



## تغییرات شکل‌های شیمیایی و قابل استفاده آهن در خاکهای تیمار شده توسط سرباره و لجن کنورتور کارخانه ذوب آهن اصفهان

علیرضا کاظمی<sup>۱\*</sup>، حسین شریعتمداری<sup>۲</sup> و محمود کلباسی<sup>۳</sup>

\* (۱) دانشجوی آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان، نویسنده مسئول مکاتبات: kazemi\_alireza\_ak@yahoo.com

(۲) دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان

(۳) استاد دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۵

### چکیده

از میان عناصر مورد نیاز گیاهان، کمبود آهن به عنوان عنصر کم مصرف بیشترین محدودیت را برای محصولات کشاورزی در سرتاسر جهان دارد. برای حل مشکل کمبود آهن در گیاهان از روشهای بسیار پر هزینه همچون کاربرد نمکها و کلاتهای آهن، تعدیل مصنوعی پ- هاش خاک و جایگزینی گونه‌های گیاهی که توانایی زیاد برای جذب آهن دارند، استفاده می‌شود. استفاده از مواد جامد زاید کارخانجات فولادسازی و ذوب آهن مانند سرباره و لجن کنورتور به عنوان مواد اصلاحی خاک در تغذیه آهن می‌توانند مفید باشند. قابلیت دسترسی زیستی و تحرک عناصر، وابسته به شکل‌های شیمیایی آنها در خاک است. این تحقیق با هدف مطالعه اثر کاربرد سه ساله لجن کنورتور و سرباره کارخانه ذوب آهن اصفهان بر (۱) مقدار آهن قابل جذب، (۲) شکل‌های شیمیایی آهن و (۳) چگونگی توزیع این شکلها در خاک سطحی و عمقی سه خاک آهکی در قالب طرح اسپلیت پلات با طرح پایه بلوکهای کامل تصادفی با سه تیمار، در سه تکرار و در دو عمق طی سه سال متوالی اجرا شد. برای تعیین شکل‌های شیمیایی آهن از روش Tessier و Shuman استفاده شد. کاربرد سرباره و لجن کنورتور برای یک، دو و سه سال متوالی سبب شد بیش از ۹۹٪ آهن در فرمهای باقی مانده، متصل به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، بی شکل، آزاد و کمتر از ۱٪ آهن در سایر فرمهای شیمیایی قرار گیرد. ترتیب مقادیر شکل‌های شیمیایی آهن در خاک سطحی و عمقی مزرعه خزانه به صورت: آهن باقی مانده < آهن متصل به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن < آهن آزاد < آهن بی شکل < آهن متصل به اکسیدهای کریستالی منگنز < آهن محلول < آهن متصل به مواد آلی < آهن تبادل‌ی < آهن کربناته بود. ترتیب مقادیر شکل‌های شیمیایی آهن در خاک سطحی و عمقی مزرعه‌های لورک و شروان شبیه مزرعه خزانه بوده با این تفاوت که مقدار آهن کربناته بیشتر از آهن تبادل‌ی بود. نتایج نشان داد کاربرد سرباره و لجن کنورتور طی سه سال متوالی باعث افزایش معنی دار شکل‌های شیمیایی آهن و آهن قابل جذب در خاک هر سه مزرعه شد.

**واژه‌های کلیدی:** آهن قابل جذب؛ سرباره؛ شکل‌های شیمیایی؛ لجن کنورتور



### مقدمه

پ- هاش خاک بین ۵ تا ۸ متغیر است و در این شرایط مقدار آهن مورد نیاز گیاهان بیشتر از مقدار آهن قابل دسترس می‌باشد (Marschner, 1986). (Römheld and

به دلیل این محدودیت، گیاهان مکانیزم‌های مختلف را برای افزایش جذب آهن بکار می‌برند.

تعیین یک شاخص معین برای آهن در خاک مشکل است زیرا قابلیت دسترسی آهن برای گیاهان و آنچه باعث سمیت آهن در گیاهان می‌شود وابسته به شرایط مخصوص مکانی خاک مانند: پ- هاش، پتانسیل کاهش و شرایط آب و خاک است. در خاکهایی که زه کش خوب دارند

در این خاکها انتظار نمی رود آهن برای گیاهان ایجاد سمیت کند (Marschner, 1987) در کل آهن و سایر فلزات به شکل های زیر یافت می شوند:

۱- در محلول خاک به صورت یونهای فلزی آزاد و کمپلکس های فلزی محلول. ۲- به صورت جذب سطحی شده روی ترکیبات آلی در سایت های تبادل یونی. ۳- متصل به مواد آلی. ۴- رسوب کرده به صورت اکسیدها و هیدروکسیدها و کربناتها. ۵- در ساختار کانیهای سیلیکاتی (Tessier et al., 1979).

خاکها مقدار زیادی عناصر سنگین از طریق منابع طبیعی و فعالیتهای انسانی دریافت می کنند که عبارتند از: هوازدگی کانیهای اولیه، استخراج معادن، احتراق سوختهای فسیلی، صنایع شیمیایی و الکترونیکی، متالورژی و مواد زاید. مقادیر کم ترکیبات حاوی عناصر سنگین برای تولید محصولات کشاورزی لازم است. اما وقتی مقدار آن در خاک از یک حدی بیشتر شود ایجادخطر و سمیت می کند. خاکها حاوی مخلوط نامتجانسی از مواد آلی و معدنی هستند. بسته به منشأ عناصر سنگین این عناصر در شکلهای معدنی و ترکیبات شیمیایی مختلف وجود دارند. همچنین در ترکیبات مختلف آلی و معدنی خاک و رسوبات در شرایط مختلف یافت می شوند. عواملی مانند: پ- هاش، شرایط اکسید و احیا (رداکس)، حالتهای اکسیداسیون، دما، وجود مواد آلی و فعالیتهای میکروبیولوژیکی بر شکل، غلظت، تحرک، تبدیل شدن و فرآیند تجمع این عناصر در اکوسیستم نقش دارند. همه عوامل ذکر شده در چرخه بیوژئوشیمیایی عناصر در محیط نقش مهمی دارند (Tokalioglu et al., 2003).

اندازه گیری مستقیم فلزات سنگین در ارتباط با فاز رسوب به علت پیچیدگی سیستم و غلظت

کم عناصر سنگین در داخل فاز رسوب به ندرت امکان پذیر است. بنابر این روشهای غیر مستقیم مانند: میکروپروب، مدل های ترمودینامیکی و روشهای عصاره گیری مرحله ای مورد استفاده قرار میگیرد. تجزیه و تحلیل توسط میکروپروب اطلاعات کمی درباره عناصر سنگین در ذرات رسوب یا کانی ارائه می دهد (Chaejung, 2001).  
گرچه غلظت کل فلزات سنگین در خاک نشانه هایی از سطح آلودگی ارائه می دهد، اما اطلاعات کافی و کاربردی درباره قابلیت زیستی، تحرک، فعالیت و سمیت عناصر ارائه نمی دهد. عناصر در خاکها دارای شکلهای فیزیکوشیمیایی متعددی هستند. بطوریکه قابلیت دسترسی زیستی آنها را تحت تاثیر قرار می دهد. روشهای عصاره گیری مرحله ای شیمیایی بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. در روش عصاره گیری مرحله ای نمونه خاک با مجموعه ای از واکنش دهنده ها برای حداکثر جداسازی و حل شدن شکلهای مختلف عناصر واکنش داده می شود. واکنش دهنده ها برای جداسازی یک قسمت ویژه از خاک بطور انتخابی عمل می کنند و روی فازهای غیر هدف کمترین اثر را داشته و آنها را به مقدار ناچیز حل می کنند. در عمل، عصاره گیری هر یک از فازهای موجود بطور کامل غیر ممکن است (Tessier et al., 1979).

روشهای عصاره گیری مرحله ای بیان شده در مقالات علمی مختلف از نظر نوع ماده عصاره گیر، ترتیب مراحل عصاره گیری و جزئیات عملی مانند: نسبت ماده جامد به عصاره گیر و زمان عصاره گیری با یکدیگر تفاوت زیادی دارند. استفاده از روشهای عصاره گیری مرحله ای موضوع بحثهای زیادی بوده است. در این روش اولین مسئله قدرت انتخابی عصاره گیر می باشد و دومین

مسئله پراکندگی مجدد عناصر در بین فازهای مختلف در حین عصاره‌گیری می‌باشد که ممکن است منجر به نتایج نادرستی شود. محققین نشان داده‌اند تکرار هر مرحله پراکندگی مجدد عناصر را کاهش می‌دهد و برای افزایش بازده روش عصاره‌گیری و دقت جداسازی عناصر رعایت بعضی پارامترها مانند: پ- هاش و پتانسیل احیایی برای عصاره‌گیری هر مرحله ضروری است (Rauret et al., 1989).

