



## The Effect of the Different Ionic Composition of Saline Water on Cadmium Transport in Two Soils with Different Calcium Carbonate content

SAMAN MALEKNIA<sup>1</sup> | ALI KHANMIRZAEI<sup>2</sup> | MAHBOUBEH MAZHARI<sup>3</sup> | SHEKOOFEH REZAEI<sup>4</sup> | MASOUD SOLTANI<sup>5</sup>

1. Department of Soil Science, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. E-mail: [saman.maleknia@kiaiu.ac.ir](mailto:saman.maleknia@kiaiu.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. E-mail:

[ali.khanmirzaei@kiaiu.ac.ir](mailto:ali.khanmirzaei@kiaiu.ac.ir)

3. Department of Soil Science, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. E-mail:

[mahboobeh.mazhari@kiaiu.ac.ir](mailto:mahboobeh.mazhari@kiaiu.ac.ir)

4. Department of Soil Science, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran. E-mail: [sh.rezaee@kiaiu.ac.ir](mailto:sh.rezaee@kiaiu.ac.ir)

5. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini

International University, Qazvin, Iran. E-mail: [msoltani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:msoltani@eng.ikiu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

#### Article history:

**Received:** Dec. 31, 2021

**Revised:** March. 1, 2022

**Accepted:** Apr. 4, 2022

**Published online:** Jan. 22, 2022

#### Keywords:

Cadmium,  
Chemical Speciation,  
Salinity,  
Surface Adsorption Isotherms

### ABSTRACT

Recent researches have proven the effect of salinity of water and soil resources on the bioavailability of cadmium. In this study, the effect of different sources of salinity including sodium chloride, sodium sulfate and calcium chloride on cadmium transport in two different soils was investigated. Soil columns with a height and inner diameter of 50 and 10 cm, respectively, were subjected to leaching of cadmium solution at a concentration of 100 mg/L along with various salts of sodium chloride, sodium sulfate and calcium chloride at a concentration of 100 me/L for 10 days. The drained solutions were analyzed at three depths of 3, 7 and 50 cm. The simulation of cadmium chemical species in the soil solution was performed using Visual MINTEQ 3. The presence of salinity along with cadmium solution caused more transport and drain of cadmium than the control soil. The highest cadmium concentration drained from the columns was belonged to the soils which received calcium chloride with the mean of 19.6 mg/L whereas the lowest was determined in soil received sodium sulfate with the mean of 6.1 mg/L. Due to the formation of chloro-cadmium complexes, treatments containing chloride had a more obvious effect on the transport of cadmium in the soil columns. The simulation of cadmium speciation in solution containing chloride showed that CdCl<sup>+</sup> and CdCl<sub>2</sub>(aq) account for more than 80% of the cadmium species, while in those containing sodium sulfate, this dominant mainly included two species of Cd(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub><sup>-2</sup> and Cd(SO<sub>4</sub>)(aq). Generally, salinity conditions affected by chloride ions in cadmium polluted lands can increase the potential of this toxic metal entering water sources and food chain.

Cite this article: Maleknia, S., Khanmirzaei, A., Mazhari, M., Rezaei, Sh., & Soltani, M. (2023). The Effect of the Different Ionic Composition of Saline Water on Cadmium Transport in Two Soils with Different Calcium Carbonate, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (11), 2583-2595. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.350368.669383>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.350368.669383>



## اثر ترکیبات یونی مختلف آب شور در انتقال کادمیوم در دو خاک با کربنات کلسیم متفاوت

سامان ملک‌نیا<sup>۱</sup> | علی خانمیرزایی<sup>۲</sup> | محبوبه مظهری<sup>۳</sup> | شکوفه رضائی<sup>۴</sup> | مسعود سلطانی<sup>۵</sup>۱. گروه خاکشناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: [saman.maleknia@kiau.ac.ir](mailto:saman.maleknia@kiau.ac.ir)۲. گروه خاکشناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: [ali.khanmirzaei@kiau.ac.ir](mailto:ali.khanmirzaei@kiau.ac.ir)۳. گروه خاکشناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: [mahboobeh.mazhari@kiau.ac.ir](mailto:mahboobeh.mazhari@kiau.ac.ir)۴. گروه خاکشناسی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران. رایانامه: [sh.rzeae@kiau.ac.ir](mailto:sh.rzeae@kiau.ac.ir)۵. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: [msoltani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:msoltani@eng.ikiu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	پژوهش‌های اخیر، تأثیر شوری منابع آب و خاک بر فراهمی زیستی کادمیوم را نشان داده است. در این پژوهش اثر منابع مختلف شوری شامل کلریدسديم، سولفاتسديم و کلریدکلسیم بر انتقال کادمیوم در دو خاک متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. ستون‌های خاک با ارتفاع ۵۰ و قطر درونی ۱۰ سانتی‌متر در مدت ۱۰ روز تحت آبشویی محلول کادمیوم با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر به همراه نمک‌های مختلف کلریدسديم، سولفاتسديم و کلریدکلسیم با غلظت ۱۰۰ میلی‌اکیوالنت در لیتر قرار گرفت. غلظت کادمیوم در زه‌آب بیرون آمده از ستون در سه عمق ۳، ۷ و ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی گونه‌های شیمیایی کادمیوم محلول توسط نرم افزار Visual MINTEQ انجام گرفت. بودن نمک‌ها به همراه محلول کادمیوم باعث تحرک بیشتر و خروج مقادیر بیشتر کادمیوم نسبت به خاک شاهد گردید. در بین تیمارهای شوری، تیمار کلریدکلسیم با میانگین ۱۹/۶ میلی‌گرم در لیتر بیشترین و تیمار سولفات سديم با ۶/۱ میلی‌گرم در لیتر کمترین مقادیر کادمیوم خروجی را داشتند. تیمارهای دارای کلر به دلیل تشکیل کمپلکس‌های کلر-کادمیوم تأثیر بارزتری در خروج کادمیوم در ستون خاک داشتند. شبیه‌سازی کادمیوم محلول در تیمارهای دارای کلر نشان داد که گونه‌های $CdCl^+$ و $CdCl_2(aq)$ بیش از ۸۰ درصد گونه‌های موجود در زهاب را تشکیل می‌داد؛ در صورتی که در تیمار دارای سولفاتسديم این نسبت در اختیار دو گونه $Cd(SO_4)_2$ و $Cd(SO_4)(aq)$ بود. به‌طور کلی شرایط شوری متأثر از یون کلر در اراضی آلوده به کادمیوم می‌تواند پتانسیل ورود این فلز سمی به منابع آب و زنجیره غذایی را افزایش دهد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۱۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۱	
واژه‌های کلیدی:	
شوری، کادمیوم، گونه‌بندی شیمیایی، همدمای جذب سطحی.	

استناد: ملک‌نیا، سامان؛ خانمیرزایی، علی؛ مظهری، محبوبه؛ رضائی، شکوفه؛ و سلطانی، محمود (۱۴۰۱). اثر ترکیبات یونی مختلف آب شور در انتقال کادمیوم در دو خاک

با کربنات کلسیم متفاوت، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱۱)، ۲۵۹۵-۲۵۸۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.350368.669383>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.350368.669383>

## مقدمه

افزایش ورود فلزها سنگین به منابع آب و خاک همواره به‌عنوان تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیط زیست پیرامون در نظر گرفته می‌شود (Machender et al., 2011). این عناصر به‌دلیل ایجاد سمیت، اثرات تجمعی، زمان ماندگاری طولانی در محیط، سرطان‌زایی و تجزیه‌ناپذیر بودن، به‌عنوان یک مشکل زیست محیطی مهم به‌شمار می‌روند (Fajana et al., 2020). فلزها سنگین از طریق جذب توسط آبزیان و گیاهان به زنجیره غذایی موجودات وارد می‌شوند (Habib et al., 2022; Afonne, and Ifediba, 2020). کادمیوم به‌عنوان یک عنصر غیرضروری و سمی، از مهمترین عناصر سنگین خاک به‌شمار می‌رود و مسمومیت با این فلز باعث اختلال در عملکرد کلیه‌ها به‌دلیل پیوند با متالوتیونین (Barregard et al., 2022)، پوکی استخوان از طریق جایگزین شدن با کلسیم (Pouillot et al., 2022)، اثر بر سیستم عصبی (Deng, 2020)، اختلالات ریوی و بروز فشار خون بالا می‌شود (Mallongi et al., 2020). یکی از منابع عمده ورود کادمیوم در سال‌های اخیر به خاک‌های کشاورزی، کاربرد پیوسته‌ی کودهای فسفاتی دارای کادمیوم، به‌منظور افزایش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی است (Park et al., 2021).

