محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۷۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸
صفحات ۴۹۹ تا ۵۱۳
Archive of SID

اثر نیتریلوتری استیک اسید (NTA) بر گیاه‌پالایی کادمیوم توسط ذرت در شرایط آبشویی خاک

نرگس محراب[1]*؛ مصطفی چرم[2] و مجتبی نوروزی مصیر[3]

۱- دانشجوی دوره دکتری مهندسی علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران، اهواز

(تاریخ دریافت ۹۷/۱۱/۲۱-تاریخ پذیرش ۹۷/۱۲/۱۱)

چکیده:

گیاه‌پالایی یک روش برای پالایش فلزات سنگین از خاک است. استفاده از کلات‌کننده‌ها می‌تواند سبب افزایش کارایی گیاه‌پالایی گردد. هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر کلات‌کننده نیتریلوتری استیک اسید (NTA) بر شاخص‌های رشدی و کارایی گیاه‌پالایی گیاه ذرت در خاک‌های آلوده به کادمیوم تحت شرایط آبشویی بوده است. بدین منظور در گلخانه آزمایشی شامل سه سطح کادمیوم (صفر، ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و NTA با غلظت‌های (صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌مول در لیتر در هر گلدان) انجام شد. مطابق نتایج بدست آمده بیشترین مقدار کادمیوم در اندام‌هوایی و ریشه گیاه در تیمار ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم و کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA به ترتیب با ۲ و ۱/۸ برابر افزایش نسبت به عدم کاربرد NTA دیده شد. همچنین مقدار کادمیوم آبشویی شده با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA در هر دو سطح آلودگی ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم بیشترین مقدار بود. در غلظت ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و ۳۰ میلی‌مول NTA، علائم سمیت بصورت زرد شدن برگ‌ها، کاهش شاخص کلروفیل، نکروزه شدن و کاهش معنی‌دار وزن خشک اندام‌های گیاهی، سطح برگ و ارتفاع گیاه مشاهده گردید. در سطح کادمیوم ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA مقادیر BAC (غلظت تجمع زیستی) و BCF (فاکتور غلظت زیستی) نسبت به عدم کاربرد NTA به ترتیب ۲/۸ و ۲/۴ برابر افزایش و TI (شاخص تحمل) ۳۳ درصد کاهش یافت. TF (فاکتور انتقال) فقط با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA در سطح ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم توانست نسبت به تیمار عدم حضور NTA افزایش معنی‌دار نشان دهد. با توجه به نتایج با کاربرد NTA به عنوان یک کلات‌کننده که دارای حداقل آسیب‌های زیست محیط است می‌توان کارایی گیاه‌پالایی توسط ذرت را بصورت قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

کلید واژگان: نیتریلوتری استیک اسید (NTA)، گیاه‌پالایی، شاخص‌های رشدی، شاخص‌های گیاه‌پالایی ، کادمیوم خاک.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۶۳۴۶۳۵۹۲ ایمیل: narges_mehrab@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقد مه

آلودگی خاک به وسیله فلزات سنگین یکی از مشکلات جدی محیط زیستی در سرتاسر جهان است که سلامت انسان و زیست بوم‌ها را به شدت تهدید می‌کند. آلودگی زیست کره به وسیله فلزات سنگین هم‌زمان با انقلاب صنعتی افزایش روزافزونی یافته است (Tian *et al*., 2014). به طور کلی غلظت کادمیوم در اکثر خاک‌های غیرآلوده کمتر از ۱ میلی-گرم بر کیلوگرم می‌باشد و اتحادیه اروپا (EU) حد مجاز کادمیوم در خاک را ۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم اعلام نموده است (Sharma & Prasad, 2010). در حالی که در گیاهان غلظت بحرانی کادمیوم ۵ تا ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گزارش شده است (Mulligan *et al*., 2001). در گیاهان بیش اندوز و گیاهان با بیومس بالا این مقدار بالاتر می‌باشد و به بیش از ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در هر کیلوگرم ماده خشک گیاه در بخش برگ‌ها با حداقل خطر و آسیب در گیاه می‌رسد (Li *et al*., 2018). امروزه تکنیک-های بسیاری از جمله خاکبرداری، الکتروکینتیک، شستشوی خاک، تثبیت، و غیره جهت پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین گسترش یافته‌اند (Anning & Akoto, 2018)، ولی این روش‌ها عمدتاً پرهزینه می‌باشند و از طرفی برخی از این روش‌ها سبب تغییرات در بعضی از ویژگی‌های خاک می‌شوند. در میان تکنیک‌های مختلف، گیاه‌پالایی بعنوان یک روش پاکسازی مؤثر و ارزان عرضه شده است که در آن جذب و جمع‌آوری آلاینده‌ها در بافت-های قابل برداشت گیاهی مدنظر می‌باشد (Mattina *et al*., 2003).

در اراضی کشاورزی آلوده به فلزات سنگین، انتخاب گیاهان زراعی متحمل به فلزات جهت برداشت آلاینده‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. برخی گونه‌های انباشتگر کادمیوم که بر اساس نتایج حاصل از آزمایشات گزارش شده‌اند گونه‌های با توده زیستی بالا شامل ذرت، آفتابگردان و خردل هندی می‌باشند (Mertens *et al*., 2006). زیست فراهمی فلزات در محیط ریشه نیز لازمه‌ی موفقیت گیاه‌پالایی است که ویژگی‌های شیمیایی مهم خاک مانند pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار رس و ماده آلی نیز در این زمینه نقش مهمی دارند. از طرفی استفاده از برخی عوامل کمپلکس‌کننده علاوه بر افزایش فراهمی فلز در خاک، باعث انتقال بیشتر فلزات به شاخساره می‌شوند (Wu *et al*., 1999).

مطالعات نشان‌داده است کلات‌کننده‌هایی مانند EDTA[1]، NTA[2]، EDDS[3] و اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم در افزایش حلالیت فلزات سنگین در خاک و جذب آن‌ها توسط گیاهان مؤثر هستند (Anning & Akoto, 2018). عوامل کلات‌کننده میل ترکیبی زیادی با کاتیون‌های فلزی مختلف داشته و به آسانی بصورت یک کمپلکس کلات-فلز از ریشه گیاه به سمت اندام‌هوایی آن جابه‌جا می‌گردند. استفاده از EDTA و اسید سیتریک پتانسیل استخراج گیاهی فلزات سنگین از خاک را توسط گیاه خردل افزایش می‌دهد (Guo *et al*., 2019). با کاربرد EDTA و افزایش جذب کادمیوم، کاهش در نسبت اندام‌هوایی بر ریشه به دلیل کاهش در سنتز زیستی کلروفیل در گیاه اتفاق می‌دهد و همچنین

