

## ارزیابی تجمع و جابجایی کادمیم در گیاه *Jatropha curcas* رشد یافته در یک خاک آلوده

پریسا احمدپور<sup>۱</sup> و محسن سلیمانی<sup>۲\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۳۰)

### چکیده

گیاه پالایی یک فناوری کم هزینه و سازگار با محیط زیست است که در آن از پتانسیل گیاهان برای پالایش محیط‌های آلوده به آلاینده‌های آلی و معدنی استفاده می‌کنند. این مطالعه جهت بررسی پتانسیل گیاه *Jatropha curcas* برای پالایش یک خاک آلوده به کادمیم (در غلظت‌های صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک) در یک دوره ۵ ماهه انجام شد. شاخص تجمع زیستی (نسبت غلظت فلز در ریشه گیاه به میزان غلظت آن در خاک)، شاخص جابجایی (نسبت غلظت فلز در شاخساره گیاه به میزان غلظت آن در خاک) و درصد کارایی برداشت (درصد مقدار فلز در کل زیست توده خشک گیاه به مقدار فلز موجود در محیط خاک) تعیین شد. میزان انباشت فلز کادمیم در ریشه بیشتر از ساقه و در ساقه بیشتر از برگ گیاه بود. بیشترین میزان غلظت کل کادمیم (حدود ۱۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک) و بیشترین درصد کارایی برداشت کادمیم به ترتیب در تیمارهای ۱۵۰ و ۲۵ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک مشاهده شد. شاخص تجمع زیستی گیاه بیشتر از یک و شاخص جابجایی آن کمتر از یک بود. اگرچه نتایج بیانگر پتانسیل این گونه برای تثبیت کادمیم در خاک‌های آلوده به این فلز یبود؛ با این وجود انجام پژوهش‌های بیشتر در عرصه نیز نیاز است.

کلمات کلیدی: گیاه پالایی، *Jatropha curcas*، فلزات سنگین، آلودگی خاک

۱. اداره کل بنادر و دریانوردی استان بوشهر

۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.soleimani@cc.iut.ac.ir

## مقدمه

رهاسازی آلاینده‌های آلی و معدنی به محیط زیست از طریق فرایندهای طبیعی (هوادیدگی سنگ‌ها و یا خاکسترهای آتشفشانی) و فعالیت‌های انسان (کشاورزی، صنعتی و شهری) انجام می‌شود. در بین آلاینده‌های محیط زیست فلزات سنگین به علت سمیت بالا، تجزیه ناپذیری و تجمع در بافت‌های گیاهی و جانوری حایز اهمیت هستند.

کادمیم فلز سنگینی است که به‌عنوان یک آلاینده مهم در خاک شناخته شده است و اثرات سمیت زیادی بر موجودات زنده دارد. براساس گزارش آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا، کادمیم یکی از ۱۲۶ آلاینده مهم شناخته شده است (۲۴). این فلز به‌عنوان یک عنصر غیر ضروری می‌تواند در غلظت‌های خیلی کم نیز بر رشد گیاه تأثیر گذاشته و زندگی گیاه را به خطر اندازد (۲۸). غلظت معمول کادمیم در خاک بین ۰/۰۱ تا ۲ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد، اما در خاک‌های شهری و کشاورزی، غلظت این فلز می‌تواند از حد آستانه تحمل نیز تجاوز کند (۵). غلظت بحرانی کادمیم در خاک بین ۳ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم یاست که باتوجه به ویژگی‌های خاک تعیین می‌شود (۱۴). براساس گزارش آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده، آلودگی کادمیم در بیش از ۸ درصد مناطق آلوده خطر ساز در ایالت متحده آمریکا وجود داشته است (۱۶).

روش‌های متداول پالایش خاک‌ها و آب‌های آلوده به فلزات سنگین، نیاز به زمان طولانی و نیروی کار زیاد داشته و در عین حال باعث تخریب ساختمان و ساختار گیاهی خاک می‌شود (۲۹). روش‌های پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، برای مناطق آلوده وسیع، از نظر تکنیکی و اقتصادی قابل اجرا نمی‌باشد (۷). بنابراین، ترویج فناوری‌های جدید جهت پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین که جنبه اقتصادی داشته باشد، اجتناب ناپذیر است (۳). گیاه‌پالایی، یک فناوری سبز، با صرفه اقتصادی و سازگار با محیط زیست است که در آن از گیاهان و یا ریزجانداران و یا ترکیبی از هر دو جهت پالایش مناطق آلوده

استفاده می‌شود (۱۹). این فناوری شامل گیاه‌استخراجی (Phytoextraction)، گیاه‌تثبیتی (Phytostabilization)، گیاه‌تبخیری (Phytovolatilization) و گیاه‌تخریبی (Phytodegradation) است (۱۱، ۱۸، ۳۰ و ۳۴).

گیاهان مناسب جهت گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به‌روش گیاه‌استخراجی، باید ظرفیت تجمع فلزات سنگین را بیشتر از میزان معمول برای سایر گیاهان به‌ویژه در شاخساره خود داشته باشند. گیاهان مذکور باید دارای میزان تولید بالای زیست‌توده، سرعت رشد بالا، دارای قدرت جذب و انتقال مؤثر فلزات به بخش‌های هوایی خود باشند (۴ و ۲۹). برای گیاه‌پالایی فلزات سنگین به گیاهان دارای تحمل و توان انباشته زیاد مواد مذکور نیاز است که به گیاهان بیش‌انباشتگر (Hyperaccumulator) معروف هستند و میزان جذب فلزات سنگین در شاخساره آنها نسبت به ریشه بیشتر از ۱ است (۶). بیش‌انباشتگرها، می‌توانند حداقل ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک کادمیم (۳۲)، ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، کروم، سرب و کبالت، ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم جیوه و ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک نیکل و روی (۱۷) انباشت کنند. تا کنون بیش از ۵۰۰ گونه گیاهی از ۱۰۰ خانواده، به‌عنوان گیاهان بیش‌انباشتگر شناسایی شده‌اند (۲۹).

