

ویژگی‌های جذب سطحی روی در برخی از خاک‌های زیرکشت برنج استان فارس

منوچهر مفتون^۱، حسن حقیقت‌نیا^۲ و نجف‌علی کریمیان^۱

چکیده

از آن‌جا که بازیابی ظاهری روی در خاک‌های معدنی (غرقابی و غیر غرقابی) ناچیز می‌باشد، بررسی دقیق فرایندهایی که باعث ابقای روی در خاک می‌شود اهمیت ویژه‌ای دارد. لذا در یک مطالعه آزمایشگاهی، ویژگی‌های جذب سطحی روی در هشت خاک آهکی زیرکشت برنج، با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت، و برازش داده‌های جذب توسط هم‌دماهای فروندلیچ و لانگ مویر ارزیابی شد. در این آزمایش دو گرم خاک برای ۲۴ ساعت با ۴۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۰۱ مولار کلسیم کلرید محتوی ۵-۵۰۰ میلی‌گرم روی در لیتر، به حالت تعادل رسانده شد. تفاوت میان غلظت‌های اولیه و نهایی روی در محلول تعادل، به عنوان روی جذب شده منظور گردید. جذب سطحی روی با شکل خطی معادله فروندلیچ قابل توجیه بود. علاوه بر آن، از برازش داده‌های جذب این عنصر با هم‌دماهای لانگ مویر، دو قسمت خطی متقاطع به دست آمد، که احتمالاً بیانگر دو محل جذبی با میل ترکیبی متفاوت برای روی می‌باشد. ضریب متناسب با انرژی پیوندی بخش اول (K_1)، یعنی در غلظت‌های کم محلول تعادل، بیشتر و حداکثر جذب (b_1) کمتر از بخش دوم (غلظت‌های زیاد محلول تعادل) بود. بنابراین، به نظر می‌رسد که در بخش اول، محل‌های جذبی به علت انرژی پیوندی بیشتر، و در بخش دوم، به واسطه ظرفیت جذبی زیادتر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. حداکثر ظرفیت جذب سطحی روی در بخش دوم حاصل از هم‌دماهای لانگ مویر (b_2)، با مقدار رس، کربنات کلسیم معادل و غلظت فسفر بومی قابل استفاده هم‌بستگی مثبت، و با ظرفیت تبادل کاتیونی هم‌بستگی منفی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: هم‌دماهای فروندلیچ، هم‌دماهای لانگ مویر، حداکثر جذب، کربنات کلسیم معادل، ظرفیت تبادل کاتیونی

مقدمه

کمبود روی یکی از شایع‌ترین کمبودهای عناصر غذایی کم‌مصرف کاتیونی در خاک‌های آهکی و قلیایی، و مخصوصاً خاک‌های زیرکشت برنج به حساب می‌آید. علت اصلی آن کم بودن روی قابل استفاده در این خاک‌ها است. هنگامی که کودهای معدنی یا آلی روی‌دار، برای رفع کمبود به خاک اضافه می‌شود، بازیابی ظاهری آن غالباً کمتر از پنج درصد است (۱) و

۱. استاد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

b (حداکثر جذب) و k (ضریب متناسب با انرژی پیوندی)، بیش از هم‌دماهای جذب فروندلیچ، یعنی معادله‌های ۱ و ۳ مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برآزش هم‌دماهای جذب سطحی روی با معادله‌های فروندلیچ و لانگ‌مویر، به وسیله پژوهشگران زیادی گزارش شده است (۵، ۱۰، ۱۹، ۲۰، ۲۷، ۲۹، ۳۰، ۳۳ و ۳۷). الیس و کنزک (۱۱) اظهار می‌کنند که رس‌ها قادر به نگهداری عنصر روی، حتی بیش از ظرفیت تبادل کاتیونی بوده، در پ-هاش نزدیک به خنثی یا قلیایی، این پدیده معلول رسوب و جذب سطحی به صورت $Zn(OH)^+$ است. روی هم‌چنین می‌تواند به وسیله سطوح کربنات‌ها (۱۵) و اکسیدهای آبدار آهن، آلومینیوم و منگنز نیز جذب شود (۱۲، ۱۴، ۱۶ و ۱۷).

شوکلای میتال (۳۳)، جذب سطحی روی را در چند خاک هندوستان، با بافت‌های مختلف و با کمبود روی مورد آزمایش قرار داده، نتیجه گرفتند که هم‌دماهای جذب شامل سه بخش می‌باشد. در بخش اول، با غلظت کم روی در محلول خاک (حداکثر ۶ میلی‌گرم در لیتر)، میزان جذب نسبت به رسوب بیشتر است. در بخش دوم، که در آن غلظت روی ۶-۵۰ میلی‌گرم در لیتر است، جذب و رسوب توأم صورت می‌گیرد، و در بخش سوم، که غلظت روی بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر است، میزان جذب بیشتر از ظرفیت تبادل کاتیونی بوده، که بیانگر تأثیر بیشتر رسوب، در مقایسه با جذب سطحی روی است. چستر (۷) عقیده دارد که روی در محلول قلیایی، و در شرایطی که غلظت آن از 1×10^{-4} مولار (۶/۵ میلی‌گرم در لیتر) بیشتر باشد، به صورت $Zn(OH)_2$ رسوب می‌نماید. ماندال و هزرا (۲۴) نشان دادند که جذب روی، حداکثر جذب و ضریب متناسب با انرژی پیوندی، در خاکی که برای مدت ۹۰ روز از آب اشباع شده و سپس برای ۳۰ روز در معرض هوا خشک گردیده است، در مقایسه با همان خاک خشک و یا خاکی که برای ۱۵ روز به صورت غرقابی نگهداری شده است، کمتر می‌باشد. کیان و اکسی (۳۱) مشاهده کردند که عملکرد برنج با حداکثر جذب روی هم‌دمای لانگ‌مویر ارتباط مثبت و معنی دار داشته است.

(۲۳). در اراضی غرقابی (شالیزارها)، این مقدار از دو درصد تجاوز نمی‌کند. این موضوع معلول ظرفیت نسبتاً زیاد خاک‌های آهکی در ابقای روی است (۱۱ و ۲۶). با این حال، فرایندهایی که باعث جذب روی در خاک می‌شود به وضوح مشخص نیست. بدیهی است درک صحیح و شناخت بهتر مکانیسم‌ها، باعث می‌شود بتوان قابلیت استفاده این عنصر را در شرایط مختلف، دقیق‌تر برآورد نمود. به طور کلی، به نظر می‌رسد جذب سطحی و یا رسوب روی به صورت هیدروکسید و کربنات، و یا محبوس شدن آن در شبکه‌های بلورین کانی‌ها، از عوامل اصلی کمی قابلیت استفاده روی در خاک‌های آهکی (غرقابی و غیر غرقابی) به حساب می‌آید (۲۶ و ۳۲).

