

گیاه پالایی کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله آکاسیا ویکتوریا (*Acacia victoriae* L.)

خدیجه خرمن‌دار*، کارشناس ارشد بیابان‌زدایی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.
علی مهدوی، دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران.

E-mail* : Khermandar625@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۸ - پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۷

چکیده

استفاده از گیاهان برای پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین راه‌کاری اقتصادی و موثر می‌باشد. گیاه پالایی از جمله روش‌های پیشنهادی است که با انباشت عناصر سنگین در گیاهان، خروج این عناصر از خاک‌های آلوده را امکان‌پذیر می‌کند. به همین منظور در این پژوهش مقاومت و اثر جذب فلز کادمیوم بر روی نهال‌های یک‌ساله *Acacia victoriae* با چهار غلظت از محلول کلرید کادمیوم (۰، ۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) به صورت یک طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. پس از طی ۴۵ روز برخی از شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه و مقدار تجمع کادمیوم در اندام‌های مختلف آن ارزیابی شد. نتایج کاربرد سطوح مختلف کادمیوم نشان داد که همه شاخص‌های مورد بررسی به طور معنی‌داری تحت تاثیر کادمیوم قرار گرفتند. به گونه‌ای که با افزایش غلظت کادمیوم به ترتیب کاهش ۶۹٪، ۶۲٪، ۵۹٪، ۵۶٪، ۵۲٪، ۵۱٪، ۴۷٪، ۲۷٪ کلروفیل کل، شاخص تحمل، سطح برگ، وزن خشک کل، وزن تر کل، ارتفاع گیاه، قطر بقه و تعداد برگ در مقایسه با تیمار شاهد حاصل شد و علائم سمیت کادمیوم در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در گیاه ظاهر شد. مقدار تجمع کادمیوم نیز در همه تیمارها در ریشه‌ها بالاتر از قسمت‌های هوایی گیاه بود. به طوری که بیش از ۹۳٪ (۵۶۹۳۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) کادمیوم در ریشه‌های این‌گونه در بالاترین غلظت تجمع یافت. با توجه به ضریب تجمع زیستی بیش‌تر از یک و فاکتور انتقال کم‌تر از یک (۱۱۲/۹ و ۰/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) *A. victoriae* را می‌توان به عنوان گونه‌ی تثبیت‌کننده کادمیوم در پالایش خاک‌های آلوده به این فلز به کار برد و استفاده از این‌گونه برای مطالعات بعدی گیاه‌پالایی، به منظور یافتن راه‌کارهای استقرار بهتر گیاه و افزایش کارایی گیاه‌پالایی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *Acacia victoriae*، شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی، تجمع زیستی، کادمیوم، گیاه‌پالایی.

۱- مقدمه

را در محیط کاهش دهد. از طرفی این فناوری روشی بسیار مؤثر، ارزان قیمت و دوستار محیط زیست محسوب می‌شود (Saleem Khan et al., 2014). کادمیوم یکی از این آلاینده‌های محیطی است که برای حیات میکروارگانیسم‌ها و عملکرد فیزیولوژیکی آن‌ها ضروری

واژه گیاه‌پالایی (Phytoremediation) شامل پیشوند یونانی Phyto به معنی گیاه و ریشه لاتین Remedium به معنی اصلاح یا حذف یک عامل مزاحم و خارجی است. اساس این روش استفاده از گیاهان و ارتباط آن‌ها با میکروارگانیسم‌های خاک است تا اثرات سمی آلودگی‌ها

شاهد دیده شد. همچنین با افزایش غلظت کادمیوم مقدار جذب کادمیوم به صورت خطی افزایش یافت. به طوری که در گونه اول و دوم به ترتیب ۳۳۶٫۹۸ و ۳۲۰٫۹۸ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیوم در بالاترین غلظت تجمع یافت. Saleem Khan و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی تاثیر کادمیوم در گونه *Zea mays L.* به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت کادمیوم روند کاهش وزن تر (۰٫۵۱٪) و خشک گیاه (۰٫۵۴٪) نسبت به تیمار شاهد وجود دارد و بیشترین تجمع کادمیوم در ریشه‌های این گونه یافت شد (۶۲٫۳۲ < ۷٫۰۶ < ۰٫۴ میلی گرم بر کیلوگرم به ترتیب در ریشه < برگ < ساقه). همچنین میانگین ضریب تجمع زیستی این گونه بیش‌تر از یک (۰٫۱۷) ارزیابی شد. Minakshi و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی اثر کادمیوم در گونه *Ocimum tenuifolium L.* خطی ارتفاع ساقه و ریشه (کاهش ۰٫۵۶٪ طول ریشه و ۰٫۴۶٪ ارتفاع ساقه)، وزن تر و خشک (کاهش ۰٫۵۴٪ وزن تر و ۰٫۶۲٪ وزن خشک)، کلروفیل *a*، *b* و کل (کاهش ۰٫۳۲٪ کلروفیل *a*، ۰٫۴۳٪ کلروفیل *b* و ۰٫۳۷٪ کلروفیل کل) با افزایش غلظت کادمیوم نسبت به شاهد ملاحظه شد و با افزایش غلظت کادمیوم، مقدار آن به ترتیب در ریشه < ساقه < برگ (۱۰۴۲٫۳۶ < ۱۸۵٫۷۷ < ۱٫۲۳ میلی گرم بر گرم) برآورد شد. Wu و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی اثر کادمیوم در *Populus deltoids × Populus nigra L.* با افزایش غلظت کادمیوم شاهد کاهش خطی سطح برگ (۰٫۴۴٪)، قطر یقه (۰٫۲۲٪)، ارتفاع گیاه (۰٫۲۳٪) و وزن خشک کل (۰٫۲۰٪) نسبت به نمونه شاهد بودند. همچنین با افزایش غلظت کادمیوم مقدار تجمع آن در اندام‌های مختلف گیاه افزایش یافت. به طوری که مقدار جذب در ریشه < ساقه < برگ (۲۹۹٫۲۵ < ۲۴۳٫۹۰ < ۲٫۰۱ میلی گرم بر گرم) ارزیابی شد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده می‌توان بیان کرد که گیاهان مورد استفاده در گیاه‌پالایی

نیست و سطوح بالای آن موجب اختلال در سیستم‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی موجودات زنده می‌شود (Hazrat et al., 2012). میانگین غلظت کادمیوم برای گیاهان حساس بین ۱۰-۵ میلی گرم بر کیلوگرم و محدودیت تعیین شده آن در خاک ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم است. اما میانگین غلظت پیدا شده این فلز در خاک می‌تواند بیش از این مقدار هم باشد، به طوری که وجود ۳۴۵۰۰۰ - ۱۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم از آن در خاک نیز گزارش شده است (Golubev, 2011). این فلز با آنکه برای حیات گیاهان غیرضروری و سمی است اما به سرعت توسط آن‌ها جذب می‌شود. جذب و دریافت مقدار زیادی از این عنصر توسط گیاهان از بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی آن‌ها از جمله، تنفس، فتوسنتز، روابط آبی گیاه، طویل شدن و فعالیت سلول‌ها، متابولیسم نیتروژن و مواد غذایی ممانعت می‌کند که در نتیجه، منجر به ضعیف شدن رشد گیاهان و کاهش زی‌توده آن‌ها می‌شود (Vijayaragavan et al., 2011). چون فلز کادمیوم مانع جذب، انتقال و استفاده از عناصر ضروری، آهن، منگنز و روی در گیاه می‌شود که این مساله می‌تواند منجر به اختلال در تعادل آبی گیاه و آسیب به قسمت‌های مختلف مانند کلروپلاست، واکوئل، میتوکندری و هسته شود. علائم مشاهده شده در غلظت بالای کادمیوم شامل، کاهش زی‌توده، کلروز شدن برگ‌ها، جلوگیری از رشد ریشه و در نهایت مرگ گیاهان است (Golubev, 2011). به منظور بررسی آثار سمیت فلز کادمیوم بر روی شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی و همچنین مقدار جذب این فلز توسط گیاهان مختلف، پژوهش‌های گوناگونی انجام شده است. Zafar and Javed, 2016 در بررسی اثر فلز کادمیوم در دو گونه *Wheat L.* دریافتند که در هر دو گونه، با افزایش غلظت کادمیوم کاهش خطی ارتفاع گیاه (۰٫۵۷٪ و ۰٫۴۱٪)، وزن خشک گیاه (۰٫۸۸٪ و ۰٫۷۱٪) و شاخص مقاومت گیاه (۰٫۶۱٪ و ۰٫۵۵٪) در مقایسه با تیمار

مختلف *A.victoriae* صورت گرفت. پژوهش حاضر بر این فرض استوار است که مقدار تجمع کادمیوم در اندام‌های مختلف این گونه متفاوت است.

