

Research Article

Agricultural Engineering., 45(4) (2023) 357-375
DOI: 10.22055/agen.2023.42923.1654

ISSN (P): 2588-526X

ISSN (E): 2588-5944

Comparing Zn speciation and fractionation in selected diagnostic horizons from Khuzestan Province

S.S. Mousavi¹, S. Hojati^{2*} and A. Landi³

1. Former M.Sc. student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran
2. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Khuzestan, Iran

Received: 31 January 2023

Accepted: 19 March 2023

Abstract

Introduction: Soils at the earth crust could be considered as the result of interaction among five soil-forming factors. The strength and weakness of each of these factors causes formation of different soils with different properties and horizons. Previous studies have reported that Iranian agricultural soils show different levels of zinc deficiency. Although the literature review confirms many studies in this regard, the number of studies compared the distribution of the chemical forms of micronutrients and especially zinc after the application of chemical fertilizers in the soils of Khuzestan especially in the common diagnostic horizons of these soils, is limited. Therefore, the purposes of this study were two-fold: (1) to measure and determine the chemical forms of zinc in selected diagnostic horizons (*Mollic*, *Calcic* and *Salic*) of Khuzestan Province, (2) to identify the contribution of some physical and chemical properties of these soils on availability of zinc.

Materials and Methods: In order to carry out this research, *Mollic* and *Calcic* diagnostic horizons were collected from the Karun 3 watershed in the east of Khuzestan province, with thermic and mesic temperature and xeric moisture regimes. However, *Salic* diagnostic horizon was sampled from the route between Ahvaz to Abadan in the southwest of the province, with hyperthermic temperature regime and an aridic moisture regime. After being transferred to the laboratory, the samples were first air-dried, and after passing through a 2-mm sieve and before carrying out the fractionation and speciation experiments, their physical and chemical characteristics including electrical conductivity (EC), pH, particle size distribution, organic C content, calcium carbonate equivalent, cation exchange capacity (CEC), specific surface area (SSA), and total and DTPA extractable Zn were determined employing common standard procedures (Table 2). Different forms of zinc in the solid phase of the *Mollic*, *Calcic*, and *Salic* soils were extracted using the method described by Tessier et al. (1979). In brief, 5 components including water soluble, exchangeable, carbonates, iron and manganese oxide, organic and residual forms were determined. The concentration of zinc in the extracts obtained from different stages of successive soil extraction was determined using an atomic absorption device. In order to estimate the accuracy of the extraction method described above, the recovery percentage was calculated. To do this, one gram of a certified soil from the state of Montana (ANIST 2711A) was used and the recovery percentage of



zinc in our study was 94.5%. In order to determine the chemical forms of zinc in the solution phase of the soils, 100 g of each soil sample was saturated with double distilled water, and then extracted using a vacuum pump and Buchner funnel. The extracts were passed through filter paper and centrifuged at 2500 rpm for 8 minutes, then the values of pH, electrical conductivity, dissolved organic carbon, and dissolved cations and were determined using common laboratory methods described earlier (Table 1). These parameters were considered as input in Visual MINTEQ software to predict zinc species in soil solution (all free and complexed organic and mineral species). The data analysis was conducted considering a factorial design based on a completely randomized design through SAS software (v9.1). The comparison of means was also done using the Tukey's test at the 5% probability level. Graphs were also drawn using Origin software (v2018).

Results and Discussion: Considering the critical level of zinc deficiency in the soil (1 mg/kg), all the soils are deficient in terms of available zinc. The studied soils are among alkaline and calcareous soils, but they did not show any differences from each other in terms of soil texture. It is noteworthy that the *mollic* horizon has a greater cation exchange capacity and specific surface area than the other two soils due to the higher amount of organic matter and the greater abundance of clay contents. The results of zinc fractionation in the studied soils showed that organic, carbonate and oxide forms in the Mollic and Calcic horizons, and carbonate, oxide and exchangeable forms in the Salic horizon were the dominant forms of Zn which affects its supply to the plants. The results also showed that Zn^{2+} , $Zn(OH)_2(aq)$, Zn-DOM (aq), and $Zn(OH)^+$ species were the dominant species of Zn in soil solution of all diagnostic horizons. The result of Zn mobility factor calculations with the addition of 10 mg/kg $Zn(SO_4)_2$ showed lower values of mobility factor in the mollic diagnostic horizon than those of the calcic and salic.

Key words: Available zn, mollic, salic, calcic, speciation, fractionation

مقایسه جزءبندی و گونه‌بندی روی در برخی افق‌های مشخصه خاک‌های استان خوزستان

سیده ساناز موسوی^۱، سعید حجتی^{۲*} و احمد لندی

۱-دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

۳-استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:

روی قابل جذب،

مالیک،

کلسیک،

سالیك،

جزءبندی،

گونه‌بندی

چکیده

خاک‌های موجود در سطح زمین نتیجه برهم کنش عوامل پنج گانه خاک‌سازی بوده و شدت و ضعف هر یک از این عوامل سبب تشکیل خاک‌های متفاوت با ویژگی‌ها و افق‌های مختلف می‌گردد. نتایج تجزیه خاک‌های کشاورزی ایران سطح متفاوتی از کمبود روی را نشان می‌دهد. این مطالعه با دو هدف (۱) اندازه-گیری و تعیین شکل‌های شیمیایی روی در افق‌های مشخصه مالیک، کلسیک و سالیك جمع‌آوری شده از مناطق مختلف در استان خوزستان (۲) و بررسی سهم برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها در تعیین فراهمی روی قابل دسترس این خاک‌ها صورت گرفت. بدین منظور و برای کمی‌سازی توزیع روی قابل دسترس در خاک‌های مورد بررسی (با سه تکرار) از روش عصاره-گیری دنباله‌ای استفاده شد. به منظور برآورد دقت نتایج شش مرحله‌ای تیسر یک گرم خاک گواهی شده ایالت مونتانا (ANIST 27 11 A) مورد استفاده قرار گرفت و درصد بازیابی به دست آمده ۹۴/۵٪ بود. از نرم افزار visual MENTEQ نسخه ۳/۱ برای محاسبه گونه‌های روی غالب در محلول تعادلی استفاده شد. پارامترهای (Zn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Cl^-)، EC و pH) به عنوان ورودی‌های مدل استفاده شدند. نتایج جزءبندی روی نشان داد که شکل‌های آلی، کربناتی و اکسیدی در افق مالیک و کلسیک و شکل‌های کربناتی، اکسیدی و تبادل‌پذیر در افق سالیك شکل‌های غالب و مؤثر روی قابل دسترس گیاه می‌باشند. همچنین نتایج نشان داد گونه‌های (Zn^{2+} , $Zn\text{-DOM (aq)}$, $Zn(OH)_2(aq)$ و $Zn(OH)^+$) گونه‌های غالب روی در همه افق‌های مشخصه انتخابی هستند. نتایج حاصل از محاسبات فاکتور تحرک عنصر روی با افزودن ۱۰ میلی گرم به کیلوگرم خاک سولفات روی نشان از مقادیر کم‌تر فاکتور تحرک در افق مشخصه مالیک نسبت به کلسیک و سالیك بود.

* عهده دار مکاتبات

Email: s.hojati@scu.ac.ir

مقدمه

خاک‌ها نتیجه برهم‌کنش فاکتورهای پنج‌گانه خاک-سازی بوده و هر یک دارای مجموعه خاصی از افق‌ها یا لایه‌های ژنتیکی می‌باشند. افق‌ها و ویژگی‌های مشخصه با تلفیق صفاتی تعریف می‌گردند که برآیند فرآیندهای خاک‌سازی متداول و گسترده را نشان می‌دهند (۵). در مجموع، حدود ۸۵ درصد از کل مساحت ایران دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است و بیشتر خاک‌های این مناطق آهکی و دارای واکنش قلیایی هستند. این شرایط همراه با کمبود این خاک‌ها از نظر ماده آلی باعث می‌شود که بسیاری از گیاهان با کمبود عناصر غذایی رو به‌رو باشند (۳۰).