بخش بزرگی از کادمیوم ورودی به خاک‌های آهکی کشور، به‌دلیل قلیایی بودن خاک و بودن کربنات‌ها به صورت ترکیبات نامحلول با کمترین فراهمی زیستی همچون شکل‌های همراه کربنات‌ها، شکل‌های همراه اکسیدهای آهن و آلومینیوم و شکل‌های به دام افتاده در ساختمان رس‌ها انباشته شده است (Beygi and Jalali, 2019; Valipour et al., 2016). از این رو انتظار می‌رود روند تحرک و انتقال کادمیوم در خاک‌های آهکی، نسبت به خاک‌های غیرآهکی و اسیدی، با کندی مواجه بوده و خاک گنجایش بالاتری در تثبیت و نگهداری این فلز داشته باشد (Rezaei et al., 2021). اگر چه روش‌های گونه‌بندی شیمیایی<sup>۱</sup> در فاز جامد اطلاعات سودمندی درباره‌ی سرنوشت فلزها تثبیت شده در خاک فراهم می‌کند، اما به‌دلیل نوع عصاره‌گیرهای به‌کار گرفته، در مورد رفتار فاز محلول به‌عنوان جزء موثر با بیشترین پتانسیل مخاطرات زیستی اطلاعات دقیقی را ارائه نمی‌کند. گونه‌بندی شیمیایی بخش محلول فلزها با در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های بین گونه‌های یونی مختلف، رفتار فلزها و قابلیت فراهمی زیستی آن‌ها را به‌گونه روشن‌تری ارائه می‌دهد (Li et al., 2021). عناصر موجود در جزء محلول خاک بیشتر به‌صورت یون آزاد و یا به‌صورت کمپلکس‌ها و زوج یون‌ها در خاک یافت می‌شوند (Ramteke et al., 2021). این در حالی است که گونه‌های هیدرولیز شده کادمیوم که در pH های بالاتر وجود دارند، نسبت به یون‌های آزاد کادمیوم ترجیح بیشتری برای مکان‌های جذبی دارند (Loganathan et al., 2012).

یکی از ویژگی‌های بارز خاک‌های کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک، انباشت نمک و شوری می‌باشد. بر اساس گزارش‌های فائو<sup>۲</sup>، ۱۹/۵ درصد از سطح زمین‌های کشاورزی آبی دنیا (۳۹۷ میلیون هکتار) متأثر از شوری می‌باشند (FAO, 2016). پژوهش‌های زیادی نشان داده‌اند که با افزایش شوری خاک، تحرک و زیست فراهمی کادمیوم افزایش می‌یابد (Yang et al., 2023; Zahedifar and Moosavi, 2020; McLaughlin et al., 1996). دلیل این افزایش بیشتر به افزایش رقابت کاتیون‌های محلول با کادمیوم و نیز تشکیل کمپلکس‌های کادمیوم با لیگاندهای معدنی مانند یون‌های سولفات، کلرید، هیدروکسید و کربنات نسبت داده شده است (Sruthi et al., 2017). با وجود گنجایش بالای خاک‌های آهکی کشور در تثبیت فلز سنگینی همچون کادمیوم به نظر می‌رسد رفتار آن در شرایط افزایش غلظت نمک‌های محلول متفاوت بوده و ظرفیت بالقوه‌ای در آلودگی محصولات کشاورزی و منابع آبی ایجاد خواهد کرد (Zahedifar and Moosavi, 2020). با این حال اطلاعات ما درباره‌ی ترکیبات یونی مختلف و تأثیر آن‌ها بر تحرک کادمیوم در خاک‌های کشور کم بوده و در این زمینه نیاز به پژوهش‌های بیشتر است. این پژوهش با هدف بررسی هم‌دماهای جذب کادمیوم، گونه‌بندی شیمیایی کادمیوم در حضور آب شور با ترکیبات یونی متفاوت و نیز انتقال کادمیوم در ستون خاک آبیاری شده با محلول شور با ترکیبات یونی مختلف در دو خاک با مقادیر آهک متفاوت انجام شد.

## پیشینه پژوهش

پژوهش‌های پیشین در خاک‌های کشور که بیشتر آهکی هستند، نشان می‌دهد که بخش بزرگی از فلزهای سنگین ورودی به خاک تثبیت شده و از تحرک آنها کاسته شده است (Khanmirzaei et al., 2013; Rajaie et al., 2006). در پژوهشی که توسط Beygi and Jalali (2019) بر روی برخی از خاک‌های آهکی استان همدان انجام گرفت، کادمیوم موجود در خاک عمدتاً به‌ترتیب فراوانی در شکل‌های

<sup>۱</sup> Chemical fractionation

<sup>۲</sup> Food and agriculture organization



کربناتی، همراه با اکسیدهای آهن و منگنز، باقیمانده، همراه با مواد آلی و نهایتاً شکل محلول و تبادل‌پذیر داشت. در مطالعه دیگری (Khoshgoftar et al (2014) با بررسی اثر ۵ سطح شوری (صفر، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌مولار کلرید سدیم و ۱۲۰ میلی‌مولار نیترات سدیم) آب آبیاری بر گندم کشت شده در یک خاک آلوده به کادمیوم در استان قم مشاهده کردند که با افزایش سطوح شوری آب آبیاری، کادمیوم ریشه و اندام هوایی افزایش چشم‌گیری داشت. بر اساس بررسی‌های Wang et al., (۲۰۱۹) شوری خاک باعث افزایش چشم‌گیری کادمیوم محلول (۳۴/۱ تا ۴۹/۷٪)، کادمیوم قابل‌عصاره‌گیری با DTPA (۳۲/۰ تا ۵۱/۶٪) و غلظت کادمیوم ریشه گندم (۲۴/۵ تا ۴۰/۲٪) در خاک‌های مورد بررسی گردید.

در مطالعه Tahervand and Jalali (2016) گونه‌های شیمیایی کادمیوم آزاد  $Cd^{2+}$ ،  $CdCl^+$ ،  $CdHCO_3^+$ ،  $CdCO_3$ ،  $Cd(OH)^+$  و  $Cd(CO_3)_2$  به‌عنوان گونه‌های غالب در برخی از خاک‌های استان همدان مورد بررسی قرار گرفت. گزارش شده است که با افزایش غلظت یون کلر در محیط تمایل آن برای تشکیل کمپلکس‌های پایدار با کادمیوم بیشتر شده و به‌عنوان گونه محلول غالب در خاک‌های شور مطرح گردیده است (Khoshgoftar et al., 20014; Ghallab and Usman, 2007).

### روش‌شناسی پژوهش

به‌منظور بررسی اثر مقادیر کربنات‌های کلسیم معادل در ظرفیت جذب و انتقال کادمیوم در خاک، دو نمونه خاک از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر دارای کربنات کلسیم معادل بالا از مزرعه آموزشی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج به مختصات جغرافیایی  $37^{\circ}08'58''N$   $50^{\circ}49'42''E$  و همچنین خاک دارای کربنات کلسیم معادل کم از مزارع چای واقع در لاهیجان به مختصات  $37^{\circ}08'58''N$   $50^{\circ}49'42''E$  در سال ۱۳۹۹ انتخاب و نمونه‌برداری شدند. نمونه‌های خاک در محل آماده‌سازی ابتدا هوا خشک، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و جهت بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل گردیدند. برخی ویژگی‌های شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)، pH، در گل اشباع (Thomas, 1996) و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (Rhoades, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با اسید (Loeppert and Suarez, 1996)، کادمیوم قابل‌عصاره‌گیری با DTPA به روش (Lindsay and Norvell, 1978) و چگالی ظاهری و حقیقی (Blake and Hartge, 1986) اندازه‌گیری شد.

