

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

پریسا احمدپور^۱ و محسن سلیمانی^{۲*}

(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 میلی‌گرم 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 زیست‌توده 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 میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) و بیشترین درصد کارایی برداشت کادمیم به ترتیب در تیمارهای ۱۵۰ و ۲۵ میلی‌گرم 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 (هوایدگی 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 ۰/۱ 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 با توجه 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، اجتناب‌ناپذیر است (۳). گیاه‌پالایی، یک فناوری سبز، با صرفه اقتصادی و سازگار با محیط زیست است که در آن از گیاهان 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*، *Cassia auriculata* و *Dodonaea viscosa* 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).

جاتروفا، یک درخت کوچک از خانواده Euphorbiaceae

می‌باشد که ارتفاع آن به ۵ متر و در شرایط ایده‌آل به ۱۰ متر و عمر متوسط آن به ۵۰ سال می‌رسد (۳۱). این گونه به دلیل رشد سریع، استقرار ساده، توانایی رشد در شرایط مختلف با تقاضای کم مواد مغذی، می‌تواند دارای پتانسیل گیاه پالایی باشد که در پژوهش‌های 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 روش‌ها

این مطالعه در گلخانه دانشکده جنگل‌داری دانشگاه پوترای مالزی ("۲۴.۱۸° ۵۹' ۲۰" 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 سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد بود. نهال‌های سالم و همسن، از مؤسسه تحقیقات کشاورزی (مردی) واقع در شهرستان سردانگ، استان سلانگور جمع‌آوری شد.

خاک مورد مطالعه و اندازه‌گیری ویژگی‌های آن

خاک مورد استفاده در این مطالعه، رس شنی از سری مانچونگ بود. این خاک از دانشکده کشاورزی دانشگاه پوترای مالزی جمع‌آوری شد. خاک پس از هواخشک شدن، خرد و از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد. خاک الک شده به‌عنوان بستر رشد مورد استفاده قرار گرفت. الک ضد زنگ جهت تهیه مخلوط خاک یکپارچه به‌عنوان بستر رشد مورد استفاده قرار گرفت. کادمیم در غلظت‌های مختلف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (Cd_۰، Cd_{۲۵}، Cd_{۵۰}، Cd_{۷۵}، Cd_{۱۰۰} و Cd_{۱۵۰}) به خاک اضافه گردید و پس از ۱۵ روز نهال‌ها کشت شدند. در طول این مدت برای ایجاد تعادل فرایند مرطوب‌سازی خاک در حد ظرفیت زراعی انجام شد. برای تهیه غلظت‌های مختلف کادمیم، از نمک کلرید کادمیم (۵H_۲O . CdCl_۲) استفاده گردید. بخشی از خاک از الک ۲ میلی‌متری

عبور داده شده و جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه فرستاده شد. بافت خاک با استفاده از روش پیپت، تعیین گردید (۲). پ-هاش خاک، در سوسپانسیون ۱/۵:۲ (خاک:مایع) اندازه‌گیری شد (۲). ظرفیت تبادل کاتیونی و کاتیون‌های تبدلی (کلسیم، منیزیم و پتاسیم) با استفاده از روش لیچینگ و با به‌کار بردن استات آمونیوم ۱ مولار در پ-هاش ۷ اندازه‌گیری شد (۲). آلومینیوم و هیدروژن تبدلی به‌روش 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) اندازه‌گیری گردید (۲). کربن و نیتروژن کل به‌وسیله دستگاه اندازه‌گیری کربن-نیتروژن-گوگرد (USA و Leco . ۲۰۰۰ CNS) اندازه‌گیری شد.

کشت گیاه

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

جدول ۱. خصوصیات اندازه‌گیری 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 (دسی‌زیمنس 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)