از هم‌دماهای جذب، برای مطالعه نگهداری روی در خاک استفاده شده است. این هم‌دماها رابطه میان جذب سطحی روی و غلظت یونی آن را در محلول تعادل نشان می‌دهند. تاکنون معادله‌های مختلفی برای توصیف و بیان این رابطه پیشنهاد گردیده است، که دو معادله فروندلیچ (معادله ۱) و لانگ‌مویر (معادله ۲)، بیش از همه مورد استفاده واقع شده است:

$$X = kC^n \quad [1]$$

$$X = \frac{KbC}{1 + KC} \quad [2]$$

در این معادله، X مقدار روی جذب شده (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، C غلظت نهایی روی در محلول تعادل (میلی‌گرم در لیتر) و n، k، K، b ضرایب جذبی روی می‌باشند. در عمل، معمولاً از شکل‌های خطی این دو معادله به منظور برآزش داده‌ها استفاده می‌شود:

$$\log X = \log k + \frac{1}{n} \log C \quad [3]$$

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{Kb} + \left(\frac{1}{b}\right)C \quad [4]$$

نکته شایان توجه این است که هم‌دماهای جذب لانگ‌مویر (معادله‌های ۲ و ۴)، به علت اهمیت فیزیکی دو ثابت آن یعنی

هدف‌های تحقیق حاضر عبارت بود از: (۱) بررسی میزان جذب روی در تعدادی از خاک‌های آهکی زیر کشت برنج در استان فارس، با استفاده از هم‌دماهای جذب فروندلیچ و لانگ‌مویر، (۲) تعیین ضرایب جذب سطحی روی در این خاک‌ها، و ارزیابی رابطه کمی میان این ضرایب و بعضی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های تحت مطالعه.

مواد و روش‌ها

خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری اراضی شلتوک کاری شده استان فارس تهیه گردید. این خاک‌ها، که برای سال‌های طولانی زیر کشت برنج بوده‌اند، پس از انتقال به آزمایشگاه، ابتدا در هوا خشک و سپس از الک دو میلی متری عبور داده شدند. بعضی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، از قبیل تجزیه مکانیکی به روش هیدرومتر (۶)، ماده آلی به روش واکی و بلاک (۳۹)، پ - هاش خمیر اشباع توسط الکتروود شیشه‌ای، ظرفیت تبادل کاتیونی به وسیله روش جانشینی کاتیون‌ها با استات سدیم (۸)، کرنات کلسیم معادل به روش خنثی کردن با اسید کلریدریک (۲) تعیین شد. ضمناً فسفر و روی قابل جذب، به ترتیب به وسیله بی‌کرنات سدیم (۲۸) و دی تی پی (۲۲) از خاک عصاره‌گیری شده و غلظت آنها به ترتیب با استفاده از دستگاه رنگ‌سنجی و جذب اتمی تعیین گردید (جدول ۱).

مقدار دو گرم خاک در داخل لوله سانتریفیوژ ریخته، به آن ۴۰ میلی لیتر از محلول‌های روی با هشت غلظت (۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی گرم در لیتر) به صورت سولفات روی، و دو قطره تولوئن (به منظور جلوگیری از رشد ریز جانداران)، اضافه شد. برای ثابت نگه داشتن تقریبی قدرت یونی، محلول‌های روی در کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار تهیه گردید. نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه در به هم زن مکانیکی تکان داده شد، و پس از ۲۳ ساعت سکون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مجدداً به مدت ۳۰ دقیقه دیگر به هم زده شد. پس از آن لوله‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در حدود ۹۰۰ گرم سانتریفیوژ و

محلول روی از کاغذ صافی واتمن ۴۲ عبور داده شد. غلظت روی در این محلول توسط دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. تفاوت بین مقدار روی در محلول اولیه و محلول نهایی، برابر با مقدار روی جذب سطحی شده به وسیله خاک در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده با معادله‌های لانگ‌مویر و فروندلیچ برازش داده شد و ضرایب مربوطه محاسبه گردید. هم‌چنین با استفاده از روش رگرسیون گام به گام، ارتباط این ضرایب با خصوصیات خاک مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

هم‌دماهای جذب سطحی روی برای هشت خاک، با شکل خطی معادله فروندلیچ (معادله ۳) هماهنگی داشته و در شکل ۱ نشان داده شده است. هم‌چنین، ضرایب جذبی مربوط به این معادله در جدول ۲ ارائه گردیده است. از آن جا که هم‌دماهای جذب فروندلیچ اصولاً یک توصیف تجربی است، لذا انتظار نمی‌رود که ضرایب آن ارتباطی با خصوصیات خاک داشته باشد. با این حال، کریمیان و کاکس (۱۸) معتقدند که با در نظر گرفتن $C=1$ ، جزء لگاریتمی سمت راست معادله خطی فروندلیچ حذف شده، در نتیجه فقط در غلظت $C=1$ ، k برابر با X می‌شود. بنابراین، با توجه به این تعبیر و تفسیر، k موجود در جدول ۲ برای بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک در نگهداری روی مورد استفاده قرار گرفت، و رابطه معنی‌داری بین k و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به دست آمد.

