

تأثیر اقلیم و تکامل خاک بر مقدار و توزیع شکل‌های شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف آهن، مس، روی و منگنز در سری‌های غالب خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد

سیروس شاکری^{۱*}، ابوالفضل آزادی^۲ و محبوب صفاری^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۱۳)

چکیده

تعیین و شناخت توزیع نسبی هر یک از شکل‌های شیمیایی عناصر و ارتباط آنها با خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و کانی‌های رسی خاک می‌تواند پژوهشگران را برای دستیابی به مدیریت پایدار کشاورزی کمک کند. تحقیق حاضر به‌منظور بررسی و شناخت شکل‌های شیمیایی عناصر کم‌مصرف روی، مس، آهن و منگنز در تعدادی از خاک‌های سطحی و زیرسطحی استان کهگیلویه و بویراحمد و ارتباط آنها با خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی انجام گرفت. نتایج مطالعه حاضر نشان داد درحالی که مقدار شکل‌های شیمیایی تبادل و جذب سطحی شده عناصر مورد مطالعه بسیار کم و قابل چشم‌پوشی بود، شکل‌های باقی‌مانده، کربناتی و آلی به‌ترتیب بیشترین به کمترین مقادیر از شکل‌های شیمیایی این عناصر را به‌خود اختصاص داده‌اند. بررسی همبستگی شکل‌های شیمیایی این عناصر با خصوصیات خاک نشان از وجود همبستگی مؤثر کربن آلی با شکل‌های شیمیایی روی و همبستگی مؤثر رس، سیلت، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم با شکل‌های شیمیایی مس منگنز و آهن داشت. همبستگی مقادیر کمی کانی‌های رسی با شکل‌های شیمیایی این عناصر نشان داد. مقادیر شکل‌های مختلف عناصر مورد مطالعه با کانی‌های سیلیکاتی ۲:۱ (به‌ویژه ورمی‌کولیت) ارتباط مستقیم دارند. بررسی مقادیر کمی شکل‌های شیمیایی آهن و منگنز در خاک‌های دارای تکامل پروفیلی (آلفی سول و مالی سول) با آب و هوای مرطوب‌تر و رژیم رطوبتی زیر یک مقادیر بالاتری را نسبت به خاک‌های با تکامل پروفیلی کمتر (انتی سول و اینسپتی سول) و آب و هوای خشک‌تر و رژیم رطوبتی یوستیک نشان دادند. به‌طور کلی نتایج نشان داد، تغییرات عوامل خاکساز از جمله اقلیم، به‌صورت محسوسی علاوه بر مقادیر کل عناصر، بر شکل‌های شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف به‌ویژه منگنز و آهن مؤثر بوده و می‌تواند در مدیریت راسته‌های خاکی با تکامل ضعیف تا زیاد مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: شکل‌های شیمیایی، عناصر غذایی کم‌مصرف، کانی‌های رسی

۱. گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

۳. گروه پژوهشی محیط زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: shakeri@pnu.ac.ir

مقدمه

شرایط ژئوپدولوژیک حاکم بر محیط خاک، عامل اصلی مؤثر بر توزیع و مقدار عناصر در خاک‌های بکر هستند. ویژگی‌های مختلف خاک اعم از pH، مقدار رس، میزان تخلخل، کربنات‌ها و ... تحت تأثیر عوامل خاکساز قرار می‌گیرند. توپوگرافی با تغییر الگوی بارش و دما، اقلیم‌های محلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همبستگی بین کانی‌شناسی خاک و شرایط اقلیمی توسط پژوهشگران بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۵ و ۲۱). بررسی‌های مختلف نشان داده‌اند که به‌طور کلی الگوی هوادیدگی کانی‌های رسی از یک منطقه گرم و مرطوب به یک منطقه سرد و خشک از کائولینیت، اسمکتیت، ورمی‌کولیت، کلریت و فیلوسیلیکات‌های مختلط به کانی‌های ایلیت و میکا می‌رسد (۴۱). آزادی و باقرنژاد (۴) با مطالعه خصوصیات خاک و کانی‌شناسی سه منطقه استان فارس به این نتیجه رسیدند که شاخص اقلیمی با توجه به نقشی که در تعیین رژیم‌های رطوبتی خاک دارد، مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در تحول و تکامل خاک و کانی‌شناسی در مناطق مطالعاتی است، به‌نحوی که در منطقه با رژیم خشک و بارندگی کمتر، پوشش گیاهی کم و نیز با فرسایش‌پذیر بودن مواد مادری، عوامل خاکساز تأثیر چندانی در تحول و تکامل خاک‌ها نداشته است که این مسئله بر نوع و ترکیب کانی‌های رسی نیز اثر مستقیم گذاشته و به تبع آن ترکیب کمی و کیفی کانی‌های رسی خاک‌ها از مواد مادری نشأت گرفته است. شاکری و همکاران (۳۶) در بررسی خصوصیات مختلف خاک و کانی‌های رسی در استان کهگیلویه و بویراحمد گزارش دادند که کانی‌های رسی خاک شامل ایلیت، کلریت و کائولینیت منشأ مواد مادری داشته و در همه نقاط کشور مشاهده می‌شود. یافته‌های این پژوهشگران نشان می‌دهد، مقدار اسمکتایت و پالیگورسکیت با توجه به آب و هوا و میزان بارندگی رابطه معکوسی با یکدیگر دارند، به‌نحوی که در مناطق خشک‌تر و در خاک‌های دارای افق‌های گچی، پالیگورسکیت غالب بوده، اما در نقاط مرطوب‌تر و نقاط پست دشت‌ها با زهکشی

نامناسب اسمکتایت بیشتری مشاهده می‌شود.

عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، منگنز، روی و مس) به‌عنوان عناصر ضروری برای رشد گیاه هستند که با وجود غلظت زیاد این عناصر در خاک (مقدار کل هر عنصر)، کمبود آنها در بیشتر خاک‌های آهکی مشاهده می‌شود. وجود مقادیر زیاد از یون بی کربنات در محلول خاک، عدم تهویه مناسب خاک، پهاش بالا، مقادیر زیاد رس، درصد بالای آهک و مصرف بیش از حد کودهای فسفوری به‌عنوان عوامل اصلی در کاهش قابلیت دسترسی این عناصر در خاک‌های آهکی شناخته می‌شوند (۱۲). میزان قابلیت دسترسی عناصر کم‌مصرف در خاک، نه تنها به غلظت کل این عناصر در خاک، بلکه به خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی خاک که متأثر از عوامل خاکساز و نوع خاک مبتنی بر نوع رژیم‌های رطوبتی، حرارتی و به‌طور کلی راسته‌های خاکی است بستگی دارد (۵). تکامل خاک، شرایط فیزیوگرافیک و رژیم‌های حرارتی و رطوبتی خاک تأثیر معنی‌داری بر توزیع و قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم مصرف دارند. نجفی قیری و همکاران (۲۷) در مطالعه فاکتورهای مؤثر بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک‌های آهکی نشان دادند که کمترین مقدار از این عناصر در خاک‌های اریدی‌سول و خاک‌های دارای رژیم رطوبتی اریدیک و یوستیک و رژیم حرارتی هیپرترمیک و بیشترین مقدار این عناصر در خاک‌های هیستوسول، اراضی پست و خاک‌های با رژیم رطوبتی اکوئیک و رژیم حرارتی مزیک هستند. شارما و همکاران (۴۰) مقادیر بیشتر آهن در آلفی‌سول‌ها و اینسپتی‌سول‌ها نسبت به اریدی‌سول‌ها و انتی‌سول‌ها را به مواد مادری و بافت ریزتر آلفی‌سول‌ها و اینسپتی‌سول‌ها نسبت دادند. این پژوهشگران نشان دادند، با تغییر رژیم رطوبتی خاک از مرطوب به سمت خشک، pH و مقدار کربنات کلسیم زیاد می‌شود، اما مقادیر رس و ماده آلی کاهش یافته و به تبع آن قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم‌مصرف نیز کاهش می‌یابد. صرف‌نظر از رژیم رطوبتی خاک، مواد مادری نیز بر مقدار کل عناصر غذایی کم‌مصرف تأثیر دارد (۱۸). نائل و همکاران (۲۶) بیان داشتند که

است که بیشتر این فرایند را کنترل می‌کند. مس و روی در غلظت‌های کم به‌وسیله اکسیدهای آهن و آلومینیم با تشکیل کمپلکس درون کره‌ای (جذب شیمیایی) جذب می‌شوند، اما در غلظت‌های زیاد رسوب هیدروکسیدهای این فلزات تشکیل می‌شود. جذب مس و روی با تشکیل کمپلکس برون کره‌ای (قابل تبادل) روی سطوح با بار منفی کانی‌های سلیکاتی لایه‌ای ۲:۱ و شاید به تشکیل کمپلکس درون کره‌ای (جذب شیمیایی) روی سطوح کائولینیت اتفاق می‌افتد. در خاک‌های قلیایی، جذب روی روی کلسیت و هم‌رسوبی مس در کلسیت اتفاق می‌افتد (۹).

معمولاً در مطالعات تفصیلی شناسایی خاک، خاک‌های روی واحدهای زمین‌نما به سری‌های کم و بیش طبیعی تقسیم می‌شوند. بر اساس تعریف مجمع علوم خاک آمریکا، سری خاک پایین‌ترین سطح از سامانه جامع رده‌بندی خاک است که ابزار مهمی در انتقال اطلاعات کسب شده از خصوصیات و رفتار یک خاک برای خاک‌های مشابه در مناطق دیگر است. با توجه به اینکه در استان کهگیلویه و بویراحمد تحقیق جامعی در مورد عناصر غذایی کم‌مصرف در سطوح پایین رده‌بندی انجام نشده است، لذا در این تحقیق تلاش شد، به بررسی تأثیر اقلیم و تکامل خاک بر توزیع عناصر غذایی کم‌مصرف آهن، مس، روی و منگنز در سری‌های غالب خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد پرداخته شود.

مواد و روش‌ها

تشریح موقعیت منطقه

استان کهگیلویه و بویراحمد با ۱۶۲۶۴ کیلومتر مربع وسعت، در جنوب غربی ایران، در محدوده ۳۰ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی واقع شده و سرزمینی کوهستانی و به نسبت مرتفع است که کوه‌های زاگرس با رشته‌های موازی، سراسر شمال و شرق آن را دربر گرفته‌اند. بلندترین نقطه استان، قله دنا با ارتفاع ۴۴۰۹ متر و پست‌ترین ناحیه آن لیشتر با ارتفاع

مواد مادری و همچنین فرایندهای خاکسازای روی میزان و تحرک عناصر غذایی کم‌مصرف تأثیر زیادی دارند که مقادیر و توزیع برخی از عناصر مانند آهن و منگنز اغلب توسط مواد مادری کنترل می‌شود، که احتمالاً به دلیل تکامل کمتر خاک‌های مطالعه شده بوده است. بر اساس تحقیقات انجام شده، غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک‌های غیررسوبی (درجا) بستگی به نوع سنگ بستر که مواد مادری خاک از آن مشتق شده و همچنین فرایندهای پدوژنتیکی که روی آن عمل می‌کنند دارد (۲۵). از طرفی، تأثیر مواد مادری بر مقدار عناصر غذایی کم‌مصرف با تکامل خاک کاهش می‌یابد (۵۵). خاک‌های که از نظر شیمیایی و بافت مشابه هستند ممکن است به دلیل حضور و یا عدم حضور مقدار کمی از کانی‌های رسی خاص با هم متفاوت باشند. برای مثال اسمکتیت‌ها تبادل کننده‌های کاتیونی بسیار قوی هستند که حضور آنها می‌تواند بر تحرک عناصر با پتانسیل سمیت زیاد تأثیر مهمی داشته باشد (۵۰). الگبالی (۸) گزارش کرد که در جذب Zn^{2+} و $Zn(OH)^+$ در مونت موریلونیت، برخی از قسمت‌های Zn غیرقابل تبادل شده و در لایه‌های هشت ضلعی رس قرار می‌گیرند. مقدار Zn^{2+} جذب شده روی مونت‌موریلونیت، ورمی‌کولیت، مسکویت و بیوتیت به pH خاک، زمان واکنش، مقدار Zn اضافه شده و جذب شده توسط رس‌های سلیکاتی با تبادل کاتیونی و برگشت‌ناپذیری به دلیل نفوذ شبکه‌ای بستگی دارد. گزارش شده است که زیست فراهمی عناصر غذایی کم‌مصرف مثل روی و مس با افزایش مقدار کانی‌های رسی در خاک‌ها کاهش پیدا می‌کند (۴۳). همچنین مطالعات زیادی تأیید کرده‌اند که در بین کانی‌های رسی، اسمکتیت‌ها بیشترین تمایل را برای جذب مس و روی دارا هستند (۱۳ و ۴۲). نمت و همکاران (۲۹) گزارش کردند که با افزایش غلظت روی بر کانی مونت‌موریلونیت، فضای بین لایه‌ای افزایش پیدا می‌کند. در ایلیت نیز احتمالاً پتاسیم خارج و بین لایه‌ها قرار گرفته و باعث افزایش فاصله بین لایه‌ها می‌شود. با افزایش pH، آزادسازی (واجذبی) مس و روی به‌وسیله اسمکتیت‌ها کاهش پیدا می‌کند. دلیل آن جذب اختصاصی

طبق روش جونز و همکاران (۱۶) و به کمک نرم افزار Xpert Highscore انجام شد. در این نرم افزار با استفاده از مساحت زیر پیک های مربوط به کانی ها در تیمار گلیسرول، مقدار کانی ها با حداکثر دقت تعیین شدند.

