‌های هوایی بود. به ازای هر گیاه، میزان جذب کادمیوم اندام‌های هوایی (بر حسب میکروگرم) در



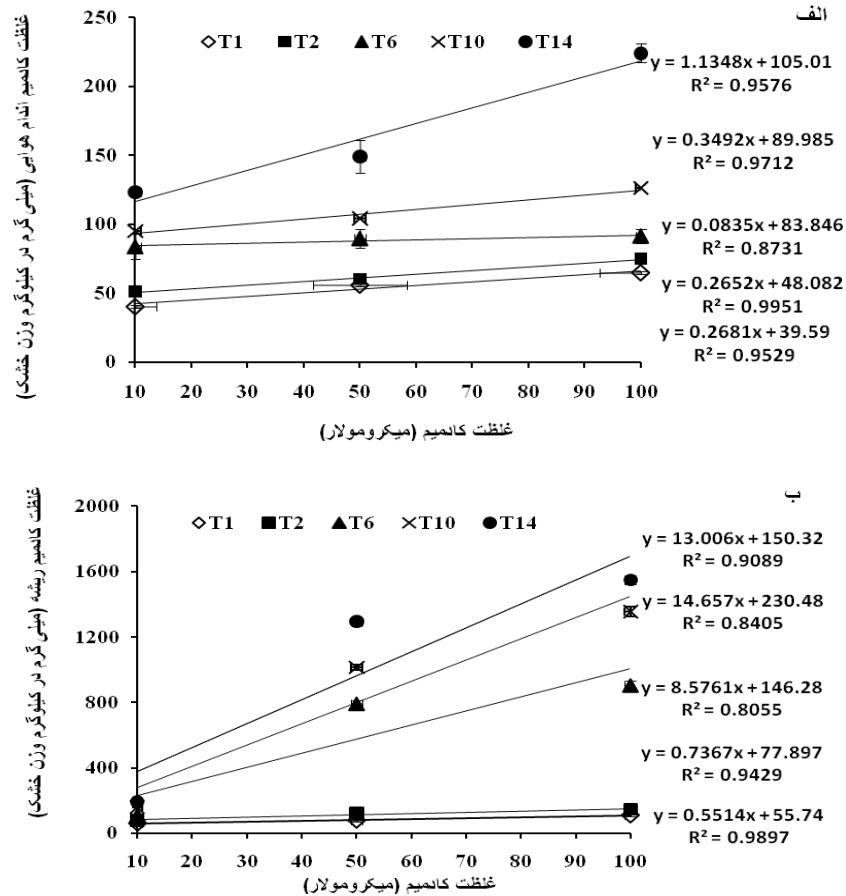


شکل ۱- تاثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم (۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ بر حسب میکرومولار) بر میزان کادمیوم (میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) در الف) اندام هوایی و ب) ریشه و بر تجمع کادمیوم (میکروگرم در هر گیاه) در ج) در اندام هوایی و د) ریشه. مقادیر میانگین سه تکرار  $\pm$  SD است. در هر برداشت زمانی حروف غیر مشترک بیانگر وجود تفاوت معنی دار بین غلظت‌های مختلف کادمیوم در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

روز ششم بعد از اعمال تیمارهای مختلف کادمیوم مشخص شد. در روزهای ۱ و ۲ پس از تیمار، اختلاف قابل توجهی در شاخص‌های فوق در مقایسه با شاهد وجود نداشت. حداقل طول اندام هوایی و ریشه ای به ترتیب  $0.2 \pm 0.15$  و  $0.12 \pm 0.157$  سانتی متر در غلظت ۱۰۰ میکرومولار در برداشت روز ۱۴ تعیین شد. درصد این کاهش در مقایسه با شاهد در اندام هوایی ۸۷ درصد و در اندام ریشه ۸۹/۳۶ درصد بود.

در بخش‌های زیرزمینی هر گیاه با افزایش غلظت کادمیوم محیط در هر برداشت زمانی، تجمع کادمیوم نیز افزایش معنی داری ( $p < 0.05$ ) را نسبت به بخش‌های هوایی از خود نشان داد (شکل ۱د). شکل ۲ ارتباط بین غلظت کادمیوم در محیط را با غلظت آن در اندام‌های گیاهی نشان می دهد.

همانطور که در شکل ۳ الف و ب مشاهده می شود، کاهش طول اندام هوایی و ریشه ای نسبت به شاهد بوضوح از



شکل ۲- رابطه بین غلظت کادمیوم (۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ بر حسب میکرومولار) در محیط کشت با غلظت کادمیوم در الف) اندام هوایی و ب) ریشه (میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک). مقادیر میانگین سه تکرار  $\pm$  SD می باشند.