بعضی از گونه‌های گیاهی مانند *Jatropha curcas*، *Dodonaea viscosa* و *Cassia auriculata*، دارای پتانسیل زیادی برای پالایش خاک‌های آلوده به انواع فلزات سنگین هستند (۲۴). در این مطالعه گیاه *Jatropha curcas* به‌دلیل رشد سریع و استقرار آسان، تقاضای کم مواد مغذی، توانایی رشد در خاک‌های فقیر به‌دلیل داشتن بوته ستر و همچنین به‌عنوان یک گونه شناخته شده تأمین سوخت زیستی، انتخاب شد (۲۱ و ۲۷). این گیاه به‌عنوان یکی از بهترین گونه‌های بیش‌انباشتگر مسیری شناخته شده (۱۰) و نیز به‌عنوان گونه مناسب جهت گیاه‌پالایی هیدروکربن‌ها در خاک معرفی شده است (۱).

جatroفا، یک درخت کوچک از خانواده Euphorbiaceae

می باشد که ارتفاع آن به ۵ متر و در شرایط ایده آل به ۱۰ متر و عمر متوسط آن به ۵۰ سال می رسد (۳۱). این گونه به دلیل رشد سریع، استقرار ساده، توانایی رشد در شرایط مختلف با تقاضای کم مواد مغذی، می تواند دارای پتانسیل گیاه پالایی باشد که در پژوهش های مختلف به آن اشاره شده است (۹، ۲۱ و ۳۶). هدف این مطالعه، ارزیابی پتانسیل گیاه پالایی و عملکرد رشد این گیاه در یک خاک آلوده شده به کادمیم بوده است.

### مواد و روش ها

این مطالعه در گلخانه دانشکده جنگل داری دانشگاه پوترای مالزی ("۲۴.۱۸° ۵۹' ۲۴" عرض جغرافیایی شمالی و "۴۵.۴۵° ۴۲' ۰" طول جغرافیایی شرقی) به مدت ۵ ماه از بهمن ماه ۸۸ تا خرداد ۸۹ صورت گرفت. متوسط دما در گلخانه در طول صبح، بعدازظهر و غروب به ترتیب ۲۷، ۳۶ و ۳۲ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد بود. نهال های سالم و همسن، از مؤسسه تحقیقات کشاورزی (مردی) واقع در شهرستان سردانگ، استان سلانگور جمع آوری شد.

### خاک مورد مطالعه و اندازه گیری ویژگی های آن

خاک مورد استفاده در این مطالعه، رس شنی از سری مانچونگ بود. این خاک از دانشکده کشاورزی دانشگاه پوترای مالزی جمع آوری شد. خاک پس از هواخشک شدن، خرد و از الک ۴ میلی متری عبور داده شد. خاک الک شده به عنوان بستر رشد مورد استفاده قرار گرفت. الک ضد زنگ جهت تهیه مخلوط خاک یکپارچه به عنوان بستر رشد مورد استفاده قرار گرفت. کادمیم در غلظت های مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم ( $Cd_{100}$ ،  $Cd_{75}$ ،  $Cd_{50}$ ،  $Cd_{25}$ ،  $Cd_{0}$ ) به خاک اضافه گردید و پس از ۱۵ روز نهال ها کشت شدند. در طول این مدت برای ایجاد تعادل فرایند مرطوب سازی خاک در حد ظرفیت زراعی انجام شد. برای تهیه غلظت های مختلف کادمیم، از نمک کلرید کادمیم ( $H_2O$ ) استفاده گردید. بخشی از خاک از الک ۲ میلی متری

عبور داده شده و جهت اندازه گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه فرستاده شد. بافت خاک با استفاده از روش پیپت، تعیین گردید (۲). پ- هاش خاک، در سوسپانسیون ۲/۵:۱ (خاک: مایع) اندازه گیری شد (۲). ظرفیت تبادل کاتیونی و کاتیون های تبدلی (کلسیم، منیزیم و پتاسیم) با استفاده از روش لیچینگ و با به کار بردن استات آمونیوم ۱ مولار در پ- هاش ۷ اندازه گیری شد (۲). آلومینیوم و هیدروژن تبدلی به روش تیتراسیون هیدروکسید سدیم و فسفر قابل دسترس با استفاده از روش بری (مخلوطی شامل فلورید آمونیوم ۰/۳ مولار و اسید هیدروکلریک ۰/۱ مولار) اندازه گیری گردید (۲). کربن و نیتروژن کل به وسیله دستگاه اندازه گیری کربن- نیتروژن- گوگرد (USA و Leco ۲۰۰۰ CNS) اندازه گیری شد.

### کشت گیاه

نهال ها در گلدان های پلاستیکی با ارتفاع ۳۲ سانتی متر، قطر بالایی ۱۰۶ سانتی متر و قطر پایینی ۶۹ سانتی متر حاوی خاک با مقادیر مختلف کادمیم به آرامی بدون آسیب رساندن به سیستم ریشه، کاشته شدند. در هر گلدان یک نهال کاشته شد و نهال های اولیه مورد استفاده از نظر خصوصیات ظاهری تقریباً یکسان بودند. قطر، ارتفاع و تعداد برگ نهال ها، هر ماه اندازه گیری شد. نهال ها بعد از ۵ ماه جهت تعیین وزن خشک (ریشه، ساقه و برگ) و میزان فلزات سنگین جذب شده در اندام های مختلف گیاه، برداشت شدند. روش آکوارجیا برای هضم نمونه های گیاه و خاک، مورد استفاده قرار گرفت (۱۵). غلظت کادمیم در اندام های مختلف گیاه و نمونه های خاک به وسیله دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (پرکین المر) اندازه گیری شد. جهت ارزیابی پتانسیل گونه گیاهی، سه شاخص شامل شاخص تجمع زیستی (نسبت غلظت فلز در ریشه گیاه به میزان غلظت آن در خاک)، شاخص جابجایی (نسبت غلظت فلز در شاخساره گیاه به میزان غلظت آن در خاک) و درصد کارایی برداشت (درصد مقدار فلز در کل