$$[5] \quad R^2 = 0.62^* \quad k = -213/9 + 37/5 CEC$$

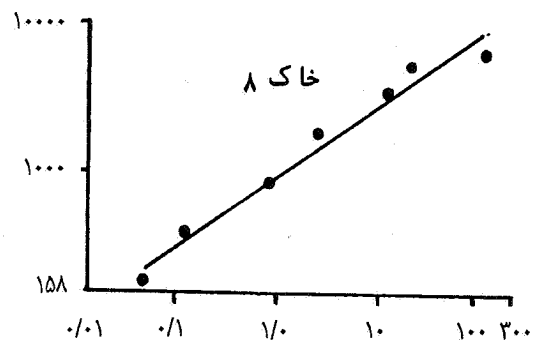
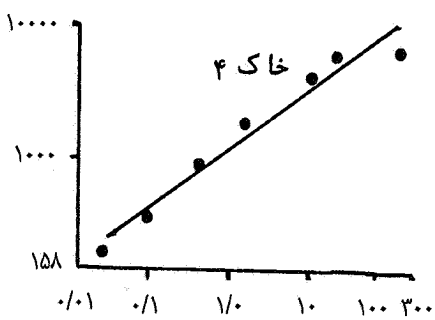
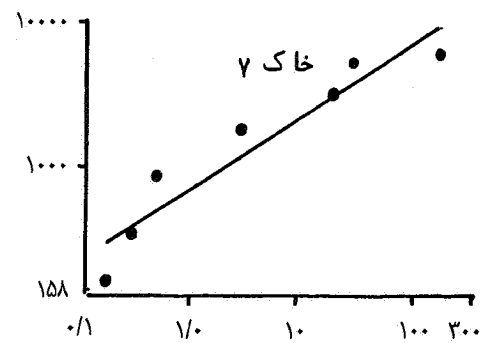
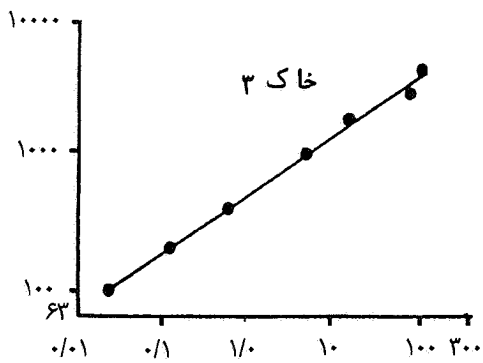
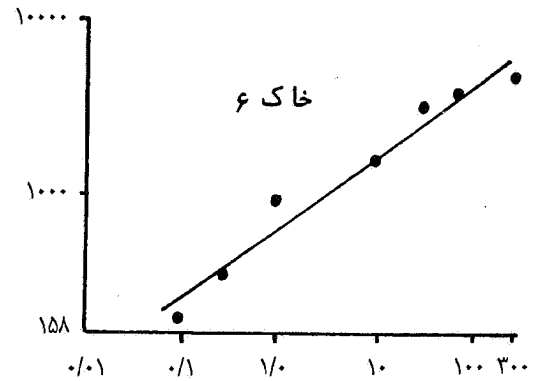
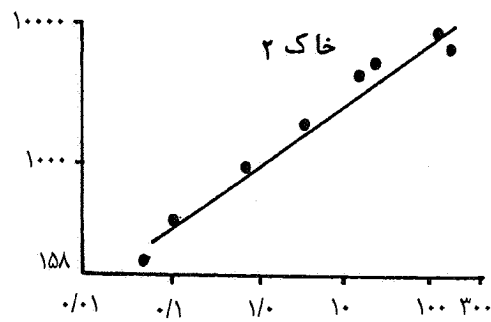
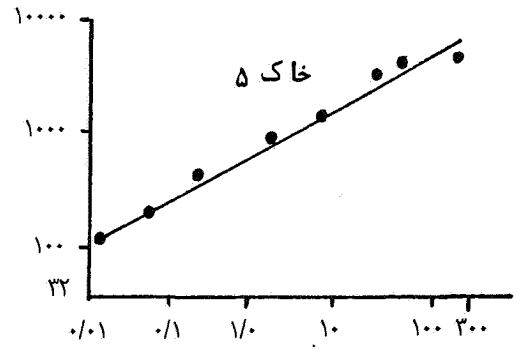
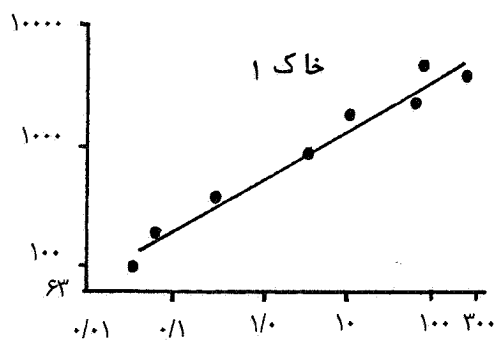
در این معادله، CEC ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی مول بر کیلوگرم خاک) می‌باشد، و نشان می‌دهد که با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، مقدار روی نگهداری شده زیاد می‌شود.

همان طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، هم‌دماهای جذب فروندلیچ در این تحقیق به صورت یک قسمتی است، که منعکس‌کننده وضعیت مشابه جذب سطحی روی در تمام مقادیر به کار رفته می‌باشد. کردی و دائر (۲۱) نیز ضمن مطالعه چهار خاک در کالیفرنیا، مشاهده کردند که هم‌دماهای جذب

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد آزمایش

| شماره خاک | نام سری خاک | رطوبت (درصد) | سیلت (درصد) | pH (معمول) | ماده آلی (درصد) | ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول در کیلوگرم خاک) | لیتوسلکراتینات (درصد) | نسبت فسفر محلول در آب (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) | نسبت نیتروژن محلول در آب (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) |
|-----------|-------------|--------------|-------------|------------|-----------------|--|-----------------------|---|--|
| ۱ | پیداگان | ۱۶/۱ | ۳۴/۰ | ۷/۲ | ۱۶/۰ | ۶/۶ | ۷۸/۸ | ۱۳ | ۶۱/۰ |
| ۲ | کرونی | ۳۰/۱ | ۴۵/۰ | ۷/۱ | ۳/۱۰ | ۳۵/۰ | ۲۷/۴ | ۵۶ | ۵۷/۰ |
| ۳ | چم‌گل | ۱۱/۲ | ۲۳/۹ | ۷/۲ | ۱/۵۷ | ۱۸/۵ | ۷۰/۳ | ۷ | ۷۸/۰ |
| ۴ | خشمه | ۳۳/۳ | ۳۳/۹ | ۷/۰ | ۲/۶۰ | ۲۹/۴ | ۵۰/۰ | ۳۶ | ۱/۵۸ |
| ۵ | مصیری | ۳۶/۲ | ۴۶/۷ | ۷/۰ | ۱/۹۰ | ۲۶/۴ | ۵۲/۳ | ۷۸ | ۶۶/۰ |
| ۶ | دهنر | ۳۲/۲ | ۴۰/۷ | ۷/۲ | ۱/۵۷ | ۲۸/۷ | ۳۵/۳ | ۳۱ | ۷۸/۰ |
| ۷ | کریال | ۶۰/۰ | ۲۹/۷ | ۷/۲ | ۳/۵۵ | ۲۹/۳ | ۴۱/۳ | ۲۵ | ۱۷/۰ |
| ۸ | جهان‌آباد | ۵۲/۰ | ۳۵/۷ | ۷/۳ | ۷/۰ | ۱/۸۴ | ۸۶/۳ | ۵۲ | ۱۶/۱ |

