



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره ششم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.15308.3054

## اثر کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم بر جذب روی در تعدادی از خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری

نرگس آبیاری<sup>۱</sup>، علیرضا حسین‌پور<sup>۲</sup> و حمیدرضا متقیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد،

آستادیار گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۷/۱۷

### چکیده

**سابقه و هدف:** جذب یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شیمیایی مؤثر بر تحرک و قابلیت استفاده روی در خاک است. حضور کاتیون‌ها در محلول می‌تواند بر جذب روی در خاک‌ها مؤثر باشد. برای بررسی جذب عناصر از همدماهای جذب استفاده می‌شود. همدماهای جذب رابطه مقدار عنصر جذب سطحی شده و غلظت عنصر را در محلول تعادلی در دمای ثابت توصیف می‌کنند. کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم از مهم‌ترین کاتیون‌های خاک‌ها هستند. در این مطالعه بررسی اثر کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم بر جذب روی در پنج نمونه خاک آهکی استان چهارمحال و بختیاری انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** به منظور بررسی همدماهای جذب روی در خاک‌های مورد مطالعه و در حضور الکترولیت‌های مختلف آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. ابتدا نمونه‌های ۲ گرمی از هر خاک در ۳ تکرار را درون لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و سپس ۲۰ میلی‌لیتر از محلول  $ZnSO_4$  حاوی غلظت‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر روی که در محلول‌های زمینه نمک‌های  $Ca(NO_3)_2$ ،  $NaNO_3$ ،  $KNO_3$  و  $NH_4NO_3$  (با غلظت ۵۰ میلی‌مولار) ساخته شده بود به لوله‌ها اضافه و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت با دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند. پس از آن محلول صاف رویی جدا شده و غلظت روی در عصاره‌ها (در حال تعادل) با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، غلظت روی جذب‌شده از تفاوت بین غلظت اولیه و نهایی (تعادلی) تعیین و سپس معادله‌های لانگ‌مویر، فروندلیچ و خطی بر داده‌ها برازش داده شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که با افزایش غلظت روی در محلول تعادلی مقدار جذب روی در خاک‌ها در حضور همه الکترولیت‌ها افزایش پیدا کرد. مقدار جذب روی در حضور کلسیم کمتر از سایر کاتیون‌ها بود. معادله‌های فروندلیچ و لانگ‌مویر با داشتن بیش‌ترین ضریب تبیین ( $R^2$ ) و کم‌ترین خطای استاندارد برآورد (SE) قادر به توصیف جذب

\* مسئول مکاتبه: [motaghian.h@yahoo.com](mailto:motaghian.h@yahoo.com)

روی بودند. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که حداکثر ظرفیت جذب روی (b معادله لانگ‌مویر) و شدت جذب (n در معادله فروندلیچ) به ترتیب در محلول حاوی کاتیون سدیم، کلسیم، پتاسیم و آمونیوم بیش‌ترین مقدار بود. ثابت متناسب با انرژی پیوند (k لانگ‌مویر) و حداکثر گنجایش بافری (MBC لانگ‌مویر) به ترتیب در محلول‌های پتاسیم، آمونیوم، سدیم و کلسیم بیش‌ترین مقدار را داشت. بیش‌ترین ضریب توزیع (kf فروندلیچ) نیز به ترتیب در محلول‌های حاوی سدیم، پتاسیم، آمونیوم و کلسیم بود. بنابراین روی در حضور سدیم و کلسیم به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تمایل را به قرارگیری در فاز جامد دارد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان داد که سدیم بیش از سایر کاتیون‌ها می‌تواند تحرک روی در خاک‌ها را کاهش دهد.

**واژه‌های کلیدی:** سدیم، ضریب توزیع، فروندلیچ، لانگ‌مویر، همدم‌های جذب

#### مقدمه

سرنوشت و قابلیت دسترسی روی در خاک‌ها تحت تأثیر سه فرایند مهم شامل حذف فلز از محلول خاک در نتیجه جذب به وسیله ذرات خاک، آزاد شدن فلز از ذرات خاک به محلول خاک و رسوب و حل شدن کانی دارای فلز به عنوان یک فاز مستقل در خاک قرار دارد (۴۱). جذب سطحی، جذب یک یون بر روی سطح باردار به وسیله نیروی الکترواستاتیکی است. در این نوع از جذب بین گروه‌های عاملی در سطح ماده جاذب و یک ماده شیمیایی پیوند تشکیل می‌شود (۴۳). ویژگی‌های جذب فلزات در خاک یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شیمیایی عناصر در خاک به شمار می‌رود، این فرآیند یک عامل تعیین‌کننده در قابلیت استفاده و تحرک فلزاتی مانند روی در خاک می‌باشد (۲۱). از جمله ویژگی‌هایی مؤثر بر جذب عناصر می‌توان به pH، ماده آلی، مدت زمان تماس، بافت خاک، کودهای فسفره، کربنات‌ها، اکسیدهای آهن، آلومینیم و منگنز، برهمکنش‌ها بین روی و سایر عناصر غذایی (۱۳) و حضور کاتیون‌ها (۴۷) اشاره کرد. این عوامل می‌توانند بر مقدار، شدت و نوع جذب روی مؤثر باشند.

روی (Zn) عنصر ضروری برای گیاهان و حیوانات است. این عنصر نقش‌های متابولیکی فراوانی در گیاه ایفا می‌کند. از مهم‌ترین آن‌ها حضور در ساختمان بسیاری از آنزیم‌ها مانند هیدروژناز، پروتئیناز، پپتیداز و فسفوهِیدرولاز است (۲۷). بنابراین، این عنصر در بخشی از آنزیم‌هایی که نقش اساسی در متابولیسم، انتقال مواد، تأمین انرژی و نسخه‌برداری دارند، وجود دارد و همین موضوع لزوم مقدار کافی این عنصر را جهت رشد مناسب گیاه به اثبات رسانده است. با این حال، کمبود آن در بسیاری از اراضی کشاورزی دنیا گزارش شده که منجر به کاهش محصول شده است (۴). کمبود روی یکی از شایع‌ترین کمبودهای عناصر غذایی کم‌نیاز در خاک‌های آهکی و قلیایی به حساب می‌آید که علت اصلی آن اغلب کمبود غلظت کل این عنصر نیست، بلکه غلظت کم روی قابل استفاده در این خاک‌هاست (۲۶). به علاوه وقتی که کود شیمیایی و یا آلی حاوی روی برای رفع کمبود به خاک افزوده می‌شود، بازیابی ظاهری آن غالباً کم‌تر از ۵ درصد است که این موضوع نشان‌دهنده ظرفیت زیاد خاک‌های آهکی برای ابقای روی است (۲۵).

مقدار کربنات کلسیم و گنجایش تبادل کاتیونی را از عوامل مؤثر بر ضرایب جذب روی ذکر کردند. کایور و همکاران (۲۰۱۰) اثر کاتیون‌های سدیم و پتاسیم را بر جذب روی در خاک‌های شمال غرب هند بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها صرف نظر از سری خاک‌ها، مقدار جذب روی با افزایش غلظت آن زیاد می‌شود و حداکثر ظرفیت جذب (b معادله لانگمیر) روی در حضور سدیم بیش‌تر از پتاسیم بود. آن‌ها افزایش جذب روی در حضور سدیم را به دلیل ویژگی منحصربه‌فرد سدیم در پخشیدگی رس‌ها در خاک‌ها گزارش کردند. خاک‌های مختلف به دلیل ویژگی‌های متفاوت توانایی جذب متفاوتی دارند (۲۰). آیالو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که جذب روی در خاک به شدت به ویژگی‌های خاک مانند مقدار کربن آلی، کربنات کلسیم و مقدار اکسیدهای آهن و منگنز وابسته است (۷).

با توجه به کمبود روی در خاک و گیاه و تأثیر آن ر کاهش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی، در سال‌های اخیر، مصرف کودهای حاوی این عنصر سترش یافته است. میزان کارایی کودهای حاوی روی تحت تأثیر یون‌های فراوانی در خاک‌ها قرار می‌گیرد. خاک‌های مناطق مختلف ایران دارای ویژگی‌های متفاوت (نوع کانی‌ها، مقدار و نوع اکسیدها، کربنات‌ها و ماده آلی) هستند (۷) که این عوامل بر جذب روی مؤثرند. به منظور دستیابی به مدیریت صحیح کوددهی، آگاهی از عوامل مؤثر بر فراهمی روی در خاک‌های مختلف و جذب آن توسط گیاه ضروری است. با توجه به رقابت و حضور کاتیون‌های مختلف در خاک‌های مختلف، بررسی تأثیر کاتیون‌ها بر عنصر روی در این خاک‌های مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین با توجه به اهمیت روی در رشد گیاهان و نقش بسیار مهم آن در روابط

همدم‌های جذب سطحی رابطه مقدار عنصر جذب سطحی شده بر سطح جاذب و غلظت عنصر را در محلول تعادل در دمای ثابت توصیف می‌کند (۱). عموماً، یک همدم‌ای جذب سطحی منحنی بسیار ارزشمندی است که پدیده حاکم بر جذب (یا واجذب) یا تحرک ماده از محیط متخلخل آبی (مانند خاک) یا زیست‌بوم‌های آبی (آب‌های آلوده مانند رودخانه‌ها و تالاب‌ها) به فاز جامد را در دما و pH ثابت توصیف می‌کند (۳ و ۲۳).