بطور کلی انتظار می‌رود مقدار فلزات عصاره‌گیری شده در هر مرحله عصاره‌گیری با مقدار فلزاتی که توسط ترکیبات خاک و یا رسوب باند شده‌اند و تحت تاثیر عصاره‌گیر آزاد شده‌اند برابر باشند. اما در طی مراحل عصاره‌گیری و در هر مرحله فلزات رها شده از ترکیبات مخصوص این فرصت را دارند تا قبل از اینکه عصاره‌گیر و مواد عصاره‌گیری شده در آن مرحله از نمونه خاک یا رسوب جداسازی شوند با ترکیبات غیر محلول دیگر خاک پیوند برقرار کنند و یا اینکه روی ترکیبات جامد به صورت رسوب تازه پراکنده شوند. به این پدیده در اصطلاح پراکندگی مجدد یا توزیع مجدد گفته می‌شود که مطالعات زیادی در این مورد انجام شده و محققان نگران این مسئله‌اند (Li et al., 2001). محققین نشان داده‌اند که برای افزایش بازده روش عصاره‌گیری و دقت جداسازی عناصر مشاهده و رعایت بعضی پارامترها مانند: پ- هاش و پتانسیل کاهش (Eh) برای عصاره‌گیری هر مرحله ضروری است (Rauret et al., 1989). تکرار عصاره‌گیری در هر مرحله ممکن است پراکندگی مجدد عناصر در طی عصاره‌گیری را کاهش دهد (Shuman, 1991) برای ارزیابی و شناسایی گونه‌های شیمیایی و شکل‌های باند شده فلزات سنگین در خاک

عصاره‌گیرهای مختلفی مانند: الکترولیتها ( $MgCl_2$  و  $CaCl_2$ )، بافر اسیدهای ضعیف برای کنترل پ- هاش (استیک اسید و اگزالیک اسید)، عوامل کلات کننده ( $EDTA$  و  $DTPA$ )، عوامل احیا کننده ( $NH_2OH$ )، اسیدهای قوی ( $HClO_4$  و  $HF$ ) و  $HNO_3$  و  $HCl$ ) و مواد قلیایی ( $Na_2CO_3$ ) بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. بسیاری از روش‌های عصاره‌گیری ساده و مرحله‌ای بر اساس روش Tessier و یا نسخه‌های مختلف آن بنیان نهاده شده است. بطوریکه برای تعیین اجزای شیمیایی فلزات از نمونه‌های خاک از عصاره‌گیرهای مختلف استفاده می‌شود تا اطلاعات سودمندی درباره قابلیت دسترسی زیستی و تحرک فلزات بدست آید (Tokalioglu et al., 2003).

این تحقیق با هدف مطالعه اثر کاربرد سه ساله لجن کنورتور و سرباره کارخانه ذوب آهن اصفهان (بر ۱) مقدار آهن قابل جذب، (۲) شکل‌های شیمیایی آهن و (۳) چگونگی توزیع این شکل‌ها در خاک سطحی و عمقی سه خاک آهکی در قالب طرح اسپلیت پلات با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تیمار، در سه تکرار و در دو عمق طی سه سال متوالی اجرا شد.

### مواد و روشها

این تحقیق در سه مزرعه آزمایشی خزان، لورک و شروان متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان با سابقه یک تا سه سال سطوح مختلف ترکیبات سرباره و لجن کنورتور در قالب طرح کترهای خرد شده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی انجام پذیرفت. جدول ۱ نتایج اولیه تجزیه خاک در سه مزرعه آزمایشی را نشان می‌دهد.

تیمارهای آزمایشی عبارتند از: (۱) شاهد (Control) بدون افزایش مواد حاوی آهن. (۲)

بلوک و در هر بلوک ۹ کرت به ابعاد ۳ در ۱۲ متر انتخاب شد. با توجه به غلظت آهن قابل عصاره‌گیری خاک مزرعه‌ها قبل از آزمایش و همچنین میزان آهن قابل جذب ترکیبات لجن کنورتور و سرباره ذوب آهن، مقدار آهن قابل جذب خاک به ۱، ۲، ۳ و ۴ برابر حد بحرانی افزایش یافت.

لجن کنورتور به میزان ۱ و ۲ و ۳ و ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیب (L40, L30, L20, L10). (۳) سرباره ذوب آهن به میزان ۱، ۲، ۳ و ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیب (S40, S30, S20, S10) (Tisdale et al., 2001). برای اعمال تیمارها در هر مزرعه در سال اول سه

جدول ۱- نتایج اولیه تجزیه خاک در سه مزرعه آزمایشی

مزرعه	بافت خاک	pH گل اشباع	ECe (dS/m)	pH (۱:۵) CaCl <sub>2</sub>	OM (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)
خزانه	لوم رسی شنی	۸/۱	۴/۳	۶/۸	۰/۹	۶۰/۶
لورک	لوم رسی سیلتی	۸/۲	۱/۶	۶/۸	۱/۱	۳۹/۵
شرودان	رسی	۸/۰	۲/۰	۶/۹	۲/۲	۳۷/۰

تشکیل می‌دهد. اکسید کلسیم (CaO) از نظر کمی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است (۵۲/۸۵٪). عناصر دیگری چون منیزیم، فسفر، منگنز، سیلیسیم و مقادیر کمی روی در سرباره وجود دارد که در تامین نیاز گیاه میتواند موثر باشد. بطور کلی در لجن کنورتور بیشتر ذرات قطر کمتر از ۰/۵ میلی‌متر داشته و بیشتر از ۵۰٪ اندازه ذرات بین ۰/۵ تا ۰/۱۲۵ میلی‌متر می‌باشند. در سرباره بیش از ۱۷ درصد ذرات قطری بیشتر از ۲ میلی‌متر داشته و اغلب ذرات قطری بین ۰/۲۵ تا ۰/۶۲ میلی‌متر دارند. مقادیر تیمارها با نسبت اشاره شده وبر مبنای ۱۵ سانتی متر عمق خاک برای لجن کنورتور در سطوح مختلف L30=۲۰/۱۱، L20=۱۲/۶۱، L10=۵/۱۱ و L40=۲۷/۶۱ تن در هکتار و برای سرباره در سطوح مختلف S20=۶۷/۸۶، S10=۲/۷۸، S40=۱۵/۰۳ و S30=۱۰/۹۵ تن در هکتار محاسبه شد.

به ترتیب برابر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک تا عمق ۱۵ سانتیمتری از سطح خاک محاسبه و به کرتهای مربوطه اضافه گردیدند. حد بحرانی آهن قابل جذب خاک برای اغلب محصولات زراعی برابر با ۱۰ میلی گرم آهن بر کیلو گرم خاک ذکر شده است (Tisdale et al. 1985). جدول شماره ۲ نتایج تجزیه شیمیایی و جدول شماره ۳ دانه بندی لجن کنورتور و سرباره را نشان می‌دهد. حدود ۶۳/۵ درصد لجن کنورتور را اکسیدهای دو ظرفیتی و سه ظرفیتی آهن تشکیل می‌دهند. از طرفی مقادیر کلسیم، سیلیسیم، منگنز، فسفر و منیزیم هم در لجن قابل ملاحظه بوده که به نوعی حائز اهمیت است. در کارخانجات مختلف بسته به نوع کوره و تکنولوژی مربوطه ترکیب شیمیایی لجن می‌تواند متفاوت باشد. آهن کل سرباره ۱۶/۸۳ درصد می‌باشد و اکسید آهن (III) ۷/۸۷ درصد آن را

تا پایان سال سوم کل کرت به غیر از کرت شاهد به سه کرت تقسیم شد که به ترتیب ۱ سال، ۲ سال و سه سال متوالی کوددهی شدند. از هر پلات آزمایشی دو نمونه خاک مرکب از دو عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتیمتر برداشته شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک و کوبیده شدند و از الک دو میلیمتر عبور داده شدند.

مواد مورد نیاز به صورت یکنواخت در سطح کرتها پخش و تا عمق ۱۵ سانتی متری به خوبی با خاک مخلوط گردید. تیمارها بصورت تصادفی در هر تکرار اعمال گردیدند. در سال دوم یک سوم کرتها رها شد ولی در دو سوم دیگر کرتها مطابق سال اول کوددهی صورت گرفت. در سال سوم، دو سوم کرتها رها و در یک سوم دیگر مطابق سال اول و دوم کوددهی صورت گرفت.

