

## اثر شوری و خاک آلوده به فاضلاب بر جذب کادمیوم توسط گیاه ذرت

الهام فتحی دره نیجه<sup>۱\*</sup>، مسعود پارسی نژاد<sup>۲</sup>، فرهاد میرزایی<sup>۳</sup>، بابک متشع زاده<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

۴. دانشیار، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۴/۲۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۶/۲۱)

### چکیده

آلودگی محیط‌زیست توسط فلزات سنگین، به‌ویژه آلودگی خاک با کادمیوم، یکی از چالش‌های محیط‌زیست محسوب می‌شود. در این پژوهش از روش گیاه‌پالایی جهت اصلاح یک خاک آلوده به کادمیوم همراه با شوری استفاده شد. این مطالعه در دو سطح شوری آب آبیاری (۰ و ۳ دسی‌زیمنس بر متر) و سه سطح آلودگی خاک (۰ و ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم در کیلوگرم خاک و نسبت یک به یک خاک و خاک آلوده به فاضلاب) اجرا شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. گیاه ذرت به‌عنوان جاذب کادمیوم انتخاب گردید. گیاهان قبل از رسیدن به مرحله زایشی برداشت شدند. شاخص‌های عملکرد، غلظت و جذب کادمیوم به‌عنوان پاسخ‌های گیاهی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که شوری آب آبیاری بر غلظت و جذب کادمیوم در گیاه ذرت اثر معنی‌داری داشته و باعث افزایش غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت به میزان ۵۲ درصد شد؛ اما در تیمار شوری علی‌رغم افزایش غلظت کادمیوم در گیاه، میزان جذب کادمیوم کاهش یافت که ناشی از کاهش وزن خشک گیاه نسبت به تیمار شاهد بود. تیمار خاک آلوده به فاضلاب نیز موجب کاهش عملکرد گیاه شد، اما در این تیمار به علت افزایش شوری و کاهش اسیدیته خاک، حلالیت کادمیوم در خاک افزایش پیدا کرد، در نتیجه غلظت کادمیوم در ریشه به میزان ۱۵ درصد نسبت به تیمار آلوده به کادمیوم افزایش نشان داد و این افزایش در اندام هوایی حدود ۱۲ درصد بود. بر این اساس شوری آب آبیاری می‌تواند میزان جذب آلاینده کادمیوم توسط گیاه را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی خاک، فلزات سنگین، فراهمی، جذب، گیاه پالایی

### مقدمه

شوری خاک و آلودگی آن با فلزات سنگین، دو مشکل اساسی در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک جهان هستند (Khoshgoftarmanesh et al., 2006). در سال‌های اخیر، استفاده از لجن فاضلاب به دلیل ارزان بودن به‌عنوان کود در اراضی کشاورزی رواج یافته است. لجن فاضلاب دارای مواد آلی و غیر آلی و مواد مغذی فراوان، باکتری‌ها و ریز جانداران و عناصر سنگین می‌باشد. لجن فاضلاب سرشار از مواد مغذی بوده و به همین دلیل می‌تواند جایگزین کودهای گران‌قیمت شود. اما به‌رغم جنبه‌های مفید لجن فاضلاب به‌عنوان کود آلی، به دلیل وجود مقادیر نسبتاً زیاد فلزات سنگین، کاربرد آن در کشاورزی مشکل‌ساز است و باعث انباشته شدن بیش از حد فلزات سنگین مانند کادمیوم، سرب، مس و روی در خاک می‌گردد (Wong and Selvam, 2005).

روش‌های مختلفی برای ترمیم و اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارند که در این بین روش‌های تثبیت، شستن خاک و گیاه‌پالایی به‌عنوان بهترین روش‌ها شناخته شده‌اند. گیاه‌پالایی که به آن پالایش سبز نیز گفته می‌شود، به‌عنوان یک روش پالایش درجا شناخته شده است که از گیاهان برای اصلاح خاک‌های آلوده استفاده می‌کند (Willey, 2007). مقدار فلزات سنگین در گیاه، بستگی به زیست‌فراهمی و در دسترس بودن این عناصر برای گیاه دارد. اسیدیته و شوری خاک، مقدار مواد آلی، مقدار کلرید خاک از عواملی هستند که در تحرک فلزات سنگین موجود در خاک مؤثر هستند (Laing et al., 2008).

با افزایش شوری، پویایی فلزات سنگین در خاک نیز افزایش پیدا می‌کند. دو سازوکار مهم در این فرآیند نقش دارند که یکی ظرفیت کاتیون‌ها و دیگری رقابت آن‌ها در جذب توسط ریشه می‌باشد، به این معنی که شوری به دلیل جابجایی کاتیون

است. Gu *et al.* (2013) تحقیقی را با هدف بررسی اثر خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب بر جذب فلزات سنگین و رشد گیاه Ryegrass در مرحله جوانه‌زنی انجام دادند. نتایج نشان داد که تیمارهای لجن فاضلاب دسترسی فلزات را در خاک افزایش داده و متعاقباً سبب افزایش تجمع این فلزات در گیاه شده است. در واقع نتایج حاکی از افزایش غلظت فلزات (کادمیوم، نیکل، مس، روی، منگنز و کروم) در ریشه و اندام هوایی گیاه در تیمارهای لجن فاضلاب نسبت به تیمار شاهد بوده است. اما افزایش تجمع فلزات سبب جلوگیری از رشد گیاه نشده است، به طوری که وزن تر ریشه و اندام هوایی گیاه در تیمارهای لجن فاضلاب نسبت به تیمار شاهد افزایش پیدا کرده است. لذا تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر شوری، کادمیوم و خاک آلوده به فاضلاب بر جذب کادمیوم توسط گیاه ذرت اجرا گردید.

### مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر برای یک فصل زراعی در سال ۱۳۹۳ در مزرعه پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج انجام شد. موقعیت جغرافیایی محل آزمایش در طول جغرافیایی ۵۹°۵۰' شرقی، عرض جغرافیایی ۴۸°۳۵' شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۳۷ متر واقع است. تحقیق به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲ فاکتور شامل دو سطح شوری آب آبیاری ۰ و ۳ دسی‌زیمنس بر متر (به ترتیب A1 و A2) و سه سطح آلودگی خاک که شامل خاک بدون آلودگی (B1)، خاک آلوده به ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم (B2) و آلودگی خاک با فاضلاب که برای این منظور از یک خاک زراعی که به مدت چند فصل زراعی تحت آبیاری با فاضلاب قرار داشت، استفاده شد و چون آنالیز خاک مذکور نشان‌دهنده پایین بودن آلاینده کادمیوم بود، لذا این خاک به صورت مصنوعی با ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم آلوده گردید و به نسبت یک به یک جرمی با خاک مزرعه مخلوط گردید (B3). این آزمایش با سه تکرار و در مجموع با ۱۸ نمونه انجام شد. غلظت ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم چند برابر حد مجاز کادمیوم در خاک یعنی مقدار ۱ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک (Cariny, 1995) می‌باشد. خاک مورد آزمایش پس از عبور دادن از الک دو میلی‌متری به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، تعیین بافت و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن قبل از اعمال تیمار تعیین گردید. اندازه‌گیری نیتروژن کل خاک به روش کج‌دلال (Bremner, 1996)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Kou, 1996)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم نرمال (Hemke & Sparks, 1996) و کادمیوم قابل

موجود در نمک با کادمیوم در سطح رس‌ها، سبب افزایش تحرک یون کادمیوم توسط آنیون موجود در نمک می‌گردد (Paalman *et al.*, 1994).

Dar *et al.* (2011) در یک آزمایش گلخانه‌ای به بررسی اثر شوری و کود روی بر حلالیت کادمیوم و روی خاک و غلظت آن‌ها در ریشه گندم پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در شوری‌های بالا با اینکه مقدار ماده خشک تولیدی گیاه کاهش می‌یابد، اما غلظت کادمیوم در محلول خاک و ریشه گندم افزایش پیدا می‌کند. شوری خاک، به‌ویژه افزایش غلظت لیگاندهای کلرید محلول (Cl<sup>-</sup>)، به طور قابل توجهی حلالیت در نتیجه زیست‌فراهمی و جذب کادمیوم توسط گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Wegler *et al.*, 2004). از همین رو محصولاتی که در خاک‌های شور رشد می‌کنند، با افزایش جذب کادمیوم سبب افزایش ورود کادمیوم به زنجیره غذایی انسان می‌شوند. Acosta *et al.* (2011) اثرات شوری ناشی از نمک‌های NaCl، MgCl<sub>2</sub>، CaCl<sub>2</sub> و Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> روی تحرک کادمیوم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که افزایش شوری سبب افزایش پویایی فلزات سنگین در خاک می‌شود. افزایش در تحرک به نوع، مقدار کل فلز سنگین و نوع نمکی که باعث شور شدن خاک می‌شود، بستگی دارد. Chai *et al.* (2013) تحقیقی را برای بررسی اثر NaCl بر روی جذب کادمیوم توسط گیاه *Spartina alterniflora* انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که NaCl در تیمار تنش کادمیوم یک میلی‌مولار موجب افزایش جذب و فاکتور انتقال یون کادمیوم از ریشه به اندام هوایی گیاه شده است.

اضافه کردن لجن فاضلاب به زمین‌های کشاورزی که حاوی مقداری فلزات سنگین نیز هستند، سبب افزایش مقدار و زیست‌فراهمی این فلزات در خاک برای انتقال به گیاهان می‌شود. زیست‌فراهمی در خاک به پیوند شیمیایی بین یک فلز با مواد آلی و بافت خاک، pH خاک، غلظت عناصر در خاک و توانایی گیاه برای تنظیم جذب یک عنصر خاص بستگی دارد (Smith, 2009). Chorom and Aghaei (2007) طی پژوهشی به بررسی اثر کاربرد لجن فاضلاب تصفیه شده بر روی خصوصیات خاک، جذب فلزات سنگین و عملکرد گیاه جو پرداختند. نتایج نشان داد که لجن فاضلاب شوری، ماده آلی، نیتروژن، فسفر، کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول به جز بی‌کربنات و غلظت قابل جذب کادمیوم را به صورت معنی‌داری افزایش داده است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که لجن فاضلاب سبب افزایش کادمیوم در علوفه گیاه به صورت معنی‌داری شده

ذرت به روش هضم خشک (Gorsuch, 1970) آماده شد و غلظت کادمیوم با دستگاه جذب اتمی مدل شیمادزو-۶۷۰ اندازه‌گیری شد. مقدار جذب کادمیوم از حاصل ضرب غلظت کادمیوم در ماده خشک گیاه محاسبه گردید ( Bianconi et al., 2013). برای تجزیه داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS 9.2 و برای رسم نمودارها از Excel استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵٪ انجام شد.

### نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش در جدول شماره (۱) ارائه شده است. خاک مزرعه دارای بافت لوم رسی بوده و شوری خاک و غلظت اولیه کادمیوم مقادیر بسیار پایینی را نشان می‌دهند که به ترتیب برابر با ۱/۵ dS/m و ۰/۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک می‌باشند که این مسئله خطای ناشی از مقادیر اولیه این دو عامل در انجام آزمایش را به حداقل می‌رساند و میزان اسیدیته آن نیز برای رشد گیاهان مناسب است. البته مقدار شوری مجاز در خاک در حالتی که برای رشد گیاهان زراعی مشکلی ایجاد نکند، حدود ۱/۷ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار کادمیوم مجاز در خاک حدود ۱ تا ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است. مقدار رطوبت ظرفیت زراعی و چگالی ظاهری خاک گلدان نیز به ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۱/۴۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

آبی که در این آزمایش برای آبیاری تیمارهای شاهد مورد استفاده قرار گرفت، به ترتیب دارای هدایت الکتریکی و اسیدیته ۰/۴ دسی‌زیمنس بر متر و ۷/۳۸ می‌باشد. همچنین مقدار باقی‌مانده خشک و سختی کل آن به ترتیب برابر با ۶۵۲ و ۴۰۳ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. برای ایجاد آب شور نیز مقدار نمک مورد نیاز محاسبه و به آب اضافه گردید تا شوری آن به میزان ۳ دسی‌زیمنس بر متر برسد.