1- Ethylenediaminetetraacetic acid
2- Nitrilotriacetic acid
3- Ethylenediaminedisuccinic acid

www.SID.ir

Archive of SID

فاکتور غلظت زیستی کادمیوم در گیاه افزایش می‌یابد (Miller *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2019). کلات-های مصنوعی تجزیه زیستی به شدت پایینی دارد و تحرک بالای فلزات سنگین را در دوره طولانی‌تری در خاک ایجاد می‌کنند و به دنبال آن خطر نفوذ عناصر سنگین به اعماق خاک را افزایش می‌دهند. در مقابل، کلات‌کننده‌های طبیعی زمان تجزیه زیستی کوتاهی دارند و دوستدار محیط زیست هستند (Bai, 2018). در چند سال اخیر، برخی ترکیبات زیست تجزیه‌پذیر مانند EDDS و NTA که جزء کلات‌کننده‌های طبیعی هستند در پالایش گیاهی مورد توجه قرار گرفته‌اند. EDDS و NTA به دلیل سرعت تجزیه بالاتر در محیط خاک، اثر سمی به مراتب کمتر از EDTA دارند. کلات‌کننده NTA در خاک حداکثر پس از دو هفته به CO_2 و NH_3 تجزیه می‌شود (Bai, 2018). مطالعات نشان داده است که NTA در غلظت ۴ مولار با افزایش ۷۸ برابری در غلظت کادمیوم محلول، جذب آن را توسط خردل هندی ۳ برابر بهبود بخشیده است (Evangelou *et al.*, 2007). مطالعات Song و همکاران (۲۰۱۶) بر حذف فلزات سنگین از رسوبات با کمک کلات‌کننده‌های EDTA، EDDS، NTA و اسیدسیتریک نشان داد که قدرت کلات‌کنندگی NTA نسبت به EDDS با فلز کادمیوم بیشتر است. بعلاوه NTA از لحاظ قیمت ارزان‌تر است و در مقیاس مزرعه‌ای برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی مقرون بصرفه‌تر است (Zhou *et al.*, 2007). در تحقیقات دیگر نیز نشان‌داده شده است که EDTA و NTA در آبشویی کادمیوم، مس و سرب در خاک‌های آهکی موفق‌تر از اسیدهای آلی مانند اسید هومیک عمل کرده است و کلات‌کننده-های EDTA و NTA اثرات مشابه‌ای در آبشویی این فلزات از خاک داشتند (Soleimani *et al.*, 2010). در این تحقیق از کلات‌کننده طبیعی NTA به عنوان یک جایگزین برای کلات‌کننده‌های مصنوعی با هدف بررسی کارایی این کلات‌کننده در خاک آلوده به کادمیوم بر برخی شاخص‌های رشدی گیاه ذرت و اثربخشی آن بر شاخص‌های کارایی گیاه‌پالایی تحت شرایط آبشویی خاک استفاده گردید.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور انجام آزمایشات، خاک غیرآلوده از مزارع دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز جمع‌آوری شد و پس از هوا خشک کردن و عبور دادن از الک دو میلی‌متری برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن از جمله بافت (Day, 1982)، pH خمیر اشباع (Carter & Gregorich, 2008)، هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC_e)، درصد مواد آلی (Walkley & Black, 1934)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) (Sumner & Miller, 1996)، نیتروژن کل (Brennan *et al.*, 1993)، فسفر قابل جذب گیاه (Olsen *et al.*, 1954)، پتاسیم محلول، کربنات کلسیم معادل (Loppert & Suarez, 1996)، کادمیوم کل به روش هضم با اسید (Soon & Abboud, 1993) و کادمیوم قابل جذب (قابل استخراج با DTPA) (Lindsay & Norvell, 1979) اندازه‌گیری شد (جدول ۱). این پژوهش در قالب طرح آماری فاکتوریل به صورت آزمایشی کاملاً تصادفی با سه سطح کادمیوم (صفر، ۲۵ و ۵۰ میلی-گرم در کیلوگرم خاک)، سه سطح NTA (صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌مول) در گلدان انجام شد. از تیمار صفر میلی‌مول NTA (NTA0) به عنوان شاهد در آزمایشات استفاده گردید. جهت انجام آزمایشات گلدانی، خاک از الک ۴ میلی‌متر عبور داده شد. به

www.SID.ir

Archive of SID

منظور آلوده‌سازی خاک به فلز کادمیوم، از نمک کلرید کادمیوم استفاده گردید و خاک آلوده به غلظت‌های ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک از طریق افشان کردن و مخلوط نمودن یکنواخت به خاک تهیه شد. سپس خاک آلوده جهت طی کردن دوره خوابانیدن و رسیدن به تعادل نسبی در اتاق دمای ثابت در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت زراعی و دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت سه هفته نگهداری گردید (Karimi *et al.*, 2012). پس از طی شدن دوره خوابانیدن، مقدار کادمیوم قابل استخراج با DTPA با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. کشت ذرت (رقم امریکن ژنتیکس) تحت شرایط کنترل دما و رطوبت در گلخانه دانشگاه شهید چمران اهواز در نیمه اسفند تا اواخر اردیبهشت سال ۹۶ انجام شد. بذرهای ذرت (با قوه نامیه ۹۹ درصد) به منظور جوانه‌زنی درون پتری‌دیش به مدت ۴۸ ساعت در دمای اتاق قرار داده شدند. سپس ۱۰ عدد بذر جوانه‌زده در گلدان‌های ۸ کیلوگرمی که قبلاً مطابق با تیمارهای کادمیومی از خاک پر گردیده بودند کشت شدند. مدیریت کودی بر اساس آزمون خاک انجام شد. در مرحله دو برگی گیاهان در هر گلدان تنک گردیدند و به ۳ گیاهچه کاهش داده شدند. در طی کشت جهت آبیاری از آب تصفیه موجود در گلخانه با شوری ۳۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر استفاده شد و رطوبت گلدان‌ها در حدود ۸۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداشته شد (Ozkan *et al.*, 2016).

از آنجا که NTA دارای نیمه عمر پایین است و بسته به شرایط هوازی سریعاً تحت تجزیه میکربی قرار می‌گیرد و از طرفی در این بازه زمانی کوتاه گیاه قادر به جذب بخش زیادی از فلزات که به شکل محلول در آمده‌اند نیست، Zhao و همکاران (۲۰۱۶) پیشنهاد دادند که محلول کلات‌کننده NTA تهیه شده در طول دوره رشد گیاه به چند بخش تقسیم شده و به خاک اضافه گردد. مطابق اظهارات آن‌ها بهترین روش برای افزایش جذب فلزات سنگین توسط گیاه و کاهش آبشویی آن‌ها، اضافه کردن کلات‌کننده NTA طی چند مرحله می‌باشد. بنابراین در طی دوره ۶۰ روزه کشت گیاه ذرت، محلول NTA تهیه شده مطابق تیمارهای آزمایشی (صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌مول در لیتر در هر گلدان) طی سه مرحله به همراه با آب آبیاری اضافه گردید. در این پژوهش از کلات NTA با فرمول شیمیایی ($C_6H_9NO_6$) با وزن مولکولی ۱۹۱/۱۴ گرم بر مول و خریداری شده از شرکت مرک آلمان استفاده گردید. اولین مرحله افزودن کلات-کننده NTA به گلدان‌ها پس از گذشت ۴ هفته از آغاز کشت گیاه انجام شد و پس از آن با فاصله زمانی منظم ۱۴ روز دو مرحله دیگر افزودن محلول NTA صورت پذیرفت. جهت انجام آبشویی، پس از افزودن هر مرتبه آب آبیاری + کلات‌کننده NTA به گلدان‌ها، در دور بعدی آبیاری میزان ۲۰ درصد بیش از مقدار رطوبت اشباع به گلدان‌ها آب داده شد تا مقداری آب بصورت زه‌آب خارج گردد. هر مرحله آبشویی ۷ روز پس از اضافه کردن کلات‌کننده NTA به خاک انجام شد. قبل از آبشویی به منظور جمع‌آوری زه‌آب‌ها، در زیر گلدان‌ها از سه‌پایه‌هایی استفاده گردید و در انتهای هر یک از گلدان‌ها یک ظرف برای جمع‌آوری زه‌آب قرار داده شد. به طور کلی ۳ مرتبه عمل آبشویی صورت گرفت و زه‌آب در هر مرحله جهت اندازه‌گیری میزان کادمیوم به آزمایشگاه منتقل گردید. در پایان روز ۶۰ام از آغاز کشت، شاخص کلروفیل در برگ‌های گیاهان در هر گلدان با دستگاه

www.SID.ir

Archive of SID

اسپد[4] مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و سپس گیاهان از سطح خاک کف‌بر شدند و ریشه‌ها از خاک جدا گردیدند. ارتفاع اندام‌هوایی با خط‌کش مورد اندازه-گیری قرار گرفت و سطح برگ با اندازه‌گیری بزرگترین طول و عرض هر برگ و از فرمول زیر محاسبه گردید (Mananze *et al.*, 2018):

