تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد دوازدهم، شماره سوم، پائیز ۱۳۹۸
۹۷۳-۹۸۷
http://dx.doi.org/10.22077/escs.2019.1421.1310

تأثیر EDTA و آمونیوم مولیبدات بر افزایش کارایی زیست‌فراهمی و کاهش تنش سرب توسط ذرت

شیوا توحیدی[۱]، احمد غلامعلی‌زاده[۲*]، محمدرضا اصغری‌پور[۳]، هرمز نقوی[۴]
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم مهندسی خاک دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل
۲. دانشیار گروه علوم مهندسی خاک دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل
۳. دانشیار گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه زابل
۴. استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی کرمان

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۲۷

چکیده

ورود آلاینده‌های صنعتی به خاک باعث انباشته شدن بیش‌ازحد فلزات سنگین ازجمله سرب، کادمیم، مس و روی در خاک می‌گردد. یک روش برای پاک‌سازی فلزات سنگین از خاک گیاه‌پالایی است. افزودن عوامل کلات کننده می‌تواند راندمان جذب فلزات را توسط گیاه افزایش دهد. به‌منظور بررسی تأثیر آمونیوم مولیبدات و اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA) بر جذب سرب توسط گیاه ذرت، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل چهار سطح سرب (صفر (Pb0)، 150 (Pb1)، 300 (Pb2) و ۴۵۰ (Pb3) میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک از منبع کلرید سرب) و دو نوع عامل کلات کننده آمونیوم مولیبدات (غلظت مولیبدن ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) (A.M) و EDTA (یک گرم بر کیلوگرم خاک) (E) و شاهد بودند. نتایج نشان داد که سطوح مختلف سرب و نوع کلات‌ها اثر معنی‌داری (P<۰/۰۱) بر وزن خشک ریشه و اندام هوایی، غلظت نسبی و جذب کل سرب ریشه و اندام هوایی داشت. آمونیوم مولیبدات باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه و اندام هوایی شد. بیشترین غلظت سرب ریشه و اندام هوایی تحت تیمار EDTA در سطح ۴۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب به دست آمد. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه مقادیر سرب ریشه و اندام هوایی گیاه تحت تأثیر استفاده از آمونیوم مولیبدات و EDTA، نشان داد که آمونیوم مولیبدات در جذب سرب توانایی کمتری داشت درحالی‌که EDTA اثر بیشتری در افزایش تجمع این عنصر در گیاه ذرت نشان داد.

واژه‌های کلیدی: **آمونیوم مولیبدات، اتیلن دی آمین تترا استیک اسید، ذرت، سرب، گیاه‌پالایی**

مقدمه

وجود مقادیر زیاد فلزات سنگین در خاک، فعالیت‌های زیستی و حاصلخیزی خاک را کاهش داده و با جذب توسط رستنی‌ها، سلامتی موجودات زنده را تهدید می‌کند (Dinakar et al., 2008). در بین فلزات سنگین، سرب یکی از خطرسازترین فلزات است که به‌وسیله گیاهان جذب می‌شود (Cenkci et al., 2010). از طرفی تجمع بیش‌ازاندازه فلزات سنگین ازجمله سرب برای اکثر گیاهان سمیت ایجاد می‌کند و زمانی که یون‌های فلزات سنگین در سطوح بالا، در محیط وجود داشته باشند به مقدار زیادی توسط ریشه گیاه جذب‌شده و درنهایت به اندام‌های هوایی منتقل و در آنجا انباشته می‌شوند که این امر منجر به صدمات متابولیسمی و کاهش رشد می‌شود (Yan-De et al., 2007). حد آستانه آلودگی سرب در خاک ۱۵۰-۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش شده است (Cariny, 1995). مقدار کل سرب در خاک‌ها به‌طور متوسط ۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است درحالی‌که این مقدار در خاک‌های آلوده به سرب بیش از ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌رسد (Hutzinger, 1980). در گیاهان آثار سمیت سرب معمولاً در غلظت‌های بالاتر از ۳۰

* نگارنده پاسخگو: احمد غلامعلی زاده. پست الکترونیک: ahangar@uoz.ac.ir

میلی‌گرم در کیلوگرم در برگ ظاهر می‌شود (Hutzinger, 1980). سرب به دلیل توان جابجایی کم و رسوب‌پذیری بالا در محیط‌زیست بسیار زیان آفرین است (Garbisu and Alkorta, 2001). روش‌های مرسوم پاک‌سازی مناطق آلوده (مانند حفاری خاک و انباشتن، تبدیل به شیشه کردن، شستشوی با اسید و تبدیل به مواد جامد) عموماً هزینه زیادی دربرداشته و اغلب باعث تخریب ساختمان و مواد آلی خاک می‌شود (Komarek et al., 2007; Luo et al., 2005). برخی از گیاهان دارای مکانیسم‌های سازگار برای انباشت یا تحمل غلظت‌های بالای آلاینده‌ها در ریزوسفر خود هستند. استفاده از چنین گیاهانی برای پاک‌سازی آب، هوا و یا خاک‌های آلوده، گیاه‌پالایی نامیده می‌شود. گیاه‌پالایی یکی از مهم‌ترین روش‌ها و فناوری‌هایی است که طی دو دهه اخیر برای رفع مشکل آلودگی فلزات در کشورهای مختلف، توسعه یافته است که در آن از طریق کشت گیاهان مناسب جهت پاک‌سازی، جذب و خارج ساختن آلاینده‌ها از خاک اقدام می‌گردد (Jensen et al., 2009). واکنش شیمیایی فلزها در خاک یکی از مسائل اساسی در بحث گیاه‌پالایی فلزهای سنگین است به همین دلیل در گیاه‌پالایی به کمک ترکیبات شیمیایی و مواد آلی حلالیت عناصر آلاینده را افزایش داده و به این صورت راندمان پالایش عناصر آلاینده توسط گیاهان را بهبود می‌بخشند (Chorom and Alizadeh, 2009).

بیشتر گیاهان بیش‌انباشتگر به علت تولید زیست‌توده اندک و رشد کند، برای کاربرد در گیاه‌پالایی مناسب نیستند. در سال‌های اخیر استفاده از گیاهانی مانند ذرت، آفتاب‌گردان، خردل، جو و کلزا که دارای توانایی تولید زیست‌توده بالا می‌باشند، به همراه اقداماتی در جهت افزایش جذب فلزات سنگین توسط این گیاهان پیشنهاد شده است که جایگزین استفاده از بیش‌انباشتگرها می‌شوند. گیاهانی مانند ذرت و کلزا علاوه بر تولید زیست‌توده زیاد، غلظت‌های نسبتاً بالایی از فلزات سنگین را جذب و در اندام‌های خود ذخیره می‌کنند (Diagomanolin et al., 2004). ذرت محصول یک‌ساله‌ای است که دارای سرعت رشد بالا و تولید سیستم ریشه‌ای وسیع با بیومس زیاد است که می‌توان از آن در کشت‌های پی‌درپی استفاده کرد (Zhang et al., 2009). چنگ و همکاران (Cheng et al., 2015) گزارش کردند که ذرت در غلظت ۶۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب مقاومت بالایی به مقدار سرب نشان داد و نتایج گواه حداقل اثرات بر روی رشد و تولید بیومس گیاه است، به‌طوری‌که سالانه هر هکتار ذرت بیش از ۹۳/۴ تن ماده خشک تولید و بیش از ۷/۲ کیلوگرم سرب را از خاک خارج می‌کند (Cheng et al., 2015). خداوردی و همایی (Khodaverdi and Homai, 2008) گیاه‌پالایی در یک خاک آلوده به سرب را موردبررسی قرار دادند و گزارش کردند که با افزایش آلایندگی خاک به سرب گیاه‌پالایی سرب از خاک توسط گیاهان *Spinacia Oleracea* و *Barbarea verna* افزایش می‌یابد. موجیری (Mojiri, 2011) نیز در تحقیقی که بر روی گیاه‌پالایی از گیاه ذرت انجام داد به این نتیجه رسید که ذرت یک گیاه بیش انباشتگر مؤثر در گیاه-پالایی خاک‌های آلوده به سرب است. برونیتی و همکاران (Brunetti et al., 2011) نشان دادند که ظرفیت انباشتگری فلزات سنگین در گیاه ذرتی که در مکان‌های آلوده رشد کرده است، به‌طور معنی‌داری با ذرت‌های رشد یافته در گلخانه متفاوت است. طی تحقیقی گزارش گردید چغندر قرمز و هویج معمولی بیشترین نسبت غلظت سرب را در نسبت اندام هوایی/ریشه‌ها دارند (Sekara et al., 2005). در این تحقیق از گیاه ذرت به خاطر توانائی تولید بیومس بالا و تحمل غلظت بالای فلز سنگین در محلول خاک و قابلیت تجمع بالای فلز سنگین استفاده شد.