جدول ۱. خصوصیات اندازه گیری شده فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

|            |                                            |
|------------|--------------------------------------------|
| رس شنی     | بافت                                       |
| ۵۷/۹±۱/۹   | شن (درصد)                                  |
| ۵/۳±۰/۴    | سیلت (درصد)                                |
| ۳۶/۹±۱/۹   | رس (درصد)                                  |
| ۲۸/۹±۰/۵   | رطوبت ظرفیت مزرعه (درصد)                   |
| ۰/۰۳±۰/۰۳  | ازت کل (درصد)                              |
| ۰/۷±۰/۱    | کربن کل (درصد)                             |
| ۰/۰۳±۰/۰۰۲ | فسفر کل (درصد)                             |
| ۰/۱۰±۰/۰۰۳ | پتاسیم کل (درصد)                           |
| ۴/۶±۰/۲    | پ-هاش (۱ به ۲/۵ خاک به آب)                 |
| ۹/۲±۱/۱    | فسفر قابل دسترس (میلی گرم در کیلوگرم)      |
| ۱۴/۰۳±۱/۷۷ | ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بر کیلوگرم) |
| ۰/۳±۰/۱۳   | هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)          |
| ۲/۶±۰/۲    | کادمیم کل (میلی گرم بر کیلوگرم)            |
| ۹/۹±۰/۳    | مس کل (میلی گرم بر کیلوگرم)                |
| ۴۶/۷±۰/۶   | روی کل (میلی گرم بر کیلوگرم)               |
| ۴۷۹±۲۳     | آهن کل (میلی گرم بر کیلوگرم)               |
| ۳۰/۶±۳/۰   | منگنز کل (میلی گرم بر کیلوگرم)             |

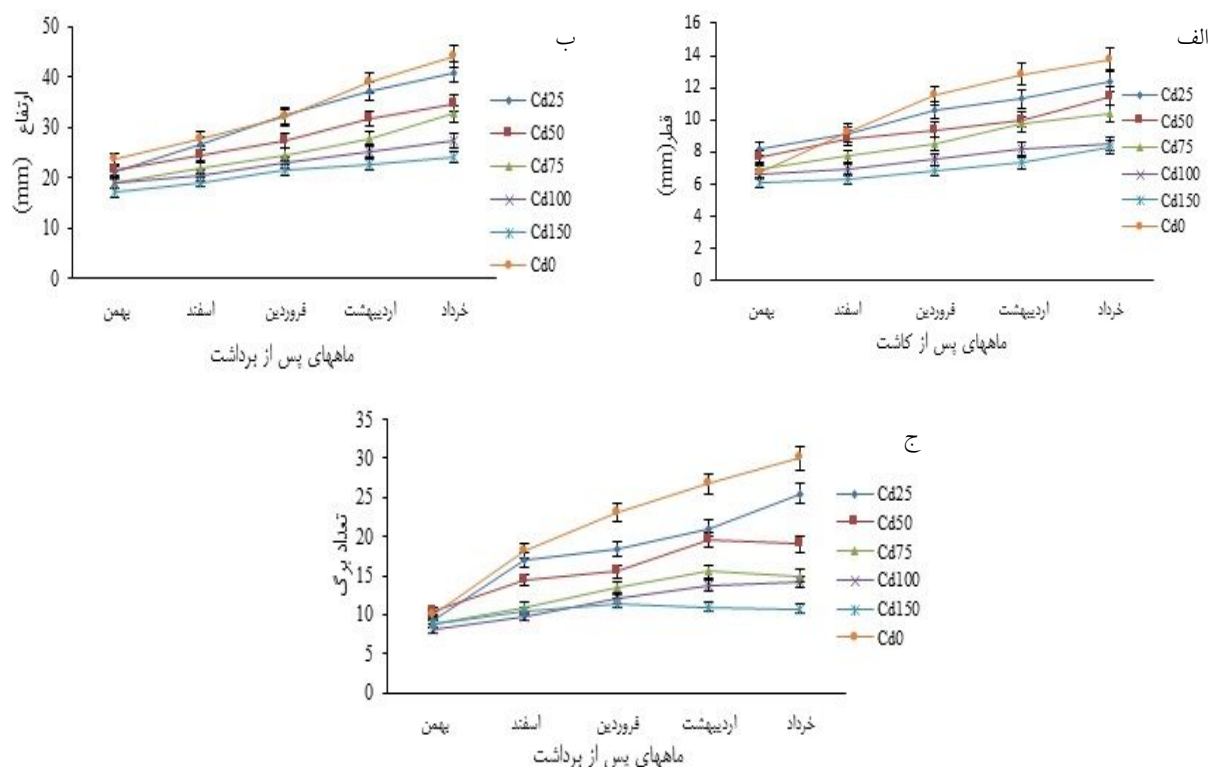
مقادیر، میانگین ± انحراف معیار است.

اندام‌های مختلف گیاه و آزمون دانکن ( $P < 0.05$ ) جهت تعیین هر گونه تفاوت معنی‌دار بین میانگین نتایج به کار رفت. همچنین همبستگی جهت تعیین رابطه غلظت کادمیم در بستر رشد با تولید وزن خشک با در نظر گرفتن ضریب همبستگی پیرسون بررسی شد. از نرم افزار SAS برای بررسی تجزیه و تحلیل داده‌ها و از نرم افزار Excel برای رسم شکل‌ها استفاده گردید.

زیست توده خشک گیاه به مقدار فلز موجود در محیط خاک) مورد استفاده قرار گرفت (۳۷).

