

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده کشاورزی

پایان نامه جهت اخذ کارشناسی ارشد مهندسی علوم خاک

# اثر کشت مستمر بر جذب و واجذب سرب در برخی از خاک‌های آهکی در استان آذربایجان غربی

نگارنده:

بهاره رجبی

اساتید راهنما: دکتر حبیب خداوردی‌لو - دکتر عباس صمدی

استاد مشاور: دکتر میرحسن رسولی صدقیانی

۱۳۸۹/۹/ ۸

مطالعات دکترا علمی بزرگ  
نمونه درآیند

شهریور ۱۳۸۹

۱۴۶۴۰۰

پایان نامه خانم بهاره رجبی به تاریخ ۸۹/۶/۲۰ به شماره ۱۵۴-۲۰۷ ک مورد پذیرش هیات محترم  
داوران با رتبه ع و نمره ۱۹۱ - قرار گرفت.

- ۱- استاد راهنمای اول و رئیس هیئت داوران: دکتر حبیب خداوردی لو لو
- ۲- استاد راهنمای دوم: دکتر عباس محمدی
- ۳- استاد مشاور: دکتر میرحسن رسولی صدیقیانی
- ۴- داور خارجی: دکتر سالار رضاپور
- ۵- داور داخلی: دکتر ابراهیم سپهر
- ۶- نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر محسن اسمعیلی

حق طبع و نشر این رساله متعلق به دانشگاه ارومیه است.

تقدیم بہ

پدر و مادر بزرگوارم

کہ وجود من در کرو و وجود با عظمت آنهاست و

برای این دو عزیز مہربان، ماورائی و قابل ستایش

ہر خطہ خدا را سپاس می گویم.

تقدیم به

خانم مهندس و مریم نازنین و دوست داشتنی

برادر و خواهرهای مهربانم و

مهدی، میثم، علیرضا، پرغام و پریسای خوبم

که تنها نگاهشان، آرامش بخش و نوید بخش بود.

و تقدیم به عزیزتری که باید بود ولی نیست.....

## تقدیر و تشکر از

استاد راهنمای بزرگوار و مهربانم دکتر خداوردی لوی که استاد علم و اخلاق بنده بودند لحظه‌ای مرا تنها نگذاشته و همواره با شکیبایی همراهیم کردند.

استاد راهنمای دومم دکتر صدیقی، ایشان نمونه‌ی علمی تعهد و تخصص بوده و تجربیات ارزشمندشان همیشه برای من رهگشا بود و دکتر رسولی صدقیانی که حضور سبز و نگاه پرمهرشان باعث دلگرمی بنده بود.

داوران خوبم: دکتر سپهر که گشاده‌رویی ایشان روحیه‌ی مضاعف بود و دکتر رضا پور که با سه صدر پیمان نامه را ویرایش نمودند. تشکر ویژه از آقای مهندس برین که در کارهای آنیاینگاهی بسیار دلسوزانه در همه مراحل مریاری کردند. دوست و همراه عزیزم خانم حسینی که همچون خواهری فداکار محبت بسیاری را نشان کرد.

در پیمان از آقایان دکتر سکوتی، دکتر اسمعیلی، دکتر برنوسی، دکتر منافی، مهندس دولتی، پورفرهادی، عباسی، احمدی نژاد، مهندس کورش جبادی و همچنین خانم‌ها خالصی، محمودی، عبدالمی، ساریخانی، البرزی، حاجی زاده، اما علی پور و همه دوستان عزیزم که نامی از آنها برده نشد، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
I	چکیده .....
	<b>فصل اول: مقدمه و اهداف</b>
۱	۱-۱- مقدمه .....
۳	۲-۱- اهداف .....
	<b>فصل دوم: کلیات و بررسی منابع</b>
۴	۱-۲- آلودگی خاک .....
۴	۲-۲- فلزات سنگین در خاک .....
۵	۳-۲- سرب در خاک .....
۸	۱-۳-۲- جذب سرب توسط گیاه .....
۸	۴-۲- جذب و واجذب فلز در خاک .....
۹	۱-۴-۲- انتقال فلز از فاز محلول خاک به فاز جامد خاک توسط فرایند جذب .....
۹	۲-۴-۲- مکانیسم‌های جذب فلز در خاک .....
۹	۱-۲-۴-۲- جذب اختصاصی فلز در خاک .....
۹	۲-۲-۴-۲- جذب غیراختصاصی فلز در خاک .....
۱۰	۳-۴-۲- اثر ویژگی‌های خاک بر جذب فلزات .....
۱۱	۱-۳-۴-۲- اثر کانی‌های رسی در جذب فلزات خاک .....
۱۱	۱-۱-۳-۴-۲- سیلیکات‌های ورقه‌ای .....
۱۳	۲-۱-۳-۴-۲- جذب همزمان فلزات بر روی سیلیکات‌های ورقه‌ای .....