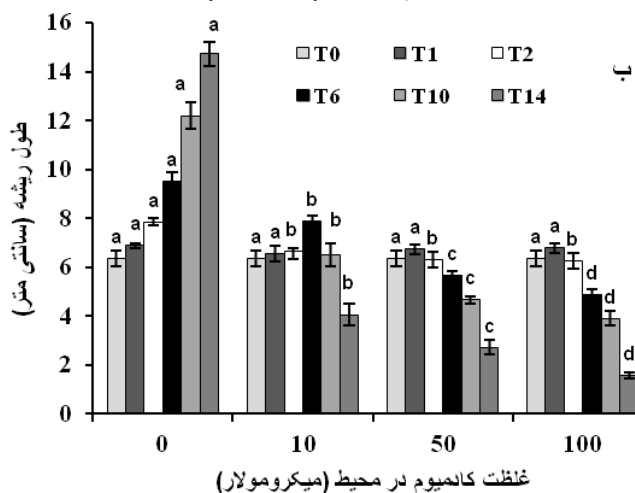
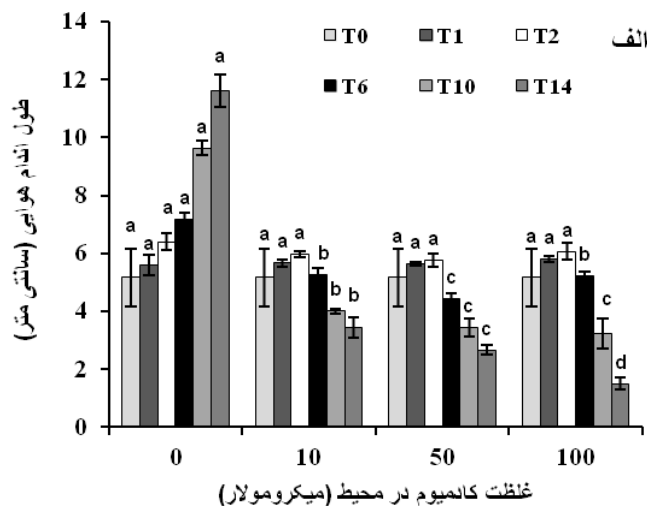
بود. مطابق شکل ۵، سطح پهنک با افزایش غلظت کادمیوم در محیط کشت، کاهش معنی داری ( $p < 0.05$ ) نسبت به شاهد در هر برداشت زمانی در بیشتر موارد ارائه داد.

حداکثر و حداقل مساحت پهنک  $1/79 \pm 94/37$  و  $0/06$   $\pm 18/93$  سانتی‌مترمربع برای گیاهان در حال رشد در محلول های غذایی به ترتیب فاقد و حاوی  $100$  میکرومولار کادمیوم در روز چهاردهم برداشت اندازه گیری شد. نتایج مربوط به شاخص های UI، IT، BF، TF برای همه برداشت ها در جدولهای ۳ و ۴ نشان داده شده است.

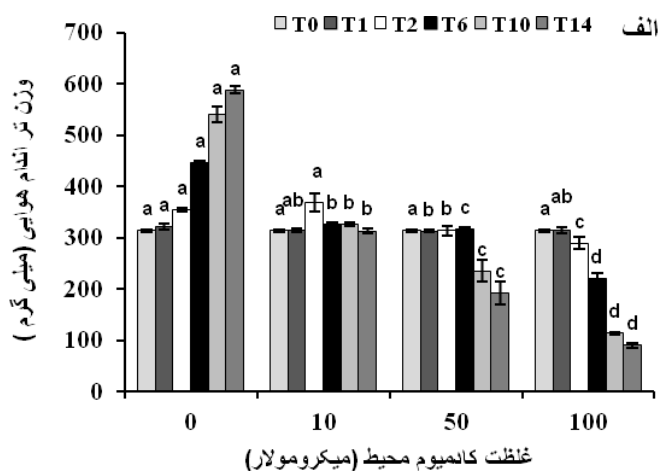
مقادیر فاکتور انتقال در تمامی غلظت های مختلف کادمیوم کمتر از یک و فاکتور تغلیظ زیستی برای اندام های هوایی و ریشه ای در تمام موارد بیشتر از یک محاسبه شد.