جدول ۲- نتایج تجزیه شیمیایی لجن کنورتور و سرباره (آزمایشگاه مرکزی شرکت ذوب آهن اصفهان)

نتایج تجزیه شیمیایی سرباره			نتایج تجزیه شیمیایی لجن کنورتور		
مقدار (%)	ترکیب	ردیف	مقدار (%)	ترکیب	ردیف
۱۶/۸	Total-Fe	۱	۴۴/۳	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱
۷/۸	FeO	۲	۱۹/۲	FeO	۲
۴/۴	MnO	۳	۶/۱	CaO	۳
۸/۹	SiO <sub>2</sub>	۴	۱/۳	SiO <sub>2</sub>	۴
۵۲/۸	CaO	۵	۰/۲	MgO	۵
۲/۲	MgO	۶	۰/۱	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶
۲/۳	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۷	۰/۲	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۷
۴/۷	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۸	۱/۰	MnO	۸
۰/۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۹	۰/۰	ZnO	۹
۰/۱	S	۱۰	۰/۰	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۱۰
۰/۰	ZnO	۱۱	۰/۱	S	۱۱
۰/۰	Na <sub>2</sub> O	۱۲	۱/۰	Loss on ignition	۱۲
۰/۰	K <sub>2</sub> O	۱۳	۰/۲	Na <sub>2</sub> O	۱۳
			۰/۳	K <sub>2</sub> O	۱۴

جدول ۳- دانه بندی لجن کنور تور و سرباره ( آزمایشگاه مرکزی شرکت ذوب آهن اصفهان )

سرباره		لجن کنورتور	
فرآوانی ذرات (%)	قطر ذرات (mm)	فرآوانی ذرات (%)	قطر ذرات (mm)
۱۷/۴۶	>۲	۳/۴۲	< ۰/۰۴۴
۷/۷۰	۱/۴۱ - ۲	۵/۴۳	۰/۰۴۴ - ۰/۰۵۳
۳/۶۵	۱/۱۹ - ۱/۴۱	۹/۸۳	۰/۰۵۳ - ۰/۰۸۸
۱۶/۱۴	۰/۵ - ۱/۱۹	۱۲/۱۹	۰/۰۸۸ - ۰/۱۰۵
۱۵/۵۵	۰/۲۵ - ۰/۵	۴/۹۶	۰/۱۰۵ - ۰/۱۲۵
۳۰/۵۰	۰/۰۶۲ - ۰/۲۵	۳۱/۳۹	۰/۱۲۵ - ۰/۲۵۰
۹/۰۰	< ۰/۰۶۲	۲۸/۵۶	۰/۲۵۰ - ۰/۵۰۰
		۴/۱۳	> ۰/۵۰۰

استخراج آهن متصل به هیدروکسیدهای آهن (Tessier et al., 1979)، سترات - بیکربنات - دیتیونات سدیم برای استخراج آهن آزاد یا پدوژنیک و هیدروکلریک - نیتریک - هیدرو فلوئوریک اسید برای استخراج فرم باقی مانده آهن عصاره‌گیری شد (Sridhar and Jackson, 1947). شکل باقی مانده آهن شکلی از آهن است که در ترکیبات سیلیکاتی خاک قرار دارد. شکل باقی مانده آهن غیر قابل دسترس برای گیاه است و به راحتی قابل عصاره‌گیری نیست. در پایان هر مرحله غلظت آهن توسط دستگاه جذب اتمی تعیین شد. برای تعیین آهن قابل جذب گیاه از عصاره‌گیر (DTPA-TEA) استفاده شد. این عصاره‌گیر برای بیان غلظت آهن قابل جذب گیاه در خاک به خوبی کاربرد دارد. در این روش ۲۰ گرم خاک توزین و به داخل ظروف پلاستیکی ۸۰ میلی لیتری منتقل شد و آنگاه ۵۰ میلی لیتر محلول ۰/۰۰۵ مولار (DTPA) + ۰/۰۱ مولار  $CaCl_2$  (+) ۰/۱ مولار تری اتانول آمین (TEA) به مجموعه اضافه و برای مدت ۲ ساعت شیک شد. پس از عصاره‌گیری بوسیله کاغذ صافی واتمن ۴۲ غلظت آهن محلول توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

برای مشاهده بهتر نتایج آزمایش سطوح L40 و S40 انتخاب و برای تجزیه‌های لازم مورد استفاده قرار گرفتند. برای تعیین شکلهای شیمیایی آهن از روش Shuman و Tessier استفاده شد. این روش عصاره‌گیری ترکیبی از دو روش عصاره‌گیری مرحله‌ای است که توسط Shuman و Tessier پیشنهاد شده است (Shuman, 1985) و (Tessier et al., 1979). بر طبق این روش نمونه خاک بطور متوالی با: آب مقطر دوبار دیونیزه شده برای استخراج فرم محلول، کلرید منیزیم یک مولار در پ- هاش ۷ برای استخراج فرم تبدیلی، هیپو کلریت سدیم در پ- هاش ۹ برای استخراج آهن متصل به مواد آلی (Shuman, 1983)، بافر استات سدیم - استیک اسید یک مولار در پ- هاش ۵ برای استخراج آهن کربناته (Tessier et al., 1979)، هیدروکسیل آمین - هیدروکلراید ۰/۱ مولار در اسید نیتریک ۰/۰۱ مولار تنظیم شده در پ- هاش ۲ برای استخراج آهن متصل به اکسیدهای کریستالی منگنز (Shuman, 1982)، بافر اگزالات آمونیوم - اسید اگزالیک ۰/۲ مولار در پ- هاش ۳ برای استخراج آهن غیر کریستالی (Schwertman, 1973)، هیدروکسیل آمین - هیدروکلراید ۱ مولار در اسید استیک ۲۵٪ (حجمی / حجمی) برای

در خاک عمقی مزرعه شروودان تیمار 3-L40 به جز 2-L40 با سایر تیمارها در سطح ۵٪ تفاوت معنی دار نشان داده و دارای بیشترین مقدار است. نتایج نشان می‌دهد کاربرد لجن کنورتور طی سه سال متوالی تاثیر بیشتری بر مقدار آهن کل داشته است. احتمالاً این امر به دلیل مقدار بیشتر آهن در ساختار لجن کنورتور ( $\text{FeO} = 19/22\%$  و  $\text{FeO} = 7/87\%$ ) نسبت به سرباره ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 44/3\%$  و  $16/83\%$  آهن کل) است. احتمالاً آهن به میزان بیشتری از ساختار سرباره حل و جدا شده و باعث افزایش مقدار آهن کل شده است. در یک تحقیق اثر کاربرد مواد زاید صنایع (حاوی مقدار قابل توجه فلزات سنگین) بر مقدار فلزات در خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در اثر کاربرد مواد جامد زاید کارخانجات فولاد سازی و ذوب آهن همانند مواد جامد زاید زیستی (مثل: لجن فاضلاب) مقدار کل فلزات سنگین خاک سطحی و عمقی بطور قابل توجهی افزایش یافت (Chaejung, 2001).

مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون‌های  $t$  و LSD در سطح ۵ درصد انجام پذیرفت. برای رسم نمودارها نیز از نرم افزار EXCEL استفاده گردید.

### نتایج و بحث

جدول شماره ۴ مقدار آهن کل را در مزرعه‌های خزانه، لورک و شروودان برای دو عمق ۲۰-۰ و ۴۵-۲۰ سانتیمتر نشان می‌دهد L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. (1,2,3) = سال کوددهی. در هر ستون حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۵٪ ( $P < 0.05$ ) می‌باشد. در خاک سطحی و عمقی مزرعه‌های خزانه و لورک تیمار 3-L40 با سایر تیمارها در سطح ۵٪ اختلاف معنی دار داشته و دارای بیشترین مقدار است. در خاک سطحی مزرعه شروودان تیمار 3-L40 به جز 2-L40 و S40-3 با سایر تیمارها در سطح ۵٪ تفاوت معنی دار نشان می‌دهد و بیشترین مقدار را دارد.