تعیین شکل های شیمیایی عناصر کم مصرف

شکل های مختلف شیمیایی عناصر غذایی کم مصرف روی، مس، آهن و منگنز در خاک به روش عصاره گیری متوالی اسپوزیتو و همکاران (۴۴) استخراج شد. در این روش شکل های تبادل، جذب، آلی، کربناته و باقی مانده به ترتیب با استفاده از نیترات پتاسیم ۵/۵ مولار، آب مقطر دوبار تقطیر شده، هیدروکسید سدیم ۵/۵ مولار، اتیلن دی آمین تترا استیک اسید (EDTA) ۵/۰۵ مولار و اسید نیتریک ۴ مولار استخراج شد (جدول ۱). غلظت عناصر استخراج شده در هر مرحله با استفاده از دستگاه طیف سنجی جذب اتمی (Shimadzu AA-670) اندازه گیری شد. حد تشخیص دستگاه برای اندازه گیری عناصر مورد مطالعه در این پژوهش ۰/۰۱ میلی گرم بر لیتر بود. فاکتور تحرک از درصد مجموع دو شکل تبادل و کربناتی بر مجموع شکل های شیمیایی محاسبه شد. پس از تعیین شکل های شیمیایی عناصر مذکور در خاک های مورد مطالعه، با استفاده از روش های آماری و نرم افزار SPSS ضرایب همبستگی شکل های شیمیایی با برخی ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و کانی های رسی خاک ها محاسبه شد. به منظور رسم نمودارهای مربوطه، از نرم افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

خصوصیات خاک های مطالعه شده

خاک های جمع آوری شده از نقاط مختلف استان کهگیلویه و بویراحمد، به منظور بررسی وضعیت شکل های شیمیایی عناصر کم مصرف و روابط آنها با خصوصیات مختلف خاک، در پنج راسته انتی سولز، اینسپتی سولز، مالی سولز، آلفی سولز و

۵۰۰ متر از سطح دریا است. با توجه به شرایط جغرافیایی استان، در امتداد اصلی کوه های زاگرس از شمال شرقی به جنوب غربی، ارتفاع کوه ها و مقدار بارندگی و رطوبت هوا به طور محسوسی کاهش می یابد. این وضعیت طبیعی، مشخصات اقلیمی دوگانه ای را پدید آورده و استان را به دو ناحیه سردسیری و گرمسیری تقسیم کرده است.

تجزیه های فیزیکی، شیمیایی و کانی شناسی

برای انجام این تحقیق، ابتدا بر اساس اطلاعات به دست آمده از عکس های هوایی و نقشه های توپوگرافی، اقدام به تفکیک واحدهای فیزیوگرافی کرده و تعدادی خاکرخ در این واحدها انتخاب و بر اساس راهنمای تشریح خاکرخ، توصیف و نمونه برداری شد. این نمونه ها به طور پراکنده از کل استان جمع آوری شدند. طبق اهداف این تحقیق، از هر خاکرخ، دو نمونه سطحی و زیرسطحی (افق های اول و دوم خاکرخ ها)، جمع آوری و نمونه ها برای انجام آزمایش های فیزیکی - شیمیایی، کانی شناسی و تعیین شکل های شیمیایی روی، مس، منگنز و آهن به آزمایشگاه منتقل شدند. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل pH در خمیر اشباع، قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره اشباع و با استفاده از هدایت سنج الکتریکی، بافت خاک به روش هیدرومتر (۶)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۲۳)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جانشین کاتیون ها با استات سدیم (۴۶)، کربن آلی به روش سوزاندن تر با بی کرومات پتاسیم در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ و تیتراسیون بی کرومات پتاسیم باقی مانده با فروآمونوم سولفات (۲۸) و گچ به روش استون (۳۲) اندازه گیری شد. برای آماده سازی نمونه ها برای شناسایی کانی های رسی، از بین بردن عوامل شیمیایی سیمانی کننده و جدا شدن ذرات رس از یکدیگر مبنای عمل قرار گرفت. نمونه های خالص شده با منیزیم و پتاسیم، اشباع و به ترتیب با گلیسرول و دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس تیمار شده و به طور جداگانه با پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفتند. فراوانی نسبی کانی های رسی

جدول ۱. مراحل مختلف عصاره‌گیری متوالی شکل‌های مختلف شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف

مرحله عصاره‌گیری	شکل شیمیایی استخراج شده	نسبت خاک به عصاره‌گیر	زمان رسیدن به تعادل	غلظت عصاره‌گیر (مولار)
۱	تبادلی	۲:۲۵	۱۶ ساعت	0.5M KNO ₃
۲	جذب سطحی شده*	۲:۲۵	۲ ساعت	H ₂ O
۳	آلی	۲:۲۵	۱۶ ساعت	0.5M NaOH
۴	کربناتی	۲:۲۵	۶ ساعت	0.5M Na ₂ EDTA
۵	باقی‌مانده	۲:۲۵	۱۶ ساعت	4M HNO ₃

*سه مرتبه عصاره‌گیری شد.

کمترین آن ۵/۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد که میانگین این خصوصیت از خاک در منطقه، ۱۹/۷۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم محاسبه شد. طبق نتایج، در مناطق شرقی و شمالی استان که بارندگی بیشتری وجود دارد، میزان رس بیشتری مشاهده شد. میانگین رس در خاک‌های مطالعه شده استان ۳۵/۵ درصد به دست آمد که این خصوصیت از خاک در خاک‌های مورد مطالعه در محدوده ۱۳/۴ و ۵۳/۴ درصد قرار داشت. نتایج مطالعات گذشته از کانی‌شناسی خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان داده است که اسمکتیت، ایلیت، کلریت، ورمی‌کولیت، پالیگورسکیت و کائولینیت کانی‌های عمده خاک‌های مطالعه شده هستند (۳۶). کانی‌های غالب رسی در مناطق با بارندگی کم پالیگورسکیت، اسمکتیت، ایلیت و کلریت و در مناطق با بارندگی زیاد، اسمکتیت، ایلیت و ورمی‌کولیت بودند. ایلیت و کلریت در همه افق‌های سطحی و زیرسطحی خاک‌های مطالعه شده مشاهده شد، اما در خاک‌های جوان واقع در اراضی شیب‌دار مانند رسوبات واریزه‌ای، خاک‌های آبرفتی و مناطق با بارندگی کمتر، به‌عنوان کانی غالب نمایان شد. مطابق نتایج جدول ۲، کلریت روند و تغییر مشخصی نسبت به عمق و اقلیم نشان نداد. طبق مطالعات انجام شده، ایلیت و کلریت مشاهده شده در منطقه، منشأ مواد مادری دارند (۳۷). به‌دلیل وجود زهکشی مناسب در همه خاک‌ها، علاوه بر حضور اسمکتیت در مواد مادری، تبدیل سایر کانی‌ها مانند ایلیت و پالیگورسکیت به اسمکتیت می‌تواند از مهم‌ترین دلایل حضور این کانی در

ورتی‌سولز طبقه‌بندی شدند (جدول ۲)، که تنوع به‌دست آمده از راسته‌های خاک مورد مطالعه در این تحقیق، می‌تواند در تفسیر بهتر وضعیت شکل‌های شیمیایی عناصر کم‌مصرف و روابط آنها با خصوصیات مختلف خاک، کمک کند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مطالعه شده نشان می‌دهد که pH خاک‌ها با میانگین ۷/۸۴ در محدوده خنثی و بازی ضعیف (۷/۴ تا ۸/۲) قرار دارند. مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی در نمونه خاک‌های مورد تحقیق، در محدوده ۰/۱ تا ۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر (میانگین ۰/۶۵ دسی‌زیمنس بر متر) به‌دست آمده، که نشان از عدم شوری خاک‌های منطقه دارد. مقادیر زیاد از میانگین کربنات کلسیم معادل (۴۷/۶۲ درصد) در خاک‌های مورد مطالعه، نشان از آهکی بودن آنها دارد که حداقل مقدار آن در افق Bt یک خاک آلفی‌سول (خاک‌خ ۱۴) در یک پلاتو (۸ درصد) و بیشترین آن در افق‌های C انتی‌سول‌های واقع در رسوبات بادبزی شکل که دارای بافت سبک بوده و در سرتاسر منطقه به‌طور پراکنده وجود دارد مشاهده شد. در منطقه مطالعه شده میانگین کربن آلی همه خاک‌های سطحی و زیرسطحی ۱/۰۷ درصد به‌دست آمد، که بیشترین و کمترین مقدار آن به‌ترتیب در افق‌های سطحی خاک‌خ ۸ (مالی‌سولز) به مقدار ۵/۳ درصد و زیرسطحی خاک‌خ ۱۵ (آلفی‌سولز) به مقدار ۰/۱۴ درصد مشاهده شد. در منطقه مورد مطالعه، بیشترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی ۳۹ و

جدول ۲. تعدادی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های مطالعه شده و تجزیه نیمه کمی کانی‌های رسی در منطقه مورد مطالعه

ردیف بندی خاک	فیزیوگرافی	Pal*	Kao*	Ver*	chl*	Ill*	Sme*	CEC (cmol kg-1)	کربن آلی (%)	CCE (%)	بی-اچ	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	افق	شماره خاک	شماره خاکسرخ
Typic Haplustolls	دشت دامنه ای	++	++	+	++	+++	+++	۶/۱۵	۱۶/۱	۱/۴۴	۹/۷	۷/۳۶	۳۶	۳/۲۷	Ap	۱	۱
Calcic Argiustolls	دشت دامنه‌ای	++	+	+	++	+++	+++	۷/۲۱	۰۸/۱	۴/۴۵	۸/۷	۴/۳۷	۲/۴۳	۳/۱۹	Ap	۳	۲
Aridic Calcustepts	دشت دامنه ای	++	+	+	+	+++	+++	۱۱/۱	۹۶/۰	۲/۵۵	۷/۹	۲۷/۴	۴۴/۶	۲۸	Ap	۵	۳
Typic Ustifluvents	رسوبات واریزه‌ای	+	++	+	++	++	++	۱۴	۳۴/۱	۲/۶۵	۹/۷	۴/۲۱	۳/۲۷	۳/۵۱	Ap	۷	۴
Gypsic Haplustepts	رسوبات واریزه‌ای	+++	-	-	++	+++	++	۱/۹	۵۲/۰	۳/۵۳	۸	۷/۱۶	۳۲	۳/۵۱	Ap	۹	۵
Typic Xerofluvents	دشت آبرفتی	++	++	-	++	++	+	۵/۵	۴۱/۰	۷/۹۰	۲/۸	۴/۱۳	۳/۹	۳/۸۷	C1	۱۲	۶
Calcic Haploxeralfs	پلاتو	++	+	+	++	++	+++	۷/۱۷	۵/۱	۸/۴۱	۶/۷	۴/۳۷	۳/۴۵	۳/۱۷	Ap	۱۳	۷
Typic Haploxerolls	پلاتو	++	+	-	++	+	+++	۱۵	۷/۰	۴/۴۹	۷/۷	۷/۵۲	۳۲	۳/۱۵	Btk1	۱۴	۷
Chromic Calcixererts	دشت آبرفتی	-	++	++	+	++	+++	۳۹	۲۵/۵	۳/۳۷	۴/۷	۳/۳۷	۳/۳۵	۳/۳۷	A	۱۵	۸
Aquic Haploxerepts	دشت آبرفتی	-	++	+	-	-	++++	۲۲	۴۳/۱	۶/۵۴	۹/۷	۳/۳۷	۳۲	۳/۳۷	Bw	۱۶	۸
Calcic Haploxeralfs	دشت آبرفتی	-	++	++	+	+	++++	۱/۳۰	۱۴/۱	۷/۹	۸/۷	۴/۴۵	۳/۳۹	۳/۱۵	Ap	۱۷	۹
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	++	-	++	++	++	+++	۱/۳۰	۴/۰	۶/۱۷	۸/۷	۴/۴۹	۶/۳۳	۹/۱۶	Bkss1	۱۸	۹
Mollic Haploxeralfs	پلاتو	+	++	+	+	+	++++	۷/۲۶	۲۶/۱	۲/۲۰	۸/۷	۷/۴۲	۴۲	۳/۱۵	Ap	۱۹	۱۰
Calcic Haploxeralfs	دشت آبرفتی	-	++	++	+	+	++++	۸/۳۱	۴۷/۰	۳/۱۷	۸/۷	۴/۴۹	۳/۳۳	۳/۱۷	Bg1	۲۰	۱۰
Typic Haploxerolls	دشت آبرفتی	-	++	++	+	+	++++	۴/۲۴	۶۴/۱	۵۲	۷/۷	۷/۳۸	۴۴	۳/۱۷	Ap	۲۱	۱۱
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	++	-	++	++	++	+++	۳/۲۱	۷۶/۰	۲/۵۵	۸	۴/۵۵	۳/۳۵	۳/۹	Btk1	۲۲	۱۱
Calcic Haploxeralfs	پلاتو	++	+	++	-	++	+++	۹/۲۵	۱۱/۳	۱/۴۸	۷/۷	۷/۳۴	۳۰	۳/۳۵	Ap	۲۳	۱۲
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	++	-	++	++	++	+++	۱/۲۵	۷۹/۰	۴/۴۵	۹/۷	۴/۳۱	۳/۱۳	۳/۴۵	C1	۲۴	۱۲
Mollic Haploxeralfs	پلاتو	-	++	++	-	+++	++++	۹/۹	۶۵/۰	۹/۶۵	۸	۴/۲۳	۶/۱۹	۹/۵۶	Ap	۲۵	۱۳
Calcic Haploxeralfs	پلاتو	++	+	++	-	++	+++	۴/۹	۵۱/۰	۸/۶۷	۸	۷/۲۲	۳/۱۹	۵۸	C	۲۶	۱۳
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	+	++	-	+++	+	+++	۱/۳۰	۸۸/۰	۲/۲۰	۸	۷/۴۶	۳۸	۳/۱۵	Ap	۲۷	۱۴
Calcic Haploxeralfs	پلاتو	++	+	++	-	++	+++	۳/۳۵	۱۶/۱	۱/۸	۸/۷	۴/۵۷	۳/۳۱	۳/۱۱	Bt1	۲۸	۱۴
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	+	++	-	+++	+	+++	۱/۲۵	۱۶/۱	۸/۴۷	۸/۷	۴/۲۵	۳/۳۹	۳/۳۵	Ap	۲۹	۱۵
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	++	++	+	+++	++	+++	۴/۲۴	۱۴/۰	۲/۴۱	۸	۷/۵۰	۲۶	۳/۲۳	Btk	۳۰	۱۵
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	+	++	-	+++	+	+++	۳/۲۱	۳۷/۱	۶/۲۲	۹/۷	۷/۳۴	۲۶	۳/۳۹	A	۳۱	۱۶
Typic Xerorthents	رسوبات واریزه‌ای	++	++	+	+++	++	+++	۵/۵	۲/۰	۸/۸۲	۶/۷	۴/۱۳	۶/۸	۷۸	C1	۳۲	۱۶