۲- روش‌ها

۲-۱- خاک مورد بررسی و اندازه‌گیری ویژگی‌های آن
خاک مورد استفاده در این پژوهش از نهالستان گروه منابع طبیعی، دانشگاه ایلام جمع‌آوری شد و قبل از شروع کار بخشی از خاک مورد نظر پس از نمونه برداری به آزمایشگاه منتقل شد و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس در هاون کوبیده شد. همچنین به منظور حذف مواد زائد و جدا کردن ذرات درشت‌تر، خاک از الک با اندازه مش ۲ میلی‌متر عبور داده شد. در نهایت برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله، بافت خاک، مقدار نیتروژن کل، ماده آلی و کربن آلی، مقدار سدیم و پتاسیم، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) خاک با استفاده از روش‌های استاندارد آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند. نتایج آنالیز خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- کاشت نهال‌ها

این پژوهش در نهالستان گروه منابع طبیعی دانشگاه ایلام انجام شد. شهرستان ایلام مرکز استان ایلام است که در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۳۸ دقیقه، در ارتفاع ۱۴۰۱ متری از سطح دریا قرار دارد. شهرستان ایلام دارای آب و هوای معتدل کوهستانی است که متوسط درجه حرارت و بارندگی سالیانه آن به ترتیب ۱۵٫۲ درجه سانتی‌گراد و ۴۲۷ میلی‌متر می‌باشد (خرمن‌دار، ۱۳۹۲). برای اجرای این پژوهش نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae* که از نظر خصوصیات ظاهری تقریباً یکسان بودند، انتخاب شدند. سپس نهال‌ها در گلدان‌های پلاستیکی به ارتفاع ۲۰

باید مکانیسم‌های مقاومتی به سمیت فلز کادمیوم را داشته باشند. بنابراین شناخت اثرات ناشی از این فلز بر روی شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاهان به منظور آگاهی از مکانیسم‌های مقاومتی و بقای آن‌ها و همچنین به منظور افزایش تحمل در برابر تنش کادمیوم ضرورت دارد. از طرفی دیگر به علت شرایط نامناسب خاک در مناطق آلوده، استقرار و رشد گیاهان می‌تواند با مشکل مواجه شود. به این دلیل شناسایی گونه‌های مناسب گیاهی که شرایط سخت محیطی را تحمل نموده و توانایی بالایی برای جذب و انباشت فلزات سنگین داشته باشند، در افزایش کارایی گیاه پالایی تاثیر مهمی دارند. در این بین خانواده لگومینوزه‌ها در کاهش آلودگی‌ها بیش از دیگر گیاهان مورد توجه هستند، چون جزء گونه‌هایی هستند که با سیستم ریشه‌ای گسترده خود باعث جذب وسیع آب و عناصر غذایی می‌گردند و به علت قابلیت تثبیت نیتروژن، گونه مناسبی برای گیاه پالایی محسوب می‌شوند. *A.victoriae* متعلق به خانواده لگومینوزه‌ها است که علاوه بر مزایای گفته شده مقاومت و تحمل بالایی به خشکی محیط دارد و علت انتخاب آن نیز ظرفیت بالا در سازگاری با شرایط سخت محیطی در اراضی تخریب یافته و خشک شده به منظور کشت و احیا آن‌ها است. همچنین با توجه به ریشه‌های عمیق و سازگاری با شرایط محیطی به عنوان گونه مناسب برای کاهش آلودگی در مناطق برون شهری و صنعتی که در معرض آلودگی قرار دارند، می‌تواند موثر واقع شود (خرمن‌دار، ۱۳۹۲). در پژوهش حاضر برای پالایش زیستی کادمیوم گونه گیاهی *A.victoriae* انتخاب شد چون تاکنون تلاشی در راستای زدودن کادمیوم از خاک با این گونه که دارای سیستم ریشه‌ای گسترده، بسیار مقاوم و کم توقع می‌باشد، انجام نشده است. از این رو این پژوهش با هدف بررسی تغییرات رشد و برخی از واکنش‌های مورفوفیزیولوژیکی و همچنین تعیین توانایی تجمع کادمیوم در بخش‌های

خرمن دار و مهدوی

ریزش برگ‌های گیاه و... ثبت شدند. سپس همه نهال‌ها از گلدان‌ها خارج و به منظور برطرف شدن گل آلودگی و کاهش مقدار خطای اندازه‌گیری شده با استفاده از آب دو بار تقطیر شستشوی آن‌ها انجام شد. در مرحله بعد نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند و وزن تر بخش‌های شسته شده گیاه (برگ، ساقه و ریشه‌ها) توزین شد. جهت توزین وزن خشک اندام‌ها، آن‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون تا رسیدن به وزن ثابت نگهداری و خشک شدند. سپس نمونه‌ها (در مجموع ۳۶ نمونه) به صورت جداگانه برای هضم آسان توسط آسیاب خرد شدند تا به منظور سنجش مقدار تجمع کادمیوم استفاده شوند. سنجش مقدار کادمیوم در برگ، ساقه و ریشه گیاه با استفاده از روش جذب اتمی صورت گرفت. بدین صورت که ۰/۱ گرم نمونه پودر شده از هر نمونه گیاهی (ساقه، برگ و ریشه) با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شدند و به روش اکسیداسیون تر به نسبت ۱:۲:۸ با اسید نیتریک ۶۵٪، اسید سولفوریک غلیظ و اسید پرکلریدریک مخلوط و به مدت ۲۴ ساعت برای انجام عمل هضم مقدماتی در شرایط آزمایشگاهی قرار داده شد. سپس محلول اسیدی حرارت داده شد تا محلول بی‌رنگ شده و بخارات اسیدی آن خارج گردد. در مرحله بعد محلول تهیه شده با آب مقطر به حجم مورد نظر رسانده شد و در نهایت مقدار جذب کادمیوم در بخش‌های مختلف گونه *A. victoriae* با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل CTA-2000 AAS) اندازه‌گیری شد (Moreira et al., 2011).

سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر که به نسبت ۱:۱:۲ با کود حیوانی خشک شده، شن-ماسه، خاک ترکیب شده بودند، کاشته و به فاصله مناسب از یکدیگر قرار داده شدند. قبل از شروع آزمایش سه ماه اجازه سازگار شدن گونه با شرایط محیطی داده شد. طی این مدت به منظور ایجاد تعادل فرآیند مرطوب سازی خاک، مقدار رطوبت گلدان‌ها توسط آبیاری با آب معمولی و بر مبنای ۶۰٪ ظرفیت زراعی، نگه داشته شد. پس از سپری شدن سه ماه نهال‌هایی که شرایط ظاهری آنها سالم بود و بر روی برگ‌ها نشانه بیماری و آفات به چشم نمی‌خورد برای انجام آزمایش انتخاب شدند و سطح آلودگی نیز با توجه به حدود غلظت مجاز کادمیوم در خاک انتخاب شد. به گونه‌ای که دامنه‌ای از غلظت صفر تا چندین برابر غلظت مجاز را پوشانند. بدین صورت که تعداد ۱۲ گلدان در چهار غلظت ۰، ۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، کلرید کادمیوم ($CdCl_2$) در سه تکرار و به صورت یک طرح کاملاً تصادفی، به مدت ۴۵ روز تحت تیمار قرار گرفتند.

