

## کاربرد لجن کنورتور اسیدی شده (ضایعات کارخانه فولاد) به عنوان کود آهن در خاک‌های آهکی

علی عباس‌پور، محمود کلباسی و حسین شریعتمداری<sup>۱</sup>

### چکیده

امکان استفاده از لجن کنورتور، یک محصول فرعی صنایع فولاد، به عنوان کود آهن بررسی شد. حدود ۶۴ درصد وزن این ماده را اکسیدهای دو و سه ظرفیتی آهن و بقیه را به‌طور عمده عناصری مانند کلسیم، سیلیسیم، منگنز، پتاسیم و فسفر تشکیل داده است. این پژوهش به صورت یک آزمایش انکوباسیون در سه خاک آهکی و با نمونه‌های ۴۰۰ گرمی در رطوبت ظرفیت مزرعه و دمای اتاق به مدت دو ماه انجام شد. تیمارها شامل سطوح مختلف لجن کنورتور (۰، ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روز پس از شروع آزمایش صورت گرفت.

نتایج آزمایش نشان داد که کاربرد لجن کنورتور باعث افزایش مختصری در pH خاک شد ولی در عین حال قابلیت جذب آهن خاک را افزایش داد. مقدار افزایش به‌طور عمده متناسب با مقدار لجن مصرفی بود. اسیدی کردن لجن کنورتور باعث افزایش چشم‌گیری در قابلیت جذب آهن خاک شد ولی مقدار قابل جذب این عنصر عموماً با گذشت زمان کاهش یافت. استفاده از لجن کنورتور همراه با گوگرد عنصری قابلیت جذب آهن و منگنز خاک‌ها را در مقایسه با تیمارهای لجن به تنهایی افزایش داد. همچنین استفاده از لجن کنورتور به تنهایی و همراه با گوگرد عنصری و اسیدسولفوریک باعث افزایش مختصری در قابلیت جذب فسفر خاک‌ها شد. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان دریافت که لجن کنورتور فولادسازی پتانسیل کاربرد به‌عنوان کود آهن در خاک‌های آهکی را داراست هرچند که انجام پژوهش‌های بیشتر گلخانه‌ای و مزرعه‌ای به‌منظور بررسی این موضوع مورد نیاز است.

واژه‌های کلیدی: کلروز آهن، لجن کنورتور فولاد، کود آهن

### مقدمه

وجود دارد (۱). مؤثرترین روش برای مرتفع کردن کلروز آهن، استفاده از کلات‌های مصنوعی آهن است ولی به دلیل گرانی عموماً برای محصولات خاص استفاده می‌شود (۸). بنابراین استفاده از ترکیبات جایگزین که بتواند به طور مؤثر کلروز آهن را معالجه نماید ضروری است. تاکنون بررسی‌های

عارضه کلروز آهن عمدتاً در خاک‌های آهکی و قلیایی رایج است که بین ۲۵ تا ۴۵ درصد زمین‌های کشاورزی در سطح جهان آهکی هستند (۲ و ۴). در ایران نیز این عارضه در کلیه مناطق میوه خیز همچون: خراسان، اصفهان، کرج و آذربایجان

۱. به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

والاس و همکاران (۱۳) از مخلوط گوگرد و ضایعات اسیدی آهن حاصله از معادن مس که آبرون سل نامیده می‌شود به منظور تصحیح کلروز آهن ناشی از آهنک استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که مخلوط آبرون سل و گوگرد (۵۰۰ گرم خاک + ۰/۲۵ گرم آبرون سل + ۰/۷۵ گرم گوگرد) مؤثرترین تیمار بود. آنان بر این باور بودند که اسید موجود در آبرون سل نه تنها در قابل جذب کردن آهن مشارکت می‌کند بلکه توانایی باکتری‌های گوگردی خاک را برای اکسایش گوگرد بالا می‌برد. هدف‌های این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. بررسی تغییرات pH، آهن و سایر عناصر غذایی قابل جذب گیاه در خاک ناشی از افزودن مقادیر مختلفی از لجن کنورتور.
۲. به‌کار بردن مخلوطی از لجن کنورتور با گوگرد عنصری و اسیدسولفوریک و بررسی تغییرات pH، آهن و سایر عناصر غذایی قابل جذب گیاه در خاک. بدیهی است در صورت امکان استفاده از این ترکیب به عنوان کود آهن، علاوه بر کاهش مشکل تغذیه گیاه در خاک‌های آهنکی، مشکلات انبار کردن این مواد و همچنین خطرات زیست محیطی حاصل از آن برطرف خواهد شد. علاوه بر آن فروش این ضایعات منبع درآمد اضافی برای کارخانه فولاد نیز خواهد بود.

### مواد و روش‌ها

لجن کنورتور علاوه بر آهن، حاوی مقادیر قابل توجهی کلسیم، منیزیم، آلومینیوم، سیلیسیم، منگنز، روی، فسفر و عناصر دیگر می‌باشد (جدول ۱) که مقادیر آنها بسته به نوع سنگ آهن و روش تولید فولاد، متغیر است (۱۲).