روی از جمله عناصر غذایی کم‌مصرفی است که برخلاف سایر عناصر غذایی که دارای بیش از یک ظرفیت هستند، در خاک فقط به صورت دو ظرفیتی (Zn^{2+}) وجود دارد و عمدتاً به این شکل توسط گیاه جذب می‌شود. البته لازم به ذکر است که جذب روی در pH‌های قلیایی به صورت $Zn(OH)^+$ نیز گزارش شده است (۱۹). کمبود روی تأثیر مخربی بر رشد، توسعه سیستم‌های عصبی و ایمنی دارد. علائم کمبود روی معمولاً به صورت کم‌خونی، ریزش مو، ناراحتی‌های پوستی، اختلالات هورمونی، اختلالات تیروئید، کوتاهی قد، بلوغ دیررس و تشدید دیابت نوع دو بروز می‌کند. کمبود روی همچنین می‌تواند باعث بروز اختلالات حسی و ناکارآمد شدن سیستم ایمنی، بروز آترواسکلروز و افزایش استرس گردد (۲۵).

روی در بسیاری از عملکردهای فیزیولوژیکی در گیاهان نقش دارد. روی مسئول سنتز اکسین در گیاه است و واکنش شیمیایی کلروفیل را کاتالیز می‌کند (۱۱). همچنین، روی در اکثر فعالیت‌های گیاه مثل تشکیل هورمون‌ها در کلروپلاست، تنظیم آب و نشاسته و همچنین در تولید پروتئین شرکت دارد. افزون بر این، روی جزئی از آنزیم RNA پلیمراز است و برای حفظ ساختمان ریبوزوم لازم است (۱۸).

مقدار روی کل در کره‌خاکی تقریباً ۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم است و در خاک مقدار آن از ۱۰ تا ۳۰۰ و به طور متوسط ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر است؛ ولی در خاک‌های قلیایی مقدار آن از ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تجاوز نمی‌کند. مقدار روی در سنگ‌ها نیز متفاوت بوده و حدود تغییرات آن از ۴ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر است. مقدار روی در بازالت ۱۰۰، شیل ۴۵، گرانیت ۱۰، سنگ آهک ۴ و در ماسه‌سنگ ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (۳۵).

به‌طور کلی، فراهمی عناصر در خاک برای گیاه به وسیله تعادل بین فاز جامد و محلول خاک کنترل می‌گردد (۱۵). فراهمی شکل‌های مختلف یک عنصر در خاک برای گیاهان متفاوت بوده و قابلیت استفاده آن برای گیاه ارتباط زیادی با نحوه توزیع آن‌ها در اجزاء مختلف خاک دارد. یافته‌های پیشین حاکی از آن است که در بیش از ۵۶ درصد خاک‌های زراعی ایران، مقدار روی قابل عصاره‌گیری با DTPA کمتر از ۰/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است و تنها ۳۱ درصد از خاک‌ها بیشتر از یک میلی‌گرم بر کیلوگرم روی قابل جذب دارند. حد بحرانی روی در خاک‌های ایران ۰/۵ تا ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۲۹).

روش‌هایی که پویایی روی را در خاک‌ها شبیه‌سازی می‌کنند، می‌توانند تخمین بسیار خوبی را از فرآیند جذب روی ارائه نمایند (۲۷). از این رو، توجه به عوامل مهم کنترل‌کننده قابلیت دسترسی روی، ضروری است و از آنجایی که همه شکل‌های روی موجود در خاک از قابلیت دسترسی و پویایی مشابهی برخوردار نیستند، لذا تعیین شکل‌های شیمیایی روی در فازهای جامد و محلول خاک به منظور تعیین شکل‌های قابل دسترسی روی حائز اهمیت است. اگرچه بررسی منابع مطالعات زیادی را در این رابطه نشان می‌دهند، لیکن تعداد مطالعاتی که به مقایسه گونه‌بندی و جزءبندی توزیع شکل‌های شیمیایی عناصر کم مصرف و به‌طور ویژه عنصر روی پس از

اندازه‌گیری کربن محلول در آب^۱ (DOC)

برای اندازه‌گیری کربن محلول در آب، ابتدا ۳ گرم خاک هواخشک را که از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده است به لوله‌های سانتریفیوژ منتقل و با ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر دوبار تقطیر شده مخلوط گردید. سپس سوسپانسیون حاصل به مدت ۳۰ دقیقه با شدت ۳۰ دور در دقیقه تکان داده شد. بعد از آن به مدت ۲۰ دقیقه با شدت ۳۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید و بعد از عبور از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ عصاره‌گیری و در نهایت میزان کربن آلی در عصاره حاصل با استفاده از دستگاه TOC Analyzer مدل TOC-VCPH ساخت شرکت شیمادزو اندازه‌گیری شد (۱۰).

روی کل

غلظت روی کل پس از هضم نمونه‌ها در مخلوط سه اسید کلریدریک (۳۷٪) و فلئوئوریدریک (۴۰٪) و نیتریک (۶۵٪) با دستگاه جذب اتمی واریان مدل SavantAA اندازه‌گیری گردید (۳۴).

سطح ویژه

روش BET بر اساس سنجش حجم گاز نیتروژن جذب و واجذب شده توسط سطح ماده در دمای ثابت نیتروژن مایع (۷۷ درجه کلوین) کار می‌کند. این سیستم بر اساس تئوری (Brunauer-Emmett-Teller) استوار است و اندازه‌گیری آن نیز هیچ گونه آسیبی به ماده وارد نمی‌کند و برای نمونه‌های پودری مناسب است (۲۸). به منظور اندازه‌گیری سطح ویژه خاک‌های مورد مطالعه از روش جذب فیزیکی N₂-BET برای ۲ گرم از هر کدام از نمونه‌ها توسط دستگاه BET مدل نانو سورد موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران اهواز اندازه‌گیری گردید.

کاربرد کودهای شیمیایی در خاک‌های استان خوزستان و به‌طور ویژه افق‌های مشخصه معمول این خاک‌ها پرداخته باشند، بسیار اندک است. از این رو، به منظور درک بهتر چگونگی توزیع شکل‌های شیمیایی روی در فازهای جامد و محلول خاک در برخی از افق‌های مشخصه معمول خاک‌های استان خوزستان این پژوهش با هدف اندازه‌گیری و تعیین شکل‌های شیمیایی روی در افق‌های مشخصه مالیک، کلسیک و سالیک جمع‌آوری شده از مناطق مختلف در استان خوزستان (۲) و بررسی سهم برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها در تعیین فراهمی روی قابل دسترس این خاک‌ها صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش خاک‌های مربوط به افق‌های مشخصه مالیک و کلسیک از حوزه آبخیز کارون ۳ واقع در شرق استان خوزستان، با رژیم حرارتی ترمیک یا مزیک در مرز ترمیک و رژیم رطوبتی زیریک و خاک‌های مربوط به افق مشخصه سالیک نیز از خاک‌های واقع در مسیر اهواز به آبادان در جنوب غرب استان با رژیم حرارتی هایپرترمیک و رژیم رطوبتی اریدیک نمونه برداری شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه ابتدا هواخشک شده و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری و پیش از انجام مطالعات گونه‌بندی و جزءبندی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه، با روش‌های مرسوم آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

به‌منظور بررسی سرنوشت جذب روی در خاک‌های مورد بررسی از محلول ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم روی که به صورت مصنوعی و با استفاده از نمک سولفات روی مطابق دستورالعمل موسسه تحقیقات آب و خاک کشور (معادل ۴۰ میلی‌گرم در هکتار) تهیه شده بود، استفاده گردید.