جدول ۴- مقدار آهن کل (mg Fe/kg soil) در خاک سطحی (۲۰-۰ cm) و عمقی (۴۵-۲۰ cm) سه مزرعه آزمایشی

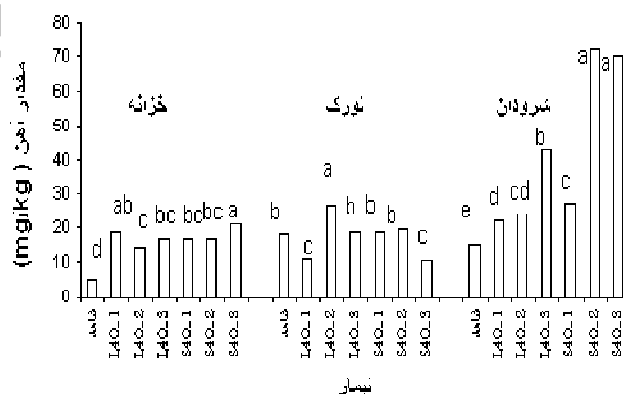
تیمار	مزرعه خزانه		مزرعه لورک		مزرعه شروودان	
	عمق (۲۰-۰ cm)	عمق (۴۵-۲۰ cm)	عمق (۲۰-۰ cm)	عمق (۴۵-۲۰ cm)	عمق (۲۰-۰ cm)	عمق (۴۵-۲۰ cm)
شاهد	۱۶۴۴۲ de	۱۳۹۱۴ c	۲۲۴۴۱ cd	۱۹۱۳۲ c	۲۴۵۲۹ bc	۲۶۶۶۲ b
L40-1	۲۱۶۱۷c	۲۶۱۹۹ b	۲۷۵۳۲ b	۲۰۲۸۰ bc	۲۵۳۸۰ bc	۲۸۴۷۵ b
L40-2	۳۳۱۴۷b	۲۴۸۰۳ b	۲۶۳۰۳ b	۲۱۸۲۰ bc	۲۹۶۵۹ a	۳۲۱۸۱ a
L40-3	۶۳۵۸۱a	۸۳۹۱۵ a	۳۵۳۶۵ a	۲۹۲۹۰ a	۳۰۳۱۶ a	۳۳۰۵۶ a
S40-1	۱۳۲۵۹ e	۱۶۵۵۲ c	۱۹۱۶۴ d	۲۲۸۴۰ b	۲۵۲۶۸ bc	۲۲۹۳۲ c
S40-2	۱۳۲۹۴ e	۱۶۳۰۰ c	۱۹۱۶۰ d	۲۲۳۷۳ bc	۲۳۸۴۴ c	۲۶۷۶۸ b
S40-3	۱۷۲۱۴ d	۱۴۶۰۹ c	۲۲۸۶۳ c	۲۰۵۴۲ bc	۲۷۴۴۲ ab	۲۲۹۹۲ c

۲۰ سانتیمتر) سه مزرعه خزانه، لورک و شروودان را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد مقدار آهن باقی مانده، آهن متصل به اکسیدها و

شکل‌های ۱ تا ۱۸ اثر تیمارها بر مقدار نسبی شکل‌های شیمیایی آهن به ترتیب در خاک سطحی (عمق ۲۰-۰ سانتیمتر) و خاک عمقی (عمق ۴۵-۲۰ سانتیمتر) را نشان می‌دهند.

مقدار آهن محلول خاک سطحی و عمقی در مزرعه شروان بیشتر از دو مزرعه دیگر است. این امر برای مزرعه شروان به دلیل مقدار ماده آلی بیشتر نسبت به دو مزرعه دیگر محتمل به نظر می‌رسد (جدول ۱). در این حالت آهن به خوبی توانسته با لیگاندهای آلی و ترکیبات کلات کننده، تشکیل کلات دهد، به شکل محلول درآید و به همراه سایر مقادیر آهن محلول در اثر عواملی مانند: بارندگی و آبیاری از خاک سطحی به خاک عمقی منتقل شود. شکل ۱ و ۲. اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن محلول (مرحله ۱) در عمق ۲۰-۴۵ و ۲۰-۲ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانه، لورک و شروان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۲،۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۰/۰۵ (P < 0.05) برای هر مزرعه می‌باشد.

هیدروکسیدهای آهن، آهن آزاد و آهن آمورف (بی شکل) بیش از ۹۹٪ آهن کل را در همه تیمارها به خود اختصاص داده است. در حالی که سایر فرمهای شیمیایی آهن کمتر از ۱٪ آهن کل را به خود اختصاص داده اند. این نشان می‌دهد که آهن بیشتر در فرم اکسیدها و هیدروکسیدهای آمورف (بی شکل) و کریستالی در خاک یافت می‌شود. در خاکهای آلی ۵۰٪ آهن در ترکیبات آلی یافت می‌شود. اما در خاکهای معدنی که بیشتر در مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارند و اغلب آهکی و قلیایی هستند بیشتر آهن به شکل اکسیدهای آهن کریستالی، آمورف و بخش باقی مانده در خاک یافت می‌شود (Fletcher, 1978 Hoffman and). نتایج نشان می‌دهد در هر سه مزرعه آزمایشی کاربرد سرباره کنورتور و لجن کنورتور طی دو و سه سال متوالی (L40-2, S40-3) در افزایش مقادیر آهن مراحل عصاره‌گیری و آهن قابل جذب موثرتر بوده است. بطوریکه کاربرد سرباره طی دو و سه سال متوالی سبب افزایش مقدار آهن محلول و تبادل در خاک سطحی و عمقی هر سه مزرعه شد. شکلهای ۳، ۲، ۱ و ۴ این مطلب را به خوبی نشان می‌دهند.

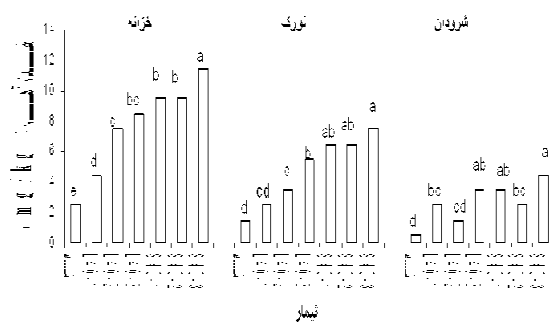


شکل ۱- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن محلول (۰-۲۰)

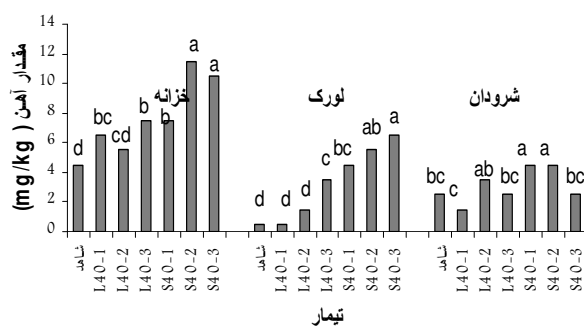




شکل ۲- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن محلول (۴۵-۲۰)



شکل ۳- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن محلول (۲۰-۲۰)



شکل ۴- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن محلول (۴۵-۲۰)

مزرعه‌های آزمایشی سبب کاهش مقدار آهن کربناته شد. شکل‌های ۷، ۶، ۵ و ۸ این مطلب را به خوبی نشان می‌دهند.

در یک تحقیق اثر کاربرد مواد زاید زیستی غنی شده با پس مانده‌های صنایع بر فرم‌های شیمیایی فلزات سنگین مانند آهن، روی، مس و منگنز در خاک بررسی شد. محققین نشان دادند کاربرد این ترکیبات مقدار فلزات متصل به مواد آلی خاک را نسبت به تیمار شاهد به میزان بیشتری در خاک سطحی (عمق ۰-۲۵ سانتیمتر) و خاک عمقی (عمق ۲۵-۵۰ سانتیمتر) افزایش داد.

محققین نشان دادند این افزایش متناسب با میزان کاربرد این ترکیبات است، بطوریکه کاربرد ۲۱۰ مگاگرم آهن بر هکتار باعث افزایش بیشتر آهن متصل به مواد آلی خاک سطحی نسبت به کاربرد ۱۲۶ مگاگرم آهن بر هکتار و تیمار شاهد شد (Sukkariyah et al., 2005).

شکل ۵ و ۶. اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل به مواد آلی (مرحله ۳) در عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۵ و ۴۵-۲۰ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزان، لورک و شرودان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۲، ۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۵٪ ( $P < 0.05$ ) برای هر مزرعه می‌باشد.

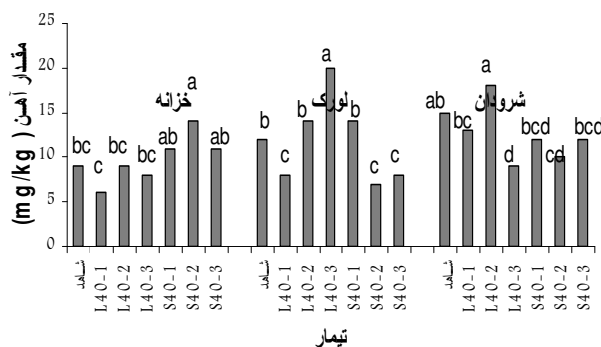
شکل ۳ و ۴. اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن تبدلی (مرحله ۲) در عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۵ و ۴۵-۲۰ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزان، لورک و شرودان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۲، ۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۵٪ ( $P < 0.05$ ) برای هر مزرعه می‌باشد.