%۵۰%, +, ++, +++: >۳۰-۵۰%, ++, +: ۱۵-۳۰%, ++, +: ۱۵* Sme: smectite, Ill: illite, chl: chlorite, Ver: vermiculite, Kao: kaolinite, Pal: palygorskite, -, ill-smectite -: trace or not detected, +: <

و هیدروکسیدهای آهن غیرمحلول بیان کردند. عدم وجود شکل تبدلی آهن در خاک‌های آهکی را می‌توان به pH بالای این خاک‌ها و تبدیل آهن دو ظرفیتی به سه ظرفیتی و متعاقباً کاهش آهن تبدلی ارتباط داد. همچنین از آنجا که در روش عصاره‌گیری متوالی از نیترات پتاسیم برای استخراج شکل تبدلی استفاده شده است، زیاد بودن بیشتر ظرفیت آهن نسبت به پتاسیم سبب شده است که انتقال یون از خاک به محلول به مقدار کمتری صورت گیرد که دلیل دیگری از کم بودن مقادیر این شکل از آهن (عدم استخراج) است. آبولینو و همکاران (۱) دلیل کم بودن مقادیر آهن تبدلی را به تمایل قوی آهن برای تبدیل شدن به شکل اکسیدی و هیدروکسیدی بیان کردند. وی و همکاران (۵۱) با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های لسی شمال چین نشان دادند، که کمترین مقدار آهن در بخش تبدلی و بیشترین مقدار آن در بخش باقی‌مانده وجود دارد. بررسی شکل‌های شیمیایی آهن در نمونه‌های سطحی و زیرسطحی خاک‌های مورد مطالعه نشان از برتری کمی همه شکل‌های شیمیایی مورد مطالعه در نمونه‌های سطحی نسبت به نمونه‌های زیرسطحی، داشته است. بررسی مقادیر آهن قابل دسترس (عصاره‌گیری شده با DTPA) در نمونه خاک‌های مورد مطالعه نشان از دامنه تغییرات این بخش از آهن از ۲/۵ تا ۳۱/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم داشته است که با توجه به حد بحرانی آهن در خاک‌های آهکی (۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، بیش از نصف (۵۳ درصد) خاک‌های مورد مطالعه دارای کمبود آهن قابل دسترس هستند. مقایسه مقادیر آهن کل و آهن استخراجی با DTPA نشان می‌دهد که هر چند مقادیر آهن کل در خاک‌ها زیاد است، اما قابلیت دسترسی آهن بسیار کم است که با توجه به بررسی شکل‌های شیمیایی آهن و مقادیر زیاد از شکل باقی‌مانده، این فرض وجود دارد که آهن در بخش ساختمانی و سیلیکاتی اجزای خاک محبوس شده است (۷) و بررسی شکل‌های شیمیایی خاک و کانی‌های رسی می‌تواند در ثابت کردن این فرضیه مهم باشد.

خاک‌ها و به‌خصوص در بخش‌های مرطوب‌تر استان باشد. در مطالعه حاضر، ورمی‌کولیت به مقدار بسیار کم در خاک‌های استان مشاهده شد. پالیگورسکیت در مناطق با بارندگی کمتر استان، کانی غالب بود.

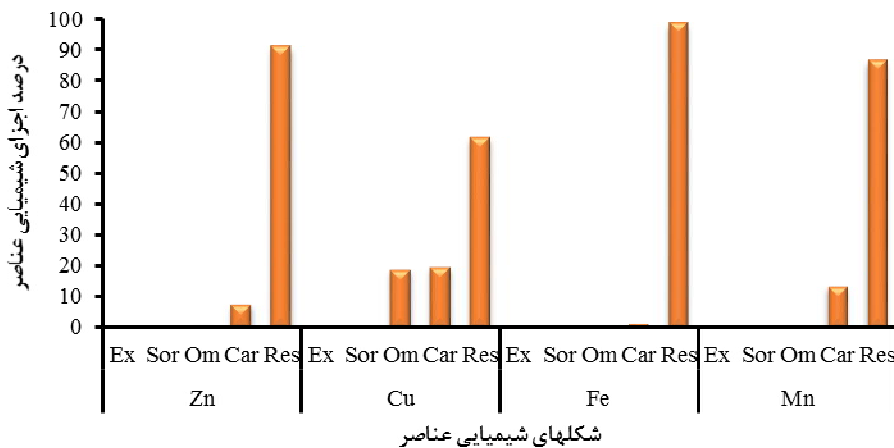
شکل‌های شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف در خاک‌های

مورد مطالعه

جدول ۳ میانگین غلظت هر شکل از شکل‌های شیمیایی عناصر کم‌مصرف را در خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. مطابق نتایج، شکل‌های شیمیایی باقی‌مانده (متوسط ۲۳۶۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه ۷۵۲۵ تا ۴۱۷۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کربناتی (متوسط ۲۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه ۶۹/۹ تا ۶۷۱/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، شکل آلی (متوسط ۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه ۰/۴ تا ۵۶۲/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و شکل جذب سطحی شده (متوسط ۱۱/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه صفر تا ۶۴/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به ترتیب بیشترین به کمترین میزان از شکل‌های شیمیایی آهن را در نمونه‌های مورد مطالعه (نمونه‌های سطحی و زیرسطحی) به‌خود اختصاص داده‌اند. بر اساس نتایج، مقادیر آهن تبدلی در همه نمونه‌های مورد مطالعه، کمتر از حد تشخیص دستگاه و ناچیز به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل آهن کربناتی پس از شکل باقی‌مانده، بیشترین مقدار آهن در خاک‌های مورد مطالعه را به‌خود اختصاص داد که می‌توان آن را ناشی از درصد زیاد کربنات کلسیم خاک‌های آهکی دانست. همچنین کم بودن آهن متصل به ترکیبات آلی نسبت به دو شکل باقی‌مانده و کربناتی، علاوه بر کمبود مواد آلی خاک، به تفاوت بین اجزا و ترکیبات آلی خاک مرتبط بوده که برحسب مقدار اجزای مواد آلی خاک (اسید فولویک، هیومین و اسید هیومیک) نتایج متفاوتی در رابطه با پیوند این اجزای آلی با مقدار عناصر در خاک به دست آمده است (۱۱). ماتور و همکاران (۲۴) یکی از عوامل مؤثر بر کاهش شکل آهن محلول در آب را ناشی از تشکیل و رسوب ترکیبات اکسیدها

جدول ۳. میانگین توزیع عناصر کم مصرف در افق‌های سطحی و عمقی راسته‌های خاک‌های مطالعه شده

شماره خاکرخ	تبادلی	جذب سطحی	آلی	کربناتی	باقی ماند	کل	DTPA	تبادلی	جذب سطحی	آلی	کربناتی	باقی ماند	کل
۱	-*	-	۰/۵	۴/۹	۶۷/۴	۷۲/۷	۰/۱	-	-	۳/۷	۳/۶	۱۰	۱۷/۳
۲	-	-	۰/۱	۵/۸	۷۵/۴	۸۱/۲	۰/۶	-	-	۵/۲	۵/۳	۱۲/۱	۲۲/۵
۳	-	-	۰/۶	۵/۲	۶۶/۹	۷۲/۷	۰/۲	-	-	۱/۹	۲	۱۱/۹	۱۵/۷
۴	-	-	۱/۲	۶/۸	۶۹/۲	۷۷/۲	۰/۶	-	-	۲/۹	۳/۱	۱۰/۷	۱۶/۷
۵	-	-	۰/۷	۳/۸	۵۱	۵۵/۴	۰/۱	-	-	۱/۹	۲/۱	۹	۱۳
۶	-	-	۰/۳	۲/۶	۵۱/۷	۵۵/۹	۰/۲	-	-	۲/۳	۲/۲	۸/۸	۱۳/۲
۷	-	-	۰/۸	۴/۸	۸۷/۳	۹۲/۹	۰/۵	-	-	۴/۶	۴/۳	۱۵/۷	۲۴/۵
۸	-	-	۲/۲	۹/۳	۸۳/۷	۹۵/۱	۲/۳	-	-	۳/۹	۴/۸	۱۲/۴	۲۱/۱
۹	-	-	۰/۷	۶/۴	۹۶/۳	۱۰۳/۴	۱/۳	-	-	۴/۲	۴/۳	۱۵/۶	۲۴/۱
۱۰	-	-	۰/۹	۱۱/۶	۱۰۴/۳	۱۱۶/۷	۲	-	-	۴/۸	۴/۷	۱۸/۱	۲۷/۵
۱۱	-	-	۰/۵	۴/۷	۶۷/۶	۹۰/۷	۰/۴	-	-	۴/۱	۳/۸	۱۱/۴	۱۹/۳
۱۲	-	-	۲/۷	۶/۲	۸۸	۹۶/۸	۲/۳	-	-	۵/۲	۳/۹	۱۲/۱	۲۱/۱
۱۳	-	-	۱/۳	۱۱/۸	۴۹/۳	۶۲/۳	۰/۷	-	-	۲/۶	۴	۷/۴	۱۳/۹
۱۴	-	-	۰/۴	۷/۷	۱۱۵/۸	۱۲۳/۹	۰/۳	-	-	۶/۵	۷/۴	۱۷/۸	۳۱/۶
۱۵	-	-	۰/۵	۴/۶	۸۵/۷	۹۰/۷	۰/۳	-	-	۲/۵	۲/۸	۱۲/۹	۱۸/۲
۱۶	-	-	۱/۱	۶	۶۶/۴	۷۳/۴	۰/۲	-	-	۲/۷	۳/۲	۶/۳	۱۲/۲
میانگین کل	-	-	۰/۹	۶/۴	۷۶/۶	۸۵/۱	۰/۸	-	-	۳/۷	۳/۸	۱۲	۱۹/۵
							آهن						
۱	-	-	۲۹/۲	۳۶۵	۲۰۳۸۴	۲۰۷۸۱	۱۵	-	-	۰/۳	۴۹	۳۵۰	۳۹۹
۲	-	-	۵/۸	۴۱۵	۲۶۰۱۱	۲۶۴۳۸	۲۰	-	-	۰/۵	۵۴	۳۵۴	۴۰۸
۳	-	-	۴/۱	۱۵۱	۱۸۲۲۶	۱۸۳۸۳	۵/۱	-	-	۰/۷	۳۳	۳۷۱	۴۰۵
۴	-	-	۱۳/۴	۱۳۱	۲۰۲۴۱	۲۰۳۹۳	۵/۱	-	-	۱	۵۲	۳۴۴	۳۹۷
۵	-	-	۲۶	۱۱۵	۱۳۸۴۴	۱۳۹۸۵	۵/۹	-	-	۰/۵	۳۱	۳۰۶	۳۳۸
۶	-	-	-	۱۱۴	۱۵۱۳۵	۱۵۲۵۰	۴	-	-	۰/۸	۴۱	۲۹۱	۳۳۲
۷	-	-	۱/۸	۲۷۶	۲۸۵۰۲	۲۸۸۷۲	۶/۶	-	-	۰/۴	۵۲	۵۲۶	۵۷۸
۸	-	-	۳۷/۱	۴۴۰	۲۳۵۱۷	۲۴۲۷۹	۱۴/۱	-	-	۸/۸	۱۳۳	۴۱۰	۵۵۱
۹	-	-	۲/۳	۴۴۶	۳۴۸۳۲	۳۵۲۸۵	۱۸/۸	-	-	۰/۵	۶۳	۸۰۸	۸۷۱
۱۰	-	-	-	۴۵۳	۳۵۰۷۲	۳۵۵۲۹	۱۶/۹	-	-	۰/۵	۶۴	۶۵۶	۷۲۰
۱۱	-	-	۰/۲	۳۶۵	۲۷۴۲۲	۲۷۷۹۲	۲۱/۱	-	-	۰/۶	۵۲	۳۷۲	۴۲۴
۱۲	-	-	۳۴/۴	۱۴۶	۲۴۹۶۴	۲۵۳۹۹	۲۰/۷	-	-	۳/۴	۶۵	۴۵۶	۵۲۴
۱۳	-	-	۱۷/۶	۳۸۹	۱۳۸۸۰	۱۴۲۸۸	۶	-	-	۰/۵	۸۳	۲۹۲	۳۷۶
۱۴	-	-	۳	۴۱۶	۳۴۹۹۸	۳۵۴۲۰	۱۵/۶	-	-	۰/۷	۲۳۴	۶۶۱	۸۹۶
۱۵	-	-	-	۲۱۱	۲۵۴۲۵	۲۵۶۳۸	۸/۳	-	-	۰/۷	۳۳	۵۲۲	۵۵۵
۱۶	-	-	۴/۴	۱۴۹	۱۶۴۵۰	۱۶۶۰۹	۷/۱	-	-	۰/۸	۴۲	۳۰۱	۳۴۴
میانگین کل	-	-	۱۱/۲	۲۸۶	۲۳۶۸۱	۲۴۰۱۶	۱۱/۹	-	-	۱/۳	۶۸	۴۳۹	۵۰۷