روی جذب سطحی شده (میلی گرم در کیلوگرم خاک)



غلظت نهائی روی در محلول تعادل (میلی گرم در لیتر)

شکل ۱. برازش داده‌ها با هم‌دمای جذب سطحی فروندلیچ در خاک‌های ۱ تا ۸

جدول ۲. ضرایب مربوط به برازش داده‌های جذب روی

| شماره خاک | با هم‌دمای فروندلیچ | |
|-----------|---------------------|---------------|
| | k | $\frac{1}{n}$ |
| ۱ | ۴۹۷ | ۰/۴۱ |
| ۲ | ۸۹۱ | ۰/۴۶ |
| ۳ | ۴۰۳ | ۰/۴۲ |
| ۴ | ۱۱۶۴ | ۰/۴۱ |
| ۵ | ۶۵۰ | ۰/۴۳ |
| ۶ | ۱۰۰۴ | ۰/۶۹ |
| ۷ | ۸۰۰ | ۰/۴۷ |
| ۸ | ۹۲۸ | ۰/۴۸ |

*** و #: به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد

سطحی با معادله فروندلیچ هماهنگی داشته و به صورت یک قسمتی هستند. نتایج مشابهی توسط پژوهشگران دیگر (۳ و ۲۷) نیز گزارش شده است. ولی درجه (۱) با برازش داده‌های جذب سطحی روی در هفت نمونه خاک آهکی غیر غرقابی با معادله فروندلیچ، هم‌دماهای دو و سه قسمتی را گزارش نمود. شوکلا و میتال (۳۳) نیز جذب سطحی روی را در چند نمونه از خاک‌های هندوستان، با بافت‌های مختلف مورد آزمایش قرار داده و به نتایج مشابهی دست یافتند.

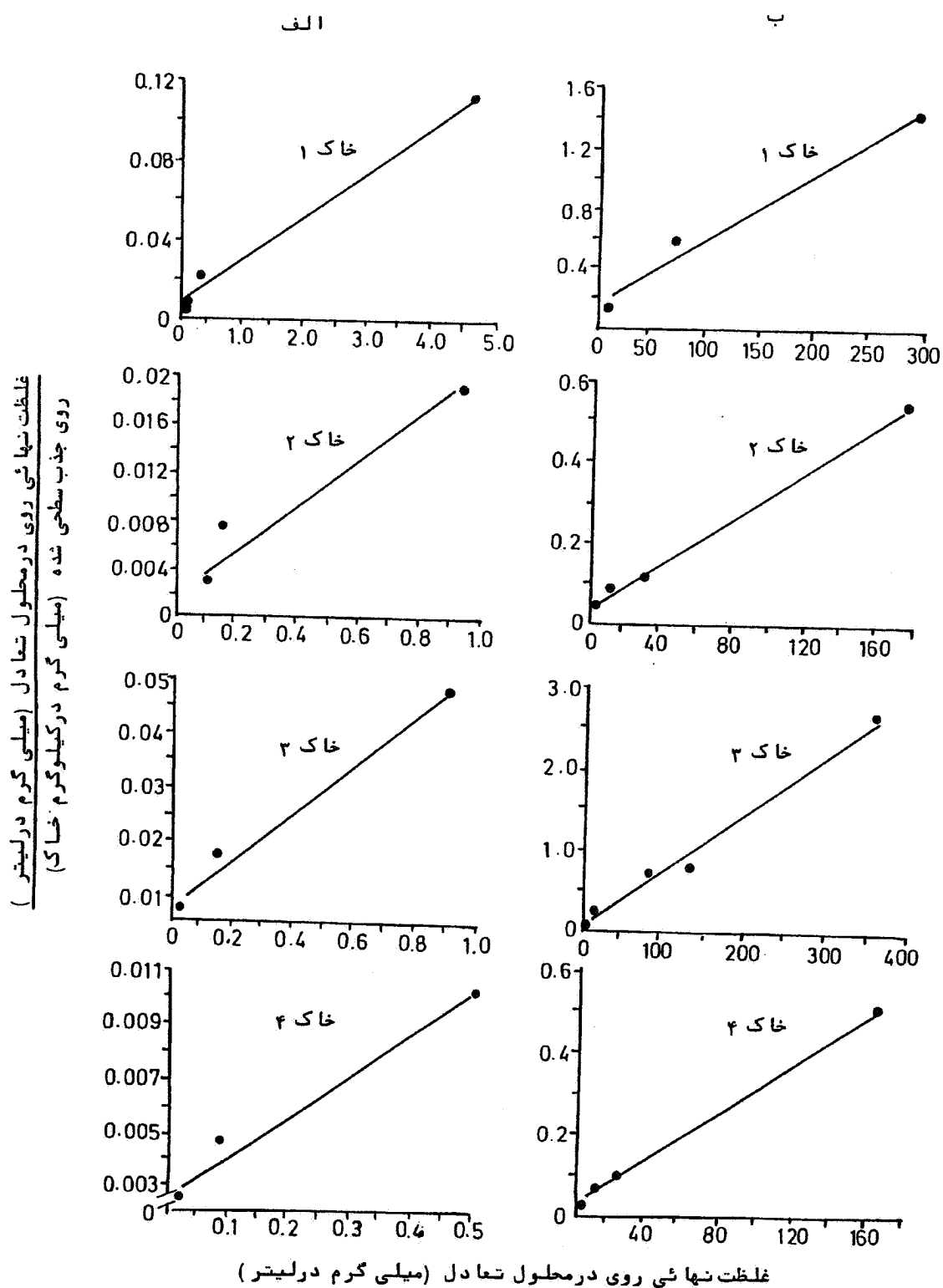
هر چند برازش داده‌های جذب سطحی روی با هم‌دماهای جذب لانگ مویر مطابقت داشت، اما مشاهده شد که هم‌دماهای دو سطحی (معادله ۶) بهتر می‌تواند این داده‌ها را توصیف نماید:

$$X = [(K_1 b_1 C) / (1 + K_1 C)] + [(K_2 b_2 C) / (1 + K_2 C)] \quad [6]$$

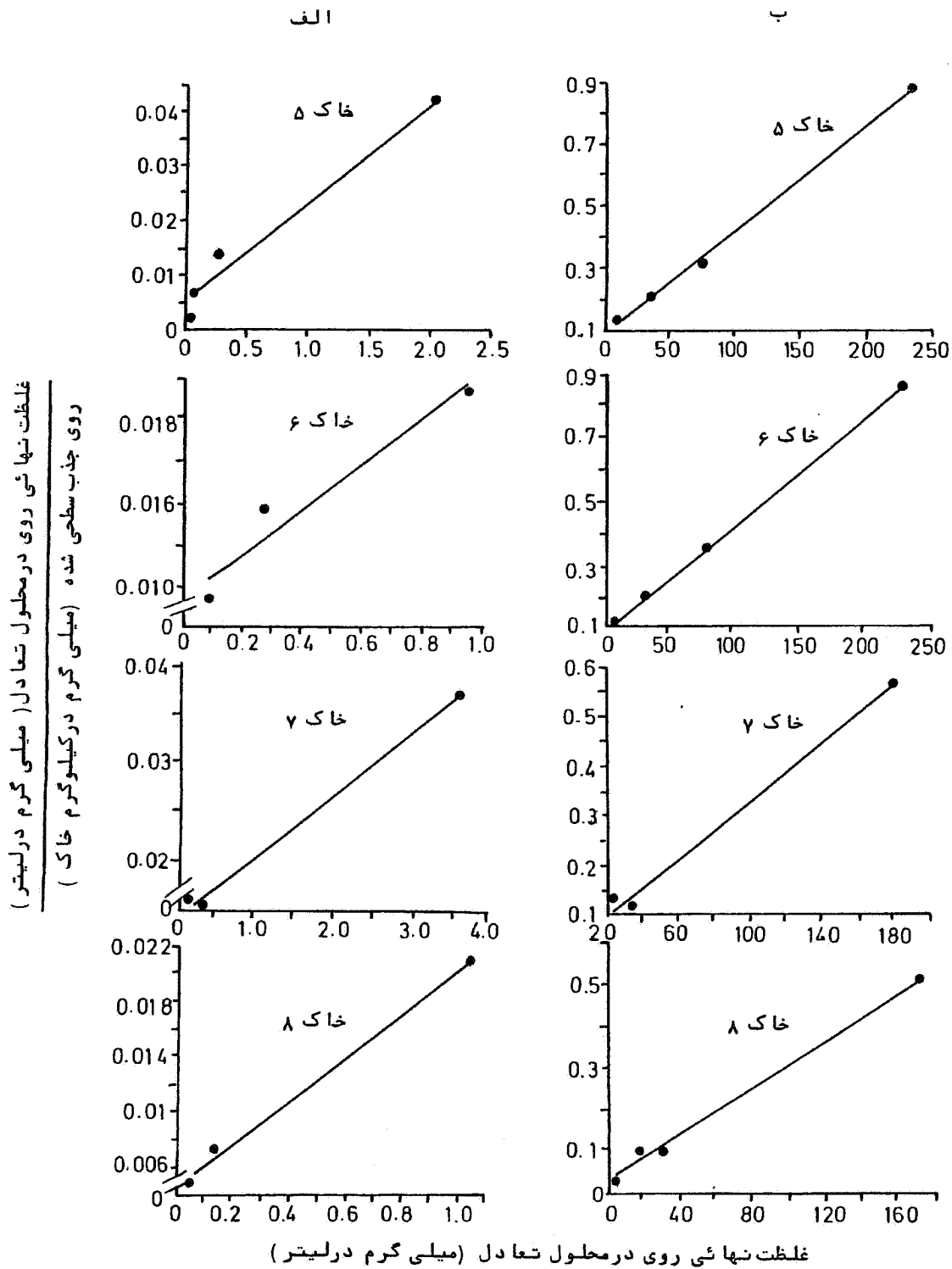
در این معادله K_1 و K_2 به ترتیب ضریب متناسب با انرژی پیوندی برای سطح اول و دوم، b_1 و b_2 به ترتیب حداکثر جذب برای سطح اول و دوم، و C غلظت در محلول تعادلی می‌باشد. برازش نتایج هم‌دماهای جذب روی توسط معادله ۶، در شکل‌های ۲ و ۳ به صورت دو سطحی ارائه گردیده، و چهار

پارامتر معادله ۶ در جدول ۳ نشان داده شده است. در سطح اول، هم‌دماهای جذب، مربوط به جذب روی در غلظت‌های کم (پنج میکروگرم در میلی‌لیتر)، و سطح دوم مربوط به جذب این عنصر در غلظت‌های بیشتر است. وجود دو سطح در هم‌دمای لانگ مویر، احتمالاً بیانگر دو محل یا دو مکانیسم مشخص، با میل ترکیبی متفاوت برای جذب روی است. ثابت متناسب با انرژی پیوندی در سطح اول (K_1)، به مراتب بزرگ‌تر از ثابت متناسب با انرژی پیوندی در سطح دوم منحنی (K_2) می‌باشد (جدول ۳). این بدان معنی است که در غلظت‌های کم روی محلول تعادلی، این عنصر با انرژی پیوندی بیشتری جذب می‌شود. از طرفی، حداکثر جذب در سطح اول منحنی (b_1)، به مراتب کمتر از سطح دوم (b_2) است (جدول ۳). به عبارت دیگر، گرچه مقدار روی جذب شده در سطح اول کمتر از قسمت دوم است، اما با انرژی پیوندی بیشتری نسبت به قسمت دوم نگهداری می‌شود. برای مثال، حداکثر جذب روی در سطح اول در خاک‌های ۳ و ۵ به ترتیب $\frac{1}{6}$ و $\frac{1}{5}$ حداکثر جذب در سطح دوم است. اما انرژی پیوندی نزدیک به ۵۷ و ۹۱ برابر سطح دوم جذب می‌باشد. شومان (۳۴) عقیده دارد که محل‌های تبدلی در بخش اول و دوم هم‌دمای لانگ مویر، به ترتیب از نظر حداکثر انرژی پیوندی و ظرفیت جذبی اهمیت دارند.