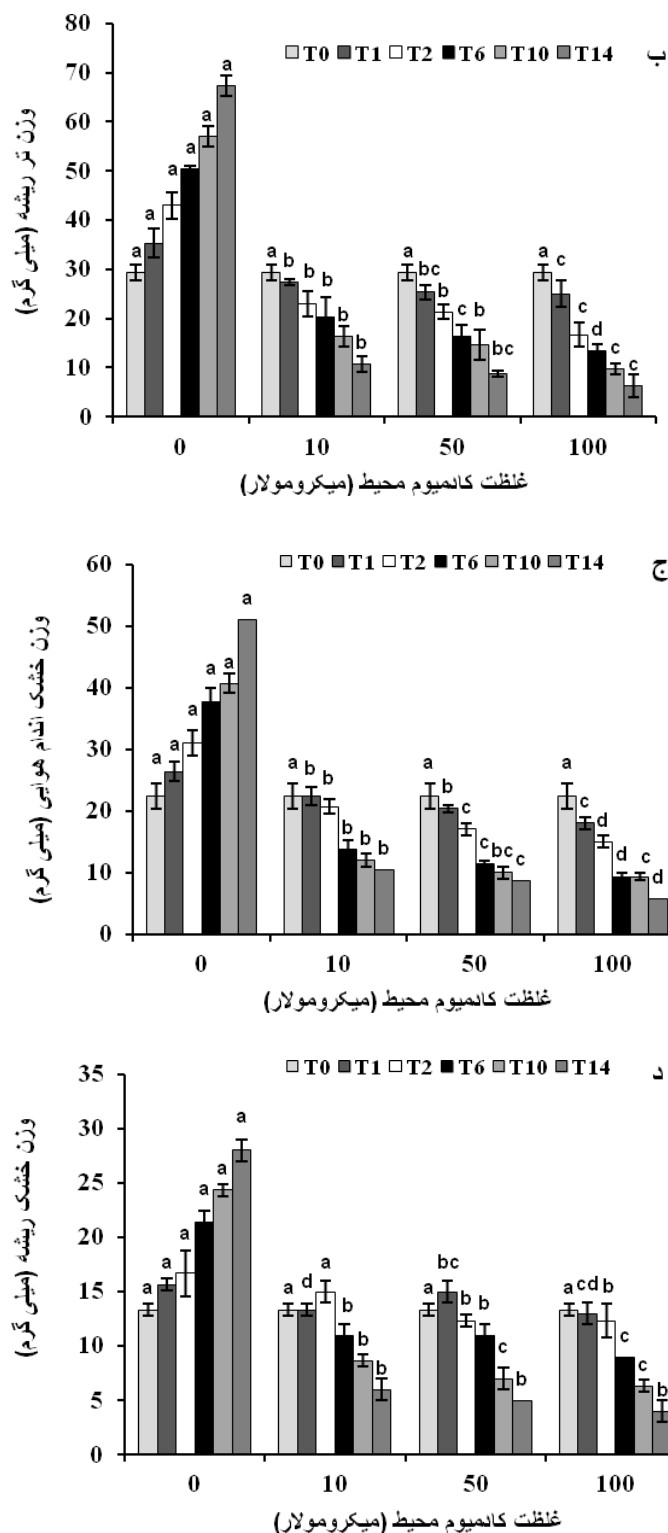
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴ الف و ب، غلظت  $100$  میکرومولار کادمیوم، به‌ویژه از روز دوم برداشت به بعد منجر به کاهش معنی داری ( $p < 0.05$ ) در وزن تر اندام هوایی و ریشه ای نسبت به شاهد شد، حداقل میزان این شاخص ها در برداشت روز ۱۴ به ترتیب  $4/7 \pm 90/3$  و  $2/31 \pm 6/3$  میلی گرم برای این تیمار اندازه گیری و درصد کاهش وزن تر برای بخش هوایی  $84/66$  و  $90/60$  درصد در مقایسه با شاهد در چنین شرایطی تعیین شد. در هر برداشت زمانی، با افزایش غلظت کادمیوم وزن خشک اندام هوایی و ریشه در بیشتر موارد نسبت به شاهد کاهش معنی داری ( $p < 0.05$ ) نشان داد (شکل ۴ ج و د). این کاهش در تیمار  $100$  میکرومولار کادمیوم در برداشت روز ۱۴، به ترتیب  $88/88$  و  $85/70$  درصد در مقایسه با شاهد



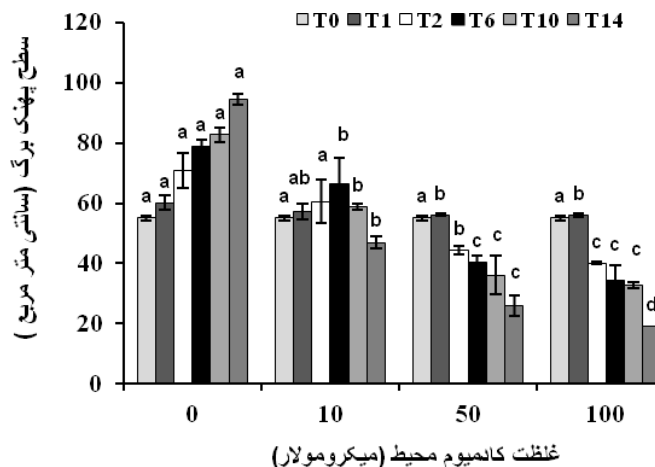


شکل ۳- تاثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم (۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ بر حسب میکرومولار) بر طول اندام هوایی و (ب) ریشه. مقادیر میانگین سه تکرار  $\pm$  SD می‌باشند. در هر برداشت زمانی حروف غیر مشترک بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار بین غلظت‌های مختلف کادمیوم در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشند.