### مدل‌های هم‌دمای جذب

برای به‌دست آوردن هم‌دمای جذب، مقدار دو گرم از هر خاک را درون لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته، ۴۰ میلی‌لیتر محلول‌های کادمیوم با غلظت‌های ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر از منبع نیترات کادمیوم به آنها اضافه شد. برای ثابت نگه‌داشتن تقریبی قدرت یونی، محلول‌های بالا در محلول پایه نیترات کلسیم ۰/۰۵ مولار تهیه گردیدند. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در هم‌زن مکانیکی (شیکر) تکان داده شده و سپس به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ و محلول شفاف از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شد. غلظت کادمیوم در محلول استخراج شده توسط روش شعله دستگاه جذب اتمی مدل PG-990 با حد تشخیص ۰/۰۴ میلی‌گرم در لیتر تعیین و تفاوت بین مقدار عنصر در محلول اولیه و محلول نهایی، به‌عنوان کادمیوم جذب شده به‌وسیله خاک در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده با معادله‌های فروندلیچ (معادله ۱) و لانگ‌مویر (معادله ۲) برازش داده شد و ضرایب مربوطه محاسبه گردید.

$$X = kC^n \quad \text{رابطه ۱}$$

$$X = \frac{KbC}{1 + KC} \quad \text{رابطه ۲}$$

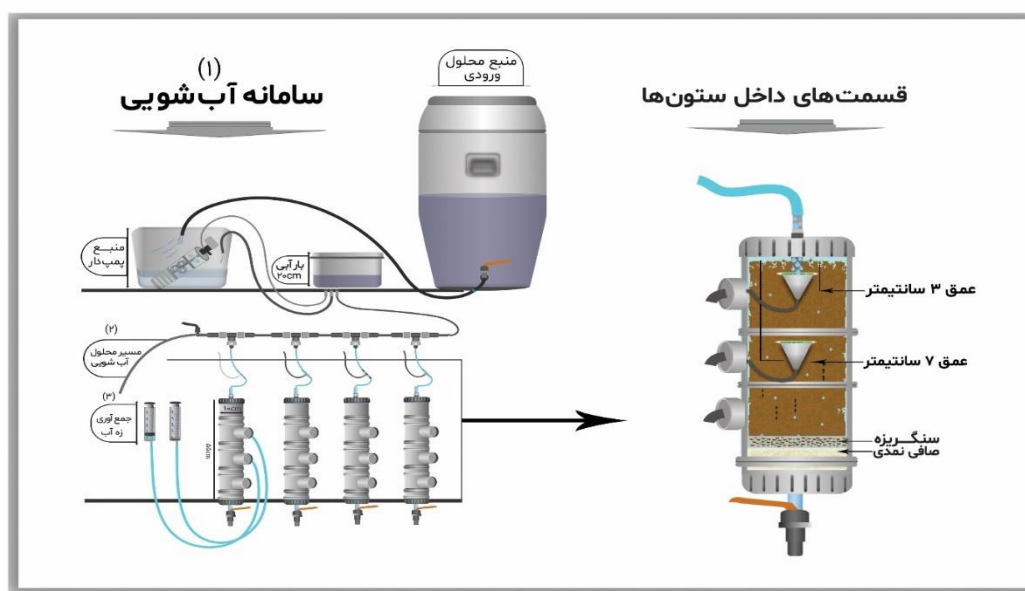
در این معادله‌ها، X مقدار کادمیوم جذب شده (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، C غلظت نهایی کادمیوم در محلول تعادل (میلی‌گرم در لیتر) و k، K، n و b ضرایب جذب کادمیوم هستند. برای برازش معادله‌ها از حالت خطی آنها (معادله ۳ و ۴) استفاده شد.

$$\log X = \log k + \frac{1}{n} \log C \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{Kb} + \left(\frac{1}{b}\right) C \quad \text{رابطه ۴}$$

### انتقال در ستون خاک

به‌منظور مطالعه تأثیر نمک‌های متفاوت آب آبیاری بر آبشویی کادمیوم از دو خاک مورد مطالعه، سه نوع نمک شامل کلرید سدیم، کلرید کلسیم و سولفات سدیم با غلظت یکسان (۱۰۰ میلی‌اکیوالنت در لیتر) در کنار کادمیوم با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر مورد استفاده قرار گرفت. تیمار شاهد به‌صورت ۱۰۰ میلی‌گرم کادمیوم در لیتر و بدون افزودن نمک در نظر گرفته شد. برای طراحی ستون‌های خاک از لوله‌های پلی‌اتیلن به ارتفاع ۵۰ و قطر درونی ۱۰ سانتی‌متر برای شبیه‌سازی عمق ریشه گیاهان زراعی استفاده گردید. در انتهای ستون‌ها، صافی‌هایی از جنس نمد برای جلوگیری از خروج خاک و سپس سنگ ریزه شسته شده برای زهکشی بهتر استفاده شد. خاک بصورت دست‌خورده پر شده و متراکم شدن به گونه‌ای انجام شد که به وزن مخصوص ظاهری خاک طبیعی (جدول ۱) برسد. متراکم کردن خاک درون لوله‌ها به گونه‌ای صورت گرفت که تراکم خاک در همه عمق‌ها یکسان باشد. در ابتدا عمق‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متری برای نمونه برداری انتخاب گردید. ولی بدلیل اینکه از عمق ۱۰ سانتی‌متر به بعد اختلاف کادمیوم خروجی معنی‌دار نبود. تصمیم به تغییر عمق‌ها به ۳، ۷ و ۵۰ سانتی‌متر گردید. به‌منظور امکان جمع‌آوری و برداشت محلول زهکشی شده در اعماق مورد نظر از کیف و مکند و ویژه مطابق روش Feng et al., (1996) استفاده گردید. محلول خروجی به‌صورت ثقیلی در انتهای ستون تجمع و بصورت روزانه به‌وسیله یک شیر با قطر خروجی ۱/۲۵ سانتی‌متری جمع‌آوری گردید (شکل ۱). هر ستون به‌طور متوسط به مدت ۱۰ روز تحت آبشویی با تیمار مورد نظر قرار گرفت. در طی ۱۰ روز آبشویی با کادمیوم و ترکیب یونی همراه، محلول خروجی از سه عمق برداشت و سپس حجم محلول و غلظت کادمیوم ثبت گردید.



شکل ۱- نمای شماتیک ستون‌ها و سامانه آبشویی

### گونه‌بندی شیمیایی

جهت بررسی گونه‌های شیمیایی کادمیوم در جزء محلول پس از اعمال تیمار نمک‌های مختلف، نمونه‌های ۲۰۰ گرمی تیمارهای خاک‌های ستون‌ها پس از آبشویی، هوا خشک، کوبیده و اقدام به تهیه گل اشباع با آب مقطر گردید. پس از گذشت یک شبانه‌روز گل اشباع عصاره‌گیری و غلظت کادمیوم و دیگر کاتیون‌ها و آنیون‌های غالب اندازه‌گیری شد. به این منظور کادمیوم محلول عصاره اشباع با روش شعله دستگاه جذب اتمی مدل PG-990، کلسیم و منیزیم محلول بوسیله تیتراسیون با EDTA (Suarez, 1996)، سدیم و پتاسیم بوسیله دستگاه فلیم‌فوتومتر مدل Sherwood450 (Helmke and Sparks, 1996)، کلر محلول بوسیله تیتراسیون با نیترات نقره (Frankenberg Jr et al., 1996)، سولفات محلول با کلرید باریم و تیتراسیون با EDTA و بی‌کربنات محلول بوسیله تیتراسیون با سولفوریک اسید اندازه‌گیری شدند (Rhoades, 1996).