همان‌طور که گفته شد برهمکنش‌ها بین روی و سایر عناصر غذایی می‌تواند بر جذب آن تأثیر بگذارد. مطالعات نشان می‌دهد که جذب روی در خاک متأثر از عوامل متعددی از جمله حضور کاتیون‌های مختلف است (۱۸، ۲۰ و ۴۷). وانگ و هارل (۲۰۰۵) اثر کاتیون‌های آمونیوم، پتاسیم و سدیم را در سه خاک اسیدی و چهار خاک آهکی در منطقه لوئیزیانای آمریکا مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاتیون‌های مورد بررسی به خصوص در غلظت بالای روی، اثرات زیادی بر جذب روی داشتند. از بین ۳ کاتیون مورد بررسی بیش‌ترین جذب روی در حضور الکترولیت حاوی سدیم بود، که دلیل آن به رقابت پایین سدیم و روی در جایگاه‌های جذب در خاک‌ها بیان شد. پس از الکترولیت حاوی سدیم، بیش‌ترین مقدار روی به ترتیب در الکترولیت‌های حاوی پتاسیم و آمونیوم جذب شد (۴۷). جلالی و احمدی (۲۰۱۲) اثر کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم را بر جذب روی در برخی خاک‌های آهکی استان همدان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین جذب روی در حضور کاتیون سدیم و پس از آن به ترتیب پتاسیم، آمونیوم و کلسیم بود (۱۸). علت جذب زیاد روی در حضور سدیم رقابت کم آن با روی در جایگاه‌های جذب مرتبط شد. آن‌ها

فیزیولوژیکی گیاهان، در این پژوهش اثر کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم بر جذب روی در تعدادی از خاک‌های آهکی استان چهارمحال و بختیاری مورد بررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری از خاک‌های کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری (محدوده طول جغرافیایی ۴۵۶۹۴۷ تا ۴۹۸۶۱۳ متر و عرض جغرافیایی در دامنه ۳۵۵۲۹۲۲ تا ۳۶۰۶۸۸۸ متر) انجام شد. اقلیم منطقه نیمه‌خشک و دارای رژیم رطوبتی زیریک (Xeric) و رژیم حرارتی مزیک (Mesic) است. نمونه‌ها از خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) از ده نقطه در سه تکرار (در سطح یک متر مربع) برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. خاک‌ها ابتدا هواخشک، کوبیده و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. سپس بافت خاک‌ها به روش هیدرومتر (۱۲)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اسید باقیمانده (۲۲) و مقدار روی قابل‌استفاده با استفاده از عصاره‌گیر DTPA-TEA (۳۰) اندازه‌گیری شد. از میان آن‌ها پنج نمونه خاک که از نظر درصد رس، درصد کربنات کلسیم معادل و مقدار روی قابل استفاده تغییرات زیادی داشتند، برای مطالعه جذب روی انتخاب شدند. ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری‌شده در خاک‌های مورد مطالعه مانند pH در سوسپانسیون ته‌نشین‌شده با نسبت ۲ به ۱ آب به خاک و پس از دو ساعت تکان دادن (۴۵)، به وسیله دستگاه pH متر مدل کورنینگ ۲۲۰، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره صاف‌شده با نسبت ۲ به ۱ آب به خاک (۳۶)، توسط دستگاه هدایت‌سنج مدل CC-510 اندازه‌گیری شد. مقدار کلسیم کربنات معادل (Calcium Carbonate Equivalent; CCE)، به روش خشتی‌سازی با اسید

هیدروکلریک ۱ نرمال و تیتراسیون اسید باقی‌مانده با محلول سدیم هیدروکسید ۰/۵ نرمال (۲۲) و گنجایش تبادل کاتیونی (Cation Exchange Capacity; CEC) با استفاده از سدیم استات ۱ نرمال، pH برابر ۷ (۴۴) اندازه‌گیری شد. درصد ماده آلی به روش سوزاندن تر با پتاسیم دی‌کرومات و تیتراسیون دی‌کرومات باقی‌مانده با فروآمونیم سولفات (۳۱) تعیین شد. مقدار روی قابل‌استفاده با استفاده از روش DTPA-TEA (۲۴) و روی کل با اسید نیتریک ۴ مولار (۴۲) عصاره‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری جذب روی در خاک ابتدا نمونه‌های ۲ گرمی از هر خاک در ۳ تکرار را درون لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و سپس ۲۰ میلی‌لیتر از محلول ZnSO<sub>4</sub> حاوی غلظت‌های ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر روی که در محلول‌های زمینه نمک‌های Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>، NaNO<sub>3</sub>، KNO<sub>3</sub> و NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (با غلظت ۵۰ میلی‌مولار) ساخته شده بود به لوله‌ها اضافه‌شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲±۲۵ درجه سانتی‌گراد با دستگاه تکان‌دهنده برقی تکان داده شدند و پس آن با دستگاه سانتریفیوژ با ۳۰۰۰ دور در دقیقه صاف شدند. سپس با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ محلول صاف رویی جدا شده و غلظت روی در عصاره‌ها (در حال تعادل) با استفاده از دستگاه جذب اتمی (مدل جی‌بی‌سی، ۹۳۲) تعیین شد.

پس از جمع‌آوری داده‌ها، غلظت روی جذب‌شده از تفاوت بین غلظت اولیه و نهایی (تعادلی) تعیین شد (۴۷). سپس، شکل غیرخطی معادله‌های لانگ‌مویر (رابطه ۱)، فروندلیچ (رابطه ۲) و معادله خطی (رابطه ۳) بر داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SigmaPlot 12.0 برازش شد.

### نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه: ویژگی‌های پنج نمونه خاک اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان داد که خاک‌ها قلیایی با pH در دامنه ۷/۳ تا ۷/۹ و میانگین ۷/۸ بودند. گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌ها در دامنه ۲۳/۵ (خاک ۱) تا ۲۹/۴ (خاک ۴) و میانگین ۲۶/۳ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم، ماده آلی در دامنه ۱/۱ (خاک ۳) تا ۲ (خاک ۱) و میانگین ۱/۶ درصد، قابلیت هدایت الکتریکی در دامنه ۰/۲۴ (خاک ۳) تا ۰/۳۲ (خاک‌های ۲ و ۵) و میانگین ۰/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. روی قابل استفاده در دامنه ۰/۸۶ (خاک ۳) تا ۲/۲۷ (خاک ۴) و میانگین ۱/۴ روی کل در دامنه ۳۶/۴ (خاک ۳) تا ۶۹/۳ (خاک ۴) و میانگین ۴۶/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. این خاک‌ها در مقایسه با خاک‌های مورد مطالعه توسط جلالی و احمدی (۲۰۱۲) دارای درصد رس و کربنات کلسیم معادل بیش‌تری بودند (۱۸). خاک ۴، بیش‌ترین گنجایش تبادل کاتیونی، روی قابل استفاده و روی کل و حداقل مقدار کربنات کلسیم معادل را در بین خاک‌های مورد مطالعه داشت. خاک ۱ دارای بیش‌ترین مقدار ماده آلی و حداقل گنجایش تبادل کاتیونی در بین خاک‌های مورد مطالعه بود. خاک ۲ دارای حداقل ماده آلی و پس از خاک ۱، کم‌ترین گنجایش تبادل کاتیونی را داشت.

$$q = \frac{kcb}{1+kc} \quad (۱)$$

$$q = K_f \times c^n \quad (۲)$$

$$q = B \times c \quad (۳)$$

که در آن‌ها،  $q$  مقدار روی جذب شده در واحد وزن خاک (میلی‌گرم بر کیلوگرم) و  $c$  غلظت روی در محلول تعادلی (میلی‌گرم بر لیتر) هستند. در معادله لانگ‌مویر  $k$  ثابت متناسب با انرژی پیوند (لیتر بر میلی‌گرم) و  $b$  حداکثر ظرفیت جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. در معادله فروندلیچ،  $n$  ضریب متناسب با انرژی جذب و  $k_f$  ضریب توزیع (لیتر بر کیلوگرم) است. در معادله خطی،  $B$  (شیب خط) بیانگر گنجایش بافری تعادلی است (۲۹). معیار انتخاب معادله‌های دارای توانایی توصیف جذب روی، داشتن بیش‌ترین ضریب تبیین ( $R^2$ ) و کم‌ترین خطای استاندارد برآورد (SE) بود.

این مطالعه به صورت طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. برای بررسی اثر کاتیون‌ها و خاک‌ها بر ویژگی‌های جذب روی از تجزیه واریانس (پس از بررسی فرضیات در قالب طرح کاملاً تصادفی) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها به روش چند دامنه دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. همچنین ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) بین ضرایب مدل‌های مختلف جذب و ویژگی‌های خاک‌ها تعیین گردید. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Statistica انجام شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه.

Table 1. Some properties of studied soils.

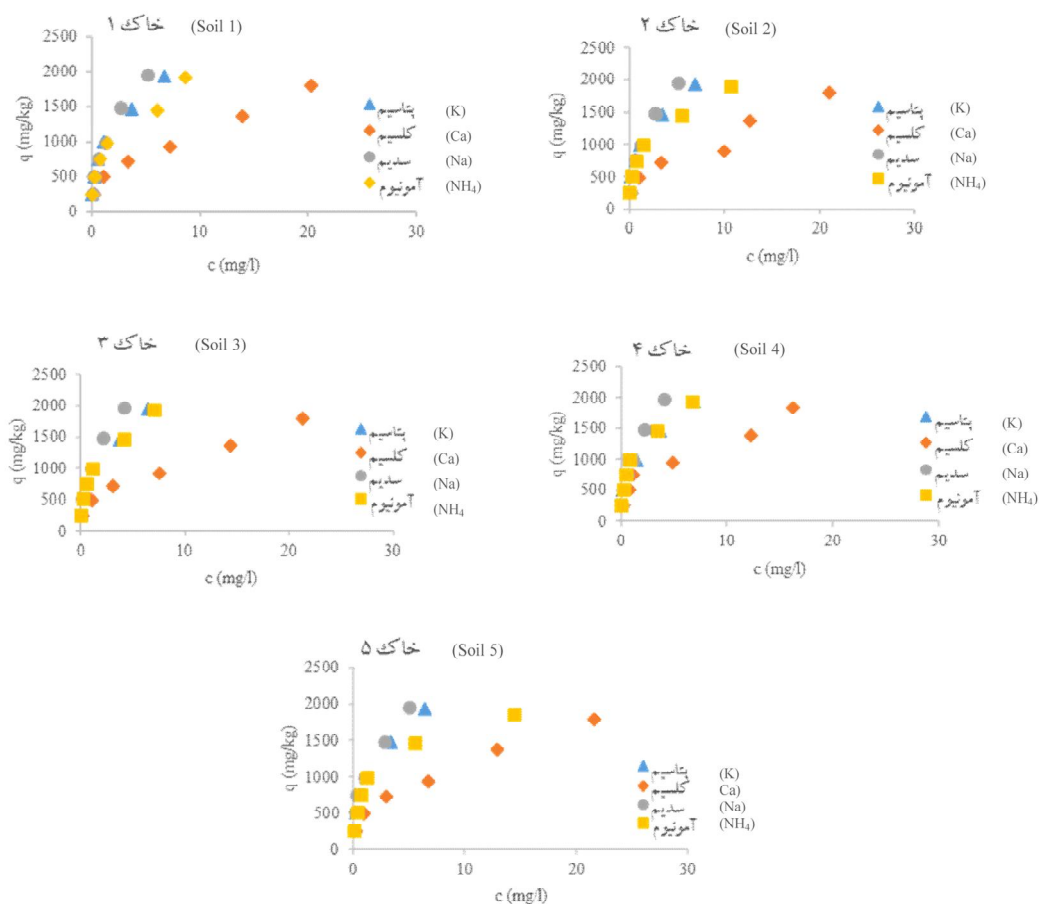
شماره خاک Soil number	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	بافت Texture	CCE درصد (%)	OM درصد (%)	pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	روی قابل استفاده Available Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	روی کل Total Zn
1	36	43	21	CL	22	2.0	7.3	0.27	23.5	1.57	43.8
2	30	45	25	CL	16	1.6	7.9	0.32	25.1	0.96	43.6
3	35	47	18	SC	12	1.1	7.9	0.24	24.9	0.86	36.4
4	39	42	19	SC	6	1.7	7.8	0.28	29.4	2.27	69.3
5	41	32	27	C	16	1.7	7.9	0.32	28.3	1.54	38.3
میانگین Mean	36	42	22		14	1.6	7.8	0.28	26.3	1.44	46.3
CV (%)	12	14	18		41	21	3	13	10	39	29

CL: لومی رسی؛ C: رسی؛ SC: رس سیلتی؛ CCE: کربنات کلسیم معادل (Calcium Carbonate Equivalent)؛ OM: ماده آلی (Organic matter)؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی (Electrical conductivity)؛ CEC: گنجایش تبادل کاتیونی (Cation exchange capacity) و CV: ضریب تغییرات بر حسب درصد (Coefficient of variation).