۲-۳- نمونه برداری و آماده سازی نمونه‌ها

پس از پایان دوره اعمال تیمار، تعدادی از شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه از جمله، طول ریشه، ارتفاع ساقه، ارتفاع کل گیاه، قطر یقه، تعداد برگ، سطح برگ، وزن تر و خشک بخش‌های مختلف گیاه (برگ، ساقه و ریشه)، شاخص ارزش تحمل گیاه، شاخص مهار رشد گیاه (Mahdavi and Khermandar, 2015)، مقدار کلروفیل a, b و کل (Mahdavi et al., 2014) اندازه‌گیری شد. طی این مدت و قبل از برداشت نمونه‌ها هرگونه نشانه‌ای از سمیت فلز کادمیوم (رنگ رفتگی، زردی، چروکیدگی،

جدول ۱. نتایج آنالیز ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش

اسیدیته	هدایت الکتریکی (ds/m)	سدیم (mg/kg)	پتاسیم (mg/kg)	کربن آلی (%)	ماده آلی (%)	نیترژن کل (%)	بافت خاک	رس (%)	شن (%)	سیلت (%)
۷/۲	۳/۵۹	۱۲	۴۲	۱/۴۴	۲/۴۸	۰/۱۶۴	سیلت-لومی	۵	۴۱	۵۴

۲-۴- محاسبه ^{29}TF , ^{29}UI , ^{29}EC , ^{29}BCF

پس از اندازه‌گیری مقدار جذب کادمیوم در بخش‌های مختلف گیاه، ضرایب و فاکتورهای مورد بررسی قرار گرفتند تا با کمک آن‌ها مکانیسم مقابله *A.victoriae* با این فلز و همچنین پتانسیل این گونه مشخص گردد. بدین صورت که بر اساس مقدار غلظت فلز کادمیوم در اندام‌های هوایی گیاه نسبت به مقدار غلظت کادمیوم وارده به خاک، ضریب تجمع زیستی هوایی ($\text{BCF}_{\text{shoot}}$) و بر اساس مقدار غلظت کادمیوم در ریشه گونه نسبت به مقدار غلظت کادمیوم وارده به خاک ضریب تجمع زیستی ریشه (BCF_{root}) محاسبه شد (Hazrat et al., 2012). همچنین بر اساس میزان غلظت کادمیوم وارده به خاک نسبت به مقدار تجمع کادمیوم در اندام‌های هوایی گیاه، ضریب غنی‌سازی (EC) بدست آمد (An et al., 2011). شاخص جذب (UI) نیز از حاصل ضرب مقدار وزن ماده خشک تیمارهای مختلف کادمیوم در مقدار غلظت این فلز در اندام‌های هوایی برآورد شد (خرمن‌دار، ۱۳۹۲) و بر حسب مقدار غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی گیاه نسبت به مقدار این فلز در ریشه گیاه، فاکتور انتقال (TF) گونه ارزیابی شد (Saleem Khan et al., 2014). آنالیز تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS نسخه ۱۶ انجام گرفت. همچنین برای بررسی وجود یا عدم وجود اختلاف معنی‌داری در بین تیمارها از تجزیه واریانس یک‌طرفه ANOVA و به منظور مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌داری LSD در سطح احتمال ۰.۰۵ استفاده شد.

۳- نتایج

۳-۱- تغییرات شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی

A.victoriae تحت تیمار کادمیوم

نتایج حاصل از تجزیه واریانس فلز کادمیوم مشخص کرد که شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی مورد بررسی (طول

ریشه، ارتفاع ساقه، ارتفاع کل گیاه، قطر یقه، تعداد برگ، سطح برگ، وزن تر و خشک برگ، ساقه، ریشه و کل گیاه، ارزش تحمل، شاخص مهار رشد گیاه و مقدار کلروفیل a, b و کل) در سطح احتمال ۰.۰۱ ($P < 0.01$) معنی‌دار بودند (جدول ۲). همچنین نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی (جدول ۳) نشان داد که، طول ریشه و ارتفاع کل گیاه در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۰۵ اختلاف معنی‌داری با تیمارهای ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و شاهد داشتند. اما ارتفاع ساقه فقط در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۰۵ اختلاف معنی‌داری با تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و تیمار شاهد داشت و با افزایش غلظت کادمیوم کاهش خطی شاخص‌ها حاصل شد. به طوری که به ترتیب کاهش ۶۲٪-۸٪، ۳۸٪-۲٪ و ۵۱٪-۰.۵٪ طول ریشه، ارتفاع ساقه و ارتفاع کل گیاه در مقایسه با تیمار شاهد به دست آمد که نشان دهنده سمی بودن کادمیوم برای گیاه است. قطر یقه نیز در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۰۵ اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشت و با افزایش غلظت کادمیوم کاهش ۴۷٪-۵٪ آن در مقایسه با تیمار شاهد برآورد شد. تعداد برگ‌ها و سطح برگ گیاه در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۰۵ اختلاف معنی‌داری با تیمارهای ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و شاهد داشتند و با افزایش غلظت کادمیوم به ترتیب کاهش ۲۷٪-۴٪ و ۵۹٪-۰.۵٪ تعداد برگ و سطح برگ‌ها در مقایسه با تیمار شاهد یافت شد (جدول ۳). وزن تر ریشه و کل گیاه نیز در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۰۵ اختلاف معنی‌داری با تیمارهای ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و شاهد داشتند. اما وزن تر برگ در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با تیمار شاهد و وزن تر ساقه نیز در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و شاهد، در سطح ۰.۰۵ اختلاف معنی‌داری داشتند و به ترتیب کاهش ۴۸٪-۱۲٪، ۴۳٪-۴٪، ۶۶٪-۴٪

خرمن دار و مهدوی

کاهش ۰/۰۷-۰/۱۰٪ شاخص تحمل و افزایش ۰/۰۷-۰/۱۰٪ شاخص مهار رشد در مقایسه با تیمار شاهد یافت شد. علت تضاد در کاهش شاخص تحمل و افزایش شاخص مهار رشد گیاه در غلظت‌های مختلف کادمیوم نشان دهنده اثر منفی فلز کادمیوم در مقاومت و رشد این گونه است (جدول ۳). در بررسی مقدار کلروفیل مشخص شد که مقدار کلروفیل a, b و کل در تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، در سطح ۵٪ اختلاف معنی داری با تیمار شاهد داشتند و همه تیمارها نیز با یکدیگر اختلاف معنی داری داشتند و با افزایش غلظت کادمیوم به ترتیب کاهش ۰/۷۳-۰/۱۶٪، ۰/۶۲-۰/۱۲٪ و ۰/۶۹-۰/۱۵٪ مقدار کلروفیل a, b و کل در مقایسه با تیمار شاهد برآورد شد (جدول ۳).

و ۰/۷-۰/۵۲٪ وزن تر برگ، ساقه، ریشه و کل گیاه در مقایسه با تیمار شاهد برآورد شد. همچنین نتایج وزن خشک گیاه نشان داد که وزن خشک ساقه، ریشه و کل گیاه در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، در سطح ۵٪ اختلاف معنی داری با تیمارهای ۵۰ میلی گرم بر لیتر و شاهد داشتند. اما وزن خشک برگ فقط در تیمار ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر با تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ میلی گرم بر لیتر و شاهد، در سطح ۵٪ اختلاف معنی داری داشت و به ترتیب کاهش ۰/۴۷-۰/۲٪، ۰/۵۰-۰/۲٪، ۰/۶۷-۰/۱۰٪ و ۰/۵۶-۰/۵٪ وزن خشک برگ، ساقه، ریشه و کل گیاه در مقایسه با تیمار شاهد برآورد شد (جدول ۳). شاخص تحمل و شاخص مهار رشد گیاه نیز در تیمارهای ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، در سطح ۵٪ اختلاف معنی داری با تیمارهای ۵۰ میلی گرم بر لیتر و تیمار شاهد داشتند. به طوری که

جدول ۲. تجزیه واریانس شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی^۰ در مقدار جذب کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

میانگین مربعات										درجه آزادی	منابع تغییرات
TMW	RMW	SMW	LMW	LA	LN	D	PL	SL	RL		
۱۷,۶۰ ^{oo}	۴,۲۶ ^{oo}	۰,۹۵ ^{oo}	۱,۴۱ ^{oo}	۱,۲۴ ^{oo}	۸۱۷ ^{oo}	۳,۶۸ ^{oo}	۶۳۹,۷۸ ^{oo}	۸۵,۸۶ ^{oo}	۲۶۰,۵۳ ^{oo}	۳	تیمار
۰,۲۶	۰,۱۲	۰,۱۵	۰,۱۲	۰,۰۹	۲۰,۸۳	۰,۲۶	۱۲,۰۸	۶,۳۳	۶,۳۳	۸	خطا