جدول ۱. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

مقدار	مشخصه	مقدار	مشخصه
۰/۱۱	نسبت نیتروژن کل (%)	Clay Loam	کلاس بافت خاک
۷۶	فسفر قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> )	۳۱	درصد رس
۵۲۰	پتاسیم قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> )	۳۶	درصد سیلت
۰/۷۲	کربن آلی (درصد)	۳۳	درصد شن
۱/۴۴	وزن مخصوص ظاهری (g.cm <sup>-3</sup> )	۰/۳۶	ظرفیت زراعی (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )
۱۰/۵	کربنات کلسیم معادل (%)	۷/۸	pH
۰/۱۳	کادمیوم (mg.kg <sup>-1</sup> )	۱/۵	شوری (dS.m <sup>-1</sup> )

استخراج با روش DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) صورت گرفت. به منظور شوری آب آبیاری، ابتدا مقدار نمک مورد نیاز برای رسیدن به شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر از رابطه زیر محاسبه گردید و سپس به آب آبیاری اضافه گردید.

$$TDS=640 EC$$

در این رابطه EC شوری آب آبیاری بر حسب دسی‌زیمنس بر متر و TDS مقدار کل جامدات محلول آب بر حسب میلی‌گرم در لیتر می‌باشد.

آلوده کردن خاک با کادمیوم، با استفاده از نمک نیترات کادمیوم Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O به صورت اسپری کردن محلول بر روی تمام قسمت‌های خاک انجام شد. نمک نیترات کادمیوم علاوه بر کادمیوم، حاوی نیترات نیز می‌باشد، بنابراین برای اضافه کردن مقدار ۲۰ میلی‌گرم کادمیوم به خاک از جرم مولی نمک نیترات کادمیوم که برابر با ۳۰۸/۴۷ گرم بر مول است، استفاده گردید. پس از ایجاد آلودگی در خاک، خاک‌ها به کیسه‌های پلاستیکی بدون زهکش منتقل شدند و به منظور رسیدن به تعادل یونی به مدت دو هفته درون این کیسه‌ها و در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۳ درصد نگهداری شدند تا برهمکنش آلاینده‌ها و خاک تکوین یافته و شرایط آلودگی طبیعی‌تر شود (Huang et al., 2009). خاک آلوده به فاضلاب نیز به مدت دو هفته هوا خشک شد. سپس به طور کامل آن را کوبیده و از الک دو میلی‌متری عبور داده و برای انجام تجزیه‌های اولیه آماده شد. سپس لجن فاضلاب به نسبت یک به یک جرمی به خاک اضافه شد و به طور کامل با خاک مخلوط گردید. در نهایت خاک‌ها جهت کشت به داخل گلدان‌ها منتقل شدند. پس از آماده شدن خاک به گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۲۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر منتقل شدند. در تحقیق حاضر از گیاه ذرت با نام علمی *Zea mays* با رقم هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ (SC704) استفاده شد که از موسسه تحقیقات اصلاح نهال و بذر کرج تهیه گردید. در طول دوره رشد، آبیاری جهت نگهداری رطوبت در حد ۸۰ درصد ظرفیت زراعی به روش توزین انجام گردید. برای اعمال سطوح شوری آب آبیاری، سطح شوری سه دسی‌زیمنس بر متر، به صورت مصنوعی و با اضافه کردن نمک NaCl به آب آبیاری اعمال گردید. بدین منظور آبیاری‌ها به دو سطح بدون شوری و شوری ۳ دسی‌زیمنس بر متر تا پایان دوره رشد گیاه انجام شد. پس از ۹۰ روز از شروع کشت، برداشت گیاه از محل طوقه انجام شده و ریشه‌ها با آب مقطر شستشو و وزن تر، وزن خشک و ارتفاع اندام هوایی و ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها جهت انجام تجزیه شیمیایی آسیاب گردیده و عصاره گیاهی

هوایی و ریشه ذرت در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است. همچنین اثر شوری آب آبیاری بر غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت معنی‌دار شده است. تاثیر آلودگی خاک بر ارتفاع و وزن تر ریشه گیاه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است. همچنین تاثیر آلودگی خاک بر غلظت و جذب کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه معنی‌دار شده است. بر هم کنش دو تیمار شوری و آلودگی خاک روی غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است.

تأثیر سطوح شوری آب آبیاری بر صفات گیاهی ذرت در شکل شماره (۱) و (۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل شماره (۱) و (۲)، مشاهده می‌شود که تمام صفات گیاهی ذرت شامل ارتفاع، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه ذرت با افزایش شوری آب آبیاری در سطح احتمال ۵ درصد کاهش معنی‌دار پیدا کرده‌اند، به عبارت دیگر کاهش وزن تر و خشک گیاه متناسب با شوری آب آبیاری بود. وزن تر اندام هوایی نسبت به شوری در مقایسه با سایر صفات حساس‌تر بود و حدود ۶۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش نشان داد. همچنین وزن خشک اندام هوایی، ریشه و ارتفاع گیاه نیز در تیمار شوری حدود ۵۶ درصد کاهش یافت. شوری با تأثیر بر رطوبت قابل دسترس خاک، اختلال در جذب آب به‌وسیله گیاه، عدم تعادل یونی و در دسترس بودن مواد غذایی مانند فسفر، روی رشد گیاه اثر معکوس دارد و سبب کاهش فتوسنتز در گیاه می‌شود (Al-Karaki, 2000)؛ به عبارت دیگر شوری سبب کاهش وزن گیاه از طریق کوچک‌تر شدن برگ‌ها، کوتاه‌تر شدن و نازک شدن بافت گیاه می‌شود. نتیجه فرآیندهای فوق بر اثر تنش شوری، کاهش قابل توجه وزن تر و خشک برگ‌ها، ساقه و کل گیاه است (Parida and Das, 2005).

در جدول شماره (۲) برخی مشخصات فیزیکی-شیمیایی خاک آلوده به فاضلاب مورد استفاده و همچنین نتایج تاثیر خاک آلوده به لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های خاک آورده شده است. پس از تجزیه شیمیایی خاک آلوده به فاضلاب، مقادیر فلزات سنگین آن مشخص شد و پس از ترکیب با خاک مزرعه، غلظت کادمیوم خاک از ۰/۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به صورت مصنوعی به ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم رسانیده شد. مقدار EC و pH مطابق با استانداردهای معمول که از عصاره اشباع تهیه می‌گردد، استخراج شده است.