$LAI = \alpha \times L \times W$ که در آن، LAI سطح برگ (cm^2)، L طول برگ (cm)، W عرض برگ (cm) و α فاکتور وزنی و معادل با ۰/۷۵ می‌باشد.

پس از شستشوی اندام‌هوایی و ریشه گیاهان، وزن تر این اندام‌ها مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و سپس جهت اندازه‌گیری وزن خشک اندام‌هوایی و ریشه گیاهان، آن‌ها در اون به مدت یک ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس و سپس ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک گردیدند. به منظور اندازه‌گیری غلظت کادمیوم در گیاه، اندام‌هوایی و ریشه گیاه پس از اون خشک شدن آسیاب شده و با استفاده از اسید نیتریک و آب‌اکسیژنه هضم گردیدند و برای اندازه‌گیری میزان کادمیوم در بافت گیاهی آماده گردیدند (Zhang *et al.*, 2008). میزان کادمیوم در اندام‌هوایی و ریشه گیاه با دستگاه جذب اتمی[5] اندازه‌گیری شد.

برای بررسی کارایی گیاه‌پالایی از شاخص‌های ضریب تجمع زیستی[6] (BAC)، فاکتور غلظت زیستی[7] (BCF)، فاکتور انتقال[8] (TF) و شاخص تحمل گیاه[9] (TI) استفاده گردید. برای محاسبه BAC که توانایی گیاه برای تجمع کادمیوم در اندام‌هوایی را نشان می‌دهد از رابطه ۱ و BCF که نشان‌دهنده توانایی گیاه برای تجمع کادمیوم در ریشه است از رابطه ۲ استفاده گردید. TF توانایی گیاه برای انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی را نشان می‌دهد و از طریق رابطه ۳ تعیین گردید. رابطه ۴ نحوه محاسبه TI را نشان می‌دهد (Amin *et al.*, 2018).

$BAC= C_{Cd,sh}/C_{Cd,s}$ (۱) $BCF=C_{Cd,r}/C_{Cd,s}$ (۲) $TF=C_{Cd,sh} / C_{Cd,r}$ (۳) $TI=DW_{C.s}/DW_{b.s}$ (۴)

که در آن‌ها، $C_{Cd,r}$ غلظت کادمیوم در ریشه ($mgkg^{-1}$)، $C_{Cd,sh}$ غلظت کادمیوم در اندام هوایی ($mgkg^{-1}$)، $C_{Cd,s}$ غلظت کادمیوم خاک ($mgkg^{-1}$)، $DW_{C.s}$ وزن خشک گیاه در خاک آلوده (g)، $DW_{b.s}$ وزن خشک گیاه در خاک شاهد (غیر آلوده) (g) می‌باشد. تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار SPSS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۹۵ درصد انجام شد.

۳. نتایج

با توجه به جدول۱ خاک مورد استفاده دارای بافت متوسط (لومی) است و از نظر شوری (۲/۴۵ dS/m) و pH (۷/۷) در حد قابل قبول جهت کشت ذرت می‌باشد. همچنین مقادیر pH خاک‌های آلوده در دو سطح ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک بعد از دوره خوابانیدن سه هفته به ترتیب ۷/۳۲ و ۷/۲۸ و همچنین pH محلول‌های ۱۵ و ۳۰ میلی‌مول در لیتر NTA به شدت اسیدی بوده و به ترتیب ۲/۶۱ و ۲/۵۸ اندازه‌گیری شد (جدول ۲). قابل ذکر است که مقدار کادمیوم قابل استخراج با DTPA در خاک غیر آلوده ۰/۴۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود که پس از آلوده کردن خاک میزان کادمیوم قابل استخراج با DTPA در دو خاک با آلودگی ۲۵ و ۵۰

4- SPAD-502 Plus
5- Analytikjena (Contract AA 300)
6- Biological Accumulation Coefficient
7- Bio Concentration Factor
8- Translocation Factor
9- Tolerance Index

www.SID.ir

Archive of SID

میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک به ترتیب معادل ۱۵/۲ و ۳۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک غیر آلوده.

ویژگی	رس	سیلت	شن	مواد آلی	کربنات کلسیم	CEC	EC_e	pH
واحد			٪			$cmol_c kg^{-1}$	dSm^{-1}	-
مقدار	۲۱/۴	۳۸	۴۰/۶	۰/۷۱	۴۱/۳۳	۱۲/۶	۲/۴۵	۷/۷
عناصر دردسترس	نیتروژن کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم محلول	کادمیوم کل		کادمیوم قابل استخراج با DTPA		
واحد	gkg^{-1}	$mgkg^{-1}$	mgL^{-1}	$mgkg^{-1}$		$mgkg^{-1}$		
مقدار	۰/۶	۱۳/۵	۳/۲	۱/۰۵		۰/۴۷		

جدول ۲- میزان pH در خاک‌های آلوده به کادمیوم پس از دوره خوابانیدن و pH محلول‌های NTA مورد استفاده.

فاکتور		pH
کادمیوم	۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۷/۳۲
	۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۷/۲۸
NTA	۱۵ میلی‌مول در لیتر	۲/۶۱
	۳۰ میلی‌مول در لیتر	۲/۵۸

قابل ذکر است که جهت سهولت بررسی نتایج، برای نمایش تیمارهای کادمیوم و NTA در جداول و نمودارها از عناوین اختصاری بصورت زیر استفاده گردید: Cd0 تیمار غیرآلوده، Cd25 و Cd50 به ترتیب دارای غلظت کادمیوم ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، NTA0 تیمار عدم کاربرد کلات-کننده، NTA15 و NTA30 به ترتیب تیمار کاربرد ۱۵ و ۳۰ میلی‌مول در لیتر کلات‌کننده در هر گلدان.