### تجزیه و تحلیل آماری

در این مطالعه طرح کاملاً تصادفی با ۱ تیمار (غلظت کادمیم در خاک در ۶ سطح ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم) و ۴ تکرار مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه واریانس برای شاخص‌های رشد و میزان فلزات سنگین در خاک و



شکل ۱. الف) قطر گیاه، ب) ارتفاع و ج) تعداد برگ گیاه در طول ماه‌های کاشت تحت تأثیر تیمارهای مختلف کادمیم میانگین  $\pm$  انحراف معیار در هر ماه نشان داده شده است. Cd، Cd<sub>25</sub>، Cd<sub>50</sub>، Cd<sub>75</sub>، Cd<sub>100</sub>، Cd<sub>150</sub> و Cd<sub>0</sub> به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک است

## نتایج و بحث

### رشد گیاه در غلظت‌های مختلف کادمیم خاک

شاخص‌های رشد گیاه در غلظت‌های مختلف کادمیم اضافه شده به خاک متفاوت بود و تفاوت معنی‌داری ( $P \leq 0.05$ ) بین تیمارها در قطر، ارتفاع و تعداد برگ در زمان برداشت وجود داشت. بیشترین میزان رشد قطری، ارتفاع و تعداد برگ مربوط به تیمار شاهد (بدون کادمیم) و کمترین مقدار مربوط به تیمار Cd<sub>150</sub> حاوی ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بود (شکل‌های ا-الف تا ج). با وجود کاهش شاخص‌های اندازه‌گیری شده رشد گیاه در حضور کادمیم، این شاخص‌ها با گذشت زمان در هر ماه در هر تیمار افزایش یافت. سلیمانی و همکاران (۳۲) به کاهش رشد گیاه فسکیو با افزایش کادمیم در محیط رشد گیاه اشاره کردند. نتایج مشابهی توسط یاداو و همکاران

خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که آلومینیوم و هیدروژن تبادل منبع اصلی اسیدیته خاک بوده است. باتوجه به محتوی نیتروژن کل خاک مقدار این عنصر برای رشد گیاه در سطح پایینی بود. همچنین باتوجه به مقدار هدایت الکتریکی خاک مورد استفاده در دسته خاک‌های غیرشور قرار دارد. غلظت کادمیم خاک قبل از کاشت و بعد از اضافه کردن این عنصر به خاک در تیمارهای مختلف بین ۲/۶ تا ۱۴۳/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و بیشترین غلظت مربوط به تیمار Cd<sub>150</sub> و کمترین مقدار مربوط به خاک شاهد Cd<sub>0</sub> بود. غلظت کادمیم در خاک بعد از کشت گیاه از ۱/۸ تا ۱۱۶/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب مربوط به تیمارهای Cd<sub>0</sub> (شاهد) و Cd<sub>150</sub> متفاوت بود.

جدول ۲. وزن خشک برگ، ساقه و ریشه (گرم) گیاه بعد از ۵ ماه تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیم

| تیما              | ریشه                   | ساقه                    | برگ                    |
|-------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Cd <sub>۰</sub>   | ۱۱/۲±۱/۲ <sup>a</sup>  | ۲۱/۸۵±۲/۱۶ <sup>a</sup> | ۱۵/۶±۱/۹ <sup>a</sup>  |
| Cd <sub>۲۵</sub>  | ۱۰/۴±۰/۳ <sup>ab</sup> | ۲۱/۳±۱/۷ <sup>a</sup>   | ۱۴/۵±۱/۱ <sup>ab</sup> |
| Cd <sub>۵۰</sub>  | ۹/۹±۰/۲ <sup>ab</sup>  | ۱۲/۳±۰/۳ <sup>b</sup>   | ۱۱/۵±۰/۹ <sup>bc</sup> |
| Cd <sub>۷۵</sub>  | ۸/۹±۰/۴ <sup>bc</sup>  | ۱۱/۰±۰/۶ <sup>b</sup>   | ۱۰/۰±۰/۹ <sup>c</sup>  |
| Cd <sub>۱۰۰</sub> | ۸/۷±۰/۵ <sup>bc</sup>  | ۱۰/۳±۰/۴ <sup>b</sup>   | ۱۰/۰±۰/۳ <sup>c</sup>  |
| Cd <sub>۱۵۰</sub> | ۷/۹±۰/۱ <sup>c</sup>   | ۹/۴±۰/۴ <sup>b</sup>    | ۹/۴±۱/۱ <sup>c</sup>   |

عدم وجود حرف مشترک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. مقادیر، میانگین ± انحراف معیار است. Cd<sub>۰</sub>، Cd<sub>۲۵</sub>، Cd<sub>۵۰</sub>، Cd<sub>۷۵</sub> و Cd<sub>۱۰۰</sub> به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشد

برگ (۹/۴ ± ۱/۱ گرم)، ساقه (۹/۴ ± ۰/۴ گرم) و ریشه (۱/۱ ± ۰/۱ گرم) در تیمار Cd<sub>۱۵۰</sub> مشاهده شد. مقدار تولید وزن خشک اندام‌های مختلف گیاه بدین ترتیب بود: ریشه > برگ > ساقه. وزن خشک گیاه با افزایش غلظت کادمیم اضافه شده به بستر کاشت کاهش یافت. کاهش وزن خشک گیاه، احتمالاً به دلیل اثر منفی کادمیم بر تقسیم سلولی و یا متابولیسم DNA، RNA و پروتئین‌ها است (۲۵).

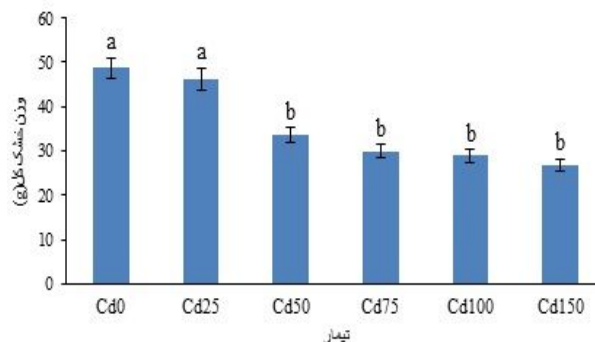
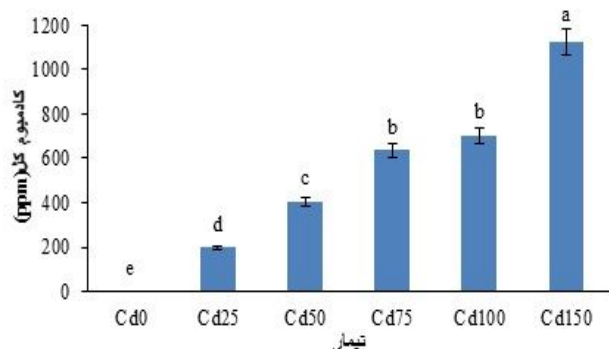
#### وزن خشک کل گیاه تحت تأثیر تیمار کادمیم