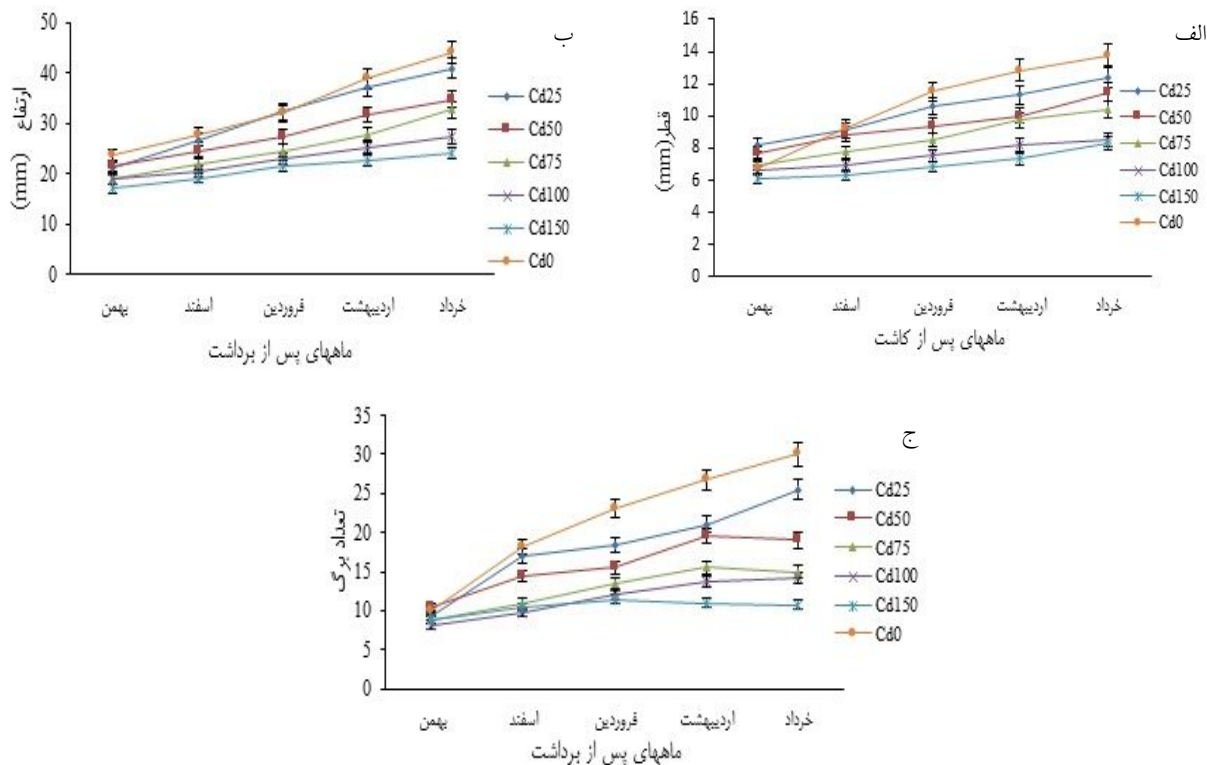
مقادیر، میانگین ± انحراف معیار است.

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 نرم‌افزار SAS برای بررسی تجزیه و تحلیل داده‌ها و از نرم‌افزار Excel برای رسم شکل‌ها استفاده گردید.

زیست‌توده 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 میلی‌گرم 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، Cd₂₅، Cd₅₀، Cd₇₅، Cd₁₀₀ و Cd₁₅₀ به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک است

رشد گیاه در غلظت‌های مختلف کادمیم خاک

شاخص‌های رشد گیاه در غلظت‌های مختلف کادمیم اضافه شده به خاک متفاوت بود و تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) بین تیمارها در قطر، ارتفاع و تعداد برگ در زمان برداشت وجود داشت. بیشترین میزان رشد قطری، ارتفاع و تعداد برگ مربوطه به تیمار شاهد (بدون کادمیم) و کمترین مقدار مربوط به تیمار Cd₁₅₀ حاوی ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک بود (شکل‌های 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

نتایج و بحث

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. با توجه به محتوی نیتروژن کل خاک مقدار این عنصر برای رشد گیاه در سطح پایینی بود. همچنین با توجه 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 Cd₁₅₀ و کمترین مقدار مربوط به خاک شاهد Cd بود. غلظت کادمیم در خاک بعد از کشت گیاه از ۱/۸ تا ۱۱۶/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم به ترتیب مربوط به تیمارهای Cd (شاهد) و Cd₅₀ 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 ₀	۱۱/۲±۱/۲ ^a	۲۱/۸۵±۲/۱۶ ^a	۱۵/۶±۱/۹ ^a
Cd _{۲۵}	۱۰/۴±۰/۳ ^{ab}	۲۱/۳±۱/۷ ^a	۱۴/۵±۱/۱ ^{ab}
Cd _{۵۰}	۹/۹±۰/۲ ^{ab}	۱۲/۳±۰/۳ ^b	۱۱/۵±۰/۹ ^{bc}
Cd _{۷۵}	۸/۹±۰/۴ ^{bc}	۱۱/۰±۰/۶ ^b	۱۰/۰±۰/۹ ^c
Cd _{۱۰۰}	۸/۷±۰/۵ ^{bc}	۱۰/۳±۰/۴ ^b	۱۰/۰±۰/۳ ^c
Cd _{۱۵۰}	۷/۹±۰/۱ ^c	۹/۴±۰/۴ ^b	۹/۴±۱/۱ ^c

عدم وجود حرف مشترک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. مقادیر، میانگین ± انحراف معیار است. Cd₀، Cd_{۲۵}، Cd_{۵۰}، Cd_{۷۵}، Cd_{۱۰۰} و Cd_{۱۵۰} به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم 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_{۱۵۰} 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).

