فصلنامه علوم محیطی، دوره پانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶

۱۷۳-۱۸۶

# توان گیاه‌پالایی دو گونه خردل اتیوپی (*Brassica carinata*) و خردل هندی (*Brassica juncea*) در خاک آلوده به کادمیوم

**زهرا سلیمان‌نژاد، احمد عبدل‌زاده* و حمیدرضا صادقی‌پور**

گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۱ تاریخ پذیرش: ۹۶/۸/۹

**سلیمان نژاد، ز.، ا. عبدل زاده و ح. صادقی پور. ۱۳۹۶.** توان گیاهپالایی دو گونه خردل اتیوپی (*Brassica carinata*) و خردل هندی (*Brassica juncea*) در خاک آلوده به کادمیوم. فصلنامه علوم محیطی. ۱۵(۳): ۱۸۶-۱۷۳.

**سابقه و هدف:** فلزات سنگین از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های محیط زیست به شمار می‌آیند که در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. تجمع عناصر در خاک به‌ویژه در زمین‌های کشاورزی، امری تدریجی بوده و غلظت عناصر سنگین می‌تواند به سطحی برسد که امنیت غذایی انسان را تهدید کند. در میان عناصر سنگین، کادمیوم به علت تحرک بالا در سیستم‌های بیولوژیک، سمیت بالا، حلالیت زیاد در آب و جذب سریع توسط سیستم ریشه‌ای بسیاری از گونه‌های گیاهی، یکی از خطرناک‌ترین عناصر سنگین است. در این تحقیق رشد، انباشتگی و توان گیاه‌پالایی کادمیوم در دو گونه خردل اتیوپی (*Brassica carinata*) و خردل هندی (*Brassica juncea*) بررسی شده است.

**مواد و روش‌ها:** گیاهان در خاک‌های آلوده با غلظت‌های ۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم رشد کردند و پس از ۷ هفته کشت در گلخانه، برای سنجش برخی خصوصیات رشدی برداشت شدند.

**نتایج و بحث:** نتایج پژوهش نشان داد که تیمارهای کادمیوم بر صفات رشد و میزان کلروفیل دو گیاه اثر معنی‌داری نداشت. هر دو گیاه شاخص تحمل تنش بالایی را نسبت به فلز کادمیوم نشان دادند. با افزایش آلودگی فلز در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و بخش هوایی هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. فاکتور انتقال گیاه خردل هندی حدوداً ۷۰٪ بیشتر از خردل اتیوپی بوده است و بیشترین میزان فاکتور انتقال در تیمار ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم در گیاه خردل هندی مشاهده شد.

**نتیجه‌گیری:** مقایسه دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی نشان می‌دهد که هر دو گونه قادر به تحمل و تجمع کادمیوم بوده، ولی فاکتور انتقال و میزان جذب و تجمع کادمیوم در گیاه خردل هندی بیشتر از خردل اتیوپی بوده است، درنتیجه به نظر می‌رسد گیاه خردل هندی عملکرد بهتری برای استفاده در فرایند گیاه‌پالایی کادمیوم داشته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی خاک- تجمع- شب‌بو- کادمیوم- گیاه‌پالایی.

* Corresponding Author. *E-mail Address*: ah_ab99@yahoo.com

## مقدمه

گیاهان در چرخه زندگی خود معمولاً در معرض انواع وسیعی از تنش‌های محیطی قرار می‌گیرند که از جمله آن‌ها می‌توان به تنش فلزات سنگین اشاره کرد. فلزات سنگین از منابع آلاینده محیط زیست از جمله خاک هستند که در صورت تجمع در خاک و جذب به وسیله گیاه به زنجیره غذایی وارد می‌شوند (Antoniadis and Alloway, 2001). به این طریق سطوح غذایی بالاتر در اکوسیستم‌های خشکی در معرض این فلزات قرار می‌گیرند و مسمومیت‌هایی را در گیاهان و یا افراد تغذیه‌کننده از آن‌ها ایجاد می‌کنند (Dalvand *et al*., 2014). در میان فلزات سنگین، کادمیوم به علت سمیت بالا، حلالیت زیاد در آب و جذب سریع توسط سیستم ریشه‌ای بسیاری از گونه‌های گیاهی، یک آلاینده قوی محسوب می‌شود (Pinto *et al*., 2004). بررسی‌ها نشان داده است که کادمیوم بر رشد و تقسیم سلول‌ها، رشد کلی گیاه و تنظیم رشد و نمو گیاهان اثر می‌گذارد. گزارش شده است که کادمیوم جذب‌شده توسط گیاه می‌تواند منجر به کلروز، نکروزه شدن برگ‌ها، اپی‌ناستی برگ‌ها، کاهش زیتوده ریشه و بخش هوایی و همچنین کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی شود (Dinakar *et al*., 2008). کادمیوم به‌دلیل نیمه‌عمر بالا (۱۰ تا ۳۰ سال) مستعدترین فلز برای تجمع در بدن انسان است (Pourmoghadas *et al*., 2002). به همین دلیل این فلز برای انسان فوق‌العاده سمی است. اثرات سمی کادمیوم در انسان شامل تخریب کلیه‌ها و بافت‌های کبد، سرطان‌زایی و آمفیزم است (Ryan *et al*., 1982). از این‌رو، به منظور احیای مجدد اراضی و به حداقل رسانیدن خطر ورود عناصر سمی به زنجیره‌های غذایی، پاک‌سازی مکان‌های آلوده به فلزات سنگین ضروری است (Yang *et al*., 2004). برای پاک‌سازی محل‌های آلوده معمولاً از حفاری خاک، آب‌شویی، جداسازی مکانیکی و یا تیمارهای شیمیایی استفاده می‌شود که بسیار دشوار و پرهزینه هستند، اما امروزه استفاده از گیاهان به‌عنوان جایگزینی مناسب، برای خارج‌سازی فلزات سنگین از خاک پیشنهاد می‌شود (Torresdey *et al*., 2005).

گیاه‌پالایی به‌عنوان یک روش پاک‌سازی موثر و ارزان عرضه شده که در آن جذب و جمع‌آوری آلاینده‌ها در بافت‌های قابل برداشت گیاهی مد نظر است (Fayiga *et al*., 2004; Mattina *et al*., 2003; Tlustos *et al*., 2016). در این روش با برداشت گیاهان از خاک، آلاینده‌ها از خاک زدوده می‌شوند (Chen and Cutright, 2002). در اراضی کشاورزی آلوده به فلزات سنگین، انتخاب گیاهان زراعی متحمل به فلزات، برای برداشت آلاینده‌ها از خاک می‌تواند یک استراتژی جدید برای مدیریت اراضی باشد. به‌طور کلی برای انتخاب یک گیاه برای گیاه‌پالایی خاک، باید قدرت جذب و تولید زیتوده بالا و انتقال زیاد عنصر از ریشه به ساقه مدنظر قرار گیرد (Raskin and Ensley, 2000; Zhang *et al*., 1997). این گیاهان که توان انباشت مقادیر زیادی از فلزات سنگین در غلظت‌های بیشتر از خاک را دارند، انباشت‌گر نامیده می‌شوند. بیشتر گیاهان انباشت‌گر متعلق به خانواده شب‌بو (Brassicaceae) هستند. انباشت‌گرها می‌توانند به‌عنوان ابزاری بسیار مفید برای پاک‌سازی خاک، آب و رسوبات آلوده استفاده شوند (Clemens, 2001)، بنابراین استفاده از گیاهان بیش‌انباشت‌گر به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین اهمیت زیادی دارد (Neilson and Rajakaruna, 2015).