وزن خشک کل گیاه تحت تأثیر غلظت‌های مختلف کادمیم، بین ۲۶/۹ تا ۴۸/۷ گرم بود. تفاوت معنی‌داری (P ≤ ۰/۰۵) بین تیمارهای کادمیم در تولید وزن خشک گیاه مشاهده شد. بیشترین تولید وزن خشک کل گیاه در خاک شاهد به دست آمد، درحالی که نهال‌های کاشته شده در خاک محتوی ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک، کمترین وزن خشک کل را نشان دادند (شکل ۲). تولید وزن خشک کل گیاه با افزایش غلظت کادمیم اضافه شده به خاک بستر رشد کاهش یافت که نشان دهنده اثر سوء کادمیم بر تولید وزن خشک گیاه به ویژه در غلظت‌های بالا است. یون‌های فلزی سمی می‌توانند جایگزین

(۳۶) در غلظت‌های زیاد عناصر آرسنیک، کروم و روی برای گیاه جاتروفا گزارش شده است که موید کاهش رشد گیاه با افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک است. سمیت فلزات سنگین به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل بازدارنده رشد گیاه مطرح است. کادمیم به عنوان یک عنصر غیر ضروری، رشد و توسعه گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸). این عنصر جذب عناصر ضروری مثل مس و روی به وسیله گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند جایگزین عناصر ضروری در واکنش‌های آنزیمی مورد نیاز در تولید DNA، RNA و پروتئین باشد (۲۶). بنابراین، وجود کادمیم در محیط و به تبع آن کمبود عناصر مغذی مثل مس و روی می‌تواند باعث کاهش رشد گیاه گردد (۲۲).

#### وزن خشک برگ، ساقه و ریشه

وزن خشک اندام‌های مختلف گیاه از جمله برگ، ساقه و ریشه تحت تأثیر غلظت کادمیم محیط تفاوت معنی‌دار داشت (P ≤ ۰/۰۵). بیشترین وزن خشک برگ (۱۵/۶ ± ۱/۹ گرم)، ساقه (۲۱/۹ ± ۲/۲ گرم) و ریشه (۱۱/۲ ± ۱/۲ گرم) در خاک شاهد به دست آمد (جدول ۲)، درحالی که کمترین وزن خشک



شکل ۳. غلظت کل کادمیم در گیاه تحت تأثیر تیمارهای کادمیم. حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین  $\pm$  انحراف معیار است. Cd، Cd<sub>۲۵</sub>، Cd<sub>۵۰</sub>، Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک است

شکل ۲. وزن خشک کل گیاه تحت تأثیر تیمارهای کادمیم. حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین  $\pm$  انحراف معیار است. Cd، Cd<sub>۲۵</sub>، Cd<sub>۵۰</sub>، Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک است

ساقه و ریشه گیاه نیز به دست آمد. مقدار کادمیم جذب شده در اندام‌های مختلف گیاه بدین ترتیب بود: برگ > ساقه > ریشه. بیشترین غلظت کادمیم در ریشه حدود ۱۰۲۴ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک بود (جدول ۳). کادمیم در مقایسه با سایر فلزات سنگین، متحرک تر بوده و به آسانی جذب گیاه می شود (۱۷). تجمع بالای کادمیم در ریشه نسبت به برگ گیاه *Phragmites australis* تحت تأثیر غلظت‌های زیاد کادمیم گزارش شده است (۱۳).

انباشت کادمیم در گیاه *Jatropha curcas* در تیمارهای Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> بیش از حدنصاب تعیین شده برای گیاهان بیش‌انباشتگر کادمیم (۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک اندام هوایی) بود (شکل ۳). در این تیمارهایی Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> آثار سمیت در گیاه به صورت زردی، خشکی و ریزش برگ‌ها نیز مشاهده گردید. سمیت کادمیم در گیاه می تواند در غلظت بین ۵ تا ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم اتفاق افتد (۳۳). غلظت زیاد کادمیم در بافت گیاه ممکن است بیانگر ظرفیت بالای این گیاه برای جذب این عنصری باشد. در مورد گیاهان تنباکو و آفتابگردان رشد یافته در خاک آلوده به کادمیم نیز نتایج مشابهی به دست آمده است (۱۰). با در نظر گرفتن این نکته که کاهش رشد گیاه در اثر سمیت کادمیم نیز ممکن است

عناصر ضروری شده و نقش بازدارنده را در متابولیسم کربوهیدرات‌های تنفسی در سلولهای گیاهی داشته باشند (۲۵).

#### رابطه بین غلظت کادمیم در خاک و وزن خشک گیاه

غلظت کادمیم در خاک بستر رشد همبستگی منفی با وزن خشک کل گیاه داشت ( $r = -0.81$ ). رابطه منفی بین این دو عامل نشان داد که وزن خشک کل گیاه با افزایش غلظت کل کادمیم اضافه شده به خاک، کاهش یافته است. کادمیم نقش بازدارنده در تولید کلروفیل دارد و کاهش مقدار کلروفیل باعث کاهش وزن خشک شاخساره می شود (۲۶).

