

## جذب و اندوزش همزمان سدیم و سرب یا کادمیم توسط سه گیاه شورپسند در دو خاک آهکی

### شور-سدیمی و غیرشور-سدیمی

رقیه حمزه‌نژاد تقلیدآباد<sup>۱</sup> - حبیب خداوردی‌لو<sup>۲\*</sup> - شهرام منافی<sup>۳</sup> - سالار رضاپور<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۱

### چکیده

امروزه آلودگی محیط زیست توسط فلزات سنگین از مسائل مهم دنیا است که برطرف کردن آن نیازمند عملیات اصلاحی موثر می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی توانایی سه گیاه آتریپلکس [*Atriplex verucifera*]، سالیکورنیا [*Salicornia europaea*] و سلمه‌تره [*Chenopodium album*] برای جذب و اندوزش همزمان سدیم و کادمیم یا سرب در دو خاک آهکی با ویژگی‌های متفاوت بود. دو نمونه خاک آهکی، یکی شور-سدیمی (S<sub>۱</sub>) و دیگری غیرشور و غیرسدیمی (S<sub>۲</sub>) انتخاب گردیدند و غلظت‌های مختلف سرب (۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک) و کادمیم (۰، ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک) به خاک افزوده شدند. هر دو خاک هفت ماه تحت تیمار تر و خشک شدن قرار گرفتند. سپس بذور گیاهان ذکر شده در گلدان‌های حاوی خاک‌های آلوده در تیمارهای فوق و همچنین تیمارهای شاهد (بدون آلودگی سرب یا کادمیم) کشت گردیدند. پس از طی دوره رشد، عملکرد گیاهان و غلظت سرب، کادمیم و سدیم خاک و گیاه در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد. عملکرد نسبی سالیکورنیا در خاک S<sub>۱</sub> و آتریپلکس و سلمه‌تره در خاک S<sub>۲</sub> بالاترین بود. در خاک شور-سدیمی، اندوزش زیستی سدیم (BCF<sub>Na</sub>) برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در غلظت صفر (بدون آلودگی سربی و کادمیمی) به ترتیب ۶۷، ۲۰۲ و ۵۷ بود که مقدار بالای BCF<sub>Na</sub> برای سالیکورنیا بیانگر توانایی بالای این گیاه در جذب و اندوزش سدیم از خاک است. نتایج نشان داد که سالیکورنیا بالاترین اندوزش کادمیم و سالیکورنیا و آتریپلکس بالاترین انباشت سرب را تحت شرایط نامطلوب خاک‌های شور-سدیمی داشتند. در حالی که سلمه‌تره و آتریپلکس بردباری بالایی به کادمیم در خاک معمولی داشتند. این نتایج بیانگر این است که این گیاهان توانایی اصلاح خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم را دارند. در این پژوهش سالیکورنیا با کمترین کاهش عملکرد نسبی، بردبارترین گیاه نسبت به شوری و آلودگی سربی و کادمیمی شناخته شد و می‌توان از این گیاه برای پالایش همزمان سرب و کادمیم در خاک‌های شور-سدیمی حتی در غلظت‌های بالای کادمیم و سرب استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تجمع زیستی، سدیم (Na)، سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، گیاهان شورپسند

### مقدمه

(۱۲). نتیجه مستقیم انباشت فلزات سنگین در خاک، تهدید اکولوژیکی گیاهان و سایر جانداران در خاک‌های آلوده و در پی آن تهدید سلامت انسان از طریق ورود به زنجیره غذایی است (۳۵). بنابراین، آلودگی خاک به فلزات سنگین از نظر تخریب اکوسیستم‌های طبیعی و ایجاد سمیت برای انسان‌ها، حیوانات و گیاهان اهمیت دارد. برخی از خاک‌های مسئله‌دار<sup>۵</sup>، به‌طور همزمان هم سدیمی بوده و هم به سطوحی از فلزات سنگین آلوده‌اند. افزایش غلظت فلزات سنگین در محلول خاک همراه با افزایش قدرت یونی منجر به فرایندهای زیر می‌گردد: ۱- رقابت یونی برای مکان‌های تبادل در خاک به دلیل افزایش مقدار کاتیون الکترولیت؛ ۲- کاهش فعالیت

با گسترش سریع صنعت در دهه‌های اخیر و همچنین افزایش کشاورزی متمرکز در پاسخ به تقاضای جمعیت در حال رشد، استخراج معادن، تولید و دفع بیشتر زباله و فاضلاب، استفاده از لجن فاضلاب و پساب‌ها به عنوان منابعی جهت تغذیه و آبیاری گیاهان و غیره، منجر به ورود و انباشت فلزات سنگین سمی در خاک‌ها شده است. اغلب فلزات سنگین، بر خلاف آلاینده‌های آلی که به طریق بیولوژیکی یا شیمیایی تجزیه می‌شوند، مدت زمان طولانی در خاک اقامت می‌یابند

۴، ۳، ۲، ۱- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیاران گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(\*- نویسنده مسئول: (Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)

غربی نمونه برداری شدند و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها تعیین گردید. توزیع اندازه ذرات در خاک با روش هیدرومتری (۱۱)، کربنات کلسیم معادل با روش تیتراسیون (۲۴)، pH خاک در عصاره ۱:۱ خاک-آب مقطر توسط pH متر (۲۱)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با روش باور (۲۸)، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک (EC<sub>e</sub>) با استفاده از دستگاه هدایت سنج (۲۴)، کربن آلی با روش والکی و بلک (۲۴)، غلظت کل عناصر میکرو در خاک به روش اکسیداسیون با اسید نیتریک ۴ مولار (۳)، مجموع کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری (۵)، سدیم محلول در عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه فلم فتومتر (۵) و سدیم قابل تبادل (Na<sub>exch</sub>) با روش استات آمونیم یک نرمال در pH=7 (۱۶) تعیین گردید. درصد سدیم تبدالی (ESP) خاک نیز با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$ESP = \frac{Na_{exch}}{CEC} \times 100 \quad (1)$$

لازم به ذکر است که به دلیل پدیده دفع آنیونی در خاک‌های شور-سدیمی، تصحیح ESP با روش باور و هاتچر با استفاده از فرمول زیر انجام گرفت:

$$Na_{exch} = Na_t - \left( \frac{Cl_w}{Cl_e \times Na_{soil}} \right) \quad (2)$$

که در آن Na<sub>exch</sub>: مقدار سدیم تبدالی پس از تصحیح دفع آنیونی، Na<sub>t</sub>: سدیم محلول بعلاوه سدیم تبدالی، Na<sub>s</sub>: مقدار سدیم محلول خاک بر اساس غلظت در عصاره اشباع، Cl<sub>w</sub>: مقدار کلرید در توده محلول و فاز تبدالی و Cl<sub>e</sub>: مقدار کلرید محلول خاک (عصاره اشباع) می‌باشد. تمامی واحدها بر حسب cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> است.