این پژوهش بر روی سه خاک آهنکی از مناطق اصغرآباد، گلشهر و مورچه خورت استان اصفهان انجام گرفت. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه و خشک شدن در مجاورت هوا از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شدند و در هر خاک آهن، منگنز، روی و مس قابل استخراج  $(AB-DTPA)NH_4HCO_3-DTPA$ ، طبق روش پیشنهادی سلطان پور و شواب (۱۰) استخراج شد. تعدادی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها از قبیل pH گل اشباع، EC عصاره اشباع و بافت خاک

زیادی در زمینه استفاده از محصولات جنبی صنایع به عنوان کود آهن در کشاورزی انجام گرفته است. از جمله این ضایعات می‌توان به لجن کنورتور صنایع فولاد اشاره کرد. لجن کنورتور در کارخانه‌های تولید فولاد در مرحله اکسایش چدن مذاب تشکیل می‌شود. در این مرحله هنگامی که اکسیژن به داخل کوره فولاد (کنورتور) تزریق می‌شود گرد و غباری از داخل کوره به بیرون انتشار می‌یابد. این ذرات به تأسیسات و دستگاه‌ها آسیب می‌رسانند، بنابراین توسط آب جمع‌آوری شده و پس از خشک کردن به صورت پودر در انبار نگه‌داری می‌شود. به ازای تولید هر تن فولاد، ۱۳ تا ۱۸ کیلوگرم لجن کنورتور به صورت پودر تولید می‌گردد (۱۲). تولید سالانه مقدار بسیار زیاد این ماده باعث بروز مشکلات انبارداری گشته و همچنین از لحاظ زیست محیطی ممکن است خطراتی را به همراه داشته باشد. ترکیب این ماده حاکی از وجود تعدادی از عناصر پر مصرف (کلسیم، منیزیم و فسفر) و کم مصرف (آهن و منگنز) در غلظت بالاست، پودری بودن آن (سطح ویژه زیاد) و وجود مقادیر نسبتاً زیاد آهن به خصوص آهن دو ظرفیتی امکان کاربرد آن را به عنوان کود آهن تقویت می‌کند.

استرولین و برگر (۱۱) از فروسل حاصل از صنایع فولاد به عنوان کود آهن و ماده اصلاحی استفاده نمودند. این ماده که مخلوطی از اسیدسولفوریک و سولفات‌های آهن است، توانست افزایش عملکرد یونجه و ذرت را به همراه داشته باشد. پارکپیان (۹) از لجن کنورتور به عنوان کود آهن استفاده نمود. این ترکیب که حاوی ۴۳ درصد آهن، ۵ درصد روی و ۲ درصد منگنز بود به دو صورت پودری و دانه‌ای همراه با اسیدسولفوریک (نسبت ۱:۲ اسید به لجن) یا بدون آن مورد استفاده قرار گرفت که بیشترین عملکرد سورگوم در تیمار لجن پودری اسیدی شده دیده شد. فروهر (۳) در بررسی خود، از پودر آهن ضایعاتی حاصل از صنایع فولاد استفاده نمود که ۹۶/۵ درصد ترکیب را اکسید آهن تشکیل می‌داد. استفاده از این ترکیب سبب کاهش معنی‌دار pH و افزایش معنی‌دار آهن قابل استخراج با EDTA در سه خاک مورد آزمایش شد.

جدول ۱. نتایج تجزیه شیمیایی لجن کنورتور

ترکیب	مقدار	ترکیب	مقدار
	-----%-----		-----%-----
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴۴/۳۰	MnO	۱/۰۲
FeO	۱۹/۲۲	ZnO	۰/۰۳
CaO	۶/۱۲	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۰۷
SiO <sub>2</sub>	۱/۳۰	S	۰/۱۳
MgO	۰/۲۴	Na <sub>2</sub> O	۱/۰۲
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۰	K <sub>2</sub> O	۰/۲۰
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۲۷	L.O.I*	۰/۳۰
Loss on ignition :*			

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های

مورد مطالعه			
منطقه	اصغر آباد	گلشهر	مورچه خورت
نمونه برداری			
بافت خاک	شن رسی	لومی	شن لومی
pH	۷/۵	۸/۰	۷/۶
EC (dS/m)	۷/۵	۲/۰	۱۰/۰
مواد آلی (%)	۰/۸۷	۰/۷۰	۰/۴۶
ازت کل (%)	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۲
آهک (%)	۴۳	۴۰	۴۰
فسفر (mg/kg)	۱۵/۰	۱۷/۷	۱۵/۷
پتاسیم (mg/kg)	۱۴۷/۸	۱۲۵/۸	۲۰۷/۲
آهن (mg/kg)	۱۵/۷	۱۳/۷	۶/۳
منگنز (mg/kg)	۲۲/۲	۲۲/۹	۸۴/۹
روی (mg/kg)	۱/۴	۱/۴	۱/۰

و هم‌چنین ماده آلی، ازت خاک، آهک و عناصر عصاره‌گیری شده توسط AB-DTPA در جدول ۲ نشان داده شده است. اثر لجن کنورتور بر خصوصیات خاک در یک آزمایش انکوباسیون و در سه تکرار به صورت طرح پایه کاملاً تصادفی در قالب فاکتوریل اجرا شد. در این آزمایش، نمونه‌های خاک (حدود ۴۰۰

گرم) در دمای معمولی اتاق و رطوبت ظرفیت مزرعه به مدت ۲ ماه نگه‌داری شدند. تیمارها به قرار زیر است:  
 ۱. L<sub>0</sub>: شاهد.

۲. L<sub>4</sub> و L<sub>8</sub>: لجن کنورتور به میزان ۴ و ۸ درصد جرم خاک.

۳. L<sub>4</sub>pH<sub>2</sub> و L<sub>4</sub>pH<sub>4</sub>: لجن اسیدی شده تاپ هاش ۲/۵ و ۴/۷ به میزان ۴ درصد جرم خاک.

۴. S<sub>1</sub>: گوگرد عنصری به میزان ۱ درصد جرم خاک.

۵. L<sub>4</sub>S<sub>1</sub>T و L<sub>4</sub>S<sub>1</sub>: ۴ درصد لجن کنورتور + ۱ درصد گوگرد عنصری و همراه با مایه تلقیح تیو باسیلوس.