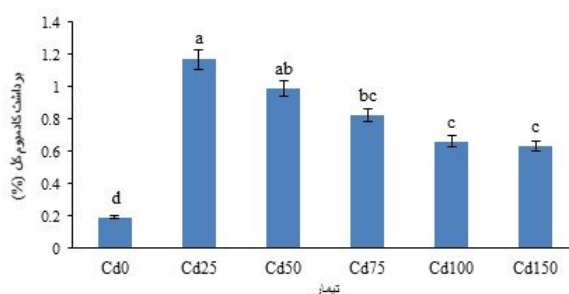
#### غلظت کادمیم در اندام‌های مختلف گیاه (برگ، ساقه و ریشه)

غلظت کادمیم برگ، ساقه و ریشه در همه تیمارها تفاوت معنی دار داشت ( $P \leq 0.05$ ). بیشترین غلظت کادمیم برگ (۳۳/۶ میلی گرم در کیلوگرم) در تیمار Cd<sub>۵۰</sub> مشاهده شد. غلظت کادمیم در برگ از تیمار Cd<sub>۲۵</sub> به Cd<sub>۷۵</sub> افزایش یافت و سپس روند کاهشی داشت. این موضوع بیانگر تأثیر منفی غلظت‌های بالای کادمیم محیط بر جذب این فلز توسط گیاه است. نتایج مشابه با اندکی تغییر در حداکثر غلظت جذب در

جدول ۳. غلظت کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم) در اندام‌های مختلف گیاه تحت تأثیر تیمارهای مختلف کادمیم .

| تیمار             | ریشه                     | ساقه                   | برگ                   |
|-------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cd <sub>0</sub>   | ۱/۴±۰/۰ <sup>e</sup>     | ۰/۸±۰/۱ <sup>e</sup>   | ۰/۹±۰/۰ <sup>d</sup>  |
| Cd <sub>۲۵</sub>  | ۱۵۵/۴±۳/۷ <sup>d</sup>   | ۳۷/۲±۱/۵ <sup>d</sup>  | ۴/۳±۰/۳ <sup>d</sup>  |
| Cd <sub>۵۰</sub>  | ۳۱۲/۴±۳۱/۲ <sup>c</sup>  | ۶۹/۴±۱/۳ <sup>c</sup>  | ۲۴/۰±۲/۰ <sup>b</sup> |
| Cd <sub>۷۵</sub>  | ۵۲۶/۵±۲/۵ <sup>b</sup>   | ۷۷/۳±۱/۱ <sup>bc</sup> | ۳۳/۶±۱/۳ <sup>a</sup> |
| Cd <sub>۱۰۰</sub> | ۵۸۱/۱±۲۹/۳ <sup>b</sup>  | ۱۰۰/۴±۸/۸ <sup>a</sup> | ۲۳/۴±۲/۰ <sup>b</sup> |
| Cd <sub>۱۵۰</sub> | ۱۰۲۳/۵±۳۶/۸ <sup>a</sup> | ۸۴/۱±۵/۲ <sup>b</sup>  | ۱۸/۰±۱/۲ <sup>c</sup> |

عدم وجود حرف مشترک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. مقادیر، میانگین ± انحراف معیاری است. Cd<sub>0</sub>، Cd<sub>۲۵</sub>، Cd<sub>۵۰</sub>، Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشد



شکل ۴. درصد کارایی برداشت کادمیم تحت تأثیر تیمارهای کادمیم .

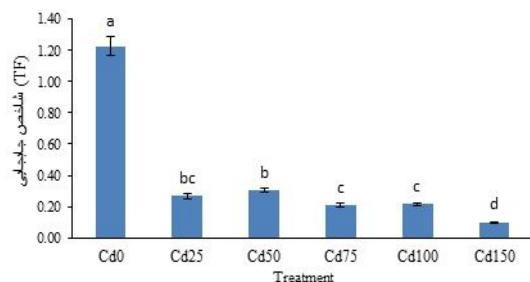
حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین ± انحراف معیاری است. Cd<sub>0</sub>، Cd<sub>۲۵</sub>، Cd<sub>۵۰</sub>، Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشد

تفاوت معنی‌دار داشت ( $P \leq 0.05$ ). کارایی برداشت کادمیم بین ۰/۱۹ تا ۱/۱۷ درصد متغیر بود (شکل ۴). این موضوع گویای یکی از نقاط ضعف فرآیند گیاه‌پالایی یعنی زمان زیاد برای اصلاح کامل محیط (در اینجا برداشت کادمیم از خاک) است. درصد کارایی برداشت کادمیم با افزایش غلظت کادمیم اضافه شده به خاک بستر رشد کاهش یافت که می‌تواند در اثر کاهش تولید وزن خشک گیاه تحت تأثیر غلظت‌های بالای کادمیم باشد. بنابراین خصوصیات فیزیولوژیک گیاه، مانند وزن زیست توده و همچنین قدرت جابجایی کادمیم از ریشه به

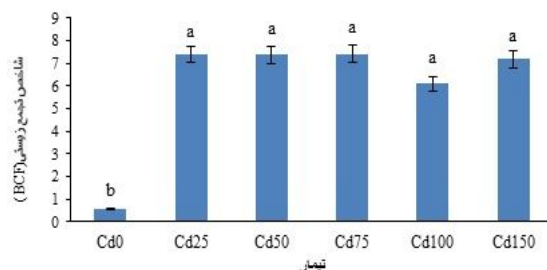
باعث تغلیظ فلز در گیاه گردد، به نظر می‌رسد که این سازوکار برای گیاه جاتروفا به واقعیت نزدیک‌تر و این گیاه بیشتر در مورد تثبیت و ذخیره سازی کادمیم در ریشه گیاه (Phytostabilization) کارآمد است.

#### برداشت کادمیم براساس وزن خشک کل گیاه

کارایی برداشت کادمیم در واقع غلظت کل فلز انباشت شده در گیاه به میزان کل فلز اضافه شده به بستر رشد است (۳۲). برداشت کادمیم از خاک توسط گیاه، بین تیمارهای مختلف



شکل ۶. شاخص جابجایی کادمیم تحت تأثیر تیمارهای کادمیم. حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین  $\pm$  انحراف معیاری است. Cd، Cd<sub>۲۵</sub>، Cd<sub>۵۰</sub>، Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می باشد



شکل ۵. شاخص تجمع زیستی تحت تأثیر تیمارهای کادمیم. حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین  $\pm$  انحراف معیاری است. Cd، Cd<sub>۲۵</sub>، Cd<sub>۵۰</sub>، Cd<sub>۷۵</sub>، Cd<sub>۱۰۰</sub> و Cd<sub>۱۵۰</sub> به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می باشد

محلول خاک وارد گیاه شده و قبل از ورود به آوند چوبی و جابجایی به قسمت هوایی گیاه از دو راه آپوپلاسمیک و سیمپلاسمیک وارد بافت ریشه شود (۲۰). در واقع سازوکارهای مختلفی در گیاه وجود دارد که می تواند جابجایی کادمیم به سمت اندام هوایی محدود کند. جابجایی سیمپلاسمیک کادمیم به آوند چوبی می تواند از طریق تولید کلات های گیاهی و ذخیره کادمیم در واکوئل محدود شود. همچنین، جابجایی آپوپلاسمیک کادمیم می تواند به دلیل توسعه بافت اندودرم، آگزودرم و بعضی از موانع خارج سلولی محدود گردد (۲۰).