جدول (۱) نحوهٔ اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی تعیین شده در خاک‌های مورد بررسی

Table (1) Methods applied to determine physical and chemical properties of selected soils

منبع (Reference)	روش مورد استفاده (Methods applied)	ویژگی‌ها (Properties)
(26)	عصاره اشباع خاک (Saturation extract)	هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity)
(8)	پیپت (Pipette)	بافت خاک (Soil Texture)
(36)	گل اشباع (Saturation Paste)	واکنش خاک (pH)
(7)	اشباع سازی با استات آمونیوم (Saturation with ammonium acetate)	ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation Exchange Capacity)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	پتاسیم محلول (Soluble K)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	سدیم محلول (Soluble Na)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	کلسیم محلول (Soluble Ca)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	منیزیوم محلول (Soluble Mg)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	آمونیم محلول (Soluble NH ₄ ⁺)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	سولفات محلول (Soluble SO ₄ ²⁻)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	فسفات محلول (Soluble PO ₄ ³⁻)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	کلر محلول (Soluble Cl ⁻)
(21)	عصاره اشباع خاک - کروماتوگرافی یونی (Ion chromatography - Saturation extract)	نیترات محلول (Soluble NO ₃ ⁻)
(37)	اکسیداسیون تر (Wet oxidation)	کربن آلی (Organic C)
(16)	تیتراسیون برگشتی با سود (Back titration with NaOH)	کربنات کلسیم معادل (Calcium Carbonate Equivalent)

تعیین شکل های شیمیایی روی در فاز محلول خاک

مقدار ۱۰۰ گرم از هر نمونه خاک با آب مقطر به حالت اشباع رسانده و با استفاده از پمپ خلاء و قیف بوختر عصاره گیری شد. عصاره ها از کاغذ صافی عبور و به مدت ۸ دقیقه با شدت ۲۵۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند سپس مقادیر پ. هاش، هدایت الکتریکی، کربن آلی محلول و کاتیون ها و آنیون های محلول در عصاره اشباع خاک که پیش تر با استفاده از روش های متداول آزمایشگاهی اندازه گیری شده بودند (جدول ۱)، به عنوان ورودی مدل در نرم افزار Visual MINTEQ و به منظور پیش بینی گونه های روی در محلول خاک (تمام گونه های آزاد و کمپلکس یافته آلی و معدنی) مورد استفاده قرار گرفتند (۲۴).

تحلیل های آماری

تجزیه و تحلیل نتایج در قالب طرح فاکتوریل در پایه طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار SAS نسخه (۹/۱) و مقایسه میانگین ها نیز با استفاده از آزمون Tukey در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. رسم نمودارها نیز با استفاده از نرم افزار Origin نسخه ۲۰۱۸ صورت گرفت.

نتایج و بحث

بررسی ویژگی های خاک های مورد مطالعه

نتایج ارائه شده در جدول ۲ بیانگر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه است. براین اساس، خاک های مورد آزمایش با عنایت به حد بحرانی کمبود روی در خاک (۱ میلی گرم بر کیلوگرم) دچار کمبود روی قابل دسترس هستند. خاک های مورد مطالعه در زمره خاک های قلیایی و آهکی هستند، لیکن از نظر بافت خاک تفاوتی را با یکدیگر نشان نمی دهند. نکته قابل توجه اینکه افق مالیک به واسطه بیشتر بودن مقدار ماده آلی و فراوانی بیشتر بخش رس نسبت به دو خاک دیگر دارای ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بیشتری است.

تعیین شکل های شیمیایی روی در فاز جامد خاک

شکل های مختلف روی در فاز جامد خاک با استفاده از روش تسیر و همکاران^۱ (۳۷) مورد بررسی قرار گرفت. در این روش ۵ جزء تبادل، کربناته، اکسید آهن و منگنز، آلی و باقی مانده تعیین گردید. غلظت روی در عصاره های به دست آمده از مراحل مختلف عصاره گیری پی در پی خاک با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین شد.

اعتبار سنجی نتایج جزء بندی شیمیایی

به منظور برآورد دقت روش عصاره گیری پی در پی تسیر و همکاران (۳۷)، در استخراج کامل یک فلز در خاک، درصد بازیابی^۲ محاسبه گردید. براین اساس از یک گرم خاک گواهی شده ایالت مونتانا (ANIST 2711A) استفاده شد و درصد بازیابی شکل های مختلف روی در روش مورد استفاده ۹۴/۵ درصد به دست آمد.

محاسبه فاکتور تحرک^۳ عنصر روی

فاکتور تحرک به عنوان نمایه ای برای ارزیابی میزان تحرک فلز روی در خاک های مورد مطالعه با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (۲۲).

$$MF = \frac{F_1 + F_2}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، F_1 تا F_5 میزان فلز در بخش های مختلف روش عصاره گیری متوالی مورد استفاده می باشد. فاکتور تحرک در ابتدا به ویژگی های ژئوشیمیایی فلز و در مرتبه بعدی به شرایط تشکیل خاک بستگی دارد. جزء تبادل و متصل به کربنات های پتانسیل تحرک پذیری و زیست فراهمی بالایی در گیاهان دارا هستند و با کمترین تغییرات اسیدیته خاک سهم این اجزا تغییر خواهد کرد. مقدار شاخص تحرک بالا بیانگر بی ثباتی نسبتاً بالا و در دسترس بودن بیولوژیکی فلزات در خاک می باشد (۳).

1- Tessier *et al.*
2- Recovery Rate
3- Mobility Factor

محلول خاک شده و همین امر سبب افزایش غلظت روی در محلول خاک می‌گردد.

شکل تبدالی

مقایسه میانگین اثر کاربرد روی نشان داد که با افزایش غلظت روی به ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم شکل تبدالی روی را به طور معنی‌داری در هر سه خاک مورد مطالعه افزایش یافت (شکل ۱).

میزان روی تبدالی در افق مالیک بیشتر از دو افق دیگر است که می‌توان آن را به ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر در این افق و همچنین فراوانی نسبی رس و سطح ویژه بالاتر که سبب ایجاد سایت‌های تبدالی می‌گردد، نسبت داد. تاگویرا و همکاران^۲ (۳۶) معتقدند که وجود ماده آلی در خاک سبب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شده و مکان‌های جذب قابل برگشت را بر سطوح خاک افزایش می‌دهد. به همین دلیل روی بیشتر می‌تواند به شکل تبدالی قرار بگیرد. در افق کلسیک نیز افزایش غلظت روی به ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سبب افزایش شکل روی تبدالی شده است و این موضوع نشان می‌دهد که روی به شکلی که قابلیت فراهمی بیشتری دارد، تبدیل گشته است. بوستانی و همکاران^۳ (۴) گزارش کردند که سطوح شوری و ماده آلی به طور معنی‌داری شکل محلول و تبدالی را افزایش داد.

مقایسه شکل‌های شیمیایی روی در فاز جامد خاک

اطلاع از توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک‌ها جهت شناخت زیست‌فراهمی و تحرک آن ضروری است. نتایج تجزیه واریانس تأثیر کاربرد روی بر شکل‌های شیمیایی آن در فاز جامد خاک در جدول (۳) ارائه شده است.

شکل محلول در آب

به طور کلی مقدار روی محلول در آب در هر سه افق مورد مطالعه با افزایش غلظت روی به ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۱). همان‌طور که در شکل (۱) پیداست میزان روی محلول در آب در افق کلسیک کم‌ترین مقدار و در افق سالیك بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. احتمالاً دلیل افزایش شکل محلول روی در افق سالیك را علاوه بر رقابت بین یون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم با روی در اشغال سایت‌های تبدالی، به تشکیل جفت یون‌های کلرید روی و کاهش ضریب فعالیت روی در این افق نسبت داد که میزان روی محلول را به طور قابل توجهی افزایش داده است. مطالعات حاکی از آن است که مکانیسم اصلی کنترل‌کننده پویایی و حرکت روی در خاک رقابت با کلسیم بر سر جایگزینی در نقاط جذب سطحی است. بعد از کلسیم رقابت روی با منیزیم و سولفات در جذب سطحی عوامل پویایی و حرکت روی در خاک هستند (۲). با استناد به جدول (۲) مشاهده می‌شود که فراوانی املاح محلول در آب در افق سالیك نسبت به دو افق دیگر به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است، لذا کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول می‌توانند از طریق رقابت با یون روی بر سر اشغال سطوح کلوئیدی خاک سبب جذب کمتر روی در این افق و در نهایت افزایش روی محلول در آب گردند. کاساگرانده و همکاران^۱ (۶) نیز گزارش کردند که شوری سبب افزایش قدرت یونی

2- Tagwira et al.