در این تحقیق مقدار روی جذب شده در تمام خاک‌ها، به غیر از خاک ۱، تقریباً نزدیک به مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی می‌باشد. در خاک ۱، احتمالاً مقداری از روی مصرفی رسوب کرده است. به عقیده بعضی از پژوهشگران (۹ و ۲۵) تمام خاک‌هایی که پ- هاش آنها نزدیک خشتی یا قلیایی است، قادرند روی را بیش از ظرفیت تبادل کاتیونی نگهداری نمایند. درجه (۱) در بررسی جذب سطحی روی در تعدادی از خاک‌های آهکی غیر غرقابی زیر سد درودزن استان فارس، مشاهده نمود که هم‌دماهای جذب در این خاک‌ها با معادله لانگ مویر منطبق بوده و شامل دو قسمت خطی است. این نتایج با آنچه توسط تایلور و همکاران (۳۷) برای خاک‌های آلاباما گزارش شده است، مطابقت دارد. اینگار و راجا (۱۳) نشان دادند که جذب



شکل ۲. برازش داده‌ها با هم‌دمای دویخشی جذب لانگ مویر در خاک‌های ۱ تا ۴
 (الف: غلظت محلول تعادل کمتر از پنج میلی‌گرم در لیتر، ب: غلظت محلول تعادل بیش از پنج میلی‌گرم در لیتر)



شکل ۳. برازش داده‌ها با هم‌دمای دویخشی جذب سطحی لانگ مویر در خاک‌های ۵ تا ۸ (الف: غلظت محلول تعادل کمتر از پنج میلی‌گرم در لیتر، ب: غلظت محلول تعادل بیش از پنج میلی‌گرم در لیتر)

جدول ۳. ضرایب مربوط به برازش داده‌های جذب روی با هم‌دمای لانگ مویر دو سطحی

| شماره خاک | b_1 | b_2 | K_1 | K_2 | b_2/b_1 | K_1/K_2 | R_1^2 | R_2^2 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|---------|---------|
| ۱ | ۱۷۹۵ | ۴۶۷۳ | ۰/۶۴ | ۰/۰۲ | ۲/۶۰ | ۳۲/۰ | ۰/۹۲*** | ۰/۹۶*** |
| ۲ | ۱۳۹۹ | ۶۸۹۷ | ۰/۳۹ | ۰/۰۹ | ۴/۹۳ | ۴/۳ | ۰/۹۹*** | ۰/۹۹*** |
| ۳ | ۴۵۲ | ۲۸۲۵ | ۵/۷۳ | ۰/۱۰ | ۶/۲۵ | ۵۷/۳ | ۰/۹۹*** | ۰/۹۸*** |
| ۴ | ۱۳۱۱ | ۶۸۹۷ | ۵/۹۶ | ۰/۱۴ | ۵/۲۶ | ۴۲/۶ | ۰/۹۸*** | ۰/۹۹*** |
| ۵ | ۱۰۸۳ | ۵۸۸۲ | ۳/۶۲ | ۰/۰۴ | ۵/۴۳ | ۹۰/۵ | ۰/۹۸*** | ۰/۹۹*** |
| ۶ | ۱۸۷۶ | ۵۹۱۷ | ۱/۱۲ | ۰/۰۴ | ۳/۱۵ | ۲۸/۰ | ۰/۹۴*** | ۰/۹۹*** |
| ۷ | ۱۲۰۵ | ۶۸۴۹ | ۰/۸۶ | ۰/۰۸ | ۵/۶۹ | ۱۰/۸ | ۰/۸۶*** | ۰/۹۹*** |
| ۸ | ۱۲۴۷ | ۷۰۴۲ | ۳/۵۳ | ۰/۰۸ | ۵/۶۵ | ۴۴/۱ | ۰/۹۹*** | ۰/۹۹*** |

b_1 و b_2 : حداکثر جذب روی (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، به ترتیب در غلظت‌های کم و زیاد روی در محلول تعادل
 K_1 و K_2 : ضریب ثابت متناسب با انرژی پیوندی، به ترتیب در غلظت‌های کم و زیاد روی در محلول تعادل
 R_1^2 و R_2^2 : ضریب تبیین معادله‌ها، به ترتیب در غلظت‌های کم و زیاد روی در محلول تعادل
 ***: معنی‌دار در سطح یک درصد

در بخش پایینی منحنی هم‌دماها در خاک‌های آهکی و سدیمی، با زیاد شدن پ- هاش خاک افزایش می‌یابد. بارو (۴) نیز افزایش نگهداری روی را، با زیاد شدن پ- هاش خاک در دمای مختلف گزارش کرده است.

اسپوزیتو (۳۶) معتقد است نبایستی از برازش داده‌های تجربی هم‌دمای جذب لانگ‌مویر برای تعیین مکانیسم جذب استفاده نمود، زیرا می‌توان از طریق ریاضی ثابت کرد که مجموع دو بخش معادله لانگ‌مویر و چهار ضریب آن با هر منحنی هم‌دما به صورت ال^۱ قابل برازش است. با این وجود، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، پژوهشگران متعددی از هم‌دمای جذب لانگ‌مویر به منظور تعیین مکانیسم جذب عناصر غذایی، از جمله روی استفاده کرده‌اند.

برای کسب اطلاع بیشتر در مورد مکانیسم نگهداری روی در خاک‌های مورد آزمایش در این تحقیق، و تأثیر ویژگی‌های خاک بر جذب سطحی این عنصر، بین ضرایب هم‌دمای لانگ‌مویر (جدول ۳) و خصوصیات خاک‌ها (جدول ۱) معادله رگرسیون تعیین گردید. شایان ذکر است که، حداکثر جذب سطحی روی در

سطحی روی در تعدادی از خاک‌های منطقه کاراتانکا، با هم‌دمای جذب لانگ‌مویر هماهنگی دارد. شومان (۳۴) عقیده دارد که بزرگ‌تر بودن ضریب متناسب با انرژی پیوندی در قسمت پایینی منحنی هم‌دما، نشان دهنده این امر است که روی در این بخش به مقدار کمتر، اما با پیوندی قوی‌تر، جذب خاک می‌گردد. وی زیاد بودن ضریب انرژی پیوندی در این بخش را با جذب روی توسط ماده آلی خاک مرتبط می‌داند. براه و همکاران (۵)، در بررسی جذب سطحی روی در هشت خاک آلفی سول و ورتی سول، مشاهده کردند که هم‌دماهای جذب در این خاک‌ها، با معادله لانگ‌مویر منطبق بوده و به شکل خطی است. هم‌چنین، حداکثر جذب در خاک‌های مختلف متفاوت است، که ناشی از اختلاف پ- هاش این خاک‌ها می‌باشد. کریمیان و معاف‌پوریان (۱۹) نیز در ۲۴ خاک نشان دادند که هم‌دماهای جذب سطحی روی با معادله لانگ‌مویر هماهنگی داشته و به صورت خطی است. نتایج مشابهی به وسیله دان و شوکلا (۱۰)، و پراساد و سارانتمیم (۳۰) گزارش شده است. اینگار و راجا (۱۳) ملاحظه کردند که حداکثر جذب روی و ضریب متناسب با انرژی پیوندی