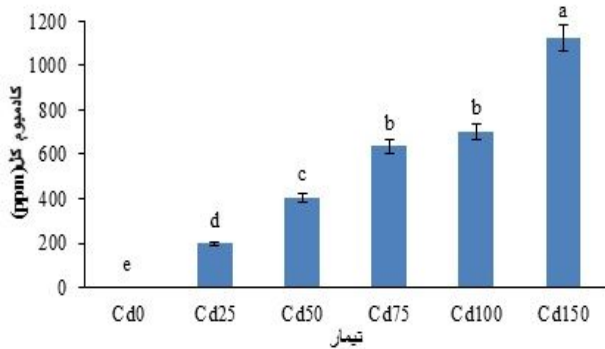
وزن خشک کل گیاه تحت تأثیر تیمار کادمیم

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 میلی‌گرم 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

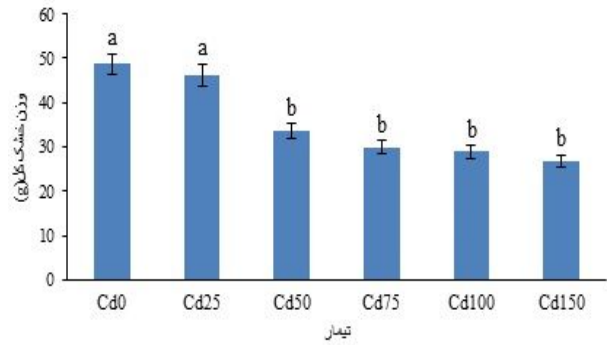
(۳۶) در غلظت‌های زیاد عناصر آرسنیک، کروم و روی برای گیاه جاتروفا گزارش شده است که مویده کاهش رشد گیاه با افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک است. سمیت فلزات سنگین به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل بازدارنده رشد گیاه مطرح است. کادمیم به عنوان یک عنصر غیر ضروری، رشد و توسعه گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۸). این 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 کادمیوم در گیاه تحت تأثیر تیمارهای کادمیوم. حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین \pm انحراف معیاری است. Cd، Cd₂₅، Cd₅₀، Cd₇₅، Cd₁₀₀، Cd₁₅₀ و Cd₀ به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک است



شکل ۲. وزن خشک کل گیاه تحت تأثیر تیمارهای کادمیوم. حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین \pm انحراف معیار است. Cd، Cd₂₅، Cd₅₀، Cd₇₅، Cd₁₀₀، Cd₁₅₀ و Cd₀ به ترتیب معرف ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک است

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

رابطه بین غلظت کادمیوم در خاک و وزن خشک گیاه

غلظت کادمیوم 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 کادمیوم اضافه شده به خاک، کاهش یافته است. کادمیوم نقش بازدارنده در تولید کلروفیل دارد و کاهش مقدار کلروفیل باعث کاهش وزن خشک شاخساره می‌شود (۲۶).

غلظت کادمیوم در گیاه *Jatropha curcas* در تیمارهای Cd₀، Cd₂₅، Cd₅₀، Cd₇₅، Cd₁₀₀ و Cd₁₅₀ بیش از حدنصاب تعیین شده برای گیاهان بیش‌انباشتگر کادمیوم (۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک اندام هوایی) بود (شکل ۳). در این تیمارهایی، Cd₂₅، Cd₅₀ و Cd₁₀₀ آثار سمیت در گیاه به صورت زردی، خشکی و ریزش برگ‌ها نیز مشاهده گردید. سمیت کادمیوم در گیاه می‌تواند در غلظت بین ۵ تا ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم اتفاق افتد (۳۳). غلظت زیاد کادمیوم 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 کادمیوم نیز نتایج مشابهی به دست آمده است (۱۰). با در نظر گرفتن این نکته که کاهش رشد گیاه در اثر سمیت کادمیوم نیز ممکن است

رابطه بین غلظت کادمیوم در خاک و وزن خشک گیاه

غلظت کادمیوم 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 کادمیوم اضافه شده به خاک، کاهش یافته است. کادمیوم نقش بازدارنده در تولید کلروفیل دارد و کاهش مقدار کلروفیل باعث کاهش وزن خشک شاخساره می‌شود (۲۶).