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک آلوده به فاضلاب قبل و پس از ترکیب با خاک مزرعه

ویژگی	واحد	پس از ترکیب با خاک مزرعه	
		قبل از ترکیب با خاک مزرعه	پس از ترکیب با خاک مزرعه
pH	-	۸/۱	۷/۹
شوری	dS.m <sup>-1</sup>	۱/۷	۱/۸
ماده آلی	%	۱/۲	۰/۹
کادمیوم	mg.kg <sup>-1</sup>	۰/۴	۰/۲۲
روی	mg.kg <sup>-1</sup>	۱/۸۷	۱/۳۲
مس	mg.kg <sup>-1</sup>	۲/۴۷	۱/۸۳
نیکل	mg.kg <sup>-1</sup>	۱/۵۹	۱/۲
سرب	mg.kg <sup>-1</sup>	۱/۸۳	۱/۲۸

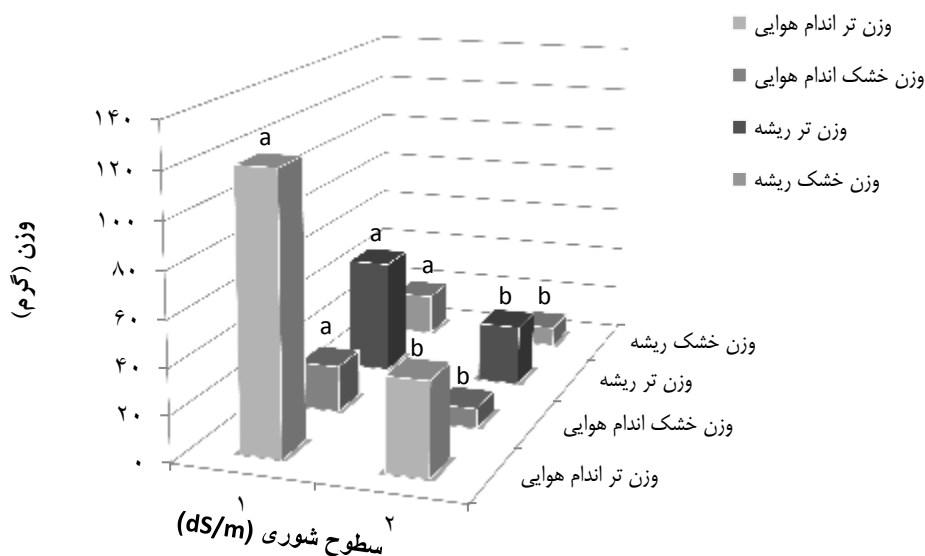
### تأثیر تنش شوری و خاک آلوده به کادمیوم بر عملکرد گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای آزمایشی بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، مقدار غلظت و جذب کادمیوم در گیاه ذرت در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول (۳)، اثر شوری آب آبیاری بر ارتفاع، وزن تر و خشک اندام

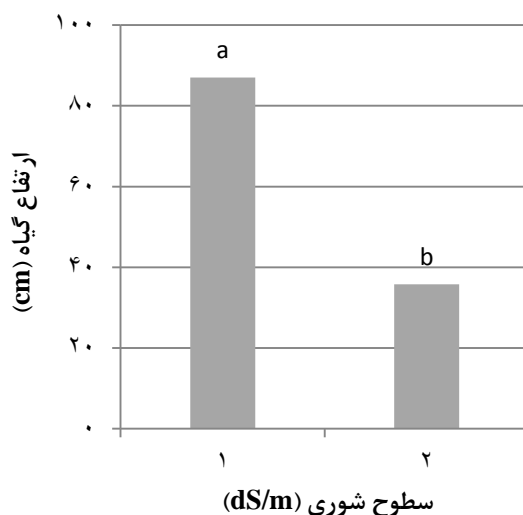
جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) صفات مورد مطالعه در گیاه ذرت

منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	وزن تر ریشه	میانگین مربعات				
						وزن خشک ریشه	غلظت کادمیوم در اندام هوایی	غلظت کادمیوم در ریشه	جذب کادمیوم در اندام هوایی	جذب کادمیوم در ریشه
شوری آب آبیاری	۱	۱۱۸۱۶/۹۶**	۲۸۵۲۰/۶۸**	۶۱۶**	۲۵۴۴/۲۲**	۴۲۹/۲۴**	۴۹/۸۶**	۵۰/۱۳۸**	۱۲۷۴/۳۱ <sup>ns</sup>	۲۳۹/۳۶ <sup>ns</sup>
آلودگی خاک	۲	۳۰۳/۹۳**	۱۲۲/۵۸ <sup>ns</sup>	۲/۴۸ <sup>ns</sup>	۳۰۲/۷۲**	۲/۱۸ <sup>ns</sup>	۱۴۵/۱۶**	۸۴۱/۵۲**	۲۳۰۴۵/۶۹**	۱۱۲۸۹۰**
شوری*آلودگی	۲	۴۳/۵۲ <sup>ns</sup>	۳۲/۴۸ <sup>ns</sup>	۱/۱۴ <sup>ns</sup>	۷/۲۴ <sup>ns</sup>	۲/۷۴ <sup>ns</sup>	۱۲/۴۴**	۱۳۴/۸۹**	۲۹۵/۸۵ <sup>ns</sup>	۱۸۴۳/۱۵ <sup>ns</sup>
خطا	۱۲	۲۴/۲۹	۷۲/۰۵	۱۳/۰۵	۹/۶۹	۳/۰۸	۰/۳۴	۲/۳۲	۵۴۵/۹۲	۱۳۹۰/۰۶

مقایسه در هر ستون و برای هر صفت مستقل انجام گرفته و ns، \* و \*\* به ترتیب نشانگر عدم اختلاف معنی‌دار، اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ و ۱٪ است.



شکل ۱. تأثیر سطوح شوری آب آبیاری بر صفات گیاهی ذرت: وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه ذرت (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ است).