^{oo} معنی داری در سطح احتمال ۱٪

ادامه جدول ۲. تجزیه واریانس شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی^۰ در مقدار جذب کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

میانگین مربعات									درجه آزادی	منابع تغییرات
Col T	Col b	Col a	GGI	TI	TDW	RDW	SDW	LDW		
۰,۹۶ ^{oo}	۰,۰۷ ^{oo}	۰,۵۱ ^{oo}	۰,۰۰۳ ^{oo}	۲۳۴۴,۷۵ ^{oo}	۱۲,۳۹ ^{oo}	۲,۶۲ ^{oo}	۰,۹۲ ^{oo}	۰,۹۲ ^{oo}	۳	تیمار
۰,۰۱	۰,۰۰	۰,۰۱	۰,۰۰۰	۴۲,۷۵	۰,۲۲	۰,۱۲	۰,۰۶	۰,۰۷	۸	خطا

^{oo} معنی داری در سطح احتمال ۱٪

جدول ۳. مقایسه میانگین‌های شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی در مقدار جذب کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی									کلرید کادمیوم (میلی گرم بر لیتر)
RMW ^(gr)	SMW ^(gr)	LMW ^(gr)	LA (cm ²)	LN	D(mm)	PL (cm)	SL (cm)	RL (cm)	
۳,۸۳ ± ۰,۴۷ ^a	۲,۹۴ ± ۰,۳۳ ^a	۳,۳۰ ± ۰,۳۳ ^a	۲,۳۴ ± ۰,۴۱ ^a	۱۳۰,۶۷ ± ۴,۷۳ ^a	۵,۳۳ ± ۰,۴۱ ^a	۶۳,۶۷ ± ۱,۱۵ ^a	۳۰,۳۳ ± ۱,۵۳ ^a	۳۳,۳۳ ± ۲,۵۳ ^a	۰ (شاهد)
۳,۶۸ ± ۰,۲۰ ^a	۲,۸۲ ± ۰,۴۰ ^a	۲,۹۱ ± ۰,۴۴ ^{ab}	۲,۲۱ ± ۰,۴۱ ^a	۱۲۵,۶۷ ± ۳,۷۸ ^a	۵,۰۶ ± ۰,۳۰ ^{ab}	۶۰,۳۳ ± ۱,۱۱ ^a	۲۹,۶۷ ± ۳,۷۸ ^a	۳۰,۶۷ ± ۳,۲۱ ^a	۵۰
۲,۲۸ ± ۰,۴۴ ^b	۲,۴۵ ± ۰,۰۹ ^a	۲,۳۹ ± ۰,۲۵ ^b	۱,۶۱ ± ۰,۱۵ ^b	۱۰۸,۳۳ ± ۳,۵۱ ^b	۴,۳۱ ± ۰,۶۹ ^b	۴۸,۶۷ ± ۳,۰۵ ^b	۲۶,۳۳ ± ۱,۵۳ ^a	۲۲,۳۳ ± ۱,۵۳ ^b	۲۵۰
۱,۳۳ ± ۰,۱۴ ^c	۱,۶۹ ± ۰,۵۶ ^b	۱,۷۲ ± ۰,۳۳ ^c	۰,۹۴ ± ۰,۰۸ ^c	۹۴,۶۷ ± ۵,۸۶ ^c	۲,۸۶ ± ۰,۵۶ ^c	۳۱,۳۳ ± ۰,۵۸ ^c	۱۸,۶۷ ± ۲,۵۲ ^b	۱۲,۶۷ ± ۲,۵۲ ^c	۵۰۰

حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی داری بین تیمارها (در سطح ۵٪) است.

گیاه پالایی کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله آکاسیا ویکتوریا (*Acacia victoriae* L.)

ادامه جدول ۳. مقایسه میانگین‌های شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی در مقدار جذب کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

شاخص‌های مورفوفیزیولوژیکی										کلرید کادمیوم (میلی گرم بر لیتر)
Col T (mg/g)	Col b (mg/g)	Col a (mg/g)	GGI	TI (%)	TDW (gr)	RDW (gr)	SDW (gr)	LDW (gr)	TMW (gr)	
1,86 ± 0,21 ^a	0,58 ± 0,06 ^a	1,28 ± 0,17 ^a	0 ± 0,00 ^a	100 ± 0,00 ^a	7,97 ± 0,43 ^a	3,10 ± 0,48 ^a	2,36 ± 0,27 ^a	2,51 ± 0,24 ^a	10,07 ± 0,34 ^a	0 (شاهد)
1,58 ± 0,06 ^b	0,51 ± 0,01 ^b	1,07 ± 0,06 ^b	0,01 ± 0,00 ^a	92 ± 9,64 ^a	7,59 ± 0,23 ^a	2,80 ± 0,13 ^a	2,32 ± 0,28 ^a	2,47 ± 0,38 ^a	9,41 ± 0,18 ^a	50
1,14 ± 0,05 ^c	0,41 ± 0,02 ^c	0,73 ± 0,05 ^c	0,03 ± 0,01 ^b	67 ± 4,58 ^b	5,76 ± 0,80 ^b	1,90 ± 0,41 ^b	1,79 ± 0,16 ^b	2,06 ± 0,24 ^a	7,12 ± 0,75 ^b	250
0,56 ± 0,02 ^d	0,22 ± 0,03 ^d	0,34 ± 0,01 ^d	0,07 ± 0,00 ^c	38 ± 7,55 ^c	3,53 ± 0,16 ^c	1,03 ± 0,22 ^c	1,18 ± 0,26 ^c	1,32 ± 0,18 ^b	4,74 ± 0,59 ^c	500

حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌داری بین تیمارها (در سطح ۰/۵) است.

۲-۳- تغییرات پارامترهای جذب *A.victoriae* تحت تیمار کادمیوم

نتایج حاصل از تجزیه واریانس فلز کادمیوم نشان داد که، شاخص‌های جذب مورد بررسی، مقدار جذب کادمیوم در بخش‌های مختلف گیاه (برگ، ساقه و ریشه‌ها)، نسبت غلظت فلز در اندام‌های مختلف گیاه، فاکتور انتقال، شاخص جذب، ضریب غنی‌سازی و ضریب تجمع زیستی (زیرزمینی و هوایی) در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بودند (جدول ۴). نتایج مقایسه میانگین شاخص‌های جذب ارزیابی شده کادمیوم (جدول ۵) نشان داد که، مقدار جذب این فلز در همه بخش‌های گیاه (برگ، ساقه و ریشه‌ها) در تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰/۵ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر و تیمار شاهد داشتند و با افزایش غلظت کادمیوم مقدار جذب در بخش‌های مختلف گیاه به صورت خطی افزایش یافت. بیشترین مقدار تجمع کادمیوم در گیاه نیز در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر صورت گرفت. به طوری که مقدار جذب در برگ، ساقه و ریشه‌ها در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب ۱۱/۱، ۱۰/۴ و ۱۰/۲ برابر مقدار جذب در تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد و در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مقدار جذب در ریشه ۵۱ برابر برگ و ۱۹/۵ برابر ساقه و در ساقه ۲/۷ برابر برگ اندازه‌گیری شد، که این مساله نشان می‌دهد که کادمیوم در ریشه‌های *A.victoriae* به طور معنی‌داری بیشتر از ساقه و برگ‌ها