شکل ۴- تاثیر غلظت‌های مختلف کادمیوم (۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ بر حسب میکرومولار) بر وزن تر (الف) اندام هوایی و (ب) ریشه و بر وزن خشک (ج) اندام هوایی و (د) ریشه. مقادیر میانگین سه تکرار  $\pm$  SD می‌باشند. در هر برداشت زمانی حروف غیر مشترک بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار بین غلظت‌های مختلف کادمیوم در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵- تاثیر غلظت های مختلف کادمیوم (۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ بر حسب میکرومولار) بر سطح پهنک. مقادیر میانگین سه تکرار  $\pm$  SD می باشند. در هر برداشت زمانی حروف غیر مشترک بیانگر وجود تفاوت معنی دار بین غلظت های مختلف کادمیوم در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

جدول ۳- مقادیر فاکتور انتقال (TF) و فاکتور تغلیظ زیستی در بخش هوایی و ریشه (BF) در برداشت های T1، T2، T6، T10، T14 برای گیاهان تیمار شده با غلظت های مختلف کادمیوم.

غلظت کادمیوم ( $\mu$ M)	TF					BF اندام هوایی					BF ریشه				
	T1	T2	T6	T10	T14	T1	T2	T6	T10	T14	T1	T2	T6	T10	T14
۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۷۶	۰/۵۹	۰/۶۴	۵۰	۴۰	۴۶	۳۶/۴	۴۰/۲	۷۸/۲	۶۲/۱	۶۰/۵	۶۱/۶	۸/۶۲
۵۰	۰/۷۰	۰/۴۸	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۱	۴۶/۲	۴۷/۲	۳۷/۳	۳۵/۶	۳۳/۱	۶۶/۲۷	۹۷/۲	۳۳۰/۴	۳۴۴/۹	۲۸۶/۶
۱۰۰	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۴	۴۳/۸	۴۰/۲	۳۶/۶	۲۶/۸	۴۰	۷۵/۶	۷۹	۳۶۳/۱	۲۸۷/۷	۲۷۶/۹

جدول ۴- درصد شاخص تحمل (IT) و درصد شاخص جذب (UI) در برداشت های T1، T2، T6، T10، T14 برای گیاهان تیمار شده با غلظت های مختلف کادمیوم.

غلظت کادمیوم ( $\mu$ M)	%IT					%UI				
	T1	T2	T6	T10	T14	T1	T2	T6	T10	T14
۰	-	-	-	-	-	۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۹۵	۸۵	۸۳	۵۳	۲۸	۳/۷	۴/۷	۴/۸	۵/۳	۵/۲
۵۰	۹۸	۸۰	۵۹	۳۸	۱۹	۴/۸	۵/۴	۱۹/۷	۱۹	۱۹/۷
۱۰۰	۹۹	۸۰	۵۱	۳۲	۱۱	۵/۵	۶/۱	۱۸/۳	۲۳/۲	۱۷/۱

محیط، این شاخص کاهش قابل توجهی را نشان داد. حداکثر درصد شاخص جذب، در روز دهم برای گیاهان تیمار شده با ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم (۲۳ درصد) و حداقل آن ۲۴ ساعت بعد از افزودن ۱۰ میکرومولار (۳/۷ درصد) محاسبه گردید.

### بحث

انجام تجزیه و تحلیل آماری حاکی از آن است که تغییر

با وجود این، میزان شاخص تغلیظ زیستی ریشه ها بالاتر از اندام های هوایی بود. با افزایش غلظت کادمیوم محیط در هر برداشت، شاخص تحمل ریشه کاهش یافت، به طوری که حداقل درصد این شاخص برای گیاهان رشد یافته در غلظت ۱۰۰ میکرومولار کادمیوم در برداشت T14 (۱۱ درصد) و بالاترین مقدار آن ۲۴ ساعت بعد از اعمال تیمار کادمیوم، در محدوده ۹۵ تا ۹۹ درصد تعیین شد. مطابق این نتایج، از روز ششم با افزایش غلظت کادمیوم

غلظت کادمیوم تأثیر معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) بر شاخص‌های جذبی و رشدی مطالعه شده (به استثناء برخی شاخص‌های رشدی در برداشت روز یکم و دوم) در این تحقیق دارد (جدولهای ۱ و ۲).