در این مطالعه از گیاهان آتریپلکس [*Atriplex verucifera*]، سالیکورنیا [*Salicornia europaea*]، سلمه‌تره [*Chenopodium album*] که بردبار به شرایط سدیمی و شوری می‌باشند، برای پالایش سبز خاک‌های شور-سدیمی آلوده به سرب و کادمیم استفاده شد. خاک‌های مورد مطالعه با افزودن مقادیر مناسب نمک نیترات سرب (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) به غلظت‌های صفر، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک و نیترات کادمیم Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O به غلظت‌های صفر، ۱۰، ۳۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیم در کیلوگرم خاک آلوده شدند. سپس خاک با غلظت‌های یاد شده در ۳ تکرار در گلدان-های ۵ کیلوگرمی ریخته شد. خاک‌های آلوده هفت ماه در پنج دور تا رطوبت اشباع آبیاری و در هوای آزمایشگاه خشک شدند تا حد امکان برهم‌کنش‌های آلاینده و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی تر باشد. سپس، بذرها سالیکورنیا، آتریپلکس و سلمه‌تره در گلدان‌های مورد نظر کشت گردید. پس از جوانه زدن بذرها، بوته‌های سالم‌تر و قوی‌تر به تعداد پنج بوته در هر گلدان برای سالیکورنیا، چهار بوته برای آتریپلکس و هفت بوته برای سلمه‌تره تنک گردیدند. مقدار کافی از عناصر غذایی ضروری گیاه Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O، MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O

اولیه<sup>۱</sup> کاتیون‌های فلزی در محلول خاک و ۳- تشکیل جفت‌های یونی بدون بار و تشکیل کمپلکس با لیگاندهای آنیونی الکترولیت. حضور این لیگاندهای کمپلکس شده در محلول خاک عمدتاً تحرک فلزات را افزایش می‌دهد (۲۲). لیگاندهای معدنی معمول که با فلزات سنگین کمپلکس می‌شوند، SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>، Cl<sup>-</sup>، PO<sub>4</sub><sup>2-</sup> و NO<sub>3</sub><sup>-</sup> و CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> می‌باشند (۳۰). از میان این لیگاندها، کلراید تحرک بالایی داشته و عاملی مهم در توزیع فلزات سنگین در بین جایگاه‌های مختلف در خاک می‌باشد. بنابراین در بسیاری از مناطق خشک، آبیاری با آب شور حاوی سطوح بالای کلراید ممکن است مشکلات ناشی از آلودگی فلزات سنگین را شدت بخشد و با تشکیل کمپلکس‌های کلراید-فلزات سنگین منجر به افزایش تحرک فلزات سنگین شود (۹).

جذب فلزات توسط گیاهان شورپسند به تحرک و زیست‌فراهمی فلزات در خاک بستگی دارد که با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از جمله pH، شوری، پتانسیل اکسایش و کاهش، فراوانی مواد آلی و مقدار رس تعیین می‌شود (۲). حالیت و فراهمی کادمیم بستگی به ظرفیت تبادل کاتیونی و محتوای رس خاک دارد. خاکی با مقادیر بالای رس و CEC، ظرفیت جذب کادمیم بالایی دارد (۹). شوری نیز عاملی موثر در زیست‌فراهمی و گونه‌بندی<sup>۲</sup> فلزات در خاک، به ویژه برای فلزات با تحرک بالا مانند کادمیم به دلیل جانشینی فلزات از مکان‌های تبدالی به ماتریکس خاک توسط کاتیون‌های نمکی و تشکیل کمپلکس‌های کادمیم-کلرید می‌باشد (۱۹). برخی پژوهشگران دریافته‌اند که افزایش غلظت کلراید در خاک، زیست‌فراهمی کادمیم را به دلیل تشکیل کمپلکس پایدار Cl-Cd افزایش می‌دهد (۲۵).

کادمیم و سرب از جمله فلزات سنگینی هستند که از منابع گوناگون به زیست‌بوم، پیکره‌ی گیاه و نهایتاً به زنجیره‌ی غذایی انسان‌ها و حیوانات راه می‌یابند و خسارت‌هایی جدی به بار می‌آورند (۱).

هدف از این مطالعه بررسی جذب و اندوزش همزمان سدیم و کادمیم یا سرب توسط سه گیاه آتریپلکس [*Atriplex verucifera*]، سالیکورنیا [*Salicornia europaea*]، سلمه‌تره [*Chenopodium album*] در دو خاک با ویژگی‌های متفاوت و امکان‌سنجی استفاده از این گیاهان در اصلاح همزمان ESP و آلودگی سرب و کادمیم در خاک است.

## مواد و روش‌ها

دو نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتیمتری) از استان آذربایجان

1- Initial activity

2- Speciation

## نتایج و بحث

جدول ۱ رده‌بندی خاک‌ها و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول ۱ دو خاک از نظر درصد سدیم تبادلی و شوری کاملاً با هم متفاوت هستند. به طوری که خاک  $S_1$ ، خاکی شور-سدیمی است، در حالی که خاک  $S_2$  غیر شور و غیر سدیمی می‌باشد. همچنین مواد آلی، CEC و pH در خاک  $S_2$  بیشتر از خاک  $S_1$  است، حال آنکه خاک  $S_1$  کربنات کلسیم معادل بیشتری دارد. هر دو خاک به‌طور طبیعی حاوی مقداری کادمیم و سرب بودند که مقدار سرب در خاک  $S_2$  بیشتر از خاک  $S_1$  بود، در حالی که مقدار کادمیم در هر دو خاک یکسان بود.

جدول ۲ تاثیر همزمان کادمیم و شوری و سدیمی خاک بر شاخص ادغام یافته عملکرد نسبی گیاهان مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲- الف تولید ماده خشک آتریپلکس در خاک شور-سدیمی با سطوح غلظت صفر تا ۱۰ میلی-گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک ۲/۳ تا ۶ برابر بیشتر از ماده خشک تولیدی در خاک غیر شور-سدیمی در همان غلظت‌ها بود. هر چند عملکرد نسبی آتریپلکس در هر دو خاک به ۰/۱۵ درصد در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. همچنین تولید ماده خشک سالیکورنیا در تیمار شاهد خاک  $S_1$  (بدون آلودگی کادمیمی)، ۳/۴ برابر بیشتر از تیمار شاهد در خاک  $S_2$  بود. دلیل این امر را می‌توان به شورپسند بودن این گیاه و بردباری بالای سالیکورنیا به شوری نسبت داد. در حالی که در آلودگی‌های کادمیمی بالاتر از ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم تفاوت معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) در تولید ماده خشک سالیکورنیا در تیمارهای مشابه در بین دو خاک مشاهده نشد. در سطوح آلودگی صفر و ۱۰ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، ماده خشک سلمه‌تره در خاک  $S_2$ ، ۶ برابر بیشتر از خاک  $S_1$  بود. یاو و همکاران (۳۳) گزارش کردند که سلمه‌تره گیاهی بردبار به نمک است که عمدتاً در مناطق نیمه خشک با شوری کم رشد می‌کند. بنابراین زیست‌توده کم این گیاه در خاک  $S_1$  می‌تواند به دلیل تاثیر شوری بالای خاک روی رشد گیاه باشد. برای سلمه‌تره در غلظت ۳۰ میلی-گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، رشد ضعیف بود و گیاه چند روز پس از جوانه‌زنی در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در هر دو خاک از بین رفت. به‌طور کلی بردباری سالیکورنیا و آتریپلکس به کادمیم در خاک  $S_1$  بیشتر از سلمه‌تره بود. در این پژوهش سالیکورنیا، نسبت به سایر گیاهان مورد مطالعه، به عنوان بردبارترین گیاه نسبت به شوری شناخته شد.

کودو و همکاران (۱۵) در آزمایشی با کشت سالیکورنیا در سه نوع خاک شور، سدیمی و بسیار سدیمی دریافتند که بیشترین عملکرد سالیکورنیا در خاک سدیمی بود. در واقع گیاهان شورپسند Na را برای

$H_3BO_3$ ،  $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ ،  $FeEDTA$ ،  $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$  و  $(NH_4)_6MO_{24} \cdot 4H_2O$  و  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  و  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  برای جلوگیری از هر گونه تنش تغذیه‌ای به گلدان‌های مذکور افزوده گردید. همچنین، برای تصحیح اثر سایر عوامل (از جمله آبشویی احتمالی، تاثیر آب آبیاری و غیره) بر ESP خاک، گلدان‌هایی به عنوان شاهد برای هر تیمار تهیه گردید که گیاهی در آنها کشت نگردیده بود. تغییرات ESP خاک در این گلدان‌ها از مقادیر تغییرات ESP در گلدان‌های حاوی گیاهان کسر شد تا تاثیر خالص گیاهان در کاهش ESP خاک به دست آید.