برای اسیدی کردن لجن کنورتور از اسید سولفوریک غلیظ و برای تیمارهای گوگرد عنصری از پودر میکرونیزه گوگرد استفاده گردید. مایه تلقیح تیو باسیلوس از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. نمونه‌برداری از تیمارهای مورد آزمایش در زمان‌های ۱، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ روز پس از شروع انکوباسیون انجام گرفت. در این نمونه‌ها EC و pH در تعلیق ۲/۵: ۱ خاک به آب تعیین شد. هم‌چنین عناصر Fe، Mn، Zn، Cu، P و K به وسیله عصاره‌گیر AB-DTPA از خاک استخراج شد. آهن، روی، مس و منگنز عصاره‌گیری شده به وسیله دستگاه جذب اتمی پرکین‌المر-مدل ۳۰۳۰، فسفر به روش اسپکتروفتومتری و پتاسیم با روش فلیم فتومتری اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری pH با استفاده از الکتروود شیشه‌ای متصل به pH متر مدل ۶۲۰ و EC با دستگاه هدایت سنج متر اهم انجام شد.

## نتایج و بحث

### تغییرات آهن قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) اثر متقابل تیمار در زمان نگه‌داری را برای آهن قابل استخراج با AB-DTPA در هر سه خاک آهکی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار نشان می‌دهد. در تیمارهای لجن کنورتور (L<sub>4</sub> و L<sub>8</sub>) متناسب با مقدار لجن، آهن قابل استخراج با AB-DTPA در خاک‌های مورد آزمایش افزایش یافته است (جدول ۵). استفاده از مقادیر زیاد لجن کنورتور (L<sub>8</sub>) باعث کاهش قابلیت استخراج آهن در

جدول ۳. تجزیه واریانس مربوط به pH و مقدار قابل عصاره‌گیری آهن و منگنز خاک‌ها

منابع تغییر				منابع تغییر			
درجه آزادی				درجه آزادی			
میانگین مربعات		میانگین مربعات		میانگین مربعات		میانگین مربعات	
خاک مورچه خورت		خاک گلشهر		خاک اصغر آباد		خاک اصغر آباد	
pH	آهن	pH	آهن	pH	آهن	pH	آهن
منگنز	منگنز	منگنز	منگنز	منگنز	منگنز	منگنز	منگنز
۰/۱۷**	۱۹۴۳/۰**	۰/۵۵**	۳۹۱/۴**	۰/۲۳**	۱۵۹۰/۲۴**	۰/۲۳**	۳۱۷۸۸/۸**
۰/۰۵**	۱۴۹۳/۶**	۰/۱۴**	۷۵۹/۶**	۰/۰۱ <sup>NS</sup>	۶۸۵/۵**	۰/۰۱ <sup>NS</sup>	۱۲۱۴/۸**
۰/۰۲**	۳۶۶/۱**	۰/۰۴**	۶۱/۵**	۰/۰۲**	۱۵۱/۷**	۰/۰۲**	۲۵۲/۰**
۰/۰۰۳	۳/۱	۰/۰۰۳	۱/۸	۰/۰۱	۲۰/۴	۰/۰۱	۱۷/۶

\*\* در سطح احتمال ۱٪ معنی دار است.

NS: در سطح احتمال ۵٪ معنی دار نیست.

جدول ۴. تجزیه واریانس مربوط به EC و مقدار قابل عصاره‌گیری فسفر، پتاسیم و روی خاک‌ها

منابع تغییر				منابع تغییر			
درجه آزادی				درجه آزادی			
میانگین مربعات		میانگین مربعات		میانگین مربعات		میانگین مربعات	
خاک مورچه خورت		خاک گلشهر		خاک اصغر آباد		خاک اصغر آباد	
EC	روی	EC	روی	EC	روی	EC	روی
پتاسیم	فسفر	پتاسیم	فسفر	پتاسیم	فسفر	پتاسیم	فسفر
۱۲/۶ <sup>NS</sup>	۰/۳۱**	۱۱۶۳/۸ <sup>NS</sup>	۲۲/۵**	۷/۷**	۱/۱۳**	۱۴۵/۵ <sup>NS</sup>	۱۰/۸**
۰/۰۴ <sup>NS</sup>	۰/۰۴ <sup>NS</sup>	۲۲۹/۰ <sup>NS</sup>	۲۲/۳**	۲/۳**	۲/۸۱**	۳۷/۹ <sup>NS</sup>	۳/۴*
۷/۸ <sup>NS</sup>	۰/۰۶ <sup>NS</sup>	۹۸۳ <sup>NS</sup>	۳/۳**	۰/۷**	۰/۰۵۲**	۹۸/۵*	۱/۳**
۷/۹	۰/۰۶	۱۰۸۳	۱/۵	۰/۰۱	۰/۱	۵۱/۸	۰/۹
				۰/۰۱	۰/۱۲	۶۰/۰	۱/۹

\*\* در سطح احتمال ۱٪ معنی دار است.

NS: در سطح احتمال ۵٪ معنی دار نیست.