روی در مقایسه با سه الکترولیت دیگر بود و بنابراین در هر غلظت تعادلی در محلول حاوی کاتیون کلسیم روی کم‌تری در سطوح جامد خاک‌ها جذب شده است. همچنین نمودار مربوط به حضور الکترولیت سدیم بالاتر از همه محلول‌ها قرار داشت. اثر کاتیون‌های همراه بر جذب روی توسط شوکلا و همکاران (۱۹۸۰) اثبات شده است (۳۹). کاپور و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی جذب روی تحت تأثیر دو کاتیون سدیم و پتاسیم بیان کردند که نمودارهای جذب در همه خاک‌ها L شکل بوده و در همه خاک‌ها نمودار جذب روی در حضور سدیم بالاتر از پتاسیم بود و به عبارت دیگر جذب روی در حضور سدیم بیش‌تر از پتاسیم بود (۲۰).

**همدماهای جذب روی:** شکل ۱ جذب روی را در برابر غلظت تعادلی روی در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، نمودارها در همه الکترولیت‌ها L شکل (تعامل قوی بین سطح جذب‌کننده و جذب‌شونده) هستند؛ ولی جذب روی در خاک‌ها و در حضور الکترولیت‌های مختلف متفاوت است.

با توجه به نمودارهای جذب با افزایش غلظت در محلول تعادلی مقدار جذب روی در خاک‌ها افزایش پیدا کرد. نمودارها در حضور کاتیون‌های سدیم، پتاسیم و آمونیوم نزدیک به یکدیگر بود، اما در حضور کاتیون کلسیم در همه خاک‌ها پایین‌تر از سه کاتیون دیگر قرار گرفته بودند. پایین بودن نمودار جذب روی در حضور کاتیون کلسیم نشان‌دهنده کاهش جذب



شکل ۱- مقدار روی جذب شده در برابر غلظت تعادلی در حضور کاتیون‌های مختلف در خاک‌های مورد مطالعه.

Figure 1. The amount of adsorbed Zn against the equilibrium concentration in the presence of various cations in the studied soils.

به دلیل عدم توانایی در توصیف جذب در ادامه بررسی نشد (جدول ۲).

در مطالعه‌های متعددی توانایی معادله‌های فروندلیچ و لانگ‌مویر برای توصیف جذب روی گزارش شده است. جلالی و احمدی (۲۰۱۲) اثر کاتیون‌های کلسیم، سدیم و پتاسیم را بر ضرایب جذب روی حاصل از معادله‌های لانگ‌مویر و فروندلیچ بررسی کردند (۱۸). کایور و همکاران (۲۰۱۰) در بررسی جذب روی تحت تأثیر کاتیون‌های سدیم و پتاسیم از معادله‌های لانگ‌مویر و فروندلیچ برای توصیف جذب روی استفاده کردند (۲۰). در پژوهشی که توسط هاشمی و باقرنژاد (۲۰۰۸) در مورد جذب و

ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد (SE) برآورد حاصل از برازش مدل‌های لانگ‌مویر، فروندلیچ و خطی بر داده‌های جذب روی در جدول ۲ ارائه گردیده است. براساس معیارهای انتخاب همدم‌های مناسب، یعنی  $R^2$  و SE (معادله دارای توانایی توصیف جذب روی دارای بیش‌ترین ضریب تبیین و کم‌ترین خطای استاندارد است) مدل‌های فروندلیچ و لانگ‌مویر جذب روی را در خاک به‌خوبی توصیف کردند. معادله فروندلیچ با بالاترین ضریب تبیین (۰/۹۴ تا ۰/۹۹) و پایین‌ترین خطای استاندارد (۲۵/۵ تا ۱۶۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد و معادله خطی

در حضور کاتیون سدیم در دامنه ۸۷۵/۶ تا ۹۶۲/۷ با میانگین ۹۲۷/۹، در حضور کاتیون پتاسیم در دامنه ۸۶۶/۴ تا ۹۲۳/۷ با میانگین ۸۹۷/۷ لیتر بر کیلوگرم و در حضور کاتیون آمونیوم در دامنه ۷۸۸/۸ تا ۹۴۰/۸ با میانگین ۸۳۹/۶ لیتر بر کیلوگرم بود.

با توجه به اطلاعات به دست آمده از مقایسه میانگین ضریب توزیع ( $k_f$ ) روی در خاک‌های بررسی شده، حداکثر ضریب توزیع در خاک ۴ بود و با دیگر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0/05$ ). در حالی‌که این شاخص در خاک‌های ۱ و ۲ و همچنین خاک‌های ۳ و ۵ تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P > 0/05$ ).

بیش‌ترین ضریب توزیع در خاک ۴ می‌تواند به ویژگی‌های متفاوت این خاک با سایر خاک‌ها مرتبط باشد بررسی ضریب همبستگی ( $r$ ) نشان داد که بین ضریب توزیع و گنجایش تبادل کاتیونی در خاک‌ها رابطه مثبت و معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) وجود داشت ( $r = 0/76$ ). جذب روی در خاک به شدت به مقدار کربن آلی، کربنات کلسیم، آهن و منگنز موجود در خاک مربوط است (۷). کربنات کلسیم در خاک‌ها موجب افزایش جذب روی می‌شود (۸). با این وجود خاک ۴ دارای حداقل کربنات کلسیم معادل در بین خاک‌های مورد مطالعه بود.

ضرایب توزیع در حضور کاتیون‌های مختلف تفاوت معنی‌داری ( $P < 0/05$ ) داشت. این ضریب در حضور کاتیون سدیم بیش‌ترین مقدار را داشت و پس از آن پتاسیم، آمونیوم و کلسیم قرار داشتند. به عبارت دیگر در حضور کلسیم، روی تمایل بیش‌تری به حضور در محلول داشت. در حالی‌که در حضور سدیم بیش‌تر در فاز جامد قرار می‌گرفت. مقایسه میانگین ضریب توزیع در حضور کاتیون‌های مختلف در هر خاک نشان داد که ضریب توزیع در خاک‌های ۱ و ۲ در حضور کاتیون‌های سدیم و پتاسیم بیش‌ترین مقدار بود و با دو کاتیون دیگر تفاوت

آزادسازی روی در ۳ نوع خاک اسیدی، آهکی و گچی صورت گرفت، از معادله‌های لانگ‌مویر، فروندلیچ و خطی استفاده شد (۱۶).

معادله فروندلیچ به‌عنوان اولین رابطه توصیف‌کننده جذب سطحی غیرایده‌آل، برگشت‌پذیر و همچنین غیرمحدود به تک‌لایه بیان شده است. این مدل تجربی می‌تواند جذب سطحی چندلایه با توزیع غیریکنواخت گرمای جذب و شدت جذب را بر روی سطوح غیرهمگن توضیح دهد و بر اساس معادله فروندلیچ انرژی پیوند با افزایش میزان جذب به‌طور نمایی کاهش می‌یابد (۱۰). معادله فروندلیچ توسط بسیاری از پژوهشگران به‌منظور بررسی ویژگی‌های جذب روی در خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۱۹، ۳۳ و ۳۴).

با توجه به نتایج به دست آمده اثر نوع خاک، نوع کاتیون و اثر متقابل آن‌ها بر شدت جذب ( $k_f$ ) و ضریب توزیع روی ( $n$ ) در معادله فروندلیچ معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) بود (نتایج نشان داده نشده است). پس می‌توان گفت که اثر کاتیون‌ها بر ویژگی‌های جذب روی توصیف‌شده به‌وسیله معادله فروندلیچ به نوع خاک نیز وابسته بود. همدمای جذب فروندلیچ یکی از همدمای جذب است که به‌صورت تجربی به‌دست آمده است (۳۲). ضرایب معادله فروندلیچ شامل ضریب توزیع ( $k_f$ ) و شدت جذب ( $n$ ) در جدول ۳ ارائه شده است.

ضریب  $k_f$  در معادله فروندلیچ به‌عنوان ضریب توزیع شناخته می‌شود (۳۸). ضریب توزیع بزرگ‌تر بیانگر تمایل بیش‌تر خاک به جذب روی است. این ضریب حداکثر جذب را نیز بیان می‌کند، اما از حداکثر ظرفیت جذب معادله لانگ‌مویر کم‌تر است (۴۰). این ضریب پارامتر مناسبی برای مقایسه تمایل فلز به جذب در خاک‌های مختلف است (۱۱). ضریب توزیع روی در حضور کاتیون کلسیم در دامنه ۳۸۴/۶ تا ۵۴۵/۹ با میانگین ۴۳۳/۳ لیتر بر کیلوگرم،



معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ ). بنابراین روی در خاک‌های ۱ و ۲ و در حضور سدیم و پتاسیم تمایل بیشتری به قرارگیری در سطوح جامد نسبت به قرارگیری در محلول خاک دارد. در خاک ۳ ضریب توزیع در حضور کاتیون‌های پتاسیم و آمونیوم با دیگر کاتیون‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ ).

جدول ۲- ضرایب تبیین ( $R^2$ ) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادله‌های لانگ‌مویر، فروندلیچ و خطی در توصیف جذب روی در حضور کاتیون‌های مختلف.