چهار ماه پس از کاشت، بخش هوایی گیاهان برداشت شده و با آب مقطر شستشو داده شدند. سپس، نمونه‌ها در دمای ۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت خشک و آسیاب شدند. غلظت سدیم، کادمیم و سرب در گیاه با روش اکسیداسیون تر و غلظت کل کادمیم و سرب در خاک به روش اکسیداسیون با اسید نیتریک ۴ مولار و اندازه‌گیری با دستگاه جذب اتمی به دست آمد (۳). ESP خاک نیز پس از برداشت گیاهان اندازه‌گیری شد.

برای ارزیابی تاثیر توأمان تنش آلودگی سرب یا کادمیم خاک و تنش شوری-سدیمی بر رشد گیاهان از شاخص ادغام یافته عملکرد نسبی (RY) استفاده شد:

$$RY = \frac{Y_c}{Y_0} \times 100 \quad (3)$$

که در آن  $Y_c$ : عملکرد ماده خشک گیاه در سطح آلودگی  $c$  و  $Y_0$ : عملکرد ماده خشک گیاه در تیمار شاهد در خاک  $S_2$  است.

برای ارزیابی توانایی گیاهان در جذب سدیم خاک در هر سطح آلودگی خاک به کادمیم یا سرب، ضریب اندوزش زیستی سدیم ( $BCF_{Na}$ ) از تقسیم "غلظت سدیم کل در گیاه" به "غلظت سدیم کل (تبادلی + محلول) در خاک" بدست آمد. هر چه مقدار ضریب  $BCF_{Na}$  بیشتر از یک باشد، به معنای تجمع بیشتر سدیم خاک توسط گیاه است.

همچنین برای ارزیابی توانایی گیاهان در پالایش سطوح مختلف آلودگی سرب یا کادمیم و تاثیر شوری و سدیم خاک بر این توانایی، در هر سطح آلودگی خاک به کادمیم یا سرب ضریب اندوزش زیستی (BCF) از حاصل تقسیم "غلظت کل فلز در گیاه" به "غلظت کل فلز در خاک" تعیین شد. هرچه این ضریب بیشتر از یک باشد، به معنای تجمع بیشتر آلودگی خاک توسط گیاه است.

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار برای خاک، گیاه و غلظت فلز در خاک انجام شد. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون SNK در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

تنظیم فشار اسمزی در واکنش خود می‌اندوزند. سای کاجوت و همکاران (۲۹) در پژوهشی دریافته‌اند که اتریپلکس بردباری بالایی به شوری دارد و در شرایط شوری بالا (شوری ۵ تا ۱۰ گرم بر لیتر کلرید سدیم) رشد بهینه دارد.

جدول ۱- رده‌بندی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

خاک S <sub>2</sub>		خاک S <sub>1</sub>		رده‌بندی خاک
Typic Endaquepts		Typic Halaquepts		
۳۲/۳		۳۷/۶		(%) شن
۴۰/۳		۳۰		(%) سیلت
۲۷/۴		۳۲/۴		(%) رس
لوم		لوم رسی		کلاس بافتی خاک
۲/۶۹		۱/۸۶		(%) مواد آلی
۲۲/۱		۲۰/۸		CEC (cmol.kg <sup>-1</sup> )
۲/۵		۱۸/۱		EC <sub>e</sub> (dSm <sup>-1</sup> )
۳		۴۲/۹		(%) ESP
۲/۱۹		۳۶/۸۶		SAR (mmol l <sup>-1/2</sup> )
۳۰/۵		۳۷		(%) CCE
۸/۱		۷/۶		pH
۲۱/۴۲		۱۰/۱۱		سرب کل (mg kg <sup>-1</sup> )
۱/۴۷		۱/۵۴		کادمیم کل (mg kg <sup>-1</sup> )
۲۹۵۰۵		۱۶۹۴۴		آهن کل (mg kg <sup>-1</sup> )
۶۲		۱۰۳		روی کل (mg kg <sup>-1</sup> )
۱۴/۱۱		۹/۲۹		مس کل (mg kg <sup>-1</sup> )
۱/۲		۲۳/۴	کلسیم	کاتیون‌های غالب در محلول خاک (mg l <sup>-1</sup> )
۰/۴		۵/۲	منیزیم	
۲۳/۸		۱۸۷/۰	سدیم	
۰/۰		۰/۰	پتاسیم	
۰/۸		۰/۰	کربنات	آنیون‌های غالب در محلول خاک (mg l <sup>-1</sup> )
۵/۶		۱/۴	بی‌کربنات	
۱۵/۲		۱۸۱/۰	کلر	
۳/۸		۳۳/۷	سولفات	

EC<sub>e</sub>: هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک؛ CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی؛ OM: مواد آلی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل؛ SAR: نسبت جذب سدیم و ESP: درصد سدیم قابل تبادل

جدول ۲- شاخص ادغام یافته عملکرد نسبی (Y<sub>c</sub>/Y<sub>0</sub>)<sup>§</sup> گیاهان اتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور- سدیمی (S<sub>1</sub>) و خاک غیر شور- سدیمی (S<sub>2</sub>)

الف) کادمیم						غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک (mg kg <sup>-1</sup> )
عملکرد نسبی گیاهان (%) <sup>§</sup>						
سلمه‌تره		سالیکورنیا		اتریپلکس		
خاک S <sub>2</sub>	خاک S <sub>1</sub>	خاک S <sub>2</sub>	خاک S <sub>1</sub>	خاک S <sub>2</sub>	خاک S <sub>1</sub>	
۱۰۰ <sup>a</sup>	۱۶ <sup>a</sup>	۱۰۰ <sup>a</sup>	۳۳۶ <sup>a</sup>	۱۰۰ <sup>a</sup>	۲۲۶ <sup>a</sup>	۰
۲۳ <sup>b</sup>	۵ <sup>b</sup>	۵۴ <sup>b</sup>	۶۰ <sup>b</sup>	۱۵ <sup>b</sup>	۸۹ <sup>b</sup>	۱۰
۱ <sup>c</sup>	۴ <sup>b</sup>	۴۳ <sup>c</sup>	۵۷ <sup>b</sup>	۱۵ <sup>c</sup>	۱۵ <sup>c</sup>	۳۰
n.g.	n.g.	۳۸ <sup>d</sup>	۳۳ <sup>c</sup>	n.g.	n.g. <sup>#</sup>	۱۰۰

(ب) سرب

عملکرد نسبی گیاهان (%) <sup>S</sup>						غلظت کل سرب افزوده شده به خاک (mg kg <sup>-1</sup> )
سلمه تره		سالیکورنیا		آتریپلکس		
خاک S <sub>2</sub>	خاک S <sub>1</sub>	خاک S <sub>2</sub>	خاک S <sub>1</sub>	خاک S <sub>2</sub>	خاک S <sub>1</sub>	
۱۰۰ <sup>a</sup>	۱۶ <sup>a</sup>	۱۰۰ <sup>a</sup>	۳۳۶ <sup>a</sup>	۱۰۰ <sup>a</sup>	۲۲۶ <sup>a</sup>	۰
۹۹ <sup>a</sup>	۱۲ <sup>b</sup>	۵۶ <sup>b</sup>	۲۶۰ <sup>b</sup>	۹۸ <sup>b</sup>	۱۶۱ <sup>b</sup>	۲۵۰
۸۵ <sup>a</sup>	۱۰ <sup>b</sup>	۴۳ <sup>b</sup>	۲۲۷ <sup>c</sup>	۹۹ <sup>b</sup>	۱۰۹ <sup>c</sup>	۵۰۰
۴۵ <sup>b</sup>	۷ <sup>b</sup>	۶ <sup>c</sup>	۲۲۳ <sup>c</sup>	۹۲ <sup>b</sup>	۹۱ <sup>c</sup>	۱۰۰۰

\$: نسبت درصد عملکرد ماده خشک گیاه در هر تیمار (Yc) به ماده خشک تیمار شاهد در خاک S<sub>2</sub> (Yo).