شکل ۱. میانگین جزء‌های شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف در تمام خاک‌های مورد مطالعه

اکسیدهای آهن کریستالی و باقی مانده به ترتیب ۶/۹۱، ۱/۶۳، ۸/۳۱، ۱۱/۱، ۷۹/۷۵، ۳/۵۲، ۴۹/۲۲ درصد کل منگنز خاک را تشکیل داده‌اند.

والنا و همکاران (۵۲) در بررسی شکل‌های شیمیایی منگنز در خاک‌های جنگلی لهستان نشان دادند شکل‌های احیایی نسبت به سایر شکل‌ها بیشترین سهم از منگنز را دارا بودند. بررسی مقادیر منگنز قابل دسترس (عصاره‌گیری شده با DTPA) در نمونه خاک‌های مورد مطالعه نشان از دامنه تغییرات این بخش از منگنز از ۴/۷ تا ۸/۳۵ (متوسط ۷/۱۶) میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های سطحی و ۲/۱ تا ۲/۱۹ (متوسط ۹/۱۳) میلی‌گرم بر کیلوگرم در خاک‌های گذشته است. طبق گزارش‌های گذشته، حد بحرانی منگنز قابل دسترس در خاک‌های آهکی ۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم است، که کمبود منگنز در ۳۲ درصد خاک‌های مورد مطالعه مشهود است.

بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی روی در خاک‌های مورد مطالعه نشان داد، شکل باقی مانده، بیشترین میزان از غلظت (متوسط ۶/۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و درصد نسبی (متوسط ۳۹/۹۱ درصد) روی موجود در خاک‌ها را به خود اختصاص داده است (جدول ۳ و شکل ۱). پس از شکل باقی مانده، شکل‌های کربناتی (متوسط ۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و درصد نسبی ۵۷/۷ درصد) و آلی (متوسط ۰/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و درصد نسبی ۳/۱ درصد) به ترتیب بیشترین و کمترین میزان از

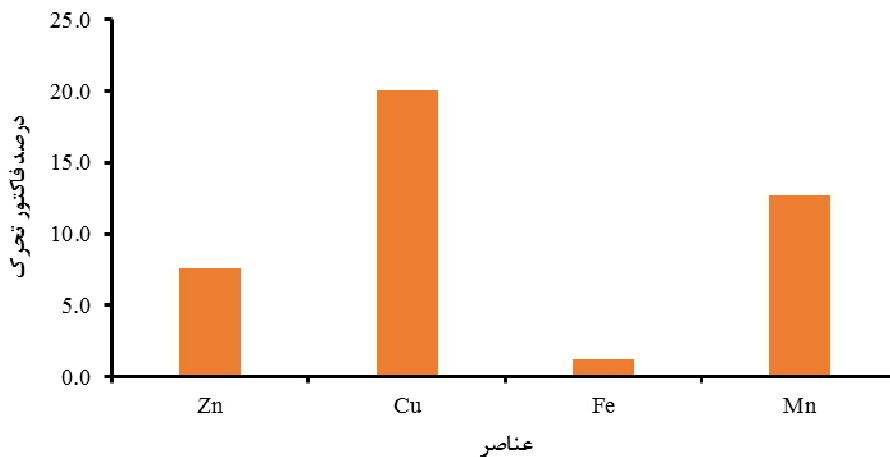
مطابق نتایج، شکل‌های شیمیایی منگنز در خاک‌های مورد مطالعه (نمونه‌های سطحی و زیرسطحی)، شکل‌های شیمیایی باقی مانده (متوسط ۲۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه ۵/۱۳۱ تا ۹۲۴/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کربناتی (متوسط ۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه ۶/۱۲ تا ۳/۴۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، و شکل آلی (متوسط ۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه ۰/۱ تا ۴/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، به ترتیب بیشترین به کمترین میزان از شکل‌های شیمیایی منگنز را به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۳). شکل‌های تبادلی و جذب سطحی شده منگنز، سهمی را به خود اختصاص نداده و مقدار عصاره‌گیری این شکل‌ها بسیار ناچیز و غیرقابل تشخیص توسط دستگاه جذب اتمی بودند. بررسی شکل‌های شیمیایی منگنز در نمونه‌های سطحی و زیرسطحی خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد، شکل باقی مانده در نمونه زیرسطحی درصد بیشتری از شکل باقی مانده را به خود اختصاص داده است که این روند در شکل آلی نیز مشهود بود. در طرف مقابل، شکل کربناتی در نمونه سطحی بیشتر از زیرسطحی وجود داشت. تابنده و همکاران (۴۷) در بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی منگنز و ارتباط آنها با شکل قابل جذب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های آهکی ایران نشان دادند مقادیر شکل تبادلی، کربناتی، آلی، به شکل اکسیدهای منگنز، متصل به اکسیدی‌های آهن بی‌شکل، متصل به

۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم و درصد نسبی ۶۱/۷ درصد)، کربناتی (متوسط ۳/۸ میلی گرم بر کیلوگرم و درصد نسبی ۱۹/۷ درصد) و شکل آلی (متوسط ۳/۷ میلی گرم بر کیلوگرم و درصد نسبی ۱۸/۵۶ درصد) به ترتیب بیشترین به کمترین میزان از شکل های شیمیایی روی را به خود اختصاص داده اند. همچنین، مانند شکل های شیمیایی روی، شکل های تبادل و آلی مس، سهمی را به خود اختصاص نداده و مقدار عصاره گیری این شکل ها بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.

در بررسی شکل های شیمیایی مس، کمانگر و همکاران (۱۷) در خاک های استان آذربایجان شرقی، علوی و همکاران (۳) در خاک های استان گلستان، جلالی و خانلری (۱۴) در خاک های آهکی غیر آلوده و آلوده شده به مس در همدان و تابنده و همکاران (۴۷) در استان فارس، شکل باقی مانده مس را به عنوان شکل غالب مس گزارش کردند. مقایسه شکل های شیمیایی سایر عناصر مورد مطالعه و مس، حاکی از افزایش شکل آلی مس است که می توان آن را به میل ترکیبی زیاد مس با مواد آلی نسبت داد. مقادیر مس قابل استخراج با DTPA، در خاک های مورد مطالعه در محدوده ۰/۳ تا ۳ میلی گرم بر کیلوگرم (متوسط ۱/۴ میلی گرم بر کیلوگرم) به دست آمد. مطالعات انجام شده در خاک های آهکی ایران، مقدار ۰/۹ میلی گرم بر کیلوگرم را به عنوان حد بحرانی مس قابل دسترس بیان کردند (۵۶). که با توجه به این محدوده، از ۳۲ نمونه مورد مطالعه، فقط ۱۰ نمونه دارای کمبود مس قابل دسترس بودند. با توجه به نتایج، درصد کمتری از خاک های مورد مطالعه دارای کمبود مس قابل دسترس در مقایسه با روی هستند، که بررسی هر شکل شیمیایی از این عناصر با خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کانی شناسی می تواند در توجیه این مقادیر کمک کند. سالبو و کرکلینگ (۳۵) با بررسی های مختلف بیان کردند، دو شکل شیمیایی تبادل و کربناتی بیشترین قابلیت دسترسی و تحرک از هر عنصر را دارا هستند و در نتیجه، فرمول فاکتور تحرک را که از درصد مجموع دو شکل تبادل و کربناتی بر مجموع شکل های شیمیایی محاسبه می شود، پیشنهاد کردند.

شکل های شیمیایی روی (قابل اندازه گیری توسط دستگاه) را در خاک های مورد مطالعه دارا بودند. در طرف مقابل دو شکل تبدلی و شکل جذب سطحی شده روی به دلیل مقادیر بسیار کم، توسط دستگاه غیر قابل تشخیص و ناچیز به دست آمد. نتایج به دست آمده از مطالعات گذشته توسط سایر پژوهشگران در خاک های آهکی (۳۳، ۳۴ و ۵۴) نیز نشان از برتری شکل های باقی مانده و کربناتی نسبت به سایر شکل ها، توسط روش عصاره گیری متوالی اسپوزیتو و همکاران (۴۴) داشته است. این در حالی است که در مطالعات انجام شده در سایر خاک های ایران (۳۱)، شکل های اکسیدهای آهن بی شکل را به عنوان شکل های غالب روی، پس از شکل باقی مانده گزارش کردند، که دلیل این اختلاف را می توان به تفاوت در روش استخراج شکل های شیمیایی روی بیان کرد. بر اساس نتایج به دست آمده از جدول ۳، مقادیر روی قابل استخراج با DTPA، به عنوان شکل قابل دسترس روی برای گیاهان، در خاک های مورد مطالعه در محدوده صفر تا ۳/۸ میلی گرم بر کیلوگرم (متوسط ۰/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) به دست آمد. مقادیر این شکل از روی در خاک های با مقادیر کم از روی کل (مجموع شکل های شیمیایی)، در حداقل مقدار خود هستند. هر چند که مطالعات گذشته نشان داده است که مقدار کل هر عنصر در خاک نمی تواند در تخمین اثرات شیمیایی عنصر مفید بوده و قابلیت دسترسی عنصر را پیش بینی کند (۳۰). برخی مطالعات انجام شده در خاک های آهکی ایران، مقدار ۰/۹ میلی گرم بر کیلوگرم را به عنوان حد بحرانی روی قابل دسترس بیان کردند (۵۶)، که با توجه به این محدوده، از ۳۲ نمونه مورد مطالعه، فقط ۷ نمونه فاقد کمبود روی قابل دسترس هستند. به طور کلی، میانگین شکل های شیمیایی روی در خاک های مورد مطالعه، صرف نظر از شکل های تبادل و جذب سطحی شده، دارای ترتیب زیر است: آلی > کربناتی >> باقی مانده.