### مدل‌سازی و آنالیز آماری

در این مطالعه تیمار محلول آبشویی شامل کلرید سدیم، کلرید کلسیم و سولفات سدیم در دو سطح صفر و ۱۰۰ میلی‌اکیوالنت، بر روی سه عمق ۳، ۷ و ۵۰ سانتی‌متری خاک با سه تکرار در دو خاک انتخابی از کرج و لاهیجان مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات بدست آمده از

عصاره اشباع خاک به عنوان ورودی برنامه Visual MINTEQ جهت شبیه سازی گونه های شیمیایی مختلف کادمیوم در فاز محلول مورد استفاده قرار گرفت (Allison et al., 1991). نتایج به دست آمده توسط نرم افزارهای آماری SAS و Excel مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و جهت مقایسه میانگین ها از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

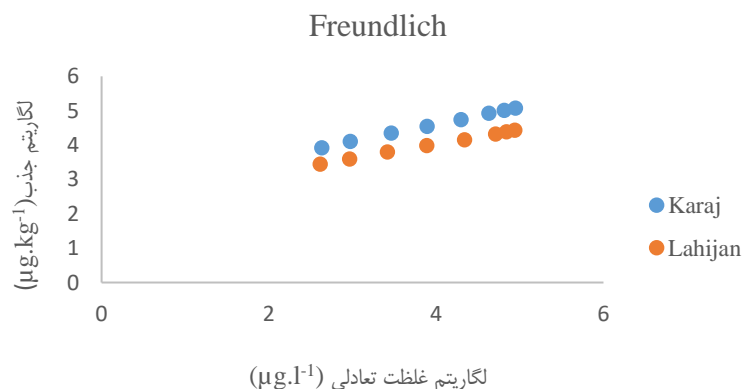
## یافته های پژوهش

برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی دو خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. خاک کرج دارای مقدار کربنات کلسیم معادل (۱۵/۲ درصد) بیشتری نسبت به خاک لاهیجان (۱/۸ درصد) بود. در مقابل از نظر محتوای کربن آلی، خاک لاهیجان با میانگین ۳/۷۳ درصد دارای کربن آلی بیشتری نسبت به خاک کرج با میانگین ۰/۲۷ درصد بود. این تفاوت ها در واکنش خاک ها مشهود بوده به طوری که pH خاک کرج و لاهیجان به ترتیب ۸/۱ و ۷/۲ اندازه گیری گردید که خود می تواند باعث رفتار متفاوت دو خاک نسبت به فلزهای سنگین ورودی باشد. هر دو خاک از نظر بافت مشابه و دارای بافت لوم رسی بودند.

جدول ۱- برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی دو خاک مورد مطالعه

خاک	کادمیوم DTPA	کربن آلی	کربنات کلسیم معادل	رس	سیلت	چگالی ظاهری	چگالی حقیقی	pH(s)	EC(e)
	mg.kg-1		g.100g-1			g.cm-3			dS.m-1
کرج	۰/۶۱	۰/۲۷	۱۵/۲	۳۹	۴۵	۱/۲۶	۲/۶۱	۸/۱	۱/۶۴
لاهیجان	۰/۱۰	۳/۷۳	۱/۸	۳۸	۴۰	۱/۴۷	۲/۴۷	۷/۲	۰/۶۸

ایزوترم های جذب سطحی فروندلیچ و لانگمویر به خوبی برای کادمیوم بر دو خاک مورد مطالعه برازش داده شده و ضرایب آنها استخراج گردید. مدل خطی فروندلیچ و ضرایب مربوطه به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۲ نشان داده شده اند. مقادیر kF در خاک کرج با میانگین ۴۲۱/۹ لیتر در کیلوگرم بیشتر از مقدار آن در خاک لاهیجان با میانگین ۲۳۰/۶ لیتر در کیلوگرم محاسبه گردید که نشان دهنده ظرفیت بالاتر خاک کرج در تثبیت و جذب کادمیوم بوده است. مقدار kF مدل فروندلیچ بیانگر مقدار جذب عنصر در غلظت تعادلی ۱ میلی گرم در کیلوگرم می باشد (Karimian and Cox, 1978). حداکثر ظرفیت جذب کادمیوم محاسبه شده با استفاده از مدل لانگمویر در خاک کرج ۴۲۸۷ میلی گرم در کیلوگرم و در خاک لاهیجان ۱۸۵۰ میلی گرم در کیلوگرم بود. این نتایج نشان داد که بخش بزرگی از کادمیوم ورودی به خاک در لایه های اولیه جذب ذرات شده و به عمق های پایین تر منتقل نشوند. به نظر می رسد این ویژگی به دلیل درصد بالای رس در دو خاک و همچنین تفاوت آنها در درصد کربنات کلسیم باشد. در پژوهش های گذشته ویژگی هایی از خاک همچون ظرفیت تبادل کاتیونی، کربنات کلسیم معادل و pH همبستگی بالایی با kF نشان داده اند (Maftoun et al., 2004). نمودارهای حلالیت، بیشترین احتمال تشکیل را در مورد ترکیب اتاویت ۱ (CdCO<sub>3</sub>) توصیف کرده اند (Cavallaro and McBride 1978) که در این صورت در خاک کرج بر احتمال جذب بالاتر و تحرک کمتر کادمیوم تأکید می گردد.



شکل ۲- نمودار خطی همدمای فروندلیچ برازش داده شده بر دو خاک مورد مطالعه

مطابق نتایج جدول ۳ محلول کادمیوم با غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر همراه غلظت‌های یونی مختلف معادل ۱۰۰ میلی‌اکیوانت در لیتر از سه منبع نمک کلریدسدیم، کلریدکلسیم و سولفاتسدیم وارد ستون خاک گردیده و زه‌آب خروجی از سه عمق ۳، ۷ و ۵۰ سانتی‌متری جمع‌آوری و غلظت کادمیوم خروجی اندازه‌گیری شده است. صرف‌نظر از خاکهای مورد بررسی، به دلیل ظرفیت جذب بالای کادمیوم در خاک‌ها، غلظت خروجی در زه‌آب‌های جمع‌آوری شده در مقایسه با غلظت ورودی بسیار کم اندازه‌گیری شد. درصد بالای رس در دو خاک می‌تواند از دلایل احتمالی این ظرفیت بالا در دو خاک مورد بررسی باشد. مقایسه دو خاک مورد بررسی در تیمار شاهد بدون حضور نمک، حاکی از اختلاف شدید دو خاک از نظر نگهداری و تحرک کادمیوم می‌باشد. مقادیر خروجی از میانگین ۱/۶۲، ۰/۳۰ و ۰/۰۹ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب در اعماق ۳، ۷ و ۵۰ سانتی‌متری خاک کرج به ۱۶/۱۷، ۳/۲۹ و ۰/۶۸ میلی‌گرم در لیتر در خاک لاهیجان افزایش نشان می‌دهد. میانگین غلظت‌های اندازه‌گیری شده از حجم زه‌آب خروجی که در مدت ۱۰ روز جمع‌آوری شده، اندازه‌گیری گردیده و بیانگر زمان طولانی ارتباط خاک و محلول کادمیوم می‌باشد. توانایی بیشتر خاک کرج در جذب و نگهداری کادمیوم را می‌توان به ضریب توزیع بیشتر خاک کرج نسبت داد به‌طوری‌که ضریب Kd در خاک کرج ۲۷۰/۱۰ و در خاک لاهیجان ۹۴/۳۵ لیتر بر کیلوگرم خاک محاسبه گردید. این تفاوت خود می‌تواند ناشی از بالاتر بودن میزان کربنات کلسیم معادل و pH خاک کرج باشد. این اختلاف در تیمارهای دارای نمک‌های مختلف نیز قابل مشاهده بود و همواره خاک کرج مقادیر کمتری کادمیوم را در اعماق مختلف نسبت به تیمار مشابه در خاک لاهیجان از خود خارج نموده است.