#: عدم رشد گیاه به دلیل سمیت کادمیم.

\*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.

کادمیم در غلظت کم (۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم) در خاک S<sub>1</sub> و در غلظت متوسط (۳۰ میلی گرم بر کیلوگرم) در خاک S<sub>2</sub> بود. گفتنی است که گیاهان آتریپلکس و سلمه تره در غلظت ۱۰۰ میلی گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک از بین رفتند. گوپتا و ساینها (۱۳) نشان دادند که سلمه تره توانایی اندوزش و پالایش مقادیر بالایی از فلزات (Ni، Cr، Pb و Cd) را در بخش های هوایی خود دارد. در سطوح کم آلودگی کادمیمی سلمه تره و آتریپلکس بالاترین انباشتگی کادمیم را به ترتیب در خاک S<sub>1</sub> و خاک S<sub>2</sub> داشتند. این نتایج بیانگر آن است که حداکثر پتانسیل گیاه برای جذب کادمیم به سطوح آلودگی خاک و همچنین نوع خاک بستگی دارد. در آزمایشی که توسط ندجیمیا و داود (۲۳) انجام گرفت، آتریپلکس بیشترین اندوزش کادمیم را در اندام های خود داشت که بیانگر توانایی آن در پالایش خاک های آلوده به کادمیم است، با این حال رشد ریشه و اندام های هوایی گیاه آتریپلکس با افزایش غلظت کادمیم در خاک کاهش معنی داری نشان داد. همچنین انباشت کادمیم در ریشه بیشتر از اندام های هوایی بود. علاوه بر این، کمترین انباشتگی کادمیم در غلظت ۳۰ میلی گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک در اندام های هوایی مربوط به آتریپلکس در خاک S<sub>1</sub> (۱۹ mg kg<sup>-1</sup>) و سالیکورنیا در خاک S<sub>2</sub> (۸ mg kg<sup>-1</sup>) بود. بسیاری از پژوهشگران گزارش کردند که کادمیم پس از انباشت در اندام های هوایی دوباره به ریشه برمی گردد (۸). غنایا و همکاران (۱۰) گزارش کردند که *Salicornia Europaea* و *Atriplex halimus* به ترتیب توانایی اندوزش ۲/۷-۱/۸ و ۷/۱ میکرومول کادمیم در هر گرم ماده خشک را در غلظت ۱۰۰ میکرومول کادمیم دارند.

با توجه به جدول ۳- ب آتریپلکس در خاک غیرشور- سدیمی سرب بالایی جذب کرد در حالی که در شرایط شور- سدیمی سالیکورنیا و سلمه تره بیشترین جذب سرب را در شاخ سارهای خود داشتند.

همچنین، با توجه به جدول ۲- ب تولید ماده خشک آتریپلکس در خاک شور- سدیمی با سطوح غلظت صفر و ۲۵۰ میلی گرم سرب بر کیلوگرم خاک، ۲/۵ برابر بیشتر از ماده خشک تولیدی در خاک غیرشور-سدیمی در همان غلظت ها بود. با این حال تفاوت معنی داری در تولید ماده خشک توسط آتریپلکس در آلودگی های بیشتر از ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم سرب بر کیلوگرم خاک در بین دو خاک مشاهده نشد. همچنین تولید ماده خشک سالیکورنیا در خاک S<sub>1</sub> بدون آلودگی کادمیمی، ۳/۵ برابر و در آلودگی های سربی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم، ۲/۵ برابر بیشتر از تیمارهای مشابه در خاک S<sub>2</sub> بود. ماده خشک سلمه تره در خاک S<sub>2</sub>، ۶ تا ۸ برابر بیشتر از خاک S<sub>1</sub> در همه تیمارها بود. افزون بر این، نرخ کاهش ماده خشک گیاه با افزایش غلظت های سرب تحت تاثیر نوع خاک بود. به گونه ای که در خاک شور- سدیمی عملکرد سلمه تره با افزایش غلظت سرب به شدت کاهش یافت در حالی که در خاک S<sub>2</sub> کاهش عملکردی چشم گیر با افزایش غلظت سرب مشاهده نشد. ماده خشک سالیکورنیا در خاک S<sub>1</sub> و آتریپلکس و سلمه تره در خاک S<sub>2</sub> بالا بود. این نتایج نشان داد که تاثیر آلودگی سربی بر رشد گیاه به طور گسترده به ویژگی های خاک و نوع گیاه بستگی دارد. در بین گیاهان مورد مطالعه، تنها سالیکورنیا در غلظت ۱۰۰ میلی گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک رشد کرد. سالیکورنیا با نرخ کاهش کم عملکرد، به عنوان بردبارترین گیاه نسبت به شوری و آلودگی سربی و کادمیمی در این پژوهش شناخته شد.

جدول ۳ روند تغییرات غلظت کادمیم و سرب در ماده ی خشک شاخ ساره گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه تره را در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی در دو خاک S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> نشان می دهد. با توجه به جدول ۳- الف آتریپلکس در خاک غیرشور- سدیمی کادمیم بالایی جذب کرد در حالی که در شرایط شور- سدیمی سالیکورنیا بیشترین جذب کادمیم را در شاخ سارهای خود داشت. در مورد سلمه تره جذب کادمیم در غلظت های مختلف کادمیم متفاوت بود. بیشترین جذب

جدول ۳- غلظت کادمیم و سرب در ماده‌ی خشک گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور- سدیمی (S<sub>۱</sub>) و خاک غیرشور- سدیمی (S<sub>۲</sub>)  
الف) کادمیم

غلظت کادمیم در ماده‌ی خشک شاخ‌ساره گیاهان (mg kg <sup>-1</sup> )						غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک (mg kg <sup>-1</sup> )
سلمه‌تره		سالیکورنیا		آتریپلکس		
خاک S <sub>۲</sub>	خاک S <sub>۱</sub>	خاک S <sub>۲</sub>	خاک S <sub>۱</sub>	خاک S <sub>۲</sub>	خاک S <sub>۱</sub>	
.	.	.	.	.	.	.
± ۸/۹ ۰/۳ <sup>a</sup>	۱۸/۹ ± ۰/۴ <sup>a</sup>	۸/۰ ± ۰/۱ <sup>a</sup>	۱۰/۲ ± ۱/۳ <sup>a</sup>	۳۹/۴ ± ۱۰/۷ <sup>a</sup>	۰/۵ ± ۰/۱ <sup>a</sup>	۱۰
۵۹/۵ ± ۱/۹ <sup>b</sup>	۳۲/۷ ± ۰ <sup>b</sup>	۸/۴ ± ۲/۰ <sup>a</sup>	۳۰/۳ ± ۷/۸ <sup>b</sup>	۴۶/۴ ± ۵/۸ <sup>a</sup>	۱۸/۹ ± ۱/۲ <sup>b</sup>	۳۰
n.g.	n.g.	۵۴/۰ ± ۰ <sup>b</sup>	۱۰۲/۸ ± ۳/۹ <sup>c</sup>	n.g.	n.g. <sup>#</sup>	۱۰۰