جدول ۳ و شکل ۱ به ترتیب غلظت و درصد نسبی هر شکل از شکل های شیمیایی مس در خاک های مورد مطالعه را نشان می دهد. طبق نتایج، شکل های شیمیایی باقی مانده (متوسط



شکل ۲. میانگین درصد فاکتور تحرک عناصر غذایی کم‌مصرف در تمام خاک‌رخ‌های مورد مطالعه

توزیع عناصر کم‌مصرف در راسته‌های مختلف موجود در منطقه

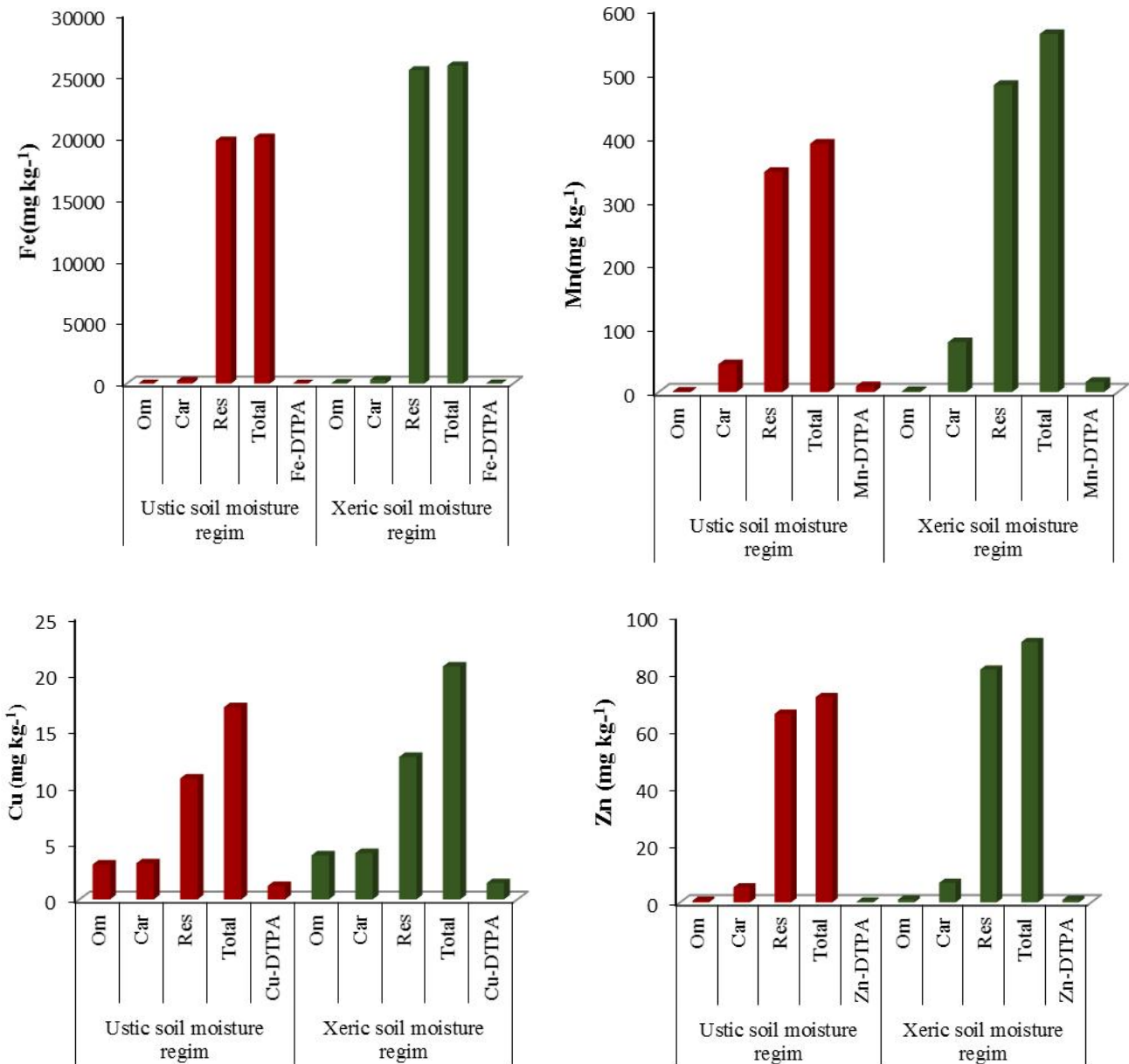
بر اساس نتایج (جدول ۳) بیشترین مقدار شکل باقی‌مانده آهن در نمونه‌های ۲۷ و ۲۸ که به ترتیب افق‌های سطحی و زیرسطحی خاک آلفی‌سول (۴۱۷۶۰ و ۳۸۲۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، نمونه ۱۹ که افق سطحی خاک اینسپتی‌سول (۳۶۷۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و نمونه‌های ۱۷ و ۱۸ که افق‌های سطحی و زیرسطحی خاک ورتی‌سول (۳۵۹۸۴ و ۳۳۶۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) هستند، مشاهده شد. کمترین مقدار شکل باقی‌مانده در نمونه ۳۲ بود که افق زیرسطحی یک خاک انتی‌سول (۷۵۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است. بیشترین شکل آلی در نمونه‌های ۱۵ و ۲۳ که افق‌های سطحی خاک‌های مالی‌سول (۵۹۲/۸ و ۴۹۵/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده مشاهده شد. کمترین میزان شکل آلی نیز در نمونه‌های ۱۲ و ۱۰ که به ترتیب افق‌های زیرسطحی خاک‌های انتی‌سول (۸۳/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و اینسپتی‌سول (۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) هستند مشاهده شد. بیشترین مقدار شکل استخراج شده با DTPA در نمونه‌های ۲۱ (۳۱/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) که افق سطحی خاک آلفی‌سول و نمونه‌های ۲۳ (۲۷/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ۳ (۲۳/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) که افق‌های سطحی خاک‌های مالی‌سول هستند مشاهده شد. کمترین مقدار این شکل نیز در

بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین میزان تحرک عناصر مورد مطالعه در پژوهش حاضر به صورت زیر به دست آمد: $Cu > Mn > Zn > Fe$ که به ترتیب دارای فاکتور تحرک ۱/۲، ۷/۶، ۱۲/۷، ۲۰ درصد (در تمام نمونه خاک بدون توجه به نوع خاک‌رخ و افق مشخصه) هستند. در مورد عنصر آهن نیز می‌توان گفت که آهن نیز همانند آلومینیم و زیرکونیم از عناصر نادر است، چرا که این عنصر در خاک تحرک زیادی ندارد و پس از هوادهی که وارد کانی‌های ثانویه خاک می‌شود، بیشتر در فاز باقی‌مانده تجمع می‌یابد (۴۸). فاکتور تحرک به ویژگی‌های ژئوشیمیایی فلز و در مرتبه بعدی به شرایط تشکیل خاک بستگی دارد. طبق یافته‌های توری و لوادو (۴۹) در صورتی که فاکتور تحرک کمتر از ۱۰ درصد باشد عنصر به عنوان یک عنصر با تحرک کم، و در صورتی که این فاکتور بیشتر از ۵۰ درصد باشد به عنوان عنصر با تحرک بسیار زیاد در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به شکل ۲ میزان فاکتور تحرک آهن و روی در نمونه‌های مورد مطالعه کمتر از ۱۰ درصد به دست آمد که نشان از تحرک کم این عناصر در خاک‌های منطقه دارد. بنابراین تحرک کم روی و آهن و تحرک متوسط مس و منگنز در بیشتر خاک‌های مورد مطالعه نشان از رفتار متفاوت این عناصر در خاک‌های آهکی منطقه داشت.

باقی مانده، نشان از تحرک کم این عنصر و یا به عبارتی جذب سطحی زیاد این عنصر در خاک است. همچنین بر اساس نتایج (جدول ۳) بیشترین مقدار شکل باقی مانده روی و مس به ترتیب در افق سطحی و زیرسطحی خاک شماره ۱۴ (آلفی سول) در مناطق با بارندگی بیشتر و خاک‌های دارای بافت سنگین تر، ماده آلی بیشتر و همچنین کربنات کلسیم کمتر (نسبت به نمونه‌های مناطق خشک تر)، مشاهده شد. مطالعات نشان داده است، بیشترین مقدار شکل استخراج شده مس و روی با DTPA به ترتیب در نمونه ۱۴ (۲/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) در افق زیر سطحی خاک آلفی سول و نمونه ۱۰ (۳/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) که افق زیرسطحی خاک اینسپتی سول هستند مشاهده شد. در طرف مقابل، کمترین مقدار این شکل نیز در نمونه ۶ (۰/۳ میلی گرم بر کیلوگرم) و نمونه ۱۶ (صفر میلی گرم بر کیلوگرم) که افق زیرسطحی یک خاک انتی سول است وجود داشت. صرف نظر از رژیم رطوبتی خاک، مواد مادری نیز بر مقدار کل عناصر غذایی کم مصرف تأثیر دارد (۱۸). در بین راسته‌های مختلف، خاک‌های شماره ۱۴ (آلفی سول) و ۱۳ (انتی سول) به ترتیب بیشترین و کمترین درصد از مس باقی مانده و خاک‌های شماره ۱۴ (آلفی سول) و ۶ (انتی سول) به ترتیب بیشترین و کمترین درصد از روی باقی مانده را به خود اختصاص داده‌اند. بر خلاف شکل باقی مانده، بیشترین و کمترین درصد از شکل کربناتی مس به ترتیب در راسته آلفی سول (خاک شماره ۱۴) و انتی سول (خاک شماره ۶)، بیشترین و کمترین درصد از شکل کربناتی روی در راسته انتی سول (خاک شماره ۱۳) و انتی سول (خاک شماره ۶) مشاهده شد. همانگونه که در جدول ۳ و شکل ۳ مشاهده می‌شود، اغلب خاک‌های دارای بیشترین مقدار شکل‌های مختلف آهن دارای تکامل پروفیلی بیشتر، آب و هوای مرطوب تر (زریک نسبت به یوستیک) هستند. این خاک‌ها دارای بافت ریزتر بوده، کربنات کلسیم کمتر و ماده آلی بیشتری نیز دارند. خاک‌های آلفی سول و مالی سول که تقریباً در همه شکل‌های آهن، بیشترین مقدار را دارا هستند، خاک‌هایی با تکامل بیشتر، ماده آلی زیاد، بافت

نمونه‌های ۱۲ (۲/۵ میلی گرم بر کیلوگرم) و ۱۷ (۲/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) که افق‌های زیرسطحی خاک‌های انتی سول هستند وجود داشتند. بررسی نسبی شکل‌های شیمیایی هر راسته نشان داد، بیشترین مقدار شکل باقی مانده منگنز در نمونه‌های ۱۷ و ۲۷ که به ترتیب افق‌های سطحی خاک‌های ورتی سول و آلفی سول (۹۲۴/۹ و ۸۴۷/۸ میلی گرم بر کیلوگرم)، هستند مشاهده شد. کمترین مقدار شکل باقی مانده در نمونه ۳۲ که افق زیرسطحی خاک انتی سول (۱۳۱/۵ میلی گرم بر کیلوگرم) بود، به دست آمد.

بیشترین مقدار شکل باقی مانده منگنز در مناطق با بارندگی بیشتر و خاک‌های دارای بافت سنگین تر، ماده آلی بیشتر و همچنین کربنات کلسیم کمتر (نسبت به نمونه‌های مناطق خشک تر)، مشاهده شد. صرف نظر از شکل زمین، مقدار منگنز در خاک‌های بافت ریز بیشتر از خاک‌های بافت درشت است. مطالعات نشان داده است، منگنز کل، قابل استخراج با DTPA، جذب سطحی شده و آلی با افزایش مقدار ماده آلی و همچنین مقدار رس، بیشتر می‌شود (۳۹). بیشترین مقدار شکل استخراج شده منگنز با DTPA در نمونه‌های ۱۵ (۶۰/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) و ۲۳ (۳۵/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) که افق‌های سطحی خاک‌های مالی سول هستند مشاهده شد. در طرف مقابل، کمترین مقدار این شکل نیز در نمونه ۱۲ (۲/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) که افق زیرسطحی یک خاک انتی سول است وجود داشت. صرف نظر از رژیم رطوبتی خاک، مواد مادری نیز بر مقدار کل عناصر غذایی کم مصرف تأثیر دارد (۱۸). یاماموتا و واتانابه (۵۴) در بررسی شکل‌های مختلف منگنز در خاک‌های منطقه سوگاواای ژاپن به این نتیجه رسیدند که بیش از ۵۰ درصد منگنز به شکل باقی مانده وجود دارد. در بین راسته‌های مختلف، خاک‌های ورتی سول و مالی سول به ترتیب بیشترین و کمترین درصد از منگنز باقی مانده را به خود اختصاص داده‌اند. بر خلاف شکل باقی مانده، بیشترین و کمترین درصد از شکل کربناتی نیز به ترتیب در راسته‌های مالی سول و ورتی سول مشاهده شد. وجود درصد زیاد منگنز در شکل شیمیایی



شکل ۳. توزیع شکل‌های مختلف عناصر در رژیم‌های رطوبتی موجود در منطقه مطالعاتی

شود، درحالی که مقدار رس و ماده آلی کاهش می‌یابد. بنابراین قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم مصرف نیز کاهش می‌یابد. شارما و همکاران (۳۸) نشان دادند که مقدار آهن و منگنز قابل استخراج با DTPA در خاک‌های مناطق دارای رژیم رطوبتی اکویک زیاد، در رژیم رطوبتی یوستیک متوسط و در اریدیک کم است. هاک و همکاران (۱۰) نتیجه گرفتند که قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم مصرف در خاک‌های آلفی-سول،

ریز و درصد کمتر کربنات کلسیم به دلیل شستشوی بیشتر هستند. در منطقه مطالعه شده در بخش‌های با بارندگی بیشتر، تکامل پروفیلی بیشتر بوده و در نتیجه مقدار عناصر کم مصرف هم بیشتر شده است. برعکس در مناطق با بارندگی کمتر خاک‌ها در ابتدای تکامل بوده و مقدار عناصر کم مصرف کمتری نیز دارند. با تغییر رژیم رطوبتی خاک از مرطوب به سمت رژیم-های رطوبتی خشک‌تر، pH و مقدار کربنات کلسیم زیاد می

شکل آلی هر عنصر، شامل یون‌های جذب سطحی شده، کلاته شده یا کمپلکس شده با مواد آلی است، که همبستگی مثبت این شکل با کربن آلی را توجیه می‌کند. ریحانی تبار و همکاران (۳۱) گزارش کردند، شکل آلی روی با هیچ یک از خصوصیات خاک ارتباطی نشان نداد. روی کربناتی با ماده آلی رابطه مثبت و با pH رابطه منفی و شکل باقی مانده روی با رس، سیلت و ماده آلی رابطه مثبت و با pH رابطه منفی معنی‌داری را دارا است. صفاری و همکاران (۳۴) در بررسی شکل‌های شیمیایی روی به روش اسپوزیتو و همکاران (۴۴) همبستگی منفی معنی‌دار pH و کربنات کلسیم با شکل‌های آلی و باقی مانده و همبستگی مثبت معنی‌دار ماده آلی با شکل‌های آلی و باقی مانده و ظرفیت تبادل کاتیونی با سه شکل شیمیایی آلی، کربناتی و باقی مانده را گزارش دادند.