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم در محیط، غلظت این فلز هم در بخش‌های هوایی و هم ریشه‌ای افزایش می‌یابد، به طوری که یک ارتباط مثبت بین این دو از برداشت روز اول به بعد با مقادیر  $R^2$  بین ۰/۸۷ تا ۰/۹۹ برای اندام‌های هوایی و بین ۰/۸۰ تا ۰/۹۸ برای اندام‌های ریشه‌ای یافت شد (شکل ۲ الف). فاکتور تغلیظ زیستی برای ارزیابی کارایی جذب و تجمع و فاکتور انتقال برای تعیین میزان توانایی برای تحمل و انتقال فلزات سنگین در گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۰). نتایج حاصل از محاسبه فاکتور تغلیظ زیستی برای اندام‌های هوایی و ریشه‌ها (جدول ۳، برای همه تیمارها بزرگتر از یک) حاکی از آن است که در این مطالعه کادمیوم می‌تواند هم در ریشه‌ها و هم در اندام‌های هوایی تغلیظ شود. با وجود این، غلظت کادمیوم تجمع یافته در ریشه‌ها بالاتر از ساختارهای هوایی (شکل ۱ الف و ب) و مطابق جدول ۳، مقادیر کمتر از یک برای فاکتور انتقال نیز تأیید کننده این نتیجه بود. با توجه به نتایج محاسبه شده برای TF، در هر برداشت با افزایش غلظت کادمیوم، میزان انتقال آن از ریشه به بخش‌های هوایی دچار کاهش شد. این موضوع احتمالاً به علت ممانعت از انتقال بیشتر کادمیوم از ریشه به سمت بخش‌های هوایی در پنی‌رک می‌باشد. گزارش شده است که گیاهان غیر انباشتگر فلزی با تجمع بالاتر فلز در ریشه‌ها و مقادیر پایین TF مشخص می‌شوند و این ممکن است به عنوان یک مکانیسم تحمل برای حفاظت اندام‌های فتوسنتزی از غلظت‌های سمی فلز عمل نماید (۲۳). با بررسی میزان جذب کادمیوم توسط هر گیاه پنی‌رک و با در نظر گرفتن بیوماس (وزن خشک)، به نظر می‌رسد که ریشه‌های این گیاه توانایی و پتانسیل بالاتری نسبت به اندام‌های هوایی برای جذب و تجمع کادمیوم دارند (شکل

ج و د). بنابراین، تصور می‌شود که افزایش غلظت کادمیوم در محیط الزاماً منجر به انتقال بیشتر آن به بخش‌های هوایی پنی‌رک نمی‌گردد و احتمالاً این گیاه در مواجهه با غلظت‌های بالاتر کادمیوم در محیط از مکانیسم‌هایی برای ممانعت از انتقال بیشتر آن به بخش‌های هوایی استفاده می‌کند. پیشنهاد شده است که ممانعت از انتقال بیشتر کادمیوم به بخش‌های هوایی و تجمع بالاتر در ریشه‌های برخی گیاهان مورد مطالعه، ممکن است که راهکاری دفاعی برای جلوگیری از بروز اثرات سمی کادمیوم در این اندام‌ها باشد، به طوری که در *Phragmites australis* حتی با افزایش غلظت کادمیوم در محیط، غلظت آن در برگ‌ها کاهش می‌یابد (۷). در گیاهان متحمل، مکانیسم‌های تحمل فلزات سنگین می‌تواند در قالب دو راهکار خلاصه شود (۱۱) که عبارت است از: ۱- ممانعت از جذب فلز به گیاه که از طریق ترشح اسیدهای آلی یا قلبایی نمودن ریزوسفر توسط ریشه‌ها انجام می‌شود یا غیر متحرک کردن این فلزات در مجاورت ریشه می‌تواند به عنوان یک مکانیسم اجتناب مطرح باشد. ۲- تحمل در برابر فلز بعد از جذب آن توسط گیاه که با همکاری یک شبکه‌ای از مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و مولکولی انجام می‌گردد. در اغلب گیاهانی که بیش انباشتگر نیستند، با محدود کردن انتقال فلز از ریشه به بخش‌های هوایی، نگهداری و تجمع فلز در ریشه، اتصال فلز به دیواره‌های سلولی یا سمیت زدایی از آن از طریق تشکیل کمپلکس با ترکیبات آلی در سیتوزول یا احتباس در واکوئل‌های سلول‌های ریشه‌ای در برابر فلزات سنگین مقاومت نشان می‌دهند (۸، ۱۱، ۱۳). در این مطالعه با توجه به تجمع بالاتر کادمیوم در ریشه‌ها نسبت به بخش‌های هوایی به نظر می‌رسد که گیاه پنی‌رک با کنترل نحوه توزیع و انتقال کادمیوم بین بخش‌های ریشه‌ای و هوایی و نگهداری بخش عمده‌ای از این فلز در ریشه‌ها از انتقال بیشتر آن به قسمت‌های هوایی ممانعت نموده است. با این حال، گونه‌های گیاهی تیمار شده با کادمیوم در شرایط کنترل شده رشدی، توانایی متفاوتی را

وجود اینکه کادمیوم یک فلز ردوکس فعال نمی‌باشد، اما با القای تنش اکسیداتیو و آسیب به رنگدانه‌های فتوسنتزی، پروتئین‌ها، لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک کاهش شدیدی را در رشد و عملکرد گیاه بوجود می‌آورد (۸).