۳-۱. شاخص‌های رشدی گیاه

مطابق جدول تجزیه واریانس جدول ۳ اثرات اصلی تیمارهای کادمیومی و تیمارهای NTA بر تمام شاخص‌های رشدی مورد بررسی اثر معنی‌داری دارند. همچنین اثر متقابل تیمارهای کادمیومی و NTA بر وزن تر اندام‌هوایی، وزن خشک ریشه و شاخص کلروفیل در سطح ۱ درصد و بر وزن خشک اندام-هوایی، سطح برگ و ارتفاع گیاه در سطح ۵ درصد اثر معنی‌داری نشان دادند. مطابق جدول ۴ تیمارهای کادمیومی در تقابل با NTA اثر کاملاً کاهشی بر وزن خشک و تر گیاه داشتند. بطوری که وزن خشک اندام‌هوایی و ریشه در تیمار ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA نسبت به شاهد به ترتیب ۳۰ و ۴۰ درصد کاهش نشان‌داد. این کاهش در وزن تر اندام‌هوایی و ریشه به ترتیب ۷ و ۱۳ درصد بود. در واقع کاربرد NTA با افزایش جذب کادمیوم توسط گیاه، سبب کاهش وزن تر و وزن خشک در گیاه می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که نسبت وزن خشک بر وزن تر در اندام‌هوایی نسبت به ریشه دارای مقادیری به مراتب کمتر است (جدول ۴). این نتایج را می‌توان به ذخیره آب بیشتر در اندام‌هوایی گیاه و در نتیجه افزایش وزن تر در اندام‌هوایی در مقایسه با ریشه نسبت داد. با افزایش سطح آلودگی کادمیوم و NTA مصرفی، نسبت وزن خشک بر وزن تر اندام-هوایی و ریشه گیاه کاهش می‌یابد ولی درصد کاهش

www.SID.ir

Archive of SID

این نسبت در اندام‌هوایی به مراتب بیشتر از ریشه است.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تاثیر تیمارهای آزمایشی بر شاخص‌های رشدی گیاه.

منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن اندام‌هوایی (mg/pot)		وزن ریشه (mg/pot)		وزن خشک/وزن تر		شاخص کلروفیل	سطح برگ (cm^2)	ارتفاع گیاه (cm)
		تر	خشک	تر	خشک	اندام‌هوایی	ریشه			
کادمیوم	۲	۶۳۳۲**	۵۲۱/۶**	۳۸/۳**	۵۱/۶۳**	۰/۰۰۶**	۰/۰۲۸**	۱۶/۹**	۸۰۵۹/۷**	۴۰۷/۸**
NTA	۲	۳۱۸/۶*	۲۳/۹**	۲/۶*	۶/۶**	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۷*	۴/۷۴**	۲۷۰/۱**	۷۰/۹**
کادمیوم × NTA	۴	۳۲۲/۹**	۴/۸*	۰/۵^{ns}	۰/۹۸**	۰/۰۰۰۷^{ns}	۰/۰۰۳^{ns}	۱/۶۲**	۵۹/۷*	۱۹/۵*
خطا	۱۸	۵۹	۱/۶	۰/۵۱	۰/۱۱	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۳	۱۹	۵/۸

^{ns}غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد است.

بطوری که در تیمار سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA نسبت به تیمار شاهد در این سطح آلودگی، نسبت وزن خشک به وزن تر در اندام‌هوایی ۲۸/۶ درصد کاهش داشت (از مقدار ۰/۱۴ در شاهد به ۰/۱۰ در تیمار ۵۰ میلی-گرم کادمیوم کاهش یافت)، در حالی که مقدار کاهش این نسبت در ریشه ۱۲/۹درصد اندازه‌گیری گردید (از مقدار ۰/۸۵ در شاهد به ۰/۷۴ در تیمار ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم کاهش یافت). شاخص کلروفیل نیز تحت تأثیر سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم و ۳۰ میلی‌مول NTA نسبت به شاهد (Cd50NTA0) کاهش معنی‌داری نشان داد، در حالی که در تیمار با سطح آلودگی ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم تفاوت معنی-داری با شاهد (Cd25NTA0) مشاهده نگردید (جدول ۴). این نتایج بیانگر این است که گیاه تا سطح آلودگی ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم و کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA و تحت شرایط آبشویی مقداری مقاومت کرده و با کاهش انتقال کادمیوم از ریشه به اندام هوایی و همچنین استراژی‌هایی مانند افزایش آب درون بافتی (وزن تر) با این تنش تا حدودی مقابله کرده و از کاهش معنی‌دار شاخص کلروفیل نسبت به Cd25NTA0 جلوگیری می‌کند (قابل ذکر است که به دلیل آبشویی میزان کادمیوم کل در خاک کمتر از ۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده است). از طرفی مطابق شکل ۱a بیشترین میزان کادمیوم در اندام هوایی در کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA مشاهده گردید. اگرچه کلات‌ها می‌توانند اثر مثبتی بر انباشت کادمیوم و انتقال آن در گیاه داشته باشند، ولی آن‌ها می‌توانند اثرات جانبی را بر فیزیولوژی گیاه به جای بگذارند.

گزارش شده است که کادمیوم در تداخل با آنزیم‌های مربوط به کلروفیل است و با افزایش غلظت کادمیوم در گیاه، کاهش همزمان کلروفیل گیاه اتفاق می‌افتد (Yin *et al.*, 2015). در پژوهش حاضر با افزایش غلظت کادمیوم به دنبال کاربرد کلات‌کننده NTA به خاک، شاخص کلروفیل برگ، سطح برگ و ارتفاع گیاه بصورت معنی‌داری کاهش یافته است. قابل ذکر است که اختلال در کلروفیل‌سازی از برگ‌های مسن‌تر که در بخش‌های پایین‌تر گیاه قرار دارند آغاز گردید.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴- تأثیر تیمارهای آزمایشی بر برخی شاخص‌های رشدی گیاه.

تیمارها	وزن اندام‌هوایی (g/pot)		وزن ریشه (g/pot)		وزن خشک/وزن تر		شاخص	سطح برگ	ارتفاع گیاه
	تر	خشک	تر	خشک	اندام‌هوایی	ریشه	کلروفیل	(cm^2)	(cm)
Cd0	۱۷۷a	۲۹/۷a	۹/۹۵a	۸/۹a	۰/۱۷a	۰/۸۹a	۳۷/۴a	۲۰۳/۹a	۷۳/۲a
Cd25	۱۳۳/۴b	۱۷/۱b	۶/۹۲b	۵/۵b	۰/۱۳b	۰/۸۳b	۳۶/۶b	۱۵۹/۷b	۶۵b
Cd50	۱۲۹b	۱۵/۹b	۶/۰۱c	۴/۲c	۰/۱۲b	۰/۷۸c	۳۴/۷c	۱۴۶/۹c	۶۰c
NTA0	۱۴۰/۷b	۲۲/۵a	۸/۱۷a	۷a	۰/۱۶a	۰/۸۶a	۳۶/۸a	۱۷۶/۲a	۶۸/۹a
NTA15	۱۴۶/۲ab	۲۱b	۷/۶۲ab	۶/۳b	۰/۱۴b	۰/۸۲b	۳۶/۶a	۱۶۸/۷b	۶۶b
NTA30	۱۵۲/۶a	۱۹/۲۵c	۷/۰۹b	۵/۳c	۰/۱۲c	۰/۸۱b	۳۵/۵b	۱۶۵/۶b	۶۳/۲c
Cd0NTA0	۱۶۰b	۳۰/۳a	۱۰/۳a	۹/۱a	۰/۱۹a	۰/۸۹a	۳۷/۹a	۲۰۴/۴a	۷۳/۵a
Cd0NTA15	۱۸۰/۶a	۲۹/۵a	۸/۹a	۸/۸a	۰/۱۶b	۰/۹۰a	۳۷/۳ab	۲۰۴a	۷۳/۳a
Cd0NTA30	۱۹۰a	۲۹/۳a	۸/۷a	۸/۶a	۰/۱۵bc	۰/۸۹a	۳۷/۲ab	۲۰۳/۵a	۷۳a
Cd25NTA0	۱۲۷/۲ cd	۱۸/۲۶b	۷/۹b	۶/۸b	۰/۱۴cd	۰/۸۶ab	۳۶/۹bc	۱۶۸b	۶۷/۸b
Cd25NTA15	۱۳۳/۲cd	۱۷/۸bc	۶/۷bc	۵/۵c	۰/۱۳de	۰/۸۳ab	۳۶/۸bc	۱۵۸/۸c	۶۶/۱b
Cd25NTA30	۱۳۹/۸c	۱۵/۳۷d	۶c	۴/۱e	۰/۱۱f	۰/۸۱bc	۳۶/۱cd	۱۵۲/۴c	۶۱/۱c
Cd50NTA0	۱۳۵/۳cd	۱۸/۹b	۶/۳c	۵d	۰/۱۴d	۰/۸۵ab	۳۵/۷d	۱۵۶/۳c	۶۵/۴b
Cd50NTA15	۱۲۴/۸d	۱۵/۷cd	۶/۲c	۴/۶de	۰/۱۲e	۰/۷۵cd	۳۵/۶d	۱۴۳/۳d	۵۸/۷cd
Cd50NTA30	۱۲۷/۳cd	۱۳/۱e	۵/۵c	۳f	۰/۱۰f	۰/۷۴d	۳۳e	۱۴۱d	۵۵/۸d

***حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است.**

۳-۲. غلظت کادمیوم اندام‌هوایی و ریشه گیاه

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر میزان کادمیوم گیاه ذرت نشان داد که اثرات اصلی و اثرات متقابل تیمارهای کادمیوم و NTA بر میزان کادمیوم اندام‌هوایی و ریشه گیاه در سطح ۱ درصد معنی‌دار هستند (جدول ۵).

تأثیر تیمارهای مختلف در افزایش غلظت کادمیوم در اندام‌هوایی و ریشه گیاه به ترتیب در شکل‌های ۱a و ۱b نشان داد که افزایش سطوح کادمیوم خاک سبب افزایش میزان کادمیوم جذب شده در گیاه شده است. بیشترین میزان کادمیوم در اندام‌هوایی گیاه با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA در سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم دیده شد که با تیمار ۱۵ میلی‌مول NTA در همین سطح آلودگی اختلاف معنی‌داری نشان داد و نسبت به تیمار شاهد ۲ برابر افزایش داشت (شکل ۱a). از طرفی این مقدار در تیمار مشابه در ریشه گیاه ۱/۸ برابر بیشتر از شاهد بود (شکل ۱b).

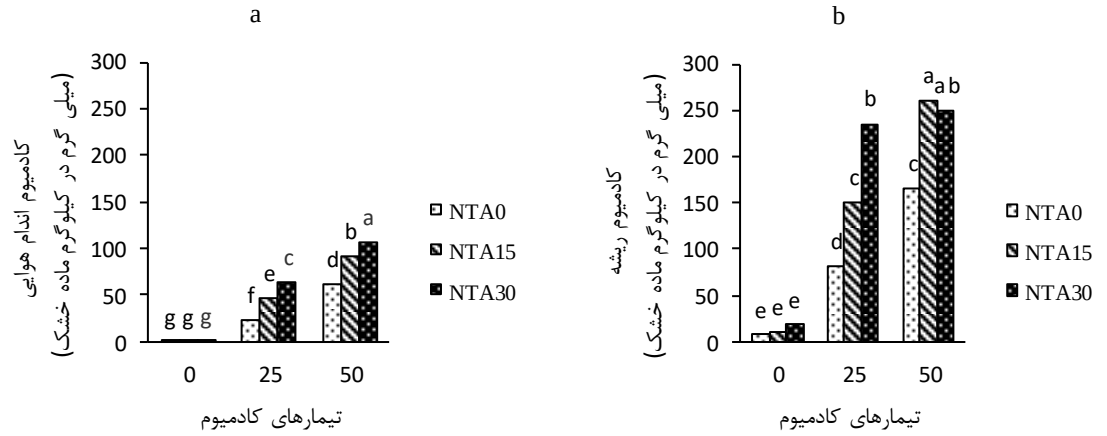
جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر کادمیوم اندام‌هوایی و ریشه گیاه.

منبع تغییرات	درجه آزادی	غلظت کادمیوم (mg/kgDW)	
		اندام هوایی	ریشه
کادمیوم	۲	۱۵۵۴۱/۲**	۱۱۹۰۵۷/۸**
NTA	۲	۱۸۶۲/۲**	۸۹۶۸/۲**
کادمیوم × NTA	۴	۶۱۹/۱**	۳۴۹۵/۹**
خطا	۱۸	۰/۶۹	۷۶/۶

ns غیر معنی‌داری، *معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، ** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد.

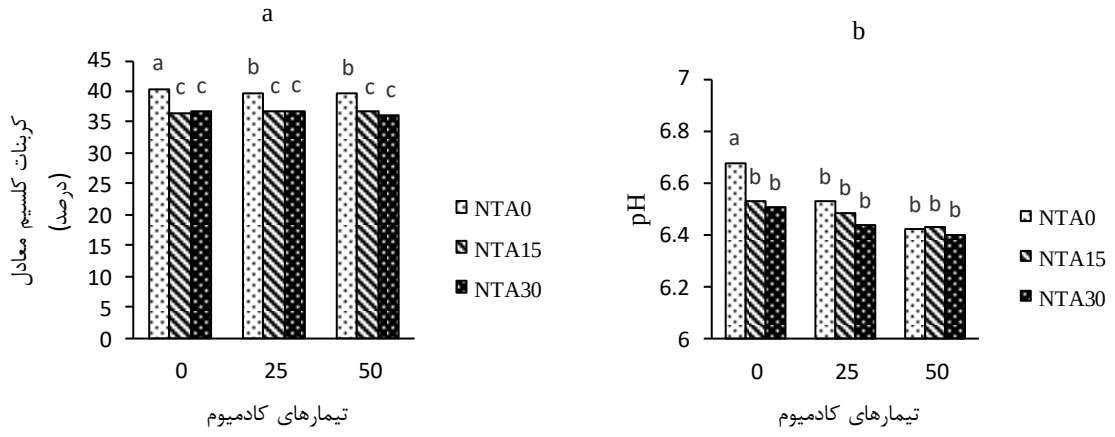
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- میانگین تأثیر متقابل تیمارهای کادمیومی و NTA بر غلظت کادمیوم اندام هوایی (a) و ریشه (b) گیاه.

با توجه به جدول۱، خاک مورد استفاده در مطالعه حاضر یک خاک با کربنات کلسیم معادل بالا (۴۱/۳ درصد) و pH=۷/۷ می‌باشد. در پایان آزمایشات مقدار کربنات کلسیم خاک کاهش معنی‌داری نشان داد شکل ۲a و از طرفی pH خاک در تیمارهای مختلف بیش از یک واحد کاهش یافت (شکل ۲b). مقدار pH از ۷/۷ در خاک اولیه به محدوده ۶/۷ تا ۶/۴ در تیمارهای مختلف آلودگی کادمیوم و سطح کاربردی NTA رسید. مطابق جدول۲، محلول‌های NTA مورد استفاده شدیداً اسیدی هستند و در کاهش pH خاک مؤثر می‌باشند. همچنین تیمارهای آلودگی کادمیوم نیز در کاهش pH اثر هر چند جزئی داشتند (جدول۲). بنابراین دلیل عمده افزایش حلالیت کادمیوم در خاک کاهش pH و تشکیل کلات NTA-Cd در خاک و تسهیل انتقال کادمیوم به سمت ریشه گیاه است. مطالعات دیگر نیز نشان داد که مقدار pH اثر قابل توجهی در جذب کادمیوم بر سطوح خاک و یا جذب توسط گیاه دارد. بدین معنی که با وجود اینکه نوع بافت خاک اثر ضعیفی در جذب کادمیوم بر سطوح ذرات خاک دارد ولی بطور کلی به ازای هر واحد افزایش pH مقدار جذب کادمیوم بر سطوح ذرات خاک ۳ تا ۵ برابر می‌شود و به دنبال آن کاهش جذب کادمیوم توسط ریشه گیاه اتفاق می‌افتد (Fotovat, 2018).