3- Boostani et al.

1- Casagrande et al.

جدول (۲) نتایج بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های مشخصه انتخابی در این پژوهش
 Table (2) Results of physical and chemical properties determined in selected soils

سالیك (Salic)	كلسيك (Calcic)	ماليك (Mollic)	واحد (Unit)	ویژگی‌ها (Properties)
9.77	0.86	1.00	(dS/m)	هدایت الکتریکی (Electrical Conductivity)
265	225	270	(g/kg)	فراوانی رس (Clay content)
415	385	400	(g/kg)	فراوانی سیلت (Silt content)
Loam	Loam	Loam	--	بافت خاک (Soil Texture)
7.93	8.04	7.62	--	واکنش خاک (pH)
6.3	21.1	68.6	(cmol _c /kg)	ظرفیت تبادل کاتیونی (Cation Exchange Capacity)
129.1	0.9	4.19	(mg/kg)	پتاسیم محلول (Soluble K)
4218.1	1.3	1.1	(mg/kg)	سدیم محلول (Soluble Na)
1104.2	17.3	19.2	(mg/kg)	کلسیم محلول (Soluble Ca)
800.7	0.9	1.0	(mg/kg)	منیزیم محلول (Soluble Mg)
1.8	0.1	0.1	(mg/kg)	آمونیم محلول (Soluble NH ₄ ⁺)
1231.7	8.0	3.7	(mg/kg)	سولفات محلول (Soluble SO ₄ ²⁻)
3.1	0.8	2.6	(mg/kg)	فسفات محلول (Soluble PO ₄ ³⁻)
5418.10	1.00	0.94	(mg/kg)	کلر محلول (Soluble Cl)
21.5	3.0	16.7	(mg/kg)	نیترات محلول (Soluble NO ₃ ⁻)
4.5	5.6	25.0	(g/kg)	کربن آلی (Organic C)
25.6	34.7	40.6	(mg/kg)	کربن آلی محلول (DOC)
265.0	435.0	93.7	(g/kg)	کربنات کلسیم معادل (Calcium Carbonate Equivalent)
85.4	70.6	130.0	(mg/kg)	روی کل (Total Zn)
2.00	0.43	2.76	(mg/kg)	روی قابل دسترس (Available Zn)

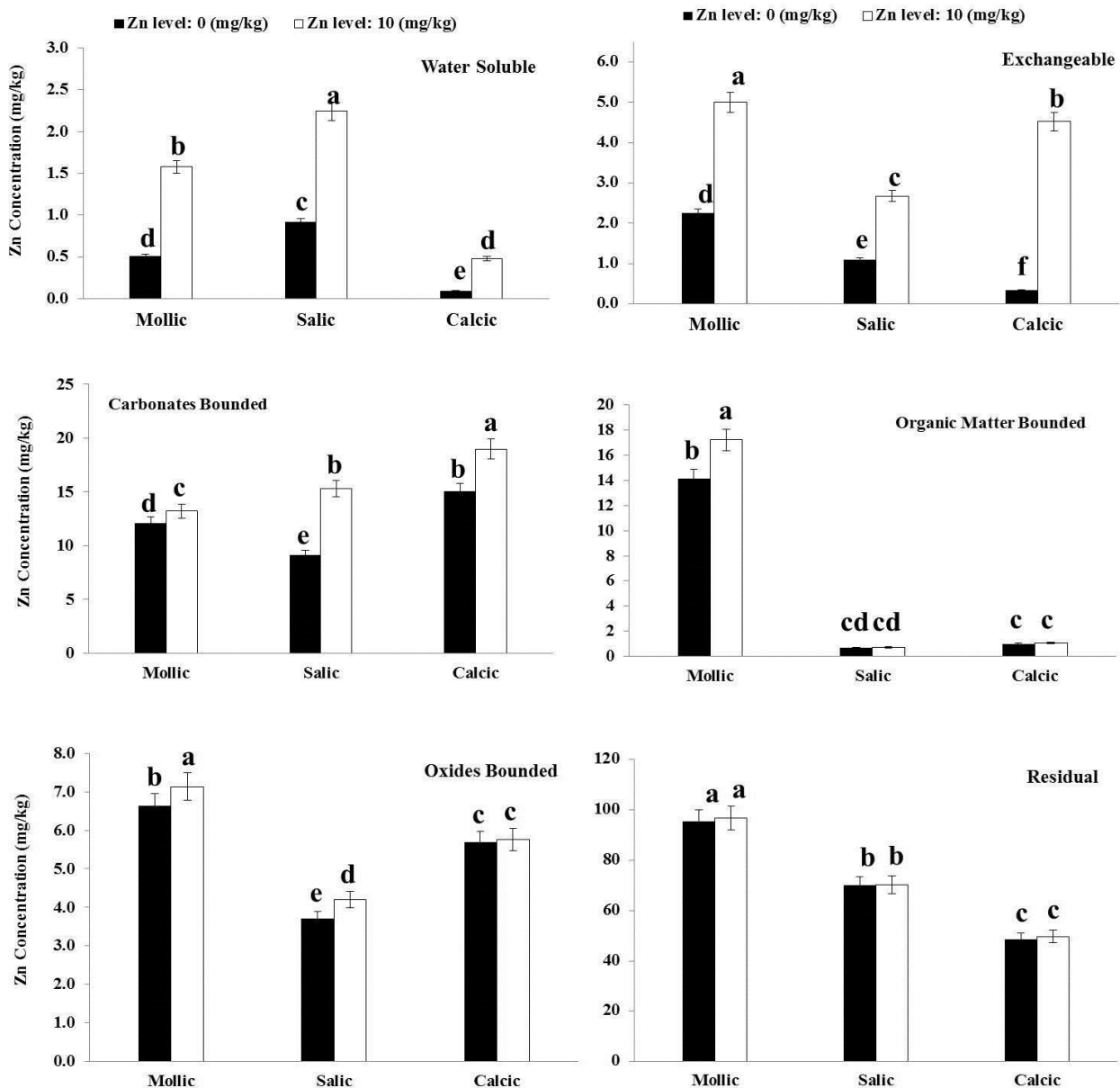
جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس شکل‌های شیمیایی روی در فاز جامد خاک‌های مورد مطالعه

Table (3) Analysis of variance for the chemical forms of Zn in solid phases of the soils studied

(Mean of squares) میانگین مربعات						درجه آزادی Degree of freedom	منبع تغییرات Source of variation
باقیمانده Residual	تبادلی Exchangeable	پیوند یافته با مواد آلی Bounded to organic matters	پیوند یافته با کربناتها Bounded to carbonates	پیوند یافته با اکسیدها Bounded to oxides	محلول در آب Water soluble		
796.42**	3.7*	113.60*	3.50*	4.26*	0.77*	2	افق (Horizon)
43.60*	1.26*	422.42*	0.50*	1.64*	0.10*	1	غلظت روی (Zn Concentration)
33.50*	7.0*	115.18*	27.79*	8.40*	4.05*	2	افق × غلظت (Horizon×Concentration)
1.15	3.72	0.79	6.95	0.01	0.28	12	خطا (Error)

* و ** به ترتیب نشان دهنده معنی داری در سطح احتمال ۰/۰۵ و ۰/۰۱ می باشد.