## ب) سرب

غلظت سرب در ماده‌ی خشک شاخ‌ساره گیاهان (mg kg <sup>-1</sup> )						غلظت کل سرب افزوده شده به خاک (mg kg <sup>-1</sup> )
سلمه‌تره		سالیکورنیا		آتریپلکس		
خاک S <sub>۲</sub>	خاک S <sub>۱</sub>	خاک S <sub>۲</sub>	خاک S <sub>۱</sub>	خاک S <sub>۲</sub>	خاک S <sub>۱</sub>	
.	.	.	.	.	.	.
۴/۹ ± ۲/۸ <sup>a</sup>	۲۹/۱ ± ۲۹/۹ <sup>a</sup>	۲۹/۹ ± ۴/۱ <sup>a</sup>	۲۱/۷ ± ۲/۸ <sup>a</sup>	۳۸/۰ ± ۸/۷ <sup>a</sup>	۱۳/۸ ± ۱/۱ <sup>a</sup>	۲۵۰
۳۴/۶ ± ۳/۵ <sup>b</sup>	۶۷/۵ ± ۳۰/۳ <sup>b</sup>	۳۲/۰ ± ۲/۳ <sup>b</sup>	۶۱/۹ ± ۲/۳ <sup>b</sup>	۵۴/۵ ± ۰/۶ <sup>b</sup>	۴۵/۰ ± ۲۴/۱ <sup>b</sup>	۵۰۰
۷۳/۷ ± ۲۸/۶ <sup>c</sup>	۸۵/۸ ± ۱۲/۱ <sup>c</sup>	۵۴/۲ ± ۵/۶ <sup>c</sup>	۷۹/۰ ± ۱/۷ <sup>c</sup>	۸۵/۹ ± ۵/۷ <sup>c</sup>	۶۸/۱ ± ۷/۳ <sup>c</sup>	۱۰۰۰

# عدم رشد گیاه به دلیل سمیت کادمیم

\$: غلظت کادمیم و سرب در تیمار شاهد به دلیل عدم قرائت توسط دستگاه جذب اتمی صفر در نظر گرفته شد.

\*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.

جدول ۳- ب با افزایش سطوح آلودگی سربی، اندوزش سرب در گیاهان افزایش یافت و هر سه گیاه بالاترین اندوزش سرب را در غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک داشتند. نتایج مشابه توسط مانوسکی و کالوجراکس (۱۹) گزارش شده است. این محققان در پژوهشی دریافتند که در گیاه *T. smyrnensis*، شوری کم تأثیر معنی‌داری بر جذب سرب توسط ریشه‌ها نداشت و در شوری‌های بالا، تجمع سرب کاهش یافت. در حالی که در برگ‌ها تأثیر شوری برعکس بود. گیاهان سرب بیشتری را در غلظت‌های بالای شوری نسبت به غلظت‌های کم آن اندوختند و علایم سمیت سرب تنها در تیمار شاهد غیر شور مشاهده شد (۱۹). مانوسکی و کالوجراکس (۱۸) گزارش کردند که افزایش شوری باعث افزایش جذب کادمیم توسط آتریپلکس گردید. شوری تأثیر مثبتی بر جذب کادمیم توسط گیاه داشت و این امر احتمالاً به دلیل زیست‌فراهمی فلزات در خاک ناشی از کاهش جذب کادمیم توسط ذرات خاک است. در حالی که در مورد سرب تأثیر آشکاری از حضور نمک بر انباشت سرب در بافت‌های گیاهی مشاهده نشد. زیرا سرب بر خلاف کادمیم که در خاک و در گیاه متحرک است، در pH های نرمال در خاک نامحلول بوده و همچنین انتقال سرب از ریشه به اندام‌های هوایی به دلیل پیوند آن به

ترتیب انباشت سرب در گیاهانی که در خاک غیرشور و غیرسدیمی (خاک S<sub>۲</sub>) رشد کرده بودند به صورت آتریپلکس < سلمه‌تره ≈ سالیکورنیا و در خاک شور- سدیمی (خاک S<sub>۱</sub>) به صورت سالیکورنیا ≈ سلمه‌تره < آتریپلکس بود. این نتایج بیانگر آن است که سالیکورنیا توانایی اندوزش بالای سرب را در شرایط شوری و سدیمی خاک و آتریپلکس در شرایط غیرشور- سدیمی دارد. ویکرم و همکاران (۳۱) پتانسیل آتریپلکس برای بهبود و پالایش سبز سلنیم از مناطق آلوده را ارزیابی کرده و آتریپلکس را به عنوان یکی از بهترین بیش‌اندوزهای سلنیم در خاک‌های شور معرفی کردند. افزایش شوری منجر به افزایش جذب کادمیم توسط گیاه *Tamarix smyrnensis* می‌شود (۲۰) که دلیل احتمالی این امر تحرک بالای فلزات در رسوب<sup>۱</sup> و یا جذب آب بیشتر (به دلیل افزایش انتقال) منجر به جریان<sup>۲</sup> بالای فلزات به درون گیاه باشد (۷). گیاهان سرب را در ریشه خود می‌اندوزند و مقادیر اندکی از آن را به شاخ‌سارها و قسمت‌های هوایی خود انتقال می‌دهند (۱۷ و ۳۶). با توجه به

1- Sediment

2- Flux

خاک  $S_1$  و آتریپلکس بیشترین و سالیکورنیا کمترین مقدار BCF را در خاک  $S_2$  داشتند. در حالی که آتریپلکس با مقادیر BCF برابر  $3/5-1/5$  و سلمه‌تره با مقادیر BCF برابر  $2-0/8$  در شرایط غیرشور- سدیمی و سالیکورنیا با مقادیر BCF حدود یک در خاک شور- سدیمی می‌تواند به عنوان بیش‌اندوز کادمیم باشد.

زیاد و همکاران (۳۴) اظهار داشتند که BCF شاخص مناسبی برای گروه‌بندی گیاهان بیش‌اندوز است. بر پایه مطالعات قلاب و عثمان (۹)، تحرک کادمیم در خاک‌های متاثر از نمک با افزایش شوری افزایش می‌یابد که دلیل این امر تشکیل کمپلکس کادمیم با کلر و افزایش تحرک‌پذیری و حلالیت کادمیم می‌باشد.

در مورد آتریپلکس و سلمه‌تره مقادیر BCF (به ترتیب  $1/5$  تا  $3/5$  و  $0/8$  تا  $2$ ) در خاک غیرشور- سدیمی با افزایش شوری افزایش یافت که به نظر می‌رسد دلیل این امر تشکیل کمپلکس کادمیم با کلر و افزایش تحرک‌پذیری کادمیم باشد. همچنین در گیاه سالیکورنیا مقادیر BCF در خاک شور- سدیمی با افزایش غلظت کادمیم تغییر محسوسی نداشت (جدول ۴- الف) که بیانگر توانایی سالیکورنیا در اندوزش کادمیم است. آتریپلکس پتانسیل چشمگیری برای اندوزش کادمیم در خاک غیرشور- سدیمی نشان داد. این نتایج نشان داد که این گیاهان می‌توانند برای پالایش خاک‌های آلوده به کادمیم استفاده شوند.

سطح ریشه و دیواره سلولی محدود است (۱۸). همچنین دلیل این امر را می‌توان به انتقال کم سرب از ریشه به شاخ‌ساره نسبت داد. ریشه‌ها مقادیر زیادی از سرب را نسبت به برگ‌ها می‌اندوزند (۳۲).

