

بررسی برخی صفات زراعی ذرت (*Zea mays L.*) متاثر از شکل‌های آهن در خاک‌های استان آذربایجان شرقی

ندا پاشاپور^۱، عادل ریحانی‌تبار^۲، شاهین اوستان^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۱/۲۵

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

مسئول مکاتبه: areyhani@tabrizu.ac.ir

چکیده

آهن یکی از مهم‌ترین عناصر کم مصرف برای گیاهان است و قابلیت دسترسی آن در خاک‌های آهنی کم می‌باشد. قابلیت دسترسی آهن برای گیاه به توزیع نسبی شکل‌های مختلف شیمیایی آن در خاک بستگی دارد که البته تابعی از ویژگی‌های خاک است. در این پژوهش گلخانه‌ای به منظور جزءبندی آهن کل به شکل‌های مختلف آهن به روش عصاره‌گیری دنباله‌ای از ۲۱ نمونه خاک با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متنوع، استفاده شد. بر طبق نتایج حاصله غلظت شکل‌های مختلف آهن به ترتیب آهن باقی‌مانده (Fe-Res) < آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری (Fe-CFeOX) < آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بی شکل (Fe-AFeOX) < آهن پیوسته به اکسیدهای منگنز (Fe-MnOX) < آهن پیوسته به مواد آلی (Fe-OM) < آهن تبدالی (Fe-Ex) ≤ آهن کربناتی (Fe-Car) بود. شکل‌های Fe-OM، Fe-Ex، Fe-CFeOX، Fe-Res، AFeOX و آهن قابل جذب (Fe-DTPA) رابطه معنی داری با ماده خشک بخش هوایی و ریشه ذرت، آهن فعال، شاخص کلروفیل و جذب آهن توسط بخش هوایی ذرت داشتند. مطالعات همبستگی نشان داد که شکل تبدالی آهن، پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل و آهن باقی‌مانده رابطه معنی داری با تمام صفات زراعی اندازه‌گیری شده در بخش هوایی ذرت داشتند که این امر نشان می‌دهد احتمالاً این شکل‌ها منبع آهن قابل جذب ذرت در خاک‌های مورد مطالعه در شرایط گلخانه‌ای بودند.

واژه‌های کلیدی: جذب آهن، ذرت، شکل‌های شیمیایی، عصاره‌گیری دنباله‌ای، غلظت

Study of Some Agronomical Traits of Corn (*Zea Mays L.*) Affected by Iron Fractions in Soils of East Azerbaijan

Neda Pashapoor¹, Adel Reyhanitabar^{2*}, Shahin Oustan²

Received: June 19, 2015 Accepted: February 14, 2016

1-Graduated MSc Student of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2- Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

*Corresponding Author: areyhani@tabrizu.ac.ir

Abstract

Iron (Fe) is the most important micronutrient for crops that has low availability in calcareous soils. Phytoavailability of Fe depends on the relative distribution of different chemical Fe forms in soil, which is function of soil properties. In this greenhouse research, total Fe fractionated into different forms by sequential extraction procedure was studied in 21 soil samples that varied in physical and chemical properties. According to the results, different Fe fractions concentration were as: Residual iron (Fe-Res) > iron associated with the crystalline iron oxides (Fe-CFeOX) > iron associated with the amorphous iron oxides (Fe-AFeOX) > manganese-oxide-associated Fe (Fe-MnOX) > organic matter-associated Fe (Fe-OM) > exchangeable iron (Fe-Ex) ≥ carbonates-bound iron (Fe-Car). Fe-Ex, Fe-OM, Fe-AFeOX, Fe-CFeOX, Fe-Res and available iron (Fe-DTPA) had a significant relationship with corn shoot and root dry matter, active iron content, chlorophyll index and shoot iron uptake. Correlation coefficient showed that the Fe-Ex, Fe-AFeOX and Fe-Res had a close and significant relationship with all measured agronomical traits of corn. It is concluded that, these forms of iron are probably the source of available iron for corn in studied soils.

Keywords: Chemical Forms of Iron, Concentration, Corn, Iron Uptake, Sequential Extraction

مقدمه

است. این عارضه به دلیل کمبود مطلق آهن در خاک نیست و مقدار آهن کل در خاکها بین یک تا ۲۰ درصد وزنی با میانگین چهار درصد متغیر است. یکی از دلایل عمده آن قابلیت انحلال بسیار کم کانی‌های حاوی آهن در خاکهای آهکی است (هاولین و همکاران ۱۹۹۹). همبستگی ضعیفی بین مقدار کل آهن در خاک و آهن قابل جذب گیاه وجود دارد، زیرا بخش زیادی از آهن کل برای گیاهان غیر قابل استفاده است (گانکل و همکاران ۲۰۰۴). آهن نقش مهمی در فعالیت آنزیمها،