تجمع پیدا کرده است و مقدار تجمع کادمیوم به ترتیب به صورت ریشه < ساقه < برگ (۵۶۹۳۳ < ۲۹۱۰ < ۱۱۰۶۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) می‌باشد (جدول ۵). نسبت غلظت ساقه به ریشه (S/R)، برگ به ریشه (L/R)، برگ به ساقه (L/S) و فاکتور انتقال در تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰/۵ اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشتند. اما بین تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰/۵ اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و با افزایش غلظت کادمیوم روند افزایشی S/R، L/R، L/S و فاکتور انتقال نسبت به تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ملاحظه شد. اما این افزایش از نظر آماری اثر معنی‌داری نداشت. به طوری که در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت‌های S/R، L/R، L/S و فاکتور انتقال به ترتیب ۱/۲، ۱۱/۱، ۹/۱ و ۳/۳ نسبت به تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش یافتند که این مساله نشان دهنده آن است که مقدار کم‌تری از فلز کادمیوم در اندام هوایی این گونه تجمع یافته است. همچنین بر اساس نتایج این فاکتور در همه تیمارها کم‌تر از یک بود که نشان دهنده تجمع بیش‌تر کادمیوم در ریشه است (میانگین، ۰/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (جدول ۵). شاخص جذب در گیاه نیز در تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰/۵ اختلاف معنی‌داری با یکدیگر و تیمار شاهد داشتند. این شاخص در واقع تاثیر مقدار جذب کادمیوم بر زی‌توده گیاه را نشان می‌دهد و بر اساس نتایج در تیمار ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش ۳/۹ برابری و در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش ۴/۹ علوم و مهندسی محیط زیست- سال دوم- شماره ۴- پاییز ۱۳۹۴

۴- بحث

۴-۱- آثار سمیت کادمیوم بر شاخص‌های

مورفوفیزیولوژیکی *A.victoriae*

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم کاهش بیشتری در طول، وزن تر و خشک ریشه در مقایسه با اندام‌های هوایی *A.victoriae* مشاهده شد و این مساله ارتباط مستقیمی با سایر شاخص‌های مورد بررسی گیاه (ارتفاع گیاه، تعداد و سطح برگ، قطر یقه، وزن تر و خشک گیاه، ارزش تحمل، شاخص مهار رشد گیاه و کلروفیل a, b و کل) دارد. علت این امر آن است که کادمیوم با اثر منفی در رشد ریشه، سبب محدودیت در جذب آب و مواد مغذی می‌شود، در نتیجه رشد کل گیاه کاهش می‌یابد. بنابراین کادمیوم به سرعت توسط گیاه جذب شده و در قسمت‌های مختلف آن تجمع می‌یابد که این مساله منجر به ممانعت از رشد گیاه و تغییر در ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه می‌شود (Benyas et al., 2013). در واقع سمیت بالای فلز کادمیوم بر بسیاری از فرآیندهای متابولسمی گیاه و متابولسم ریشه اثر گذاشته و در نتیجه حساسیت گیاه به سمیت کادمیوم با کاهش طول ریشه نمایان می‌شود (Gupta and Abdullah, 2011). کاهش ارتفاع ساقه گیاه در غلظت‌های مختلف کادمیوم نیز می‌تواند به دلیل کاهش و اختلال در سلول‌های مرستمی آن منطقه باشد (Patil and Umadevi, 2014). از طرفی کادمیوم با اثر منفی در رشد ریشه سبب محدودیت در جذب آب و مواد مغذی در گیاه می‌شود. در نتیجه رشد ساقه کاهش می‌یابد (Benyas et al., 2013). بنابراین کاهش گیاه در طول تنش با فلزات سنگین منجر به کاهش پتانسیل آبی، جلوگیری از جذب نیترات‌ها و تنش اکسیداتیو می‌گردد (Minakshi et al., 2012).

برابری این شاخص نسبت به تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر برآورد شد. با آنکه مقدار غلظت کادمیوم در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر دو برابر تیمار ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر شد، اما مقدار شاخص جذب نسبت به تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر افزایش چشمگیری نداشت که این مساله در نتیجه اثر منفی غلظت بالای فلز کادمیوم بر مقدار زی‌توده گیاه است. در بررسی ضریب غنی‌سازی نیز مشخص شد که تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۵٪ اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشتند. اما بین تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و با افزایش غلظت کادمیوم این ضریب در تیمار ۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر تغییری نداشت و فقط در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ۰.۲٪ نسبت به دو تیمار قبلی کاهش یافت، که این مساله تایید کننده تجمع غالب کادمیوم در ریشه تیمارهای مختلف گیاه است (جدول ۵). بر اساس نتایج حاصل از ضریب تجمع زیستی ریشه و اندام‌های هوایی مشخص شد که هر دو ضریب در تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۵٪ اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد داشتند. اما بین تیمارهای ۵۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، در سطح ۰.۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و با افزایش غلظت کادمیوم روند افزایشی در ضریب تجمع زیستی ریشه و اندام‌های هوایی برآورد شد. اما این افزایش از نظر آماری اثر معنی‌داری نداشت. به طوری که در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ضریب تجمع زیستی ریشه ۰.۲٪ و ضریب تجمع زیستی اندام‌های هوایی ۰.۵٪ بیش‌تر از تیمار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر برآورد شد. همچنین هر دو ضریب بیش‌تر از یک بودند و میانگین ضریب تجمع زیستی ریشه بیش‌تر از میانگین ضریب تجمع زیستی اندام‌های هوایی گیاه بود، که باز هم تایید کننده تجمع غالب فلز کادمیوم در ریشه‌ها است (جدول ۵).

گیاه پالایی کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله آکاسیا ویکتوریا (*Acacia victoriae* L.)

جدول ۴. تجزیه واریانس شاخص‌های جذب^۰ کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییرات
L/S	L/R	S/R	Root	Shoot	Leaf		
۰/۱۰ ^{***}	۰/۰۰ ^{***}	۰/۰۰ ^{***}	۲۰۰۹۸۷۰۰۰۰ ^{***}	۵۲۵۱۶۶۶۷۰ ^{***}	۷۶۰۳۶۳۹۰ ^{***}	۳	تیمار
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۷۵۵۸۳۳۳۰	۴۳۵۸۳۰	۲۱۹۱۷۰	۸	خطا

^{***} معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

ادامه جدول ۴. تجزیه واریانس شاخص‌های جذب^۰ کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

میانگین مربعات					درجه آزادی	منابع تغییرات
BCF _{shoot}	BCF _{root}	EC	UI	TF		
۴۵۸۰ ^{***}	۹۵۵۹۷۰ ^{***}	۰/۰۰ ^{***}	۱۳۵۱۴۲۵۹۶ ^{***}	۰/۰۱ ^{***}	۳	تیمار
۰/۲۳	۵۳/۱۰	۰/۰۰	۷۴۷۲۲۹/۴۰	۰/۰۰	۸	خطا

^{***} معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪

جدول ۵. مقایسه میانگین‌های شاخص‌های جذب کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

شاخص‌های ارزیابی شده						کلرید کادمیوم (میلی‌گرم بر لیتر)
L/S (mg/kg)	L/R (mg/kg)	S/R (mg/kg)	Root (mg/kg)	Shoot (mg/kg)	Leaf (mg/kg)	
۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ (شاهد)
۰/۳۵ ± ۰/۰۱ ^b	۰/۰۱۸ ± ۰/۰۰۳ ^b	۰/۰۵۰ ± ۰/۰۱۰ ^b	۵۶۰۰ ± ۳۰۰ ^b	۲۸۰ ± ۳۶۱۰ ^b	۱۰۰ ± ۱۰ ^b	۵۰
۰/۳۷ ± ۰/۰۱ ^b	۰/۰۱۹ ± ۰/۰۰۳ ^b	۰/۰۵۱ ± ۰/۰۰۵ ^b	۲۸۲۰۰ ± ۳۱۱۹۳ ^c	۱۴۲۳۳۰ ± ۶۱۱۰ ^c	۵۲۳۳۰ ± ۶۵۱۰ ^c	۲۵۰
۰/۳۸ ± ۰/۰۲ ^b	۰/۰۲۰ ± ۰/۰۰۳ ^b	۰/۰۵۱ ± ۰/۰۰۴ ^b	۵۶۹۳۳ ± ۲۲۸۱۱ ^d	۲۹۱۰ ± ۱۱۱/۴ ^d	۱۱۰۶۷۰ ± ۶۶۶ ^d	۵۰۰

حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌داری بین تیمارها (در سطح ۵٪) است.