جدول ۴ مقادیر میانگین ضریب تغلیظ‌زیستی (BCF) را برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی در دو خاک  $S_1$  و  $S_2$  نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۴- الف برای آتریپلکس، مقادیر BCF در غلظت‌های  $10$  و  $30$  میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، به ترتیب  $0/04$  و  $0/60$  در خاک  $S_1$  و  $3/44$  و  $1/47$  در خاک  $S_2$  بود. برای همه غلظت‌های کادمیم، مقادیر BCF در آتریپلکس در خاک  $S_1$  تقریباً یکسان بود در حالی که در خاک  $S_2$  از  $0/3$  تا  $0/7$  متغیر بود. برای سلمه‌تره، مقادیر BCF در غلظت‌های  $10$  و  $30$  میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک، به ترتیب  $1/64$  و  $1/04$  در خاک  $S_1$  و  $0/77$  و  $1/89$  در خاک  $S_2$  بود. آتریپلکس تمایل بیشتری برای اندوزش کادمیم در خاک شور- سدیمی نشان داد. همان‌طور که در مورد غلظت فلز در گیاه بحث شد، حداکثر پتانسیل گیاه برای جذب کادمیم به سطوح آلودگی خاک و همچنین نوع خاک بستگی داشت. روند تغییرات BCF تا حدی مشابه روند تغییرات غلظت فلز در گیاه بود که در جدول ۳ مورد بحث قرار گرفت. با این حال تفاوت بین گیاهان در جدول ۳ در نظر گرفته نشد و با توجه به نتایج جدول ۴ اختلاف معنی‌داری بین سه گیاه در هر دو خاک وجود داشت. به‌طوری که سلمه‌تره بیشترین و آتریپلکس کمترین مقدار BCF را در

جدول ۴- مقادیر میانگین ضریب تغلیظ‌زیستی (BCF) برای اصلاح آلودگی کادمیمی و سربی برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور- سدیمی ( $S_1$ ) و خاک غیرشور- سدیمی ( $S_2$ ) (الف) کادمیم

BCF <sup>S</sup>						غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
سالمه‌تره		سالیکورنیا		آتریپلکس		
خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	
$0/77 \pm 0/03^a$	$1/64 \pm 0/04^a$	$0/69 \pm 0/01^a$	$0/88 \pm 0/13^a$	$3/44 \pm 1/07^a$	$0/04 \pm 0/01^a$	۱۰
$1/89 \pm 0/06^b$	$1/04 \pm 0/01^a$	$0/27 \pm 0/07^b$	$0/96 \pm 0/26^a$	$1/47 \pm 0/19^b$	$0/60 \pm 0/04^a$	۳۰
n.g.	n.g.	$0/53 \pm 0/01^c$	$1/01 \pm 0/04^a$	n.g.	n.g. <sup>#</sup>	۱۰۰

(ب) سرب

BCF <sup>S</sup>						غلظت کل سرب افزوده شده به خاک ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
سلمه‌تره		سالیکورنیا		آتریپلکس		
خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	
$0/02 \pm 0/01^a$	$0/11 \pm 0/13^a$	$0/11 \pm 0/03^a$	$0/09 \pm 0/01^a$	$0/14 \pm 0/03^a$	$0/05 \pm 0/01^a$	۲۵۰
$0/07 \pm 0/01^b$	$0/13 \pm 0/06^a$	$0/06 \pm 0/01^b$	$0/12 \pm 0/01^a$	$0/11 \pm 0/01^b$	$0/09 \pm 0/05^a$	۵۰۰
$0/07 \pm 0/03^b$	$0/08 \pm 0/04^a$	$0/05 \pm 0/01^b$	$0/08 \pm 0/01^a$	$0/08 \pm 0/01^b$	$0/07 \pm 0/01^a$	۱۰۰۰

S: نسبت کادمیم و سرب کل در ماده خشک گیاه ( $C_p$ ) در هر تیمار ( $Y_c$ ) به غلظت کل کادمیم و سرب در خاک ( $C_s$ )

# عدم رشد گیاه به دلیل سمیت کادمیم.

\*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.

نشان داد که این گیاه در پالایش سبز خاک با مقادیر بالای غلظت‌های کادمیم، سرب و روی موثر است. اوزاوا و همکاران (۲۶) بیان داشتند که سالیکورنیا توانایی اندوزش مقادیر بالایی از کادمیم نسبت به سایر بیش‌اندوزهای کادمیم دارد و سالیکورنیا را به عنوان گیاهی مناسب برای پالایش سبز خاک‌های شور آلوده به کادمیم معرفی کردند.

جدول ۵ مقادیر میانگین ضریب اندوزش زیستی ( $BCF_{Na}$ ) برای جذب سدیم خاک توسط گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک  $S_1$  و  $S_2$  را نشان می‌دهد. هرچه این ضریب بیشتر از یک باشد، به معنای اندوزش بیشتر سدیم خاک توسط گیاه است. با توجه به جدول ۵، سالیکورنیا در جذب سدیم خاک در هر دو خاک  $S_1$  و  $S_2$  و آتریپلکس در خاک غیر شور و غیرسدیمی ( $S_2$ ) در آلودگی سربی و کادمیمی تواناتر از سلمه‌تره هستند. با این حال در گیاه سالیکورنیا توانایی جذب سدیم در هر دو خاک  $S_1$  و  $S_2$  با افزایش سطوح آلودگی سربی و کادمیمی خاک کاهش یافت. مقادیر  $BCF_{Na}$  در خاک شور - سدیمی در گیاهان سالیکورنیا و آتریپلکس و سلمه‌تره با افزایش غلظت سرب و کادمیم کاهش یافت. با این حال مقادیر  $BCF_{Na}$  در آلودگی سربی و کادمیمی برای خاک غیرشور و غیرسدیمی ( $S_2$ ) و خاک شور - سدیمی برای هر سه گیاه روند افزایشی و کاهشی منظمی نداشت.

با توجه به جدول ۴- ب مقادیر BCF برای آتریپلکس در همه غلظت‌های سرب  $0.09 \leq$  بود در حالی که برای خاک  $S_2$  بین  $0.14 - 0.09$  بود که با افزایش غلظت سرب کاهش یافت. مقادیر BCF برای سالیکورنیا  $0.12 \leq$  بود و تفاوت معنی‌دار در هر دو خاک مشاهده شد که این اختلاف معنی‌دار در خاک  $S_1$  بیشتر از خاک  $S_2$  بود ( $p < 0.05$ ). برای سلمه‌تره، مقادیر BCF در غلظت‌های  $250$  و  $500$  میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک، به ترتیب  $0.11$  و  $0.13$  در خاک  $S_1$  و  $0.07$  و  $0.02$  در خاک  $S_2$  بود. به‌طور کلی BCF هر دو فلز توسط گیاهان مورد مطالعه در تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) با سایر تیمارها داشت. با این حال، مقدار BCF در بین غلظت‌های مختلف افزوده شده فلز به خاک تفاوت معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) نداشتند. سلمه‌تره تمایل نسبتاً بیشتری برای انباشت سرب در خاک شور - سدیمی نشان داد. هر چند با داشتن مقادیر BCF کمتر از  $0.15$ ، هیچ کدام از گیاهان مورد مطالعه توانایی بالایی در انباشت سرب نداشتند. بیشترین غلظت سرب در ماده خشک گیاه  $85/84 \text{ mg kg}^{-1}$  برای سلمه‌تره در خاک  $S_1$  و  $85/92 \text{ mg kg}^{-1}$  برای آتریپلکس در خاک  $S_2$  بود. نتایج مشابه توسط پوربسکا و استروسکا (۲۳) گزارش شده است. سای کاپوت و همکاران (۲۹) گزارش کردند که آتریپلکس فلزات سنگین را در ریشه انباشته و مقایسه اندکی از آن را به قسمت‌های بالایی گیاه انتقال می‌دهد. داده‌های به‌دست آمده از این آزمایش