در یک جمع‌بندی کلی و بر اساس نتایج بدست آمده از این مطالعه، تصور می‌شود که در پنیوک رشد یافته در مناطق اطراف صنایع فولادسازی، اگرچه غلظت‌های بالاتر کادمیوم منجر به کاهش رشد در این گیاه می‌شود، با وجود این، هم اندام‌های هوایی و هم ریشه‌ها توانایی تغلیظ کادمیوم (حداقل در طی دوره آزمایشی این تحقیق) را دارند (به علت داشتن BF بزرگتر از یک)، اما به ازای هر گیاه، ریشه‌ها توانمندی بالاتری را در مقایسه با بخش هوایی برای جذب و تجمع کادمیوم از خود ارائه می‌دهند. احتمالاً این گیاه با تجمع و نگهداری بیشتر کادمیوم در ریشه، از انتقال بیشتر آن به بخش هوایی ممانعت می‌نماید تا از بروز اثرات سمی کادمیوم در این بخش‌ها جلوگیری شود.

### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از معاون محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به‌دلیل حمایت‌های مالی (در قالب پژوهانه کارشناسی‌ارشد به شماره ۹۴/۳/۰۲/۳۱۵۷۹) برای انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

در توزیع کادمیوم در بافت‌ها و اندام‌های مختلف از خود ارائه داده اند (۲،۷،۱۰،۲۱،۲۴،۲۸،۳۴). معمولاً اطلاعات مربوط به بیوماس و شاخص تحمل در گیاهان تا حدی می‌توانند در شناسایی بیش‌انباشتگرها مفید باشند (۲۰). با توجه به کاهش معنی‌دار طول و وزن تر و خشک‌بخش هوایی و ریشه‌ای پنیوک در مقایسه با شاهد (شکل‌های ۳ و ۴) و همچنین کاهش شاخص تحمل به‌ویژه در غلظت‌های بالاتر کادمیوم (جدول ۴)، به نظر می‌رسد که کادمیوم حتی در غلظت پایین نیز می‌تواند اثرات سمی خود را بر شاخص‌های فوق‌اعمال نماید. در معرض قرار گرفتن با کادمیوم باعث کاهش رشد و بیوماس در بیشتر گیاهان و حتی در مواردی مرگ گیاه شده است (۱،۹،۲۳،۲۵،۲۸،۳۴). کادمیوم از طریق اتصال به غشاء یا از طریق ایجاد تنش اکسیداتیو، منجر به تشدید پراکسیداسیون لیپیدها و در نتیجه اختلال در نفوذ پذیری و عملکرد پروتئین‌های ناقل غشایی به‌ویژه کانال‌های آبی می‌گردد (۱۸). علاوه بر این، کاهش شاخص تحمل ریشه با افزایش غلظت کادمیوم بیانگر تأثیر سمی این فلز بر رشد ریشه می‌باشد. گزارش شده است که کادمیوم با اختلال در تقسیمات میتوزی مناطق مریستمی ریشه می‌تواند رشد ریشه‌ها را کاهش دهد (۱۴). تصور می‌شود که در مجموع چنین آسیب‌هایی در غشاء، شرایط را برای نشت بیشتر یون‌ها، کاهش جذب آب و در نهایت کاهش رشد و توسعه پذیری سلول‌های گیاهی فراهم نماید. همچنین مشخص شده است با

### منابع

- ۱- حافظی، م.، نمکی شوشتری، ع.، اسرار، ز. و ترکزاده، م. ۱۳۸۸. تأثیرات غلظت‌های سمی کادمیوم بر میزان گره‌زایی و تثبیت ازت سوشهای مختلف باکتری سینوریزوبیوم ملیوتی (وحشی و دارای پلازمید) در گیاه یونجه (*Medicago sativa*) مجله زیست‌شناسی ایران. جلد ۲۲ (۴)، ۶۳۵-۶۲۶.
- ۲- نورانی آزاد، ح. و کفیل زاده، ف. ۱۳۹۰. تأثیر سمیت کادمیوم بر رشد، قندهای محلول، رنگیزه‌های فتوسنتزی و برخی آنزیمها در *Carthamus tinctorius* L. گلرنگ. مجله زیست‌شناسی ایران. جلد ۲۴ (۶)، ۸۶۷-۸۵۸.
- 3- Almas, A.R. and Singh, B.R. 2001. Plant uptake of cadmium-109 and zinc-65 at different temperature and organic matter levels. Journal of Environmental Quality. 30, 869-877.
- 4- Aravind, P. and Prasad, M. N. V. 2005. Cadmium- Zinc interaction in hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular

- toxicology. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17, 3-20.
- 5- Baker, A. J. M. 1987. Metal tolerance. *New Phytologist*. 106, 93-111.
  - 6- Baker, A.J.M. and Brooks, R.R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate elements a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 1, 81-126.
  - 7- da Silva, M. N., Mucha, A. P., Rocha, A. C., Silva, C. Carli, C. Gomes, C. R. and Almeida, C. M. R. 2014. Evaluation of the ability of two plants for the phytoremediation of Cd in salt marshes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 141, 78-84.
  - 8- Gill, S.S., Khan, N.A. and Tuteja, N. 2012. Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). *Plant Science*. 182, 112-120.
  - 9- Guo, B., Dai, S., Wang, R., Guo, J., Ding, Y. and Xu, Y. 2015. Combined effects of elevated CO<sub>2</sub> and Cd-contaminated soil on the growth, gas exchange, antioxidant defense, and Cd accumulation of poplars and willows. *Environmental and Experimental Botany*. 115, 1-10.
  - 10- Hawrylak-Nowak, B., Dresler, S. and Matraszek, R. 2015. Exogenous malic and acetic acids reduce cadmium phytotoxicity and enhance cadmium accumulation in roots of sunflower plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 94, 225-234.
  - 11- Hossain, M. A., Piyatida, P., de Silva, J. A. T. and Fujita, M. 2012. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *Journal of Botany*. 2012: 1-37.
  - 12- Hu, P.J., Gan, Y.Y., Tang, Y.T., Zhang, Q.F., Jiang, D., Yao, N. and Qiu, R.L. 2012. Cellular tolerance, accumulation and distribution of cadmium in leaves of hyperaccumulator *Picris divaricata*. *Pedosphere*. 22(4), 497-507.
  - 13- Ibaniez, S.G., Medina, M.I. and Agostini, E., 2011. Phenol tolerance, changes of antioxidative enzymes and cellular damage in transgenic tobacco hairy roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungi. *Chemosphere*. 83, 700-705.
  - 14- Jun-yu, H., Yan-fang, R., Cheng, Z. and De-an, J. 2008. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth and seed amylase activities in rice (*Oryza sativa*). *Rice Science*. 15, 319-325.
  - 15- Kovacs, B., Gyori, Z., Prokisch, J., Loch, J. and Daniel, P. 1996. A study of plant sample preparation and Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry parameters. *Communications in Soil Sciences and Plant Analysis*. 27, 1177-1198.
  - 16- Lin, L., Shi, J., Liu, Q., Liao, M. and Mei, L. 2014. Cadmium accumulation characteristics of the winter farmland weeds *Cardamine hirsute* Linn. and *Gnaphalium affine* D.Don. *Environmental Monitoring and Assessment*. 186, 4051-4056.
  - 17- Liu, H., Wang, H., Ma, Y., Wang, H. and Shi, Y. 2016. Role of transpiration and metabolism in translocation and accumulation of cadmium in tobacco plants (*Nicotiana tabacum* L.). *Chemosphere*. 144, 1960-1965.
  - 18- Liu, S., Yang, C., Xie, W., Xia, C. and Fan, P. 2012. The effects of cadmium on germination and seedling growth of *Suaeda salsa*. *Procedia Environmental Sciences*. 16, 293-298.
  - 19- Liu, X., Peng, K., Wang, A., Lian, C. and Shen, Z. 2010. Cadmium accumulation and distribution in populations of *Phytolacca americana* L. and the role of transpiration. *Chemosphere*. 78, 1136-1141.
  - 20- Liu, Z., He, X., Chen, W., Yuan, F., Yan, K. and Tao, D. 2009. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in a potential hyperaccumulator-*Lonicera japonica* Thunb. *Journal of Hazardous Materials*. 169, 170-175.
  - 21- Monteiro, M.S., Rodriguez, E., Loureiro, J. Mann, R.M., Soares, A.M.V.M. and Santos, C. 2010. Flow cytometric assessment of Cd genotoxicity in three plants with different metal accumulation and detoxification capacities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 73, 1231-1237.
  - 22- Nedelkoska, T.V. and Doran, P.M. 2000. Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerulescens*. *Biotechnology and Bioengineering*. 67(5), 607-615.
  - 23- Pietrini, F., Iori, V., Bianconi, D., Mughini, G., Massacci, A. and Zacchini, M. 2015. Assessment of physiological and biochemical responses, metal tolerance and accumulation in two eucalypt hybrid clones for phytoremediation of