- ۱۴ ..... pH-۳-۱-۳-۴-۲ کانی‌هایی با بار به وابسته
- ۱۶ ..... جذب همزمان فلزات در کانی‌هایی با بار به وابسته pH
- ۱۷ ..... اثر مواد آلی در جذب فلزات خاک. ۲-۳-۴-۲
- ۱۹ ..... اثر pH در جذب فلزات خاک. ۳-۳-۴-۲
- ۲۰ ..... اثر کربنات کلسیم در جذب فلزات خاک. ۴-۳-۴-۲
- ۲۱ ..... اثر زمان در جذب فلزات خاک. ۵-۳-۴-۲
- ۲۲ ..... اثر دما در جذب فلزات خاک. ۶-۳-۴-۲
- ۲۳ ..... واجذب فلزات در خاک. ۴-۴-۲
- ۲۳ ..... واجذب سرب در خاک. ۱-۴-۴-۲
- ۲۴ ..... همدمای جذب فلزات خاک. ۵-۲

### فصل سوم: مواد و روش‌ها

- ۲۶ ..... ۱-۱- خاک‌های منطقه مورد مطالعه
- ۲۷ ..... ۲-۲- تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها
- ۲۷ ..... ۱-۲-۳- تعیین بافت خاک
- ۲۸ ..... ۲-۲-۳- تعیین پ هاش خاک
- ۲۸ ..... ۳-۲-۳- تعیین کربن آلی خاک
- ۲۸ ..... ۴-۲-۳- تعیین کربنات کلسیم معادل
- ۲۹ ..... ۵-۲-۳- تعیین کربنات کلسیم فعال
- ۲۹ ..... ۶-۲-۳- تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی
- ۳۰ ..... ۳-۳- کانی شناسی خاک‌ها



۳۰	..... ۳-۴- تعیین همدمای سرب خاک.
۳۰	..... ۳-۴-۱- آماده سازی محلول اصلی.
۳۱	..... ۳-۴-۲- آماده سازی محلول زمینه.
۳۱	..... ۳-۴-۳- آماده سازی محلول استاندارد.
۳۱	..... ۳-۴-۴- آماده سازی نمونه ها.
۳۳	..... ۳-۴-۵- برازش داده های جذب و واجذب سرب به مدل های تجربی همدمای جذب.
۳۵	..... ۳-۴-۶- همبستگی رفتار جذب و واجذبی سرب با ویژگی های خاک و ایجاد معادلات رگرسیونی.

#### فصل چهارم: نتایج و بحث

۳۷	..... ۴-۱- ویژگی های عمومی خاک
۳۹	..... ۴-۲- اثر کشت مستمر بر جذب و واجذب سرب در خاک های زراعی و غیر زراعی همجوار.
۴۱	..... ۴-۳- کانی شناسی خاک ها
۴۲	..... ۴-۴- مقادیر تغییرات ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک ها و پارامترهای مدل های همدمای سرب.
۴۵	..... ۴-۵- همدمای جذب سرب
۵۱	..... ۴-۶- پارامترهای همدمای جذب و واجذب سرب در خاک
۵۱	..... ۴-۶-۱- مقادیر پارامترهای همدمای جذب و واجذب سرب در کلیه خاک های مورد مطالعه
۵۵	..... ۴-۶-۲- آزمون مقایسه میانگین جفتی در خاک های مورد مطالعه
۵۵	..... ۴-۶-۳- ضرایب همبستگی ساده (۲) در خاک های مورد مطالعه
۵۸	..... ۴-۶-۴- معادلات رگرسیونی چند متغیره گام به گام
۶۱	..... ۴-۶-۵- ارزیابی بهبود کارایی مدل های رگرسیونی
۶۱	..... ۴-۶-۷- پسماند سرب در خاک