*, and ** indicates significant at P<0.05 and P<0.01, respectively.



شکل (۱) مقایسه توزیع شکل‌های مختلف روی در فاز جامد افق‌های مشخصه انتخابی. میانگین‌هایی که در یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون توکی می‌باشند.

Figure(1) Comparison of the distribution of different forms of zinc in the solid phase of selected diagnostics horizons. Means that share the same letter do not statistically have a significant difference at the 5% level of Tukey's test.

(شکل ۱). در این ارتباط می‌توان بیان کرد یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر افزایش بخش آلی روی، آزادسازی روی از ترکیبات آلی بوده که علاوه بر اثر مستقیم؛ از طریق تشکیل کمپلکس با فلز می‌تواند به صورت غیر مستقیم و از طریق کاهش pH بر فراهمی روی در بخش آلی مؤثر باشد. در واقع کاهش pH و فرآیند متحرک شدن سبب

شکل پیوند یافته با مواد آلی

مقدار روی پیوند یافته با مواد آلی با افزایش غلظت به ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در مقایسه با خاک‌های شاهد تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان داد (شکل ۱). بر این اساس میزان روی پیوند یافته با مواد آلی در افق مالیک بیشترین مقدار و در افق سالیک کم‌ترین مقدار را نشان داد

می‌توان به تشکیل کمپلکس‌های روی با کربنات‌های خاک نسبت داد. همچنین pH که یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فراهمی روی است در افق کلسیک از مقدار بالاتری برخوردار است لذا سبب ترسیب روی شده و به این ترتیب فراهمی روی را کاهش می‌دهد. راتان و شارما^۴ (۲۷) بیان کردند کمبود روی به طور گسترده در خاک‌های با pH بالا، میزان کم ماده آلی، آهنی و شور و سدیمی بیشتر است. راموس و همکاران^۵ (۲۶) دلیل افزایش قابل توجه در شکل کربناتی روی را به pH مناسب برای رسوب آن مربوط دانستند. آنان بیان داشتند که کربنات کلسیم موجود در خاک می‌تواند به عنوان یک جاذب قوی برای روی عمل کند و با روی به صورت کمپلکس دو نمکی ($ZnCO_3 \cdot CaCO_3$) در خاک ترسیب یابد. زینتی و همکاران^۶ (۴۳) نشان دادند که شکل کربناتی روی با کربن آلی خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری دارد.

شکل پیوند یافته با اکسیدها

مقدار روی پیوند یافته با اکسیدها با افزایش غلظت روی به ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد (شکل ۱). براین اساس مقدار روی پیوند یافته با اکسیدها در افق مالیک و سالییک با افزایش غلظت، افزایش نشان داده است. اما در افق کلسیک افزایش غلظت؛ اختلاف معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد نشان نداده است (شکل ۱). علت بالا بودن غلظت روی اکسیدی در افق مالیک می‌تواند به دلیل این باشد که بخشی از روی با اکسیدهای آهن و منگنز پیوند برقرار کرده و به سبب جذب ترجیحی روی توسط اکسیدهای فلزی مانند اکسید آهن و منگنز، غلظت روی اکسیدی در این افق بیشتر شده است. از آنجا که روی میل زیادی به جذب بر سطوح اکسیدهای آهن و منگنز بخصوص در pH های بالاتر دارد ممکن است مقداری از روی افزوده شده به خاک و هم‌چنین

می‌شود تا روی از شکل‌های با قابلیت تحرک کم‌تر به شکل‌های با قابلیت تحرک بیشتر انتقال یابد. بنابراین، افق مالیک با دارا بودن ماده آلی بیشتر (جدول ۲) و فراوانی بیشتر کربن آلی محلول سهم بسزایی در افزایش شکل آلی روی نشان داد. سخون و همکاران^۱ (۳۱) نیز بیان کردند افزایش مواد آلی در خاک سبب افزایش شکل‌های آلی عناصر در خاک می‌گردد. علت کم‌تر بودن شکل آلی در افق کلسیک و سالییک را می‌توان با میزان کربنات کلسیم در افق کلسیک و مقدار کم ماده آلی و شوری در افق سالییک مرتبط دانست. دهقانی و همکاران^۲ (۸) کاهش میزان روی پیوند یافته با مواد آلی را در اثر افزایش شوری خاک اینگونه توجیه کرد که شوری سبب کاهش رشد و توسعه ریشه از طریق فشار اسمزی محلول خاک و کاهش جذب آب توسط ریشه شده و از سوی دیگر فعالیت موجودات زنده را کاهش می‌دهد و در نتیجه تولید و ترشح مواد آلی توسط ریشه و موجودات زنده کم شده و بدین ترتیب میزان کربن آلی محلول را نیز کاهش می‌دهد. کامالی و همکاران^۳ (۱۴) با مطالعه بر روی خاک‌های آهنی دریافتند در بین شکل‌های شیمیایی روی کم‌ترین بخش مربوط به شکل آلی است که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. آنان دلیل این امر را میزان کم ماده آلی خاک، مقدار بالای کربنات کلسیم و pH خاک و هم‌چنین احتمالاً تمایل کم روی برای جذب سطحی توسط سطوح رس‌ها در مقایسه با کربنات کلسیم دانستند.

شکل کربناتی

نتایج تجزیه واریانس نمونه‌ها نشان داد روی پیوند یافته با کربنات‌ها با افزایش غلظت روی به ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در همه نمونه‌ها نسبت به تیمار شاهد اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان می‌دهد (جدول ۳). روی پیوند یافته با کربنات‌ها در افق کلسیک بیشترین مقدار و در افق مالیک کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص داد (شکل ۱). به طور کلی افزایش روی پیوند یافته با کربنات‌ها در افق کلسیک را

4- Rattanand Sharma

5- Ramos *et al.*

6- Zinati *et al.*

1- Sekhon *et al.*

2- Dehghani *et al.*

3- Kamali *et al.*

حاوی روی بود و با افزودن ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم سولفات روی به خاک مقدار شاخص تحرک به طور معنی-داری افزایش یافت. این مقدار در افق مالیک از ۱۱/۳۰٪ به ۱۴/۰۴٪ و در افق سالیك از ۱۲/۹۹٪ به ۲۱/۱٪ و در افق کلسیک از ۲۱/۸۴٪ به ۲۹/۷۷٪ تغییر یافت (شکل ۳) که بیانگر افزایش مقدار فلز متحرک با افزایش غلظت روی می باشد. مطالعات مختلفی مقدار بالای فاکتور تحرک را در افق های سطحی گزارش کرده اند (۱۸). به طور کلی در افق های سطحی سهم جزء ساده شدنی (تبادلی و کربناته) بیشتر است و این نشان می دهد تحرک عنصر در افق های سطحی نسبتاً بالاست. در مطالعه حاضر فاکتور تحرک عنصر روی در افق های سطحی به ترتیب مالیک > سالیك > کلسیک می باشد (شکل ۲).

کم ترین مقدار شاخص تحرک در افق مالیک مشاهده گردید. عموماً در خاک های مالی سولز عامل مهم در توزیع و تجمع عناصر وجود ماده آلی زیاد در این خاک هاست. کم بودن مقدار شاخص تحرک در این افق می تواند نشان از تجمع بیشتر روی به فرم های حبس شده در ساختار کانی ها و فرم آلی باشد. بیشترین میزان فاکتور تحرک در افق کلسیک مشاهده گردید که می تواند متأثر از لیتولوژی سنگ بستر و میزان آهک موجود در این افق باشد و نشان می دهد محتوای روی قابل دسترس در این افق بیشتر است. در افق سالیك نیز با افزودن سولفات روی به طور قابل ملاحظه ای شاخص تحرک افزایش یافت که نشان می دهد سهم بخش های ساده-تر در این افق بیشتر است و روی بیشتر به فرم تبادلی است که با نتایج جزء بندی روی و یافته های حمزه نژاد و همکاران^۴ (۱۲) و لو و همکاران^۵ (۱۸) همخوانی دارد.