ادامه جدول ۵. مقایسه میانگین‌های شاخص‌های جذب کلرید کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A.victoriae*

شاخص‌های ارزیابی شده					کلرید کادمیوم (میلی‌گرم بر لیتر)
BCF _{shoot}	BCF _{root}	EC	UI (mg/kg)	TF (mg/kg)	
۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ ± ۰ ^a	۰ (شاهد)
۷/۶۰ ± ۰/۹۲ ^b	۱۱۲ ± ۶ ^b	۰/۰۸۴ ± ۰/۰۰۵ ^b	۲۸۸۰۹۰ ± ۲۹۸/۴ ^b	۰/۰۶۹ ± ۰/۰۱۰ ^b	۵۰
۷/۸۰ ± ۰/۰۶ ^b	۱۱۲/۸۰ ± ۱۲/۵ ^b	۰/۰۸۴ ± ۰/۰۰۸ ^b	۱۱۲۲۰/۷۰ ± ۱۶۳۴/۷۰ ^c	۰/۰۷۰ ± ۰/۰۱۰ ^b	۲۵۰
۸/۰۳ ± ۰/۲۹ ^b	۱۱۳/۹۰ ± ۴/۶ ^b	۰/۰۸۲ ± ۰/۰۰۲ ^b	۱۴۱۶۸ ± ۴۷۶/۹ ^d	۰/۰۷۱ ± ۰/۰۰۵ ^b	۵۰۰

حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌داری بین تیمارها (در سطح ۵٪) است.

کاهش ماده‌سازی است که این موضوع در حضور کادمیوم چشمگیر است. پس کادمیوم مانع از رشد ریشه گیاه شده و سبب تغییراتی در همانند سازی مواد و کاهش ماده خشک در گیاه می‌گردد (Benyas et al., 2013). کاهش سطح برگ گیاه با افزایش غلظت کادمیوم نیز به علت کاهش نفوذپذیری و افزایش دما در گیاه تحت تاثیر فلز کادمیوم است که، منجر به کاهش سطح برگ در گیاه

افزایش غلظت فلز کادمیوم همچنین سبب کاهش وزن تر و خشک بخش‌های مختلف گیاه شد. چون بیشترین تاثیر فلزات سنگین در رشد ریشه در مقایسه با رشد ساقه ملاحظه می‌گردد و این امر منجر به کاهش بیشتر در رشد گیاه و وزن تر آن‌ها می‌شود (Minakshi et al., 2012). از طرفی کاهش وزن گیاه به عنوان اولین پاسخ فیزیولوژیکی به عوامل تنش‌زای محیط رشد در قالب

طول ریشه، ساقه و وزن خشک کل در هر چهار گونه کاهش یافتند. Hussain و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی اثر کادمیوم در گونه *Zea maize L.* به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت کادمیوم کاهش خطی وزن خشک ساقه و ریشه، سطح برگ، کلروفیل a, b و کل در مقایسه با شاهد مشاهده شد. Benyas و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی تاثیر کادمیوم در گونه‌های *Amaranthus caudatus L.* and *Brassica napus L.* که با افزایش کادمیوم کاهش معنی داری در ارتفاع گیاه، وزن خشک برگ، ساقه و ریشه، تعداد برگ‌های سبز گیاهان، سطح برگ، کلروفیل a, b و کل در مقایسه با تیمار شاهد ملاحظه شد. Gupta and Abdullah, 2011 در بررسی اثر کادمیوم در گونه *Zea mays L.* دریافتند که با افزایش کادمیوم، کاهش خطی طول ریشه و ساقه، ارتفاع گیاه و وزن خشک این گونه در مقایسه با شاهد یافت شد. Vijayaragavan و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی اثر سمیت کادمیوم در *Vigna unguiculata L.* دریافتند که با افزایش غلظت کادمیوم، طول ساقه و ریشه، وزن تر ساقه و ریشه، وزن خشک ساقه و ریشه، سطح برگ، کلروفیل a, b و کل به صورت خطی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافتند. در پژوهش‌های شرح داده شده، محققان گزارش کردند که مقدار کاهش در شاخص‌های اندازه‌گیری شده ریشه گیاهان از جمله، طول، وزن تر، وزن خشک و ارزش تحمل نسبت به شاخص‌های اندازه‌گیری شده اندام‌های هوایی گیاهان از جمله، ارتفاع، وزن تر و خشک بیش‌تر بود که نشان دهنده تاثیر بیش‌تر کادمیوم در ریشه گیاه نسبت به اندام‌های هوایی است. بر اساس یافته محققان مختلف یکی از شایع‌ترین علائم ریختی ناشی از فلزات سنگین، تغییر رنگ و زردی برگ‌ها است. این تغییر در بسیاری از مطالعات به عنوان اولین علامت مسمومیت در نظر گرفته شده است. به طوری که Minakshi و همکاران (۲۰۱۲) مهمترین اثر

می‌شود (Benyas et al., 2013). کاهش سطح برگ در غلظت‌های بالای فلز کادمیوم ممکن است منجر به کاهش فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها، تثبیت دی‌اکسید کربن، کاهش محتوای کلروفیل و همچنین ممانعت از فعالیت فتوسنتز در گیاهان مختلف شود (Vijayaragava et al., 2011). پژوهشگران دریافته‌اند که اندازه‌گیری مقدار کلروفیل شاخص مهمی برای ارزیابی اثرات آلودگی هوا و فلزات سنگین بر روی گیاهان است. در این پژوهش دلیل کاهش کلروفیل با افزایش غلظت کادمیوم آن است که کادمیوم جایگزین منیزیم در سلول‌ها شده و این امر منجر به کاهش کلروفیل در گیاه می‌شود. البته ممکن است کاهش کلروفیل به علت القاء تنش اکسیداتیو و تخریب ساختار کارتنوئیدها باشد. برخی از پژوهشگران نیز گزارش کرده‌اند که کاهش ارتفاع ساقه ارتباط مستقیمی با کاهش کلروفیل و فتوسنتز در گیاه دارد و کاهش در زی‌توده گیاه مانع از سنتز کلروفیل می‌شود (Ano et al., 2013). نتایج این پژوهش با یافته‌های برخی پژوهشگران همخوانی دارد، به طوری که Kanwal و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی اثر کادمیوم در *Wheat L.* دریافتند که افزایش غلظت کادمیوم باعث کاهش خطی ارتفاع و وزن خشک ساقه و ریشه و همچنین کلروفیل a, b و کل در مقایسه با شاهد شد. Zhi و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی تاثیر کادمیوم در گونه *Eruca sativa mill L.* گزارش دادند که با افزایش غلظت فلز کادمیوم کاهش شاخص‌های مورفولوژیکی گیاه از جمله، طول ریشه، ارتفاع ساقه و وزن تر کل گیاه در مقایسه با شاهد ملاحظه شد. Anayat و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی اثر فلز کادمیوم در گونه *Foeniculum vulgare L.* به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت کادمیوم، ارتفاع ساقه و ریشه، کلروفیل و سطح برگ گیاه کاهش یافتند. Patil and Umadevi, 2014 در بررسی تاثیر کادمیوم در چهار گونه *Eucalyptus L.* دریافتند که با افزایش کادمیوم

نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های برخی از محققان تطابق دارد، به طوری که Kanwal و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی مقدار تجمع کادمیوم در *Wheat L.* دریافتند که با افزایش غلظت کادمیوم مقدار تجمع در این گونه افزایش یافت و این مقدار در ریشه‌ها بیشتر از اندام‌های هوایی بود. به طوری که ۹۰٪ کادمیوم در ریشه‌های آن تجمع یافت. Eissa و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی تجمع کادمیوم در چند گونه *Corn L.*, *Sunflower L.*, *Bean L.*, *Barley L.*, *Wheat L.*, *Cotton L.* گزارش دادند که با افزایش غلظت کادمیوم مقدار جذب در اندام‌های مختلف آن‌ها به صورت خطی افزایش یافتند و بیش‌ترین مقدار تجمع کادمیوم در همه گونه‌ها در ریشه‌ها بود. به طوری که غلظت فلز کادمیوم در ریشه‌ها ۲٫۵-۲٫۳ برابر بیش‌تر از اندام‌های هوایی بود و فاکتور انتقال نیز در همه گونه‌ها کم‌تر از یک بود. Maria و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی مقدار تجمع فلز کادمیوم در *Sunflower L.* دریافتند که تجمع کادمیوم در ریشه‌های این گونه بیش‌تر از اندام‌های هوایی است و این مقدار ۱۰ برابر بیش‌تر از اندام‌های هوایی برآورد شد و فاکتور انتقال در این گونه نیز کم‌تر از یک بود. Dai و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی تجمع فلز کادمیوم در گونه درختی *Populus × canescens L.* به این نتیجه رسیدند که تجمع کادمیوم در اندام‌های آن با افزایش کادمیوم به صورت خطی افزایش یافت و تجمع کادمیوم در ریشه به ترتیب ۱۶۷ و ۴۸۵ برابر بیش‌تر از برگ و ساقه‌ها بود. Hazrat و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی تجمع کادمیوم در گونه *Trifolium alexandrinum L.* گزارش دادند که غلظت کادمیوم در ریشه‌های آن ۳٫۵ برابر بیش‌تر از اندام‌های هوایی است. همچنین فاکتور انتقال در این گونه کم‌تر از یک و ضریب تجمع زیستی ریشه نیز بیش‌تر از اندام هوایی برآورد شد. Han و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی تجمع کادمیوم در هفت کلون *Salix caprea L.* به این نتیجه رسیدند که تجمع کادمیوم در ریشه‌ها ۶ برابر بیش‌تر علوم و مهندسی محیط زیست- سال دوم- شماره ۴- پاییز ۱۳۹۴