جدول ۵- مقادیر میانگین ضریب اندوزش زیستی سدیم ( $BCF_{Na}$ ) توسط گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در سطوح مختلف آلودگی کادمیمی (الف) و سربی (ب) در دو خاک شور - سدیمی ( $S_1$ ) و خاک غیرشور - سدیمی ( $S_2$ )

الف) کادمیم						غلظت کل کادمیم افزوده شده به خاک ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
$BCF_{(Na)}^S$						
سلمه‌تره		سالیکورنیا		آتریپلکس		
خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	
$13 \pm 8/27^a$	$55 \pm 2/85^a$	$486 \pm 21^a$	$202 \pm 63^a$	$518 \pm 313^a$	$67 \pm 15^a$	۰
$69 \pm 10^b$	$22 \pm 16^b$	$892 \pm 107^b$	$85 \pm 13^b$	$411 \pm 484^b$	$60 \pm 3^a$	۱۰
$151 \pm 69^c$	$20 \pm 2/09^b$	$446 \pm 4/39^c$	$127 \pm 66^c$	$956 \pm 192^c$	$27 \pm 0.53^b$	۳۰
n.g.	n.g.	$193 \pm 266^d$	$148 \pm 44^c$	n.g.	n.g. #	۱۰۰

  

ب) سرب						غلظت کل سرب افزوده شده به خاک ( $\text{mg kg}^{-1}$ )
$BCF_{(Na)}^S$						
سلمه‌تره		سالیکورنیا		آتریپلکس		
خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	خاک $S_2$	خاک $S_1$	
$13 \pm 8/27^a$	$55 \pm 20^a$	$486 \pm 21^a$	$202 \pm 63^a$	$518 \pm 313^a$	$67 \pm 15^a$	۰
$25 \pm 13^b$	$25 \pm 17^b$	$651 \pm 45^b$	$202 \pm 63^a$	$636 \pm 87^b$	$66 \pm 33^a$	۲۵۰
$13 \pm 6/05^c$	$25 \pm 19^b$	$488 \pm 22^c$	$224 \pm 81^a$	$910 \pm 139^c$	$67 \pm 16^a$	۵۰۰
$26 \pm 8/16^d$	$10 \pm 4/34^c$	$390 \pm 256^d$	$178 \pm 27^b$	$532 \pm 59^d$	$80 \pm 0/44^b$	۱۰۰۰

§: نسبت سدیم کل در ماده خشک گیاه (Cp) در هر تیمار (Yc) به غلظت کل سدیم در خاک (Cs).

#: عدم رشد گیاه به دلیل سمیت کادمیم.

\*: در هر ستون، اعداد با حروف متفاوت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد دارند.



کادمیم یا سرب توسط سه گیاه آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره در دو خاک با ویژگی‌های متفاوت و امکان‌سنجی استفاده از این گیاهان در اصلاح همزمان ESP و آلودگی سربی و کادمیمی خاک انجام گرفت. سالیکورنیا بالاترین اندوزش کادمیم و سالیکورنیا و آتریپلکس بالاترین انباشت سرب را تحت شرایط نامطلوب خاک‌های شور-سدیمی داشتند. در حالی که سلمه‌تره و آتریپلکس بردباری بالایی به کادمیم در خاک معمولی داشتند. این نتایج بیانگر این است که این گیاهان توانایی اصلاح خاک‌های آلوده به سرب و کادمیم را دارند. سالیکورنیا در جذب سدیم خاک در هر دو خاک  $S_1$  و  $S_2$  و آتریپلکس در خاک غیر شور و غیرسدیمی ( $S_2$ ) در آلودگی سربی و کادمیمی توانا تر از سلمه‌تره بودند. در این پژوهش سالیکورنیا با کمترین کاهش عملکرد نسبی، بردبارترین گیاه نسبت به شوری و آلودگی سربی و کادمیمی شناخته شد و می‌توان از این گیاه برای پالایش همزمان سرب و کادمیم در خاک‌های شور-سدیمی حتی در غلظت‌های بالای کادمیم و سرب استفاده کرد.

در غلظت صفر (بدون آلودگی سربی و کادمیمی)، اندوزش زیستی سدیم ( $BCF_{Na}$ ) برای گیاهان آتریپلکس، سالیکورنیا و سلمه‌تره به ترتیب ۶۷، ۲۰۲ و ۵۷ در خاک شور-سدیمی بود که مقدار بالای  $BCF_{Na}$  برای سالیکورنیا بیانگر توانایی بالای این گیاه در جذب و اندوزش سدیم از خاک است. کریشناپیلای و سری‌رانجان (۱۴) در آزمایشی نشان دادند که آتریپلکس پتانسیل برداشت ۰/۲۵ کیلوگرم کلرید بر مترمربع خاک و ۰/۰۶ کیلوگرم سدیم بر مترمربع از خاک-های آلوده طی دوره ۱۵۰ روزه دارد. چیسسیک و همکاران (۶) در آزمایش مزرعه‌ای کاربرد آتریپلکس را برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی رس در ایتالیا اثبات کردند. همچنین براون و همکاران (۴) نشان دادند که آتریپلکس می‌تواند به عنوان یک صافی زیستی<sup>۱</sup> برای برداشت عناصر غذایی از خاک‌های شور استفاده شود.

## نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی جذب و اندوزش همزمان سدیم و

## منابع

- 1- Alloway B.J. 1990. Heavy metals in soils: Lead. Blackie and Glasgow. Ltd, London, Pp: 177-196.
- 2- Almeida C.M., Mucha A.P., and Vasconcelos M.T. 2004. Influence of the sea rush *Juncus maritimus* on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant. *Environ. Sci. Technol*, 38: 3112-3118.
- 3- Brooks R.R. 1999. Phytochemistry of hyperaccumulators. In: *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. University Press, Cambridge, pp: 261-289.
- 4- Brown J.J., Glen E.P., Fitzsimmons K.M., and Smith S. 1999. Halophytes for the treatment of saline aquaculture effluent. *Aquaculture*, 175: 255-268.
- 5- Chapman H.D., and Pratt P.F. 1978. *Methods of analysis for soils, plants and waters*. Division of agricultural sciences. University of California, USA.
- 6- Chisci G.C., Bazzoffi P., Pagliani M., Papini R., Pellegrini S., and Vignozzi N. 2001. Association of *Sulla* and *Atriplex* shrub for the physical improvement of clay soils and environmental protection in central Italy. *Agr. Ecosys and Environ*, 84: 45-53.
- 7- Fitzgerald E., Caffrey J., Nesaratnam S., and McLoughlin P. 2003. Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland. *Environ. Pollut*, 123: 67-74.
- 8- Gadapati W.R., and Macfie S.M. 2006. Phytochelatin are only partially correlated with Cd-stress in two species of *Brassica*. *Plant Sci*, 170: 471-480.
- 9- Ghallab A., and Usman A.R.A. 2007. Effect of Sodium Chloride-induced Salinity on Phyto-availability and Speciation of Cd in Soil Solution Water Air Soil Pollut, 185: 43-51.
- 10- Ghnaya T., Nouairi I., Slama I., Messedi D., Grignon C., Abdelly C., and Ghorbel M.H. 2005. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *J. Plant Physiol.*, 162: 1133-1140.
- 11- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. In: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis*, part 1. SSSA, pp: 383-411.
- 12- Guo G.L., Zhou Q.X., Koval P.V., and Belogolova G.A. 2006. Speciation distribution of Pb, Cu and in contaminated phaeozem in north-east China using single and sequential extraction procedures. *Aust J. Soil Res*, 44: 135-142.
- 13- Gupta A.K., and Sinha S. 2006. Phytoextraction capacity of the *Chenopodium Album L.* grown on soil amended with tannery sludge. *Bioresour. Tec*, 98: 442-446.
- 14- Krishnapillai M., and Sri Ranjan R. 2005. Evaluation the phytoremediation potential of *Atriplex Patula* on salt