روی موجود در مواد آلی به این اکسیدها متصل شده و سبب افزایش شکل اکسیدی گردد.

پری زنگنه و همکاران^۱ (۲۳) علت بالابودن غلظت روی در شکل متصل به اکسیدهای آهن را جذب ترجیحی بر سطوح این اکسیدها دانستند. یانگ و همکاران^۲ (۴۲) معتقدند که بیشتر بودن روی پیوند شده با اکسید آهن و منگنز می تواند به این دلیل باشد که بخشی از روی افزوده شده به خاک با اکسیدهای آهن و منگنز پیوند برقرار کرده باشد همچنین با کاهش شکل باقی مانده روی در خاک و تغییر شکل آن به شکل اکسیدی می تواند یکی دیگر از دلایل افزایش روی پیوند شده با اکسید آهن و منگنز باشد.

شکل باقی مانده

نتایج حاکی از آن است که با افزایش غلظت روی به ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم تأثیر معنی داری بر شکل باقی مانده حاصل نشد. علت را می توان غلظت زیاد روی کل در خاک ها دانست به طوری که غلظت روی کل در افق مالیک ۱۳۰/۸۳ میلی گرم بر کیلوگرم و در افق های کلسیک و سالیك به ترتیب ۷۰/۶۳ و ۸۵/۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم است (جدول ۲). همان طور که از شکل (۱) برمی آید، مقدار روی باقی مانده در افق مالیک بیشترین مقدار و در افق کلسیک کم ترین مقدار را به خود اختصاص داده است. افزایش نیافتن شکل باقی مانده روی در اثر کاربرد کود سولفات روی نشان دهنده آن است که رویی که به خاک افزوده شده است به شکل های دیگر روی با قابلیت فراهمی بیشتر تبدیل شده است و تا حدی در توزیع شکل های شیمیایی روی در خاک مؤثر بوده است. این نتایج با یافته های کریمی و همکاران^۳ (۱۵) مطابقت دارد.

نتایج مربوط به محاسبه فاکتور تحرک روی در خاک

نتایج نشان داد میزان شاخص تحرک عنصر روی برای هر سه نوع خاک مورد مطالعه در خاک شاهد کم تر از خاک

4- Hamzehnezhad et al.

5- Lu et al.

1- Parizanganeh et al.

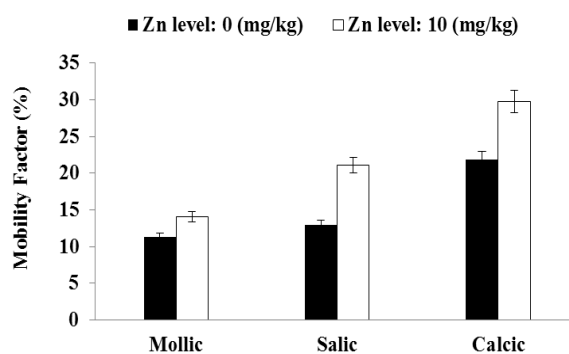
2- Yang et al.

3- Karimi et al.

آزاد در محلول خاک شده است. عبدلهی و همکاران^۱ (۱) نیز گزارش نمودند که کاربرد کود شیمیایی سولفات روی به میزان ۴۰ کیلوگرم در هکتار غلظت گونه روی آزاد را در محلول خاک از $10^{-7} \times 1/2$ مول در لیتر در تیمار شاهد به $10^{-7} \times 1/8$ مول در لیتر افزایش داده است.

برای تمامی افق‌های مورد مطالعه کاربرد کود روی سبب افزایش گونه Zn-DOM شده است. به طوری که در افق مالیک این مقدار از ۴۰/۳۲٪ به ۵۱/۸۳٪ و در افق کلسیک از ۳۹/۵۱٪ به ۴۳/۴۵٪ و در افق سالیك از ۲۵/۱۱٪ به ۳۶/۴۷٪ افزایش یافت (شکل ۳). توزیع بیشتر این گونه در افق مالیک را می‌توان به سبب وجود مقادیر بیشتر کربن آلی در این افق نسبت داد که سبب حلالیت بیشتر آن به واسطه تشکیل کمپلکس فلز - کربن آلی شود. از دیگر دلایل ممکن می‌توان به pH کم تر افق مالیک نسبت به دو افق دیگر اشاره نمود که باعث توزیع بیشتر این گونه شده است. ونگ و همکاران (۴۱) نیز گزارش نمودند که کربن آلی محلول در افزایش حلالیت فلزات نقش به‌سزایی دارد. هینسینگر^۲ (۱۳) دریافت که تشکیل کمپلکس‌های فلزات و اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه گیاهان بر گونه بندی عناصر در خاک موثر است.

با افزایش غلظت روی در نتیجه کاربرد کود سولفات روی، فراوانی این گونه در افق مالیک از ۱/۱۲٪ به ۱/۶۵٪، در افق کلسیک از ۳/۳۷٪ به ۴/۴۶٪ و در افق سالیك از ۳/۱۱٪ به ۴/۱۳٪ افزایش نشان داد (شکل ۳). بخش قابل توجهی از روی در محلول خاک در تعادل با شکل‌های جذب شده آن در فاز جامد است. بنابراین از آنجا که pH نقش مهمی در گونه‌بندی روی در خاک دارد، افق کلسیک به سبب داشتن pH بالاتر $Zn(OH)^+$ بیشتری نسبت به دو افق دیگر برخوردار است. سلطانی‌تهرانی^۳ (۳۵) گزارش نمود که در pH ۷/۷ تا ۹/۱ گونه $Zn(OH)^+$ گونه اصلی روی در محلول خاک است.



شکل (۲) مقایسه شاخص تحرک عنصر روی در افق‌های انتخابی

Figure(2) Comparison of the mobility index of zinc element in selected horizons

مقایسه گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک‌های مورد بررسی

شکل ۳ تأثیر کاربرد سولفات روی (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را در افق‌های مورد مطالعه بر فراوانی و توزیع گونه‌های غالب روی ($Zn(OH)^+$, Zn-DOM, Zn^{2+} , $Zn(OH)_2(aq)$) در محلول خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. این چهار گونه بیش از ۸۰/۱۵ درصد در افق مالیک، ۷۷/۱۷ درصد در افق کلسیک و ۷۲/۲۸ درصد در افق سالیك از کل روی محلول در خاک‌های مورد مطالعه را تشکیل داده‌اند (غلظت سایر گونه‌ها ناچیز بود). نتایج تجزیه واریانس توزیع گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک‌های مورد بررسی در جدول (۴) ارائه شده است. بر این اساس، در هر سه افق مورد مطالعه افزایش غلظت روی سبب افزایش معنی‌دار گونه Zn^{2+} گردیده است. به گونه‌ای که در افق مالیک از ۳۸/۲۹٪ به ۴۴/۶۴٪، در افق کلسیک از ۳۰/۴۵٪ به ۴۵/۰۵٪ و در افق سالیك از ۴۰/۸۲٪ به ۵۳/۸۷٪ افزایش یافته است. بر این اساس، فراوانی گونه Zn^{2+} برای افق سالیك بیشتر از دو افق دیگر است (شکل ۳). دلیل این موضوع را می‌توان به تمایل این خاک به قرارگیری بیشتر روی در فرم آزاد و محلول نسبت داد. به نظر می‌رسد pH کمتر خاک در افق سالیك و به دنبال آن افزایش آزادسازی روی از فاز جامد خاک سبب افزایش فراوانی گونه روی