مورفولوژی سمیت کادمیوم در گیاه را کلروز برگ‌ها می‌دانند که این مسئله به علت تغییر در فعالیت بسیاری از آنزیم‌های کلیدی در گیاه است.

۴-۲- توانایی جذب و انتقال کادمیوم در نهال‌های

A.victoriae

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، با افزایش غلظت کادمیوم محتوای این فلز در بخش‌های مختلف گیاه (برگ، ساقه و ریشه) افزایش یافت. به طوری که بالاترین مقدار تجمع کادمیوم در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب در ریشه < ساقه < برگ (۵۶۹۳۳ < ۲۹۱۰ < ۱۱۰۶۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) برآورد شد و مشخص شد که ریشه‌ها قادر به تجمع ۹۳/۵٪ کادمیوم در بافت‌های خود بودند. علت این مساله آن است که ریشه گیاه اولین اندام در خاک است که از طریق دیواره سلولی کادمیوم را دریافت می‌کند، در نتیجه مقدار غلظت کادمیوم در ریشه‌ها بسیار بالاست (Chen et al., 2011). در مقابل علت تجمع بسیار کم کادمیوم در برگ نسبت به ریشه آن است که برگ‌های گیاه به سیستم آنتی‌اکسیدانتی مجهزاند که از گیاه در مقابل سمیت کادمیوم محافظت می‌کنند و از طرفی دیگر این کاهش در برگ‌ها نشان دهنده باقی ماندن کادمیوم در ریشه است (Asgher et al., 2013). در واقع وجود اختلاف زیاد غلظت کادمیوم بین ریشه و اندام هوایی نشان دهنده محدودیت انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی است، در نتیجه غلظت فلز کادمیوم در ریشه‌های گیاه نسبت به اندام‌های هوایی آن بیش‌تر است (Hazrat et al., 2012). همچنین نتایج این پژوهش مشخص کرد که در همه تیمارها ضریب تجمع زیستی ریشه بیش‌تر از یک و فاکتور انتقال نیز کم‌تر از یک است. براساس یافته‌های محققان، گونه گیاهی که ضریب تجمع زیستی ریشه و فاکتور انتقال آن به ترتیب بیش‌تر و کم‌تر از یک باشد، برای هدف تثبیت گیاهی در فرآیند گیاه پالایی مناسب است (Saleem Khan et al., 2014).

کادمیوم نسبت به اندام هوایی دارند که این مساله به ویژگی بارز خانواده لگومینوزها که همان سیستم ریشه‌ای گسترده است، برمی‌گردد. بنابراین استفاده از گونه *A. victoriae* به عنوان یک گیاه چند منظوره پیشنهاد می‌شود. چون علاوه بر توانایی بالا در تثبیت کادمیوم در ریشه‌ها (جهت کاهش آلودگی خاک‌های آلوده به این فلز) به دلیل سازگاری با شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک، مقاومت در برابر خشکسالی و شوری، جهت جلوگیری از فرسایش، آبشویی و رواناب نیز قابل بهره‌برداری است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان پیش زمینه‌ای برای پالایش کادمیوم توسط *A. victoriae* در پژوهش‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین استفاده از این گونه برای مطالعات بعدی گیاه‌پالایی، به منظور یافتن راه‌کارهای استقرار بهتر گیاه و افزایش کارایی گیاه‌پالایی پیشنهاد می‌شود. اما برای اینکه مشخص شود تا چه اندازه برای پاک‌سازی محیط مناسب است، نیاز به تحقیق گسترده‌تر در شرایط مختلف دارد. چون فرآیند زدودن آلودگی خاک فرآیندی تدریجی است که به کشت گیاهان در طی سالیان طولانی نیاز دارد.

از اندام‌های هوایی است و فاکتور انتقال نیز کم‌تر از یک بود. Mala و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی تجمع فلز کادمیوم در سه کلون *Willow L.* گزارش دادند که تجمع کادمیوم در هر سه کلون در ریشه‌ها بیش‌تر از اندام‌های هوایی است و این مقدار بین ۹-۱۰ برابر مقدار تجمع در اندام‌های هوایی برآورد شد. Regvar و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی تجمع کادمیوم در *Salix caprea L.* دریافتند که مقدار تجمع کادمیوم در ریشه بیشتر از برگ‌ها بود و فاکتور انتقال نیز کم‌تر از یک حاصل شد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر همچنین نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم میزان ضریب غنی‌سازی در اندام‌ها کاهش یافت که این موضوع باز هم تایید کننده توانایی تجمع بیشتر کادمیوم در ریشه‌ها و ممانعت از انتقال آن به اندام هوایی گیاه است. شاخص جذب نیز که به عنوان قوی‌ترین معیار برای تعیین پتانسیل پالایش گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد، با افزایش غلظت کادمیوم افزایش کم‌تری نسبت به تیمارهای قبل داشت که این مساله در نتیجه اثر منفی غلظت بالای کادمیوم بر کاهش زی‌توده گیاه است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در بررسی گیاه‌پالایی کادمیوم توسط نهال‌های یک‌ساله *A. victoriae* مشخص شد که علائم مورفولوژی سمیت فلز کادمیوم در این گونه در تیمار ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به صورت کلروز، نکروزه و پژمردگی برگ‌ها (رنگ سبز متمایل به زرد و سوختگی در برگ‌ها، نوک و حاشیه برگ‌ها به صورت نکروزه)، کاهش قطر، انشعابات، شکنندگی و تغییر رنگ ریشه‌ها از سفید به رنگ سیاه تا قهوه‌ای که نشان دهنده چوب پنبه‌ای شدن شدید آن است، ملاحظه شد. بنابراین می‌توان عنوان کرد که تغییرات مورفوفیزیولوژیکی توسط فلز کادمیوم شروع آثار نامساعد در رشد و توسعه گیاه بود. همچنین نمایان شد که ریشه‌های *A. victoriae* توانایی بالایی در جذب

۶- پی‌نوشت‌ها

1. Bio Concentration Factor
 2. Enrichment Coefficient
 3. Uptake Index
 4. Translocation Factor
۵. طول ریشه (RL)، ارتفاع ساقه (SL)، ارتفاع کل گیاه (PL)، قطر یقه (D)، تعداد برگ (LN)، وزن تر برگ (LMW)، وزن تر ساقه (SMW)، وزن تر ریشه (RMW)، وزن تر کل گیاه (TMW)، وزن خشک برگ (LDW)، وزن خشک ساقه (SDW)، وزن خشک ریشه (RDW)، وزن خشک کل گیاه (TDW)، ارزش تحمل (TI)، شاخص مهار رشد (GGI)، کلروفیل a (Col a)، کلروفیل b (Col b)، کلروفیل کل (Col T)، جذب برگ (Leaf)، جذب ساقه (Shoot)، جذب ریشه (Root)، غلظت ساقه به ریشه

-Dai, Hui-Ping, Shan, Chan-Juan, Jia, Genliang, Lu, Chao, Yang, Tu-Xi and Wei, An-Zhi (2013) "Cadmium detoxification in *Populus × canescens*", Turkish Journal of Botany, No. 37, pp. 950-955.