#### همبستگی بین کادمیم کل در خاک و گیاه

همبستگی مثبت بین غلظت کل کادمیم در خاک بستر رشد و گیاه *Jatropha curcas* وجود داشت ( $r=0.97$ ). این موضوع نشان داد که غلظت کل کادمیم جذب شده توسط گیاه با افزایش غلظت کادمیم اضافه شده به خاک افزایش می یابد. نتایج مشابهی در مورد گیاه سپیدار (۳۵) گزارش شده است. برعکس لو و همکاران (۱۹) گزارش دادند که همبستگی منفی بین تجمع کادمیم، سرب و کروم در گیاه *Vetiveria zizanioides* و غلظت فلزات اضافه شده به خاک وجود داشت. شاید دلیل این امر حساسیت زیاد و قدرت تحمل کم گیاه به فلزات مذکور باشد که از جذب فلز توسط گیاه جلوگیری می کند.

شاخصاره در امتداد آوند چوبی، بر کارایی برداشت عنصر از محیط تأثیرگذار است (۱۲).

#### شاخص های تجمع زیستی و جابجایی کادمیم

شاخص تجمع زیستی نسبت غلظت فلزات سنگین در ریشه گیاه به خاک می باشد در حالی که شاخص جابجایی، نسبت غلظت عنصر در بخش هوایی گیاه به خاک و در برخی منابع نسبت غلظت عنصر در شاخصاره به ریشه است (۳۲). شاخص تجمع زیستی در تیمارهای مختلف کادمیم بین ۰/۵۶ تا ۷/۴۱ متغیر بود و بین تیمارها تفاوت معنی دار وجود داشت ( $P \leq 0.05$ ) که در شکل ۵ مقدار این شاخص در تیمارهای مختلف نشان داده شده است. مقدار این شاخص در تیمارهای مختلف به استثنای تیمار شاهد بیشتر از ۱ بود. شاخص جابجایی در همه تیمارها به جز تیمار شاهد کمتر از یک (و به طور دقیق تر کمتر از ۰/۴) بود که بیانگر قدرت کم جابجایی کادمیم از خاک به گیاه و یا از ریشه به شاخصاره بوده است (شکل ۶). به عبارت دیگر برای انتقال کادمیم به گیاه و یا انتقال آن به اندام های هوایی گیاه محدودیت وجود داشته است که وابسته به خصوصیات خاک و نوع گیاه است (۱۶). نتایج مشابهی توسط متشرعزاده و همکاران (۲۳) در گیاه پالایی خاک آلوده به کادمیم با استفاده از گیاه آفتابگردان گزارش شده است. کادمیم می تواند از طریق

## نتیجه گیری

کاشت گیاه *Jatropha curcas* در خاک آلوده به کادمیم نشان داد که این فلز بیشتر در ریشه گیاه در مقایسه با ساقه و برگ تجمع یافت. غلظت کل کادمیم انباشت شده در گیاه فقط در تیمارهای حاوی کادمیم زیاد ( $Cd_{100}$ ,  $Cd_{75}$  و  $Cd_{150}$ ) بیش از حد نصاب تعیین شده برای گیاهان بیش انباشتگر کادمیم بود که با در نظر گرفتن اثر سمیت کادمیم، کاهش رشد گیاه و تولید زیست توده کمتر ممکن است باعث تغلیظ فلز در گیاه شده باشد. بنابراین به نظر می رسد گیاه مذکور برای فرایند *Phytoextraction* کادمیم مناسب نیست. کم بودن شاخص جابجایی (کمتر از ۱) این گونه به پتانسیل گیاه پالایی آن از طریق تثبیت کادمیم برای جلوگیری از توزیع این فلز در خاک

آلوده اشاره دارد. میزان بالای شاخص تجمع زیستی (نسبت غلظت فلز در ریشه به خاک) در تیمارهای مختلف کادمیم نیز این موضوع را تأیید می کند. با این وجود انجام پژوهش های بیشتر به ویژه در عرصه های طبیعی آلوده و در حضور سایر آلاینده ها توصیه می شود.

## سپاسگزاری

این مقاله با حمایت علمی و مادی سازمان بنادر و دریانوردی به انجام رسیده است. همچنین از دکتر تی مودا محمد محمود عضو هیات علمی دانشگاه پوترای مالزی تشکر و قدردانی می گردد.