**Table 2. Coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of estimation (SE) of Langmuir, Freundlich and linear equations in the description of adsorption of Zn in the presence of different cations.**

SE (mg/kg) (خطای استاندارد)				$R^2$ (ضریب تبیین)				شماره خاک Soil number
$NH_4^+$ آمونیم	$K^+$ پتاسیم	$Na^+$ سدیم	$Ca^{2+}$ کلسیم	$NH_4^+$ آمونیم	$K^+$ پتاسیم	$Na^+$ سدیم	$Ca^{2+}$ کلسیم	
(Langmuir) لانگ‌مویر								
169.5	133.9	130.6	181.4	0.94	0.96	0.97	0.92	1
155.2	149.4	124.0	243.1	0.95	0.95	0.97	0.86	2
131.6	126.1	109.6	193.0	0.96	0.97	0.98	0.91	3
122.8	191.6	114.7	216.4	0.97	0.93	0.97	0.89	4
103.4	131.4	171.0	175.5	0.98	0.97	0.94	0.92	5
144.8	146.5	130.0	201.9	0.96	0.96	0.97	0.90	میانگین Mean
(Freundlich) فروندلیچ								
98.7	46.4	57.7	86.0	0.98	0.99	0.99	0.98	1
51.3	25.5	56.1	160.2	0.99	0.99	0.99	0.94	2
64.0	68.4	57.5	90.4	0.99	0.99	0.99	0.98	3
75.1	37.4	73.0	135.6	0.99	0.99	0.99	0.96	4
102.8	76.5	117.7	63.6	0.98	0.98	0.97	0.99	5
72.3	50.8	76.0	107.2	0.99	0.99	0.99	0.97	میانگین Mean
(Linear) خطی								
443.1	459.8	385.6	290.9	0.48	0.46	0.63	0.74	1
501.0	476.2	392.4	293.9	0.33	0.42	0.62	0.74	2
446.0	429.8	373.2	309.5	0.49	0.53	0.66	0.70	3
504.7	449.8	357.4	379.0	0.35	0.48	0.69	0.58	4
588.0	446.0	437.2	341.4	0.04	0.50	0.52	0.64	5
473.7	452.3	389.1	322.9	0.41	0.48	0.62	0.68	میانگین Mean

ضرایب تبیین معادله‌های لانگ‌مویر و فروندلیچ در سطح ۱ درصد معنی‌دار بودند.

The coefficients of determination of Langmuir and Ferundlich were significant at 1% level.

جدول ۳- میانگین ضرایب معادله فروندلیچ مورد استفاده برای توصیف جذب روی در حضور کاتیون‌های مختلف در خاک‌های مورد مطالعه.

**Table 3. The mean Freundlich equation coefficients used to describe zinc adsorption in the presence of different cations in studied soils.**

میانگین Mean	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> آمونیم	K <sup>+</sup> پتاسیم	Na <sup>+</sup> سدیم	Ca <sup>2+</sup> کلسیم	شماره خاک Soil number
k <sub>f</sub> (l/kg)					
739.2 <sup>C</sup>	796.8 <sup>Cb</sup>	892.2 <sup>Ba</sup>	875.6 <sup>Ca</sup>	392.2 <sup>Cc</sup>	1
747.5 <sup>C</sup>	810.9 <sup>Cc</sup>	902 <sup>Bab</sup>	892.4 <sup>BCb</sup>	384.6 <sup>Cd</sup>	2
772.6 <sup>B</sup>	850.6 <sup>Bc</sup>	866.4 <sup>Bbc</sup>	962.7 <sup>Aa</sup>	410.8 <sup>BCd</sup>	3
839.9 <sup>A</sup>	940.8 <sup>Ab</sup>	923.7 <sup>ABab</sup>	949.2 <sup>Aa</sup>	545.9 <sup>Ac</sup>	4
773.4 <sup>B</sup>	798.8 <sup>Cc</sup>	904.1 <sup>Bb</sup>	959.5 <sup>Aa</sup>	433.2 <sup>Dd</sup>	5
	839.6 <sup>c</sup>	897.7 <sup>b</sup>	927.9 <sup>a</sup>	433.3 <sup>d</sup>	میانگین Mean
n					
0.442 <sup>AB</sup>	0.382 <sup>ABb</sup>	0.404 <sup>ABb</sup>	0.490 <sup>Ab</sup>	0.490 <sup>Aa</sup>	1
0.430 <sup>CB</sup>	0.355 <sup>BCc</sup>	0.379 <sup>ABb</sup>	0.480 <sup>Ba</sup>	0.487 <sup>Aa</sup>	2
0.450 <sup>A</sup>	0.409 <sup>Ac</sup>	0.424 <sup>Ac</sup>	0.504 <sup>Aa</sup>	0.464 <sup>ABb</sup>	3
0.423 <sup>CD</sup>	0.379 <sup>ABc</sup>	0.384 <sup>Bc</sup>	0.522 <sup>Aa</sup>	0.408 <sup>Cbc</sup>	4
0.409 <sup>D</sup>	0.331 <sup>Cc</sup>	0.415 <sup>ABb</sup>	0.435 <sup>Cab</sup>	0.454 <sup>Ba</sup>	5
	0.371 <sup>d</sup>	0.405 <sup>c</sup>	0.486 <sup>a</sup>	0.460 <sup>b</sup>	میانگین Mean

حروف بزرگ در هر ستون نشان‌دهنده مقایسه میانگین بین خاک‌ها در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون چند دامنه دانکن است. حروف کوچک در هر ردیف نشان‌دهنده مقایسه میانگین بین الکترولیت‌ها در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون چند دامنه دانکن است. وجود حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح ۵ درصد است. بدون واحد است.

The upper case letters in each column indicate a mean comparison between the soils at the 5% level based on the Duncan's multiple range test. The lowercase letters in each row indicate a mean comparison between the electrolytes at the 5% level based on Duncan's multiple range test. The presence of at least one same letter indicates nonsignificant difference at 5% level. n is without unit.

جذب بیش‌تر عنصر در خاک است. جلالی و احمدی (۲۰۱۲) در حضور کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم پس از برآزش داده‌های جذب روی در معادله فروندلیچ گزارش دادند که ضریب توزیع در حضور کاتیون پتاسیم بیش‌ترین مقدار و بعد از آن سدیم، آمونیوم و کلسیم قرار داشتند (۱۸). بنابراین روی در حضور پتاسیم بیش‌تر جذب ذرات خاک شده است و دسترسی به آن کم‌تر بود، در حالی‌که در حضور کلسیم، روی به‌راحتی در محلول باقی‌مانده و در دسترس می‌باشد.

انتخاب‌پذیری کاتیون‌ها در جذب را می‌توان تمایل نسبی یک کاتیون به یک سطح جذب‌کننده تعریف نمود. انتخاب‌پذیری به اندازه شعاع آب‌پوشی

ضریب توزیع در خاک ۴ در حضور کاتیون سدیم بیش‌ترین مقدار را دارا بود و با دیگر کاتیون‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ ). در خاک ۵ کم‌ترین ضریب توزیع مربوط به محلول حاوی الکترولیت آمونیوم بود و با دیگر کاتیون‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ )، پس روی در حضور آمونیوم تمایل به حضور در محلول خاک دارد.

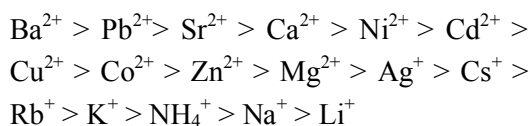
ضریب توزیع پایین عنصر به معنی جذب کم‌تر آن در سطوح جامد خاک و قرارگیری فلز در محلول خاک می‌باشد (۲۸). در واقع ضریب توزیع پایین عنصر سبب می‌شود که بیش‌تر در دسترس آبشویی، جابه‌جایی و شرکت در واکنش‌های شیمیایی در محلول خاک قرار گیرد. مقدار ضریب توزیع بالا نشانه

مقایسه میانگین شدت جذب در خاک‌های مورد بررسی نشان داد که خاک ۳ بیشترین شدت جذب روی را داشت و با خاک ۱ تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P > 0/05$ ). خاک‌های ۴ و ۵ نیز کم‌ترین شدت جذب را داشتند ( $P < 0/05$ ). بررسی ضریب همبستگی نشان داد که بین شدت جذب و گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌ها رابطه منفی و معنی‌داری ( $r = -0/60, P < 0/05$ ) وجود داشت. بر اساس نتایج جدول ۱ خاک‌های ۳ و ۱ کم‌ترین و خاک‌های ۴ و ۵ بیش‌ترین گنجایش تبادل کاتیونی را داشتند.

مقایسه میانگین شدت جذب روی در بین کاتیون‌های بررسی شده نشان داد که شدت جذب روی در کاتیون‌های مختلف تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0/05$ ). شدت جذب روی به ترتیب در حضور کاتیون سدیم، کلسیم، پتاسیم و آمونیوم بیش‌ترین مقدار بود. به این معنی که روی در حضور کاتیون سدیم با بیش‌ترین شدت و در حضور کاتیون آمونیوم با کم‌ترین شدت جذب سطوح جامد خاک می‌شود. ضریب توزیع روی در حضور آمونیوم نیز کم‌ترین مقدار بود.

مقایسه میانگین شدت جذب در حضور کاتیون کلسیم نشان داد که شدت جذب در خاک‌های ۱ و ۲ بیش‌ترین و تفاوت معنی‌داری با دیگر خاک‌ها دارند ( $P < 0/05$ ). بین شدت جذب روی در حضور الکترولیت دارای کلسیم و گنجایش تبادل کاتیونی در خاک‌ها رابطه منفی و معنی‌دار ( $r = -0/66, P < 0/05$ ) وجود داشت. نتایج مشابهی برای جذب روی در حضور این الکترولیت توسط جلالی و احمدی (۲۰۱۲) گزارش شده است (۱۸). در حضور کاتیون کلسیم کم‌ترین شدت جذب در خاک ۴ بود و با دیگر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0/05$ ). مقایسه میانگین در حضور کاتیون سدیم نشان داد که شدت جذب در خاک‌های ۳ و ۴ بیش‌تر و با دیگر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0/05$ ). در حضور کاتیون‌های پتاسیم و آمونیوم شدت جذب در خاک ۳

مربوط است. یونی که دارای کوچک‌ترین شعاع آب‌پوشی است می‌تواند در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به سطح قرار گرفته و به شدت نگهداری شود. در مورد کاتیون‌های دو ظرفیتی ثبات اندکی در ترتیب انتخاب‌پذیری وجود دارد. به نظر می‌رسد که نوع سطح و pH هر دو تأثیر عمده‌ای بر ترتیب انتخاب‌پذیری می‌گذارند. اما اگر یون‌هایی با ظرفیت‌های متفاوت بررسی شود، به‌طور کلی یون‌های با ظرفیت بیش‌تر ترجیح داده می‌شوند. هلفریش ترتیب انتخاب‌پذیری زیر یا سری لیوتروپی را برای برخی کاتیون‌های متداول ارائه کرده است (۳۲):



بر اساس سری لیوتروپی، کلسیم به دلیل داشتن شعاع آب‌پوشی کوچک‌تر بیش‌تر از روی جذب می‌شود (۳۲)؛ بنابراین کلسیم به دلیل رقابت با روی در جایگاه‌های جذب باعث کاهش جذب روی در خاک می‌شود (۴۷) این مطلب در شکل ۱ نشان داده شده است. به گزارش کوکس و ریزنور (۱۹۷۳) آمونیوم در خاک در جذب با کاتیون‌ها رقابت کرده و در نتیجه جذب کاتیون‌ها توسط گیاه را کاهش می‌دهد (۹). به گزارش کایور و همکاران (۲۰۱۰) در پنج خاک از هشت خاک مورد بررسی آن‌ها، ضریب توزیع روی در حضور سدیم بیش‌تر از پتاسیم بود (۲۰).