جدول ۲- ضرایب معادلات هم‌دمای جذب سطحی برازش داده شده در دو خاک مورد مطالعه

R <sup>2</sup>	فروندلیج		Kd	منطقه
	kF	nF		
۰/۹۹	۴۲۱/۹	۰/۴۹	۲۷۰/۱۰	کرج
۰/۹۹	۲۳۰/۶	۰/۴۱	۹۴/۳۵	لاهیجان

R <sup>2</sup>	لانگمویر		Kd	منطقه
	KL	bL		
۰/۹۷	۰/۰۶۳	۴۲۸۷	۲۷۰/۱۰	کرج
۰/۹۸	۰/۰۵۱	۱۸۵۰	۹۴/۳۵	لاهیجان

nF ضریب ثابت فروندلیج، kF ثابت جذب فروندلیج L.kg-1، R<sup>2</sup> ضریب تعیین معادلات، KL ثابت جذب لانگمویر L.mg-1، ظرفیت جذب لانگمویر

L.kg-1 Kd ضریب توزیع کادمیوم

میانگین غلظت کادمیوم خروجی در محلول‌های یونی مختلف نشان داد که حضور شوری متأثر از ترکیبات یونی مختلف باعث افزایش تحرک کادمیوم در ستون‌های خاک گردیده است. به‌طوری‌که کمترین میانگین غلظت خروجی مربوط به تیمار کادمیوم بدون نمک با غلظت میانگین ۳/۶۹ میلی‌گرم در لیتر اندازه‌گیری شد. در این بین تیمار محلول کادمیوم در حضور نمک کلریدکلسیم باعث خروج بیشترین کادمیوم محلول از عمق‌های مختلف ستون خاک با میانگین ۱۹/۶۰ میلی‌گرم در لیتر گردید. تاثیر حضور نمک بر انتقال کادمیوم در تیمارهای نمک به ترتیب از بیشتر به کمتر شامل کلریدکلسیم < کلریدسدیم < سولفاتسدیم مشاهده شد. با افزایش نفوذ محلول در اعماق پایین‌تر ستون‌های خاک، نگهداری قابل توجه کادمیوم توسط ذرات خاک مشاهده گردید به‌طوری‌که میانگین غلظت کادمیوم خروجی در خاک کرج از سه عمق مورد بررسی به‌صورت کاهشی ۱۱/۶۴، ۵/۲۰ و ۲/۰۴ میلی‌گرم در لیتر، و در خاک لاهیجان ۲۳/۸۳، ۱۰/۹۵، ۱/۹۹ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب در عمق‌های ۳، ۷ و ۵۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در محلول‌های شور با منبع آنیون کلر نسبت به محلول سولفات، افزایش بیشتر تحرک و خروج کادمیوم رخ داده و بین دو تیمار کلریدکلسیم و کلریدسدیم، یون کلسیم به‌علت توانایی در آزادسازی کادمیوم تبادلی نقش بیشتر در تحرک کادمیوم ایفا نموده است.

مطالعات زیادی افزایش فراهمی‌زیستی کادمیوم را در حضور شوری آب و خاک تاکید نموده‌اند (Chi et al., 2022; Ghallab and Usman 2010; Usman 2010; Khoshgoftar et al., 2004). Ghallab and Usman (2010) غلظت‌های مختلف کلریدسدیم به همراه آب آبیاری را با کشت ذرت در یک خاک آلوده به کادمیوم به میزان ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از افزایش غلظت کادمیوم ریشه و اندام هوایی بوته‌های ذرت با افزایش مقادیر کلریدسدیم آب آبیاری بود. در مواردی نیز نتایج پژوهش (Filipović et al., 2018) با دو غلظت ۵ و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم و در حضور شوری ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار از منبع کلریدسدیم حاکی از نبود رابطه



خطی بین غلظت کادمیوم، غلظت نمک و جذب گیاهی بود. (Khoshgoftar et al., 2004) سه مکانیسم احتمالی مسئول افزایش فراهمی زیستی کادمیوم در شرایط شوری را (۱) رقابت کاتیونی کادمیوم بر سر مکان‌های جذبی خاک، (۲) تشکیل کمپلکس‌های کلر- کادمیوم و (۳) افزایش قدرت یونی محلول خاک عنوان کردند. به نظر می‌رسد سازوکار تشکیل کمپلکس‌های کادمیوم با لیگاندهای مختلف نقش موثرتری در روند تحرک آن در خاک ایفا نماید.

جدول ۳- میانگین غلظت کادمیوم خروجی از عمق‌های مختلف ستون خاک تحت تیمار محلول ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر کادمیوم در حضور نمک‌های مختلف (۱۰۰ میلی‌اکی‌والانت در لیتر)

میانگین	میانگین غلظت کادمیوم خروجی (میلی‌گرم در لیتر)								عمق زهکش (سانتی‌متر)
	سولفات سدیم		کلرید کلسیم		کلرید سدیم		آب مقطر (شاهد)		
	لاهیجان	کرج	لاهیجان	کرج	لاهیجان	کرج	لاهیجان	کرج	
۱۷/۷a	۲۱/۷۹	۹/۵۵	۲۹/۸۹	۲۴/۶۱	۲۷/۴۷	۱۰/۷۸	۱۶/۱۷	۱/۶۲	سه
۸/۰۷b	۳/۴۴	۱/۰۰	۲۵/۲۴	۱۴/۷۶	۱۱/۸۲	۴/۷۱	۳/۲۹	۰/۳۰	هفت
۳/۲۶c	۰/۴۱	۰/۴۵	۵/۹۳	۷/۲۰	۰/۹۳	۰/۴۳	۰/۶۸	۰/۰۹	پنجاه
	۸/۵۵a	۳/۶۷b	۲۰/۳۵a	۱۵/۵۲b	۱۳/۴۰a	۵/۳۰b	۶/۷۱a	۰/۶۷b	
	۶/۱۰c		۱۹/۶۰a		۹/۳۵b		۳/۶۹d		میانگین