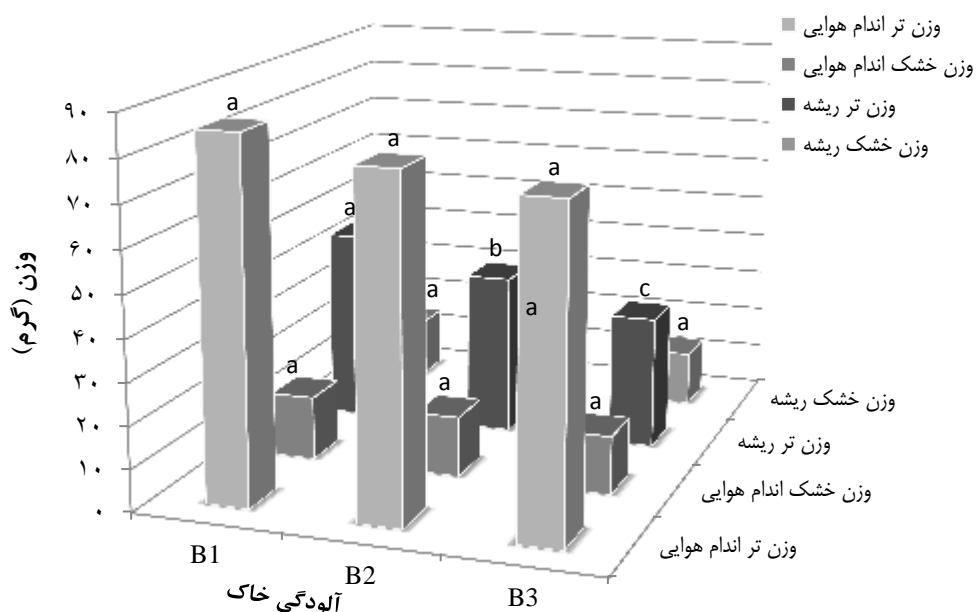
شکل ۲. تأثیر سطوح شوری آب آبیاری بر ارتفاع ذرت (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ است).

گرم با ۷ درصد کاهش به ۸۰ گرم در تیمار آلوده به کادمیوم رسیده است. علت کاهش وزن گیاه در خاک آلوده به کادمیوم را می‌توان به جذب بیشتر کادمیوم توسط گیاه نسبت داد که سمیت آن موجب اختلال در رشد شده است، به طوری که غلظت کادمیوم در اندام هوایی گیاه در تیمار شاهد و تیمار آلوده به کادمیوم از ۰/۱۰۸ به ۷/۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافته است و در ریشه گیاه نیز از غلظت ۱ به ۱۹/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم رسیده است. حضور کادمیوم منجر به کاهش سرعت رشد، تبخیر و تعرق و جذب یون توسط گیاه می‌شود و با کاهش جذب آب و غلظت سایر یونها، مانع از انجام فعالیت ریشه می‌گردد (Veselov et al., 2003). در حقیقت کادمیوم باعث

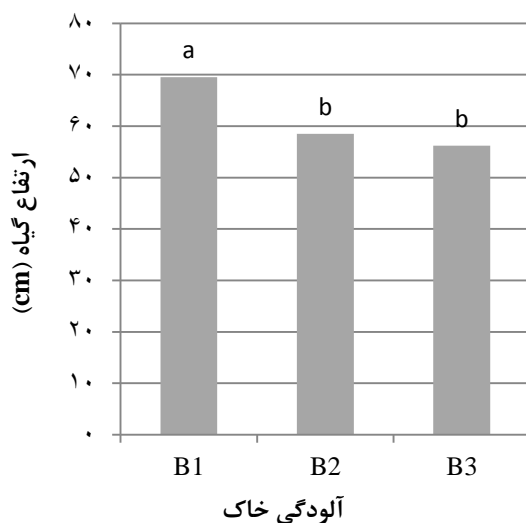
تأثیر تیمارهای آلودگی خاک بر وزن تر و خشک و ارتفاع گیاه ذرت در شکل (۳) و (۴) آورده شده است. با توجه به این دو شکل مشاهده می‌گردد که در خاک آلوده به کادمیوم، ارتفاع گیاه و وزن تر ریشه نسبت به تیمار شاهد، کاهش معنی‌داری داشته است. همچنین در خاک آلوده به ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، وزن تر اندام هوایی و وزن خشک ریشه نیز کاهش پیدا کرده است. در میان صفات اندازه‌گیری شده وزن تر ریشه و ارتفاع گیاه، نسبت به آلودگی کادمیوم در سطح ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نسبت به سایر صفات گیاهی حساس‌تر هستند و این صفات نسبت به تیمار شاهد، ۱۶ درصد کاهش یافته پیدا کرده‌اند. وزن تر اندام هوایی نیز در تیمار شاهد از ۸۶

نسبت به تیمار شاهد ۳۱ درصد کاهش داده و وزن تر گیاه از ۴۶ گرم در تیمار شاهد به ۳۱/۷ گرم در تیمار آلوده به فاضلاب رسیده است. وزن تر ریشه در تیمار آلوده به فاضلاب ۱۷/۵ درصد نسبت به تیمار آلوده به کادمیوم نیز کاهش یافته است. ارتفاع گیاه در تیمار آلوده به لجن فاضلاب کاهش ۱۹ درصدی نسبت به تیمار شاهد و کاهش ۴ درصدی نسبت به تیمار آلوده به کادمیوم داشته است. این کاهش عملکرد گیاه می‌تواند به دلیل غلظت بالای فلز سنگین کادمیوم موجود در خاک آلوده به فاضلاب باشد که سبب بروز تنش در گیاه شده و رشد گیاه را دچار اختلال می‌کند.

کاهش فعالیت هورمون سیتوکینین می‌شود که تأثیر به سزایی در تکثیر سلول و رشد گیاه دارد (Mok, 1994). Shafi *et al* (2010) به این نتیجه دست یافتند که تنش کادمیوم و نمک NaCl سبب کاهش وزن خشک ریشه و اندام هوایی گندم شد و به طور کلی تعداد ریشه‌های جانبی، طول کلی ریشه‌ها، میانگین قطر ریشه و حجم کلی ریشه‌ها را کاهش داده و سبب چوب پنبه‌ای شدن ریشه‌ها گردید. تیمار آلوده به لجن فاضلاب، صفات گیاهی اندازه‌گیری شده را نسبت به تیمار شاهد کاهش داده است. کاهش ارتفاع و وزن تر ریشه در این تیمار در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است. آلودگی فاضلاب، وزن تر ریشه را



شکل ۳. تأثیر آلودگی خاک بر صفات گیاهی ذرت: وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه ذرت (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است).



شکل ۴. تأثیر آلودگی خاک بر ارتفاع گیاه ذرت (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است).