جدول ۵. اثر تیمار و زمان نگهداری بر مقدار آهن (mg/kg) قابل عصاره‌گیری با AB-DTPA

L <sub>4</sub> S <sub>1</sub> T	تیمار							زمان انکوباسیون	شاک
	L <sub>4</sub> S <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	L <sub>4</sub> pH <sub>4</sub>	L <sub>4</sub> pH <sub>2</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>0</sub>		
۶۹/۹	۴۹/۱	۲۸/۵	۱۷۱/۸	۱۸۱/۶	۶۵/۱	۶۵/۲	۲۵/۴	۱	
۵۱/۵	۴۲/۰	۲۵/۳	۱۳۸/۰	۱۵۸/۰	۶۵/۱	۶۱/۱	۲۰/۳	۱۰	
۴۴/۳	۳۹/۹	۲۲/۶	۱۳۸/۸	۱۵۶/۳	۵۷/۹	۴۵/۱	۱۹/۴	۳۰	اصفر آباد
۳۶/۳	۳۷/۷	۲۶/۴	۹۹/۸	۱۴۷/۴	۴۸/۵	۵۱/۷	۱۹/۷	۶۰	
۵۰/۵ <sup>d</sup>	۴۲/۳ <sup>e</sup>	۲۵/۹ <sup>f</sup>	۱۳۷/۱ <sup>b</sup>	۱۶۰/۸ <sup>a</sup>	۵۹/۱ <sup>c</sup>	۵۵/۸ <sup>cd</sup>	۲۱/۲ <sup>f</sup>	میانگین	
۳۴/۴	۳۷/۱	۱۵/۱	۹۶/۰	۱۳۴/۹	۵۴/۳	۳۸/۳	۱۲/۸	۱	
۵۳/۱	۳۶/۴	۲۶/۰	۹۲/۶	۱۱۹/۱	۵۴/۷	۵۴/۹	۱۵/۲	۱۰	
۵۲/۰	۲۳/۵	۱۷/۷	۸۴/۵	۱۲۳/۷	۴۶/۸	۲۹/۸	۱۲/۴	۳۰	گلشهر
۳۲/۴	۳۵/۷	۱۵/۳	۸۲/۵	۱۰۴/۷	۳۸/۰	۳۱/۶	۱۲/۸	۶۰	
۴۳/۰ <sup>d</sup>	۳۳/۲ <sup>e</sup>	۱۸/۵ <sup>f</sup>	۸۸/۹ <sup>b</sup>	۱۲۰/۶ <sup>a</sup>	۴۸/۵ <sup>c</sup>	۳۸۸ <sup>d</sup>	۱۳/۵ <sup>f</sup>	میانگین	
۲۵/۲	۲۵/۲	۸/۹	۱۳۲/۷	۱۵۹/۵	۶۵/۱	۴۲/۹	۶/۸	۱	
۳۶/۵	۳۹/۳	۹/۱	۹۲/۷	۱۳۳/۷	۶۳/۷	۳۸/۶	۶/۷	۱۰	
۳۸/۱	۳۴/۸	۷/۳	۶۸/۹	۸۶/۳	۵۸/۷	۳۵/۱	۵/۶	۳۰	مورچه خورت
۳۳/۹	۲۷/۹	۶/۳	۹۰/۲	۹۴/۰	۵۹/۴	۲۴/۹	۴/۶	۶۰	
۳۸/۴ <sup>d</sup>	۳۶/۸ <sup>d</sup>	۷/۶ <sup>e</sup>	۱۰۲/۸ <sup>b</sup>	۱۱۴/۴ <sup>a</sup>	۶۱/۷ <sup>c</sup>	۳۵/۴ <sup>d</sup>	۵/۹ <sup>e</sup>	میانگین	

در هر ستون اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۷.۵ تفاوتی با یکدیگر ندارند.

### تغییرات منگنز قابل استخراج خاک

اثر متقابل تیمار در زمان نگهداری برای منگنز قابل استخراج با AB-DTPA در هر سه خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار شده است (جدول ۳). تیمارهای حاوی اسیدسولفوریک بهترین نتیجه را در افزایش منگنز قابل استخراج در همه خاکها داشته است (جدول ۶)، ولی در این تیمارها با گذشت ۲ ماه از شروع آزمایش، کاهش معنی داری در منگنز قابل استخراج نسبت به زمان شروع آزمایش ایجاد شده است. کاهش عمده در ۱۰ روز اول اتفاق افتاده، هر چندکه ممکن است این کاهش در زمان کمتر از ۱۰ روز به وقوع پیوسته باشد. به نظر می رسد روند نزولی منگنز قابل استخراج در طول زمان نگهداری به دلیل تغییرات pH و رسوب یا اکسایش منگنز II و III به IV می شود که منگنز IV می تواند به صورت کانی های کم محلول در محیط خاک رسوب کند. تیمارهای حاوی گوگرد عنصری ( $L_4S_1$  و  $L_4S_1T$ ) نیز افزایش معنی داری در منگنز قابل استخراج نشان می دهند. در طول نخستین ماه آزمایش، افزایش معنی داری در مقدار منگنز قابل استخراج از خاک در تیمارهای حاوی گوگرد عنصری دیده می شود، ولی احتمال می رود بخش اعظم اکسایش گوگرد در ماه اول اتفاق افتاده باشد. در ماه دوم میزان قابلیت استخراج منگنز کاهش یافته است. افزودن لجن کنورتور ( $L_4$  و  $L_8$ ) باعث افزایش جزئی در قابلیت استخراج منگنز شده است. علت افزایش را می توان به منگنز موجود در ترکیب لجن (به میزان ۱/۰۲ درصد) نسبت داد.