۶۲

۸-۴- نتیجه گیری

۶۲

۹-۴- پیشنهادات

## فصل پنجم: منابع

۶۴

۱-۵- منابع مورد استفاده

چکیده انگلیسی

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۲۶	جدول ۳-۱- مشخصات رده‌بندی خاک‌های نمونه‌برداری شده از استان آذربایجان غربی .....
۳۸	جدول ۴-۱- رده‌بندی و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های زراعی .....
۴۰	جدول ۴-۲- رده‌بندی و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های غیرزراعی همجوار .....
۴۳	جدول ۴-۳- مقادیر میانگین و انحراف معیار ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها (الف، ب، ج و د) در خاک‌های مطالعه .....
۴۹	جدول ۴-۴- نمایه شدت جذب جهت مقایسه ظرفیت جذب سرب در خاک‌های مورد مطالعه .....
۵۲	جدول ۴-۵- مقادیر پارامترهای جذب سرب و ضریب تبیین برای مدل‌های همدمای فروندلیچ، لانگمویر و خطی در خاک‌های مورد مطالعه .....
۵۳	جدول ۴-۶- مقادیر پارامترهای واجذب سرب و ضریب تبیین برای مدل‌های همدمای فروندلیچ، لانگمویر، خطی و ضریب پسماند در خاک‌های مورد مطالعه .....
۵۴	جدول ۴-۷- مقادیر میانگین پارامترهای مدل‌های همدمای فروندلیچ، لانگمویر و خطی برای جذب سرب و درصد تغییرات مقادیر پارامترها در گروه‌بندی خاک‌ها بر اساس درصد نسبی کربنات کلسیم معادل .....
۵۶	جدول ۴-۸- ضرایب همبستگی ساده بین ویژگی‌های مختلف فیزیکوشیمیایی خاک‌ها (الف) و بین ویژگی‌های مختلف فیزیکوشیمیایی خاک‌ها با پارامترهای مدل‌های جذب و واجذب فروندلیچ، لانگمویر و خطی (ب) .....
۵۹	جدول ۴-۹- معادلات رگرسیونی چند متغیره ایجاد شده با روش گام به گام برای برآورد پارامترهای مدل‌های فروندلیچ، لانگمویر و خطی با ویژگی‌های خاک .....
۶۰	جدول ۴-۱۰- معادلات رگرسیونی چند متغیره ایجاد شده با روش گام به گام برای برآورد پارامترهای مدل‌های مختلف همدمای جذب سرب در خاک‌های مورد مطالعه با و بدون وارد کردن کربنات کلسیم به عنوان ورودی مدل رگرسیونی .....

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴۱	شکل ۴-۱- پراش نگارهای پرتو ایکس خاک‌های مورد مطالعه.....
۴۶	شکل ۴-۲- همدمای نمونه جذب سرب خاک‌های مورد مطالعه.....
۴۸	شکل ۴-۳- همدمای جذب سرب در خاک‌های مختلف مورد مطالعه.....