خانواده شب‌بو حدوداً از ۳۵۰۰ گونه تشکیل شده است که *Brassica* یکی از مهم‌ترین جنس‌های آن است و یکی از معروف‌ترین اعضای این جنس خردل هندی (*Brassica juncea*) است که بومی مدیترانه و غرب آسیا بوده و به‌طور گسترده در هندوستان کاشته می‌شود (Malan *et al*., 2011). گزارش شده که خردل هندی

گیاهی امیدوارکننده برای حذف و گیاه‌پالایی فلزات سنگین از خاک‌های آلوده است (Ebbs *et al*., 1997; Graziani *et al*., 2016). به گفته محققانی که ژنوتیپ‌های خردل هندی را مورد بررسی قرار داده‌اند، هنگامی که گیاهان در محیط هیدروپونیک در معرض ۲۵ میکرومول بر لیتر کادمیوم قرار گرفته‌اند، تغییرات گسترده‌ای در محدوده جذب کادمیوم بخش هوایی از ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم وزن خشک بخش هوایی داشتند (Li *et al*., 2004). خردل هندی به علت جداسازی کادمیوم با پپتیدهای باندشونده به فلز سنگین (فیتوشلاتین‌ها)، تحمل بالایی به کادمیوم نشان می‌دهد. بنابراین، تجمع بالای کادمیوم در خردل هندی ممکن است منجر به رشد نسبتاً عادی بخش هوایی در معرض کادمیوم شود (Zhu *et al*., 1999).

خردل اتیوپی (*Brassica carinata*) گیاه علفی یک ساله، با سیستم ریشه‌ای عمیق و به خوبی توسعه یافته، مقاوم به خشکی و گرما است. Quartacci *et al*. (2007) نشان دادند که خردل اتیوپی در بین ۹ گونه مورد بررسی، بالاترین مقدار فلزات را بدون کاهش معنی‌دار توده زیستی بخش هوایی انباشته کرد.

با توجه به آلودگی فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم، بر اثر مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی یا استفاده از لجن فاضلاب در خاک کشاورزی و توسعه صنعتی در مناطق مختلف کشور، استفاده از گیاهان برای پاک‌سازی محیط بسیار مهم است. در این پژوهش توان تجمع و گیاه‌پالایی کادمیوم توسط دو گونه خردل هندی و خردل اتیوپی به دلیل تولید زیتوده بالا و قابلیت رشد و نمو مناسب در اکثر مناطق کشور بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

### شرایط کاشت

بذر دو گونه خردل اتیوپی و خردل هندی از مرکز تحقیقات دانه‌های روغنی استان مازندران تهیه شد. بذرهای ضدعفونی‌شده در پتری‌دیش جوانه‌دار شده و گیاهچه‌های سه‌روزه در اوایل فروردین ماه سال ۱۳۹۴، از پتری‌دیش به گلدان‌های پلاستیکی سه کیلوگرمی پرشده از خاک (۳ عدد در هر گلدان) منتقل و در گلخانه‌ای با پوشش سقف و دیواره پلاستیکی برای جلوگیری از نفوذ باران و با دو طرف فضای آزاد برای جریان هوای کافی، کشت شدند. برای آماده‌سازی خاک، ابتدا به میزان ۱۰۰ کیلوگرم خاک زراعی و غیرآلوده اطراف شهرستان نکا جمع‌آوری شد. برای ایجاد آلودگی کادمیوم در خاک به‌طور مصنوعی از غلظت‌های ۰، ۷۵ و ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، به‌صورت نمک کلرید کادمیوم استفاده شد. این سطوح با توجه به بررسی‌های محققان دیگر از جمله Quartacci *et al*. (2005) در گیاه‌پالایی کادمیوم در خردل هندی و همچنین آزمایش‌های اولیه انتخاب شد. نمک‌ها به‌طور مجزا در آب مقطر حل و به‌صورت لایه‌لایه به سطح خاک اسپری شدند و خاک هر گلدان جداگانه و به‌طور یکنواخت مخلوط شد. خاک مورد بررسی رُسی با pH حدود ۷ بود و غلظت کادمیوم آن پیش از اضافه کردن نمک کلرید کادمیوم اندازه‌گیری شد (جدول ۱). خاک‌های آلوده به‌طور مرتب در حد ظرفیت زراعی آبیاری شده و برای تثبیت و تعادل اجزای خاک و فلز کادمیوم و همسان‌سازی شرایط آلودگی مصنوعی با شرایط آلودگی طبیعی به مدت سه ماه در شرایط هوای آزاد قرار داده شد (Khodaverdiloo *et al*., 2012). در طول دوره آزمایش اغلب روزها هوا آفتابی بوده و میانگین حداکثر و حداقل دمای روز و شب در گلخانه به ترتیب ۲۹ و ۱۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین رطوبت نسبی ٪۸۱ بود. آبیاری گلدان‌ها در طول دوره رشد، با آب شهری انجام شد و گیاهان پس از ۷ هفته (در آغاز فاز زایش) برای سنجش برخی خصوصیات رشدی برداشت شدند.

**جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده**

**Table 1. Some physical and chemical characteristics of used soil**

| رس (٪) Clay (%) | سیلت (٪) Silt (%) | ماسه (٪) Sand (%) | بافت خاک Soil texture | اسیدیته خاک pH | هدایت الکتریکی EC ($dSm^{-1}$) | کادمیوم (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Cadmium ($mg\ Kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 47 | 39 | 14 | رسی Clay | 7 | 1.11 | <0.1 |

## اندازه‌گیری صفات رشد

پس از برداشت، ابتدا ریشه گیاهان با آب شسته و سپس آب سطحی ریشه‌ها با دستمال کاغذی گرفته شد. بعد از آن ریشه از بخش هوایی جدا و طول و وزن آن اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند و مجددا توزین شدند.

برای تعیین شاخص برگ ویژه، از هر گیاه سه برگ (از قسمت‌های مختلف پایین، میانه و بالا) جدا و پس از اندازه‌گیری وزن تر، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون در درجه حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک و توزین شدند. برای اندازه‌گیری سطح برگ از نرم‌افزار ImageJ استفاده شد و سپس سطح برگ ویژه ( Specific Leaf Area) بر حسب سانتی‌متر مربع بر گرم تعیین شد (Arias, 2007) (فرمول ۱).

$$SLA = \frac{\text{Leaf area}}{\text{Leaf dry weight}} \qquad (۱)$$

## اندازه‌گیری شاخص تحمل:

برای ارزیابی تحمل گونه‌ها به فلزات سنگین، شاخص تحمل (Tolerance Index) با به دست آوردن تفاضل وزن خشک تیمار از شاهد از فرمول پیشنهادی(1981) Rosielle and Hamblin (فرمول ۲) و شاخص تحمل تنش (Stress tolerance index) با تقسیم حاصل‌ضرب وزن خشک تیمار در شاهد بر توان دوم میانگین وزن خشک شاهد دو گونه از فرمول پیشنهادی Fernandez (1992) (فرمول ۳) محاسبه شد.

$$TOL = DWc - DWt \qquad (۲)$$

$$STI = \frac{DWc \times DWt}{(\overline{DWc})^{۲}} \qquad (۳)$$

در فرمول‌های بالا، DWt، DWc و $\overline{DWc}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده وزن خشک تحت تیمار کادمیوم، وزن خشک شاهد برای هر گونه و میانگین وزن خشک شاهد دو گونه است.

## اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کاروتنوئید

برای سنجش میزان کلروفیل و کاروتنوئید از روش Arnon (1949) استفاده شد. ابتدا مقدار ۰/۰۵ گرم از بافت تر گیاه با ۳ میلی‌لیتر استون ۸۰ ٪ سائیده شد و سپس مخلوط به‌دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت g ۱۳۰۰۰ سانتریفیوژ شد و از فاز فوقانی برای سنجش کلروفیل و کاروتنوئید استفاده شد.

## سنجش غلظت کادمیوم

برای استخراج کادمیوم میزان ۱/. گرم از وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاهان به منظور حذف ترکیبات آلی به مدت ۸ ساعت در داخل کوره در دمای ۵۷۵ درجه سانتی‌گراد سوزانده و غلظت کادمیوم بعد از هضم اسیدی با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل GBC Avanta ver.1.33 اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی پتانسیل استخراج گیاهان، فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی ( Bio Concentration Factor Shoot) و ریشه (Bio Concentration Factor Root) گیاه با استفاده از فرمول ۴ محاسبه شد، که C نشان‌دهنده غلظت کادمیوم است (Bini *et al*., 1995).

$$BCFR = \frac{Croot}{Csoil} \qquad BCFS = \frac{Cshoot}{Csoil} \qquad (۴)$$

برای ارزیابی توانایی گیاه در انتقال کادمیوم از ریشه به بخش هوایی، فاکتور انتقال (Translocation Factor)

کادمیوم طبق فرمول (۵) محاسبه شد.

$$TF = \frac{Cshoot}{Croot} \qquad (۵)$$

## تجزیه آماری

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد (هر گلدان به‌عنوان یک تکرار است). فاکتور اول سطوح کادمیوم و فاکتور دوم گونه‌های مورد بررسی بود. محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح ۹۵٪ انجام شد.

## نتایج و بحث

### ارزیابی صفات رشد

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر کادمیوم فقط در سطح برگ‌ویژه برگ بالایی و اثر گونه فقط در وزن خشک بخش هوایی معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل کادمیوم × گونه در هیچ یک از صفات رشد معنی‌دار نبود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که سطوح مختلف کادمیوم در خردل اتیوپی و خردل هندی اثر معنی‌داری در طول و وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان در مقایسه با گیاه شاهد نداشت، ولی وزن خشک بخش هوایی خردل اتیوپی در مقایسه با خردل هندی بیشتر بود. عدم تغییر عوامل رشد و عدم وجود علائم مسمومیت در هر دو گونه مورد بررسی تحت تیمارهای مختلف کادمیوم بیانگر توانایی این گیاهان به تحمل غلظت بالای کادمیوم خاک است. مشابه نتایج ما Sarmadi *et al.* (2011) با بررسی دو واریته گیاه شیرین‌بیان نشان دادند که با تجمع زیاد کادمیوم پارامترهای رشد ساقه تغییری نداشته است و هیچ نوع علائم مسمومیت از قبیل سوختگی و قرمز شدن بافت مشاهده نشد که بیانگر توانایی گیاه شیرین‌بیان به تحمل کادمیوم است.

در علف هرز سوروف (*Echinochloa polystachya*) نیز با وجود تجمع کادمیوم در اندام هوایی، تغییری در وزن و طول اندام‌های گیاه مشاهده نشد (Dominguez *et al.*, 2007). اگر چه کادمیوم برای گیاهان بسیار سمی است (Cuypers *et al.*, 2010)، Armas *et al.* (2015) و Seth *et al.* (2008) هر دو به ترتیب افزایش اولیه در پارامترهای رشد خردل هندی در حال رشد در خاک آلوده به کادمیوم و هیدروپونیک را گزارش کردند. نویسندگان علت آن را به اثرات هورمونی نسبت دادند که در پاسخ به تنش بیش‌فعال شد. همچنین Tang *et al.* (2016) نشان دادند که میزان زیتوده خشک برگ گیاه گل ناز (*Sedum alfredii*) که بیش‌انباشت‌گر روی و کادمیوم است، تحت تیمار روی و کادمیوم در مقایسه با کنترل افزایش یافت.

در ارزیابی شاخص سطح برگ ویژه، آلودگی بالای کادمیوم در برگ پایینی خردل اتیوپی و برگ بالایی خردل هندی منجر به کاهش SLA شد (جدول ۳). در واقع SLA نسبت سطح بافت‌های فتوسنتزکننده را به وزن بافت‌های فتوسنتزکننده نشان می‌دهد. بنابراین با کاهش SLA کارایی برگ از لحاظ فتوسنتزی افزایش می‌یابد، زیرا با کاهش SLA، ضخامت برگ، غلظت کلروپلاست، و همچنین کلروفیل و تراکم سلول‌های فتوسنتزکننده و کارایی نور افزایش می‌یابد (Bagheri and Mohammadalipur, 2011).

### ارزیابی بردباری گیاهان به تنش کادمیوم

شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی واکنش ژنوتیپ‌ها در شرایط محیطی مختلف و تعیین تحمل و حساسیت آن‌ها ارائه شده است. Fernandez (1992)، شاخص تحمل تنش (STI) را معرفی کرد. ژنوتیپ‌های پایدارتر بر اساس این شاخص دارای مقادیر بالاتر STI هستند. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر گونه در شاخص تحمل تنش کادمیوم معنی‌دار بود (جدول ۴). در مقایسه ارزیابی تحمل، هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی شاخص تحمل تنش (STI) زیادی را نسبت به کادمیوم نشان دادند (شکل ۱). Rosielle and Hamblin, (1981)، شاخص TOL را معرفی کردند. مقدار بالای TOL نشانه حساسیت ژنوتیپ به تنش

است، بنابراین انتخاب ژنوتیپ‌ها بر اساس مقادیر کم TOL است. نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر کادمیوم، گونه و اثر متقابل کادمیوم × گونه در شاخص تحمل معنی‌دار نبود (جدول ۴). در مقایسه ارزیابی تحمل، هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی شاخص تحمل (TOL) کمی را نسبت به کادمیوم نشان دادند، به‌طوری که اثر این فلز در شاخص‌های تحمل هر دو گیاه در مقایسه با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱).