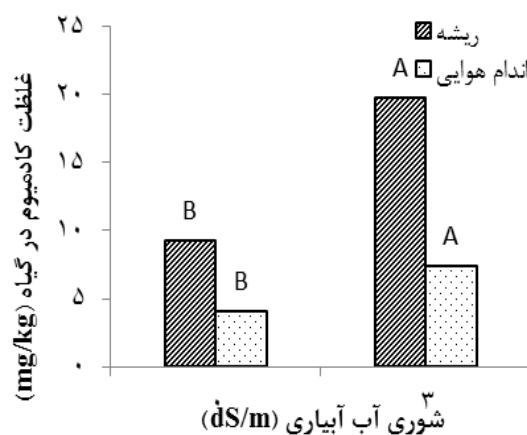
نتایج این آزمایش نشان داد که شوری آب آبیاری باعث افزایش غلظت کادمیوم در گیاه شده است. افزایش غلظت کادمیوم در گیاه می‌تواند ناشی از افزایش حلالیت کادمیوم بر اثر شوری باشد که توسط سایر محققان نیز تأیید شده است. افزایش NaCl باعث افزایش فشار اسمزی بر ریشه گیاه شده و موجبات افزایش جذب کادمیوم از محلول خاک را فراهم می‌آورد. کمپلکس‌های کلرید ناشی از کلرید سدیم با کادمیوم، جذب این فلزات سنگین به وسیله خاک را به طور چشمگیری کاهش و افزایش غلظت کادمیوم و کلر در فاز محلول می‌تواند فراهمی کادمیوم در خاک را افزایش دهد (Acosta et al., 2011). به عبارت دیگر سدیم موجود در نمک NaCl با یون کادمیوم موجود در سطح ذرات خاک ترکیب شده و تشکیل نمک کلرید کادمیوم را می‌دهد. در طی این فرآیند سدیم به ذرات خاک چسبیده و کادمیوم به صورت نمک کلرید کادمیوم در محلول خاک باقی‌مانده و به راحتی در دسترس گیاه قرار می‌گیرد.

مقدار جذب کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت از حاصل‌ضرب غلظت کادمیوم در عملکرد وزن خشک گیاه به دست می‌آید. نتایج مقایسه میانگین جذب کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای شوری آب آبیاری در شکل (۶) نشان داده شده است. با توجه به این شکل درمی‌یابیم که با افزایش شوری آب آبیاری، میزان جذب کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت کاهش پیدا کرده است، اما در عین حال سبب افزایش غلظت کادمیوم در گیاه شده است. در واقع اگرچه غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی گیاه با افزایش شوری افزایش یافته است، اما به دلیل کاهش وزن خشک گیاه در تیمارهای شوری آب آبیاری، میزان جذب کادمیوم نیز در این تیمارها کاهش یافته است. با توجه به شکل (۶)، میزان جذب در تیمار بدون شوری در اندام هوایی و ریشه ذرت به ترتیب ۸۱ و ۱۷۴/۸ میکروگرم در گلدان بوده است که در تیمار با هدایت الکتریکی ۳ دسی‌زیمنس بر متر به ۶۴/۲ و ۱۶۷ میکروگرم در گلدان کاهش پیدا کرده است. در حقیقت با افزایش شوری آب آبیاری، میزان جذب در اندام هوایی و ریشه ذرت به ترتیب ۲۰/۷ و ۵ درصد کاهش یافته است که این امر به دلیل کاهش محسوس وزن گیاه ذرت می‌باشد. با توجه به این نتایج می‌توان مشاهده کرد که میزان جذب کادمیوم در ریشه بیشتر از اندام هوایی است. کاهش انتقال کادمیوم از ریشه به اندام‌های هوایی می‌تواند ناشی از غیر متحرک شدن این عنصر در دیواره سلولی یا اتصال کادمیوم به ترکیبات آلی موجود در ریشه (فیتوکلاتین) باشد (Sanita and Gabrielli, 1999).

با توجه به این نتایج، کاهش وزن اندام هوایی و ریشه به عنوان اولین پاسخ فیزیولوژیکی به عوامل تنش‌زای محیط رشد در قالب کاهش ماده‌سازی مطرح است. Kang et al. (2010) نیز بیان کردند که با افزایش شوری آب آبیاری، زیست‌توده جوانه، ارتفاع، وزن تر و خشک ذرت مومی به ازای هر یک دسی‌زیمنس بر متر افزایش در میزان شوری آب آبیاری به میزان ۲ درصد کاهش یافته است که در این تحقیق نیز مشاهده می‌شود که با افزایش شوری آب آبیاری، میزان تولید محصول نیز کاهش پیدا کرده است. Chaab and Savaghebi (2010) نیز در پژوهشی به بررسی اثر کاربرد روی بر جذب کادمیوم توسط گیاه ذرت پرداختند و آن‌ها نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش کاربرد کادمیوم میزان وزن خشک ذرت کاهش پیدا می‌کند.

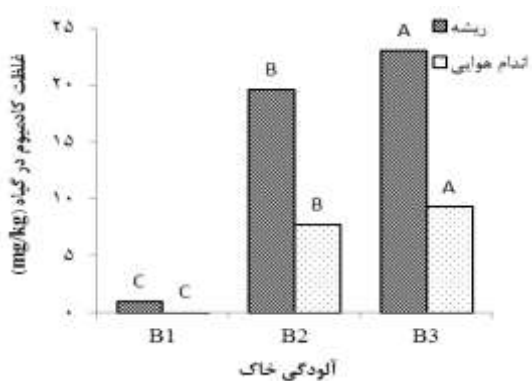
#### تأثیر شوری آب آبیاری بر غلظت کادمیوم در گیاه

تأثیر شوری آب آبیاری بر غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش شوری آب آبیاری، غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت به صورت معنی‌داری افزایش یافته است. غلظت کادمیوم در ریشه از ۹/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شاهد به ۱۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار شور افزایش یافته است، یعنی غلظت کادمیوم در این تیمار نسبت به تیمار شاهد، تقریباً دو برابر شده است. در اندام هوایی نیز غلظت کادمیوم در تیمار شور با افزایش ۴۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد، به ۷/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم رسیده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تمایل زیاد کادمیوم به تشکیل کمپلکس با کلر و همچنین بالا رفتن حلالیت فاز جامد کنترل‌کننده این عنصر به دلیل افزایش قدرت یونی باعث زیاد شدن قابلیت استفاده کادمیوم در خاک شده است.