## اثر کشت مستمر بر جذب و واجذب سرب (Pb) در برخی از خاکهای آهکی در استان آذربایجان غربی

### چکیده

فراهمی فلزات سنگین به توزیع فلز بین فاز محلول و جامد خاک بستگی دارد و توسط همدماهای جذب بیان می‌شود. در این پژوهش ۲۰ نمونه خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی متر) متعلق به پنج زیرگروه (*Vertic Calcixerepts (VC)*, *Vertic Endoaquepts (VE)*, *Typic Calcixerepts (TC)*, *Typic Haploxerepts (TH)* و *Typic Endoaquepts (TE)*) از خاک‌های زراعی استان آذربایجان غربی انتخاب شد. همدمای جذب سرب در خاک‌ها با به تعادل رساندن خاک با محلول‌هایی با غلظت‌های صفر، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ میلی‌گرم سرب در لیتر، بدست آمد. کانی ایلیت، رس غالب زیرگروه‌های *TE*، *TH* و *TC* و اسمکتایت کانی غالب رس در زیرگروه‌های *VC* و *VE* بود. در خاک‌های مختلف کربنات کلسیم فعال (*ACCE*) از ۴/۳ تا ۷/۸ درصد؛ کربنات کلسیم معادل (*CCE*) از ۶/۲ تا ۱۶ درصد و رس از ۳۱ تا ۴۵ درصد متغیر بودند. معادلات لانگمویر، فروندلیچ و خطی به داده‌های جذب سرب برازش یافتند. مدل فروندلیچ ( $0.70 < R^2 < 0.98$ ) و مدل خطی ( $0.51 < R^2 < 0.94$ ) برازش مناسبی با داده‌ها داشتند، مدل لانگمویر ( $0.71 < R^2 < 0.99$ ) تنها به برخی از خاک‌های مورد مطالعه، که عمدتاً *CCE* کمی داشتند، برازش یافت. همبستگی مثبت معنی‌داری بین *CCE* با حداکثر جذب سرب ( $P < 0.01$ ) ( $r = 0.84$ )؛ و همچنین با پارامتر *a* فروندلیچ ( $P \leq 0.01$ )؛ ( $r = 0.78$ ) مشاهده شد. همبستگی مثبت معنی‌داری بین سرب جذب شده در غلظت تعادلی ۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر ( $Pb_{0.6}$ ) با *CCE* ( $P \leq 0.01$ )؛ ( $r = 0.84$ ) و رس ( $P \leq 0.01$ )؛ ( $r = 0.75$ ) و بین ضریب توزیع (*K<sub>SD</sub>*) با *ACCE* ( $P \leq 0.01$ )؛ ( $r = 0.55$ ) بدست آمد. مطالعات رگرسیونی چند متغیره گام به گام نشان داد که ۶۲ درصد تغییرات در پارامتر *a* فروندلیچ و ظرفیت جذب سرب در خاک‌های آهکی، ناشی از *CCE* ( $P \leq 0.01$ )؛ ( $r = 0.72$ ) بود. با این حال، *pH* نسبتاً بالای خاک‌های مورد مطالعه (۷/۰ تا ۸/۰) و حضور مقادیر نسبتاً بالای کربنات آزاد و فعال در این خاک‌ها به همراه ظرفیت جذب بالای آنها، امکان

تشکیل فاز جامد رسوب به شکل کربنات سرب را تبیین می‌نماید. پیوندهای قوی و برگشت‌ناپذیر سرب در خاک‌های مورد مطالعه مشاهده شد. نتایج نشان داد که کشت مستمر تاثیر معنی‌داری بر رفتار جذب و واجذب سرب در خاک‌های مورد مطالعه نداشت. احتمالاً این امر ناشی از این واقعیت است که رفتار جذب و واجذب به شدت توسط کربنات کلسیم معادل، فعال و رس کنترل می‌شدند که تاثیر چندانی از کشت مستمر نپذیرفته‌اند. بطور کلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که رس و *CCE* مهمترین ویژگی‌های خاک در کنترل جذب سرب در خاک‌های مورد مطالعه هستند.

واژگان کلیدی: جذب، رس، زیست‌فراهمی، سرب، کربنات کلسیم، واجذب.