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که حاصلخیزی خاکها به علت استفاده بی‌رویه و بدون توجه به اعمال مدیریت مناسب و اصول کشاورزی پایدار کاهش یافته است (گروهن و همکاران ۲۰۰۰، هان و همکاران ۲۰۰۳). در میان عناصر کم مصرف، کمبود آهن بیشترین محدودیت را برای کشاورزی پایدار و محصولات کشاورزی در سرتاسر جهان ایجاد می‌کند. کلروز یا زردی آهن در گیاهان مناطق وسیعی از دنیا، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه خشک با خاکهای آهکی رایج

های عناصر کم مصرف کاتیونی از جمله آهن در خاک-ها و رسوبات ابداع شده است. در سال ۱۹۷۲ برای جداسازی شکل‌های معدنی عناصر کم مصرف کاتیونی روشی توسط چائو پیشنهاد شد (به نقل از استوویر و همکاران ۱۹۷۹)، که بعدها توسط اسپوزیتو و همکاران (۱۹۸۲) اصلاح شد. در این روش شکل‌های تبدلی، محلول، جذب سطحی شده، آلی، کربناتی و باقی مانده جداسازی می‌شوند. تسیر و همکاران (۱۹۷۹) نیز روشی برای تعیین شکل‌های روی و آهن ارائه دادند که در آن شکل‌های تبدلی، کربناتی، آلی، پیوند یافته با اکسیدهای آهن و منگنز و باقی مانده تفکیک می‌شوند. شومن (۱۹۸۵) روشی را در خاک‌های اسیدی برای جداسازی شکل‌های مختلف عناصر کم مصرف کاتیونی از جمله آهن ارائه کرد که در آن جزء متصل به کربنات-ها وجود نداشت. علت این امر اسیدی بودن خاک‌های مورد مطالعه و کم اهمیت بودن جزء کربناتی بود و شکل‌های مختلف عناصر کم مصرف کاتیونی (روی، آهن، مس و منگنز) در این روش شامل بخش‌های پیوسته به اکسید آهن بی‌شکل، اکسید آهن بلوری، اکسید منگنز و همچنین شکل‌های محلول با اضافه تبدلی و آلی بود. روش سینگ و همکاران (۱۹۸۸) نیز تلفیقی از روش‌های تسیر، شومن و چائو می‌باشد که آهن را به شکل‌های تبدلی، کربناتی، آلی، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن بی‌شکل و بلوری و باقی مانده جداسازی می‌کند (علوی و همکاران ۱۳۹۱). باید توجه داشت که انتخاب یک عصاره‌گیر برای استخراج یک شکل ویژه از یک فلز از خاک نه تنها نسبت آن فلز در بین شکل‌های گوناگون بلکه مقدار کل آن فلز را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا تا حد ممکن باید دقت شود از عصاره‌گیرهایی استفاده گردد که فقط شکل ویژه یک عنصر را تحت تأثیر قرار دهند. به عنوان مثال در استخراج شکل تبدلی، کلرید منیزیم یا نیترات منیزیم بر استات آمونیوم ترجیح داده می‌شود؛ زیرا استات آمونیوم ممکن است سبب انحلال شکل‌های کربناتی نیز بشود (به نقل از

متابولیسم اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها (پروتئین‌های هم، سیتوکروم، کاتالاز، لگ هموگلوبین، پروتئین‌های Fe-S، فردوکسین و همچنین آنزیم‌های حاوی آهن مانند نیترژناز و سوپر اکسید دیسموتاز و...)، تکامل کلروپلاست، فتوسنتز، تنفس گیاه، احیای نیترات و سوخت و ساز اسیدهای آلی دارد. در بسیاری از گیاهان کمبود آهن موجب تحریک پاسخ‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک متعددی می‌شود. مکانیسم‌های سازشی و یا قابل تحریک در میان ژنوتیپ‌ها متفاوت است و این تفاوت‌ها بر اساس دو استراتژی تقسیم بندی شده است. گونه‌های گرمینه آهن را از طریق ترشح فیتوسیدروفورهای گیاهی با میل ترکیبی زیاد به آهن و جذب فیتوسیدروفورهای گیاهی آهن‌دار به وسیله سیستم ویژه جذب تخصص یافته غشایی بدست می‌آورند (مارشور و همکاران ۱۹۸۷، موری و همکاران ۱۹۸۷). فیتوسیدروفورها اسیدهای آمینه غیر پروتئینی هستند که با آهن فریک کمپلکس پایداری را تشکیل می‌دهند. سپس این کمپلکس‌ها از طریق سیستم‌های انتقالی موجود در غشاء سلول‌های ریشه که به طور اختصاصی عمل می‌کنند داخل سیتوپلاسم گیاه راه می‌یابند (سمر و همکاران ۱۳۸۹).