**جدول۲- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، گونه و اثر متقابل کادمیوم×گونه بر برخی صفات رشد**

**Table 2. Analysis of variance, effect of cadmium, species and cadmium × species interactions on some growth characteristic**

| منابع تغییرات S.O.V | درجه آزادی df | طول ریشه Root length | طول بخش هوایی Shoot length | وزن خشک ریشه Root dry weight | وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight | سطح برگ‌ویژه برگ پایینی Lower leaf specific leaf area | سطح برگ‌ویژه برگ میانی Middle leaf specific leaf area | سطح برگ‌ویژه برگ بالایی Upper leaf specific leaf area |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کادمیوم cadmium | 2 | $0.82^{ns}$ | $13.08^{ns}$ | $0.01^{ns}$ | $0.03^{ns}$ | $5561.29^{ns}$ | $2253.97^{ns}$ | $15358.44^{*}$ |
| گونه species | 1 | $44.61^{ns}$ | $5.54^{ns}$ | $0.07^{ns}$ | $0.72^{**}$ | $432.96^{ns}$ | $107.99^{ns}$ | $697.26^{ns}$ |
| کادمیوم×گونه cadmium × species | 2 | $4.56^{ns}$ | $20.04^{ns}$ | $0.00^{ns}$ | $0.01^{ns}$ | $4095.11^{ns}$ | $602.80^{ns}$ | $2718.37^{ns}$ |
| خطا Error | 12 | 19.37 | 24.42 | 0.02 | 0.01 | 2030.72 | 2704.66 | 3086.07 |
| کل Total | 17 | | | | | | | |

**، * و ns به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح ۱٪، ۵٪ و غیرمعنی‌دار بودن هستند.

**, *, and ns indicate a significance at level of 1%, 5% and not significant, respectively.

**جدول ۳- اثر سطوح مختلف کادمیوم خاک در برخی صفات رشد دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی**

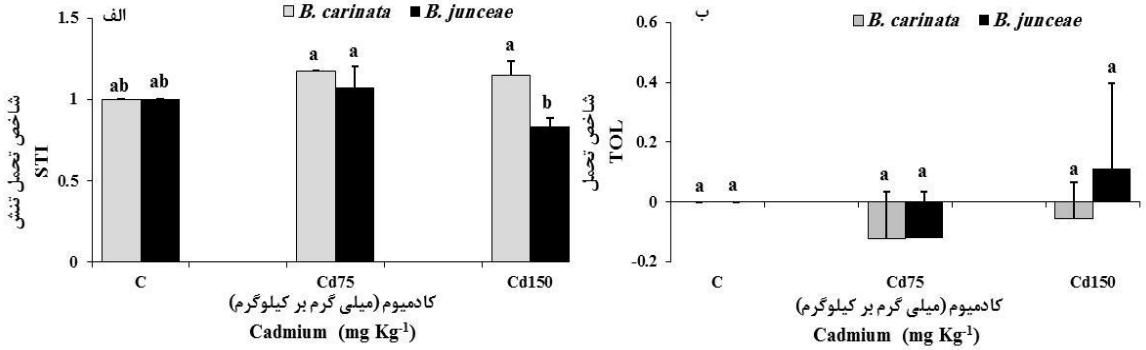
**Table 3. Effect of different levels of soil cadmium on Some growth characteristic *B.carinita* and *B.junceae***

| صفات رشد growth characteristic | غلظت کادمیوم خاک (mg $kg^{-1}$) Cadmium concentration in soil (mg $kg^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|
| | *B.carinata* | | |
| | 75 | 150 | 0 |
| طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm) | $34.4\pm1.3^{a}$ | $35.8\pm3.5^{a}$ | $35.3\pm0.3^{a}$ |
| طول بخش هوایی (سانتی‌متر) Shoot length(cm) | $25.3\pm2.8^{a}$ | $26.3\pm4.2^{a}$ | $30.1\pm3.9^{a}$ |
| وزن خشک ریشه (گرم هر گیاه) Root dry weight (g $Plant^{-1}$) | $0.8\pm0.0^{a}$ | $0.7\pm0.1^{a}$ | $0.8\pm0.0^{a}$ |
| وزن خشک بخش هوایی (گرم هر گیاه) Shoot dry weight (g $Plant^{-1}$) | $1.4\pm0.0^{a}$ | $1.4\pm0.0^{a}$ | $1.3\pm0.0^{a}$ |
| سطح برگ‌ویژه برگ پائینی (سانتی‌متر مربع بر گرم) Lower leaf specific leaf area ($cm^2g^{-1}$) | $143.1\pm19.3^{ab}$ | $96.7\pm34.4^{b}$ | $202.3\pm19.0^{a}$ |
| سطح برگ‌ویژه برگ میانی (سانتی‌متر مربع بر گرم) Middle leaf specific leaf area ($cm^2g^{-1}$) | $130.3\pm23.6^{a}$ | $131.1\pm36.6^{a}$ | $181.6\pm30.2^{a}$ |
| سطح برگ‌ویژه برگ بالایی (سانتی‌متر مربع بر گرم) Upper leaf specific leaf area ($cm^2g^{-1}$) | $112.2\pm30.2^{a}$ | $167.7\pm57.3^{a}$ | $225.6\pm57.3^{a}$ |
| | *B.junceae* | | |
| طول ریشه (سانتی‌متر) Root length(cm) | $32.6\pm1.8^{a}$ | $30.7\pm3.1^{a}$ | $32.7\pm1.0^{a}$ |
| طول بخش هوایی (سانتی‌متر) Shoot length(cm) | $28.3\pm0.4^{a}$ | $24.0\pm2.0^{a}$ | $26.1\pm1.8^{a}$ |
| وزن خشک ریشه (گرم هر گیاه) Root dry weight (g $Plant^{-1}$) | $0.9\pm0.0^{a}$ | $0.8\pm0.0^{a}$ | $0.9\pm0.1^{a}$ |
| وزن خشک بخش هوایی (گرم هر گیاه) Shoot dry weight (g $Plant^{-1}$) | $1.1\pm0.0^{a}$ | $0.9\pm0.0^{a}$ | $1.0\pm 0.1^{a}$ |
| سطح برگ‌ویژه برگ پائینی (سانتی‌متر مربع بر گرم) Lower leaf specific leaf area ($cm^2g^{-1}$) | $114.3\pm23.1^{b}$ | $146.0\pm33.6^{ab}$ | $152.5\pm21.4^{ab}$ |
| سطح برگ‌ویژه برگ میانی (سانتی‌متر مربع بر گرم) Middle leaf specific leaf area ($cm^2g^{-1}$) | $136.1\pm29.0^{a}$ | $138.7\pm12.4^{a}$ | $153.6\pm39.9^{a}$ |
| سطح برگ‌ویژه برگ بالایی (سانتی‌متر مربع بر گرم) Upper leaf specific leaf area ($cm^2g^{-1}$) | $141.4\pm20.3^{ab}$ | $111.9\pm12.0^{b}$ | $214.9\pm41.0^{a}$ |

میانگین ± خطای استاندارد با ۳ تکرار، میانگین‌های هر ردیف در هر دو گونه که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each row in both species are not significantly different according to a Duncan's multiple comparison test ($P < 0.05$). Means ± standard error (n=3).

گیاه خردل اتیوپی در سطوح مختلف آلودگی کادمیوم، شاخص تحمل تنش (STI) بالاتری نسبت به گیاه خردل هندی داشت. از نظر شاخص تحمل (TOL) گیاه خردل اتیوپی نسبت به آلودگی بالای کادمیوم، کمترین میزان TOL را نشان داد. همواره هدف از انتخاب گونه‌های متحمل به تنش، معرفی گونه‌هایی بوده که به‌طور نسبی در مقایسه با سایر ژنوتیپ‌ها تنش را بهتر تحمل کرده و در شرایط یکسان افت عملکرد کمتری داشته باشند (Srivastava *et al.*, 1987). Fernandez (1992) با بررسی عملکرد در دو محیط دارای تنش و بدون تنش، ارقام ماش (*Vigna radiata* L.) را از نظر واکنش در دو محیط به ۴ گروه تقسیم‌بندی کرد: گروه A)، ژنوتیپ‌هایی که در هر دو محیط تنش و بدون تنش تظاهر یکسانی دارند؛ گروه B)، ژنوتیپ‌هایی که فقط در محیط بدون تنش تظاهر خوبی دارند؛ گروه C) ژنوتیپ‌هایی که عملکرد بالایی در محیط دارای تنش دارند؛ و گروه D) ژنوتیپ‌هایی که دارای تظاهر ضعیفی در هر دو محیط هستند. وی هم‌چنین اظهار داشت که مناسب‌ترین معیار انتخاب برای تنش، شاخصی است که قادر به تشخیص گروه A از سایر گروه‌ها باشد. TOL قادر به تفکیک گروه A از C نیست، در حالی‌که شدت استرس در محاسبه STI لحاظ شده، بنابراین قادر به تفکیک ژنوتیپ‌های گروه A از گروه‌های B و C است. هر دو گیاه خردل اتیوپی و هندی براساس تقسیم‌بندی فرناندز با توجه به عدم کاهش صفات رشد تحت تنش کادمیوم و تظاهر یکسان در هر دو محیط دارای تنش و فاقد آن، در گروه A قرار می‌گیرند.