- contaminated soil. The canadin soc. Eng. Agr. food, and biological systems, pp: 05-052.
- 15- Kudo N., Sugino T., Oka M., and Fujiyama H. 2010. Sodium tolerance of plants in relation to ionic balance and the absorption ability of microelements. *Soil Sci and Plant Nutrition*, 56: 225-233.
- 16- Lavkulich L.M. 1981. *Methods Manual*, Pedology Laboratory. Department of Soil Science, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.
- 17- Malone C., Koeppel D.E., and Miller R.J. 1974. Localization of lead accumulated by corn plants. *Plant Physiol*, 53: 388-394.
- 18- Manousaki E., and Kalogerakis N. 2009. Phytoextraction of Pb and Cd by the Mediterranean saltbush (*Atriplex halimus* L.): metal uptake in relation to salinity. *Environ Sci Pollut Res*. 16: 844-854.
- 19- Manousaki E., and Kalogerakis N. 2010. Halophytes Present New Opportunities in Phytoremediation of Heavy Metals and Saline Soils. *Ind. Eng. Chem. Res.*, xxx, XXXX: A-D.
- 20- 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.l Research*. 106: 326-332.
- 21- McLean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. In: Page, A. L. (ed): *Methods of soil analysis. Part2. Chemical and microbiological properties*. Madison, Wisconsin, USA, P: 199-224.
- 22- McLean J.E., and Bledsoe B.E. 1992. Behaviour of metals in soils. *Ground. Water. Issue. EPA*, 540: (S-92-0)18: 25.
- 23- Nedjimia B., and Daoud Y. 2008. Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *Schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake. *Flora*, 204: 316-324.
- 24- Nelson R.E., and Sommers L.E. 1982. Total carbon. Organic carbon and organic matter. In A. L. Page et al. (ed) *Methods of soil analysis. Part2. 2nd. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA*, Madison, WI, pp: 539-579.
- 25- Norvell W.A., Wu J., Hopkins D.G., and Welch R.M. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 64: 2162-2168.
- 26- Ozawa T., Miura M., Fukuda M., and Kakuta S. 2010. Cadmium Tolerance and Accumulation in a Halophyte *Salicornia europaea* as a New Candidate for Phytoremediation of Saline Soils. *Sci. Rep. Grad. Sch. Life. & Envi. Sci*, 60: 1-8.
- 27- Porebska G., and Ostrowska A. 1999. Heavy Metal Accumulation in Wild Plants: Implications for Phytoremediation. *Polish. J. Environ. Studies*, 8(6): 433-442.
- 28- Rhoads J.D. 1982. Cation exchange capacity. In A. L. Page et al. (ed) *Methods of soil analysis. Part2. 2nd. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA*, Madison, WI. P. 149-158.
- 29- Sai Kachout S., Leclerc J.C., Ben Mansoura A.M., Rejeb N., and Ouerghi Z. 2009. Effects of Heavy Metals on Growth and Bioaccumulation of the Annual Halophytes *Atriplex Hortensis* and *A. Rosea*. *J. Applied. Sci. Res*, 5(7): 746-756.
- 30- Scheffer F., and Schachtschabel P. 2002. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Auflage. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- 31- Vickerman D.B., Shannon M.C., Banuelos G.S., Grieve C.M., and Trumble J.T. 2002. Evaluation of *Atriplex* lines for selenium accumulation, salt tolerance and suitability for a key agricultural insect pest. *Environ. Pollut*, 120: 463-473.
- 32- Wozny A. 1995. Lead in Plant Cells, *Sorus*, Poland. 16-25.
- 33- Yao S., Lan H., and Zhang F. 2010. Variation of seed heteromorphism in *Chenopodium album* and the effect of salinity stress on the descendants. *Annals of Botany*, 105 (6): 1015-1025.
- 34- Zayed A., Gowthaman S., and Terry N. 1998. Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: I. Duckweed. *J. Environ. Qual.* 646 Odjegba and Fasidi, 27: 715-721.
- 35- Zhou Q.X., Kong F.X., and Zhu L. 2004. *Ecotoxicology* (in Chinese). Sci Press Beijing, China.
- 36- Zimdahl R.L., and Koeppel D.E. 1977. Lead in the Environment. National Sci. Foundation, Washington DC, pp: 99-104.

## Simultaneous Uptake and Accumulation of Sodium and Cadmium or Lead by Three Halophyte Plants in Two Calcareous Soils

R. Hamzenejad Taghlidabad<sup>1</sup> - H. Khodaverdiloo<sup>2\*</sup> - Sh. Manafi<sup>3</sup> - S. Rezapour<sup>4</sup>

Received:28-11-2010

Accepted:23-7-2011

### Abstract

Nowadays, environmental pollution by heavy metals is one of the most serious threats of the world which needs effective remediation actions. The aim of this study was to investigate the potential use of *Atriplex* [*Atriplex verucifera*], *Salicornia* [*Salicornia europaea*] and *Chenopodium Album* in simultaneous uptake and accumulation of Na and Cd or Pb in two calcareous soils with different properties. Two soils, including a saline-sodic-calcareous (S<sub>1</sub>) and a calcareous (S<sub>2</sub>) soil, were selected. Different concentrations of Pb (0, 250, 500 and 1000 mg Pb kg<sup>-1</sup> soil) and Cd (0, 10, 30 and 100 mg Cd kg<sup>-1</sup>) were then added to the soils. The contaminated soils were incubated under a wetting-drying moisture regime for nearly seven months. The plants seeds were grown in pots containing different treatments of polluted soils and in control treatment (no Cd and Pb contaminations). The plant yields and concentrations of Pb, Cd and Na in the soil and plant samples were measured. Results showed that relative yield of *Salicornia* was more in soil S<sub>1</sub>, whereas those of *Atriplex* and *Chenopodium Album* were more in soil S<sub>2</sub>. In saline- sodic soil, the values of Na bioconcentration factor (BCE<sub>Na</sub>) in control treatment were 67, 202 and 57 for *Atriplex*, *Salicornia* and *chenopodium album* respectively. The high value of BCE<sub>Na</sub> in *Salicornia* revealed the ability of this plant in absorption and accumulation of Na from soil. A considerable accumulation of soil Cd by *Salicornia* and Pb accumulation by *Atriplex* and *Salicornia* was observed under unsuitable conditions of the saline-sodic soil, whereas, *Atriplex* and *Chenopodium* had high capability for Cd in the soil S<sub>2</sub>. These results revealed that these plants could be used for remediation of Pb and Cd contaminated soils. In this study, *Salicornia* with lower rate of yield reduction had the highest tolerance to Cd-stress and it seems that one can use this plant for phytoremediation of Cd and Pb from saline- sodic soil even in high concentrations of Cd and Pb.

**Keywords:** Bioaccumulation, Sodium (Na), Lead (Pb), Cadmium (Cd), Halophyte plants

1,2,3,4- MSc Student and Assistant Professors, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Respectively

(\*-Corresponding Author Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)