### تغییرات pH و EC خاک

کاربرد لجن اسیدی کاهش معنی داری در pH خاک نسبت به شاهد به وجود آورده ولی این کاهش در طول زمان نگهداری تا حدودی خنثی شده است (جدول ۷). تأثیر کوتاه مدت تیمارهای اسیدی احتمالاً به دلیل اسید موجود در لجن این تیمارها و افزایش pH در مراحل بعدی به دلیل خنثی شدن این اسید به وسیله آهک خاک است. تیمارهای حاوی گوگرد عنصری کاهش معنی داری را در pH خاک باعث شده اند ولی

طول زمان نگهداری شده است. به نظر می رسد که دلیل آن، افزایش pH و رسوب ترکیبات نامحلول تر آهن در خاک باشد (۷). اسیدی کردن لجن کنورتور ( $L_4pH_4$  و  $L_4pH_2$ ) آهن قابل استخراج با AB-DTPA را در مقایسه با شاهد به طور قابل ملاحظه ای افزایش داده است. هر چند که در طول زمان نگهداری از قابلیت استخراج آهن کاسته شده ولی با این وجود مقدار آن پس از گذشت ۶۰ روز از شروع آزمایش، چندین برابر شاهد می باشد، این در حالی است که pH در این تیمارها نسبت به شاهد کاهش چشم گیری نداشته است. به عنوان مثال در خاک مورچه خورت pH در تیمار  $L_4pH_2$  نسبت به شاهد پس از پایان دوره انکوباسیون کاهش نیافته، این در حالی است که آهن قابل استخراج در تیمار مذکور حدود ۱۷ برابر شاهد افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش شدید آهن قابل استخراج در اثر افزودن لجن اسیدی شده به خاک بدون کاهش pH است. پارکپیان (۹) لجن کنورتور را با اسیدسولفوریک مخلوط نمود (نسبت ۱:۲ گرد و غبار به اسید)، بدین طریق میزان آهن قابل استخراج آن از ۴ به ۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک افزایش یافت ولی پس از گذشت ۶۰ روز مقدار آن به ۶ میلی گرم بر کیلوگرم خاک تنزل یافت. فروهر (۳) گزارش کرد مقدار آهن قابل استخراج با EDTA در خاکهایی که با پودر اکسید آهن ضایعاتی تیمار شده بودند کاهش معنی داری در طول ۶۰ روز آزمایش انکوباسیون داشته است، ضمن این که pH ماده مورد استفاده در این پژوهش حدود ۲ گزارش شده بود.

تیمار ۱ درصد گوگرد عنصری ( $S_1$ ) تفاوت معنی داری در قابلیت استخراج آهن نسبت به شاهد نداشته در حالی که در تیمارهای لجن کنورتور به همراه گوگرد عنصری ( $L_4S_1$ ) و تیوباسیلوس ( $L_4S_1T$ ) افزایش معنی داری در قابلیت استخراج آهن نسبت به شاهد دیده شده ولی نسبت به  $L_4$  افزایشی را نشان نمی دهد. در طول زمان نگهداری مقدار آهن قابل استخراج با AB-DTPA در تیمارهای لجن کنورتور به همراه گوگرد عنصری همانند تیمارهای اسیدسولفوریک کاهش داشته است.

جدول ۶ اثر تیمار و زمان نگهداری بر مقدار منگنز (mg/kg) قابل عصاره گیری با AB-DTPA

L <sub>4</sub> SiT	L <sub>4</sub> Si	Si	تیمار				زمان				شاخ
			L <sub>4</sub> pH <sub>4</sub>	L <sub>4</sub> pH <sub>2</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>0</sub>	انکوباسیون			
۶۲/۶	۴۹/۷	۵۱/۹	۵۹/۳	۷۷/۶	۴۶/۴	۲۴/۴	۲۶/۶	۱			
۶۸/۹	۷۵/۱	۸۵/۱	۲۱/۷	۲۲/۹	۳۱/۳	۲۵/۲	۱۵/۹	۱۰			
۹۴/۶	۹۶/۷	۹۳/۴	۱۹/۳	۱۹/۶	۱۹/۴	۲۱/۳	۱۶/۹	۳۰			اصفر آباد
۷۰/۶	۴۱/۳	۷۳/۷	۱۰/۴	۱۲/۷	۱۲/۶	۱۵/۶	۱۰/۴	۶۰			
۷۴/۳ <sup>a</sup>	۶۵/۷ <sup>b</sup>	۷۶/۵ <sup>a</sup>	۳۷/۷ <sup>d</sup>	۳۳/۲ <sup>c</sup>	۲۷/۴ <sup>d</sup>	۲۱/۶ <sup>c</sup>	۱۷/۵ <sup>f</sup>	میانگین			
۲۸/۲	۲۹/۸	۲۷/۳	۱۹/۹	۲۶/۸	۱۴/۸	۱۲/۲	۱۰/۱	۱			
۳۲/۲	۲۱/۰	۲۷/۰	۱۰/۵	۱۲/۵	۱۰/۹	۲۳/۳	۱۰/۰	۱۰			
۲۷/۲	۱۳/۸	۱۹/۷	۹/۱	۱۰/۱	۹/۶	۸/۰	۸/۸	۳۰			گلشهر
۱۰/۶	۱۴/۳	۹/۹	۸/۱	۶/۴	۶/۴	۷/۰	۴/۸	۶۰			
۲۴/۶ <sup>a</sup>	۱۹/۷ <sup>b</sup>	۲۱/۰ <sup>b</sup>	۱۱/۹ <sup>c</sup>	۱۳/۹ <sup>c</sup>	۱۰/۴ <sup>cd</sup>	۱۲/۶ <sup>c</sup>	۸/۴ <sup>d</sup>	میانگین			
۲۷/۹	۲۵/۲	۲۳/۹	۴۵/۸	۵۵/۹	۱۲/۲	۱۰/۲	۷/۹	۱			
۲۸/۱	۴۰/۵	۳۹/۴	۱۱/۷	۱۵/۲	۱۳/۰	۹/۸	۶/۱	۱۰			
۲۷/۹	۴۰/۱	۱۶/۳	۶/۵	۹/۴	۸/۶	۷/۲	۵/۴	۳۰			مورچه خورت
۱۵/۰	۹/۷	۱۱/۵	۸/۲	۶/۷	۷/۶	۳/۴	۲/۳	۶۰			
۲۷/۳ <sup>a</sup>	۲۸/۹ <sup>a</sup>	۲۲/۸ <sup>b</sup>	۱۸/۱ <sup>c</sup>	۲۱/۸ <sup>b</sup>	۱۰/۴ <sup>d</sup>	۷/۷ <sup>c</sup>	۵/۴ <sup>f</sup>	میانگین			

در هر ستون اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵٪ تفاوتی با یکدیگر ندارند.