**شکل ۱- اثر سطوح مختلف کادمیوم خاک در شاخص تحمل تنش (الف) و شاخص تحمل (ب) دو گیاه *B.carinita* و *B.junceae*. میله‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد است، در هر نمودار میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.**

**Fig. 1. Effect of cadmium level (mg kg$^{-1}$) on stress tolerance index and tolerance index in *B.carinita* and *B.junceae*. The bars represent standard error, In each chart, means that have at least one common letter in the 95% level by Duncan test with no significant difference**

## میزان انباشت کادمیوم در گیاهان

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر کادمیوم بر تمامی پارامترهای مرتبط با غلظت و اثر گونه بر غلظت کادمیوم و فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی و فاکتور انتقال معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل کادمیوم × گونه بر تمامی پارامترهای مرتبط با غلظت جز فاکتور انتقال معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت آلودگی کادمیوم در خاک، غلظت کادمیوم در ریشه و بخش هوایی هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. غلظت کادمیوم خردل هندی نسبت به گونه دیگر بیشتر بود، به‌طوری که در ریشه و بخش هوایی این گونه به‌ترتیب به ۰/۰۴ و ۰/۰۲ درصد رسید. در مقایسه بین دو گیاه مورد بررسی در سطوح مختلف آلودگی کادمیوم، بیشترین تغلیظ زیستی در ریشه گیاه خردل اتیوپی تحت تیمار ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم اتفاق افتاد. در گیاه خردل هندی با افزایش غلظت آلودگی کادمیوم در

خاک، تغلیظ زیستی کادمیوم در ریشه و بخش هوایی گیاه افزایش معنی‌داری را نشان داد، ولی در فاکتور انتقال هر دو گیاه افزایش معنی‌داری مشاهده نشد، اما فاکتور انتقال گیاه خردل هندی حدوداً ۷۰٪ بیشتر از خردل اتیوپی بود (جدول ۵). در این بررسی مشخص شد که افزایش میزان آلودگی کادمیوم در خاک منجر به افزایش غلظت آن در ریشه و بخش هوایی هر دو گیاه شد، ولی میزان کادمیوم در ریشه هر دو گیاه بیشتر از بخش هوایی بود. مشابه نتایج ما Yuanjie *et al*. (2017) نیز نشان دادند که غلظت کادمیوم در بافت ریشه گیاه بادام زمینی بسیار بیشتر از برگ بود، که نشان‌دهنده این است که جابه‌جایی کادمیوم از ریشه به بخش هوایی ممکن است توسط موانع داخلی برای دفاع از بخش هوایی محدود شده باشد. ریشه گیاه جایگاه اصلی بی‌حرکت‌سازی کادمیوم است، که عمدتاً از طریق حفظ یون‌های سمی در دیواره سلولی (Yuanjie *et al*., 2017) و ایجاد برخی موانع کارآمد برای محدود کردن ورود کادمیوم به آوند چوب اتفاق می‌افتد و در نتیجه جلوی انتقال آن به بخش هوایی را می‌گیرد (Lux *et al*., 2011).

در گیاهان مورد بررسی ما نیز احتمالاً کاهش فاکتور انتقال، سبب تحمل زیاد گیاه شد. Ebrahimi *et al*. (2014) نیز اظهار داشتند که به‌طور کلی بیشتر فلزات در ریشه گیاهان تجمع می‌یابند. به‌نظر می‌رسد تعیین غلظت فلز در گیاه یا اندام، می‌تواند برآورد بهتری از بازده استخراج فلزات سنگین در یک گونه داده و نشان‌دهنده وسعت فلزاتی باشد که می‌توانند توسط یک گیاه حذف شوند. همان‌طور که Moameri *et al*. (2015) نشان دادند، اگر گیاه دارای توانایی گیاه‌پالایی باشد، با افزایش مقدار فلز در خاک، مقدار آن در اندام‌های گیاه نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بر اساس آنالیز فاکتور تغلیظ زیستی (BCF)، با توجه به قابلیت گیاهان برای جذب فلزات سنگین و حساسیت به آلودگی بالای فلز می‌توان چهار گروه را در آن‌ها در نظر گرفت. گونه یا بخش گیاهی که دارای BCF بین ۱۰-۱، ۱-۰/۱، ۰/۱-۰/۰۱ و کمتر از ۰/۰۱ باشد به‌ترتیب بیش‌انباشت‌گر، میان‌انباشت‌گر، کم‌انباشت‌گر و غیرانباشت‌گر است (Bini *et al*., 1995). با معیارهای ذکرشده در بالا، می‌توان هر دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی را به‌عنوان گیاه بیش‌انباشت‌گر برای کادمیوم در نظر گرفت.

**جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، گونه و اثر متقابل کادمیوم × گونه بر غلظت کادمیوم، فاکتور تغلیظ زیستی، فاکتور انتقال و شاخص تحمل**

**Table 4. Analysis of variance, effect of cadmium, species and cadmium × species interactions on cadmium concentration, bioconcentration factor, translocation factor and tolerance index**

| منابع تغییرات S.O.V | درجه آزادی df | غلظت کادمیوم ریشه Root cd concentration | غلظت کادمیوم بخش هوایی Shoot cd concentration | فاکتور تغلیظ زیستی ریشه Root bioconcentration factor | فاکتور تغلیظ زیستی بخش هوایی Shoot bioconcentration factor | فاکتور انتقال Translocation factor | شاخص تحمل تنش Stress tolerance index | شاخص تحمل tolerance index |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کادمیوم Cadmium | 2 | 219003.54** | 24302.20** | 14.54** | 1.30** | 0.04** | 0.03ns | 0.04ns |
| گونه Species | 1 | 120.79ns | 20040.68** | 0.30ns | 1.47** | 0.42** | 0.08* | 0.01ns |
| کادمیوم×گونه Cadmium×species | 2 | 13222.39** | 7519.50** | 1.46** | 0.38** | 0.02ns | 0.04ns | 0.01ns |
| خطا Error | 12 | 1885.38 | 34.26 | 0.16 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.08 |
| کل Total | 17 | | | | | | | |

**، * و ns به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح ۱٪، ۵٪ و غیرمعنی‌دار بودن هستند.

**, *, and ns indicate a significance at level of 1%, 5% and not significant, respectively.

**جدول ۵- اثر سطوح مختلف کادمیوم خاک در غلظت، فاکتور تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال کادمیوم در دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی**