فصل اول

مقدمه و اهداف

۱- مقدمه و اهداف

۱-۱- مقدمه

آلودگی خاک به فلزات سنگین، خطراتی جدی برای اکوسیستم‌های طبیعی و سلامت انسان و دیگر موجودات می‌آفریند (Renella و همکاران، ۲۰۰۴). سرب یکی از آلودگی‌های پروسعت خاک در اکثر مناطق است که از راه‌هایی گوناگون، از جمله نهشته‌های اتمسفری، دود اتومبیل‌ها، کاربرد پسماندهای صنعتی و لجن فاضلاب، به خاک راه می‌یابد (Tiller، ۱۹۸۹). بنابراین، افزایش غلظت سرب در خاک و در نتیجه تهدید زیست‌بوم و موجودات زنده به یک نگرانی جدی تبدیل شده است. Lindsay (۱۹۷۹)، مقدار معمول سرب کل در خاک را ۲۰۰-۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیان کرد. مقدار مجاز سرب کل در خاک‌های کشاورزی تحت تیمار فاضلاب ۵۰-۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که این مقدار در خاک‌های آهکی به دلیل کاهش حلالیت سرب، با افزایش pH، افزایش می‌یابد (Renella و همکاران، ۲۰۰۴).

هم‌دماهای جذب، کاربردی گسترده در تعیین جذب و نگهداشت مواد شیمیایی در خاک و ارزیابی و مدیریت مناطق آلوده دارند. همچنین پارامترهای مدل‌های هم‌دماهای جذب و واجذبی به عنوان یک ورودی در برنامه‌های گونه‌بندی شیمیایی عناصر و مدل‌های انتقال املاح به کار می‌روند (Harter، ۱۹۹۱). زیست‌فراهمی<sup>۱</sup> سرب در خاک به توزیع آن در بین فاز محلول و جامد خاک بستگی دارد و با هم‌دماهای جذب/واجذبی بیان می‌گردد (Moreno و همکاران، ۲۰۰۵). فراهمی و توزیع فلزات سنگین در خاک به نوع فلز، نوع خاک، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، فراوانی نسبی و نوع کانی‌های رسی، فراوانی مواد آلی، اکسیدهای آهن و منگنز و آلومینیوم، پتانسیل اکسایش-کاهش، و تراوشات ریشه‌ای در ریزوسفر، بستگی دارد (Anderson و Christensen، ۱۹۸۸).

جذب سرب در خاک به سه شکل است: ۱) جذب ویژه توسط فازهای جامد که شامل جذب شیمیایی و تشکیل کمپلکس‌های درون‌کره‌ای و کمتر برگشت‌پذیر، ۲) جذب غیرویژه یا جذب فیزیکی، شامل جذب الکترواستاتیک (تبادل یونی) و برگشت‌پذیر و تشکیل کمپلکس‌های نسبتاً پایدار برون‌کره‌ای با اجزای خاک و ۳)

<sup>۱</sup>. Bioavailability



تشکیل فازهای رسوبی بسیار پایدار (McBride, 1994). هم‌دماهای واجذب، نشان دهنده برگشت‌پذیری یا برگشت‌ناپذیری پیوندهای تشکیل شده بین سرب و اجزای خاک و لذا زیست‌فراهمی آن است (Businelli و همکاران، ۲۰۰۳).

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، تاثیر زیادی بر جذب یک ماده شیمیایی توسط خاک دارند (WanZuhairi, 2000). شکل غالب جذب سرب بر روی اکسیدهای آهن و منگنز و کانی‌ها، تشکیل کمپلکس‌های درون‌کره‌ای است. در کانی‌های رسی، جذب سرب فقط کمپلکس برون‌کره‌ای نبوده و ترکیبی از برون‌کره‌ای و درون‌کره‌ای است و به pH و قدرت یونی محلول بستگی دارد (Miretzky و همکاران، 2007). ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی خاک از جمله فراوانی رس، اسیدیته پتانسیل اکسایش- کاهش، فراوانی نسبی کربنات کلسیم و فراوانی اکسیدهای آهن و منگنز، عواملی مهم در تعیین جذب و واجذب یک فلز در خاک هستند (Anderson و Christensen, 1988; McLean و Bledsoe, 1992).

کانی‌های کربناتی، از اجزای مهم خاک‌های آهکی هستند و توان بالایی در جذب سطحی فلزات سنگین از جمله سرب و تعیین تحرک و زیست‌فراهمی آن دارند (Elkhatib و همکاران، 1991; McBride, 1980). در pH 7/5-8 و در خاک‌های آهکی تشکیل فاز رسوب کربنات سرب می‌تواند به دلیل مقدار زیاد جذب سرب توسط خاک باشد (Elkhatib و همکاران، 1991; Santillan-Medrano و Jurinak, 1975; Soldatini و همکاران، 1976).