کلات‌ها مواد شیمیایی خاصی هستند که با داشتن جایگاه‌های پیوندی متعدد در ساختار خود، توانایی احاطه کردن عناصر را به‌صورت چنگالی داشته و بدین طریق باعث افزایش قابلیت جذب عنصر توسط گیاه می‌شوند. از انواع کلات‌ها در این حالت می‌توان به EDTA، HEEDTA، DTPA و EDDHA اشاره کرد (Bi et al., 2003). کاربرد خاکی عامل‌های کلات کننده‌ای همانند EDTA، غلظت فلزاتی همانند سرب را در گیاهان از طریق افزایش حلالیت فلز و انتقال آن از ریشه به ساقه‌ها افزایش می‌دهند (Meers et al., 2009).

محققان با بررسی تأثیر آمونیوم مولیبدات بر گیاه‌پالایی عناصر سمی خاک توسط گیاه یونجه به این نتایج دست یافتند که Cr و Zn با آمونیوم مولیبدات تشکیل رسوب داده ازاین‌جهت سمیت این عناصر در گیاه ناچیز است درحالی‌که Cu، Ni و Cd به شکل محلول درآمده‌اند. این محققین آمونیوم مولیبدات را به‌عنوان عاملی نیمه شیمیایی، نیمه استخراجی و آمفوتریک معرفی کردند. البته تاکنون از آمونیوم مولیبدات برای حذف فلزات سمی موجود در پساب، همانند Zn و Pb به شکل رسوب استفاده می‌شده است (Qu et al., 2011). آمونیوم مولیبدات اثر تحرک و عدم تحرک فلزات

سنگین سمی را در گیاه‌پالایی این فلزات در خاک نشان می‌دهد. همچنین آمونیوم مولیبدات پتانسیل بالقوه‌ای در توانایی رسوب Pb و Zn دارد و سمیت این فلزات را در گیاه کاهش می‌دهد. از طرفی آمونیوم مولیبدات توانایی کلات کنندگی و تشکیل بخش‌های محلول‌تر با Cd، Cu و Ni را هم دارد که این ویژگی قابلیت زیست‌فراهمی این فلزات را برای گیاه افزایش می‌دهد (Tharayil and Pillai, 2013). در این تحقیق برای اولین بار تأثیر آمونیوم مولیبدات را در خاک به‌عنوان ماده جدیدی برای حذف آلودگی خاک به سرب بررسی می‌شود؛ بنابراین با توجه به مطالب ذکرشده، هدف از انجام این آزمایش، مطالعه اثر آمونیوم مولیبدات بر افزایش زیست‌فراهمی سرب در گیاه ذرت و مقایسه آن با EDTA برای حذف آلودگی آن از خاک است.

مواد و روش‌ها

خاک موردنیاز از خاک با رده‌بندی Typic Haplocambid واقع در منطقه کرمان تهیه شد و پس از هوا خشک‌کردن خاک و عبور از الک ۲ میلی‌متری برای تجزیه اولیه خاک به آزمایشگاه منتقل شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ آورده شده است. بافت خاک به روش هیدرومتر بایوکاس (Bouyoucos, 1997)، pH نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه pH متر در گل اشباع (Thomas, 1996)، EC خاک در عصاره گل اشباع توسط دستگاه هدایت سنج الکتریکی (Rhoades, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی از روش چاپمن (Klute and Dirksen, 1986)، کربن آلی به روش والکی و بلک (Walkley and Black, 1934)، رطوبت ظرفیت مزرعه خاک توسط دستگاه صفحه فشاری (Topp et al., 1993)، نیتروژن کل به روش کجلدال (Page et al., 1982)، فسفر قابل‌استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1954)، پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم (Helmke and Sparks, 1996) توسط دستگاه فلیم‌فتومتر و سرب قابل‌استخراج توسط DTPA-TEA از روش لیندزی و نورول (Lindsay and Norwell, 1978) استفاده شد.

جدول ۱. بعضی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در سال ۱۳۹۱

Table1. Some of the physical and chemical characteristics of the tested soil in 2012

هدایت الکتریکی EC	اسیدیته pH	ظرفیت زراعی FC	کربن آلی OC	ازت N	فسفر P	پتاسیم K	سرب Pb	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand
$dS.m^{-1}$		---------- % ----------		---------- $mg.kg^{-1}$ ----------				$cmol.kg^{-1}$	---------- % ----------		
3.1	7.7	12.48	0.58	0.06	26	190	1.607	12.48	14	28	58

آزمایش در گلخانه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان در قالب طرح کامل تصادفی با آرایش فاکتوریل و با سه تکرار اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل ۴ سطح سرب شامل صفر (Pb0)، ۱۵۰ (Pb1)، ۳۰۰ (Pb2) و ۴۵۰ (Pb3) میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک (از منبع کلرید سرب)، و دو نوع کلات آمونیوم مولیبدات (غلظت مولیبدن ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (A.M) و EDTA (یک گرم بر کیلوگرم خاک) (E) (Qu et al., 2016; Tariq and Ashraf, 2016) و شاهد با سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش به خاک اعمال شد. پس‌ازآن بذر گیاه ذرت (*Zea mays* L.) (رقم سینگل کراس ۷۰۴) در خاک‌های آلوده‌شده به تیمارهای آزمایش کشت گردید. جهت آلوده‌سازی نمونه‌های خاک ابتدا از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و سپس در واحدهای ۱۵ کیلوگرمی توزین و روی نایلون‌های پلاستیکی ریخته و کودهای عناصر پرمصرف موردنیاز گیاه ذرت (نیتروژن، فسفر، پتاسیم) بر اساس آزمون خاک به نمونه‌ها افزوده شد. مقادیر موردنیاز سرب، EDTA و آمونیوم مولیبدات نیز به روش افشانه به خاک‌ها افزوده شدند. هر نمونه پس از اعمال تیمارها کاملاً مخلوط شده و در نایلون‌های مخصوص ریخته شدند. برای اینکه شرایط آلودگی خاک به عناصر سنگین تا حدی شبیه شرایط طبیعی موجود در زمین‌های آلوده گردد، نمونه‌های تیمار شده تا حد رطوبت ظرفیت مزرعه مرطوب شده و نمونه‌های خاک به مدت ۱۰ روز در رطوبت ظرفیت زراعی نگهداری شد (Fatahi Kiasari et al., 2010). پس‌ازاین مدت نمونه‌ها هوا خشک و پس از کوبیدن به مقدار ۵ کیلوگرم در گلدان‌ها ریخته شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌های خاک، تعداد ۸ عدد از بذر گیاه در گلدان‌ها کشت شد و گیاهچه‌های جوان پس از ۱۰ روز به

۳ عدد در گلدان تنک شدند. در طی مراحل داشت که به مدت ۶۰ روز به طول انجامید مقدار رطوبت گلدان‌ها در حد رطوبت ظرفیت مزرعه ثابت نگه‌داشته شد. پس‌ازاین مدت، اندام هوایی گیاهان از سطح خاک بریده شد و ریشه گیاهان جمع‌آوری شد. نمونه‌های گیاهی پس از شستشو در آب مقطر، به آزمایشگاه منتقل و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک‌شده و پس از توزین، آسیاب شد. نمونه‌های گیاهی در کوره الکتریکی در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شدند. هضم نمونه‌های گیاهی توسط روش هضم خشک صورت گرفت (Cottenie, 1980) و مقدار سرب موجود در اندام هوایی و ریشه گیاه توسط دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی (Shimadzu-AA670) اندازه‌گیری شد. نمونه‌های خاک نیز پس از برداشت اندام هوایی و قبل از برداشت ریشه گیاهان، برداشت‌شده و پس از هوا خشک شدن برای تجزیه بعدی به آزمایشگاه انتقال یافتند. پارامترهای نظیر وزن خشک اندام هوایی و ریشه ذرت، غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه ذرت، جذب سرب در اندام هوایی و ریشه ذرت (شامل حاصل‌ضرب ماده خشک تولیدی در غلظت عنصر در اندام گیاهی) و اندازه‌گیری فراهمی سرب در خاک به روش DTPA انجام شد. تحلیل‌های آماری توسط نرم‌افزار SAS انجام و اشکال توسط نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