ضریب ( $n$ ) در معادله فروندلیچ به‌عنوان شدت جذب در نظر گرفته می‌شود (۱۴). با بزرگ‌تر شدن شدت جذب فلز، روی با شدت بیش‌تری جذب می‌شود. شدت جذب روی در حضور کاتیون کلسیم ۰/۴۰۸ تا ۰/۴۹۰ با میانگین ۰/۴۶۰، در حضور کاتیون سدیم ۰/۴۳۵ تا ۰/۵۲۲ با میانگین ۰/۴۸۶، در حضور کاتیون پتاسیم ۰/۳۷۹ تا ۰/۴۲۴ با میانگین ۰/۴۰۵ و در حضور کاتیون آمونیوم ۰/۳۳۱ تا ۰/۴۰۹ با میانگین ۰/۳۷۱ بود (جدول ۳).

بیش‌ترین مقدار و تفاوت معنی‌داری با دیگر خاک‌ها داشت ( $P < 0/05$ ).

مقایسه میانگین شدت جذب در حضور کاتیون‌های مختلف در هر خاک نشان داد که شدت جذب در خاک ۱ و ۲ در حضور کاتیون‌های کلسیم و سدیم بیش‌ترین مقدار را داشت و با دیگر کاتیون‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0/05$ ). به‌جز در خاک ۵، در همه خاک‌های بررسی‌شده بیش‌ترین شدت جذب در حضور کاتیون سدیم بود. بنابراین روی در حضور کاتیون سدیم و در خاک‌ها ۱، ۲، ۳ و ۴ با شدت بیش‌تری جذب می‌شود.

کاپور و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کرد که شدت جذب روی در حضور سدیم بیش‌تر از پتاسیم بود (۲۰). جلالی و احمدی (۲۰۱۲) گزارش کردند که شدت جذب روی در حضور آمونیوم بیش‌ترین مقدار را داشت و به دنبال آن سدیم، پتاسیم و کلسیم قرار داشتند (۱۸). تفاوت این نتایج می‌تواند به دلیل ویژگی‌های متفاوت خاک‌های مورد مطالعه باشد.

توانایی همدمای جذب لانگ‌مویر در توصیف جذب روی توسط پژوهشگران مختلف به اثبات رسیده است (۲، ۵، ۶، ۱۷ و ۳۰). با این‌حال مقدار خطای استاندارد برآورد این معادله نسبت به معادله فروندلیچ در این مطالعه نزدیک به ۲ برابر است. نتایج نشان داد که اثر خاک و کاتیون‌های مورد بررسی و همین‌طور اثر متقابل خاک و کاتیون‌ها بر ضرایب معادله لانگ‌مویر ( $k$ ،  $b$  و  $MBC$ ) در سطح یک درصد معنی‌دار بود ( $P < 0/01$ ) (داده‌ها نشان داده نشده است). بنابراین اثر کاتیون‌ها بر ویژگی‌های جذب روی توصیف‌شده به‌وسیله معادله لانگ‌مویر به نوع خاک‌ها بستگی دارد.

در جدول ۴ ضرایب مربوط به معادله لانگ‌مویر در حضور کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم آورده شده است. ضریب  $b$  در معادله لانگ‌مویر بیانگر حداکثر مقدار روی جذب‌شده و یا حداکثر ظرفیت جذب روی به‌صورت یک لایه‌ای در خاک است.

بر اساس نتایج جدول ۴ میانگین حداکثر جذب روی در حضور کاتیون‌های مختلف در دامنه ۱۸۱۱/۹ (در خاک ۴ و با زمینه حاوی کلسیم) تا ۲۶۵۷/۴ (در خاک ۴ با زمینه حاوی سدیم) میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. میانگین حداکثر جذب روی در حضور کاتیون کلسیم در دامنه ۱۸۱۱/۹ تا ۲۳۳۹/۶ با میانگین ۲۲۰۰/۸، در حضور کاتیون سدیم در دامنه ۲۱۲۰/۶ تا ۲۶۵۷/۴ با میانگین ۲۴۵۶/۶، در حضور کاتیون پتاسیم در دامنه ۲۰۷۴/۶ تا ۲۱۳۴/۴ با میانگین ۲۱۰۲/۹ و در حضور کاتیون آمونیوم در دامنه ۱۹۱۹/۸ تا ۲۰۹۳/۱ با میانگین ۱۹۸۷/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. بیش‌ترین مقدار این ضریب در حضور کاتیون سدیم و پس از آن به‌ترتیب کلسیم، پتاسیم و آمونیوم بود. اگرچه بازدارندگی این کاتیون‌ها بر افزایش این شاخص وجود دارد، اما به‌دلیل گنجایش جذب بالای روی در خاک‌های آهکی این اثر بسیار کم است (۴۷). تفاوت بین حداکثر جذب روی در حضور کلسیم و پتاسیم معنی‌دار نیست ( $P > 0/05$ ). به‌استثنای خاک‌های شماره ۲ و ۵، در سایر خاک‌ها زمینه حاوی سدیم بیش‌ترین جذب روی را داشت. بنابراین خاک‌ها در حضور کاتیون سدیم توانایی جذب روی بیش‌تری دارند. در حضور پتاسیم و آمونیوم در خاک‌های آهکی جذب روی در خاک کاهش پیدا کرد ( $P < 0/05$ ).

سدیم به‌دلیل داشتن شعاع هیدراته بزرگ قادر به ایجاد کمپلکس برون‌کره با سطوح کانی‌ها و کلوئیدهای رسی است؛ در مقابل  $K^+$  و احتمالاً  $NH_4^+$  می‌توانند کمپلکس درون‌کره نیز با کانی‌ها و رس‌ها تشکیل دهند (۴۲)، بنابراین سدیم به‌راحتی تبادل می‌شود. وانگ و هارل (۲۰۰۵) گزارش کردند بیش‌ترین جذب روی به‌ترتیب در محلول‌های حاوی سدیم، پتاسیم و آمونیوم به‌دست آمد (۴۷). سدیم به‌دلیل داشتن شعاع آب‌پوشی بزرگ کم‌تر جذب سطوح کانی‌ها می‌شود (۳۲)، بنابراین به‌دلیل رقابت کم‌تر سدیم با روی برای جایگاه‌های جذب، روی در حضور سدیم بیش‌تر جذب می‌شود.

ظرفیت جذب روی (b) در حضور کاتیون سدیم بیشترین مقدار بود. این شاخص در حضور کاتیون سدیم با دیگر کاتیون‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0/05$ ) و روی در حضور سدیم مقدار بیش‌تری نسبت به کاتیون‌های دیگر جذب می‌شود. همچنین حداکثر ظرفیت جذب روی در حضور کاتیون آمونیوم کمترین مقدار بود و پس از آن محلول‌های دارای پتاسیم و کلسیم قرار دارند.

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از مقایسه میانگین، حداکثر جذب روی (b) بین خاک‌های مورد مطالعه تفاوتی نداشت ( $P > 0/05$ ). با توجه به تفاوت ویژگی‌ها خاک‌ها انتظار تفاوت در مقدار حداکثر جذب روی وجود داشت. اما به‌دلیل این‌که مدل لانگ‌مویر مقدار حداکثر جذب روی را بیش برآورد می‌کند (۴۷)؛ مقدار برآوردشده این شاخص در خاک‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشت. حداکثر

جدول ۴- میانگین ضرایب معادله لانگ‌مویر مورد استفاده برای توصیف جذب روی در حضور کاتیون‌های مختلف در خاک‌های مورد مطالعه.

**Table 4. The mean of coefficients of Langmuir equation used to describe Zn adsorption in the presence of different cations in the studied soils.**

میانگین Mean	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> آمونیم	K <sup>+</sup> پتاسیم	Na <sup>+</sup> سدیم	Ca <sup>2+</sup> کلسیم	شماره خاک Soil number
b (mg/kg)					
2230.5 <sup>A</sup>	1969.9 <sup>Ac</sup>	2120.6 <sup>Abc</sup>	2491.9 <sup>Aba</sup>	2339.6 <sup>ABab</sup>	1
2244.4 <sup>A</sup>	1924.8 <sup>Ab</sup>	2085.8 <sup>Ab</sup>	2443.3 <sup>Aba</sup>	2523.5 <sup>Aa</sup>	2
2233.8 <sup>A</sup>	2093.1 <sup>Abc</sup>	2098.9 <sup>Abc</sup>	2569.6 <sup>Aa</sup>	2173.4 <sup>Bb</sup>	3
2144.0 <sup>A</sup>	2032.1 <sup>Ab</sup>	2074.6 <sup>Ab</sup>	2657.4 <sup>Aa</sup>	1811.9 <sup>Cb</sup>	4
2082.6 <sup>A</sup>	1919.8 <sup>Aa</sup>	2134.4 <sup>Aa</sup>	2120.6 <sup>Ca</sup>	2155.6 <sup>BCa</sup>	5
	1987.9 <sup>c</sup>	2102.9 <sup>cb</sup>	2456.6 <sup>a</sup>	2200.8 <sup>b</sup>	میانگین Mean
k (l/mg)					
0.598 <sup>C</sup>	0.797 <sup>Ba</sup>	0.874 <sup>Aa</sup>	0.588 <sup>Bb</sup>	0.134 <sup>Bc</sup>	1
0.644 <sup>C</sup>	0.872 <sup>Ba</sup>	0.934 <sup>Aa</sup>	0.634 <sup>Bb</sup>	0.135 <sup>Bc</sup>	2
0.629 <sup>C</sup>	0.821 <sup>Ba</sup>	0.871 <sup>Aa</sup>	0.674 <sup>Bb</sup>	0.148 <sup>Bc</sup>	3
0.791 <sup>A</sup>	1.165 <sup>Aa</sup>	0.964 <sup>Ab</sup>	0.617 <sup>Bc</sup>	0.420 <sup>Ad</sup>	4
0.725 <sup>B</sup>	0.797 <sup>Bb</sup>	0.839 <sup>Ab</sup>	1.108 <sup>Aa</sup>	0.158 <sup>Bc</sup>	5
	0.890 <sup>a</sup>	0.907 <sup>a</sup>	0.724 <sup>b</sup>	0.199 <sup>c</sup>	میانگین Mean
MBC (l/kg)					
1297.6 <sup>D</sup>	1568.7 <sup>CDb</sup>	1854.9 <sup>ABa</sup>	1466.1 <sup>Db</sup>	300.7 <sup>Bc</sup>	1
1366.7 <sup>C</sup>	1677.3 <sup>BCb</sup>	1948.9 <sup>Aa</sup>	1549.3 <sup>CDb</sup>	291.2 <sup>Bc</sup>	2
1399.0 <sup>C</sup>	1716.7 <sup>Bb</sup>	1830.2 <sup>Bab</sup>	1731.8 <sup>Bb</sup>	317.2 <sup>Bc</sup>	3
1688.2 <sup>A</sup>	2366.9 <sup>Aa</sup>	1987.8 <sup>Ab</sup>	1638.1 <sup>BCc</sup>	759.9 <sup>Ad</sup>	4
1530.2 <sup>B</sup>	1529.1 <sup>Dc</sup>	1903.9 <sup>Ab</sup>	2348.3 <sup>Aa</sup>	339.7 <sup>Bd</sup>	5
	1771.7 <sup>b</sup>	1905.2 <sup>a</sup>	1746.7 <sup>b</sup>	401.8 <sup>c</sup>	میانگین Mean

حروف بزرگ در هر ستون نشان‌دهنده مقایسه میانگین بین خاک‌ها در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون چند دامنه دانکن است. حروف کوچک در هر ردیف نشان‌دهنده مقایسه میانگین بین الکترولیت‌ها در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون چند دامنه دانکن است. وجود حداقل یک حرف مشترک نشان‌دهنده نبود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

The upper case letters in each column indicate a mean comparison between the soils at the 5% level based on the Duncan's multiple range test. The lowercase letters in each row indicate a mean comparison between the electrolytes at the 5% level based on Duncan's multiple range test. The presence of at least one same letter indicates nonsignificant difference at 5% level.