مقدار آهن تبدلی در مزرعه‌های خزان و لورک نزدیک به یکدیگر است ولی با مقدار آهن تبدلی مزرعه شرودان تفاوت قابل توجه دارد. این امر با توجه به نزدیکی بافت خاک دو مزرعه خزان و لورک و تفاوت بافت خاک این دو مزرعه با مزرعه شرودان قابل توجیه است (جدول ۱). در یک تحقیق شکل‌های شیمیایی برخی فلزات سنگین در خاک‌های آلوده به مواد زاید صنایع مورد بررسی قرار گرفت. محققین نشان دادند کاربرد این ترکیبات باعث افزایش مقدار آهن تبدلی در خاک سطحی و عمقی می‌شود (Melamed et al., 2003).

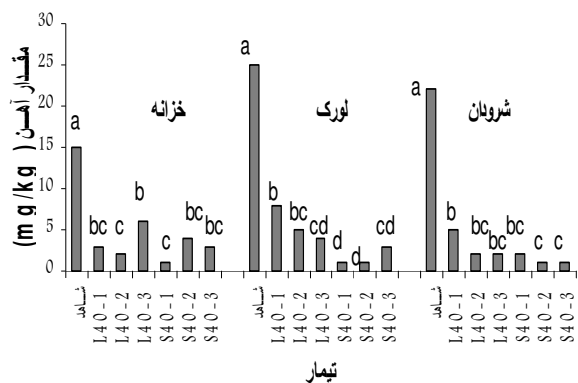
کاربرد سرباره و لجن کنورتور برای دو و سه سال متوالی سبب افزایش مقدار آهن متصل به مواد آلی در خاک سطحی و عمقی هر سه مزرعه شد. درحالی که کاربرد سرباره و لجن کنورتور برای سه سال متوالی در خاک سطحی و عمقی



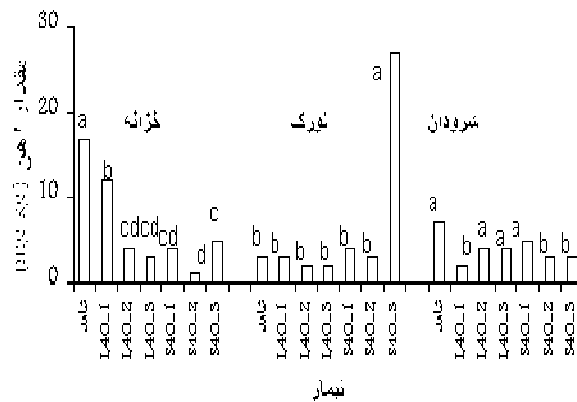
شکل ۵- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل به مواد آلی در عمق (۰-۲۰)



شکل ۶- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل به مواد آلی در عمق (۰-۴۵)



شکل ۷- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل بر اکسید منگنز در عمق (۰-۲۰)

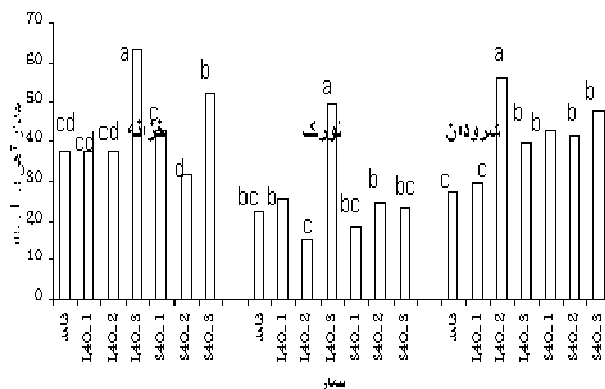


شکل ۸- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل بر اکسید منگنز در عمق (۲۰-۴۵)

حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۰.۰۵٪ (P<0.05) برای هر مزرعه می باشد.

دو محقق نشان دادند فلزات سنگین مانند آهن قادرند با مواد آلی محلول در خاک کلات تشکیل دهند و به دلیل حلالیت بالا در اثر بارندگی و آبیاری از سطح به عمق خاک منتقل شوند.

شکل ۷ و ۸ اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن کربناته (مرحله ۴) در عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزان، لورک و شرودان. = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۲،۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. (Marschner and Wilczynski, 1991)



شکل ۹- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل بر اکسید منگنز در عمق (۲۰-۴۵)



شکل ۱۰- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل بر اکسید منگنز در عمق (۲۰-۴۵)

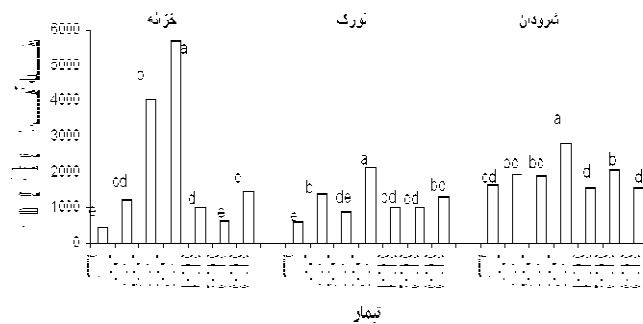
شکل، آهن متصل به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، آهن آزاد و آهن باقی مانده را به میزان قابل توجه نسبت به تیمار شاهد افزایش داده است. شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸ این مطلب را به خوبی نشان می‌دهند.

شکل ۹ و ۱۰. اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن متصل به اکسیدهای منگنز (مرحله ۵) در عمق ۲۰-۴۵ و ۰-۲۰ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانه، لورک و شرودان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۱، ۲ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۰.۰۵٪ ( $P < 0.05$ ) برای هر مزرعه می‌باشد.

مقدار آهن متصل به مواد آلی و آهن کربناته در هر سه مزرعه تقریباً یکسان است. کاربرد سه ساله سرباره در مزرعه شرودان مقدار آهن متصل به مواد آلی را نسبت به دو مزرعه دیگر بیشتر افزایش داده است.

در مزرعه شرودان در واقع آهن به خوبی از این ترکیب حل و جدا شده و به شکل متصل به مواد آلی عصاره‌گیری شده است. شاید یکی از دلایل این امر بهتر مخلوط شدن سرباره با خاک سطحی باشد. یا اینکه احتمالاً آهن موجود در سرباره بهتر از لجن کنورتور با ماده آلی قابل توجه مزرعه شرودان تشکیل کلات داده و به این شکل عصاره‌گیری شده است.

کاربرد لجن کنورتور طی سه سال متوالی (L40-3) در هر سه مزرعه آزمایشی و برای عمق‌های ۲۰-۴۵، ۰-۲۰ سانتیمتر مقدار آهن بی



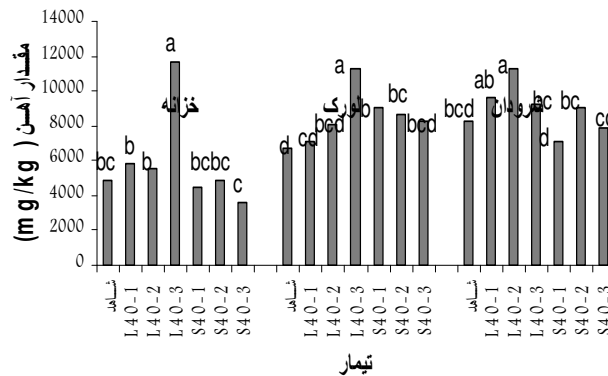
شکل ۱۱- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن بی شکل در عمق (۲۰-۰)



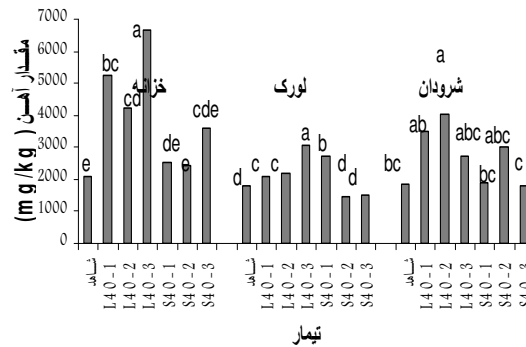
شکل ۱۲- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن بی شکل در عمق (۴۵-۲۰)

بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات ۲،۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۵٪ ( $P < 0.05$ ) برای هر مزرعه می باشد.