جدول ۴ نتایج غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های عصاره اشباع ستون‌های خاک متأثر از نمک‌های مختلف را نشان می‌دهد. افزایش قابل ملاحظه کادمیوم محلول در عصاره اشباع خاک تیمارهای دارای نمک نسبت به ستون شاهد، بیانگر تاثیر حضور نمک‌های محلول در کاهش جذب کادمیوم به ذرات خاک و افزایش تحرک آن در ستون خاک می‌باشد. در خاک کرج کادمیوم محلول از ۰/۰۴۷ میلی‌مول در لیتر در ستون شاهد به ۰/۱۱۲، ۰/۱۸۸ و ۰/۰۷۳ میلی‌مول در لیتر (معادل ۲/۴، ۴ و ۱/۵ برابر افزایش) به ترتیب در ستون‌های خاک دریافت‌کننده کلرید سدیم، کلرید کلسیم و سولفات سدیم افزایش نشان داد. همین روند با مقادیر بیشتر در خاک لاهیجان مشاهده گردید. به طوری که نسبت به تیمار بدون نمک ستون شاهد از ۰/۰۸۸ میلی‌مولار به ۰/۲۳۶ و ۰/۳۱۲ میلی‌مولار افزایش داشت که معادل افزایش ۲/۷ و ۳/۵ برابری به ترتیب در ستون‌های خاک دریافت‌کننده کلرید سدیم، کلرید کلسیم بود. با توجه به تأثیر تشکیل کمپلکس‌های کلر- کادمیوم بر افزایش حلالیت کادمیوم، این روند در حضور سولفات مشاهده نگردید. مقادیر کمتر کادمیوم مشاهده شده در تیمار دریافت‌کننده سولفات سدیم، احتمالاً به دلیل افزایش قدرت یونی و کاهش فعالیت کادمیوم محلول و در نتیجه وا جذب آن از مکان‌های تبادل است. مدل‌سازی تعادل شیمیایی کادمیوم محلول خاک با استفاده مدل MINTEQA 3.1 انجام و نتایج در جدول ۵ آورده شده است. گونه‌های یونی کادمیوم در محلول هر دو خاک مورد مطالعه عمدتاً شامل  $CdCl_2(aq)$ ،  $CdCl^+$ ،  $Cd^{2+}$ ،  $Cd(SO_4)_2^{2-}$  و  $Cd(SO_4)(aq)$  بود. در ستون خاک شاهد کادمیوم محلول عمدتاً به صورت گونه آزاد  $Cd^{2+}$  با غلظت‌های ۳۳/۲ و ۵۳/۷۸ میکرومول در لیتر به ترتیب در خاک کرج و لاهیجان وجود داشت. گونه یونی  $Cd(SO_4)_2^{2-}$  نیز به ترتیب با ۰/۰۰۵ و ۰/۲۳ میکرومول در لیتر در دو خاک کرج و لاهیجان کمترین غلظت را در محلول خاک شاهد داشت. حضور نمک‌های کلرید سدیم و کلسیم به طور قابل توجه باعث تغییر نسبت گونه‌های یونی و تشکیل کمپلکس‌های کلر- کادمیوم گردید. محلول خاک کرج در حضور کلرید سدیم به ترتیب حاوی ۷۱/۱ و ۲۵/۳۰ میکرومول در لیتر  $CdCl_2(aq)$  و  $CdCl^+$  بود که برابر با ۷۷ درصد مجموع کادمیوم محلول بوده و در خاک لاهیجان این مقادیر به ترتیب شامل ۲۳/۳۰ و ۱۴۳/۵ میکرومول در لیتر  $CdCl_2(aq)$  و  $CdCl^+$  و محاسبه گردید که برابر ۸۹ درصد از کادمیوم محلول خاک می‌باشد (شکل الف ۳). این نتایج همبستگی مثبتی با نتایج آزمایشات سامانه آبشویی داشته و نشان‌دهنده تأثیر حضور یون کلر در افزایش تحرک کادمیوم در دو خاک است. مقایسه دو تیمار کلرید سدیم و کلرید کلسیم نیز بیانگر افزایش چشمگیر کادمیوم محلول و همچنین کمپلکس شده با کلر در تیمار کلرید کلسیم می‌باشد. نتایج حضور کلسیم کلرید نیز در سامانه آبشویی حاکی از نقش بارزتر این ترکیب در افزایش تحرک کادمیوم داشت. به طوری که غلظت گونه یونی  $CdCl^+$  از ۷۱/۱ در تیمار کلرید سدیم به ۱۲۱/۰ میکرومول در لیتر در تیمار کلرید کلسیم و غلظت گونه  $CdCl_2(aq)$  از ۲۵/۳۰ میکرومول در لیتر تیمار کلرید سدیم به ۳۵/۴۰ میکرومول در لیتر در تیمار کلرید کلسیم در خاک کرج افزایش یافته است. دو گونه  $Cd(SO_4)_2^{2-}$  و  $Cd(SO_4)(aq)$  گونه‌های غالب ستون خاک دریافت‌کننده سولفات خاک بود به طوری که ۶۵ و ۷۳ درصد به ترتیب گونه‌های کادمیوم را در خاک کرج و لاهیجان تشکیل داده‌اند (شکل ب ۳).



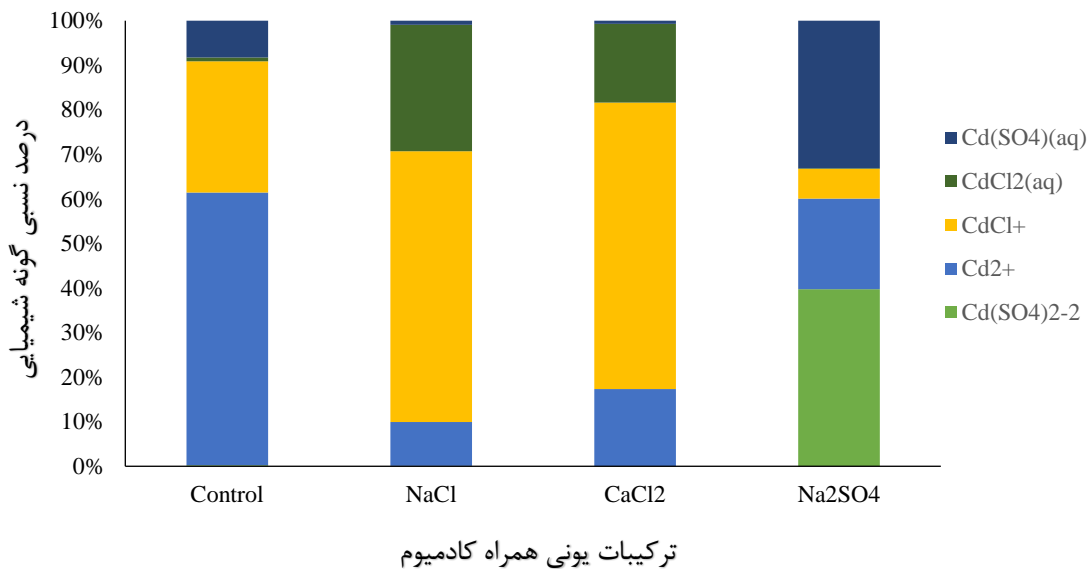
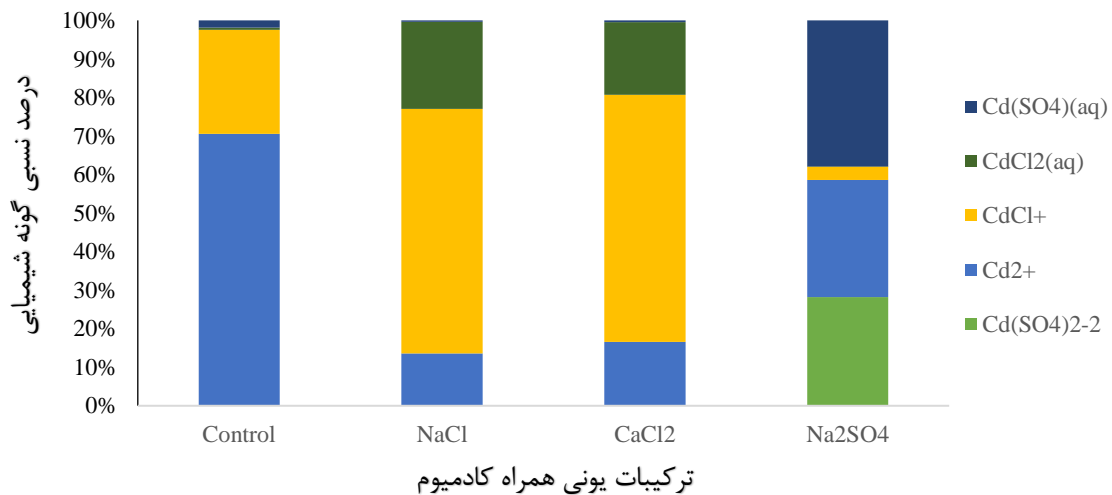
جدول ۴- میانگین غلظت عناصر عصاره اشباع خاک ستون‌های آبشویی شده با کادمیوم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در حضور نمک‌های مختلف آب آبشویی (۱۰۰ میلی‌اکیوالنت در لیتر) در دو خاک مورد بررسی