جدول ۷. اثر تیمار و زمان نگهداری بر pH خاکها

L <sub>4</sub> S <sub>1</sub> T	L <sub>4</sub> S <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	تیمار				زمان				خاک	
			L <sub>4</sub> pH <sub>4</sub>	L <sub>4</sub> pH <sub>2</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>0</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>0</sub>	انکوباسیون		
۷/۵۶	۷/۸۰	۷/۵۸	۷/۶۰	۷/۵۰	۸/۰۰	۷/۷۰	۷/۷۶	۷/۷۶	۷/۷۶	۷/۷۶	۱	اصفر آباد
۷/۶۱	۷/۶۱	۷/۵۵	۷/۶۷	۷/۷۲	۷/۹۳	۷/۸۶	۷/۸۳	۷/۸۳	۷/۸۳	۷/۸۳	۱۰	
۷/۶۵	۷/۶۳	۷/۵۳	۷/۷۳	۷/۷۰	۸/۰۳	۶/۸۶	۷/۷۶	۷/۷۶	۷/۷۶	۷/۷۶	۳۰	
۷/۶۳	۷/۵۵	۷/۵۳	۷/۷۶	۷/۶۷	۷/۹۶	۷/۸۳	۷/۸۳	۷/۸۳	۷/۸۳	۷/۸۳	۶۰	
۷/۶۱ <sup>cd</sup>	۷/۶۵ <sup>cd</sup>	۷/۵۵ <sup>d</sup>	۷/۶۹ <sup>c</sup>	۷/۶۵ <sup>cd</sup>	۷/۹۸ <sup>a</sup>	۷/۸۹ <sup>b</sup>	۷/۷۷ <sup>b</sup>	۷/۷۷ <sup>b</sup>	۷/۷۷ <sup>b</sup>	۷/۷۷ <sup>b</sup>	میانگین	
۷/۸۸	۷/۸۵	۷/۸۳	۷/۶۰	۷/۳۸	۸/۰۰	۷/۹۶	۷/۹۸	۷/۹۸	۷/۹۸	۷/۹۸	۱	
۷/۷۱	۷/۷۵	۷/۷۰	۷/۸۰	۷/۶۷	۸/۲۵	۸/۱۵	۸/۱۱	۸/۱۱	۸/۱۱	۸/۱۱	۱۰	
۷/۵۶	۷/۵۷	۷/۶۰	۷/۶۵	۷/۷۲	۸/۱۰	۸/۰۳	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۸/۰۰	۳۰	
۷/۳۶	۷/۵۰	۷/۶۲	۷/۶۵	۷/۵۰	۸/۰۰	۸/۰۳	۸/۰۱	۸/۰۱	۸/۰۱	۸/۰۱	۶۰	
۷/۶۳ <sup>bc</sup>	۷/۶۷ <sup>b</sup>	۷/۶۹ <sup>b</sup>	۷/۶۷ <sup>b</sup>	۷/۵۷ <sup>c</sup>	۸/۰۹ <sup>a</sup>	۸/۰۴ <sup>a</sup>	۸/۰۳ <sup>a</sup>	۸/۰۳ <sup>a</sup>	۸/۰۳ <sup>a</sup>	۸/۰۳ <sup>a</sup>	میانگین	
۷/۸۰	۷/۷۲	۷/۷۲	۷/۶۰	۷/۶۳	۷/۹۸	۷/۹۳	۷/۶۵	۷/۶۵	۷/۶۵	۷/۶۵	۱	مورچه خورت
۷/۶۶	۷/۶۵	۷/۶۳	۷/۶۳	۷/۶۸	۸/۰۰	۷/۸۸	۷/۷۰	۷/۷۰	۷/۷۰	۷/۷۰	۱۰	
۷/۵۸	۷/۵۵	۷/۶۵	۷/۷۲	۷/۶۲	۷/۹۰	۷/۷۰	۷/۷۳	۷/۷۳	۷/۷۳	۷/۷۳	۳۰	
۷/۵۵	۷/۵۳	۷/۵۲	۷/۶۸	۷/۷۵	۷/۸۸	۷/۸۶	۷/۷۰	۷/۷۰	۷/۷۰	۷/۷۰	۶۰	
۷/۶۵ <sup>cd</sup>	۷/۶۱ <sup>d</sup>	۷/۵۸ <sup>d</sup>	۷/۶۶ <sup>c</sup>	۷/۶۷ <sup>c</sup>	۷/۹۴ <sup>a</sup>	۷/۸۲ <sup>b</sup>	۷/۶۹ <sup>c</sup>	۷/۶۹ <sup>c</sup>	۷/۶۹ <sup>c</sup>	۷/۶۹ <sup>c</sup>	میانگین	

در هر ستون اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۰.۵ تفاوتی با یکدیگر ندارند.