شکل ۱۱ و ۱۲. اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن بی شکل (مرحله ۶) در عمق ۲۰-۴۵ و ۲۰-۰ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانه، لورک و شرودان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک



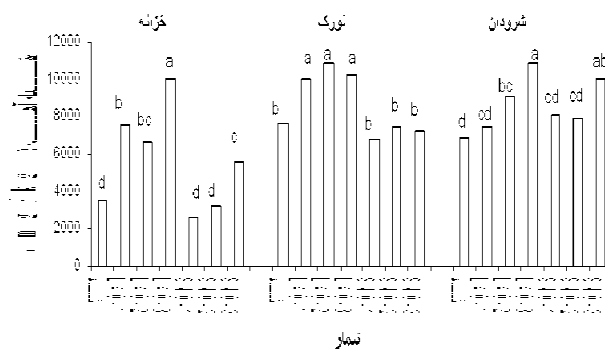
شکل ۱۳- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن باقیمانده در عمق (۰-۲۰)



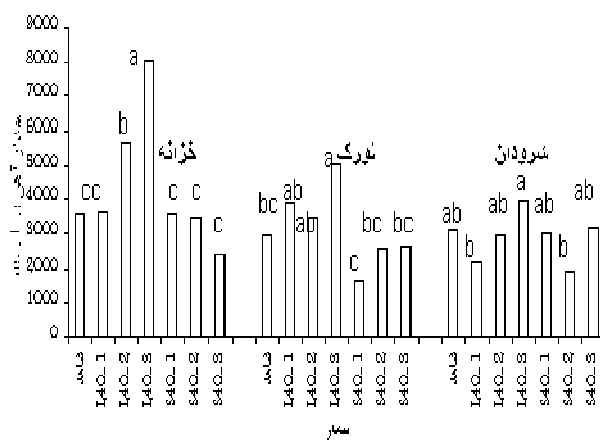
شکل ۱۴- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن باقیمانده در عمق (۰-۴۵)

سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن آزاد (مرحله ۸) در عمق ۲۰-۴۵ و ۲۰-۴۵ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانه، لورک و شروان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۳ و ۲،۱ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۰.۰۵ (P<0.05) برای هر مزرعه می‌باشد.

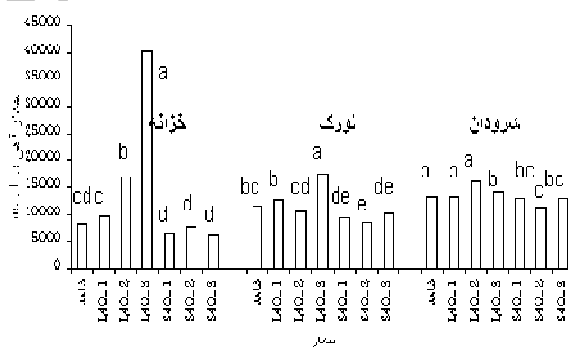
شکل ۱۳ و ۱۴. اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن اکسیدی و هیدروکسیدی (مرحله ۷) در عمق ۲۰-۴۵ و ۲۰-۴۵ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانه، لورک و شروان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۳ و ۲،۱ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۰.۰۵ (P<0.05) برای هر مزرعه می‌باشد. شکل ۱۵ و ۱۶. اثر



شکل ۱۵- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن باقیمانده در عمق (۲۰-۰) (۲۰-۰)



شکل ۱۶- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن باقیمانده در عمق (۲۰-۴۵) (۲۰-۴۵)



شکل ۱۷- اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن باقیمانده در عمق (۱۷-۰) (۲۰-۰)





شکل ۱۸ - اثر کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن باقیمانده در عمق ۱۸ (۴۵-۲۰)

بیشتر ذرات قطر کمتر از ۰/۵ میلیمتر داشته و بیشتر از ۵۰٪ اندازه ذرات بین ۰/۵ تا ۰/۱۲۵ میلیمتر قطر دارند. این امر باعث می‌شود ذرات لجن کنورتور سطح ویژه بیشتری نسبت به ذرات سرباره داشته باشند و بهتر در واکنش‌های شیمیایی شرکت کنند (جدول ۳).

در مزرعه‌های خزانة و لورک کاربرد سه ساله لجن کنورتور (L40-3) برای عمق‌های ۲۰-۰ و ۴۵-۲۰ سانتیمتر، در مزرعه شرودان کاربرد سه ساله سرباره (S40-3) برای عمق ۲۰-۰ و کاربرد سه ساله لجن کنورتور (L40-3) برای عمق ۴۵-۲۰ سانتیمتر باعث افزایش قابل ملاحظه مقدار آهن قابل جذب عصاره‌گیری شده توسط (DTPA) شد.

در مزرعه شرودان در واقع آهن به خوبی از این ترکیب حل و جدا شده و به صورت قابل جذب عصاره‌گیری شده است. شاید یکی از دلایل این امر بهتر مخلوط شدن سرباره با خاک سطحی باشد. یا اینکه احتمالاً آهن موجود در سرباره بهتر از لجن کنورتور با ماده آلی قابل توجه مزرعه شرودان تشکیل کلات داده و به صورت قابل جذب عصاره‌گیری شده است.

شکل ۱۷ و ۱۸. اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن باقی مانده (مرحله ۹) در عمق ۲۰-۰ و ۴۵-۲۰ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانة، لورک و شرودان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۲، ۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۵٪ ( $P < 0.05$ ) برای هر مزرعه می‌باشد. احتمالاً دلیل این امر مقدار بیشتر آهن در ترکیب لجن کنورتور (۱۹/۲۲٪ = اکسید آهن (II) و ۴۴/۳٪ = اکسید آهن (III)) نسبت به سرباره (۷/۸۷ = اکسید آهن (II) و ۱۶/۸۳٪ = آهن کل) است. در واقع آهن به خوبی از لجن کنورتور جدا شده، حل شده و در ساختار اکسیدهای آهن کریستالی، آمورف و بخش باقی مانده خاک سطحی و عمقی این مزارع قرار گرفته است. البته شاید خوب مخلوط شدن این ترکیب با خاک سطحی نیز در افزایش مقدار آهن این بخش تاثیر گذار باشد. البته واکنش لجن کنورتور و سرباره در خاک با یکدیگر متفاوت است. در لجن کنورتور

یک و دو درصد وزنی لجن کنورتور (L1 و L2) تفاوت معنی داری با یکدیگر نشان نداد ولی هر دو با L0.5 اختلاف معنی دار داشتند (دستوری، ۱۳۸۰).

عباسپور نشان داد که کاربرد لجن کنورتور به میزان ۱۶ درصد جرم خاک در یک خاک اسیدی باعث افزایش معنی دار آهن قابل عصاره‌گیری با (DTPA-TEA) شد، بطوریکه مقدار آهن قابل استخراج در این خاک تا حدود ۳۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (عباسپور، ۱۳۷۹).

شکل‌های ۱۹ و ۲۰ اثر سالهای کاربرد سربراره و لجن کنورتور بر مقدار آهن قابل جذب برای عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتیمتری خاک را نشان می‌دهند.

در تحقیقی اثر کاربرد سطوح مختلف سربراره و لجن کنورتور کارخانه ذوب آهن اصفهان بر مقدار آهن قابل عصاره‌گیری توسط (DTPA-TEA) در سه مزرعه تحقیقاتی خزانه، لورک و شرودان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در مزرعه خزانه سطوح سه و چهار درصد وزنی لجن کنورتور و سربراره (L30، L40، S30 و S40) بایکدیگر تفاوت معنی دار ندارند در صورتی که این سطوح با شاهد دارای تفاوت معنی دار می‌باشند. این روند تقریباً در دو مزرعه دیگر نیز مشاهده شد (محمود آبادی، ۱۳۸۳).

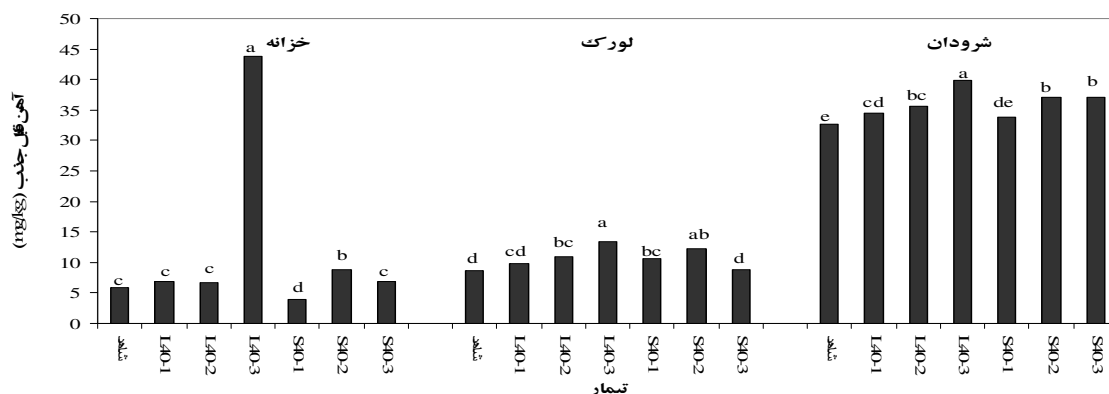
دستوری در تحقیقی نشان داد، تیمار ۰/۵ درصد وزنی لجن کنورتور (L0.5) از نظر آهن قابل جذب تفاوت معنی داری با شاهد ندارد؛ تیمارهای



شکل ۱۹- اثر سالهای کاربرد سربراره و لجن کنورتور بر مقدار آهن قابل جذب برای عمق ۰-۲۰ سانتیمتری خاک

بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات ۲،۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۰/۵ (P<0.05) برای هر مزرعه می‌باشد.