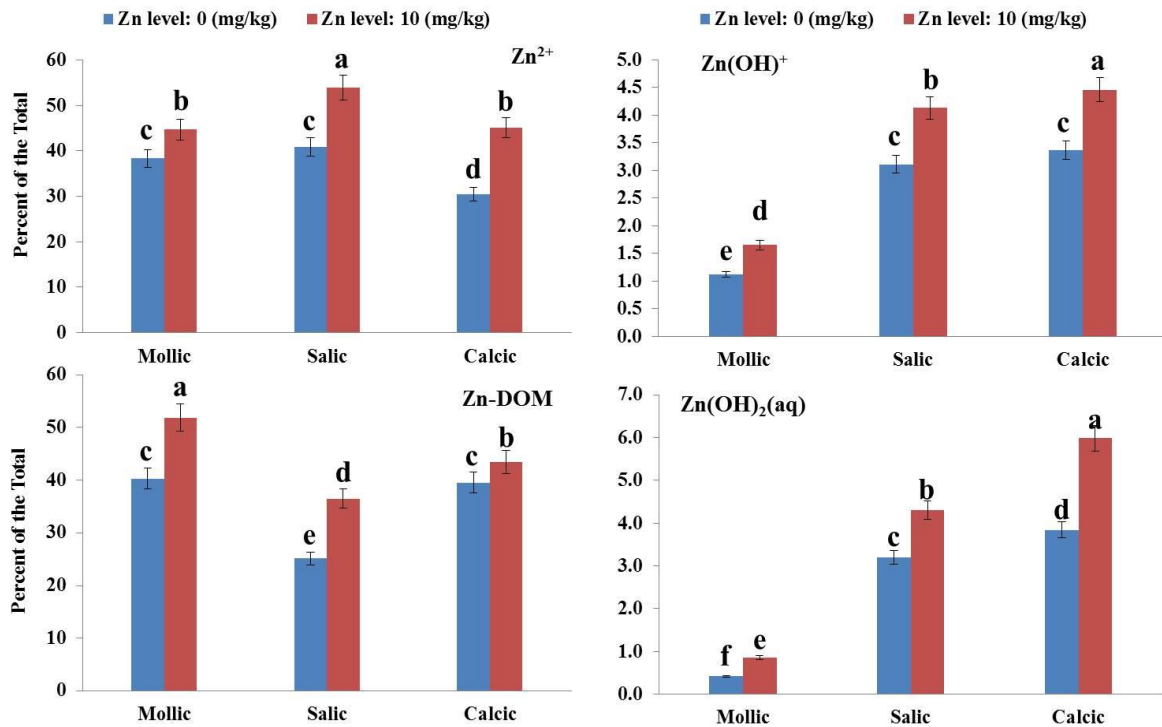
1- Abdollahi et al.

2- Hinsinger

3- Soltani Tehrani

افزایش یافت (شکل ۳). مقدار بیشتر این گونه را در افق کلسیک به pH قلیایی تر این افق نسبت به دو افق دیگر می-توان نسبت داد.

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که کاربرد کود روی بر توزیع گونه $Zn(OH)_2(aq)$ در میان افق‌های مورد بررسی در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود. به نحوی که، مقدار این گونه در افق مالیک از ۰/۴۲٪ به ۰/۸۵٪، در افق کلسیک از ۳/۸۴٪ به ۵/۹۸٪ و در افق سالیک از ۳/۲٪ به ۴/۳٪



شکل (۳) مقایسه فراوانی گونه‌های غالب روی در محلول خاک‌های مورد مطالعه. میانگین‌هایی که در یک حرف مشترک هستند از لحاظ آماری فاقد اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد آزمون توکی می‌باشند.

Figure (3) Comparison of the abundance of the predominant zinc species in the solution phase of the studied soils. Means that share the same letter do not statistically have a significant difference at the 5% level of Tukey's test.

جدول (۴) تجزیه واریانس تاثیر کاربرد کود سولفات روی بر غلظت گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک

Table (4) Analysis of the variance for the effect of zinc sulfate application on the concentration of dominant zinc species in the soil solution phase

(Mean of square) میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات
Zn(OH) ₂ (aq)	Zn(OH) ⁺	Zn-DOM	Zn ²⁺	(Degree of freedom)	(Source of Variation)
11.09**	19.00**	80.00**	290.00**	2	افق (Horizon)
46.00**	76.00**	46.00**	457.00**	1	غلظت روی (Zn Concentration)
3.00**	8.07**	17.08**	116.00**	2	افق × غلظت (Horizon×Concentration)
0.06	0.03	0.09	0.0001	12	خطا (Error)

** نشان دهنده معنی داری در سطح احتمال ۰/۰۱ می‌باشد.

** indicates significant at P<0.01

نتیجه‌گیری

مقایسه شکل‌های شیمیایی روی در فاز جامد افق‌های انتخابی نشان داد که شکل‌های آلی، کربناتی و اکسیدی در افق مالیک و شکل‌های کربناتی، اکسیدی و تبادل‌پذیر در افق‌های سالیک و کلسیک شکل‌های غالب روی در این افق‌ها می‌باشند. بررسی جزءبندی روی در خاک‌های مورد مطالعه نشان داد که با افزایش غلظت روی در افق مالیک پس از کاربرد کود شیمیایی سولفات روی از فراوانی شکل باقی‌مانده کاسته شده است و بر فراوانی شکل‌های تبادل‌پذیر و محلول افزوده شده است. این در حالی است که در افق‌های کلسیک و سالیک روی افزوده شده در نتیجه کاربرد کود شیمیایی سولفات روی اگرچه فراوانی شکل کربناتی را افزوده است، لیکن فراوانی شکل‌های تبادل‌پذیر محلول را نیز به طور معنی‌داری افزایش داده است. مقایسه گونه‌بندی روی نیز در افق‌های انتخابی نیز نشان داد که گونه‌های Zn^{2+} , $Zn(OH)_2(aq)$, $Zn-DOM$ و $Zn(OH)^+$ گونه‌های غالب روی در فاز محلول تمام افق‌های مورد بررسی هستند و

گونه Zn^{2+} با فراوانی ۴۰/۸۲٪ در افق سالیک و گونه $Zn-DOM$ به ترتیب با ۴۰/۳۲٪ و ۳۹/۵۱٪ در افق‌های مالیک و کلسیک بیشترین فراوانی را نسبت به سایر گونه‌ها دار می‌باشند. مقایسه فاکتور تحرک در خاک‌های مورد بررسی نشان داد که روی در افق مشخصه مالیک از تحرک کم‌تری نسبت به افق‌های کلسیک و سالیک برخوردار است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بررسی جزءبندی و گونه‌بندی روی در خاک‌ها می‌تواند به عنوان ابزاری موثر در مدیریت بهتر تغذیه عناصر غذایی کم‌مصرف مانند روی به کار برده شود.

سپاس‌گزاری

هزینه‌های انجام این پژوهش توسط معاونت محترم پژوهشی، فناوری و ارتباط با جامعه دانشگاه شهید چمران اهواز و از پژوهانه نویسنده دوم مقاله به شماره SCU.AS1401.365 پرداخت شده است.