1. L-curve isotherm

خاک هم بستگی مثبت و معنی داری به دست آوردند. تایلور و همکاران (۳۷)، داده‌های جذب روی مربوط به شش خاک آلابامای آمریکا را با هم دماهای فروندلیچ، لانگ مویر و بی‌ای تی^۱ برازش داده، و نتیجه گرفتند که حداکثر جذب لانگ مویر با ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، پ-هاش و رس خاک همبسته است، و این خواص تعیین کننده تغییرات در جذب سطحی هستند. پارود و گوادالیکس (۲۹) گزارش کردند که در پ-هاش‌های بیش از شش، جذب سطحی قوی، و یا حتی با رسوب روی در خاک همراه می‌باشد.

مطابق معادله ۹، بین حداکثر جذب روی در بخش دوم منحنی و کربنات کلسیم، معادل هم‌بستگی منفی معنی داری وجود دارد، که داده‌های ارائه شده در جدول‌های ۱ و ۳ این نوع هم بستگی را تأیید می‌نماید. به عنوان مثال، خاک ۳ با بیشترین کربنات کلسیم معادل (۷۰/۳ درصد)، کمترین حداکثر جذب (۲۸۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، و خاک ۲ با کمترین کربنات کلسیم معادل (۲۷/۴ درصد)، تقریباً بیشترین حداکثر جذب (۶۸۹۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) را دارا می‌باشد. وجود ارتباط منفی بین b_2 با کربنات کلسیم معادل، احتمالاً به دلیل بزرگ بودن اندازه ذرات کربنات‌ها بوده، که سبب کاهش سطح جذب کننده روی شده است.

از آن جا که در نگهداری و ابقای روی در خاک‌های آهکی مورد استفاده در این تحقیق، مقدار فسفر بومی قابل استفاده گیاه، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم نقش مهمی ایفا می‌نمایند، بنابراین برای افزایش بازیابی ظاهری روی در این خاک‌ها، لازم است تأثیر هر کدام از این پارامترها تعدیل شود. کاهش فسفر بومی خاک در شرایط مزرعه، دور از دسترس نیست. برای نیل به این هدف پیشنهاد می‌شود در خاک‌هایی که فسفر قابل استفاده در آنها نسبتاً زیاد است، از کاربرد کودهای فسفردار خودداری شود. با این حال، تغییر مقدار رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و یا کربنات کلسیم در مزرعه عملاً غیرممکن است. لذا به منظور افزایش بازیافت روی مصرفی توسط گیاه،

بخش اول منحنی (b_1)، با هیچ یک از ویژگی‌های خاک هم‌بستگی معنی داری نشان نداد. حال آن‌که ضریب تبیین معنی داری میان مقدار حداکثر جذب روی در قسمت دوم منحنی (b_2)، با بعضی از خصوصیات خاک ملاحظه گردید:

$$b_2 = 2670 + 67/3 \text{ Clay} \quad R^2 = 0/58^* \quad [7]$$

$$b_2 = -416 + 235 \text{ CEC} \quad R^2 = 0/75^* \quad [8]$$

$$b_2 = 9994 + 86/6 \text{ CCE} \quad R^2 = 0/62^* \quad [9]$$

$$b_2 = 3783 + 69 \text{ P} \quad R^2 = 0/63^* \quad [10]$$

در این معادله‌ها Clay، CCE و P به ترتیب درصد رس، کربنات کلسیم معادل (درصد) و غلظت فسفر قابل استفاده بومی خاک (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) می‌باشد، و CCE قبلاً تعریف شده است. از طرفی، در هیچ کدام از معادله‌های ۷ تا ۱۰، اضافه کردن هر متغیر مستقل دیگر سبب تغییر معنی دار ضریب تبیین نگردید.

حداکثر جذب روی در بخش دوم (b_2)، با رس هم‌بستگی معنی دار نشان داد. نتایج مشابهی توسط درجه (۱) و کوومیکلس (۲۰) گزارش شده است. شوکلا و میتال (۳۳) نشان دادند که هم‌دماهای جذب روی در خاک‌های شنی همواره زیر هم‌دماهای مشابه خود در خاک لومی قرار دارند، و در خاک‌های لومی، در مقایسه با خاک‌های شنی، b زیادتر و K کمتر است. هم چنین، کریمیان و معافپوریان (۱۹)، و سیدهو و همکاران (۳۵) نیز هم بستگی مثبتی بین حداکثر جذب سطحی روی و درصد رس خاک به دست آوردند.

بین حداکثر جذب سطحی روی در بخش دوم منحنی، با ظرفیت تبادل کاتیونی و غلظت فسفر قابل استفاده بومی خاک نیز ارتباط معنی داری دیده شد (معادله‌های ۸ و ۱۰). به عنوان مثال، خاک ۳ با کمترین ظرفیت تبادل کاتیونی و غلظت فسفر، تقریباً بیشترین حداکثر جذب را دارا می‌باشد. دان و شوکلا (۱۰) و یودو و همکاران (۳۸)، ضمن تطابق هم‌دماهای جذب با معادله یک سطحی لانگ مویر در خاک‌های آهکی، بین حداکثر جذب سطحی و درصد رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی

- سه راه زیر توصیه می‌شود:
۱. کاهش پ - هاش ریزوسفر (خاک ریشه) با مصرف مواد اسید ساز.
 ۲. استفاده از گونه‌ها و ارقام روی کارا^۱، که با تراوش هیدروژن و یا مواد کلاته کننده سبب افزایش حلالیت روی بومی و مصرفی می‌شوند.
 ۳. از آن جا که کاربرد Zn EDTA به علت گرانی مقرون به صرفه نیست، مصرف مواد آلی و یا مواد بهسازی غنی شده با روی توصیه می‌شود.
- سپاسگزاری
- بدین وسیله از کمک‌های ارزنده شورای پژوهشی دانشگاه شیراز، در تأمین اعتبار مالی لازم برای اجرای این تحقیق، صمیمانه سپاسگزاری و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. درجه، ز. ۱۳۶۸. ارزیابی وضعیت روی قابل استفاده گیاه به روش‌های آزمایشگاهی و گلخانه‌ای در خاک‌های منطقه زیر سد درودزن استان فارس. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، شیراز.
2. Allison, L. E. and C. D. Moodie. 1965. Carbonate. pp. 1379-1396. In: C. A. Black et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part II, Am. Soc. Agron., Madison, WI.
3. Assad, F. F. and J. D. Nielsen. 1985. Adsorption of zinc in selected soils from Denmark. Acta Agric. Scan. 35: 48-54.
4. Barrow, N. J. 1986. Testing a mechanistic model. IV. Describing the effects of pH on zinc retention by soils. J. Soil. Sci. 37: 295-302.
5. Borah, D. K., N. K. Banerjee and R. K. Rathan. 1990. Studies on adsorption of zinc by soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 38: 27-33.
6. Bouyoucos, C. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle-size analysis of soils. Agron. J. 54: 464-465.
7. Chester, R. 1965. Adsorption of zinc and cobalt on illite in sea water. Nature 206: 884-886.
8. Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. pp. 811-903. In: C. A. Black et al. (Eds.), Method of Soil Analysis. Part II. Am. Soc. Agron., Madison, WI.
9. Demumbrum, L. E. and M. L. Jackson. 1965. Copper and zinc exchange from dilute neutral solutions by soil colloidal electrolytes. Soil Sci. 81: 353-357.
10. Dhane, S. S. and L. M. Shukla. 1995. Zinc adsorption and its thermodynamics in some soil series of Maharashtra. J. Indian Soc. Soil Sci. 43: 590-593.
11. Ellis, B. G. and B. D. Knezek. 1972. Adsorption reaction of micronutrients in soils. pp. 59-78. In: J. J. Mortvedt et al. (Eds.), Micronutrients in Agriculture. Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, WI.
12. Ghanem, S. A. and D. S. Mikkelsen. 1988. Sorption of zinc on iron hydrous oxides. Soil Sci. 146: 15-21.
13. Iyengar, B. R. V. and M. E. Raja. 1983. Zinc adsorption as related to its availability in some soils of Karnataka. J. Indian Soc. Soil Sci. 31: 432-438.
14. Jenne, E. A. 1968. Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and waters: The significant role of hydrous Mn and Fe oxides. Adv. Chem. 73: 337-387.
15. Jurinak, J. J. and N. Bauer. 1956. Thermodynamics of zinc adsorption on calcite, dolomite, and magnesite

- type minerals. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20: 466-471.
16. Kalbasi, M. and G. J. Racz. 1978. Association of zinc with oxides of iron and aluminium in some Manitoba soils. Can. J. Soil Sci. 58: 61-68.
 17. Kalbasi, M., G. J. Racz and L. A. Loewen-Rudgers. 1978. Mechanism of zinc adsorption by iron and aluminium oxides. Soil Sci. 125: 146-150.
 18. Karimian, N. and F. R. Cox. 1978. Adsorption and extractability of molybdenum in relation to some chemical properties of soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 757-761.
 19. Karimian, N. and G. R. Moafpouryan. 1999. Zinc adsorption characteristics of selected calcareous soils of Iran and their relationship with soil properties. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 30: 1721-1731.
 20. Kuo, S. and D. S. Mikkelsen. 1979. Zinc adsorption by two alkaline soils. Soil Sci. 128: 274-278.
 21. Kurdi, F. and H. E. Doner. 1983. Zinc and copper sorption and interaction in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 873-876.
 22. Lindsay, W. I. and W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
 23. Maftoun, M. and N. Karimian. 1989. Relative efficiency of two zinc sources for maize (*Zea mays* L.) in two calcareous soils from an arid area of Iran. Agronomie 9: 771-775.
 24. Mandal, B. and G. C. Hazra. 1997. Zinc adsorption in soils as influenced by different soil management practices. Soil Sci. 162: 713-721.
 25. Misra S. G. and R. C. Tiwari. 1966. Retention and release of copper and zinc by some Indian soils. Soil Sci. 101: 465-471.
 26. Moraghan, J. T. and H. J. Mascagni, Jr. 1991. Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities. pp. 329-370. In: J. J. Mortvedt et al. (Eds.), Micronutrients in Agriculture. Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, WI.
 27. Msaky, J. J. and R. Calvet. 1990. Retention and release of copper and zinc in soils: Influence of pH on adsorption characteristics. Soil Sci. 150: 513-521.
 28. Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Watanabe and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939, U. S. Gover. Prin. Office, Washington, D. C.
 29. Pardo, M. T. and M. E. Guadalix. 1996. Zinc sorption-desorption by two Andepts: Effect of pH and support medium. Europ. J. Soil Sci. 47: 257-263.
 30. Prasad, B. and I. Sarangthem. 1993. Adsorption of zinc as affected by its sources in calcareous soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 41: 261-265.
 31. Qian, J. H. and Z. C. Xie. 1992. Studies on chemical behavior of soil zinc and zinc-supply characteristics to rice. pp. 283-289 In: S. Protch (Eds.), The Role of Sulfur, Magnesium and Micronutrients in Balanced Plant Nutrition. The Sulfur Inst., Washington, D. C.
 32. Reddy, M. R. and H. R. Parkins. 1974. Fixation of zinc by clay minerals. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38: 229-232.
 33. Shukla, V. C. and S. B. Mital. 1979. Characterization of zinc adsorption in some soils of india. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 905-908.
 34. Shuman, L. M. 1975. The effect of soil properties on zinc adsorption by soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39: 454-458.

35. Sidhu, A. S., N. S. Randhawa and M. K. Sinha. 1977. Adsorption of zinc in different soils. *Soil Sci.* 124: 211-218.
36. Sposito, G. 1989. *The Chemistry of Soils*. P. 15, Oxford University Press, New York, NY.
37. Taylor, R. W., K. Hassan, A. A. Mehadi and J. W. Shuford. 1995. Zinc sorption by some Alabama soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 993-1008.
38. Udo, E. J., H. L. Bohn and T. C. Tucker. 1970. Zinc adsorption by calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 405-407.
39. Walkley, A. and C. A. Black. 1934. An Examination of the Deglijareff method for determining organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.