شکل ۱۹، اثر سالهای کاربرد سربراره و لجن کنورتور بر مقدار آهن قابل جذب برای عمق ۰-۲۰ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانه، لورک و شرودان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سربراره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک



شکل ۲۰- اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن قابل جذب برای عمق ۰-۲۰-۴۵

یکدیگر اختلاف معنی دار ندارند. تنها در مزرعه‌های لورک و شرودان، برای آهن متصل به اکسیدهای کریستالی منگنز مقادیر آهن بین دو عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتی متر در سطح ۵ درصد با یکدیگر اختلاف معنی دار دارند.

همچنین میانگین مقادیر آهن قابل جذب عصاره‌گیری شده توسط *DTPA-TEA* (بر حسب mg Fe/kg soil بین عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتیمتر بر اساس آزمون *t* و در سطح ۵ درصد در هر سه مزرعه خزانة، لورک و شرودان با یکدیگر اختلاف معنی دار نشان نمی‌دهند. نتایج مقایسه آماری در شکل ۲۱ نشان داده شده است. احتمالاً به دو دلیل مقدار آهن قابل جذب و فرمهای شیمیایی آهن در خاک سطحی و عمقی (عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتیمتر) با یکدیگر اختلاف معنی دار نشان نمی‌دهند. (۱) شاید مقدار آهن اضافه شده توسط تیمارهای سرباره و لجن کنورتور به خاک در مقایسه با آهن خاک ناچیز باشد. در این حالت فرمهای مختلف آهن و آهن قابل جذب در دو عمق شاید هیچگونه تغییری در حالت کلی نداشته باشند. (۲) شاید آهن موجود در ساختار سرباره و لجن کنورتور به خوبی

شکل ۲۰، اثر سالهای کاربرد سرباره و لجن کنورتور بر مقدار آهن قابل جذب برای عمق ۰-۲۰-۴۵ سانتیمتری خاک سه مزرعه خزانة، لورک و شرودان. L40 و S40 = به ترتیب لجن کنورتور و سرباره به میزان ۴ برابر مقدار توصیه آزمون خاک بر حسب آهن قابل جذب این ترکیبات. ۲، ۱ و ۳ نشان دهنده سال کوددهی است. حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون LSD و در سطح ۵٪ ( $P < 0.05$ ) برای هر مزرعه می‌باشد.

جدول شماره ۵ میانگین مقدار شکل‌های شیمیایی آهن در دو عمق ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتیمتر، در مزرعه‌های خزانة، لورک و شرودان نشان میدهد. گیاهان عناصر مورد نیاز خود را از خاک جذب می‌کنند. بنابر این بررسی شکل‌های شیمیایی عناصری مانند آهن که در ساختار کلروفیل و فرآیند فتوسنتز نقش دارد در خاک سطحی و عمقی ضروری است. نتایج بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که میانگین مقادیر آهن بین عمق‌های ۰-۲۰ و ۲۰-۴۵ سانتیمتر بر اساس آزمون *t* و در سطح ۵ درصد برای هر یک از مراحل عصاره‌گیری، در هیچکدام از مزارع با

توانسته از خاک سطحی به خاک عمقی حرکت کند.

برای هر فرم شیمیایی و در هر ستون حروف مشترک نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار بر اساس آزمون t و در سطح ۰.۰۵ (P<0.05) می‌باشد.

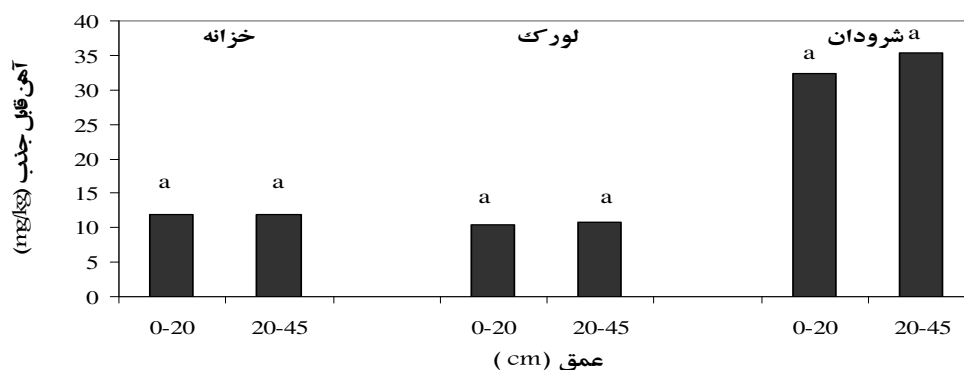
دلیل دوم برای مقدار آهن قابل جذب (DTPA-TEA) شاید مصداق بیشتری داشته باشد. احتمالاً آهن موجود در ساختار سرباره و لجن کنورتور به خوبی توانسته از ساختار این ترکیبات حل شده و جدا شود و وارد فاز محلول خاک بشود. یکی از دلایل این امر می‌تواند تشکیل کلات آهن باشد. این امر برای مزرعه شروودان (به دلیل مقدار ماده آلی بیشتر نسبت به دو مزرعه دیگر) محتمل تر به نظر می‌رسد. در این حالت آهن به خوبی توانسته با لیگاندهای آلی و ترکیبات کلات کننده، تشکیل کلات دهد، به شکل محلول درآید و به همراه سایر مقادیر آهن محلول در اثر عواملی مانند: بارندگی و آبیاری از خاک سطحی به خاک عمقی منتقل شود. این لیگاندهای آلی یا نتیجه

تجزیه مواد آلی خاک هستند مانند: اسید فولویک و یا توسط موجودات زنده خاک مانند: باکتریها و قارچها و ریشه‌های گیاهان ترشح می‌شوند. اصطلاحاً این ترکیبات کلات کننده سایدروفور نامیده می‌شود. مقادیر بیشتر آهن قابل جذب در مزرعه شروودان نسبت به دو مزرعه دیگر می‌تواند تایید کننده این فرضیه باشد. شکل شماره ۲۱ اثر عمق نمونه بر توزیع آهن قابل جذب را نشان می‌دهد.

محققین در تحقیق خود نشان دادند فلزات سنگین مانند آهن قادرند با مواد آلی محلول در خاک کلات تشکیل دهند و به دلیل حلالیت بالا در اثر بارندگی و آبیاری از سطح به عمق خاک منتقل شوند. این محققین همچنین نشان دادند مقدار مواد آلی محلول در خاکهای آهکی و قلیایی به دلیل پ- هاش بالای این خاکها نسبت به خاکهای دیگر بیشتر بوده و در نتیجه مقدار انتقال فلزات از سطح به عمق خاک بیشتر است (Wilczynski, Marschner and) 1991.