غلظت کادمیوم در گیاه *Jatropha curcas* در تیمارهای Cd₀، Cd₂₅، Cd₅₀، Cd₇₅، Cd₁₀₀ و Cd₁₅₀ بیش از حدنصاب تعیین شده برای گیاهان بیش‌انباشتگر کادمیوم (۱۰۰ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک اندام هوایی) بود (شکل ۳). در این تیمارهایی، Cd₂₅، Cd₅₀ و Cd₁₀₀ آثار سمیت در گیاه به صورت زردی، خشکی و ریزش برگ‌ها نیز مشاهده گردید. سمیت کادمیوم در گیاه می‌تواند در غلظت بین ۵ تا ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم اتفاق افتد (۳۳). غلظت زیاد کادمیوم 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 کادمیوم نیز نتایج مشابهی به دست آمده است (۱۰). با در نظر گرفتن این نکته که کاهش رشد گیاه در اثر سمیت کادمیوم نیز ممکن است

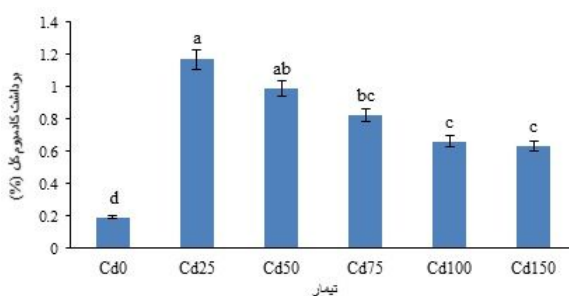
غلظت کادمیوم در اندام‌های مختلف گیاه (برگ، ساقه و ریشه)

غلظت کادمیوم برگ، ساقه و ریشه در همه تیمارها تفاوت معنی دار داشت ($P < 0.05$). بیشترین غلظت کادمیوم برگ (۳۳/۶ میلی گرم در کیلوگرم) در تیمار Cd₅₀ مشاهده شد. غلظت کادمیوم در برگ از تیمار Cd₂₅ به Cd₇₅ افزایش یافت و سپس روند کاهشی داشت. این موضوع بیانگر تأثیر منفی غلظت‌های بالای کادمیوم 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 ₀	۱/۴±۰/۰ ^e	۰/۸±۰/۱ ^e	۰/۹±۰/۰ ^d
Cd _{۲۵}	۱۵۵/۴±۳/۷ ^d	۳۷/۲±۱/۵ ^d	۴/۳±۰/۳ ^d
Cd _{۵۰}	۳۱۲/۴±۳۱/۲ ^c	۶۹/۴±۱/۳ ^c	۲۴/۰±۲/۰ ^b
Cd _{۷۵}	۵۲۶/۵±۲/۵ ^b	۷۷/۳±۱/۱ ^{bc}	۳۳/۶±۱/۳ ^a
Cd _{۱۰۰}	۵۸۱/۱±۲۹/۳ ^b	۱۰۰/۴±۸/۸ ^a	۲۳/۴±۲/۰ ^b
Cd _{۱۵۰}	۱۰۲۳/۵±۳۶/۸ ^a	۸۴/۱±۵/۲ ^b	۱۸/۰±۱/۲ ^c

عدم وجود حرف مشترک در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. مقادیر، میانگین ± انحراف معیاری است. Cd₀، Cd_{۲۵}، Cd_{۵۰}، Cd_{۷۵}، Cd_{۱۰۰} و Cd_{۱۵۰} به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشد



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

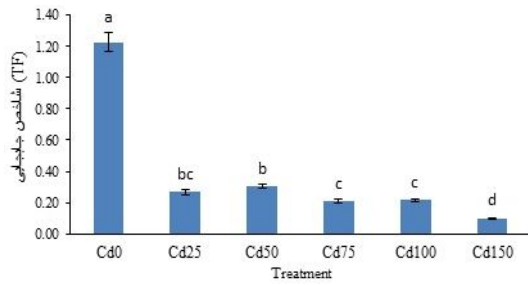
حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن است. ستون‌ها معرف میانگین ± انحراف معیاری است. Cd₀، Cd_{۲۵}، Cd_{۵۰}، Cd_{۷۵}، Cd_{۱۰۰} و Cd_{۱۵۰} به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشد

تفاوت معنی‌دار داشت (P = ۰/۰۵). 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