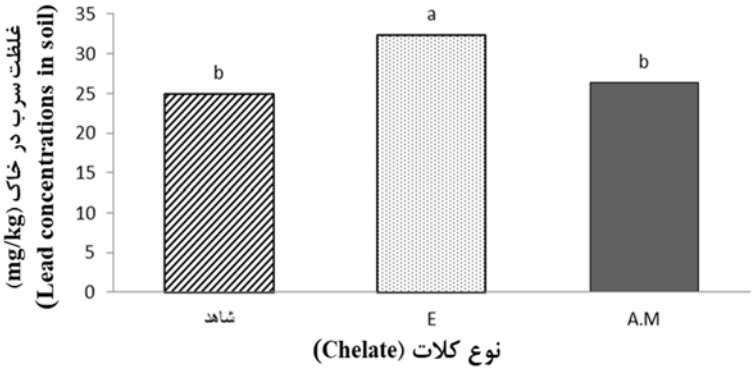
نتایج و بحث

سرب قابل‌استخراج با عصاره‌گیر DTPA- TEA

وجود پیوندهای آلی- فلزی در ترکیب کلات و فلزات سبب می‌شود فلزات کمتر در معرض کلوئیدها و هیدروکسیدها و اکسیدها قرارگرفته، لذا مانع از رسوب و تثبیت آن‌ها در خاک می‌شود. از طرفی کلات‌ها توسط ریشه گیاهان قابل‌جذب بوده، می‌توانند فلزات را از فاز جامد و غیرمحلول به فازهای تبادلی انتقال داده و درنهایت میزان جذب فلزات توسط گیاهان را افزایش دهند (Fatahi Kiasari et al., 2010). همان‌گونه در شکل ۱ مشاهده می‌شود بیشترین مقدار سرب فراهم خاک (قابل‌استخراج با DTPA) مربوط به تیمار EDTAاست که ۲۹/۵ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود. کمترین میزان سرب فراهم خاک مربوط به تیمار شاهد بود. هرچند تیمار آمونیوم مولیبدات نسبت به شاهد ۵/۵ درصد افزایش را نشان داد اما ازنظر آماری نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. EDTA نسبت به آمونیوم مولیبدات مقدار سرب فراهم را به‌طور متوسط ۲۲ درصد افزایش داد. درواقع می‌توان گفت که EDTA نسبت به آمونیوم مولیبدات در افزایش سرب محلول تأثیر بیشتری داشت. دلیل آن را می‌توان به وجود کمپلکس‌های قوی و پایدار میان EDTA و سرب (Sillen and Martell, 1964)، پتانسیل تحرک بالای کمپلکس‌های Pb-EDTA در خاک (Luo et al., 2005) و مقاومت بالای EDTA نسبت به تجزیه در خاک دانست (Evangelou et al., 2007). این عوامل کمپلکس کننده شامل سه گروه آمینوکربوکسیلیک اسیدهای سنتزی، طبیعی و اسیدهای آلی با وزن مولکولی پایین می‌باشند. لازم به ذکر است تحت شرایط طبیعی بیشتر فلزات، در خاک دارای تحرک کمی بوده و قابلیت استفاده آن‌ها برای گیاه کم است. بنابراین استفاده از موادی مانند کلات کننده در خاک به میزان چشمگیری قابلیت استفاده فلز را افزایش داده و درنتیجه تجمع فلزات را توسط گیاهان تا حد زیادی افزایش می‌دهد (Angelova et al., 2004).

سرب یکی از کم‌تحرک‌ترین فلزات است (Alloway, 1995). بااین‌وجود محققین نیز بیان کردند که کاربرد EDTA باعث افزایش معنی‌داری در تحرک فلز سرب در خاک می‌شود (Gabos et al., 2009). در یک مطالعه برای تعیین توزیع سرب در بخش‌های مختلف خاک گزارش شد که بیشتر سرب موجود در خاک در بخش باقیمانده و پس‌ازآن در بخش هیدروکسید آهن و منگنز قرار دارد، اما افزودن کلات‌ها به خاک خصوصاً EDTA باعث می‌شود مقدار سرب در بخش هیدروکسیدهای آهن و منگنز و کربنات آن کاسته شده و به بخش قابل‌تبادل آن‌ها افزوده شود (Shen et al., 2002). نتایج برخی تحقیقات نیز تأکید بر نقش مهم EDTA نسبت به NTA در قابل‌دسترس نمودن سرب برای گیاه داد. پژوهش‌ها نشان داده است که EDTA، غلظت سرب و کادمیم محلول در خاک را به ترتیب ۴۹۶ و ۱۱۴ برابر افزایش می‌دهد (Evangelou et al., 2007). در آزمایشی اثر EDTA بر بخش‌های مختلف خاک به روش عصاره‌گیری متوالی بررسی گردید و چنین بیان گردید که با افزایش EDTA به خاک سبب انحلال سرب قابل‌تبادل از روی سطوح ذرات خاک و رسوب آن توسط کربنات‌ها می‌شود (Kirkham, 2000). تحقیقات نشان داد که DTPA و EDTA، غلظت سرب و کادمیم عصاره‌گیری شده را در خاک افزایش می‌دهند و کاربرد سطوح زیاد ترکیبات کلات کننده، زیست‌فراهمی عناصر سنگین در خاک را نسبت به خاک شاهد، ۱۶ برابر افزایش می‌دهد (Brown et al., 1994).

گزارش شده است که کلات کننده‌های سنتزی مانند DTPA و EDTA، در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به عناصر کادمیم، سرب و روی، مؤثرتر از کلات‌های آلی مثل اسید اگزالیک و اسیدسیتریک می‌باشند (Luo and Shen, 2006). بابائیان و همایی (Babaeian and Homaee, 2011) نشان دادند که با افزایش غلظت سرب در خاک و در حضور NTA و EDTA غلظت سرب محلول در خاک به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا می‌کند، درحالی‌که در عدم حضور این دو، غلظت سرب محلول خاک بسیار اندک است. این محققین دلیل آن را این‌گونه بیان کردند که در عدم حضور آمینو پلی کربوسیلیک اسید بخش اعظم سرب به‌صورت اشکال غیرمحلول در خاک تبدیل می‌شود، بنابراین دسترسی گیاه به آن کاهش پیدا می‌کند (Babaeian and Homaee, 2011).



شکل ۱. اثر کاربرد کلات‌های EDTA (E) و آمونیوم مولیبدات (AM) بر غلظت سرب قابل‌دسترس در خاک توسط عصاره‌گیر DTPA-TEA پس از برداشت گیاه.

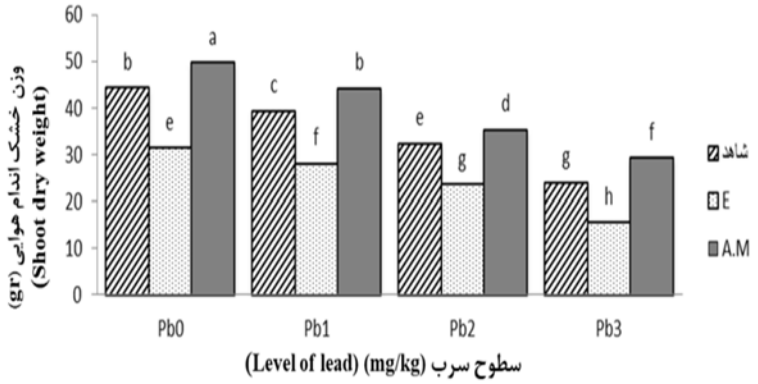
Fig. 1. Effect of EDTA (E) and ammonium molybdate (AM) chelates applications on available lead concentrations in soil by DTPA-TEA extractor after plant harvesting.