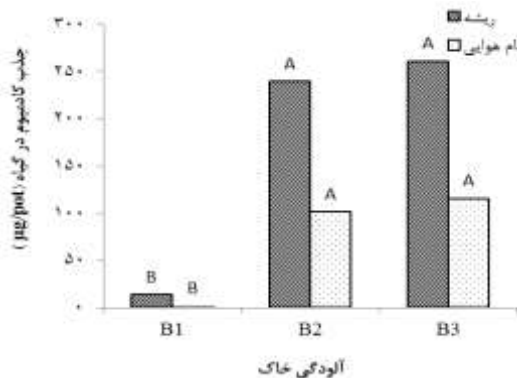
شکل ۵. مقایسه میانگین غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای شوری آب آبیاری (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است).

شاهد و آلوده به کادمیوم می‌تواند به علت پایین بودن pH در لجن باشد. به عبارتی هر چه خاک اسیدی باشد، جذب کادمیوم توسط گیاه نیز بیشتر می‌گردد. علت کاهش pH خاک‌های آلوده به لجن فاضلاب می‌تواند به دلیل حضور اسیدهای آلی حاصل از تخمیر مواد آلی باشد (Salimi et al., 2012). در حقیقت مواد آلی خاک فعالیت فلزات موجود در خاک را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند و تحرک و جابجایی و توزیع فلزات در خاک را بهبود می‌بخشند. این امر به دلیل تشکیل کمپلکس با ترکیبات آلی محلول است که مانع رسوب فلزات سنگین و افزایش حلالیت آن‌ها در خاک می‌گردد (Chhotu et al., 2009).

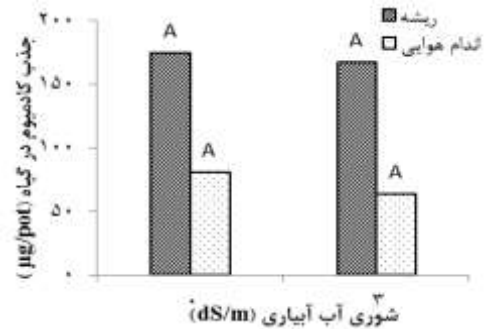


شکل ۷. مقایسه میانگین غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای سطوح کادمیوم خاک (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است).

مشابه غلظت کادمیوم در تیمارهای مختلف، میزان جذب کادمیوم توسط اندام هوایی و ریشه گیاه نیز با افزایش سطح کادمیوم به طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۸). با توجه به نتایج شکل (۸)، با وجود کاهش وزن خشک ذرت در تیمارهای آلوده به کادمیوم، میزان جذب کادمیوم در این تیمارها نیز به علت افزایش غلظت کادمیوم، در اندام هوایی و ریشه ذرت افزایش یافته است.



شکل ۸. مقایسه میانگین جذب کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای سطوح کادمیوم خاک (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است).



شکل ۶. مقایسه میانگین جذب کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت در تیمارهای شوری آب آبیاری (حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است).

### تأثیر آلودگی خاک بر غلظت کادمیوم در گیاه

اثر آلودگی خاک بر غلظت و جذب اندام هوایی و ریشه ذرت در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲). با مصرف کادمیوم، غلظت کادمیوم در ریشه و اندام هوایی افزایش معنی‌داری پیدا کرده است. شکل (۷) مقایسه میانگین غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه ذرت را در سطوح مختلف آلودگی خاک نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۷)، با افزایش غلظت کادمیوم در خاک، غلظت این عنصر در ریشه و اندام هوایی گیاه افزایش معنی‌داری پیدا کرده است. این موضوع طبیعی به نظر می‌رسد، چرا که با افزایش هر عنصر در اطراف ریشه، غلظت آن در گیاه نیز افزایش پیدا می‌کند، البته به شرطی که آن عنصر قابل‌دسترس و قابل‌جذب برای گیاه باشد. به عبارتی افزایش مقدار فلزات سنگین در خاک، منجر به افزایش غلظت این فلزات در بافت‌های مختلف گیاه می‌گردد و از آنجا که فلزات سنگین برای گیاهان سمی نیستند، بنابراین می‌توانند بدون نشان دادن آثار مسمومیت، در گیاه تجمع پیدا کنند.

در تیمار خاک آلوده به فاضلاب، غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه نسبت به تیمار شاهد و تیمار آلوده به کادمیوم افزایش معنی‌داری داشته است. غلظت کادمیوم در اندام هوایی در تیمار آلوده به کادمیوم از ۱۹/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم به ۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم در تیمار آلوده به فاضلاب رسید که بوده است که ۱۵ درصد افزایش نشان داد. در ریشه نیز غلظت کادمیوم ۱۷ درصد افزایش پیدا کرد و در کل غلظت کادمیوم در ریشه بیشتر از اندام هوایی بود. شوری زیاد خاک آلوده به فاضلاب سبب افزایش حلالیت کادمیوم در خاک شده و در نتیجه غلظت کادمیوم در گیاه را افزایش می‌دهد. علت زیاد خاک آلوده به فاضلاب به دلیل غلظت بالای عناصر کلسیم، منیزیم، سدیم و کلر در لجن است. همچنین بالا بودن غلظت کادمیوم در گیاه در بستر خاک آلوده به فاضلاب نسبت به خاک



## نتیجه‌گیری

شد، اما وزن تر و خشک این اندام‌ها کاهش یافت. در خاک آلوده به فاضلاب نیز به دلیل افزایش شوری خاک و کاهش اسیدیته، سبب افزایش حلالیت کادمیوم در خاک شده و باعث افزایش غلظت کادمیوم در گیاه شده است. با توجه به نتایج، اثر متقابل سطوح مختلف آلودگی خاک و شوری تأثیر معنی‌داری بر افزایش مقدار غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه داشته است. به عبارت دیگر اعمال تیمار خاک آلوده به فاضلاب بر روی خاک و همچنین افزایش شوری آب آبیاری در ناحیه ریشه، سبب افزایش غلظت کادمیوم در گیاه شده است. دلیل این امر نیز در افزایش شوری و در نتیجه افزایش انحلال کادمیوم در خاک می‌باشد.