در بررسی همبستگی شکل‌های شیمیایی مختلف مس با برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک، شکل‌های آلی، کربناتی و باقی مانده مس همبستگی مثبت معنی‌داری با رس و ظرفیت تبادل کاتیونی و همبستگی منفی معنی‌داری با شن، قابلیت هدایت الکتریکی (به استثنای شکل کربناتی) و کربنات کلسیم معادل نشان دادند. همبستگی شکل‌های شیمیایی مختلف آهن با برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه (جدول ۴) نشان داد که شکل آلی آهن همبستگی مثبت معنی‌دار با کربن آلی (**۰/۸۸۸) و ظرفیت تبادل کاتیونی (*۰/۳۹۷) و همبستگی منفی معنی‌دار با pH (**۰/۴۸۶-) دارد. شکل کربناتی آهن همبستگی مثبت معنی‌دار با کربن آلی (*۰/۳۸۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی (**۰/۵۸۷)، رس (**۰/۴۹۷) و سیلت (*۰/۳۶۱) و همبستگی منفی و معنی‌داری با کربنات کلسیم معادل (**۰/۵۷۷-) و شن (**۰/۴۷۲-)؛ و شکل باقی مانده آهن، همبستگی مثبت معنی‌دار با ظرفیت تبادل کاتیونی (**۰/۸۲۷) رس (**۰/۷۸۲) و سیلت (**۰/۵۹۸)، و همبستگی منفی معنی‌دار با کربنات کلسیم معادل (**۰/۸۴۴-) و شن (**۰/۴۱۵) نشان داده است. همچنین نتایج نشان از همبستگی مثبت معنی‌دار آهن استخراجی با DTPA با ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی و همبستگی منفی معنی‌دار با pH خاک دارد.

مالی سول و ورتی سول، بیشتر از خاک‌های اینسپتی سول، اریدی سول و انتی سول است. نجفی قیری و همکاران (۲۷)، نشان دادند که کمترین مقدار عناصر غذایی کم مصرف در اریدی سول ها و خاک‌های دارای رژیم رطوبتی اریدیک و یوستیک بود. آنها نتیجه گرفتند که این فاکتورها روی خصوصیات خاک مانند مقدار رس، pH، مواد آلی و کربنات کلسیم و در نتیجه بر چرخه عناصر غذایی کم مصرف و توزیع آنها مؤثر هستند. مقدار بیشتر آهن در آلفی سول‌ها و اینسپتی سول‌ها نسبت به اریدی سول‌ها و انتی سول‌ها ممکن است مربوط به مواد مادری و بافت ریزتر آلفی سول‌ها و اینسپتی سول‌ها نسبت به اریدی سول‌ها و انتی سول‌ها باشد (۴۰). به طور کلی نتایج بررسی اطلاعات موجود در جدول ۳ و شکل ۳ بیانگر این موضوع بود که بیشترین مقدار شکل‌های مختلف عناصر، در راسته‌های خاک موجود در مناطق با رژیم رطوبتی مرطوب‌تر است. خاک و همکاران (۱۰) در بررسی ۳۲ خاک در سراسر اتیوپی نشان دادند که بیشترین میزان عناصر غذایی کم مصرف در راسته‌های مالی سول، ورتی سول و آلفی سول هستند.

همبستگی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با شکل‌های شیمیایی عناصر

در جدول ۴، همبستگی شکل‌های شیمیایی مختلف روی و مس با تعدادی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شکل آلی روی همبستگی مثبت معنی‌دار با کربن آلی و همبستگی منفی معنی‌دار با pH، شکل کربناتی روی همبستگی مثبت معنی‌دار با کربن آلی و شکل باقی مانده روی همبستگی مثبت معنی‌دار با سیلت، رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و همبستگی منفی معنی‌دار با شن و کربنات کلسیم معادل نشان داده است. همچنین نتایج نشان از همبستگی مثبت معنی‌دار روی استخراجی با DTPA با ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی و همبستگی منفی معنی‌دار با pH خاک دارد.

جدول ۴. همبستگی شکل‌های شیمیایی روی، مس، منگنز و آهن با برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

شکل شیمیایی	اسمکتیت	ایلیت	کلریت	ورمی-کولیت	کائولینیت	پالگورسکیت	شن	رس	پ هاش	آهک	کربن آلی	ظرفیت تبادل کاتیونی
روی												
آلی	-۰/۰۹	-۰/۰۶۳	۰/۱۹۹	۰/۰۳	-۰/۰۹	-۰/۱۳۳	۰/۲۲۹	-۰/۱۲۹	-۰/۴۰۴*	۰/۰۴۶	۰/۶۸۰**	۰/۱۸۹
کربناتی	۰/۱۸۷	-۰/۰۹۵	-۰/۰۷۶	۰/۳۵۷*	۰/۰۴۹	-۰/۳۶۷*	-۰/۰۱۹	۰/۰۳۷	-۰/۱۴۶	-۰/۳۱۲	۰/۳۵۷*	۰/۳۴۱
باقی مانده	۰/۶۵۵**	-۰/۱۶۷	-۰/۴۴۷*	۰/۵۸۰**	۰/۲۱۹	-۰/۴۲۹*	-۰/۷۶۴**	۰/۷۴۹**	-۰/۲۴۱	-۰/۸۶۸**	۰/۳۲۵	۰/۸۶۴**
استخراجی با DTPA	۰/۱۹۵	-۰/۲۸۱	-۰/۰۳۴	۰/۱۸۸	۰/۰۶۲	-۰/۴۰۰*	-۰/۱۲۲	۰/۲۲۶	-۰/۳۵۵*	-۰/۳۰۰	۰/۵۸۴**	۰/۵۳۷**
مس												
آلی	۰/۴۰۱*	-۰/۰۰۴	-۰/۱۲۳	۰/۵۳۲**	۰/۰۸۶	-۰/۳۲۷	-۰/۶۰۹**	۰/۶۷۵**	-۰/۱۸۵	-۰/۶۷۰**	-۰/۲۶۹	۰/۶۹۷**
کربناتی	۰/۲۶۵	۰/۰۴۳	-۰/۱۱۸	۰/۵۱۰**	۰/۱۱۲	-۰/۳۱۲	-۰/۴۲۹*	۰/۴۶۸**	-۰/۱۷۲	-۰/۶۲۳**	-۰/۲۸۱	۰/۶۱۵**
باقی مانده	۰/۳۱۴	-۰/۲۹۳	-۰/۳۷۵*	۰/۴۱۵*	۰/۲۰۱	-۰/۲۶۴	-۰/۵۷۱**	۰/۷۰۹**	-۰/۰۳۷	-۰/۵۳۶**	-۰/۱۶۰	۰/۵۰۱**
استخراجی با DTPA	۰/۴۶۳**	-۰/۰۲۶	-۰/۱۶	۰/۵۴۵**	۰/۰۳۱	-۰/۳۳۶	-۰/۶۸۸**	۰/۶۵۶**	-۰/۱۸۸	-۰/۷۲۲**	-۰/۲۶۹	۰/۶۹۲**
آهن												
آلی	۰	۰/۰۱۶	۰/۰۹۵	۰/۰۰۶	۰/۰۷۴	-۰/۱۳۸	۰/۰۴۵	۰/۰۱۴	-۰/۴۸۶**	-۰/۰۷۳	۰/۸۸۸**	۰/۳۹۷**
کربناتی	۰/۴۴۴*	-۰/۰۹۲	-۰/۲۲	۰/۴۶۳**	۰/۲۰۶	-۰/۴۴۰*	-۰/۴۷۲**	۰/۴۹۷**	-۰/۲۱۳	-۰/۵۷۷**	۰/۳۸۰*	۰/۵۸۷**
باقی مانده	۰/۶۳۹**	-۰/۱۹۹	-۰/۴۵۵**	۰/۶۰۹**	۰/۱۳۹	-۰/۴۴۱*	-۰/۸۱۰**	۰/۷۸۲	-۰/۱۰۹	-۰/۸۴۴**	۰/۱۷۱	۰/۸۲۷**
استخراجی با DTPA	۰/۴۳۵*	-۰/۰۷۱	-۰/۱۴۲	۰/۴۸۴**	۰/۰۷۷	-۰/۳۷۱**	-۰/۵۰۱**	۰/۴۱۶*	-۰/۲۷۷	-۰/۵۵۳**	۰/۴۹۲**	۰/۶۶۰**
منگنز												
آلی	-۰/۰۱۳	۰/۰۰۵	۰/۰۸۹	-۰/۰۱۸	۰/۱۱۱	-۰/۲۱۶	-۰/۰۶۴	۰/۰۱۱	-۰/۵۲۲**	-۰/۰۷۶	۰/۹۰۴**	۰/۴۲۲**
کربناتی	۰/۰۵	-۰/۰۰۷	-۰/۱۸۸	۰/۵۰۷**	۰/۰۵۷	-۰/۱۸۳	-۰/۲۱۵	۰/۳۱۶	-۰/۲۱۹	-۰/۴۳۴*	۰/۳۶۳**	۰/۵۰۶**
باقی مانده	۰/۵۲۱**	-۰/۱۵۷	-۰/۴۰۸*	۰/۴۵۹**	۰/۲۸۸	-۰/۳۷۰*	-۰/۶۳۳**	۰/۵۸۷**	-۰/۰۵۳	-۰/۷۹۱**	۰/۰۱۳	۰/۶۶۴**
استخراجی با DTPA	۰/۰۸۳	۰/۰۰۳	-۰/۰۴۷	۰/۱۶۸	۰/۰۵۵	-۰/۳۵۰*	-۰/۱۲۷	۰/۰۸۴	-۰/۵۸۶**	-۰/۲۶۸	۰/۹۲۱**	۰/۵۵۹**

** و * به ترتیب معنادار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

در خاک مؤثر هستند. آهن محلول و تبادل با افزایش مقدار ماده آلی و رس افزایش می‌یابد. مقدار آهن به دلیل جذب بر روی سایت‌های غیرآلی، با افزایش مقدار رس افزایش می‌یابد. قابلیت دسترسی آهن در اغلب خاک‌های مناطق خشک، به وسیله بافت‌های درشت، مواد آلی کم و کربنات کلسیم و pH زیاد، محدود می‌شود. ارتباط مستقیم بین مقدار رس با مقادیر

(۰/۶۶۰**)، ماده آلی (۰/۴۹۲**)، رس (۰/۴۱۵*) و سیلت (۰/۴۸۲**) و همبستگی منفی معنی‌دار با کربنات کلسیم معادل (۰/۵۵۳**) و شن (۰/۵۰۱**) دارد. صرف نظر از شکل‌های مختلف آهن، مقدار آنها در خاک‌های بافت ریز بیشتر از خاک‌های بافت درشت است. تغییر در pH خاک، کربنات کلسیم، مواد آلی و بافت خاک در توزیع شکل‌های مختلف آهن

و شن (**۰/۶۳۳-)، نشان دادند. ارتباط منگنز استخراجی با DTPA با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نشان از همبستگی مثبت معنی دار این شکل از منگنز با ظرفیت تبادل کاتیونی (**۰/۵۵۹) و ماده آلی (**۰/۹۲۱) و همبستگی منفی معنی دار با pH (**۰/۵۸۶-) داشت. مقدار منگنز در خاک‌های بافت ریز بیشتر از خاک‌های بافت درشت است. منگنز کل، قابل استخراج با DTPA، جذب سطحی شده و آلی با افزایش مقدار ماده آلی و همپنین مقدار رس، بیشتر می‌شود (۳۹). یاداو (۵۳) مشاهده کرد که آهن و منگنز قابل دسترس ارتباط مثبت و معنی داری با کربن آلی و ارتباط منفی و معنی داری با pH و مقدار کربنات کلسیم خاک دارد. با توجه به خصوصیات رفتاری مشابه آهن و منگنز در خاک، دلایل ارتباط خصوصیات خاک و منگنز در موارد زیادی مشابه آهن بوده که در بخش‌های قبل توضیح داده شده است. ماده آلی مانند تأثیر آن در مورد سایر عناصر غذایی کم‌مصرف، به دلیل بهبود ساختمان خاک، جلوگیری از رسوب و همچنین دارا بودن عوامل کلاته کننده، قابلیت دسترسی این عناصر را بیشتر می‌کند. pH نیز اثر مشابهی بر دو عنصر آهن و منگنز دارد. تابنده و همکاران (۴۷) در بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی منگنز و ارتباط آنها با شکل قابل جذب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های آهکی ایران نشان دادند از بین شکل‌های مختلف، شکل تبدالی آلی و اکسیدی همبستگی مثبت و معنی داری با شکل قابل جذب عصاره گیری شده با عصاره گیر DTPA نشان داده است. همچنین نتایج این پژوهشگران نشان داد، اکسید منگنز در خاک با ظرفیت تبادل کاتیونی و درصد رس همبستگی مثبت و با درصد کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی معنی دار نشان دارد.