تأثیر سطوح مختلف سرب و کلات بر وزن خشک اندام هوایی

نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی ذرت مربوط به تیمار بدون سرب (Pb0) بود. کمترین وزن خشک گیاه ذرت مربوط به تیمار ۴۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود. کلات EDTA و آمونیوم مولیبدات بر روی رشد گیاه ذرت تأثیرگذار بودند. در تیمار بدون سرب، کلات آمونیوم مولیبدات تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی داشته است. کیو و همکاران (Qu et al., 2011). تأثیر آمونیوم مولیبدات را بر روی گیاه‌پالایی عناصر سمی در خاک توسط گیاه یونجه بررسی و مشاهده کردند که آمونیوم مولیبدات بیومس گیاهی را افزایش می‌دهد چون نیتروژن و مولیبدن عنصر غذایی ضروری گیاه هستند که می‌توانند سبب تقویت عملکرد گیاه گردند. در همه سطوح تیمار سرب، بیشترین وزن خشک اندام هوایی گیاه ذرت مربوط به تیمار آمونیوم مولیبدات و کمترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به تیمار EDTA بود. کلاتEDTA تأثیر بیشتری بر ظهور علامت سمیت بر روی گیاه نشان داد؛ به‌عبارت‌دیگر آمونیوم مولیبدات اثر افزایشی وEDTA اثر کاهشی بر وزن خشک اندام هوایی گیاه داشته است. در شکل ۲ مشاهده می‌شود کمترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار بدون سرب (Pb0) مربوط به EDTA بوده است. تقریباً همین روند در کل سطوح مختلف سرب در خاک مشاهده می‌شود. بیشترین کاهش وزن خشک اندام هوایی مربوط به تیمار EDTA، در سطح ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب است که حدود ۳۴/۳۵ درصد نسبت به شاهد کمتر بود. نتایج نشان داد اگرچه با افزایش سطح سرب در تیمار EDTA وزن خشک اندام هوایی کاهش یافت، اما تیمار آمونیوم مولیبدات باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی در همان تیمار مربوط به سرب شد. به‌طوری‌که آمونیوم مولیبدات در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، ۱۲/۱۳ درصد، ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، ۹/۲۲ درصد و ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، ۲۴/۹۰

درصد نسبت به شاهد وزن خشک اندام هوایی را افزایش داد. با توجه به نتایج حاصل، کاهش رشد یکی از اثرات اولیه غلظت‌های سمی فلز سنگین سرب بر گیاهان است به‌عبارت‌دیگر سمیت سرب در گیاهان، باعث شده که رشد گیاه کاهش یابد؛ که وجود کلات EDTA به دلیل فراهمی و حلالیت خوب آن برای سرب در خاک و انتقال این فلز به گیاه در افزایش سمیت و کاهش رشد گیاه تأثیر به سزایی داشته است. گزارش کاهش زیست‌توده اندام هوایی گیاهانی ازجمله کلم، لوبیا و گندم توسط ۳ میلی‌مولEDTA و همچنین کاهش در زیست‌توده آفتابگردان و جو در اثر افزایش مقدار ۱/۵ میلی‌مول ازEDTA به یک کیلوگرم خاک می‌تواند گویای این مطلب باشد که این کلات در ایجاد سمیت و کاهش عملکرد در گیاه نقش دارد (Shen et al., 2002). همچنین گزارش گردیده است که کاربرد ۶۴۰۰ میلی‌گرم سرب در کیلوگرم خاک موجب کاهش وزن خشک گیاه ذرت می‌شود (Ramazani and Ghasemi, 2011) در تحقیقی که بر روی گیاه‌پالایی گیاه ذرت انجام شد محققان گزارش کردند که با افزایش غلظت سرب رشد گیاه و بیومس آن کاهش می‌یابد و سالانه، با کشت هر یک هکتار ذرت حداکثر ۹۳/۴ تن ماده خشک تولید می‌شود که حداکثر ۷/۲ کیلوگرم سرب را از خاک خارج می‌کند (Cheng et al., 2015).

سرب با ممانعت از انجام فتوسنتز و تنفس و همچنین کاهش جذب مواد غذایی به‌وسیله گیاه سبب کاهش بیومس و رشد آن می‌شود (Ramazani and Ghasemi, 2011). سرب دارای سمیت زیادی برای گیاهان است و در بازدارندگی فتوسنتز و تنفس به‌وسیلهٔ تأثیر بر مکانیسم‌های انتقال الکترون نقش دارد. این عنصر حتی به مقدار کم نیز می‌تواند روی تنفس میتوکندریایی مؤثر باشد. تحمل به سرب در گیاهان آوندی گزارش شده، به نظر می‌رسد با اختلال در ویژگی‌های غشایی مانند ترکیب‌های دیواره سلولی به‌وسیلهٔ اسیدپکتیک و تشکیل پیرواورتوفسفات‌های غیرفعال سرب در ارتباط باشد (Orcut and Nilsen, 2000). پژوهشگران در مطالعه‌ای بیان کردند که رشد ریشه و اندام هوایی گیاه تحت تأثیر اثرات منفی غلظت‌های بالای سرب قرار می‌گیرد. به عبارتی با افزایش غلظت سرب در خاک، رشد ریشه و اندام هوایی کاهش می‌یابد (Jadia and Fulekar, 2008). در مطالعه‌ای دیگر که اثر EDTA بر جذب فلزات سنگین توسط گیاه آفتابگردان موردبررسی قرار گرفت محققان مشاهده کردند که EDTA در کاهش رشد بیومس (ریشه و اندام هوایی) این گیاه مؤثر است (Turgut et al., 2004).

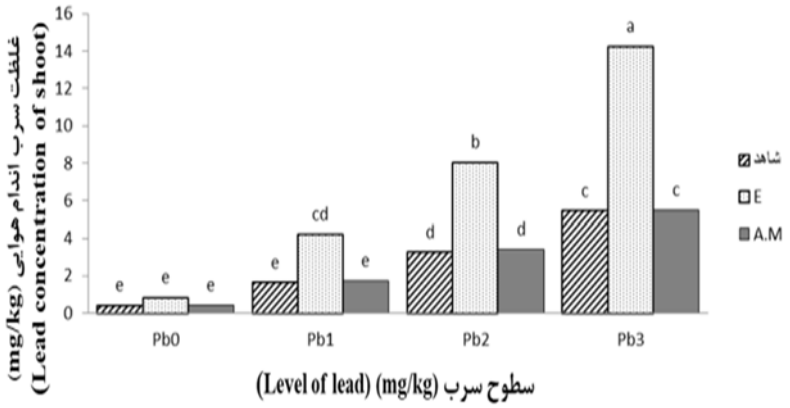


شکل ۲. اثر کاربرد کلات‌های EDTA (E) و آمونیوم مولیبدات (AM) و سطوح مختلف سرب بر وزن خشک اندام هوایی.
Fig. 2. Effect of EDTA (E) and ammonium molybdate (AM) chelates application and different level of Lead on shoots dry weight.

تأثیر سطوح مختلف سرب و کلات بر غلظت نسبی و جذب سرب اندام هوایی

نتایج حاصل از اثرات متقابل سطوح مختلف سرب و کلات در شکل ۳ نشان داد که در حضور و عدم حضور کلات‌ها، با افزایش سطح سرب در خاک، غلظت سرب در اندام هوایی نیز افزایش یافت. منتها این افزایش غلظت، در حضور کلات‌ها به‌مراتب بیشتر از عدم حضور آن‌ها بود. همچنین مشاهده شد که در هر سطحی از آلودگی کاربرد EDTA باعث افزایش

معنی‌دار غلظت سرب در بخش هوایی گردید (شکل ۳). در تیمار بدون سرب (Pb0)، هرچند کلاتEDTA غلظت سرب اندام هوایی را نسبت به شاهد افزایش داد اما ازنظر آماری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد؛ اما با افزایش سطوح سرب، میزان تأثیرگذاری EDTA بر غلظت سرب اندام هوایی بیشتر شد EDTA .به ترتیب در سطوح ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، نسبت به شاهد ۲/۵۰، ۲/۴۰ و ۲/۶۱ برابر، غلظت سرب در اندام هوایی را افزایش داد. بیشترین افزایش غلظت سرب اندام هوایی مربوط به تیمار EDTA، در سطح ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب بود. افزودن آمونیوم مولیبدات در مقایسه با تیمار شاهد، افزایش معنی‌داری بر غلظت سرب در اندام هوایی ذرت نشان نداد. تقریباً همین روند در کل سطوح مختلف سرب در خاک مشاهده شد.



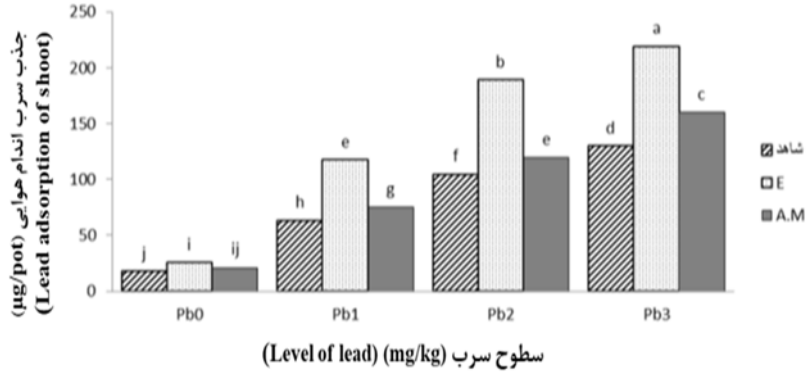
شکل ۳. غلظت سرب در اندام هوایی گیاه ذرت پس از تیمار با دو کلات EDTA (E) و (AM) آمونیوم مولیبدات.