در مقایسه با خاک‌های غیر آهکی، مطالعاتی اندک در مورد جذب سرب در خاک‌های آهکی انجام شده است (Elkhatib و همکاران، 1991). بنابراین، اطلاعاتی اندک از ویژگی‌های جذب و واجذب سرب در خاک‌هایی با مقادیر متفاوت کربنات کلسیم، ارتباط تحرک و فراهمی سرب با ویژگی‌های این خاک‌ها و تفاوت رفتار سرب در زیرگروه‌های مختلف خاک وجود دارد.

## فصل اول: مقدمه و اهداف

---

اهداف این پژوهش عبارت بودند از: (۱) مطالعه رفتار جذب، واجذبی و پس ماند سرب در برخی از خاک‌های آهکی استان آذربایجان غربی، (۲) بررسی اثر کشت مستمر بر رفتار جذب و واجذبی سرب در خاک‌های مورد مطالعه (۳) کمی کردن رفتار جذب و واجذبی سرب در این خاک‌ها، (۴) ارزیابی همبستگی پارامترهای جذب، واجذبی و پس ماند سرب با ویژگی‌های خاک و (۵) ایجاد مدل‌هایی رگرسیونی برای برآورد این پارامترها با استفاده از ویژگی‌های خاک.

فصل دوم

کلیات و بردی مبلغ

## فصل دوم: کلیات و بررسی منابع

### ۲- کلیات و بررسی منابع

#### ۲-۱- آلودگی خاک

آلودگی فلزات سنگین بر اثر عوامل طبیعی یا انسانی صورت می‌گیرد. از عوامل طبیعی می‌توان به بارندگی‌ها، آتشفشان‌ها، گرد و غبار و سنگ‌های اولیه اشاره کرد. انسان با کاربرد کودهای آلی و معدنی، استفاده از علف‌کش‌ها، استخراج فلز معادن، ذوب فلزات، مصرف زغال‌سنگ و دیگر سوخت‌های فسیلی موجب افزایش آلودگی در محیط‌زیست می‌شود، بطوریکه میزان مصرف انرژی، شاخصی از مقدار آلودگی فلزات سنگین در نقاط مختلف جهان است. افزایش فراهمی فلزات در خاک و هوا از این طریق، بیشتر از راه‌های دیگر افزایش آلودگی، جهت جذب گیاهان است (Pendias و Pendias - Kabata، ۲۰۰۰) و به این ترتیب فلزات سمی به زنجیره غذایی راه می‌یابند و منجر به تجمع بیولوژیکی و مسمومیت گیاهان می‌شوند. یکی از راه‌های مهم افزایش آلودگی خاک، فلزات سنگین است.

#### ۲-۲- فلزات سنگین در خاک

فلزات سنگین به گروهی از عناصر گفته می‌شود که عموماً چگالی آنها بیشتر از ۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد. با این تعریف، ۵۳ عنصر از ۹۰ عنصر شناخته شده فلز سنگین هستند. فلزات سنگین هم شامل عناصر ضروری (مانند مس، منگنز، سلنیم، روی، کبالت) و هم غیرضروری (مانند سرب، کادمیم، جیوه) هستند. عناصر ضروری در غلظت‌های پایین برای گیاهان و حیوانات مورد نیاز بوده و بطور کلی عناصر ریزمغذی<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. ولی در غلظت‌های بالاتر، این عناصر نیز می‌توانند برای گیاهان، حیوانات و انسان سمی باشند (Duraisamy و Bolan، ۲۰۰۳). فلزات سنگین با بارهای مثبت یا منفی و شرایط اکسیداسیون و احیای متفاوتی در محلول خاک حضور دارند. فلزات سنگین غالباً به شکل کاتیونی هستند مانند مس (Cu)، سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، جیوه (Hg)، کروم (Cr(III))، نیکل (Ni)، روی (Zn) و کبالت (Co)، با این حال، برخی از این فلزات به شکل آنیونی هستند

<sup>۱</sup>. Micronutrients