همبستگی کانی‌های رسی خاک با شکل‌های شیمیایی عناصر

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، شکل کربناتی روی با اسمکتیت ارتباط مثبت (۰/۱۸۷)، با ورمی‌کولیت ارتباط مثبت و معنی دار (*۰/۳۵۷) و با پالیگورسکیت ارتباط منفی و معنی داری (*۰/۳۶۷-) نشان می‌دهد. شکل باقی‌مانده نیز با اسمکتیت

آهن کل در مطالعات کشاورزی و همکاران (۱۹) در شمال شرق ایران گزارش شده است. معمولاً مقدار عناصر کم‌مصرف در خاک‌های دارای رس زیاد، بیشتر است (۲۰). همان‌طور که مشاهده شد بین شکل کربناتی و میزان کربنات کلسیم خاک ارتباط منفی و معنی داری وجود دارد. آکی و دولتی (۲) دلیل این ارتباط منفی را این گونه توجیه کرده‌اند که میزان جذب ممکن است حتی در مواردی که مقدار آهک در خاک زیاد است، زیاد نباشد، زیرا آهک موجود در شکل فعال نیست. بنابراین هر چه میزان رس بیشتر و آهک کمتر باشد میزان جذب نیز بیشتر می‌شود. در خاک‌های مورد مطالعه، بین میزان رس و کربنات کلسیم خاک ارتباط منفی و معنی داری وجود دارد. با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی به دلیل افزایش سایت‌های تبدالی روی کلوئیدهای خاک، قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم‌مصرف بیشتر می‌شود. افزایش مواد آلی نیز به دلایل بهبود ساختمان خاک، جلوگیری از اکسید شدن و رسوب عناصر غذایی کم‌مصرف که فرم‌های غیرقابل دسترس هستند و همچنین دارا بودن عوامل کلات کننده که باعث افزایش حلالیت این عناصر می‌شود، قابلیت دسترسی عناصر غذایی کم‌مصرف را بیشتر می‌کند. در طرف مقابل، افزایش pH و کربنات کلسیم، حلالیت را کاهش می‌دهند. افزایش pH باعث اکسید شدن آهن می‌شود که سبب ایجاد شکل رسوبی و غیرقابل دسترس این عنصر در خاک می‌شود (۲۱ و ۲۲). در بررسی همبستگی شکل‌های شیمیایی مختلف منگنز با برخی خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک، شکل آلی همبستگی مثبت و معنی داری با ظرفیت تبادل کاتیونی (*۰/۴۲۲) و ماده آلی (**۰/۹۰۴) و همبستگی منفی و معنی داری با pH (**۰/۵۲۲-)، شکل کربناتی ارتباط مثبت و معنی داری با ظرفیت تبادل کاتیونی (**۰/۵۰۶) و ماده آلی (**۰/۳۶۳) و همبستگی منفی و معنی داری با کربنات کلسیم معادل (*۰/۴۳۴-)، و شکل باقی‌مانده منگنز، همبستگی مثبت معنی داری با ظرفیت تبادل کاتیونی (**۰/۶۶۴)، رس (**۰/۵۸۷) و سیلت (**۰/۴۸۹) و همبستگی منفی معنی داری با کربنات کلسیم معادل (**۰/۷۹۱-)

در مناطقی که کربنات کلسیم بیشتر است رس کمتر بوده و کانی پالیگورسکیت با سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی کمتر غالب است، که این شرایط باعث می‌شود که مقدار جذب شکل‌های مختلف روی و مس در این خاک‌ها کمتر از خاک‌های با رس بیشتر و کانی غالب اسمکتیت و ورمی‌کولیت باشد. شکل‌های مختلف روی و مس همبستگی مثبتی با کائولینیت نیز نشان دادند؛ گرچه این ارتباط معنی‌دار نبود. کانی کائولینیت به‌جز در بخش‌های کمی از منطقه مطالعه شده در سایر خاک‌های مطالعه شده مشاهده شد. این کانی از نوع کانی‌های موروثی بوده که در حال حاضر امکان تشکیل آن در منطقه به‌دلیل عدم وجود شرایط لازم ممکن نیست. این کانی دارای بار وابسته به pH بوده و ظرفیت تبادل کاتیونی کمی نیز دارد. به‌دلیل جذب مقداری از مس و روی بر روی این کانی، همبستگی مثبتی بین شکل‌های مختلف روی و مس با این کانی مشاهده شد ولی به دلیل ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه کم، این ارتباط معنی‌دار به‌دست نیامد. آهن استخراجی با DTPA نیز با اسمکتیت و ورمی‌کولیت ارتباط مثبت (به ترتیب، $0/435^*$ و $0/484^{**}$) و با پالیگورسکیت ارتباط منفی و معنی‌داری ($0/371^*$) داشت. شکل کربناتی منگنز ارتباط مثبت و معنی‌داری با ورمی‌کولیت ($0/507^{**}$)، شکل باقی‌مانده ارتباط مثبت و معنی‌داری با اسمکتیت ($0/521^{**}$) و ورمیکولایت ($0/459^{**}$) و ارتباط منفی و معنی‌داری با پالیگورسکیت ($0/370^*$) نشان داد. شکل استخراجی منگنز با DTPA با پالیگورسکیت ($0/350^*$) ارتباط منفی و معنی‌داری نشان داد. این نتایج نشان می‌دهد که شکل‌های مختلف آهن و منگنز با کانی‌های سلیکاتی ۲:۱ ارتباط مستقیم دارند. کانی‌های رسی ۲:۱ در pH بالا دارای بار منفی دائمی زیادی بوده و در نتیجه توانایی جذب کاتیون‌های مختلف را دارا هستند. معمولاً در بررسی تأثیر رس‌ها بر جذب عناصر، مقدار و نوع رس با هم در نظر گرفته می‌شوند. خاک‌هایی که از نظر شیمیایی و بافت مشابه هستند ممکن است به‌دلیل حضور و یا عدم حضور مقدار کمی از کانی‌های رسی خاص باهم متفاوت باشند. برای مثال اسمکتیت‌ها تبادل‌کننده‌های کاتیونی

و ورمی‌کولیت ارتباط مثبت و معنی‌دار (به ترتیب $0/655^{**}$ و $0/580^{**}$)، با کائولینیت ارتباط مثبت ($0/219^*$) و با پالیگورسکیت ارتباط منفی و معنی‌داری ($0/429^*$) داشت. روی استخراجی با DTPA نیز با اسمکتیت، ورمی‌کولیت و کائولینیت ارتباط مثبت (به ترتیب، $0/195$ ، $0/188$ و $0/062^*$) و با پالیگورسکیت ارتباط منفی و معنی‌داری ($0/400^*$) داشت. شکل‌های آلی و استخراجی مس با DTPA با اسمکتیت (به ترتیب $0/401^*$ و $0/463^*$) و ورمی‌کولیت (به ترتیب $0/532^{**}$ و $0/545^*$) ارتباط مثبت و معنی‌داری نشان دادند. این دو شکل مس با کائولینیت ارتباط مثبت (به ترتیب $0/086^*$ و $0/031^*$) و با پالیگورسکیت ارتباط منفی ($0/327^*$ و $0/336^*$) را نشان دادند. شکل‌های کربناتی و باقی‌مانده مس ارتباط مثبتی با اسمکتیت (به ترتیب $0/265^*$ و $0/314^*$) و کائولینیت (به ترتیب $0/112^*$ و $0/201^*$)، ارتباط مثبت و معنی‌داری با ورمی‌کولیت (به ترتیب $0/510^{**}$ و $0/415^{**}$) و ارتباط منفی با مقدار پالیگورسکیت (به ترتیب $0/312^*$ و $0/264^*$) نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که شکل‌های مختلف روی و مس با کانی‌های سلیکاتی ۲:۱ ارتباط مستقیم دارند. کانی‌های رسی ۲:۱ در pH بالا دارای بار منفی دائمی زیادی بوده و در نتیجه توانایی جذب کاتیون‌های مختلف را دارا هستند. طبق مطالعات سیپوز (۴۳)، به دلیل ظرفیت بالای رس‌ها در جذب عناصر غذایی کم مصرف مثل روی و مس، زیست‌فراهمی آنها با افزایش مقدار رس در خاک‌ها کاهش پیدا می‌کند. مطالعات گذشته نشان داده است، در بین کانی‌های رسی، رس اسمکتیت بیشترین تمایل را برای جذب مس و روی دارد (۴۲). همچنین غلظت بعضی از فلزهای سنگین مثل مس ارتباط مثبتی با مقدار ورمی‌کولیت خاک‌ها دارد. این کانی ظرفیت پیوندی بیشتری در مقایسه با سایر کانی‌های رسی دارد (۴۵). کانی پالیگورسکیت دارای سطح ویژه حدود 180 مترمربع بر گرم و ظرفیت تبادل کاتیونی حدود 12 سانتی‌مول بر کیلوگرم بوده، در حالی که کانی اسمکتیت دارای سطح ویژه حدود 800 مترمربع بر گرم و ظرفیت تبادل کاتیونی حدود 100 سانتی‌مول بر کیلوگرم است.

که کربنات کلسیم بیشتر بوده است، میزان رس کمتر بوده و کانی پالیگورسکیت با سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی کمتر غالب بود، که این شرایط باعث می‌شود مقدار جذب شکل‌های مختلف عناصر مورد مطالعه در این خاک‌ها کمتر از خاک‌های با رس بیشتر و کانی غالب اسمکتیت و ورمی‌کولیت باشد. میزان فاکتور تحرک کم روی و آهن و متوسط مس و منگنز در بیشتر خاک‌های مورد مطالعه نشان از رفتار متفاوت این عناصر در خاک‌های آهکی منطقه دارد. بررسی‌های تحقیق حاضر نشان داد تغییرات اقلیمی (رطوبت و دما) علاوه بر تأثیرگذاری بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی، به‌نحو بسیار مؤثری بر وضعیت شکل‌های شیمیایی عناصر غذایی کم‌مصرف مؤثر است.

بسیار قوی هستند حضور آنها می‌تواند تا حد زیادی بر تحرک عناصر تأثیر بگذارد (۵۰).

نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج به‌دست آمده، شکل‌های باقی‌مانده، کربناتی و آلی به‌ترتیب بیشترین به کمترین مقادیر از شکل‌های شیمیایی عناصر را به‌خود اختصاص دادند. بررسی تغییرات اقلیمی از رژیم رطوبتی یوستیک به زیریک، همراه با تغییرات تکامل خاک و افزایش کمی همه شکل‌های شیمیایی عناصر مورد مطالعه شد که این تغییرات با افزایش مقادیر رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی و همچنین کاهش کربنات کلسیم همراه بود. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار شکل‌های مختلف روی، مس، آهن و منگنز با کانی‌های سیلیکاتی ۲:۱ ارتباط مستقیم دارند. در مناطقی

منابع مورد استفاده

1. Abollino, O., A. Giacomino, M. Malandrino, E. Menthasi, M. Aceto and R. Barberis. 2006. Assessment of metal availability in contaminated soil by sequential extraction. *Water Air Soil Pollution* 137: 315.
2. Akay, A. and B. Doulati. 2012. The effect of soil properties on Zn adsorption. *Journal of International Environmental Application and Science* 7(1): 151-160.
3. Alavi, H., M. Barani Motlagh and E. Dordipour. 2013. Determination of chemical forms of copper and their relationships with plant responses and soil properties in some soils of Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*. 19(3): 43-62. (In Farsi).
4. Azadi, A. and M. Baghernejad. 2015. Study of morphological and mineralogical properties, potassium and phosphorus status in three soil toposequences of Fars province, Ph.D. dissertation in Soil Science, College of Agriculture Shiraz University. Iran.
5. Bell, R. W. and B. Dell. 2008. Micronutrients for Sustainable Food, Feed, Fibre and Bioenergy Production. International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, France.
6. Buoyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method for marking particle size analysis of soil. *Agronomy. Journal* 54: 4661-4665.
7. Connolly E. L., N. Campbell, N. Grotz, C. L. Prichard and M. L. Guerinet. 2003. Overexpression of the FRO₂ iron reductase confers tolerance to growth on low iron and uncovers post-transcriptional control. *Plant Physiology* 133(3):1102-1110.
8. Elgabaly, M. M. 1950. Mechanism of zinc fixation by colloidal clays and related minerals. *Soil Science* 69(3): 167-174.
9. Ginder-Vogel, M. and D. L Sparks. 2010. The impacts of X-ray absorption spectroscopy on understanding soil processes and reaction mechanisms. *Developments in Soil Science* 34: 1-26.
10. Haque, I., N Z. Lupwayi and T. Tadesse. 2000. Soil micronutrient contents and relation to other soil properties in Ethiopia. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31: 2751-2762.
11. Harter, R. D. 1991. Micronutrient adsorption-desorption reactions in soils. PP. 59-87. In: Mortvedt J. J., F. R. Cox, L. H. Shuman and R. H. Welch (Eds.), *Micronutrients in Agriculture*. SSSA, Madison, WI.
12. Havlin, J. L., S. L. Tisdale, W. L. Nelson and J. D Beaton. 2016. *Soil Fertility and Fertilizers*. Pearson Education India.
13. Helios Rybicka, E., W. Calmano and A. Breeger. 1995. Heavy metals sorption/desorption on competing clay minerals; an experimental study. *Applied Clay Science* 9(5): 369-381.

14. Jalali, M. and Z. V. Khanlari. 2007. Redistribution of fractions of zinc, cadmium, nickel, copper, and lead in contaminated calcareous soils treated with EDTA. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 53(4): 519-532.
15. Jeong, G. Y., S. Hillier and R. A. Kemp. 2011. Changes in mineralogy of loess-paleosol sections across the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research* 75: 245-255.
16. Johns, W. D., R. E. Grim and F. Bradley. 1954. Quantitative estimations of clay minerals by diffraction methods. *Journal of Sedimentary Research* 24(4): 242-251.
17. Kamangar, O., A. Reyhanitabar and S. Oustan. 2017. Determination of copper fractions and their relations with soil properties in some soils of East Azerbaijan province. *Water and Soil Science* 27(4): 63-74. (In Farsi).
18. Katyal, J. C. and B. D Sharma. 1991. DTPA-extractable and total Zn, Cu, Mn, and Fe in Indian soils and their association with some soil properties. *Geoderma* 49: 165-179.
19. Keshavarzi, A., V. Kumar, E. L. Bottega and J. Rodrigo-Comino. 2019. Determining land management zones using pedo-geomorphological factors in potential degraded regions to achieve land degradation neutrality. *Land* 8(6): 92.
20. Keshavarzi, A. and V. Kumar. 2018. Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran. *International Journal of Environmental Health Research* 29(5): 544-560.
21. Khormali, F. and M. Kehl. 2011. Micromorphology and development of loess-derived surface and buried soils along a precipitation gradient in Northern Iran. *Quaternary International* 234: 109-123.
22. Kumar, M. and A. Babel. 2011. Available micronutrient status and their relationship with soil properties of Jhunjhunu tehsil, District Jhunjhunu, Rajasthan, India. *Journal of Agricultural Science* 3(2): 97-106.
23. Loepfert, R. H. and D. L. Suarez. 1996. Carbonate and gypsum. PP. 437-474. In: Sparks D. L. (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, SSSA Book Series, Part 3, Madison, WI.
24. Mathur, B. S., S. K. Singh, B. P. Gupta and P. Kumar. 1998. Studies on some forms of iron and aluminium and their release in relation to acidity of Chotanagpur soils. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 46(3): 456-458.
25. Mitchell, R. L. 1964. Trace elements in soils. PP. 320-368. In: Bear, F. E. (Eds.), *Chemistry of Soil*. Oxford & IBH, Calcutta.
26. Nael, M., H. Khademi, A. Jalalian, R. Schulin, M. Kalbasi and F. Sotohan. 2009. Effect of geo-pedological conditions on the distribution and chemical speciation of selected trace elements in forest soils of western Alborz, Iran. *Geoderma* 152(1-2): 157-170.
27. Najafi-Ghiri, M., R. Ghasemi-Fasaee and E. Farrokhejad. 2013. Factors affecting micronutrient availability in calcareous soils of Southern Iran. *Arid Land Research and Management* 27(3): 203-215.
28. Nelson, D. W. and L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. PP. 961-1010. *Methods of Soil Analysis part 3-Chemical Methods*, (Methodsofsoilan3).
29. Németh T., I. Mohai and M. Tóth. 2005. Adsorption of copper and zinc ions on various montmorillonites: an XRD study. *Acta Mineralogica-Petrographica* 46: 29-36.
30. Ramos, L., L. M. Hernandez and M. J. Gonzalez. 1994. Sequential fractionation of copper, lead, cadmium and zinc in soils from or near Donana National Park. *Journal of Environmental Quality* 23(1): 50-57.
31. Reyhani Tabar, A., N. A. Karimian, M. Muazardalan, G. R. Savaghebi and M. R. Ghannadha. 2006. Zinc fractions of selected calcareous soils of Tehran province and their relationships with soil characteristics. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 10(3): 125-136. (In Farsi).
32. Richards, L. A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils*. United States Department of Agriculture Handbook No. 60. United States Government Printing Office, Washington DC.
33. Saffari, M., N. Karimian, A. Ronaghi, J. Yasrebi and R. Ghasemi-Fasaee. 2016. Stabilization of lead as affected by various amendments and incubation time in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62(3): 317-337.
34. Saffari, M., J. Yasrebi, N. Karimian. and X. Shan. 2009. Evaluation of three sequential extraction methods for fractionation of zinc in calcareous and acidic soils. *Research Journal of Biological Sciences* 4(7): 848-857.
35. Salbu, B. and T. Krekling. 1998. Characterisation of radioactive particles in the environment. *Analyst* 123(5): 843-850.
36. Shakeri, S., S. A. Abtahi, N. A. Karimian, M. Baghernejad and H. R. Owliaie. 2015. Kinetics of nonexchangeable potassium release in surface and subsurface horizons of predominant soil series in Kohgilouye-va-Boyerahmad Province. *Journal of Water and Soil Science* 19(73): 301-319. (In Farsi).
37. Shakeri, S. and S. A. Abtahi. 2018. Potassium forms in calcareous soils as affected by clay minerals and soil development in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, Southwest Iran. *Journal of Arid Land* 10(2): 217-232.
38. Sharma, B. D., S. S. Mukhopadhyay, P. S. Sidhu and J. C. Katyal. 2000. Pedospheric attributes in distribution of total and DTPA-extractable Zn, Cu, Mn and Fe in Indo-Gangetic plains. *Geoderma* 96: 131-151.

39. Sharma, B. D., Seth. Anubhuti, S. Saini Rajinder and D. Salwinder Singh. 2011 Distribution of different forms of Mn and their association with soil properties in arid zone soils of Punjab, India, *Archives of Agronomy and Soil Science* 57(1): 15-26.
40. Sharma, B. D., R. K. Harsh-Arora and V. K. Nayyar. 2004. Relationships between soil characteristics and total and DTPA-extractable micronutrients in Inceptisols of Punjab. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 799-818.
41. Sheldon, N. D. and N. J. Tabor. 2009. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols. *Earth Science Reviews* 95: 1-52.
42. Shukla, L. M. 2002. Sorption of Zn and Cd on soil clays. *Agrochemical* 44: 101-106.
43. Sipos, P. 2003. Distribution of Cu, Ni, Pb and Zn in natural brown forest soil profiles from the Cserhat Mts., Ne Hungary. *Acta Mineralogical-Petrografica* 44: 43-50.
44. Sposito, G., L. J. Lund and A. C. Chang. 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 1. *Soil Science Society of America Journal* 46(2): 260-264.
45. Sultan, K. 2006. Clay mineralogy of central Victorian (Creswick) soils: clay mineral contents as a possible tool of environmental indicator. *Soil and Sediment Contamination* 15(4): 339-356.
46. Sumner, M. E. and W. P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. PP. 1201- 1229, *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods, (methodsofsoilan3)*.
47. Tabande, L., M. R. Bakhshi and N. A. Karimian. 2013. Evaluation of the relationships between Cu chemical forms and Cu uptake by Soybean in several calcareous soils in Fars Province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 3(1): 183-198. (In Farsi).
48. Taylor, G. and R. A. Eggleton. 2001. *Regolith Geology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, NY.
49. Torri, S. I. and R. S. Lavado. 2008. Dynamics of Cd, Cu and Pb added to soil through different kinds of sewage sludge. *Waste Management* 28(5): 821-832.
50. Van der Merwe, G. M. E., M. C Laker and C. Buhmann. 2002. Clay mineral association in melanic soils of South Africa. *Australian Journal of Soil Research* 40: 115-126.
51. Wei, B., F. Jiang, X. Li and S. Mu. 2010. Contamination levels assessment of potential toxic metals in road dust deposited in different types of urban environment Environ. *Environmental Earth Sciences* 61: 1187-1196.
52. Walna, B., W. Szychalski and A. Ibragimow. 2010. Fractionation of iron and manganese in the horizons of a nutrient-poor forest soil profile using the sequential extraction method. *Polish Journal of Environmental Studies* 19(5): 1029-1037.
53. Yadav, K. K. 2008. Micronutrient status in soils of udaipur district of rajasthan. *Hydrology Journal* 34: 3.
54. Yamamoto, M. and Y. Watanabe. 1996. The chemical forms of Zn, Mn and Cu in soils of Sugadala- Kuogen. Japanese. *Soil Science and Plant Nutrition* 67(3): 279-284.
55. Zhang, X. P., W. Deng and X. M. Yang. 2002. The background concentrations of 13 soil trace elements and their relationship to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet). *Journal of Asian Earth Sciences* 21: 167-174.
56. Ziaieian, A. H. and M. J. Malakouti. 2001. Effects of Fe, Mn, Zn and Cu fertilization on the yield and grain quality of wheat in the calcareous soils of Iran. PP. 840-841. In: Horst W. J. et al. (Eds.), *Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences, Vol 92*. Springer, Dordrecht.

Effect of Climate and Soil Development on the Quantity and Chemical Forms Distribution of Iron, Copper, Zinc and Manganese Micronutrients in the Dominant Soil Orders of Kohgiluyeh and Boyerahmad Province

S. Shakeri^{1*}, A. Azadi² and M. Saffari³

(Received: March 31-2020 ; Accepted: August 01-2020)

Abstract

Determining the relative distribution of each chemical form of the elements and their relationship with the physical, chemical, and clay mineralogical properties of soils can help researchers to achieve the sustainable agricultural management. The present study was conducted to evaluate the chemical forms of four micronutrients (Zn, Cu, Fe and Mn) in some surface and subsurface soils of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad province and their relationship with the physical, chemical and mineralogical properties of the soils. The results showed that the exchangeable and sorbed chemical forms of the studied elements were very low and negligible, but the residual, carbonate, and organic forms had the highest to lowest values of the chemical forms of these elements, respectively. Examination of the correlation of the chemical forms of these elements with soil properties showed the effective correlation of organic carbon values with the Zn chemical forms; also, there was a correlation between clay, silt, cation exchange capacity and calcium carbonate and the chemical forms of Cu, Fe and Mn. The correlation between the quantities of clay minerals and the chemical forms of these elements showed that the amounts of different forms of the studied elements were directly related to 2:1 clay silicate minerals (especially vermiculite). Evaluation of Fe and Mn chemical forms also showed that the amounts of these elements were higher in the soils with developed profiles (Alfisol and Mollisol), the wetter climate and zeric moisture regime rather than in soils with non-developed profiles (Entisols and Inceptisols) and a drier climate and a ustic moisture regime. In general, the results showed that variations of soil forming factors such as climate (as well as the total amount of each micronutrients), could be effective on the chemical forms of micronutrients (especially on Mn and Fe); these can be effective in the management of weakly to highly-developed soils orders.

Keywords: Chemical forms, Micronutrients, Second clay minerals

1. Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran.

2. Soil and Water Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran.

3. Department, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

*: Corresponding Author, Email: Shakeri@pnu.ac.ir