Fig. 3. Lead concentration in shoots of corn plant after treatment with two chelates, EDTA (E) and ammonium molybdate (AM).

در عدم حضور کلات، غلظت اندک سرب در اندام هوایی می‌تواند به دلیل پیوند سرب با مکان‌های تبادلی دیواره سلولی آوند چوب و نیز رسوب به‌صورت کربنات‌های سرب بر روی آن باشد (Dushencov et al., 1995). طبق گزارش ارائه‌شده HEDTA و EDTA می‌توانند غلظت سرب موجود در اندام هوایی را تا ۱۰۰ برابر بیشتر از مقدار آن در گیاهان شاهد افزایش دهند (Huang and Cunningham, 1996). با به‌کارگیری عوامل کلات کننده، دسترسی گیاهان به فلزات سنگین بیشتر شده و درنتیجه جمع و انتقال آن‌ها در گیاه نیز بیشتر می‌شود. در یک بررسی اثر عوامل کلات کننده بر روی نمونه‌های مخلوط (Ni، Pb، Zn، Cu) در خاک مشخص گردید که EDTA نه‌تنها برافزایش قابلیت انحلال و جذب سرب و کادمیم در گیاهان مؤثر بوده بلکه می‌تواند بر روی قابلیت دسترسی سایر عناصر سنگین در خاک و گیاهان نیز اثرگذار باشند (Turgut et al., 2004). طبق بررسی‌های انجام‌شده توسط بنا عراقی و هودجی (Bana Araghi and Houdji, 2010)، کاربرد EDTA و EDDS غلظت فلزات سنگین را در مقایسه با شاهد به‌طور معنی‌داری در اندام هوایی گیاه ذرت افزایش داد. همچنین طی یک مطالعه اثر EDTA و اسیدسولفوریک برجذب سرب در گیاه ذرت، آفتابگردان و پنبه بررسی و نتیجه شد که افزایش EDTA به خاک باعث افزایش فراهمی عنصر سنگین سرب در خاک شد، حال آن‌که اسیدسولفوریک دارای قابلیت اندکی در افزایش مقدار فراهم‌شده عنصر و درنهایت مقدار عنصر جذب‌شده توسط گیاه داشت (Fatahi Kiasari et al., 2010). پژوهشگران نشان دادند که کاربرد اسیدهای آلی و EDTA غلظت عناصر سمی ازجمله کادمیم، نیکل و سرب را در محلول خاک زیاد می‌کند و درنتیجه غلظت عناصر در اندام هوایی گیاهان افزایش می‌یابد (Liphadzi and Kirkham, 2006). طی بررسی گیاه‌پالایی عناصر سنگین، در سه گیاه مختلف زراعی و غیر زراعی (یونجه، آفتابگردان و تاج‌خروس)، گزارش شد که با افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک غلظت این عناصر در ریشه و اندام هوایی گیاهان نیز افزایش می‌یابد (Motesharezadeh et al., 2010). کاربرد EDTA و

EDDS باعث افزایش معنی‌دار غلظت عناصر مس، سرب، روی، کادمیم، در بخش‌های هوایی شد و کاربرد EDDS برای فراهمی مس و روی نسبت به EDTA مؤثرتر بود درحالی‌که برای فراهم‌سازی سرب و کادمیم EDTA مؤثرتر از EDDS بود (Luo et al., 2005). در تحقیق دیگری که بر روی گیاه-پالایی گیاه ذرت انجام شد گزارش گردید کاربرد سطوح بالای EDTA موجب افزایش جذب و انتقال سرب در ریشه و اندام هوایی گیاه ذرت می‌شود (Hovsepyan and Greipsson, 2007). چو راک و همکاران (Cho-Ruk et al., 2006) در مطالعه گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به سرب در گیاهان چندساله نشان دادند که *A. philaxeroides* توانایی جداسازی تقریباً ۱/۳-۱/۸ برابر مقدار بیشتری از سرب را نسبت به دو گیاه *P.grandiflora* و *S. procumbens* دارد. هم‌چنین این نتایج هم‌راستا با نتایج ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2009) و ژیائو و همکاران (Xiao et al., 2008) است.

برای اینکه در جریان گیاه‌پالایی ظرفیت واقعی پالایش عناصر سنگین توسط گیاهان مشخص گردد از مقدار جذب (که حاصل‌ضرب غلظت عنصر در میزان وزن خشک گیاه است) استفاده می‌شود. شکل ۴ نشان داد که مواد افزاینده فراهمی سرب خاک برافزایش میانگین جذب سرب اندام هوایی مؤثر بوده به‌گونه‌ای که آمونیوم مولیبدات توانست جذب سرب اندام هوایی را نسبت به شاهد افزایش دهد؛ اما تأثیر EDTA به‌عنوان کلات فراهم‌کننده عناصر بسیار بیشتر از آمونیوم مولیبدات بود. روند افزایشی مقدار جذب سرب اندام هوایی با EDTA همانند روند افزایشی در غلظت نسبی سرب در اندام هوایی بود. در آمونیوم مولیبدات مقدار غلظت نسبی سرب اندام هوایی با شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت، ولی در جذب سرب اندام هوایی نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری را نشان داد.



شکل ۴. تأثیر آمونیوم مولیبدات (AM) و EDTA (E) بر جذب سرب اندام هوایی ذرت.

Fig. 4. Effect of ammonium molybdate (AM) and EDTA (E) chelates on lead adsorption by corn shoots.

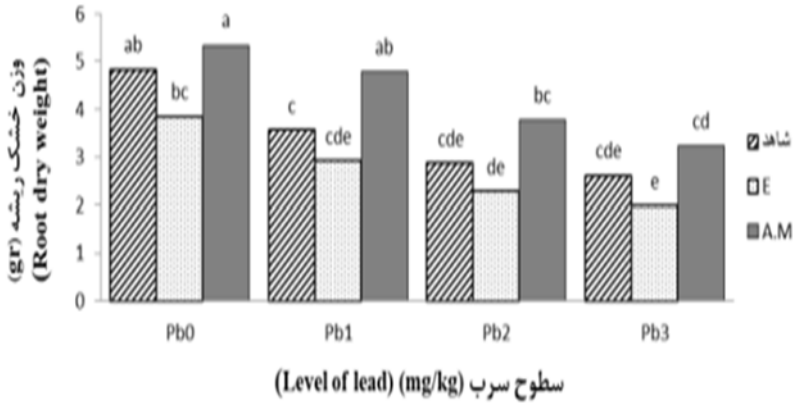
این‌گونه به نظر می‌رسد که هرچند آمونیوم مولیبدات غلظت سرب را نسبت به شاهد در گیاه افزایش نداد اما با تأثیری که بر رشد گیاه گذاشت توانست در جذب سرب نسبت به شاهد پیشی گیرد؛ اما مشاهدات در این تحقیق نشان داد که EDTA نسبت به آمونیوم مولیبدات در جذب سرب اندام هوایی موفق‌تر عمل کرده است. طبق مطالعات انجام‌شده با تعیین مقدار کل عناصر نیکل و کادمیم نشان دادند اگرچه آفتابگردان در جذب نسبی این عناصر در اندام هوایی و ریشه با استفاده از EDTA موفق عمل کرده بود اما کاهش زیست‌توده این گیاه بر اثر افزایش EDTA سبب شد مقدار کل جذب این عناصر کاهش یابد لذا این پژوهشگران نتیجه گرفتند که استفاده از این گیاه برای گیاه جذبی با استفاده از EDTA در شرایط خاک‌هایی با pH حدود ۵/۵ مناسب نیست (Chen and Teresa, 2001; Turgut et al., 2004).