جدول ۵- میانگین غلظت شکل‌های شیمیایی آهن (soil mg Fe/kg) در خاک سه مزرعه آزمایشی

مزرعه آزمایشی			عمق (cm)	شکل‌های شیمیایی آهن
شرودان	لورک	خزانه		
۳۹/۷۱ a	۱۷/۷۰ a	۱۵/۴۲ a	۰-۲۰	آهن محلول
۵۴/۱۴ a	۱۷/۸۷ a	۱۵/۰۸ a	۲۰-۴۵	
۲/۵۷ a	۴/۲۸ a	۷/۵۷ a	۰-۲۰	آهن تبدیلی
۲/۸۵ a	۳/۷۱ a	۷/۷۱ a	۲۰-۴۵	
۲۲/۷۱ a	۱۱/۱۴ a	۱۰/۸۵ a	۰-۲۰	آهن متصل به مواد آلی
۱۲/۸۵ a	۱۲/۰۰ a	۱۰/۱۴ a	۲۰-۴۵	
۳/۵۷ a	۶/۴۲ a	۶/۱۴ a	۰-۲۰	آهن کربناته
۵/۲۸ a	۶/۵۷ a	۵/۲۸ a	۲۰-۴۵	
۴۱/۷۱ b	۲۷/۴۲ b	۴۲/۱۴ a	۰-۲۰	آهن متصل به اکسیدهای کریستالی منگنز
۷۸/۸۵ a	۴۳/۲۸ a	۴۲/۰۰ a	۲۰-۴۵	
۱۹۲۲ a	۱۱۵۶ a	۲۱۲۵ a	۰-۲۰	آهن آمورف (بی شکل)
۱۸۴۷ a	۱۰۰۴ a	۱۹۸۱ a	۲۰-۴۵	
۸۷۰۰ a	۸۶۶۹ a	۵۶۷۵ a	۰-۲۰	آهن به صورت اکسیدها و هیدروکسیدها
۸۸۳۷ a	۸۳۷۳ a	۵۷۶۲ a	۲۰-۴۵	
۲۸۴۳ a	۲۸۳۹ a	۴۱۲۵ a	۰-۲۰	آهن آزاد (پدوژنیک)
۲۷۴۷ a	۲۴۸۲ a	۴۰۳۵ a	۲۰-۴۵	
۱۳۴۸۷ a	۱۱۴۹۰ a	۱۳۶۹۷ a	۰-۲۰	آهن باقی مانده
۱۳۵۷۲ a	۱۰۸۱۰ a	۱۶۰۴۰ a	۲۰-۴۵	



شکل ۲۱- اثر عمق نمونه بر توزیع آهن قابل جذب (قابل استخراج توسط DTPA-TEA)

### نتیجه گیری

مقدار آهن باقی مانده، آهن متصل به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، آهن آزاد و آهن آمورف (بی شکل) بیش از ۹۹٪ آهن کل را در همه تیمارها به خود اختصاص داده است. در حالی که سایر فرمهای شیمیایی آهن کمتر از ۱٪ آهن کل را به خود اختصاص داده اند. کاربرد سرباره و لجن کنورتور طی سه سال متوالی باعث افزایش قابل توجه مقدار آهن در هر یک از مراحل عصاره گیری و آهن قابل جذب (DTPA-TEA) برای هر سه مزرعه آزمایشی شد. در کل کاربرد لجن کنورتور نسبت به سرباره طی سه سال متوالی تاثیر بیشتری بر مقدار آهن بی شکل، آهن متصل به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن، آهن آزاد و آهن باقی مانده داشت.

### سپاسگزاری

از کارخانه ذوب آهن اصفهان و دانشگاه صنعتی اصفهان که با همکاری صمیمانه خود شرایط لازم را برای انجام این کار تحقیقاتی فراهم کردند سپاسگزاری می گردد.

### منابع

- (۱) دستوری، ع.، ۱۳۸۰. اثر پوسته های اکسیدی، لجن کنورتور و سرباره کارخانجات ذوب آهن و فولاد سازی بر رشد و عملکرد ذرت در یک خاک آهکی. پایان نامه کارشناسی ارشد خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- (۲) عباسپور، ع.، ۱۳۷۹. بررسی اثر کاربرد لجن کنورتور به عنوان کود آهن و ماده بهساز در خاکهای آهکی و اسیدی. پایان نامه کارشناسی ارشد خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- (۳) محمود آبادی، ع.، ۱۳۸۳. اثر لجن کنورتور و سرباره ذوب آهن بر عملکرد ذرت و جذب برخی عناصر سنگین در سه خاک آهکی. پایان نامه کارشناسی ارشد خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- 4) Chaejung, M. (2001). Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Appl. Geochem.* 16: 1369-1375.
- 5) Hoffman, S.J., and W. K. Fletcher. (1978). Selective sequential extraction of Cu, Zn, Fe, Mn, and Mo from soils and sediments. pp. 289-299. In: Watterson J. R. and Theoblad P. K. (Eds). *Geochemical Exploration*. IMM Publ.

- Micronutrients in agriculture, 2nd ed. SSSA Book Ser. 4. SSSA, Madison, WI.
- 14) Shuman, L. M. (1985). Fractionation methods for soil microelements. *Soil Sci.* 140: 11-22.
  - 15) Shuman, L. M. (1983). Sodium hypochlorite method for extracting microelements associated with organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 656-660.
  - 16) Shuman, L. M. (1982). Separation soil iron and manganese oxide fractions for microelement analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1099-1102.
  - 17) Sridhar, K. and M. L. Jackson. (1947). Layer charge decrease by tetrahedral cation removal and silicon incorporation during natural weathering of phlogopite and saponite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 847-850.
  - 18) Sukkariyah, B. F., G. Evanylo and L. Zelazny. (2005). Recovery and distribution of biosolids-derived trace metals in a clay loam soil. *J. Environ. Qual.* 34: 1843-1850.
  - 19) Tessier, A., P. G. C. Campbell and M. Bisson. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.* 51: 844-851.
  - 20) Tisdale, S. L., W. L. Nelson, J. D. Beaton and J. L. Havlin. (1985). *Soil fertility and fertilizers*, 5 th edition. McMillan publishing co. NY.
  - 21) Tokalioglu, S., S. Kartal and G. Birol. (2003). Application of a tree-stage sequential extraction procedure for the determination of extractable metal contents in highway soils. *Turk. J. Chem.* 27: 333-346.
  - 6) Li, B., Q. Wang, B. Hauang and S. Li. (2001). Evaluation of the results from a quasi-Tessiers sequential extraction procedure for heavy metal speciation in soil and sediment by ICP. MS. *Analitical Sciences*. Vol, 17. Supplement.
  - 7) Marschner, B., and A.M. Wilczynski. (1991). The effect of liming on quantity and chemical composition of soil organic matter in a pine forest in Berlin, Germany. *Plant Soil.* 137: 229-236.
  - 8) Marschner, E. C. (1987). *Mineral nutrition of plants*, Academic press, New York.
  - 9) Melamed, R., X. Cao, M. Chen and L. Q. Ma. (2003). Field assessment of lead immobilization in a contaminated soil after phosphate application. *Sci. Total. Environ.* 305: 117-127.
  - 10) Rauret, G., R. Rubio, J. F. Lopez-Sanchez and E. Casassas. (1989). Specific procedure for metal solid speciation in heavily polluted river sediments. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 35: 89-100.
  - 11) Römheld, V., and H. Marschner. (1986). Mobilization of iron in the rhizosphere of different plant species. pp. 155-204. In: Tinker B. and Läuchli A. (Eds). *Advances in Plant Nutrition, Volume 2*, Praeger Scientific, New York.
  - 12) Schwertman, U. (1973). Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Can. J. Soil. Sci.* 53: 244-246.
  - 13) Shuman, L. M. (1991). Chemical forms of micronutrients in soils. p.113-144. In: Mortvedt J. J. et al. (ed.),

## Chemical forms changes and extractable iron in soils treated with slag and convertor sludge of Esfahan iron melting factory

Alireza Kazemi<sup>1\*</sup>, Hosein Shariatmadari<sup>2</sup> and Mahmood Kalbasi<sup>3</sup>

1) \* M.Sc. Graduated of Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, Corresponding author, email: kazemi\_alireza\_ak@yahoo.com

2) Associate professor, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

3) Professor of Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

### ABSTRACT

Iron deficiency is the most widespread deficiency among the plant micro nutrients. Nowadays, different materials such as inorganic salts, organic chelates, soil acidifying materials and industrial wastes are used to overcome iron deficiency. Slag and convertor sludge of steel factories contain considerable amount of iron. Application of slag and convertor sludge to soil may affect bioavailability and chemical forms of iron in soil. The objectives of this study were to investigate the application effect of slag and convertor sludge of Esfahan iron melting factory on the chemical forms of iron, distribution of these forms and bioavailability of iron in surface (0-20cm) and subsurface (20-45cm) soil of three research fields. Each plot received 3 treatments] control, 4 times critical level as slag (S40) and converter sludge (L40)] in 3 replications for one, two and three years. The Tessier and Shuman method was used for chemical forms of iron analysis. The results indicated that more than 99% of the applied Fe occurred in residual, Fe oxide and hydroxide and free forms. The order of the chemical forms in Khazaneh field was: residual >bound to Fe oxide and hydroxide >free iron >amorphous iron >bound to crystalline Mn oxide >soluble iron >bound to organic matter >exchangeable Fe >carbonate Fe. In Lavark and Shervedan fields the order was the same, but carbonate Fe was more than exchangeable Fe. Application of slag and convertor sludge for three consecutive years was increased the chemical forms and (DTPA) extractable iron in surface and subsurface soils of three experimental fields.

**Keywords:** chemical forms; convertor sludge; extractable Fe; slag