جدول ۸. مقایسه اثر تیمارها بر مقدار فسفر، پتاسیم و روی (mg/kg) قابل عصاره گیری با AB-DTPA و EC (dS/m) خاک‌ها (آزمون دانکن)

خاک مورچه خورت				خاک گلشهر				خاک اصغر آباد				تیمار
EC	روی	پتاسیم	فسفر	EC	روی	پتاسیم	فسفر	EC	روی	پتاسیم	فسفر	
۲/۲ <sup>b</sup>	۱/۴ <sup>b</sup>	۲۷۱/۹ <sup>a</sup>	۲۰/۱ <sup>a</sup>	۰/۹ <sup>d</sup>	۱/۶ <sup>b</sup>	۱۳۹/۵ <sup>a</sup>	۱۳/۰ <sup>c</sup>	۳/۱ <sup>c</sup>	۲/۴ <sup>b</sup>	۱۴۰/۴ <sup>a</sup>	۱۱/۱ <sup>b</sup>	L <sub>0</sub>
۲/۲ <sup>b</sup>	۱/۴ <sup>b</sup>	۲۵۵/۳ <sup>a</sup>	۲۱/۷ <sup>a</sup>	۰/۸ <sup>d</sup>	۱/۸ <sup>b</sup>	۱۴۷/۹ <sup>a</sup>	۱۴/۲ <sup>b</sup>	۳/۱ <sup>c</sup>	۲/۳ <sup>b</sup>	۱۴۰/۵ <sup>a</sup>	۱۲/۳ <sup>ab</sup>	L <sub>4</sub>
۲/۱ <sup>b</sup>	۱/۵ <sup>b</sup>	۲۵۳/۵ <sup>a</sup>	۲۱/۹ <sup>a</sup>	۰/۸ <sup>d</sup>	۱/۸ <sup>b</sup>	۱۳۸/۴ <sup>a</sup>	۱۵/۱ <sup>ab</sup>	۲/۹ <sup>c</sup>	۲/۴ <sup>b</sup>	۱۳۲/۸ <sup>a</sup>	۱۲/۵ <sup>ab</sup>	L <sub>8</sub>
۳/۰ <sup>a</sup>	۱/۷ <sup>a</sup>	۲۵۸/۱ <sup>a</sup>	۲۱/۹ <sup>a</sup>	۲/۶ <sup>a</sup>	۲/۴ <sup>a</sup>	۱۴۵/۸ <sup>a</sup>	۱۶/۰ <sup>a</sup>	۳/۹ <sup>b</sup>	۲/۹ <sup>a</sup>	۱۴۲/۲ <sup>a</sup>	۱۲/۸ <sup>ab</sup>	L <sub>4pH2</sub>
۲/۹ <sup>a</sup>	۱/۷ <sup>a</sup>	۲۶۲/۶ <sup>a</sup>	۲۰/۶ <sup>a</sup>	۲/۴ <sup>b</sup>	۱/۹ <sup>ab</sup>	۱۴۶/۷ <sup>a</sup>	۱۵/۳ <sup>ab</sup>	۳/۹ <sup>b</sup>	۲/۸ <sup>a</sup>	۱۴۳/۶ <sup>a</sup>	۱۲/۷ <sup>ab</sup>	L <sub>4pH4</sub>
۲/۸ <sup>a</sup>	۱/۳ <sup>b</sup>	۲۶۶/۱ <sup>a</sup>	۱۸/۳ <sup>b</sup>	۲/۳ <sup>bc</sup>	۱/۴ <sup>b</sup>	۱۴۱/۶ <sup>a</sup>	۱۵/۲ <sup>ab</sup>	۴/۲ <sup>a</sup>	۲/۶ <sup>ab</sup>	۱۴۷/۲ <sup>a</sup>	۱۱/۷ <sup>b</sup>	S <sub>1</sub>
۲/۹ <sup>a</sup>	۱/۶ <sup>ab</sup>	۲۳۹/۹ <sup>a</sup>	۱۹/۸ <sup>ab</sup>	۲/۳ <sup>bc</sup>	۲/۰ <sup>ab</sup>	۱۴۲/۸ <sup>a</sup>	۱۵/۴ <sup>ab</sup>	۳/۹ <sup>b</sup>	۲/۵ <sup>b</sup>	۱۴۵/۰ <sup>a</sup>	۱۲/۶ <sup>ab</sup>	L <sub>4</sub> S <sub>1</sub>
۲/۸ <sup>a</sup>	۱/۴ <sup>b</sup>	۲۶۵/۲ <sup>a</sup>	۱۸/۸ <sup>b</sup>	۲/۲ <sup>c</sup>	۱/۶ <sup>b</sup>	۱۴۱/۲ <sup>a</sup>	۱۵/۴ <sup>ab</sup>	۴/۰ <sup>ab</sup>	۲/۷ <sup>ab</sup>	۱۴۷/۱ <sup>a</sup>	۱۳/۰ <sup>a</sup>	L <sub>4</sub> S <sub>1</sub> T

در هر ستون اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک در سطح احتمال ۵٪ تفاوتی با یکدیگر ندارند.

حلالیت روی همانند منگنز و آهن شدیداً به pH وابسته است و با کاهش pH، حلالیت کانی‌های حاوی روی افزایش می‌یابد (۷).