تأثیر برهمکنش سطوح مختلف سرب و کلات بر وزن خشک ریشه

با توجه به شکل ۵ بیشترین وزن خشک ریشه ذرت مربوط به تیمار شاهد، بدون سرب (Pb0) بود. کمترین وزن خشک

ریشه گیاه ذرت مربوط به تیمار ۴۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود. کلات EDTA و آمونیوم مولیبدات بر روی رشد گیاه ذرت تأثیرگذار بودند. در تیمار بدون سرب، کلات آمونیوم مولیبدات تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک ریشه داشته است. بیشترین وزن خشک ریشه گیاه ذرت مربوط به تیمار آمونیوم مولیبدات در تیمار شاهد (بدون سرب) و کمترین وزن خشک ریشه مربوط به تیمار EDTA در سطح ۴۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود. با توجه به نتایج و شواهد این آزمایش آمونیوم مولیبدات باعث افزایش وزن خشک ریشه و EDTAاثر کاهشی بر وزن خشک ریشه گیاه داشته است. تقریباً همین روند در کل سطوح مختلف سرب در خاک مشاهده می‌شود. بیشترین کاهش وزن خشک ریشه مربوط به تیمار EDTA، در سطح ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب است که حدود ۲۴ درصد نسبت به شاهد کمتر بود. نتایج نشان داد اگرچه با افزایش سطح سرب وزن خشک ریشه کاهش یافت، اما تیمار آمونیوم مولیبدات باعث افزایش وزن خشک ریشه شد. به‌طوری‌که آمونیوم مولیبدات در تیمار ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، ۳۴/۲۶ درصد، ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، ۳۲/۱۶ درصد و ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، ۲۴/۱۳ درصد نسبت به شاهد وزن خشک ریشه را افزایش داد.

به نظر می‌رسد که وجود کلات EDTA به دلیل فراهمی و حلالیت خوب آن برای سرب در خاک و انتقال این فلز به گیاه در افزایش سمیت و کاهش رشد گیاه بی‌تأثیر نبوده است و تأثیر EDTA بر کاهش رشد ریشه گیاه به دلیل افزایش فراهمی سرب و درنهایت بروز بیشتر علائم سمیت در گیاه است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت آمونیوم مولیبدات تأثیری بر انحلال سرب خاک نداشته و احتمالاً به دلیل وجود مولیبدن و آمونیوم در ترکیب آن بوده که اثر مثبت بر رشد و وزن خشک گیاه گذاشته است.



شکل ۵. تأثیر آمونیوم مولیبدات (AM) و EDTA (E) بر وزن خشک ریشه ذرت تیمار شده با غلظت‌های مختلف سرب

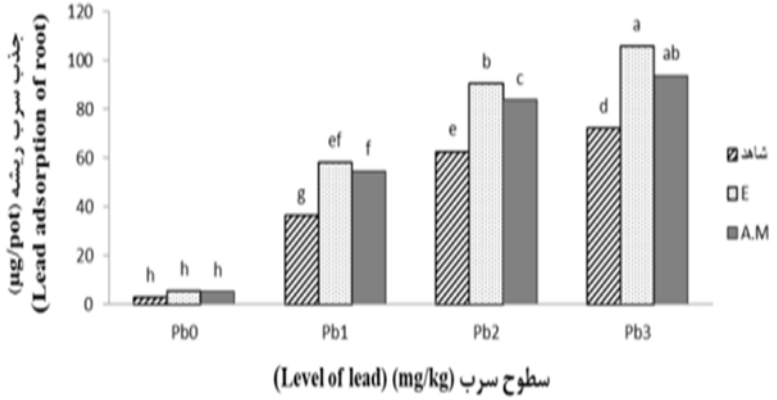
Fig. 5. Effect of ammonium molybdate (AM) and EDTA (E) chelates on root dry weight of corn treated with different levels of Lead.

طبق مطالعات انجام‌شده ریشه‌ها به سرب حساس‌تر از ساقه‌ها هستند، گزارش شده است که سرب رشد ریشه را از طریق محدود کردن تقسیم سلولی و کشیدگی سلول کاهش می‌دهد (Fodor et al., 1996). در یک پژوهش عنوان شد که کاربرد EDTA و EDDS اثرات بازدارنده بر رشد گیاه ذرت داشته و در مقایسه با تیمار شاهد عملکرد ریشه و ساقه ذرت در تیمارهای کلات به مقدارهای مختلفی کاهش‌یافته است (Bana Araghi and Houdji, 2010). اثر EDTA و فلزات سنگین بر رشد گیاه آفتابگردان بررسی و گزارش شد که بیشترین وزن خشک ریشه گیاه آفتابگردان مربوط به تیمار شاهد (بدون کلات) و کمترین وزن خشک ریشه مربوط به استفاده EDTA و فلز سنگین است (Ullah et al., 2011). پژوهشگران بیان کردند که احتمالاً عناصر فلزی سنگین رشد ریشه را بازداشته و سبب تغییراتی در همانندسازی و همچنین، کاهش ماده خشک گیاه می‌شود (Schat and Sharma, 1997; Farzami, 2002). طی یک مطالعه، اثر آمونیوم مولیبدات بر گیاه‌پالایی عناصر سنگین بررسی گردید و بیان شد که در اثر استفاده از آمونیوم مولیبدات، عناصر روی و کروم در خاک رسوب‌کرده و سمیت این فلزات در گیاه کاهش یافته است، اما عناصر کادمیم، نیکل و مس به‌صورت

محلول درآمده‌اند که سمیت این عناصر در گیاه بعد از استفاده از آمونیوم مولیبدات افزایش یافته است (Qu et al., 2011). گروهی از محققین نشان دادند که سرب موجب کاهش ارتفاع گیاه، کاهش وزن خشک ریشه، بخش هوایی و کل گیاه می‌گردد (Sharma and Dubey, 2005). همچنین با بررسی اثر سمیت سرب بر رشد ریشه گیاه برنج پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که سمیت سرب باعث کاهش رشد ریشه گیاه می‌شود (Kim et al., 2002). نتایج ذکرشده با نتایج تحقیق حاضر که بیان‌کننده نقش سرب در کاهش بیومس گیاهی است، همخوانی دارد.

تأثیر سطوح مختلف سرب و کلات بر غلظت نسبی و جذب سرب ریشه

با توجه به شکل ۶ می‌توان بیان نمود که تیمارهای بکار رفته تأثیر معنی‌داری بر غلظت سرب در ریشه گیاه ذرت دارند. نتایج نشان داد که با افزایش سطح سرب در خاک غلظت سرب ریشه نیز افزایش یافت به‌گونه‌ای که بیشترین غلظت سرب ریشه در تیمار ۴۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و کمترین غلظت سرب ریشه، در تیمار شاهد بود. آمونیوم مولیبدات تأثیر چندانی بر غلظت سرب ریشه نداشت و نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. کلات EDTA تأثیر معنی‌داری بر غلظت سرب ریشه ایفا کرده است. در سطح ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کلات کنندهEDTA سبب شد که ریشه گیاه ذرت بیشترین غلظت سرب را در خود تجمع دهد. در تیمار شاهد (Pb0) هرچند کلات EDTA نسبت به شاهد ۲/۴۷ برابر سرب بیشتری جذب کرده بود اما این کلات ازنظر آماری اختلاف معنی‌داری با شاهد و آمونیوم مولیبدات نشان نداد. غلظت سرب ریشه تحت تأثیر EDTA به ترتیب در تیمار ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، نسبت به شاهد ۹۷/۷۴، ۷۶/۲۲ و ۹۳/۴۵ درصد افزایش داشت. در این پژوهش، میانگین غلظت سرب در اندام‌های زیرزمینی گیاهان در تیمارهای شاهد و نیز در تیمارهای دارای EDTA از اندام‌های هوایی آن‌ها بیشتر بوده است.



شکل ۶. تأثیر آمونیوم مولیبدات (AM) و EDTA (E) بر غلظت سرب جذب‌شده از ریشه در گیاه ذرت تیمار شده

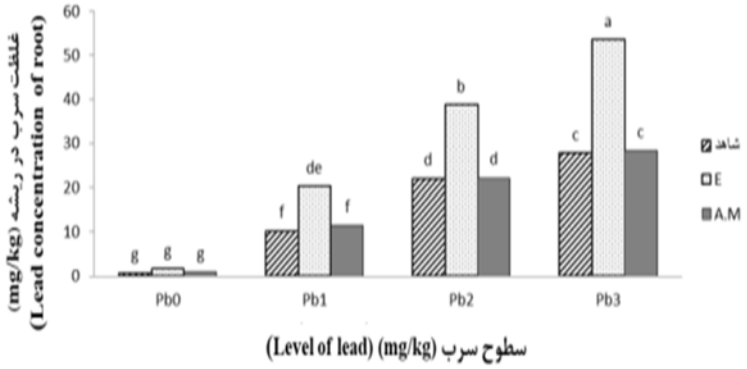
Fig. 6. Effect of ammonium molybdate (AM) and EDTA (E) chelates on the concentration of lead absorbed by roots in treated corn plant.

شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش سطح آلودگی در خاک جذب سرب در ریشه نیز افزایش یافت. جذب سرب ریشه در سطح بدون سرب EDTA و آمونیوم مولیبدات نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نشان نداد. جذب سرب ریشه توسط EDTA در سطوح ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به ترتیب ۵۹/۸۷ و ۴۴/۱۲ و ۴۶/۱۹ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود. در مورد آمونیوم مولیبدات در سطوح ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب به ترتیب ۴۹/۹۸ و ۳۳/۴۰ و ۲۹/۵۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمدهEDTA نسبت به آمونیوم مولیبدات و شاهد بیشترین تأثیر را بر جذب سرب ریشه نشان داد.

با توجه به مطالب ذکرشده به نظر می‌رسد که EDTA توانایی بیشتری برای تشکیل کمپلکس با سرب دارد. همچنین، EDTA به‌عنوان ماده افزایش‌دهنده فراهمی سرب،

توانایی بالاتری نسبت به آمونیوم مولیبدات در رهاسازی فلزات از خاک و قابل‌دسترس نمودن آن برای گیاه دارد.

تحقیقات بسیاری از محققین نشان می‌دهد که EDTA مؤثرترین کلات کننده برای افزایش فراهمی سرب در خاک و جذب توسط گیاه است (Huang et al., 1997; Shen et al., 2002). تأثیر فسفات آمونیوم، سیترات آمونیوم و EDTA بر میزان تحرک و قابلیت دسترسی سرب و کادمیم در خاک، توسط گیاهان ذرت، تاج‌خروس وحشی و گاو پنبه، بررسی و عنوان شد که حداکثر میزان غلظت سرب در اندام‌های زیرزمینی (ریشه) و هوایی هر یک از گیاهان موردنظر، به تیمارهای حاوی EDTA مربوط بوده است (Amouei et al., 2012). همچنین در این پژوهش، میانگین میزان غلظت سرب در ریشه گیاهان نسبت به اندام‌های هوایی آن‌ها بیشتر به‌دست آمده است. بسیاری از پژوهشگران بر این باورند که بعضی از گیاهان نظیر ذرت در جذب و تجمع فلزات سنگین، به‌ویژه فلز سرب از خاک، از مکانیسم‌های خاص و بسیار پیچیده‌ای جهت جذب و تجمع سرب در اندام‌های زیرزمینی و نیز ممانعت از ورود و انتقال سرب به‌طرف اندام‌های هوایی استفاده می‌نمایند (Huang et al., 1997). همچنین با بررسی اثرات EDTA و کمپوست زباله‌ی شهری بر سطوح مختلف کادمیم و سرب در خاک و گیاه‌پالایی این عناصر توسط گیاه آفتابگردان نتیجه شد که بیشترین غلظت سرب، در ریشه آفتابگردان و تحت تأثیر کلات EDTA بوده است (Moslehi et al., 2011). طی یک تحقیق با بررسی پاسخ آفتابگردان به سمیت سرب و کادمیم، مشاهده شد که بیشترین جذب سرب و کادمیم در قسمت ریشه گیاه است (Motesharezadeh and Savaghebi, 2011). گروهی از محققان بامطالعه‌ای که روی اثر EDTA و تلقیح میکروبی بر جذب و انتقال عناصر Pb، Cu، Zn و Cd بر گیاهان ذرت و آفتابگردان داشتند، بیان کردند که استفاده از EDTA غلظت Cu،Pb و Zn را در هر دو گیاه افزایش داده، ولی بیشترین غلظت سرب در ریشه تحت تأثیر تیمار EDTA بوده است (Rabie and Mohamed, 2009).



شکل ۷. تأثیر آمونیوم مولیبدات (AM) و EDTA (E) بر جذب سرب از ریشه در گیاه ذرت

Fig. 7. Effect of ammonium molybdate (AM) and EDTA (E) chelates on lead adsorption by root in corn plant

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان داد که استفاده از EDTA موجب افزایش غلظت سرب محلول در خاک و سپس جذب توسط ریشه و اندام هوایی می‌شود؛ بنابراین، مصرف این ترکیبات باعث افزایش کارایی و کاهش زمان آلودگی‌زدایی سرب از خاک می‌شود. در این رابطه برای افزایش حلالیت فلزات سنگین در خاک، کلات EDTA بیشتر از آمونیوم مولیبدات برای فلز سرب مؤثر بوده است. توانایی بالای گیاه ذرت در جذب مقادیر زیادی سرب در ریشه و ساقه و نیز تأثیر بالای کلات EDTA در زیست‌فراهمی سرب نشان داد که افزایش کلات باعث افزایش پالایش گیاهی سرب در خاک‌های آلوده به این عنصر سنگین می‌شود.

منابع

Alloway, B.J., 1995. Heavy Metals in Soils. Environmental Pollution. 90, 269-273.

Amouei, A., Mahvi, A., Naddafi, K., 2012. The effect of chemical additives on the uptake and accumulation of Pb and Cd in native plants of north of Iran. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 86, 116-124.

Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., Vanov, K., 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Industrial Crops and Products. 19, 197-205.

Babaeian, E., Homaee, M., 2011. Enhancing lead phytoextraction of land cress (*Barbara verna*) using aminopolycarboxylic acids. Journal of Water and Soil. 24, 1142-1150. [In Persian with English Summary]

Bana Araghi, N., Houdji, M., 2010. Evaluate of the potential EDTA and EDDS in enhancing phytoremediation of heavy metals in soils contaminated by corn plant, Fourth Conference on Environmental Engineering. Tehran, Tehran University, Faculty of Environmental Science. [In Persian]

Bi, Y.L., Li, X.L., Christie, P., Hu, Z.Q., Wang, M.H., 2003. Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash. Chemosphere. 50, 863-869.

Bouyoucos, C.J., 1997. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agronomy Journal. 54, 464-465.

Brown, S.L., Angle, S., Baker, A.J.M., 1994. Phytoremediation potential of Thlaspi caerulescens and bladder campion for zinc and cadmium contaminated soil. Journal of Environmental Quality. 23, 1151-1157.

Brunetti, G., Farrag, K., Rovira, P.S., Nigro, F., Senesi, N., 2011. Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by Brassica napus from contaminated soils in the Apulia region Italy. Geoderma. 160, 517–523.

Cariny, T., 1995. The reuse of contaminated land. John Wiley and Sons Ltd. 219p.

Cenkci, S., Cioerci, I.H., Yildiz, M., Oezay, C., Bozdao, A., Terzi, H., 2010. Lead contamination reduces chlorophyll biosynthesis and genomic template stability in *Brassica rapa* L. Health and Environmental Research Online. 6, 467-473.

Chen, H., Teresa, C., 2001. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr and Ni uptake by *Helianthus annuus*. Chemosphere. 45, 21-28.

Cheng, S.F., Huang, C.Y., Lin, Y.C., Lin, S.C., Chen, K.L., 2015. Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land-An in situ study and benefit assessment. Ecotoxicology and Environmental Safety. 111, 72-77.

Chorom, M., Alizadeh, A., 2009. Comparison of synthetic chelates and compost at enhancing phytoextraction of Cd, Ni and Pb from contaminated soil under canola cultivation. Journal of Water and Soil. 23, 20-29. [In Persian with English Summary]

Cho-Ruk, K., Kurukote, J., Supprung, P., Vctayasuporn, S., 2006. Perennial plants in the phytoremediation of lead-contaminated soils. Biotecnology. 5, 1-4.

Cottenie, A., 1980. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendation. FAO Soils Bulletin. 38, 70-73.

Diagomanolin, M., Farhang, M., Ghazi-Khansar, M., Jafarzadeh, N., 2004. Heavy metals (Ni, Cr, Cu) in the Karoon waterway river, Iran. Toxicology Letters. 151, 63-67.

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

Dushencov, V., Kumar, P.B.A.N., Motto, H., Raskin, I., 1995. The use of plants to remove heavy metals from agueous streams. Environmental Science and Technology. 29, 1239-1245.

Evangelou, M., Ebel, M., Schaeffer, A., 2007. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity and fate of chelating agents. Chemosphere. 68, 989-1003.

Farzami, M., 2002. Investigate the physiological responses of several crops to salinity stress and cadmium, PhD thesis Azad University, Science and Research. [In Persian]

Fatahi Kiasari, A., Fotovat, A., Astaraee, A., Haghnia, Gh., 2010. Sulfuric Acid and EDTA on Phytoremediation of Lead in Soil by sunflower, corn and cotton plant. Science and Technology of Agriculture and Natural

Resources (Water and Soil Sciences). 51, 1268-1285. [In Persian with English Summary]

Fodor, F., Sarvari, E., Lang, F.R., Szigeti, Z., Cseh, E., 1996. Effects of Pb and Cd on cucumber depending on the Fe-complex in the culture solution. Plant Physiology. 148, 434-439.