**Table 5. Effect different levels of soil cadmium on concentration, bioconcentration factor and translocation factor in *B.carinita* and *B.junceae***

| فاکتور انتقال translocation factor | فاکتور تغلیظ زیستی bioconcentration factor | | غلظت کادمیوم Cadmium concentration in soil (mg kg$^{-1}$) | | غلظت کادمیوم در خاک Cadmium concentration in soil (mg kg$^{-1}$) | گیاه Plant |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | بخش هوایی Shoot | ریشه Root | بخش هوایی Shoot | ریشه Root | | |
| 0.3±0.0$^{b}$ | - | - | 0.4±0.0$^{e}$ | 1.1±0.1$^{a}$ | 0 | |
| 0.1±0.0$^{c}$ | 0.4±0.0$^{c}$ | 3.5±0.4$^{a}$ | 27.6±1.8$^{d}$ | 262.3±35.2$^{c}$ | 75 | *B.carinata* |
| 0.2±0.0$^{c}$ | 0.4±0.0$^{c}$ | 2.3±0.2$^{b}$ | 56.9±5.1$^{c}$ | 339.8±33.3$^{b}$ | 150 | |
| 0.5±0.1$^{a}$ | - | - | 0.7±0.1$^{e}$ | 1.4±0.3$^{e}$ | 0 | |
| 0.5±0.0$^{a}$ | 1.1±0.1$^{b}$ | 2.1± 0.1$^{b}$ | 86.2±5.9$^{b}$ | 106.6±7.3$^{d}$ | 75 | *B.junceae* |
| 0.4±0.0$^{ab}$ | 1.3±0.0$^{a}$ | 2.8± 0.2$^{ab}$ | 198.2±1.9$^{a}$ | 425.7±36.9$^{a}$ | 150 | |

میانگین ± خطای استاندارد با ۳ تکرار، میانگین‌های هر ستون که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری ندارند.

Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to a Duncan's multiple comparison test ($P < 0.05$). Means ± standard error (n=3).

## اثر کادمیوم در میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج آنالیز واریانس نشان داد که اثر کادمیوم، گونه و اثر متقابل کادمیوم × گونه، جز اثر گونه در میزان کاروتنوئید در هیچ یک از رنگیزه‌های فتوسنتزی معنی‌دار نبود (جدول ۶).

تیمارهای کادمیوم در هر دو گیاه به‌طور مشابهی اثر معنی‌داری در میزان و نسبت رنگیزه‌های فتوسنتزی در مقایسه با شاهد نداشت، با این حال بیشترین میزان کلروفیل کل در خردل اتیوپی در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم و در گیاه خردل هندی در تیمار ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم مشاهده شد (شکل ۲). کاهش نیافتن میزان کلروفیل را می‌توان به مکانیسم‌های دفاعی مختلفی که در مقابل تنش کادمیوم توسط گیاه به کار گرفته می‌شود، نسبت داد. John *et al*. (2009) نشان دادند که غلظت‌های صفر، ۱۵۰ و ۳۰۰ میکرومولار کادمیوم، طی مدت ۴۰ روز تیماردهی، میزان کلروفیل a، کلروفیل b و کل و نیز میزان کاروتنوئیدها را در خردل هندی در مرحله گل‌دهی افزایش داد، اما با تداوم شرایط تنش و گذشت زمان، میزان این رنگیزه‌ها کاهش یافت. علاوه بر این، Tang *et al*. (2016) در گیاه بیش‌انباشت‌گر گل ناز (*Sedum alfredii*) نشان دادند که تحت تیمار روی و کادمیوم میزان کلروفیل و پارامترهای فلورسانس کلروفیل در مقایسه با کنترل افزایش یافت. این امر به‌علت بیش‌بیانی تعداد زیادی از ژن‌های مسیر فتوسنتزی مانند چرخه کالوین، واکنش‌های نوری، انتقال الکترون و نمو پلاست توسط روی و کادمیوم در برگ این گیاه است.

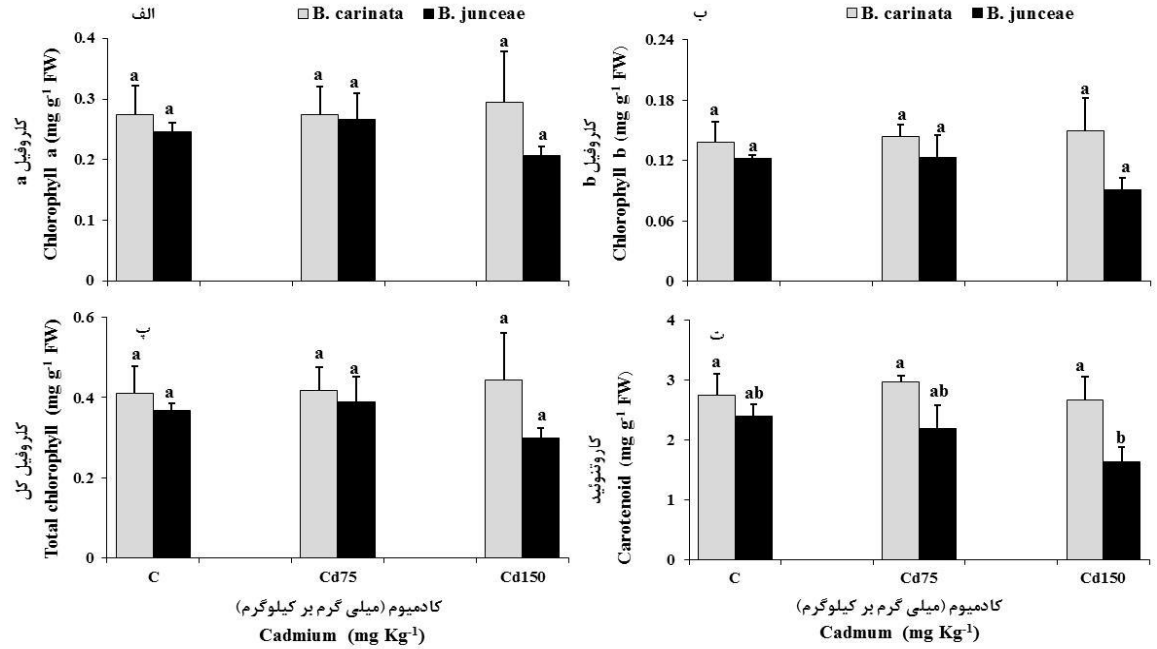
**جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیوم، گونه و اثر متقابل کادمیوم×گونه بر رنگیزه‌های فتوسنتزی**

**Table 6. Analysis of variance, effect of cadmium, species and cadmium × species interactions on photosynthetic pigments**

| کاروتنوئید Carotenoids (mg g$^{-1}$ FW) | کلروفیل کل Total chlorophyll (mg g$^{-1}$ FW) | کلروفیل b Chlorophyll b (mg g$^{-1}$ FW) | کلروفیل a Chlorophyll a (mg g$^{-1}$ FW) | درجه آزادی df | منابع تغییرات S.O.V |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.3641$^{ns}$ | 0.0015$^{ns}$ | 0.0003$^{ns}$ | 0.0005$^{ns}$ | 2 | کادمیوم Cadmium |
| 2.3250$^{*}$ | 0.0220$^{ns}$ | 0.0034$^{ns}$ | 0.0076$^{ns}$ | 1 | گونه Species |
| 0.1750$^{ns}$ | 0.0061$^{ns}$ | 0.0007$^{ns}$ | 0.0028$^{ns}$ | 2 | کادمیوم×گونه Cadmium×species |
| 0.2763 | 0.0131 | 0.0011 | 0.0068 | 12 | خطا Error |
| | | | | 17 | کل Total |

$^{**}$، $^{*}$ و $^{ns}$ به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح ۱٪، ۵٪ و غیرمعنی‌دار بودن هستند.