که تفاوت در جذب کل روی در حضور پتاسیم و آمونیوم ناچیز بود (۴۷). مطالعات همبستگی نشان داد بین حداکثر جذب (b لانگ‌مویر) و شدت جذب (n فروندلیچ) روی همبستگی مثبت و معنی‌داری ( $r=0/89$ ,  $P=0/000$ ) وجود داشت. بنابراین در حضور کاتیون سدیم کم‌ترین حداکثر جذب و شدت جذب وجود دارد. به گزارش ژو و آلیوا (۱۹۹۳) در قدرت یونی مشابه در خاک‌های شنی کاتیون  $Ca^{2+}$  به دلیل رقابت با روی در جایگاه‌های جذب اثر قابل توجهی بر کاهش جذب روی نسبت به  $Mg^{2+}$  و  $K^+$  داشت (۴۸). در مطالعات متعددی به جذب زیاد روی در حضور سدیم اشاره شده است (۱۵ و ۱۸). همچنین کایور و همکاران (۲۰۱۰) افزایش جذب روی در حضور سدیم را به دلیل پراکنده شدن ذرات خاک بیان کردند (۲۰). مشخص است که رفتار سدیم با کاتیون‌های چندظرفیتی متفاوت است. زمانی که یون‌های سدیم در سطوح تبادل‌ی قرار می‌گیرند باعث پراکندگی کلونیدهای خاک‌ها می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد که سدیم به دلیل خاصیت پخشیدگی رس‌ها مکان‌هایی را برای جذب روی فراهم می‌کند. بنابراین جذب روی در حضور سدیم بیش‌تر از پتاسیم اتفاق افتاده است.

ضریب  $k$  در معادله لانگ‌مویر بیانگر قدرت پیوند بین خاک و روی جذب شده است و از آن با نام ثابت متناسب با انرژی پیوند یاد می‌شود (۴۰). ثابت متناسب با انرژی پیوند بزرگ‌تر بیانگر جذب اختصاصی روی در سطوح ذرات خاک با انرژی بالا و ثابت تفکیک پایین می‌باشد و مقدار کوچک‌تر ثابت متناسب با انرژی پیوند مربوط به جذب در سطوح ذرات خاک با انرژی کم‌تر و ثابت تفکیک بالا است (۳۷). با توجه به نتایج جدول ۴ ثابت متناسب با انرژی پیوند روی در محلول‌های مورد بررسی در دامنه ۰/۱۳۴ (در خاک ۱ و در زمینه حاوی کلسیم)

بررسی حداکثر ظرفیت جذب روی در حضور کاتیون سدیم بین خاک‌های مختلف نشان داد که حداکثر جذب روی (b) در خاک ۵ با دیگر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری ( $P<0/05$ ) داشت. همچنین این شاخص در حضور کاتیون سدیم بین خاک‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ تفاوت معنی‌داری وجود نداشت ( $P>0/05$ ). در حضور کاتیون کلسیم، حداکثر ظرفیت جذب روی در خاک ۴ نسبت به سایر خاک‌ها کم‌تر بود ( $P<0/05$ ). همچنین بین خاک‌های ۱ و ۲ و خاک‌های ۳ و ۵ تفاوت معنی‌دار وجود نداشت ( $P>0/05$ ). در حضور کاتیون پتاسیم و آمونیوم بین خاک‌های بررسی شده تفاوت معنی‌داری دیده نشد ( $P>0/05$ ).

حداکثر ظرفیت جذب روی در خاک ۵ در حضور کاتیون‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P>0/05$ ). در خاک ۲ حداکثر ظرفیت جذب در حضور دو کاتیون کلسیم و سدیم تفاوت معنی‌داری با دو کاتیون پتاسیم و آمونیوم داشت ( $P<0/05$ ). در همه خاک‌های مورد بررسی حداکثر ظرفیت جذب روی در حضور کاتیون سدیم بیش‌ترین مقدار بود. بنابراین بالاترین جذب روی در حضور کاتیون سدیم و در همه خاک‌ها وجود داشت. همچنین کم‌ترین مقدار حداکثر ظرفیت جذب روی در خاک ۱ و ۳ و در حضور کاتیون‌های پتاسیم و آمونیوم بود. بنابراین کم‌ترین جذب روی در خاک‌های ۱ و ۳ و در حضور کاتیون‌های پتاسیم و آمونیوم بود.

حداکثر ظرفیت جذب روی در حضور کاتیون سدیم بیش‌تر از ۳ کاتیون دیگر بود. بعد از سدیم، حداکثر جذب روی در حضور کاتیون‌های کلسیم، پتاسیم و آمونیوم قرار داشت. نتایج حاصل از نمودارهای جذب روی در حضور کاتیون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم و آمونیوم نشان داد که بیش‌ترین جذب روی در حضور کاتیون سدیم اتفاق افتاد. مشابه پژوهش حاضر وانگ و هارل (۲۰۰۵) گزارش کردند

شد ضریب توزیع ( $k_f$  در معادله فروندلیچ) و انرژی جذب روی در حضور کلسیم نیز کم‌ترین در بین کاتیون‌ها بود.

به‌طور کلی، بیش‌ترین مقدار انرژی پیوند روی جذب‌شده در حضور کاتیون پتاسیم و کم‌ترین مقدار آن در حضور کاتیون کلسیم مشاهده شده است. بنابراین روی در حضور کاتیون پتاسیم با انرژی بیش‌تری جذب شده و ثابت تفکیک کم‌تری دارد. با توجه به این‌که ضریب  $b$  لانگ‌مویر (حداکثر ظرفیت جذب) در کاتیون کلسیم از دیگر کاتیون‌ها کم‌تر بود؛ پس می‌توان گفت جذب روی در خاک حاوی کلسیم در مقایسه با دیگر کاتیون‌ها کم‌تر و با انرژی بیش‌تری انجام می‌گیرد. از آن‌جایی‌که شعاع آب‌پوشی کلسیم از روی کوچک‌تر است، بنابراین کلسیم به‌میزان بیش‌تری جذب سطوح کانی‌ها می‌شود و به‌دلیل رقابتی که با روی در جایگاه‌های جذب دارد برای جذب روی محدودیت ایجاد می‌شود و احتمالاً روی به‌صورت درون‌کره جذب می‌شود. مطالعات همبستگی نشان داد بین انرژی پیوند در معادله لانگ‌مویر ( $k$ ) با ضریب توزیع در معادله فروندلیچ ( $k_f$ ) همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $r=0/88$ ;  $P=0/00$ ) و با شدت جذب معادله فروندلیچ ( $n$ ) همبستگی منفی و معنی‌داری ( $r=-0/57$ ;  $P=0/00$ ) وجود داشت.

وانگ و هارل (۲۰۰۵) گزارش کردند که در خاک‌های آهکی انرژی پیوند در حضور سدیم بیش‌تر از پتاسیم و آمونیوم بود (۴۷). حضور پتاسیم و آمونیوم در نیمی از خاک‌های آهکی مورد مطالعه باعث کاهش انرژی پیوند روی شد. این کاهش انرژی پیوند در حضور پتاسیم و آمونیوم می‌تواند به‌دلیل محدود شدن جذب روی در جایگاه‌های اختصاصی باشد. این کاهش ثابت انرژی پیوند نشان می‌دهد که جذب اختصاصی (کوالانسی) روی در حضور پتاسیم

تا ۱/۱۶۵ (در خاک ۴ و در زمینه حاوی آمونیوم) لیتر بر میلی‌گرم بود. ضریب  $k$  در حضور کاتیون کلسیم در دامنه ۰/۱۳۴ تا ۰/۴۲۰ با میانگین ۰/۱۹۹، در حضور کاتیون سدیم در دامنه ۰/۵۸۸ تا ۱/۱۰۸ با میانگین ۰/۷۲۴، در حضور کاتیون پتاسیم در دامنه ۰/۸۷۴ تا ۰/۹۶۴ با میانگین ۰/۹۰۷ و در حضور کاتیون آمونیوم در دامنه ۰/۷۹۷ تا ۱/۱۶۵ با میانگین ۰/۸۹۰ لیتر بر میلی‌گرم بود.

مقایسه میانگین انرژی پیوند ( $k$ ) در خاک‌ها نشان داد که خاک ۴ با داشتن بیش‌ترین مقدار انرژی پیوند، تفاوت معنی‌داری با خاک‌های دیگر داشت ( $P<0/05$ ). در واقع در این خاک روی با انرژی بیش‌تری و به‌صورت اختصاصی جذب ذرات خاک می‌شود. تفاوت انرژی پیوند بین خاک‌های ۲ و ۳ معنی‌دار نبود ( $P>0/05$ )؛ در حالی‌که ثابت متناسب با انرژی پیوند در خاک ۵ بیش‌تر از خاک‌های ۱، ۲ و ۳ بود ( $P<0/05$ ). مطالعه همبستگی نشان داد که رابطه بین ضریب متناسب با انرژی پیوند ( $k$ ) و گنجایش تبادل کاتیونی در خاک‌ها معنی‌دار ( $r=0/87$ ,  $P<0/01$ ) بود. بر اساس نتایج جدول ۱، خاک ۴ بیش‌ترین مقدار گنجایش تبادل کاتیونی را داشت و خاک‌های ۲، ۳ و ۱ به‌ترتیب کم‌ترین مقدار گنجایش تبادل کاتیونی را داشتند.