Gabos, M.B., Abreu, C.A., Coscione, A.R., 2009. EDTA assisted phytoremediation of a Pb contamined soil: Metal leaching and uptake by jack beans. Scientia Agricola. 66, 506-514.

Garbisu, C., Alkorta, I., 2001. Phytoextraction: acosteffective plant based technology for the removal of metals from the environment. Bioresource Technology. 779, 229-236.

Helmke, P.A., Sparks, D.L., 1996. Lithium, sodium, potassium, cesium, and rubidium. In: Sparks, D.L., (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods and Processes. Madison: Soil Science of Society, pp. 551-574.

Hovsepyan, A., Greipsson, S., 2005. EDTA-Enhanced phytoremediation of lead-contaminated soil by corn. Journal of Plant Nutrition. 28, 2037-2048.

Huang, J.W., Chen, J., Berti, W.B., Cunningham, S.D., 1997. Phytoexraction of lead-contaminated Soils: Role of synthetic in lead phytoextraction. Environmental Science and Technology. 31, 800-805.

Huang, J.W., Cunningham, S.D., 1996. Lead phytoextraction species variation in lead uptake and translocation. New Phytologist. 134, 75-84.

Hutzinger, O., 1980. The Handbook of Environmental Chemistry. Vol. 3 part. A. pp. 59-107.

Jadia, C.D., Fulekar, M.H., 2008. Phytotoxicity and remediation of heavy metals by fibrous grass (sorghum). Biosciences. 10, 861-499.

Jensen, J.K., Holm, P.E., Nejrup, J., Larsen, M.B., Borggaard, O.K., 2009. The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soils. Environmental Pollution. 157, 931-937.

Khodaverdi, H., Homai, M., 2008. Investigated modeling of phytoremediation of soil contaminated with Cadmium and Lead. Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 42, 417-426. [In Persian with English Summary]

Kim, Y., Yang, Y., Lee, Y., 2002. Pb and Cd uptake in rice roots. Physiologia Plantarum. 116, 368-372.

Kirkham, M.B., 2000. EDTA-facilitated phytoremediation of soil with heavy metals from sewage sludge. International Journal of Phytoremediation. 2, 159-172.

Klute, A., Dirksen, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory metals. In: Kulte, A., (ed.), Methods of soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. American Society of Agronomy. Madison, WI.

Komarek, M., Tlustos, P., Szakova, J., Chrastnyb, V., Ettler, V., 2007. The use of maize and poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soils. Chemosphere. 67, 640-651.

Lindsay, W.L., Norwell, W.A., 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America. 42, 421-428.

Liphadzi, M.S., Kirkham, M.B., 2006. Availability and plant uptake of heavy metals in EDTA-assisted phytoremediation of soil and comoseted biosolids. African Journal of Botany. 72, 391-397.

Luo, C., Shen, Z., 2006. Enhanced phytoxtraction of Pb and other form artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS. Chemosphere. 63, 1773-1784.

Luo, C., Shen, Z., Lou, S., Li, X., 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. Chemosphere. 59, 1-11.

Meers, S.E., Qadir, M., De Caritat, P., Tack, F.M.G., Du Laing, G., Zia, M.H., 2009. EDTA-assisted Pb phytoextraction. Chemosphere. 74, 1279-1291.

Mojiri, A., 2011. The potential of corn (*Zea mays*) for phytoremediation of soil contaminated with cadmium and lead. Journal of Biological and Environmental Sciences. 5, 17-22.

Moslehi, A., Fekri, M., Mahmoud Abadi, M., 2011. The effects of EDTA (ethylene diamine tetra-acetic acid) and municipal waste compost on different levels of lead and cadmium in the soil and phytoremediation these elements by sunflower plant. 1st National Conference on phytoremediation, Kerman, The International

Center for Advanced Science and Technology and Environmental Science. [In Persian]

Motesharezadeh, B., Savaghebi, Gh., 2011. Study of Sunflower Plant Response to Cadmium and Lead Toxicity by Usage of PGPR in a Calcareous Soil. Journal of Water and Soil. 25, 1069-1079. [In Persian with English Summary].

Motesharezadeh, B., Savaghebi-Firoozabadi, Gh.R., Mirseyed Hosseini, H., Alikhani, H.A., 2010. Study of the enhanced phytoextraction of cadmium in a calcareous soil. International Journal of Environmental Research. 3, 525-532.

Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939, US Gov. Printing Office, Washington, DC.

Orcut, D.M., Nilsen, E.T., 2000. Plant Physiology under Stress. John Willy Inc.

Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., 1982. Methods of soil analysis. Part2. 2nd ed. ASA and SSSSA. Madison, WI.

Qu, J., Song, X., Feng, Y., Cong, Q., Yuan, X., Quan, X., 2016. Stabilization of Pb, Hg, Cr, Zn in Soil with Ammonium Molybdate and Uptake by Alfalfa Plants. Academia Journal of Biotechnology. 4, 145–152.

Qu, J., Wang, L., Yuan, X., Cong, Q., Guan, Sh., 2011. Effects of ammonium molybdate on phytoremediation by alfalfa plants and (im) mobilization of toxic metals in soils. Environmental Earth Sciences. 64, 2175-2182.

Rabie, A., Mohamed, H., 2009. Effect of microbial inoculation and EDTA on the uptake and translocation of heavy metal by corn and sunflower. Chemosphere. 76, 893-9.

Ramazani, M., Ghasemi, S., 2011. Evaluate of the phytoremediation of lead in soil by corn plant (*Zea mays* L). 1st National Conference on phytoremediation, Kerman, the International Center for Advanced Science and Technology and Environmental Science. [In Persian]

Rhoades, J.D., 1996. Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L., et al. (ed.), Methods of Soil Analysis. SSSA, Inc. ASA, Inc. Madison, WI, pp.417-436.

Schat, H., Sharma, R.V., 1997. Heavy metal induced accumulation of free proline in a metal tolerant and a non-tolerant ecotype of silene vulgaris. Physiologia Plantarum. 101, 477-482.

Sekara, A., Poniedzialek, L., Ciura, J., Jedrszczyk, E., 2005. Cadmium and Lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: implications for phytoremediation. Polish Journal of Environmental Studies. 14, 509-516.

Sharma, P., Dubey, R.S., 2005. Lead toxicity in plants. Plant Physiology. 17, 35-52.

Shen, Z.G., Li, X.D., Wang, C.C., Chen, H.M., Chua, H., 2002. Lead phytoextraction from contaminated soil with high biomass plant species. Environmental Quality. 31, 1893-1900.

Sillen, L.G., Martell, A.E., 1964. Stability constants of metal ion complexes. Special Publication No. 17. The Chemical Society. Londan.

Tariq, S.R., Ashraf, A., 2016. Comparative evaluation of phytoremediation of metal contaminated soil of firing range by four different plant species. Arabian Journal of Chemistry. 9, 806-814.

Tharayil, M., Pillai, H.P.S., 2013. Immobilization and mobilization effect of ammonium molybdate on phytoremediation of toxic heavy metals in soil. Acta Biologica Indica. 2, 353-360.

Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L., et al. (ed.), Methods of Soil Analysis. SSSA. Inc., ASA, Inc. Madison, WI, pp. 475-490.

Topp, G.C., Galynou, B.C., Ball, B.C., Carter, M.R., 1993. Soil water adsorption curve. In: Carter, M.R., (ed.), Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 569-579.

Turgut, C., Pepe, M.K., Curight, T.J., 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. Environmental Pollution. 131, 147-154.

Ullah, R., Bakht, J., Shafi, M., Iqbal, M., Khan, A., Saeed, M., 2011. Phyto-accumulation of heavy metals by sunflower (*Helianthus annuus*) grown on contaminated soil. Biotechnology. 75, 17192-17198.

Walkley, A., Black, I.A., 1934. Examination of the degtjareff method determining soil organic matter and a proposed modification of the

chromic acid titration method. Soil science. 34, 29-38.

Xiao, X., Tongbin, C., Zhizhuang, A., Mei, L., 2008. Potential of Pteris vittata L. for phytoremediation of sites co-contaminated with cadmium and arsenic: The tolerance and accumulation. Journal of Environmental Sciences. 20, 62-67.

Yan-De, J., Zhen-li, H.E., Xiao-e, Y., 2007. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Zhejiang University Science. 8, 192-207.

Zhang, H., Dang, Z., Zheng, L.C., Yi, X.Y., 2009. Remediation of soil co-contaminated with pyrene and cadmium by growing maize (*Zea mays* L.). International Journal of Environmental Science Technology. 6, 249-258.