## منابع مورد استفاده

- Agamuthu, P., O. P. Abioye and A. A. Aziz. 2010. Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using *Jatropha curcas*. J. Hazard. Mater. 179: 891-894.
- Akbar, M., O. Ahmed, A. Jamaluddin, N. Majid, H. Abdul-Hamid, S. Jusop, A. Hassan, K. H. Yusof and A. Abdu. 2010. Differences in soil physical and chemical properties of rehabilitated and secondary forests. Am. J. Appl. Sci. 7: 1200-1209.
- Alkorta, I and C. Garbisu. 2001. Phytoremediation of organic contaminants in soils. Biores. Technol. 79: 273-276.
- Alkorta, I., J. Hernández-Allica, J. Becerril, I. Amezaga, I. Albizu and C. Garbisu. 2004. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic. Rev. J. Environ. Sci. Biotechnol. 3: 71-90.
- Alloway, B. J. 1995. Heavy Metals in Soils. Springer. pp: 339-367
- Baker, A. J. M. 1981. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. J. Plant Nutr. 3: 1-4.
- Barceló, J. and C. Poschenrieder. 2003. Phytoremediation: principles and perspectives. Contrib. Sci. 2: 333-344.
- Benavides, M. P., S. M. Gallego and M. L. Tomaro. 2005. Cadmium toxicity in plants. Braz. J. Plant Physiol. 17: 21-34.
- Chang, F. C., Ko C. H., Tsai, M. J., Wang, Y. N and Chung, C. Y. 2014. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil by *Jatropha curcas*. Ecotoxicol. 23 (10): 1969-1978.
- Chiang, P. N., M. K. Wang, C. Y. Chiu and S. Y. Chou. 2006. Effects of cadmium amendments on low molecular weight organic acid exudates in rhizosphere soils of tobacco and sunflower. Environ. Toxicol. 21: 479-488.
- Garbisu, C and I. Alkorta. 2001. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. Bioresour. Technol. 77: 229-236.
- Hart, J. J., R. M. Welch, W. A. Norvell, L. A. Sullivan and L. V. Kochian. 1998. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. Plant Physiol. 116: 1413-1420.
- Iannelli, M. A., F. Pietrini, L. Fiore, L. Petrilli and A. Massacci. 2002. Antioxidant response to cadmium in *Phragmites australis* plants. Plant Physiol. Biochem. 40: 977-982.
- Kabata-Pendias, A and H. Pendias. 1984. Trace Elements in Plants and Soils. CRC Press, Florida, USA, p. 413.
- Karaca A. 2004. Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil. Geoderma 122: 297-303.
- Kirkham, M. B. 2006. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments. Geoderma 137: 19-32.

17. Lasat, M. M. 2002. Phytoextraction of toxic metals: A review of biological mechanisms. J. Environ. Qual. 31: 109-120.
18. Li, J. T., B. Liao, Z. Dai, R. Zhu and W. S. Shu. 2009. Phytoextraction of Cd-contaminated soil by carambola (*Averrhoa carambola*) in field trials. Chemosphere 76: 1233-1239.
19. Lu, H., X. Zhang, L. Bi-rong and X. Di-lou. 2005. Comparison of the accumulation ability of *Vetiveria zizanioides* to several heavy metals in soil. J. Biol. 5: 20-23.
20. Lux, A., M. Martinka, M. Vaculík and P. J. White. 2011. Root responses to cadmium in the rhizosphere: A review. J. Exp. Bot. 62: 21-37.
21. Mangkoedihardjo, S., A. Surahmida. 2008. *Jatropha curcas* L. for phytoremediation of lead and cadmium polluted soil. World Appl. Sci. J. 4: 519-522.
22. Manousaki, E., J. Kadukova, N. Papadantonakis and N. Kalogerakis. 2008. Phytoextraction and phytoexcretion of Cd by the leaves of *Tamarix smyrnensis* growing on contaminated non-saline and saline soils. Environ. Res. 106: 326-332.
23. Motesharezadeh, B., G. R. Savaghebi-Firozabadi, H. A. Alikhani and H. M. Hosseini. 2008. Effect of sunflower and amaranthus culture and application of inoculants on phytoremediation of the soils contaminated with cadmium. American-Eurasian J. Agr. Environ. Sci. 4: 93-103.
24. Nagaraju, A and S. Karimulla. 2002. Accumulation of elements in plants and soils in and around Nellore mica belt, Andhra Pradesh, India: a biogeochemical study. Environ. Geol. 41: 852-860.
25. Niu, Z. X., L. N. Sun, T. H. Sun, Y. S. Li and H. Wang. 2007. Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. J. Environ. Sci. 19: 961-967.
26. Orcutt, D. M and E. T. Nilsen. 2000. The Physiology of Plants under Stress: Soil and Biotic Factors: John Wiley and Sons Inc. PP. 326-332.
27. Parawira W. 2010. Biodiesel production from *Jatropha curcas*: A review. Sci. Res. Essays. 5: 1796-1808.
28. Pinto, A. P., A. M. Mota, A. De Varennes and F. C. Pinto. 2004. Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. Sci. Total Environ. 326: 239-247.
29. Sarma, H. 2011. Metal hyperaccumulation in plants: A review focusing on phytoremediation technology. Environ. Sci. Technol. 4: 118-138.
30. Singh, O. V., S. Labana, G. Pandey, R. Budhiraja and R. K. Jain. 2003. Phytoremediation: an overview of metallic ion decontamination from soil. Appl. Microbiol. Biotechnol. 61: 405-412.
31. Singh, R., M. Kumar, E. Haider. 2007. Synergistic cropping of summer groundnut with *Jatropha curcas*- a new two-tier cropping system for Uttar Pradesh. Agr. Res. 5: 1-2.
32. Soleimani, M., M. A. Hajabbasi, M. Afyuni, A. Mirlohi, O. K. Borggaard and P. E. Holm. 2010. Effect of endophytic fungi on cadmium tolerance and bioaccumulation by *Festuca arundinacea* and *Festuca pratensis*. Inter. J. Phytorem. 12: 535-549.
33. Solís-Domínguez, F. A., M. C. González-Chávez, R. Carrillo-González and R. Rodríguez-Vázquez. 2007. Accumulation and localization of cadmium in *Echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system. J. Hazard. Mater. 141: 630-636.
34. Susarla, S., V. F. Medina and S. C. McCutcheon. 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. Ecol. Eng. 18: 647-658.
35. Wu, F., W. Yang, J. Zhang and L. Zhou. 2009. Cadmium accumulation and growth responses of a poplar (*Populus deltoids* × *Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil. J. Hazard. Mater. 177: 268-273.
36. Yadav, S. K., A. A. Juwarkar, G. P. Kumar, P. R. Thawale, S. K. Singh and T. Chakrabarti. 2009. Bioaccumulation and phyto-translocation of arsenic, chromium and zinc by *Jatropha curcas* L. Impact of dairy sludge and biofertilizer. Bioresour. Technol. 100: 4616-4622.
37. Yoon, J., X. Cao, Q. Zhou and L.Q. Ma. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Sci. Total Environ. 3: 456-464.