مقایسه میانگین انرژی پیوند ( $k$ ) در حضور کاتیون‌های مورد بررسی نشان داد که بیش‌ترین انرژی پیوند روی در حضور کاتیون‌های پتاسیم و آمونیوم می‌باشد. در واقع روی در حضور پتاسیم و آمونیوم با انرژی بیش‌تر و به‌صورت اختصاصی جذب می‌شود. پس از این دو کاتیون، بیش‌ترین انرژی جذب روی در حضور سدیم می‌باشد و بعد از آن کلسیم قرار داشت. بنابراین در حضور کاتیون کلسیم انرژی جذب روی کم‌ترین مقدار است و چنان‌چه قبلاً توضیح داده

و آمونیوم کاهش پیدا کرده است. به گزارش کایور و همکاران (۲۰۱۰) انرژی پیوند روی در حضور سدیم بیش‌تر از پتاسیم بود (۲۰). در حالی‌که مشابه پژوهش حاضر، جلالی و احمدی (۲۰۱۲) گزارش دادند که انرژی پیوند در حضور پتاسیم و آمونیوم بیش‌تر از سدیم و کلسیم بود و جذب روی توسط جایگاه‌های اختصاصی در حضور پتاسیم و آمونیوم در مقایسه با کلسیم و سدیم افزایش یافت (۱۸). این تفاوت می‌تواند به این دلیل باشد که تخمین‌های انرژی جذب توسط همدماهای جذب فقط باید به صورت کیفی در نظر گرفته شوند و با تغییر انرژی آزاد گونه‌های مختلف ارتباط دارند (۴۶).

حداکثر گنجایش بافری از حاصل ضرب  $b$  و  $k$  (ضرایب معادله لانگ‌مویر) به دست می‌آید. این پارامتر نشان می‌دهد که به ازای هر واحد افزایش غلظت روی موجود در محلول تعادلی، چه مقدار از آن فلز در فاز جامد جذب می‌شود (۳۵). پارامتر MBC در حضور کاتیون کلسیم در دامنه ۲۹۱/۲ تا ۷۵۹/۹ با میانگین ۴۰۱/۸، در حضور کاتیون سدیم در دامنه ۱۴۶۶/۱ تا ۲۳۴۸/۳ با میانگین ۱۷۴۶/۷، در حضور کاتیون پتاسیم در دامنه ۱۸۳۰/۲ تا ۱۹۸۷/۸ با میانگین ۱۹۰۵/۲ و در حضور کاتیون آمونیوم در دامنه ۱۵۲۹/۱ تا ۲۳۶۶/۹ با میانگین ۱۷۷۱/۷ لیتر بر میلی‌گرم بود (جدول ۴). بیش‌ترین مقدار حداکثر گنجایش بافری در حضور کاتیون پتاسیم (۱۹۸۷/۸ لیتر بر میلی‌گرم) و کم‌ترین مقدار آن در حضور کاتیون کلسیم (۲۹۱/۲ لیتر بر میلی‌گرم) مشاهده شده است. این پارامتر نشان می‌دهد که در حضور پتاسیم برای افزایش غلظت روی در محلول تعادلی به مقدار یک میلی‌گرم در لیتر در خاک مورد مطالعه، مقدار ۱۸۳۰/۲ تا ۱۹۸۷/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی در فاز جامد خاک جذب می‌شود. بنابراین برای تغییر یک واحد در غلظت روی در محلول تعادلی، خاکی که

حاوی پتاسیم باشد مقدار بیش‌تری از این فلز را در فاز جامد جذب خواهد کرد. به عبارت دیگر در برابر افزایش غلظت روی در محلول مقاومت بیش‌تری داشته و برای تغییر در غلظت روی در محلول تعادلی نیاز به جذب بیش‌تر این فلز در فاز جامد دارد. حداکثر گنجایش بافری روی در حضور کاتیون پتاسیم بیش‌تر از حضور سایر کاتیون‌ها بود. در حالی‌که این پارامتر در حضور دو کاتیون سدیم و آمونیوم تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P > 0.05$ ) ولی در حضور کاتیون کلسیم کم‌ترین مقدار را داشت ( $P < 0.05$ ). در واقع به دنبال افزایش روی در محلول تعادلی دارای کلسیم، مقدار کم‌تری روی در سطوح جذب می‌شود.

مقایسه میانگین حداکثر گنجایش بافری نشان داد که روی در حضور کاتیون کلسیم و در خاک ۴ با بیش‌ترین گنجایش بافری با دیگر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ )، ولی در دیگر خاک‌ها در حضور این کاتیون تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ( $P > 0.05$ ). در حضور کاتیون سدیم حداکثر گنجایش بافری در خاک ۵ بالاتر از دیگر خاک‌ها و تفاوت معنی‌داری با آن‌ها داشت ( $P < 0.05$ ). حداکثر گنجایش بافری در حضور کاتیون پتاسیم در خاک‌های ۲، ۴ و ۵ بیش‌ترین مقدار را داشت و با خاک‌های ۱ و ۳ تفاوت معنی‌داری داشتند ( $P < 0.05$ ).

بیش‌ترین مقدار حداکثر گنجایش بافری در حضور کاتیون‌های مورد بررسی در خاک‌های ۴ و ۵ بود. بین حداکثر گنجایش بافری و گنجایش تبادل کاتیونی در خاک‌ها رابطه مثبت و معنی‌داری ( $r = 0.87, P < 0.01$ ) به دست آمد. بر اساس نتایج جدول ۱ خاک‌های ۴ و ۵ بیش‌ترین گنجایش تبادل کاتیونی را داشتند و بنابراین دارای بیش‌ترین حداکثر گنجایش بافری روی هستند. در خاک ۴ حداکثر گنجایش بافری به ترتیب در حضور آمونیوم، پتاسیم، سدیم و کلسیم و در خاک ۵ به ترتیب در حضور



### نتیجه گیری کلی

معادله‌های فروندلیچ و لانگ‌مویر قادر به توصیف جذب روی بودند؛ اما معادله فروندلیچ با داشتن ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیشتر و خطای استاندارد (SE) کم‌تر به‌عنوان بهترین مدل توصیف‌کننده جذب روی انتخاب شد. نتایج نشان داد که حداکثر ظرفیت جذب روی (b معادله لانگ‌مویر)، مقدار توان جذب روی در خاک‌ها را بیش‌برآورد می‌کند. جذب روی در حضور کاتیون سدیم نسبت به کاتیون‌های کلسیم، پتاسیم و آمونیوم بیشتر بود. نتایج مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین مقدار حداکثر ظرفیت جذب روی و شدت جذب (n در معادله فروندلیچ) به‌ترتیب در محلول‌های حاوی کاتیون سدیم، کلسیم، پتاسیم و آمونیوم بود. ثابت متناسب با انرژی پیوند (k لانگ‌مویر) و حداکثر گنجایش بافری (MBC لانگ‌مویر) به‌ترتیب در محلول‌های پتاسیم، آمونیوم، سدیم و کلسیم بیش‌ترین مقدار را داشت. بیش‌ترین ضریب توزیع ( $k_f$  فروندلیچ) نیز به‌ترتیب در محلول‌های حاوی سدیم، پتاسیم، آمونیوم و کلسیم بود. به‌عبارت دیگر، با وجود این‌که روی در حضور کاتیون سدیم به مقدار و شدت بیش‌تری جذب شد اما با انرژی کم‌تری نسبت به پتاسیم و آمونیوم نگره‌داری می‌شود.

سدیم، پتاسیم، آمونیوم و کلسیم بیش‌تر بود. در خاک‌های ۱ و ۲ حداکثر گنجایش بافری در حضور کاتیون‌های سدیم و آمونیوم تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P > 0.05$ ). این تفاوت در رفتار خاک‌ها می‌تواند به‌دلیل تفاوت در ویژگی‌های مؤثر بر جذب در خاک‌ها باشد.

مطالعات همبستگی نشان داد که بین حداکثر گنجایش بافری در معادله لانگ‌مویر (MBC) با ضریب توزیع معادله فروندلیچ ( $k_f$ ) همبستگی مثبت و معنی‌داری ( $r=0.96$ ;  $P=0.00$ ) وجود داشت. مقایسه میانگین حداکثر گنجایش بافری روی در هر خاک با حضور کاتیون‌های مختلف نشان داد که این پارامتر در هر خاک در حضور کاتیون‌های مختلف به‌ترتیب پتاسیم < سدیم = آمونیوم < کلسیم بود ( $P < 0.05$ ). بنابراین در هر خاک در حضور کاتیون پتاسیم، روی بیش‌تر و در حضور کاتیون کلسیم، روی کم‌تری در فاز جامد جذب می‌شود. ثابت متناسب با انرژی پیوند (k لانگ‌مویر) در هر خاک در حضور کاتیون پتاسیم بیش‌ترین مقدار و در حضور کاتیون کلسیم کم‌ترین مقدار بود (جدول ۴). بنابراین افزایش گنجایش بافری در حضور کاتیون پتاسیم را می‌توان به بیش‌تر بودن ثابت متناسب با انرژی پیوند در حضور این کاتیون نسبت داد.

### منابع

1. Aishah Zarime, N., Wan Zuhairi, W.Y., and Krishna, S. 2014. Adsorption of Nickel and Zinc by residual soils. *Am. J. Environ. Sci.* 10: 6. 526-532.
2. Akay, A., and Doulati, B. 2012. The effect of soil properties on Zn adsorption. *J. Int. Environ. Appl. Sci.* 7: 1. 151-160.
3. Allen, S.J., McKay, G., and Porter, J.F. 2004. Adsorption isotherm models for basic dye adsorption by peat in single and binary component systems. *J. Coll. Inter. Sci.* 280: 2. 322-333.
4. Alloway, B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environ. Geochem. Health.* 31: 5. 537-548.
5. Alves Tito, G., Garófalo Chaves, L.H., and Sena de Souza, R. 2008. Zinc adsorption in bentonite clay: particle size and pH influence. *Revista Caatinga.* 21: 5. 1-4.
6. Arias, M.C., Pérez-Novo, F., Osorio, F., López, E., and Soto, B. 2005. Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer of acid soils. *J. Coll. Inter. Sci.* 288: 1. 21-29.