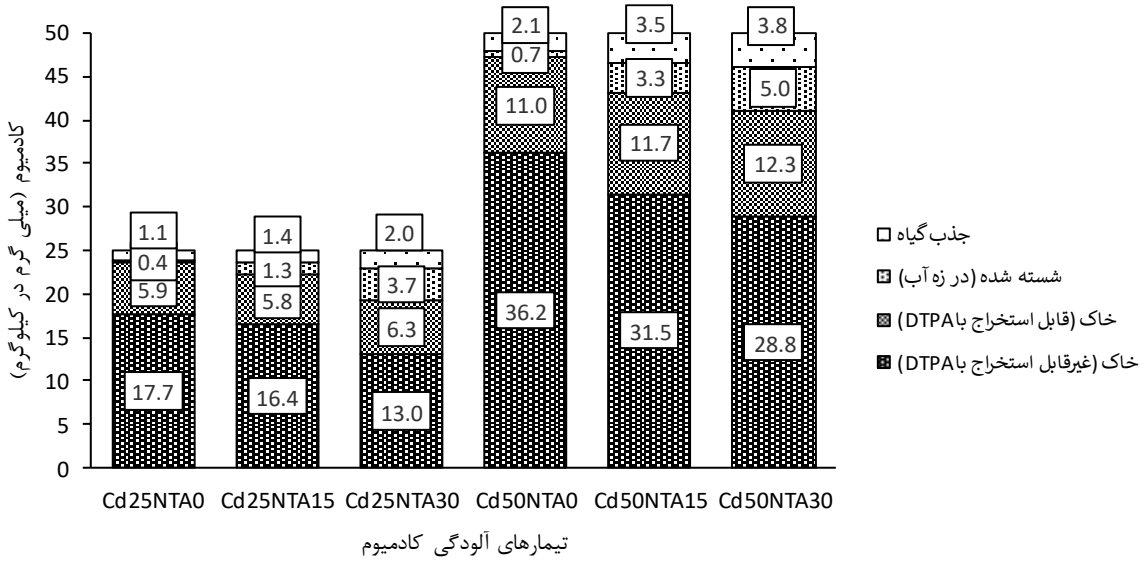


شکل ۲ - تأثیر متقابل سطوح کادمیوم و NTA بر کربنات درصد کلسیم معادل خاک (a) و pH خاک (b).

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به اینکه کشت گیاه ذرت در خاک آلوده به کادمیوم تحت شرایط آبشویی انجام شده است، بنابراین کل کادمیوم پس از کشت شامل کادمیوم جذب شده توسط گیاه، کادمیوم در زه‌آب و کادمیوم خاک (قابل استخراج با DTPA و غیر قابل استخراج با DTPA) می‌باشد (شکل ۳). مطابق شکل ۳، بیشترین مقدار کادمیوم جذب شده توسط گیاه، کادمیوم زه‌آب و کادمیوم خاک در هر دو سطح آلودگی ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم در کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA بدست آمد و کمترین مقادیر در عدم کاربرد NTA در این سطوح آلودگی مشاهده شد. با افزایش غلظت کادمیوم از ۲۵ به ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در عدم حضور NTA میزان کادمیوم گیاه از ۱/۱ به ۲/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش یافته است. در صورتی که این مقادیر در تیمارهای کادمیومی مشابه با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA از ۲ به ۳/۸ میلی‌گرم افزایش داشته است که ناشی از اثر مثبت کلات‌کننده NTA در افزایش حلالیت کادمیوم خاک و افزایش سطوح آلودگی کادمیوم می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳ – مقادیر کادمیوم در گیاه، زه‌آب، خاک (بخش قابل استخراج با DTPA و بخش غیر قابل استخراج با DTPA) در خاک‌های آلوده به کادمیوم.

۳-۴. شاخص‌های کارایی گیاه‌پالایی

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای کادمیومی و NTA بر شاخص‌های کارایی گیاه‌پالایی در جدول ۶ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، اثرات اصلی تیمارهای کادمیومی و NTA بر ضریب تجمع زیستی (BAC)، فاکتور غلظت زیستی (BCF)، فاکتور انتقال TF و شاخص تحمل TI در سطح ۱ درصد اثر معنی‌داری نشان دادند. همچنین اثر متقابل تیمارهای کادمیومی و NTA بر تمام شاخص‌های مورد مطالعه در سطح ۱ درصد مؤثر بودند و تنها اثر متقابل تیمارها بر TF در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر BAC، BCF، TF و TI.

منابع تغییرات	درجه آزادی	BAC ضریب تجمع زیستی	BCF فاکتور غلظت زیستی	TF فاکتور انتقال	TI شاخص تحمل
کادمیوم	۲	۱۵/۸۸**	۱۰۵/۳۳**	۰/۲۵۹**	۰/۰۴۱**
NTA	۲	۵/۲۰**	۲۹/۱۹**	۰/۰۲۵**	۰/۰۸۶**
کادمیوم × NTA	۴	۱/۲۱**	۵/۸۶**	۰/۰۰۳*	۰/۰۱۶**
خطا	۱۸	۰/۰۰۳	۰/۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱

^{ns}غیر معنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد است.

(BAC: ضریب تجمع زیستی، BCF: فاکتور غلظت زیستی، TF: فاکتور انتقال TI: شاخص تحمل گیاه)

مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای آزمایشی بر شاخص‌های کارایی گیاه‌پالایی در جدول ۷ قابل مشاهده است. نتایج حاکی از بیشتر بودن BCF نسبت به BAC است که نشان‌دهنده تجمع بیشتر کادمیوم در ریشه نسبت به آن در اندام‌هوایی می‌باشد. بیشترین BAC و BCF در هر دو سطح آلودگی ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم در تیمار کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA و کمترین مقادیر این شاخص‌ها در تیمار عدم کاربرد NTA دیده شد. این نتایج به دلیل کاهش کارایی گیاه‌پالایی و تجمع کمتر فلز کادمیوم در اندام‌های گیاهی در تیمارهای عدم کاربرد NTA مشاهده گردید. مقدار BAC و BCF بالاتر نشانه توانایی بیشتر گیاه در تجمع فلزات سنگین است (Alaboudi *et al.*, 2018).

جدول ۷- مقادیر میانگین مربعات تأثیر افزایش غلظت NTA مورد استفاده بر شاخص‌های گیاه‌پالایی.