-Eissa, Mamdouh-A, Ghoneim, Mohamed-F, El-Gharably, Galal-A and El-Razek, Mohamed Abd (2014) "Phytoextraction of nickel, lead and cadmium from metals contaminated soils using different field crops and EDTA", World Applied Sciences Journal, No. 32 (6), pp. 1045-1052.

-Golubev, Ivan A. (2011) "Handbook of phytoremediation", Nova Science Publisher, Inc, 840 pp.

-Gupta, Diwaker and Abdullah (2011) "Toxicity of copper and cadmium on germination and seedling growth of maize (*Zea mays* L.) seeds", Indian Journal of Sciences and Research, No. 2 (3), pp. 67-70.

-Han, Sim-Hee, Kim, Du-Hyun and Lee, Jae-Cheon (2010) "Cadmium and zinc interaction and phytoremediation potential of seven (*Salix caprea* clones)", Journal of Ecology and Field Biology, No. 33 (3), pp. 245-251.

-Hazrat, Ali, Naseer, Muhammad, Anwar-Sajad, Muhammad (2012) "Phytoremediation of heavy metals by *Trifolium alexandrinum*", International Journal of Environmental Sciences, No. 2 (3), pp. 1459-1469.

-Hussain, Iqbal, Akhtar, Shamim, Ashraf, Muhammad-Arslan, Rasheed, Rizwan, Siddiqi, Hussain-Ejaz and Ibrahim, Muhammad (2013) "Response of Maize seedlings to cadmium application after different time intervals", Agronomy, No. 2013, pp. 1-9.

-Kanwal, Sadia, Bano, Asma and Malik, Riffat-Naseem (2015) "Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat growth, physiology, nutrition and cadmium uptake under increasing cadmium stress", International Journal of Agronomy and Agricultural Research, No. 7(5), pp. 30-42.

-Mahdavi, Ali, Khermandar, Khadijeh, Ahmady-Asbchin, Salman and Tabaraki, Reza (2014) "Lead accumulation potential in *Acacia victoriae*", International Journal of Phytoremediation, No. 16 (6), pp. 582-592.

-Mahdavi, Ali and Khermandar, Khadijeh (2015) "Differential expression of zinc accumulation during two growing seasons of *Acacia victoriae*",

(S/R), غلظت برگ به ریشه (L/R), غلظت برگ به ساقه (L/S), فاکتور انتقال (TF), شاخص جذب (UI), ضریب غنی سازی (EC), ضریب تجمع زیستی ریشه (BCF_{root}), ضریب تجمع زیستی ساقه (BCF_{shoot}).

۷- منابع

-خرمن‌دار, خدیجه (۱۳۹۲) "بررسی پتانسیل جذب آلاینده سرب توسط درختچه بیابانی آکاسیا (*Acacia victoriae*)", پایان‌نامه کارشناسی ارشد بیابان‌زدایی, دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی, دانشگاه ایلام, ۱۰۵ص.

-An, Lingyao, Pan, Yanhui, Wang, Zhubing and Zhu, Cheng (2011) "Heavy metal absorption status of five plant species in monoculture and intercropping", Journal of Plant Soil, No. 345, pp. 237-245.

-Anayat, Mohsin, Kumar-Agnihotri, Rajneesh, Vamil, Rashmi and Sharma, Rajendra (2014) "Growth performance of *Foeniculum vulgare* L. under cadmium and mercury induced heavy metal stress", International Journal of Agriculture and Crop Sciences, No.7 (1), pp. 42-46.

-Ano, A.O, Eke-Okoro, O.N and Egesi, C.N (2013) " Heavy metals (Cd, Ni and Pb) pollution effects on Cassava (*Manihot esculenta* Crantz)", International Journal of Biodiversity and Conservation, No. 5 (10), pp. 640-646.

-Asgher, Mohd, R, Khan, M-Iqbal, Iqbal, Noushina, Masood, Asim and A-Khan, Nafees (2013) "Cadmium tolerance in Mustard cultivars: dependence on proline accumulation and nitrogen assimilation", Journal of Functional and Environmental Botany, No. 3 (1), pp. 30-42.

-Benyas, E, Dabbagh-Mohammadinassab, A and Oustan, S (2013) "Effects of cadmium on some morphological and physiological traits of Amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) and Oilseed rape (*Brassica napus* L.)", International Journal of Biosciences, No. 3 (4), pp. 17-26.

-Chen, X, Wang, J, Shi, Y, Zhao, M.Q and Chi G.Y (2011) "Effects of cadmium on growth and photosynthetic activities in Pakchoi and Mustard", Botanical Studies, No. 52, pp. 41-46.

- potential of screening in a model phytostabilisation study”, *Journal of Plant Soil*, No. 330, pp. 345-356.
- Saleem-Khan, Muhammad, Ahmad-Khan, Sajjad, Anwar-Sajad, Muhammad, Ali, Farooq, Ali, Hazrat, Muhammad-Khan, Wisal, Ali, Sajjad and Hussain, Fida (2014) “Phytoremediation of cadmium from effected soil using Maize plant (*Zea mays L.*)”, *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, No. 5 (2), pp. 1-8.
- Vijayaragavan, M, Prabhakar, C, Sureshkumar, J, Natarajan, A, Vijayarangan, P and Sharavanan, S (2011) “Toxic effect of cadmium on seed germination growth and biochemical content of Cowpea (*Vigna unguiculata L.*) plants”, *International Multidisciplinary Research Journal*, No. 1 (5), pp. 1-6.
- Wu, Fuzhong, Yang, Wanqin, Zhang, Jian and Zhou, Liqiang (2010) “Cadmium accumulation and growth responses of a Poplar (*Populus deltoids × Populus nigra*) in cadmium contaminated purple soil and alluvial soil”, *Journal of Hazardous Materials*, No. 177, pp. 268–273.
- Zafar, Sadia-Noureen and Javed, Farrukh (2016) “In vitro study of interactive effect of cadmium and salicylic acid on growth and biochemical parameters in Tetra and Hexaploid Wheat”, *International Journal of Agriculture and Biology*, No. 18 (4), pp. 671– 676.
- Zhi, Yuan, Deng, Zhaohui, Luo, Mingdan, Ding, Wei, Hu, Yaqin, Deng, Jianfang, Li, Yanyan, Zhao, Yanping, Zhang, Xuekun, Wu, Wenhua and Huang, Bangquan (2015) “Influence of heavy metals on seed germination and early seedling growth in *Eruca sativa Mill*”, *American Journal of Plant Sciences*, No. 6, pp. 582-590.
- Journal of Forestry Research*, No. 26 (3), pp. 663-671.
- Mala, J, Cvrckova, H, Machova, P, Dostal, J and Sima, P (2010) “Heavy metal accumulation by Willow clones in short time hydroponics”, *Journal of Forest Science*, No. 56 (1), pp. 28–34.
- Maria, S.D, Puschenreiter, M and Rivelli, A.R (2013) “Cadmium accumulation and physiological response of Sunflower plants to Cd during the vegetative growing cycle”, *Plant Soil Environ*, No. 59 (6), pp. 254–261.
- Minakshi, Dwivedi, Singh, A.K, Singh, V.P, Mishra, P.K and Singh, S.K (2012) “Studies on different concentration of lead (Pb) and cadmium (Cd) on growth and accumulation in different parts of Tulsi (*Ocimum tenuifolium L.*)”, *Interntional Journal of Environmental Sciences*, No. 2 (3), pp. 1733-1741.
- Moreira, H, Marques, A.P.G.C, Rangel, A.O.S.S and Castro, P.M.L (2011) “Heavy metal accumulation in plant species indigenous to a contaminated Portuguese site: prospects for phytoremediation”, *Water Air Soil Pollution*, No. 221 (14), pp. 377–389.
- Patil, Gunjan and Umadevi, M (2014) “Cadmium and lead effect on growth parameters of four Eucalyptus species”, *International Journal of Biosciences*, No. 5 (5), pp. 72-79.
- Regvar, Marjana, Matevz, Likar, Andrej, Piltaver, Nives, Kugonic and Jane, Smit (2010) “Fungal community structure under goat Willows (*Salix caprea L.*) growing at metal polluted site: the