$^{**}$, $^{*}$, and $^{ns}$ indicate a significance at level of 1%, 5% and not significant, respectively.




**شکل ۲- اثر سطوح مختلف کادمیوم خاک در میزان کلروفیل a (الف)، کلروفیل b (ب)، کلروفیل کل (ج) و کاروتنوئید (د) در دو گیاه *B.carinita* و *B.junceae*. میله‌ها نشان‌دهنده خطای استاندارد است، در هر نمودار میانگین‌هایی که حداقل دارای یک حرف مشترک باشند در سطح ۹۵٪ با آزمون دانکن در مقایسه با شاهد اختلاف معنی‌داری ندارند.**

**Fig. 2. Effect different levels of soil cadmium (mg kg$^{-1}$) on Chlorophyll a, Chlorophyll b, Total chlorophyll and Carotenoids in *B.carinita* and *B.junceae*. The bars represent standard error, In each chart, means that have at least one common letter in the 95% level by Duncan test with no significant difference**

## نتیجه‌گیری

گیاهان مورد استفاده در گیاه‌پالایی باید ظرفیت قابل‌توجهی برای جذب، تغلیظ و تحمل آلودگی مورد نظر و کاهش غلظت آن در محیط آلوده در طول زمان داشته باشند (Mudgal *et al*., 2010) و بتوانند به سرعت رشد کرده و زیتوده کافی ایجاد کنند. در این تحقیق مشخص شد که هر دو گیاه مورد نظر با وجود جذب مقدار قابل‌توجهی از کادمیوم، قادر به رشد در محیط‌های آلوده بوده و میزان تولید زیتوده آن‌ها در مقایسه با گیاه شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. با توجه به اثر میزان زیتوده گیاه بر میزان جذب کلی فلزات سنگین، کارآیی جذب کادمیوم در خاک‌های آلوده کم نشد و با افزایش آلودگی کادمیوم در خاک میزان غلظت کادمیوم و تغلیظ زیستی در ریشه هر دو گونه افزایش یافت. با توجه به عدم افزایش فاکتور انتقال، به‌نظر می‌رسد ممانعت از انتقال کادمیوم به اندام‌های هوایی یکی از دلایل تحمل هر دو گیاه نسبت به غلظت‌های سمی کادمیوم و نشان‌دهنده نقش ریشه در نگه‌داری کادمیوم اضافی است. علاوه بر این کاهش نیافتن میزان کلروفیل احتمالاً با دخالت مکانیسم‌های دفاعی مختلف در مقابل تنش کادمیوم مرتبط است. همچنین مقایسه دو گیاه خردل اتیوپی و خردل هندی نشان می‌دهد که هر دو گونه قادر به تحمل و تجمع کادمیوم هستند، ولی فاکتور انتقال و میزان جذب و تجمع کادمیوم در گیاه خردل هندی بیشتر از خردل اتیوپی است.

## سپاسگزاری

این پژوهش با کمک مالی شماره ۹۵۰۶۰۴ ستاد توسعه زیست‌فناوری و ۹۵۸۵۰۰۶۰ صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور انجام شده است.

## منابع


Antoniadis, N. and Alloway, B.J., 2001. Availability of Cd, Ni and Zn to rye grass in seawage sludge treated soils at different temperatures. Water, Air and Soil Pollution. 132, 201– 204.

Arias, D., 2007. Calibration of LAI -2000 to Estimate leaf area index and assement of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in costarica. Forest Ecology and Management. 247, 85-193.

Armas, T., Pinto, A.P., Varennes, A., Mourato, M.P., Martins, L.L., Goncalves, M.L.S. and Mota, A.M., 2015. Comparison of cadmium-induced oxidative stress in *Brassica juncea* in soil and hydroponic cultures. Plant Soil. 388, 294–305.

Arnon, D.I., 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology. 24, 1-15.

Bagheri, A.R. and Mohammadalipur, Z., 2011. Effects of salicylic acid on soybean yield components and growth under the salt stress conditions. Journal of Plant Ecophysiology. 8, 29-41 (In Persian whit English abstract).

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

Chen, H. and Cutright, T.J., 2002. The interactive effects of chelator, fertilizer, and rhizobacteria for enhancing phytoremediation of heavy metal contaminated soil. Journal of Soils Sediments. 2, 203-210.

Clemens, S., 2001. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. Planta. 212, 475–486.

Cuypers, A., Plusquin, M., Remans, T., Jozefczak, M., Keunen, E., Gielen, H., Opdenakker, K., Nair, A., Munters, E. and Artois, T., 2010. Cadmium stress: an oxidative challenge. BioMetals. 23, 927–940.

Dalvand, M., Hamidian, A.H., Zare Chahoki, M.A., Motesharezadeh, B., Mirjalili, A.A. and Esmaeilzadeh, E., 2014. Evaluation of concentration Cu, Pb, Zn and Mn in shoots of *Artemisia sp.* In around rangelands copper mine in the barberry valley, Taft city in Yazd province. Journal of Rangeland Science. 3, 219-229 (In Persian whit English abstract).

Dinakar, N., Nagajyothi, P.C., Udaykiran, Y. and Damodharam, T., 2008. Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedlings**.** Journal of Environmental Sciences. 20, 199-206.

Dominguez, F.A., Chavez, M.C.G., Gonzalez, R.C. and Vazquez, R.R., 2007. Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system. Journal of Hazardous Materials. 141, 630–636.

Ebbs, S.D., Lasat, M.M., Brady, D.J., Cornish, J., Gordon, R. and Kochian, L.V., 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. Journal of Environmental Quality. 26, 1424–1430.

Ebrahimi, M., Jafari, M., Savaghebi, Gh.R., Azarnivand, H., Tavili, A. and Madrid, F., 2014. Investigation of heavy metals accumulation in plants growingin contaminated soils (case study: Qazvin Province, Iran). Journal of Rangeland Science. 2, 91-99 (In Persian whit English abstract).

Fayiga, A.O., Ma, L.Q., Cao, X. and Rathinasabapathi, B., 2004. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyper accumulator *Petri vitiate* L. Journal of Environment and Pollution. 2, 289-296.

Fernandez, G.C.J., 1992. Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. pp. 257-270. In: Kuo, C.G. (ed.) Proceedings of a Symposium on Adaptation of Vegetables and other Food Crops in Temperature and Water Stress. AVRDC Publications, Tainan, Taiwan.

Graziani, N.S., Salazar, M.J., Pignata, M.L. and Rodriguez, J.H., 2016. Assessment of the root system of *Brassica juncea* (L.) czern. and *Bidens pilosa* L. exposed to lead polluted soils using rhizobox systems. International Journal of Phytoremediation. 18, 235–244.

John, R., Ahmad, P., Gadgil, K. and Sharma, S., 2009. Cadmium and lead-induced changes in lipid peroxidation, antioxidative enzymes and metal accumulation in *Brassica juncea* L. at three different growth stages. Archives of Agronomy and Soil Science. 55, 395–405.

Khodaverdiloo, H., Rahmanian, M., Ghorbani Dashtaki, Sh., Rezapour, S., Hadi, H. and Han, F.X., 2012. Effect of cyclic wetting-drying moisture on redistribution of lead (Pb) loaded to some semiarid-zone soils. Pedosphere. 22, 304–313.