تیمارها	BAC ضریب تجمع زیستی	BCF فاکتور غلظت زیستی	TF فاکتور انتقال	TI شاخص تحمل
Cd0	۰/۰۴ c	۰/۶۱ c	۰/۰۷ b	۰/۹۸a
Cd25	۲/۱۷ b	۶/۱۶ b	۰/۳۴ a	۰/۹۰b
Cd50	۲/۴۹ a	۶/۸۶ a	۰/۳۹ a	۰/۸۴c
NTA0	۰/۸۲ c	۲/۷۳ c	۰/۲۱ b	۱ a
NTA15	۱/۵۳b	۴/۵۶ b	۰/۲۶ b	۰/۹۱ b
NTA30	۲/۳۴a	۶/۳۳ a	۰/۳۲a	۰/۸۰ c
Cd0NTA0	۰/۰۰۶ g	۰/۳۲ f	۰/۰۲ c	۱ a
Cd0NTA15	۰/۰۵ g	۰/۶۸ f	۰/۰۹ c	۰/۹۷ ab
Cd0NTA30	۰/۰۸ g	۰ /۸۴ f	۰ /۱ c	۰/۹۶ ab
Cd25NTA0	۱/۱۷ f	۳/۹۶ e	۰/۲۹ b	۱ a
Cd25NTA15	۱/۹۹ d	۵/۷۱d	۰/۳۴ b	۰/۹۳ b
Cd25NTA30	۳/۳۵ b	۸/۸۰b	۰ /۳۸ b	۰/۷۸ d
Cd50NTA0	۱/۳۱ e	۳/۹۱ e	۰/۳۳ b	۱ a
Cd50NTA15	۲/۵۶ c	۷/۲۹ c	۰/۳۵ b	۰/۸۵ c
Cd50NTA30	۳/۶۱ a	۹/۳۷ a	۰/۴۶ a	۰/۶۷ e

***حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است.**

(BAC: ضریب تجمع زیستی، BCF: فاکتور غلظت زیستی، TF: فاکتور انتقال، TI: شاخص تحمل گیاه)

www.SID.ir

Archive of SID

مقایسه میانگین تأثیر اثر متقابل سطوح کادمیوم و NTA نشان داد که TF در سطح آلودگی ۵۰ میلی-گرم کادمیوم نسبت به ۲۵ میلی‌گرم در حضور ۳۰ میلی‌مول NTA بصورت معنی‌داری بیشتر بود. در سطح آلودگی ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم، کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA نسبت به عدم کاربرد آن توانست TF را بصورت معنی‌داری از ۰/۳۳ به ۰/۴۶ افزایش دهد. در صورتی که در سطح آلودگی ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم با کاربرد NTA افزایش معنی‌داری در TF مشاهده نگردید (جدول۷). مطالعات Yin و همکاران (۲۰۱۵) بر فاکتور انتقال TF کادمیوم با استفاده از دو کلات‌کننده EDTA و NTA در گیاه *Boehmeria nivea (L.)* نشان دادند که غلظت کادمیوم در اندام‌هوایی در تیمار NTA بیشتر از شاهد (عدم کاربرد NTA) بود، در حالی که غلظت کادمیوم در ریشه تحت تأثیر تیمار NTA دارای مقداری کمتر از شاهد بود. نتایج آن‌ها حاکی از اثر مثبت NTA در افزایش انتقال کادمیوم از ریشه به اندام‌هوایی گیاه بوده است و آن‌ها گزارش نمودند که EDTA در جذب و انتقال کادمیوم مؤثرتر از NTA عمل کرده است. همچنین نتایج مقایسه میانگین شاخص تحمل TI تحت تأثیر تیمار آلودگی کادمیوم و NTA مصرفی قرار گرفت و TI در مقایسه با تیمار شاهد کاهش معنی‌داری داشت. بطوری که این شاخص در تیمار ۲۵ و ۵۰ میلی‌گرم کادمیوم با کاربرد ۳۰ میلی‌مول NTA نسبت به شاهد به ترتیب ۲۲ و ۳۳ درصد کاهش نشان داد (جدول ۷).

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با افزایش سطوح کادمیوم و سمیت آن، وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه کاهش یافته ولی با این وجود گیاه ذرت توانست از طریق افزایش آب درون بافتی نسبت به شرایط تنش تا حدودی مقاومت کند و وزن تر ریشه و اندام هوایی کاهش کمتری نسبت به تیمار عدم آلودگی نشان دهد. در واقع یکی از استراتژی گیاهان در مقابله با تنش آلودگی فلزات سنگین افزایش رشد سیستم ریشه‌ای است که در این صورت ریشه آب و مواد غذایی بیشتری جهت رشد گیاه جذب می‌نماید و با افزایش در نسبت وزن خشک بر وزن تر با شرایط استرس فلزات سنگین مقابله می‌کند و با این کار غلظت فلزات سنگین رقیق می‌گردد. از آنجا که فلزات سنگین در کلروفیل‌سازی اخلال ایجاد می‌کنند و از طرفی در میزان کلروفیل و نرخ فتوسنتز برگ و رشد گیاه ارتباط مستقیمی وجود دارد، بنابراین با افزایش کادمیوم در بیومس گیاه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و بطور کلی عملکرد گیاه کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر برخی علائم مانند کاهش سبزی و میزان کلروفیل برگ گیاه در آلودگی بالای کادمیوم (۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و نرخ حداکثر NTA بکار برده شده (۳۰ میلی‌مول در هر گلدان) ظهور نمود. در حالی که در سطح آلودگی ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم و با کاربرد ۱۵ و ۳۰ میلی‌مول NTA، کاهش معنی‌داری در شاخص کلروفیل با تیمارهای شاهد دیده نشد. لذا توجه به مقدار مصرف کلات‌کننده در سطوح آلودگی مختلف و همچنین توجه به نوع گیاه امری ضروری به نظر می-رسد. از آنجا که گیاهان مناسب جهت گیاه‌پالایی می-توانند حدود ۱۰۰ میلی‌گرم یا بیشتر از کادمیوم در هر کیلوگرم ماده خشک را با حداقل خطر و آسیب در گیاه تحمل کنند (Li *et al.*, 2018)، به نظر می‌رسد گیاه ذرت به دلیل تولید بیومس بالا، در سطح آلودگی ۲۵ میلی‌گرم کادمیوم و کاربرد ۳۰

www.SID.ir

Archive of SID

میلی‌مول NTA در شرایط آبشویی خاک با حداقل کاهش عملکرد بصورت موفقی در پالایش کادمیوم خاک مؤثر می‌باشد.

نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت کادمیوم در ریشه بالاتر از اندام‌هوایی است. که این می‌تواند به دلیل استراتژی گیاه جهت محدود کردن انتقال فلزات از ریشه به بخش‌های هوایی در مواجهه با استرس فلزات سنگین باشد. مقادیر تجمع کادمیوم در اندام-هوایی و ریشه (BAC و BCF) حاکی از بیشتر بودن تجمع کادمیوم در ریشه نسبت به اندام‌هوایی است. همچنین با افزایش سطح آلودگی کادمیوم TF افزایش و TI کاهش یافت. بطور کلی، گونه‌های گیاهی با TF<۱ حذف‌کننده (Excluders) هستند، در حالی که در انباشتگرها (Accumulators) و بیش انباشتگرها (Hyperaccumulators) TF>۱ است (Yin *et al.*, 2015). مطابق مطالعه حاضر جدول ۷، گیاه ذرت در همه تیمارها دارای TF<۱ است و این مؤید این مطلب است که گیاه ذرت گیاه انباشتگر نیست؛ بلکه حذف کننده است و اهمیت استفاده از گیاه ذرت در گیاه‌پالایی فلزات سنگین به دلیل تولید بیومس بالا می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان‌داد که استفاده از NTA به عنوان یک کلات-کننده طبیعی و دوستدار محیط زیست در گیاه‌پالایی توسط ذرت در خاک‌های آهکی ایران که دارای کربنات کلسیم بالایی هستند مؤثر بوده و NTA بصورت موفقی بر افزایش انحلال و جذب فلز کادمیوم و افزایش کارایی گیاه‌پالایی در آلودگی‌های سطوح پایین‌تر (۲۵ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک) بدون کاهش جدی در شاخص‌های رشدی گیاه در شرایط آبشویی خاک عمل می‌کند.