- cadmium-contaminated waters. *Journal of Environmental Management*. 162, 221-231.
- 24- Rosén, K., Eriksson, J. and Vinichuk, M. 2012. Uptake and translocation of  $^{109}\text{Cd}$  and stable Cd within tobacco plants (*Nicotiana sylvestris*). *Journal of Environmental Radioactivity*. 113, 16-20.
- 25- Rui, H., Chen, C., Zhang, X., Shen, Z. and Zhang, F. 2016. Cd-induced oxidative stress and lignification in the roots of two *Vicia sativa* L. varieties with different Cd tolerances. *Journal of Hazardous Materials*. 301, 304-313.
- 26- Siddiqi, M. Y., Glass, A. D. M., Ruth, T. J. and Rufty, T. 1990. Studies of the uptake of nitrate in barley: I. Kinetics of  $^{13}\text{NO}_3$  influx. *Plant Physiology*. 93, 1426-1432.
- 27- Soudek, P., Petrova, S. and Vanek, T. 2011. Heavy metal uptake and stress responses of hydroponically cultivated garlic. *Environmental and Experimental Botany*. 74, 289-295.
- 28- Sun, R.L., Zhoi, Q.X., Wang, L. and Liu, W. 2009. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator. *Journal of Hazardous Materials*. 161, 808-814.
- 29- Tauqeer, H.M. Ali, S. Rizwan, M. Ali, Q. Saeed, R. Iftikhar, U. Ahmad, R. Farid, M. Abbasi, G.H. 2016. Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzickiana*: Growth and physiological response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 126, 138-146.
- 30- Ueno, D., Iwashita, T., Zhao, F.J. and Ma, J.F. 2008. Characterization of Cd translocation and identification of Cd form in xylem sap of the Cd-hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Plant and Cell Physiology*. 49, 540-548.
- 31- Uraguchi, S. and Fujiwara, T. 2012. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation. *Rice*. 5:1-8.
- 32- Wong, C. K. E. and Cobbett, C. S. 2009. HMA P-type ATPases are the major mechanism for root-to-shoot Cd translocation in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist*. 181:71-78.
- 33- Wu, Z., Zhao, X., Sun, X., Tan, Q., Tang, Y., Nie, Z., Qu, C., Chen, Z. and Hu, C. 2015. Antioxidant enzyme systems and the ascorbate-glutathione cycle as contributing factors to cadmium accumulation and tolerance in two oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.) under moderate cadmium stress. *Chemosphere*. 138, 526-536.
- 34- Zhang, H., Guo, Q., Yang, J., Shen, J., Chen, T., Zhu, G., Chen, H. and Shao, C. 2015. Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of two castor (*Ricinus communis* L.) cultivars exhibit differences in Cd accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 120, 184-192.
- 35- Zhang, S., Chen, M., Li, T., Xu, X. and Deng, L. 2010. A newly found cadmium accumulator-*Malva sinensis* Cavan. *Journal of Hazardous Materials*. 173: 705-709.
- 36- Zoufan, P., Saadatkah, A. and Rastegarzadeh, S. 2015. Amount of Mn and Zn in herbaceous plants growing on industrial area of steel production companies in southeast of Ahvaz, Iran. *Progress in Biological Sciences*. 5(2): 181-193.

## Assessment of some growth indices and Cd accumulation in shoots and roots of *Malva parviflora* L. under hydroponic system

Zoufan P.<sup>1</sup>, Neisi E.<sup>1</sup> and Rastegarzadeh S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Biology Dept., Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, I.R. of Iran

<sup>2</sup> Chemistry Dept., Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, I.R. of Iran

### Abstract

In this study, uptake and accumulation of cadmium (Cd) by *Malva parviflora* L. and as well as some growth parameters were investigated in hydroponic medium. After collecting from the industrial area of Khuzestan steel company, the seeds were sown on the pots containing humus commercial soil and kept under controlled conditions. 47-day-old plants were transferred to nutrition solutions including 0 (control), 10, 50 and 100  $\mu\text{M}$  of Cd. The plants were harvested at 0 (control), 1, 2, 6, 10 and 14 days after supplement with Cd treatments. Based on these results, Cd concentration in shoots and roots showed an increase with increasing Cd concentration of medium. However, both concentration and accumulation of Cd in the roots exhibited higher values than that in the aboveground organs. At 100  $\mu\text{M}$  Cd, maximum Cd concentration in the shoot and root was assayed 224 and 1548 mg/kg DW, respectively. In each harvest time, with increasing Cd concentration of medium, length, fresh weight, dry matter of shoots and roots, blade area also index of tolerance significantly decreased in comparison with control. With regard to  $TF < 1$ , it seems that the roots of Mallow mainly possess higher capability than aerial parts to accumulate Cd. In summary, *M. parviflora* prevent Cd toxicity effects probably by reducing more translocation of Cd to the shoots.

**Key words:** Cadmium, Uptake, Bioconcentration, Growth