طبق نتایج به دست آمده افزایش سطوح کادمیوم در خاک، موجب افزایش معنی‌دار غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت شد، ولی وزن خشک اندام هوایی و ریشه کاهش یافت. میزان جذب نیز در تیمار آلوده به کادمیوم بیشتر بود. همچنین شوری ناشی از کلرید سدیم، فراهمی کادمیوم را به دلیل تشکیل کمپلکس محلول این فلز با کلرید در خاک افزایش داد. در حقیقت افزایش فراهمی این فلز سنگین بر اثر شوری می‌تواند به دلیل افزایش قدرت یونی بر اثر شوری و در نتیجه افزایش حلالیت فازهای جامد کنترل‌کننده فعالیت فلزات سنگین در خاک‌ها باشد. بنابراین افزایش شوری آب آبیاری باعث افزایش غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه ذرت

## REFERENCES

- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., and Martinez S. (2011). Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 85, 1318-1324.
- Al-Karaki, G. N. (2000). Growth and mineral acquisition by mycorrhizal tomato grown under salt stress. *Mycorrhiza*, 10, 51-54.
- Bianconi, D., Pietrini, F., Massacci, A., Iannelli, M. A. (2013). Uptake of cadmium by Lemna minor, a hyperaccumulator plant involved in phytoremediation applications. E3S Web of Conferences.
- Bouyoucos, C. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54, 464-465.
- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-total. P. 1085-1122. In D.L., Sparks *et al.*, Method of soil analysis, Published by: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Cariny, T. (1995). *The re-use of contaminated land*, Jhon Wiley and Sons Ltd. Publisher, 219.
- Chaab, A. and Savaghebi, Gh. (2010). Effect of zinc application on cadmium uptake of maize growth. *Agricultural Segment*, 1(1), AGS/1515.
- Chai, M. W., Shi, F. C., Li, R. L., Liu, F. C., Qiu, G. Y., Liu, L. M. 2013. Effect of NaCl on growth and accumulation of halophyte *Spartina alterniflora* under CdCl<sub>2</sub> stress. *South African Journal of Botany*. 85, 63-69.
- Chhotu, D., Jadia and Fulekar, M.H., (2009) Phytoremediation of heavy metals: Recent techniques, *African Journal of Biotechnology*, 8 (6), 921-928.
- Chorom, M., Aghaei, M. (2007). Effects of amended sewage sludge application on yield and heavy metal uptake of barley (A case study of Ahvaz sewage treatment plant). *Journal of Water and Wastewater*. 62, 53-63. (In Farsi)
- Dar, S. R., Thomas, T., Dagar, J. C., Singh, D., Chauhan, M. K., Kumar, A. (2011). Phytoavailability of zinc and cadmium as affected by salinity and zinc in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on cadmium polluted soil. *Libyan Agriculture Research Center Journal International*. 2(4), 195-199.
- Gu, C., Bai, Y., Tao, T., Chen, G., Shan, Y. 2013. Effect of sewage sludge amendment on heavy metal uptake and yield of Ryegrass seedling in a mudflat soil. *Journal of Environmental Quality*. 42(2), 421-428.
- Hemke, P. H., Spark, D. L. (1996). Potassium. P. 551-574. In D.L., Sparks *et al.*, Method of soil analysis, Published by: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Huang, Y., Hu, Y., Liu, Y. (2009). Combined toxicity of copper and cadmium to six rice genotypes (*Oryza sativa* L.). *Journal of Environmental Science*. 21, 647-653.
- Kang, Y., Chen, M., Wan, S. (2010). Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. ceratina Kulesh) in North China Plain: *Agric. Water Manage.* 97, 1303-1309.
- Khoshoftarmanesh, A. H., Shariatmadari, H., Karimian, N., Van der Zee, S. (2006). Cadmium and zinc in saline soil solutions and their concentrations in wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 582-588. (In Farsi)
- Kou, S. (1996). Phosphorus. P. 869-920. In Sparks, D.L. *et al.*, Method of soil analysis, Published by: Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Laing Du, G., Vos De, R., Vandecasteele, B., Lesage, E., Tack, F.M.G., Verloo, M. G. (2008). Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 77, 589-602.
- Lindsay, W. L., and Norvell, W. A. (1978). "Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, manganese, and copper." *J. Soil Sci. Soc. Am.*,

- 42, 421-428.
- Mok, M. 1994. Cytokinins and plant development- An overview. PP. 155-166. *In: Mok, D. and M. Mok (Eds.), Cytokinins: Chemistry, Activity, and Function*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Paalman, M. A. A., Van der Weijden, C. H., Loch, J. P. G. (1994). Sorption of cadmium on suspended matter under estuarine conditions: competition and complexation with major seawater ions. *Water Air Soil Pollut.* 73, 49-60.
- Parida, A. K., Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60, 324-349.
- Pascual, I., Antolin, M. C., Garcia, C., Polo, A., Sanchez-Diaz, M. (2007). Effect of water deficit on microbial characteristics in soil amended with sewage sludge or inorganic fertilizer under laboratory conditions. *Bioresource Technology*. 98, 29-37.
- Salimi, M., Amin, M. M., Ebrahimi, A., Ghazifard, A., Najafi, P., Amini, H., Razmjoo, P., Dasjerdi, M. (2012). Influence of salinity on phytoremediation of cadmium in contaminated soil. *Journal of Health System Research*. 6, 1130-1137. (In Farsi)
- Sanita di Toppi, L. and Gabbrielli, R. (1999). Response to Cadmium in higher plants. *Environ. EXP. Bot* 41,105-130.
- Shafi, M., Guoping, Z., Bakht, J., Khan, M. A., Ul-Islam, E., Khan, M. D., Raziuddin. (2010). Effect of cadmium and salinity stresses on root morphology of wheat. *Pakistan Journal of Botany*. 42(4), 2747-2754.
- Smith, S. R. (2009). A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal aolid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International*. 35, 142-156.
- Veselov, D., Kuudoyarova, G., Ssymonyan, M., Veselov, S. T. (2003). Effect of cadmium on ion uptake, transpiration and cytokinin content in wheat seedlings. *Plant Physiol*. 117, 353-359.
- Wegglar, K., Mclaughlin, M., Graham, R. D. (2004). Effect of chloride in soil solution on the plant availability of biosolids-borne cadmium. *Journal of Environmental Quality*. 33(2), 496-504.
- Willey, N. (2007). *Phytoremediation methods and review*, Methods in Biotechnology, 23, Humana Press, Totowa, New Jersey.
- Wong, J. W. C., Selvam, A. (2005). Speciation of heavy metals during co-coposting of sewage sludge with lime. *Chemosphere article in press*.