References

Alaboudi, K.A., Ahmed, B., Brodie, G., 2018. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. Annals of Agricultural Sciences 63,123–127.

Anning, A.K., Akoto, R., 2018. Assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with Typha latifolia and Chrysopogon zizanioides. Ecotoxicology and Environmental Safety 148, 97-104.

Bai, W., 2018. Effects of application of NTA and EDTA on accumulation of soil heavy metals in chrysanthemum. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 113, 012175.

Brennan, R.F., Armour, J.D., Reuter, D.J., 1993. Diagnosis of zinc deficiency. In A.D. Robson (Ed.) Zinc in Soils and Plants, P206. Springer, Netherlands. pp. 167-181.

Carter, M.R., Gregorich, E.G., 2008. Soil sampling and methods of analysis (2nd ed). CRC Press. Boca Raton. FL. 1204 p.

Day, P.R., 1982. Particle fractionation and particle-size analysis. In Methods of soil analysis. Page, A.L., R.H. Miller, D.R. Keeney (Ed.). American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp: 935-951.

Fotovat, A., 2018. Heavy metals in soils. Alloway, B.J. (Eds.). Ferdowsi University Press, Mashhad. 704 p. (in Persian).

Amin, H., Arain, B.A., Jahangir, T.M., Abbasi, M.S., Amin, F., 2018. Accumulation and distribution of lead (Pb) in plant tissues of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.): profitable phytoremediation with biofuel crops. Geology, Ecology, and Landscapes 2, 51-60.

www.SID.ir

Archive of SID

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.

Guo, D., Ali, A., Ren, C., Du, J., Li, R., Lahori, A.H., Xiao, R., Zhang, Z., Zhang, Z., 2019. EDTA and organic acids assisted phytoextraction of Cd and Zn from a smelter contaminated soil by potherb mustard (Brassica juncea, Coss) and evaluation of its bioindicators. Ecotoxicology and Environmental Safety 167, 396-403.

Karimi, R., Chorom, M., Solhi, S., Solhi, M., Safe, A., 2012. Potential of *Vicia faba* and *Brassica arvensis* for phytoextraction of soil contaminated with cadmium, lead and nickel. African Journal of Agricultural Research 7, 3293-3301.

Li, X., Zhang, X, Wu, Y., Li, B., Yang, Y. 2018. Physiological and biochemical analysis of mechanisms underlying cadmium tolerance and accumulation in turnip. Plant Diversity 40, 19-27.

Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1979. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society America Journal 42, 421-428.

Loppert, R.H., Suarez, D.L., 1996. Carbonate and gypsum. In: D. L. Sparks et al. (Ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3, SSSA, ASA, Madison, WI. pp 437-474.

Mananze, S.E., Pocas, I., Cunha, M., 2018. Maize leaf area estimation in different growth stages based on allometric descriptors. African journal of agricultural research 13, 202-209.

Mertens, J., Vervaeke, P., Meers, E., Tack, F.M.G., 2006. Seasonal changes of metals in willow (*Salix sp.*) stands for phytoremediation on dredged sediment. Journal of Environmental Science and Technology 40, 1962-1968.

Miller, G., Davis, C., Begonia, G., Begonia, M., 2016. Metal Uptake, Growth Responses, and Chlorophyll Production of Wheat (*Triticum aestivum*) Exposed at Different Durations to Chelate-Amended Cadmium-Contaminated Soils. World Environment 6, 10-18.

Mulligan, C.N., R. N. Yong, and B. F. Gibbs. 2001. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: An evaluation. Engineering Geology 60, 193-207.

Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Circ. 939. U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Ozkan, A., Gunkaya, Z., Banar, M., 2016. Pyrolysis of plants after phytoremediation of contaminated soil with lead, cadmium and zinc. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 96, 415-419.

Sharma, S., Prasad, F.M., 2010. Accumulation of Lead and Cadmium in soil and vegetable crops along major highways in Agra (India). Electronic Journal of Chemistry 7, 1174-1183.

Soleimani, M., Hajabbasi, M.A., Afyuni, M., Akbar, S., Jensen, J.K., Holm, P.E., Borggaard, O.K. 2010. Comparison of natural humic substances and synthetic ethylenediaminetetraacetic acid and nitrilotriacetic acid as washing agents of a heavy metal polluted soil. Journal of Environmental Quality 39, 855-862.

Song, Y., Ammami, M.T., Benamar, A., Mezazigh, S., Wang, H., 2016. Effect of EDTA, EDDS, NTA and citric acid on electrokinetic remediation of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn contaminated dredged marine sediment. Environmental Science and Pollution Research 23, 10577-10586.

Soon, Y.K., Abboud, S., 1993. Cadmium, chromium, lead and nickel. Soil sampling and method of analysis. Lewis Publishers, pp. 103-107.

Sumner, M.E., Miller, W.P., 1996. Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In D.L. Sparks (ed.), Methods of soil analysis. p1320. Part 2: Chemical properties, (3rd ed.) ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI, pp. 1201-1231.

Tian, S., Jia, Y., Ding, Y., Wang, R., Feng, R., Song, Z., Guo, J., Zhou, L., 2014. Elevated atmospheric CO_2 enhances copper uptake in crops and pasture species grown in copper-contaminated

www.SID.ir

Archive of SID

soils in a micro-plot study. Clean-Soil, Air, Water 42, 347-354.

Walkley, A., Black, I.A., 1934. Review examination of the degtjareff method determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Journal of Soil Science 34, 29-38.

Wu, J., Hsu, F., Cunningham, S., 1999. Chelate–assisted Pb phytoextraction: Pb availability, uptake and translocation constrains. Environmental Science and Technology 33, 1898-1904.

Yin, Y., Wang, Y., Liu, Y., Zeng, G., Hu, X., Hu, X., Zhou, L., Guo, Y., Li. J,. 2015. Cadmium accumulation and apoplastic and symplastic transport in *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich on cadmium-contaminated soil with the addition of EDTA or NTA. RSC Advances 5, 47584-47591.

Zhang, L., Zhang, L., Song, F., 2008. Cadmium uptake and distribution by different maize genotypes in maturing stag. Communications in Soil Science and Plant Analysis 39, 1517-1531.

Zhao, S., Jia, L., Duo, L., 2016. Combining nitrilotriacetic acid and permeable barriers for enhanced phytoextraction of heavy metals from municipal solid waste compost by lolium perenne and reduced metal leaching. Journal of Environmental Quality 45, 933-939.

Zhou, J.M., Dang, Z., Chen, N.C., Xu, S.G., Xie, Z.Y., 2007. Influence of NTA on accumulation and chemical form of copper and zinc inmaize. Journal of Agro-Environment Science 26, 453-457.

www.SID.ir