بیکربنات	سولفات	غلظت عناصر محلول عصاره اشباع mmol.L-1						محلول پایه آبشویی (me.L-1)۱۰۰
		کلر	پتاسیم	سدیم	منیزیم	کلسیم	کادمیوم	
<b>خاک کرج</b>								
۳/۲۱	۰/۷۸	۸/۱۹	۰/۴۱	۵/۱۳	۳/۸۸	۱۰/۲۱	۰/۰۴۷	شاهد (آب مقطر)
۲/۴۸	۳/۵۵	۱۸۱/۱۹	۰/۴۹	۱۴۰/۴۰	۸/۱۰	۵۸/۰۸	۰/۱۱۲	کلرید سدیم
۲/۲۵	۴/۷۶	۱۵۵/۱۱	۰/۷۱	۵/۸۴	۸/۱۵	۱۳۰/۱۵	۰/۱۸۸	کلرید کلسیم
۶/۴۹	۶۹/۸۷	۳/۸۵	۰/۳۷	۸۸/۱۸	۳/۸۸	۱۳/۱۱	۰/۰۷۳	سولفات سدیم
<b>خاک لاهیجان</b>								
۲/۲۱	۳/۸۲	۱۰/۴۳	۰/۷۱	۷/۳۱	۴/۷۹	۸/۲۱	۰/۰۸۸	شاهد (آب مقطر)
۲/۰۱	۸/۱۶	۲۳۱/۰۸	۰/۹۷	۱۶۸/۲۵	۱۲/۱۶	۱۸/۲۳	۰/۲۳۶	کلرید سدیم
۲/۰۸	۹/۶۸	۱۵۵/۱۱	۰/۹۳	۸/۱۴	۱۴/۱۱	۱۸۶/۴۵	۰/۳۱۲	کلرید کلسیم
۰/۰۹۳	۱۱۲/۳۷	۱۲/۰۸	۰/۶۸	۱۲۰/۰۷	۵/۹۳	۱۷/۰۹	۰/۰۹۳	سولفات سدیم

(Weggler-Beaton et al., 2003) دریافتند که با افزایش غلظت یون کلر در محلول خاک کمپلکس‌های کلر-کادمیوم گونه غالب محلول خواهند بود. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که غلظت کادمیوم اندام‌های هوایی گیاه، همبستگی بالاتری با فعالیت گونه  $CdCl_2$  نسبت به یون آزاد کادمیوم داشت. (Smolders et al., 1997) نشان دادند که گونه‌های کمپلکس  $CdCl_2$  محلول خاک دارای فراهمی زیستی بالایی برای گیاهان هستند. (Ghallab and Usman 2010) با مطالعه گونه‌های شیمیایی کادمیوم محلول در خاک آلوده به ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده کردند که کادمیوم محلول عمدتاً به شکل یون آزاد و کمپلکس  $CdSO_4$  است که با افزایش غلظت کلر در اثر مصرف آب شور در یک خاک آهکی، گونه‌های کمپلکس کلر-کادمیوم بر دیگر گونه‌ها غلبه می‌کنند. به‌عنوان مثال در تیمار شوری  $68/4$  میلی‌مولار کلرید سدیم یون آزاد کادمیوم از  $71/3$  درصد کل به  $19/8$  درصد کاهش پیدا کرد. در حالی که، درصد محاسبه شده  $CdCl_2$  از  $18/4$  به  $78/2$  درصد کاهش یافت.

جدول ۵- میانگین غلظت گونه‌های شیمیایی کادمیوم عصاره اشباع خاک ستون‌های آبشویی شده با کادمیوم (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در حضور نمک‌های مختلف آب آبشویی (۱۰۰ میلی‌اکیوالنت بر لیتر) در دو خاک مورد بررسی

گونه‌های شیمیایی کادمیوم $\mu mol .L-1$					محلول پایه آبشویی (me.L-1)۱۰۰
$Cd(SO_4)(aq)$	$CdCl_2(aq)$	$CdCl_2$	$Cd^{2+}$	$Cd(SO_4)2-$	
<b>خاک کرج</b>					
۰/۸۶۲	۰/۲۹۷	۱۲/۷	۳۳/۲	۰/۰۰۵	شاهد (آب مقطر)
۰/۴۵۲	۲۵/۳۰	۷۱/۱	۱۵/۲	۰/۰۱۰	کلرید سدیم
۰/۸۴۷	۳۵/۴۰	۱۲۱	۳۱/۱	۰/۰۱۹	کلرید کلسیم
۲۷/۷۰	۰/۰۲۲	۲/۵۵	۲۲/۲	۲۰/۶۰	سولفات سدیم
<b>خاک لاهیجان</b>					
۷/۲۶۰	۰/۷۷۰	۲۵/۹۲	۵۳/۷۸	۰/۲۳۰	شاهد (آب مقطر)
۲/۲۱۰	۶۶/۸۵	۱۴۳/۵	۲۳/۳۰	۰/۱۵۰	کلرید سدیم
۲/۲۹۰	۵۵/۱۴	۲۰۰/۵	۵۳/۹۳	۰/۰۸۰	کلرید کلسیم
۳۰/۷۶	۰/۱۶۰	۶/۲۲۰	۱۸/۸۷	۳۶/۹۸	سولفات سدیم



شکل ۳- درصد نسبی گونه‌های شیمیایی کادمیوم محلول در تیمارهای مختلف شوری خاک کرج (الف) و خاک لاهیجان (ب)

### نتیجه‌گیری

نتایج رفتار جذب سطحی کادمیوم در دو خاک کرج و لاهیجان با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت کاملاً متفاوت بدست آمد. بالا بودن ضریب  $k_F$  خاک کرج (۴۲۱/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) در مقابل خاک لاهیجان (۲۳۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) نشان از ظرفیت بالاتر خاک کرج در نگهداری و ممانعت از خروج کادمیوم نسبت به خاک لاهیجان داشت. این اختلاف در مقادیر کربنات کلسیم معادل و pH دو خاک منعکس گردیده است. بیشترین غلظت کادمیوم خروجی از ستون‌های خاک مربوط به تیمارهای ترکیب یونی کلرید کلسیم و کلرید سدیم بود. شبیه‌سازی مقادیر گونه‌های یونی کادمیوم هم حضور گونه‌های کمپلکس کادمیوم-کلر را در مقادیر نسبی بالا، این واقعیت را که نقش کلر در افزایش تحرک کادمیوم در خاک‌ها در حضور مقادیر بالای ترکیبات تثبیت کننده همچون کربنات‌های کلسیم و ماده آلی و pH بالا پررنگ و بارز است، تایید می‌نماید. با این حال روند رو به رشد شور شدن خاک‌های کشور در اثر مدیریت نامناسب مصرف آب‌های زیرزمینی شور، در کنار تجمع کادمیوم در خاک، می‌تواند پتانسیل ایجاد گونه‌های شیمیایی متحرک این فلز سنگین و خطر ورود آن به چرخه زیستی را افزایش دهد. پژوهش‌های آینده می‌توانند در سطح مزارع و با استفاده از گونه‌های گیاهی در حال رشد انجام پذیرد و اطلاعات مفیدتری از رفتار فلز کادمیوم در شرایط شوری خاک ارائه نمایند.