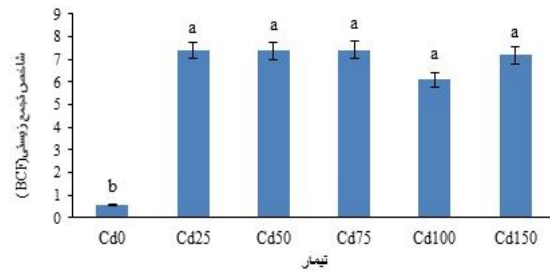
باعث تغلیظ فلز در گیاه گردد، به نظر می‌رسد که این سازوکار برای گیاه جاتروفا به واقعیت نزدیک‌تر و این گیاه بیشتر در مورد تثبیت و ذخیره سازی کادمیم در ریشه گیاه (Phytostabilization) کارآمد است.

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، Cd₂₅، Cd₅₀، Cd₇₅، Cd₁₀₀، Cd₁₅₀ به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشد



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، Cd₂₅، Cd₅₀، Cd₇₅، Cd₁₀₀، Cd₁₅₀ به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک می‌باشد

محلول خاک وارد گیاه شده و قبل از ورود به آوند چوبی و جابجایی به قسمت هوایی گیاه از دو راه پوپلاسمیک و سیمپلاسمیک وارد بافت ریشه شود (۲۰). در واقع سازوکارهای مختلفی در گیاه وجود دارد که می‌تواند جابجایی کادمیم را به سمت اندام هوایی محدود کند. جابجایی سیمپلاسمیک کادمیم به آوند چوبی می‌تواند از طریق تولید کلات‌های گیاهی و ذخیره کادمیم در واکوئل محدود شود. همچنین، جابجایی آپوپلاسمیک کادمیم می‌تواند 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 می‌یابد. 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 می‌کند.

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

شاخص‌های تجمع زیستی و جابجایی کادمیم

شاخص تجمع زیستی نسبت غلظت فلزات سنگین در ریشه گیاه به خاک می‌باشد در حالی که شاخص جابجایی، نسبت غلظت عنصر در بخش هوایی گیاه به خاک و در برخی منابع نسبت غلظت عنصر در شاخساره 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 ($P=0/05$) 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 دقیق‌تر کمتر از ۰/۴) بود که بیانگر قدرت کم جابجایی کادمیم از خاک به گیاه و یا از ریشه به شاخساره بوده است (شکل ۶). به عبارت دیگر برای انتقال کادمیم به گیاه و یا انتقال آن به اندام‌های هوایی گیاه محدودیت وجود داشته است که وابسته به خصوصیات خاک و نوع گیاه است (۱۶). نتایج مشابهی توسط متشعزاده و همکاران (۲۳) در گیاه پالایی خاک آلوده به کادمیم با استفاده از گیاه آفتابگردان گزارش شده است. کادمیم می‌تواند از طریق

نتیجه گیری

آلوده اشاره دارد. میزان بالای شاخص تجمع زیستی (نسبت غلظت فلز در ریشه به خاک) در تیمارهای مختلف کادمیم نیز این موضوع را تأیید می‌کند. با این وجود انجام پژوهش‌های بیشتر به‌ویژه در عرصه‌های طبیعی آلوده و در حضور سایر آلاینده‌ها توصیه می‌شود.

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 می‌گردد.

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_{150} ، Cd_{100} ، Cd_{75}) بیش از حد نصاب تعیین شده برای گیاهان بیش‌انباشتگر کادمیم بود که با در نظر گرفتن اثر سمیت کادمیم، کاهش رشد گیاه و تولید زیست‌توده کمتر ممکن است باعث تغلیظ فلز در گیاه شده باشد. بنابراین به نظر می‌رسد 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

منابع مورد استفاده

1. 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.
2. 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.
3. Alkorta, I and C. Garbisu. 2001. Phytoremediation of organic contaminants in soils. Biores. Technol. 79: 273-276.
4. 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.
5. Alloway, B. J. 1995. Heavy Metals in Soils. Springer. pp: 339-367
6. Baker, A. J. M. 1981. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. J. Plant Nutr. 3: 1-4.
7. Barceló, J. and C. Poschenrieder. 2003. Phytoremediation: principles and perspectives. Contrib. Sci. 2: 333-344.
8. Benavides, M. P., S. M. Gallego and M. L. Tomaro. 2005. Cadmium toxicity in plants. Braz. J. Plant Physiol. 17: 21-34.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Kabata-Pendias, A and H. Pendias. 1984. Trace Elements in Plants and Soils. CRC Press, Florida, USA, p. 413.
15. Karaca A. 2004. Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil. Geoderma 122: 297-303.
16. 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.