### نتیجه‌گیری

کاربرد لجن کنورتور باعث افزایش مقدار آهن قابل جذب خاک‌ها شد و مقدار افزایش عموماً متناسب با مقدار لجن مصرفی بود. استفاده از لجن کنورتور همراه با گوگرد عنصری و اسید سولفوریک قابلیت جذب آهن و منگنز را در خاک‌ها در مقایسه با تیمارهای لجن به تنهایی افزایش داد که اسیدسولفوریک از این نظر مؤثرتر از گوگرد عنصری بود. استفاده از لجن کنورتور به تنهایی و یا همراه با گوگرد عنصری و اسیدسولفوریک افزایش مختصری را در قابلیت جذب فسفر خاک‌ها باعث شد. کاربرد مقادیر زیاد لجن کنورتور باعث افزایش جزئی در pH خاک‌ها شدند در حالی‌که اسیدسولفوریک و گوگرد عنصری کاهش pH خاک‌ها را به همراه داشتند. با گذشت زمان در آزمایش انکوباسیون، یک روند نزولی در مقدار آهن و منگنز قابل استخراج خاک‌ها در همه تیمارها دیده شد. شدت کاهش در تیمارهای حاوی گوگرد عنصری کندتر بود. کاربرد لجن کنورتور همراه با گوگرد عنصری و اسیدسولفوریک، هدایت الکتریکی خاک‌ها را افزایش داد ولی تأثیر اسیدسولفوریک در این ارتباط مشهودتر بود. به منظور تأیید و کاربردی شدن نتایج این پژوهش، انجام بررسی‌های گلخانه‌ای و مزرعه‌ای با استفاده از گیاهان حساس به استرس آهن و کاربرد لجن کنورتور به‌عنوان کود آهن پیشنهاد می‌شود.

بر خلاف تیمارهای اسید سولفوریک در طول زمان نگره‌داری افزایش معنی‌داری در pH خاک دیده نشده که نشان‌دهنده اثر دراز مدت‌تر گوگرد بر کاهش pH خاک است. کاهش pH خاک‌های آهکی در اثر افزودن گوگرد عنصری توسط محققان زیادی تأیید شده است (۵ و ۶). تیمارهای  $L_4S_1$  و  $L_4S_1T$  آثار مشابهی بر کاهش pH خاک داشته‌اند احتمالاً گونه‌های تیوباسیلوس استفاده شده در شرایط این خاک فعال نبوده‌اند. مقادیر زیاد لجن کنورتور به تنهایی باعث افزایش جزئی در pH خاک شده که به دلیل بالا بودن pH لجن (pH تعلیق ۲/۵ : ۱ لجن به آب برابر ۱۱/۲) می‌باشد.

در خاک‌های مورد آزمایش تنها تیمارهای حاوی اسیدسولفوریک و گوگرد عنصری باعث افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی نسبت به شاهد گردیده‌اند (جدول ۸). به‌طور کلی در تیمارهایی که باعث آزاد شدن  $H^+$  شده (اسید سولفوریک و گوگرد عنصری) حلالیت املاح و نمک‌های موجود در خاک و لجن افزایش یافته و بدین طریق هدایت الکتریکی خاک افزایش می‌یابد.

### تغییرات فسفر، پتاسیم و روی قابل استخراج

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴)، اثر تیمارها بر فسفر و روی قابل استخراج با AB-DTPA را در هر سه خاک مورد آزمایش در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار نشان داده در حالی‌که پتاسیم قابل استخراج حتی در سطح ۵٪ معنی‌دار نشده است. کاربرد لجن کنورتور به تنهایی با وجود افزایش جزئی در pH خاک موجب افزایش مختصری در قابلیت استخراج فسفر نسبت به شاهد شده است (جدول ۸). در خاک‌های مورد آزمایش، کاربرد تیمارها تأثیر معنی‌داری در پتاسیم قابل استخراج با AB-DTPA نداشته‌اند (جدول ۸). روی قابل استخراج با AB-DTPA تنها در تیمارهای اسیدسولفوریک افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد داشته است (جدول ۸).

## منابع مورد استفاده

۱. سالاردینی، ع. ا. ۱۳۷۱. حاصل خیزی خاک. چاپ چهارم، انتشارات دانشگاه تهران.
۲. سالاردینی، ع. ا. و م. مجتهدی، ۱۳۶۷. اصول تغذیه گیاه. چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
۳. فروهر، م. ۱۳۷۱. بررسی امکان استفاده از پودر اکسید آهن ضایعاتی حاصل از فرایند اسیدشویی فولاد به عنوان کود آهن، دانشکده کشاورزی، پایان نامه کارشناسی ارشد خاک شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۴. کلباسی، م. ۱۳۷۴. کلروز آهن در گیاهان و راه های مبارزه با آن. نشریه شماره ۱۸، سازمان پارکها و فضای سبز اصفهان.
5. Kalbasi, M., F. Filsoof and Y. Rezai-Nejad. 1988. Effect of sulfur treatment on yield and uptake of Fe, Zn and Mn by corn, sorghum and soybean. *J. Plant Nutr.* 11: 1353-1360.
6. Kaplan, M. and S. Orman. 1998. Effect of elemental sulfur and sulfur containing waste in a calcareous soil in Turkey. *J. Plant Nutr.* 21(8): 1655-1665.
7. Lindsay, W. L. 1992. *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
8. Mortvedt, J.J. 1988. Iron source and management practices for correcting iron chlorosis problem. *J. Plant Nutr.* 9: 94-97.
9. Parkpian, P. 1983. *The Potential of Iron Waste By-Product as an Iron Fertilizer in Alkaline Soil*. Texas A & M University.
10. Soltanpour, P.N. and A.P. Schwab. 1977. A new soil test for simultaneous extraction macro and micro-nutrients in alkaline soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 8(3): 195-207.
11. Stroehlin, J.L. and C. Berger. 1963. The use of ferrosul, a steel industry by-product, as a soil amendment. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 27: 51-53.
12. United Nations. 1990. *The recuperation and economic utilization of by-product of the iron and steel industry*. Economic Commission for Europe. Geneva.
13. Wallace, A., Y.S. Samman and C.A. Wallace. 1982. Correction of lime-induced chlorosis in soybean in a calcareous soil with sulfur and an acidifying iron compound. *J. Plant Nutr.* 5(4-5): 949-953.