Li, W., Higashi, T. and Fujimura, T., 2004. Uptake of cadmium and inorganic nutrients by Brassica plant under water culture conditions. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 75, 329–337.

Lux, A., Martinka, M., Vaculik, M. and White, P.J., 2011. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. Journal of Experimental Botany. 62, 21–37.

Malan, R., Walia, A., Saini, V. and Gupta, S., 2011. Comparison of different extracts leaf of *Brassica juncea* Linn on wound healing activity. European Journal of Experimental Biology. 2, 33-40.

Mattina, M.J.I., Lannucci-Berger, W., Musante, C. and White, J.C., 2003. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. Journal of Environmental Pollution. 124, 375– 378.

Moameri, M., Jafari, M., Tavili, A., Motasharezadeh, B. and Zare Chahuki, M., 2015. Assesment of potential of rangeland plant for phytoremediation contaminated soils with Zn and Pb (case study: rangeland ground of Zn and Pb Zanjan). Journal of Rangeland Science. 1, 29-41 (In Persian whit English abstract).

Mudgal, V., Madaan, N. and Mudgal, A., 2010. Heavy metals in plants: phytoremediation: Plants used to remediate heavy metal pollution. Agriculture and Biology Journal of North America. 1, 40-46.

Neilson, S. and Rajakaruna, N., 2015. Phytoremediation of agricultural soils: using plants to clean metal-contaminated arable land. Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants. 1, 159-168.

Pinto, A.P., Motaa, M., Devarennes, A. and Pinto, F.C., 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. Science of the Total Environment Journal. 326, 239- 247.

Pourmoghadas, H., Javadi, A. and Islamiyah, R., 2002. Evaluation of the amount of toxic metals cadmium, chromium, lead and mercury in tomato paste in Isfahan city. Scientific Journal of Hamadan Medical Science University and Health Services. 9, 40-46 (In Persian whit English abstract).

Quartacci, M.F., Baker, A.J.M. and Navari-Izzo, F., 2005. Nitrilotriacetate- and citric acid-assisted phytoextraction of cadmium by Indian mustard (*Brassica juncea* (L.) Czernj, Brassicaceae). Chemosphere. 59, 1249–1255.

Quartacci, M.F., Irtelli, B., Baker, A.J.M. and Navari-Izzo, F., 2007. The use of NTA and EDDS for enhanced phytoextraction of metals from a multiply contaminated soil by *Brassica carinata.* Chemosphere. 68, 1920-1928.

Raskin, I. and Ensley, B.D., 2000. Phytoremediation of toxic metals using plants to clean up the environment. Wiley-Interscience Publication.

Rosielle, A.T. and Hamblin, J., 1981. Theotricals aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. Crop Science. 21, 43-46.

Ryan, J.A., Pahren, H.B. and Lucas, J.B., 1982. Controlling cadmium in the human food chain: a review and rationale based on health effects. Environmental Research. 28, 251–302.

Sarmadi, M., Irani, M. and Bernard, F., 2011. The study of tolerance of cadmium and accumulation it in Licorice plantlets. Environmental Sciences. 3, 69-80 (In Persian whit English abstract).

Seth, C., Kumar, S., Chaturvedi, P. and Misra, V., 2008. The role of phytochelatins and antioxidants in tolerance to cd accumulation in *Brassica juncea* L. Ecotoxicology Environ Safety. 71, 76–85.

Srivastava, J.P., Acevedo, E. and Varma, S., 1987. Drought tolerance in winter cereal. John Wiley Pub, USA.

Tang, L., Yao, A., Yuan, M., Tang, Y., Liu, J., Liu, X. and Qiu, R., 2016. Transcriptional up-regulation of genes involved in photosynthesis of the Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii* in response to zinc and cadmium. Chemosphere. 164, 190-200.

Tlustos, P.B., rendova, K., Szakova, J., Najmanova, J. and Koubova, K., 2016. The long-term variation of Cd and Zn hyperaccumulation by *Noccaea* spp. and *Arabidopsis halleri* plants in both pot and field conditions. International Journal of Phytoremediation. 18, 110–115.

Torresdey, G., Videa, J.R.P., Rosa, G. and Parsons, J.G., 2005. Phytoremediation of heavy metals and study of the metal coordination by X-ray absorption spectroscopy. Coordination Chemistry Reviews. 249, 1797–1810.

Yang, X.E., Long, X.X., Calvert, D.V. and Stofella, P.J., 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn hyperaccumulating plant species (*Sedium alfredii* Hance). Plant Soil. 259, 181–189.

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

Zhang, M., Alva, A.K., Li, Y.C. and Calvert , D.V., 1997. Chemical association of Cu, Zn, Mn, and Pb in selected sandy citrus soils. Journal of Soil Science. 162, 181–188.

Zhu, Y.L., Pilon-Smits, E.A.H., Jouanin, L. and Terry, N., 1999. Overexpression of glutathione synthetase in Indian mustard enhances cadmium accumulation and tolerance. Plant Physiology. 119, 73–79.

Environmental Sciences Vol.15 / No.3 / Autumn 2017

**173-186**

# Phytoremediation potential of two species *Brassica juncea* and *Brassica carinata* in soils contaminated by cadmium

**Zahra Soleimannejad, Ahmad Abdolzadeh* and Hamid Reza Sadeghipour**

Department of Biology, Faculty of Science, Golestan University, Gorgan, Iran

**Received:** 2017.07.23 **Accepted:** 2017.10.31

**Soleimannejad, Z., Abdolzadeh, A. and Sadeghipour, H.R., 2017.** Phytoremediation potential of two species Brassica juncea and Brassica carinata in soils contaminated by cadmium. Environmental Sciences. 15(3): 173-186.

**Introduction:** Heavy metals are one of the most important environmental pollutants that have been given high importance in recent decades. The accumulation of elements in the soil, especially in agricultural land, has been gradual and the concentration of heavy elements can reach to levels that threaten human food security. Among the heavy metals, cadmium is considered as one of the most dangerous elements due to its high mobility in biological systems, high toxicity, high solubility in water and rapid absorption by the root system of many plant species. Therefore, in this research, the growth, accumulation and phytoremediation potential of cadmium in two species Ethiopian mustard (*Brassica carinata*) and Hindi mustard (*Brassica juncea*) is studied.

**Materials and methods:** Plants in contaminated soils with concentrations of 0, 75 and 150 mg $kg^{-1}$ of cadmium were grown in a greenhouse and harvested after seven weeks to measure some growth characteristics.

**Results and discussion:** The results showed that cadmium treatments had no significant effect on growth traits and chlorophyll content of two plants compared with the control. Both plants showed a high stress tolerance index and low stress tolerance to cadmium. With increasing cadmium concentrations in the soil, the concentration of cadmium in the root and shoot of both plants *B. carinata* and *B. juncea* significantly increased. The translocation factor of *B. juncea* was about 70% higher than *B. carinata.* The highest translocation factor was observed in the treatment of 75 mg $kg^{-1}$ of cadmium in *B. juncea*.

**Conclusion:** Comparison of the two plants *B. carinata* and *B. juncea* showed that both species are able to tolerate and accumulate cadmium, but the translocation factor, uptake and accumulation of cadmium in plant *B. juncea* was greater than *B. carinata* and, so, it seems that *B. juncea* showed better performance for use in phytoremediation process.

**Keywords:** Soil contamination, Accumulation, Brassicaceae, Cadmium, Phytoremediation.

* Corresponding Author. *E-mail Address*: ah_ab99@yahoo.com