References

1. Abdollahi, A., Norouzi Masir, M., Taghavi, M., Moezzi, A.A., 2020. Effects of functionalized iron oxide nanoparticles and zinc sulfate chemical fertilizer on zinc speciation in soil and uptake of zinc in wheat. *Journal of Water and Soil Science*, 24(2): 87-103.
2. Acosta, J.A., Jansen, B., Kalbi, K., Faz, A., and Martinez, S. 2001. Salinity increase mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere* 85(8): 1318-1324.
3. Anegebe, B., Okuo, J.M., Ewekay, E.O., and Ogbeifun, D.E. 2014. Fractionation of lead-acid battery soil amended with Biochar. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(2), 36-43.
4. Boostani, H.R., Chorom, M., Moezzi, A.A., Karimian, N.A., Enayatizamir, N., Zarei, M., Simulation of Zinc release affected by microbial inoculation and salinity levels in a non-sterile calcareous soil using kinetic models. *Journal of Water and Soil*, 30(3): 904-919.
5. Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., and McDaniel, P.A. 2003. Soil genesis and classification. 5th edition, Iowa State University Press. 494 p.
6. Casagrande, J.C., Alleon, L.R.F., Camargo, O .A., and Arnone, A .D. 2004. Effects of pH and ionic strength on zinc sorption by a variable charge soil. *Commun. Soil Sci Plant Anal.* 35: 2087-2095.
7. Chapman, H .D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black, C.A. (ed.), *Methods of soil analysis*. Part 2. Monograph No.9, American Society of Agronomy. Madison, WI, USA, pp. 811– 903.
8. Dehghani, A., Fotovat, A., Haghnia, G .H and Keshavarz P, 2007. Effect of salinity and cow manure on the concentrations and distribution of species in the soil solution. *Sci Tech Agric Natur Resource* 41(11): 53-61.

9. Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle Size Analysis, In: Klute A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 1*, Am. Soc. Agron. Inc., Madison, WI, USA, pp. 383-411.
10. Ghani, W.A.W.A.K., Mohd, A., da Silva, G., Bachmann, R.T., Taufiq-Yap, Y.H., Rashid, U., and Al-Muhtaseb.A.H., 2013. Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: Chemical and Physical Characterization. *Industrial Crops and Products*, 44: 18-24.
11. Hafeez, F.Y., Abaid-Ullah, M., Hassan, M.N. 2013. Plant growth- promoting rhizobacteria as zinc mobilizers: a promising approach for cereals bio fortification. *Bacteria in Agrobiolgy: Crop Productivity*, pp. 217-235.
12. Hamzehnezhad, R., Sepehr, E., Samadi, A., Rasouli Sadaghiani, M.H., Khodaverdiloo, H., 2018. Effect of nano zero-valent iron particles (nZVI) on mobility and chemical forms of cadmium and lead in soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(3): 549-559.
13. Hinsinger, P. 2001. Bioavailability of trace element as related to root-induced chemical changed in the rhizosphere in: Hooda, P.S., (Ed), *Trace Elements in Soils*. John Wiley & Sons publication, pp. 25- 41.
14. Kamali, S., Ronaghi, A. and Karimian, N., 2011. Soil Zinc Transformations as Affected by Applied Zinc and Organic Materials. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 42(9): 1038-1049.
15. Karimi, A., Moezzi, A.A., Chorom, M., Enayatizamir, N., 2019. Effects of sugarcane bagasse derived biochar on distribution of Zinc fractions in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 33(3): 445-461.
16. Kidd, P.J., Barcelo, M.P., Bernal, F., Navari-Izzo, C., Poschenrieder, S., Shilev, R., Clemente, and Monterroso, C. 2009. Trace element behaviour at the root–soil interface: Implications in phytoremediation. *Environmental Explorer of Botany*, 67: 243–259.
17. Loeppert, R.H., and Suarez, D.L. 1996. Carbonate and gypsum, In: Sparks D.L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 3*, Am. Soc. Agron. Inc., Madison, WI. USA. pp. 437-474.
18. Lu, Y, Zhu, F., Chen, J., Gan, H., and Guo, Y. 2007. Chemical fractionation of heavy metals in urban soils of Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 11: 362- 378.
19. Malakouti, M.J., Homaei, M., 2004. *Soils fertility in arid and semi-arid regions*. 2nd edition, Tarbiat Modarress University Press, 754 p.
20. Marschner, P., 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 3rd edn. Academic Press, London.
21. National Research Council, 1993. *Soil and water quality. An agenda For agriculture*. National Academy Press, Washington, DC, USA.
22. Obrador, A., J. Novillo, and M. Alvarez. 2003. Mobility and availability to plants of two zinc sources applied to calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:564-572.
23. Parizanganeh, A., Lakhan, V. C and Jalalian, H., 2007. A geochemical and statistical approach for assessing heavy metal pollution in sediments from southern Caspian coast. *International J Env Sci Technol* 4: 351-358.
24. Parker, D.R., NoNell, W.A., and Chaney, R.L. 1995. GEOCHEM-PC- A chemical Speciation Program for IBM and Compatible Personal Computers. *Chemical Equilibrium and Reaction Models*, 42: 253-269.

25. Plum, L. M, Rink, L., Haase, H. 2010. The essential Toxin: impact of zinc on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7: 1342-1365.
26. Ramos, L, Hernandez, L .M and Gonzaaalez, M. J., 1994. Sequential fraction of Cu, Pb, Cd and Zn in soils from or near Donana National Park. *Journal of Environmental Quality*, 23: 50-57.
27. Rattan, R.K. and Sharma, P.D., 2004. Main micronutrients available and their method of use. *Proceedings IFA International Symposium on Micronutrients*. 23-25 February, New Delhi, India, pp. 1-10.
28. Ravikovitch, S., Margolin, M., and Navrot, J., 1968. Zinc availability in calcareous soils: I. comparison of chemical extraction methods for estimation of plant availability zinc. *Soil Sci* 105: 57-61.
29. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. P. 417-436. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part III*, 3rd Ed., Am. Soc. Agron., Madison, WI.
30. Rupa, T .R., Tomar, K .P., Damidar Reddy, D., and Subba Rao, A. 2000. Time-dependent zinc desorption in soils. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 31: 2547-2563.
31. Sekhon, K. S., J. P., Singh, and D. S. Mehla. 2006. Long-term effect of organic, inorganic input on the distribution of zinc and copper in soil fractions under a rice-wheat cropping system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52: 551-556.
32. Shahbazi, K. and Besharati, H. 2013. Review of Iran Agricultural Soils Fertility Status. *Scientific-Promotion Journal of Land Management*, 1: 1-15 (In Persian).
33. Sharifi, M., M., Afyuni, and A. H. Khoshgoftarmanesh. 2011. Effects of Sewage Sludge, Compost and Cow Manure on Availability of Soil Fe and Zn and their Uptake by Corn, Alfalfa and Tagetes Flower. *Journal of Water and Soil Science*. 15(56): 141-154.
34. Shuman, L.M. and Hargrove, W.L. 1985. Effect of tillage on the distribution of manganese, copper, iron and zinc in soil fractions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49: 1117 – 1121.
35. Soltani Tehrani, S., 2013. The effect of pre-planting and plant residue management on zinc element speciation in soil solution and amino acids concentration in the rhizosphere of two wheat cultivars. M.Sc. Thesis, Isfahan University of Technology
36. Tagwira, F., Riho M and Mugwira L, 1992. Effect of PH and phosphorous and organic matter on zinc availability and distribution in two Zimbabwean soils. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 23: 1485-1491.
37. Tessier, A., Campbell P. G. C., and Bisson, M., 1979. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51: 844-51.
38. Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D., and Halvin, J.L. 1990. *Soil Fertility and Fertilizers*. 5th Ed., McMillan Publication Co., New York.
39. Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L., et al., (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 3-American Society of Agronomy*, Madison. WI, USA, pp. 475- 490.
40. Walkley, A., and Black, I .A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 34: 29-38.
41. Weng, L.P., Temminghoff, E.J.M., Lofts, S., Tipping, E., and Van Riemsdijk, W.H. 2002. Complexation with dissolved organic matter and solubility control of heavy metals in a sandy soil. *Environment Science Technology*, 36: 4804-4810.

42. Yang, X., Lu, k., McGrouther, K., Che, L., Lu, G., Wang, Q., Liu, X., Shen, L., Huang, H., Ye, Z., and Wang, H. 2017. Bioavailability of cd and Zn in soils treated with biochars derived from tobacco stalk and dead pigs. *Journal of Soils and Sediments* 17(3):751-762.
43. Zinati, G.M., Li, Y. and Bryan, H .H, 2001. Accumulation and fractionation of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soils amended with compost. *J Environ Sci Health* 36: 229-243.