7. Ayalew, A., Beyene, Sh., and Walley, F. 2015. Sorption of Zinc and Iron in soils of selected areas in Southern Ethiopia. *Chem. Mater. Res.* 7: 11. 24-34.
8. Bohn, H.L., McNeal, B.L., and O'Connor, G.A. 2001. *Soil Chemistry*, 3rd ed. John Wiley & Sons Inc. New York, 307p.
9. Cox, W.J., and Reisenauer, N.M. 1973. Growth and ion uptake by wheat supplied nitrogen as nitrate, on ammonium, or both. *Plant Soil.* 38: 2. 363-380.
10. Damson, A.W., and Gast, A.P. 1997. *Physical Chemistry of Surfaces*, sixth ed. Wiley Interscience. New York. 808p.
11. Elrashidi, M.A., and O'Connor, G.A. 1982. Influence of solution composition on sorption of zinc by soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 6. 1153-1158.
12. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. In: A. Klute (Ed.) *Methods of Soil Analysis: Part I-Physical and mineralogy methods*. Agron. Monogr. 9. 2<sup>nd</sup> ed. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin. Pp: 383-412.
13. Hafeez, B., Khanif, Y.M., and Saleem, M. 2013. Role of zinc in plant nutrition-a review. *Am. J. Exp. Agri.* 3: 2. 374-391.
14. Hararah, M.A., Al-Nasir, F., El-Hasa, F., and Ala'a, H. 2012. Zinc adsorption-desorption isotherms: possible effects on the calcareous vertisol soils from Jordan. *Environ. Earth. Sci.* 65: 7. 2079-2085.
15. Hashemi, S.S. 2012. Amount lability of zinc and sorption it's by different soils at the presence of potassium and sodium cations and phosphate, nitrate and chloride. 14<sup>th</sup> international clay conference. Italy.
16. Hashemi, S.S., and Baghernejad, M. 2008. Zinc sorption by acid, calcareous and gypsiferous soils as related to soil mineralogy. *I.A.R.* 27: 1.2. 1-16.
17. Huang, B., Li, Z., Huang, J., Guo, L., Nie, X., Wang, Y., Zhang, Y., and Zeng, G. 2014. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil. *J. Hazard. Mater.* 264: 15. 176-183.
18. Jalali, M., and Ahmadi, M.Z. 2012. Effects of common ions on Zn sorption in some calcareous soils of Western Iran. *Pedosphere.* 22: 2. 190-200.
19. Karimian, N., and Moafpouryan, G.R. 1999. Zinc adsorption characteristics of selected calcareous soils of Iran and their relationship with soil properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30: 11-12. 1721-1731.
20. Kaur, G., Sharma, B.D., Seth, A., and Bhardwaj, S.S. 2010. Zinc Adsorption as affected by supporting electrolyte in benchmark soils of Punjab in Northwest India. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41: 22. 2685-2698.
21. Kparmwang, T. 2003. Zinc adsorption and desorption at low concentrations by basaltic soil on Jos plateau Nigeria. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 34: 11-12. 1589-1609.
22. Leoppert, R.H., and Suarez, D.L. 1996. Carbonate and gypsum. In: D.L. Sparks. (Ed.) *Methods of Soils Analysis*. SSSA, Madison. Pp: 437-474.
23. Limousin, G., Gaudet, J.P., Charlet, L., Szenknect, S., Barthes, V., and Krimissa, M. 2007. Sorption isotherms: a review on physical bases, modeling and measurement. *Appl. Geochem.* 22: 2. 249-275.
24. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA test for zinc, Iron, manganese, and copper. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 3. 421-428.
25. Maftoun, M., Haghighat Nia H., and Karimian, N. 2000. Characterization of Zn Adsorption in Some Calcareous Paddy Soils from Fars Province. *J. Water Soil Sci.* 4: 2. 71-84. (In Persian)
26. Marschner, H. 1993. Zinc uptake from soils. In: Robson A.D. (ed.) *Zinc in Soils and Plants*. Kluwer Academic Pub. Dordrecht. The Netherlands. Pp: 59-77.
27. Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press. San Diego. CA.
28. Morera, M.T., Echeverria, J.C., Mazkarian, J., and Garrido, J. 2001. Isotherms and sequential extraction procedures for evaluating sorption and distribution of heavy metals in soils. *Environ. Pollut.* 113: 2. 135-144.

29. Motamedi, P., Salehi, M.H., and Hosseinpour, A. 2012. Cadmium and lead sorption capacity in some palygorskitic soils in Isfahan province. *J. Water Soil* 26: 319-328. (In Persian)
30. Nascimento, C.W.A., and Fontes, R.L.F. 2004. Correlation between characteristics of latosols from Minas Gerais State, Brazil, and parameters of adsorption equations of copper and zinc. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 28: 6. 965-971.
31. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1996. Carbon, organic carbon, and organic matter. In: D.L. Sparks (Ed) *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison. Pp: 961-1010.
32. Oustan, Sh. 2010. *Environmental Soil Chemistry*. Tabriz univ. press, 454p. (In Persian)
33. Pardo, M.T., and Guadalix, M.E. 1996. Zinc sorption-desorption by two Andepts: Effect of pH and support medium. *Eur. J. Soil. Sci.* 47: 2. 257-263.
34. Reyhanitabar, A., Ardalan, M., Gilkes, R.J., and Savaghebi, G. 2010. Zinc sorption characteristics of some selected calcareous soils of Iran. *J. Agr. Sci. Tech.* 12: 24. 99-110.
35. Reyhanitabar, A., Karimian, N., Ardalan, M., Savaghebi, G., and Ghannadha, M. 2007. Comparison of five adsorption isotherms for prediction of zinc retention in calcareous soils and relationship of their coefficients with soil characteristics. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38: 1-2. 147-159.
36. Rhoades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA. Madison. Pp: 417-435.
37. Serrano, S., Garrido, F., Campbell, C.G., and García-González, M.T. 2005. Competitive sorption of cadmium and lead in acid soils of Central Spain. *Geoderma*. 124: 1-2. 91-104.
38. Sheikh-hosseini, A., Shirvani, M., and Shariatmadari, H. 2013. Competitive sorption of nickel, cadmium, zinc and copper on palygorskite and sepiolite silicate clay minerals. *Geoderma*. 192: 249-253.
39. Shukla, V.C., Mittal, S.B., and Gupta, R.K. 1980. Zinc adsorption in some soils as affected by exchangeable cations. *Soil Sci.* 129: 6. 366-370.
40. Singh, D., McLaren, R.G., Keith, C., and Cameron, K.C. 2006. Zinc sorption-desorption by soils: Effect of concentration and length of contact period. *Geoderma*. 137: 1-2. 117-125.
41. Sparks, D.L. 2003. *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press. 352p.
42. Sposito, G.L., Lund, J., and Chang, A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 2. 260-265.
43. Strwan, D.G., Bohn, H.L., and Oconnor, G.A. 2015. *Soil Chemistry*, wiley Blackwell. 392p.
44. Sumner, M.E., and Miller, P.M. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. In: D.L. Sparks (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods*. Soil Science Society of America. Madison. Pp: 1201-1230.
45. Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. In: A.L. Page et al. (Eds.) *Methods of Soil Analysis: Chemical and microbiological properties*. Agron. Monogr. 9. Part 2. 2<sup>nd</sup> ed. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin. Pp: 159-166.
46. Van Riemsdijk, W.H., Blot, G.H., Koopal, L.K., and Blaakmeer, J. 1986. Electrolyte adsorption on heterogeneous surfaces: adsorption models. *J. Coll. Inter. Sci.* 109: 1. 219-228.
47. Wang, J.J., and Harrel, D.L. 2005. Effect of ammonium, potassium and sodium cations and phosphate, nitrate, and chloride anions on Zn sorption and lability in selected acid and calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 4. 1036-1046.
48. Zhu, B., and Alva, A.K. 1993. Differential adsorption of trace metals by soils as influenced by exchangeable cations and ionic strength. *Soil Sci.* 155: 1. 61-66.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(6), 2019*

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.15308.3054

## The effect of Calcium, Sodium, Potassium and Ammonium cations on adsorption of Zinc in some calcareous soils of Chaharmahal-Va-Bakhtiari province

N. Abyar<sup>1</sup>, A.R. Hosseinpur<sup>2</sup> and \*H.R. Motaghian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Shahrekord University

Received: 06.27.2018; Accepted: 10.09.2018

### Abstract

**Background and Objectives:** The adsorption is one of the most important chemical processes affecting the mobility and availability of Zinc (Zn) in the soils. Moreover, the presence of cations in the solution may affect Zn adsorption. Adsorption isotherms were used to determine the characteristics of Zn adsorption. The adsorption isotherms describe relation between adsorbed metal on sorbent and its concentration in equilibrated solution at a constant temperature. The calcium, sodium, potassium and ammonium are the important cations in soil. In this study, the effect of the calcium, sodium, potassium and ammonium on the Zn adsorption in 5 calcareous soils in Chaharmahal va- Bakhtiari was investigated.

**Materials and Methods:** An experiment was performed using completely randomized design to determine the characteristics of adsorption isotherms of Zn in the studied soils and in the presence of different electrolytes. At first, 2 grams of each soil (in 3 replicates) placed into centrifuge tubes, then 20 ml of solution ZnSO<sub>4</sub> contains 25, 50, 75, 100, 150 and 200 mg / l of Zn in Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NaNO<sub>3</sub>, KNO<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> electrolytes (at a concentration of 50 mM) were added to the tubes and the samples were shaken with electric shaking apparatus for 24 hours and then were centrifuged (3000 rpm). The soil solution was separated and concentration of Zn in all extractants (in equilibrium) was determined using atomic absorption spectrophotometer (GBC model, 932). In the following, the concentration of adsorbed Zn was determined from the difference between initial and final concentration (equilibrium concentration). Then the Langmuir, Freundlich and Linear equations were fitted to the data.

**Results:** The results showed that concentration of adsorbed Zn in the all soils and all electrolytes increased by increasing Zn concentrations in the equilibrium solution. Amount of adsorbed Zn in the presence of Ca<sup>2+</sup> was lower than the presence of Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and K<sup>+</sup>. The Freundlich and Langmuir equations have the highest determination coefficient (R<sup>2</sup>) and the lowest standard error of estimate (SE). Therefore, these equations were able to describe the characteristics of Zn adsorption. The result of mean comparison showed that the maximum adsorption capacity (b in Langmuir equation) and adsorption intensity (n in Freundlich equation) were highest in the solution contains sodium, calcium, potassium and ammonium, respectively. The coefficient related to the binding energy (k in Langmuir equation) and maximum buffering capacity (MBC in Langmuir equation) were highest in the solution containing potassium, ammonium, sodium and calcium, respectively. The highest distribution coefficient was in solutions containing sodium, potassium, ammonium and calcium, respectively. Therefore, the highest and lowest affinity of Zn to adsorb onto soil solid phase was in the presence of sodium and calcium, respectively.

**Conclusion:** The results of this study illustrated that sodium can decrease mobility of Zn in the calcareous soils more than the other cations.

**Keywords:** Adsorption isotherm, Distribution coefficient, Freundlich, Langmuir, Sodium

---

\* Corresponding Author; Email: motaghian.h@yahoo.com