**"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"****REFERENCES**

- Afonne, O. J., & Ifediba, E. C. (2020). Heavy metals risks in plant foods—need to step up precautionary measures. *Current Opinion in Toxicology*, 22, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2019.12.006>
- Allison J.D., Brown, D.S., & Novo-Gradac, K.J. (1991). MINTEQA2/ PRODEFA2, A geochemical assessment model for environmental systems: Ver. 3.0 .User's manual. Environ. Res. Lab., USEPA, Athens, GE.
- Barregard, L., Sallsten, G., Lundh, T., & Mölne, J. (2022). Low-level exposure to lead, cadmium and mercury, and histopathological findings in kidney biopsies. *Environmental Research*, 211, 113119. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113119>
- Beygi, M., & Jalali, M. (2019). Assessment of trace elements (Cd, Cu, Ni, Zn) fractionation and bioavailability in vineyard soils from the Hamedan, Iran. *Geoderma*, 337, 1009-1020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.009>
- Blake, G.R., & Hartge K. H. (1986). Bulk density. In: Klute, A. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1 – Physical and mineralogical methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 363-382.
- Cavallaro, N., & McBride, M.B. (1978) Copper and cadmium adsorption characteristics of selected acid and calcareous soils. *Soil Science Society American Journal*, 42, 550-556. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200040003x>
- Chi, W., Yang, Y., Liu, T., Sun, Y., Du, Y., Qin, H., & Li, X. (2022). Effects of water salinity on cadmium availability at soil–water interface: implication for salt water intrusion. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20606-2>
- Deng, P., Ma, Q., Xi, Y., Yang, L., Lin, M., Yu, Z., & Zhou, Z. (2020). Transcriptomic insight into cadmium-induced neurotoxicity in embryonic neural stem/progenitor cells. *Toxicology in Vitro*, 62, 104686. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2019.104686>
- Fajana, H. O., Jegede, O. O., James, K., Hogan, N. S., & Siciliano, S. D. (2020). Uptake, toxicity, and maternal transfer of cadmium in the oribatid soil mite, *Oppia nitens*: Implication in the risk assessment of cadmium to soil invertebrates. *Environmental Pollution*, 259, 113912. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113912>
- FAO (2016). Salt-affected soil. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/> August, 2016).
- Feng, S.Y., Zhang, Y.F. & Shen, R.K. (1995). Experimental study and numerical modeling of N-fertilizer transformation and transportation in saturated soil under the condition of drainage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 95, 16-22. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60014-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60014-9)
- Filipović, L., Romić, M., Romić, D., Filipović, V., & Ondrašek, G. (2018). Organic matter and salinity modify cadmium soil (phyto) availability. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 824-831. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.041>
- Frankenberger Jr., W. T., Tabatabai, M. A., Adriano, D. C., & Doner, H. E. (1996). Bromine, Chlorine, & Fluorine. In: Sparks, D.L., (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 833-867.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis* :In: Klute A. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part I-Physical and mineralogy methods*. Agron. Monogr. 9. 2nd ed. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 383-412.
- Ghallaab, A., & Usman, A. R. A. (2007). Effect of sodium chloride-induced salinity on phyto-availability and speciation of Cd in soil solution. *Water, Air, and Soil Pollution*, 185(1), 43-51. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9424-y>
- Habib, M. R., Hoque, M. M., Kabir, J., Akhter, S., Rahman, M. S., Moore, J., & Jolly, Y. N. (2022). A comparative study of heavy metal exposure risk from the consumption of some common species of cultured and captured fishes of Bangladesh. *Journal of Food Composition and Analysis*, 108, 104455. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104455>
- Helmke, P.A., & D.L. Sparks. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In: Sparks, D.L. (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. Agronomy Monograph, vol. 5. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 551-574.



- Karimian, N., & Cox, F. R. (1978). Adsorption and extractability of molybdenum in relation to some chemical properties of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 42(5), 757-761. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200050021x>
- Khanmirzaei, A., Bazargan, K., Amir Moezzi, A., Richards, B. K., & Shahbazi, K. (2013). Single and sequential extraction of cadmium in some highly calcareous soils of southwestern Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(1), 153-164. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000014>
- Khoshgoftar, A. H., Shariatmadari, H., Karimian, N., Kalbasi, M., Van der Zee, S. E. A. T. M., & Parker, D. R. (2004). Salinity and zinc application effects on phytoavailability of cadmium and zinc. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1885-1889. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1885>
- Li, Z., Liang, Y., Hu, H., Shaheen, S. M., Zhong, H., Tack, F. M., ... & Zhao, J. (2021). Speciation, transportation, and pathways of cadmium in soil-rice systems: A review on the environmental implications and remediation approaches for food safety. *Environment International*, 156, 106749. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106749>
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978) Development of a DTPA soil test for Zn, Fe, Mn, and Cu. *Soil Science Society American Journal*, 42: 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- Loeppert, R. H., & Suarez, D. L. (1996). Carbonate and gypsum In: Sparks D.L. (ed.) *Chemical Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America. Madison pp. 437-447.
- Loganathan, P., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Naidu, R. (2012). Cadmium sorption and desorption in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(5), 489-533. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.520234>
- Machender, G., Dhakate, R., Prasanna, L. & Govi, P.K. (2011) Assessment of heavy metal contamination in soils around Balanagar industrial area, Hyderabad, India. *Environmental Earth Sciences*, 63(5), 945-953. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0763-4>
- Maftoun, M., Rassooli, F., Ali Nejad, Z., & Karimian, N. (2004). Cadmium sorption behavior in some highly calcareous soils of Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(9-10), 1271-1282. <https://doi.org/10.1081/CSS-120037545>
- Mallongi, A., Birawida, A. B., Astuti, R. D. P., & Saleh, M. (2020). Effect of lead and cadmium to blood pressure on communities along coastal areas of Makassar, Indonesia. *Enfermería Clínica*, 30, 313-317. <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2020.03.001>
- McLaughlin, M.J., Tiller, K.G., Naidu, R. & Stevens, D.P. (1996). Review: the behavior and environmental impact of contaminants in fertilizers. *Australian Journal of Soil Research* 34, 1-54. <https://doi.org/10.1071/SR9960001>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks D.L. (ed) *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison. pp. 961-1010.
- Park, H. J., Kim, S. U., Jung, K. Y., Lee, S., Choi, Y. D., Owens, V. N., & Hong, C. O. (2021). Cadmium phytoavailability from 1976 through 2016: Changes in soil amended with phosphate fertilizer and compost. *Science of The Total Environment*, 762, 143132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143132>
- Pouillot, R., Farakos, S. S., & Van Doren, J. M. (2022). Modeling the risk of low bone mass and osteoporosis as a function of urinary cadmium in US adults aged 50-79 years. *Environmental Research*, 212, 113315. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113315>
- Rajaie, M., Karimian, N., Maftoun, M., Yasrebi, J., & Assad, M. T. (2006). Chemical forms of cadmium in two calcareous soil textural classes as affected by application of cadmium-enriched compost and incubation time. *Geoderma*, 136(3-4), 533-541. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.007>
- Ramteke, D., Chakraborty, P., Chennuri, K., & Sarkar, A. (2021). Geochemical fractionation study in combination with equilibrium based chemical speciation modelling of Cd in finer sediments provide a better description of Cd bioavailability in tropical estuarine systems. *Science of The Total Environment*, 764, 143798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143798>
- Rezaei, M. J., Farahbakhsh, M., Shahbazi, K., & Marzi, M. (2021). Study of cadmium distribution coefficient in acidic and calcareous soils of Iran: comparison between low and high concentrations. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101516. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101516>
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L., (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 417-435.
- Smolders, E., Lambrechts, R.M., McLaughlin, M.J., & Tiller K.G. (1997). Effect of soil solution chloride on

- Cd availability to Swiss chard. *Journal of Environmental Quality*, 27:426-431. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020025x>
- Sruthi, P., Shackira, A. M., & Puthur, J. T. (2017). Heavy metal detoxification mechanisms in halophytes: an overview. *Wetlands Ecology and Management*, 25(2), 129-148. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9513-z>
- Suarez, D. L. (1996). Beryllium, Magnesium, Calcium, Strontium, and Barium. In: Sparks, D.L., (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 575-601.
- Tahervand, S., & Jalali, M. (2016). Sorption, desorption, and speciation of Cd, Ni, and Fe by four calcareous soils as affected by pH. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(6), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5313-4>
- Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil activity. In: Sparks, D.L., (Eds), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods*. Agronomy Monograph, vol. 9. American Society Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp 475-490.
- Valipour, M., Shahbazi, K., & Khanmirzaei, A. (2016). Chemical immobilization of lead, cadmium, copper, and nickel in contaminated soils by phosphate amendments. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 44(5), 572-578. <https://doi.org/10.1002/clen.201300827>
- Wang, M., Chen, S., Chen, L., & Wang, D. (2019). Responses of soil microbial communities and their network interactions to saline-alkaline stress in Cd-contaminated soils. *Environmental Pollution*, 252, 1609-1621. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.082>
- Wegler-Beaton, K., McLaughlin, M. J., & Graham, R. D. (2000). Salinity increases cadmium uptake by wheat and Swiss chard from soil amended with biosolids. *Soil Research*, 38(1), 37-46. <https://doi.org/10.1071/SR99028>
- Yang, X., Li, J., Zheng, Y., Li, H., & Qiu, R. (2023). Salinity elevates Cd bioaccumulation of sea rice cultured under co-exposure of cadmium and salt. *Journal of Environmental Sciences*, 126, 602-611. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.05.053>
- Zahedifar, M., & Moosavi, A. A. (2020). Assessing cadmium availability of contaminated saline-sodic soils as influenced by biochar using the adsorption isotherm models. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(12), 1735-1752. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1694145>