در مطالعات مربوط به خاک - گیاه، اطلاع از توزیع عناصر ضروری بین اجزای خاک، برای درک بهتر شیمی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و در شناخت بر همکنش آن‌ها با ریشه‌های گیاه در ریزوسفر کمک زیادی می‌کند. آهن از این امر مستثنی نبوده و آگاهی از شکل‌های شیمیایی آن در فهم شیمی آن در خاک، درک جنبه‌های حاصلخیزی و تغذیه گیاهی این عنصر اهمیت دارد (هان و همکاران ۲۰۰۳). تکنیک عصاره‌گیری دنباله‌ای از روش‌های رایج جداسازی شکل‌های شیمیایی آهن می‌باشد که به منظور درک بهتر فرآیندهای موثر در فراهمی این عنصر به کار برده می‌شود (خان میرزایی و همکاران ۱۳۹۱). روش‌های عصاره‌گیری دنباله‌ای گوناگونی برای جداسازی شکل-

آهن بی‌شکل^۱ لپیدوکروسایت < گنوتایت > هماتیت اگرچه اکسیدهای آهن بلورین (III) کمتر از آهن بی-شکل قابلیت احیا دارند اما به دلیل مقادیر زیاد این اکسیدها در برخی از خاک‌ها نقش قابل ملاحظه‌ای (۲۰-۱۰ درصد) در احیای کل آهن دارند (رودن و زچارا ۱۹۹۶، وان بودگوم و همکاران ۲۰۰۳).

این تحقیق با هدف تعیین شکل‌های مختلف آهن در برخی خاک‌های استان آذربایجان شرقی و بررسی روابط شکل‌های آهن با برخی شاخص‌های رشد گیاه ذرت انجام شد که تاکنون گزارش منتشر شده‌ای از منطقه وجود نداشت.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری خاک: بر اساس نقشه‌های تهیه شده توسط سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی نمونه‌برداری به تعداد ۴۰ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) از مناطق عمدتاً ذرت‌کاری استان به صورت تصادفی صورت گرفت. پس از خشک کردن و گذراندن خاک‌ها از الک ۲ میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله

بافت خاک به روش هیدرومتری چهار زمانه (گی و اور ۲۰۰۲)، pH و EC در عصاره اشباع خاک (ریچاردز ۱۹۵۴)، کربن آلی به روش اکسایش تر (نلسون و سامرز ۱۹۹۶)، کربنات کلسیم معادل با روش خنثی کردن با اسید و تیترا نمودن باقی‌مانده با سود سوزآور (آلیسون و مودی ۱۹۶۵)، کربنات کلسیم معادل فعال با روش اگزالات آمونیم (دروینین ۱۹۴۲)، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از روش باور (باور و همکاران ۱۹۵۲) و مقدار آهن قابل جذب گیاه در خاک با روش DTPA (لیندزی و نورول ۱۹۷۸) تعیین شد. در ادامه با توجه به این ویژگی‌ها تعداد ۲۱ نمونه خاک که بیشترین ضریب تغییرات را از نظر ویژگی‌های فوق الذکر داشتند انتخاب و برای آزمایش عصاره‌گیری دنباله‌ای و کشت گلخانه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند.

ریحانی تبار و همکاران (۱۳۸۵). باتوجه به موارد ذکر شده امروزه برای جداسازی و تعیین شکل‌های شیمیایی آهن در خاک، بیشتر از روش تلفیقی سینگ و همکاران (۱۹۸۸) استفاده می‌شود. از محاسن این روش می‌توان به اهمیت دادن به تمام شکل‌های مختلف آهن در خاک به ویژه جزء کربناتی و سریع بودن فرایند عصاره‌گیری اشاره کرد که امتیاز اخیر از نظر تکنیکی مهم است.

در کشاورزی پایدار با مشخص کردن روابط بین شکل‌های مختلف آهن و ویژگی‌های خاک، تمهیدات لازم برای تغییر برخی پارامترهای خاکی با هدف افزایش قابلیت استفاده آهن را می‌توان تدارک دید. از سوی دیگر، تناسب و کارایی روش‌های عصاره‌گیری دنباله‌ای در پیش‌بینی زیست‌فراهمی عناصر عموماً از طریق مقایسه با مقادیر عناصر در قسمت‌های مختلف گیاه به ویژه در بخش هوایی گیاهان ارزیابی می‌گردد. مقدار نسبی شکل‌های مختلف آهن در هر خاک بسته به میزان هوادیدگی، pH، مقدار ماده آلی، نوع مواد مادری، نوع زراعت و مصرف کود متفاوت است. حالت تعادل در خاک هیچ‌گاه به طور کامل پدید نمی‌آید. زیرا تغییرات مداوم دما، مقدار آب و همچنین فعالیت‌های زیستی، پیوسته خاک را از حالت تعادل دور نگه می‌دارند. در شرایطی ممکن است یک کانی رسوب کرده و در شرایط دیگر همان کانی شروع به حل شدن نماید. تغییرات شدید، شرایط را برای پدید آمدن ترکیبات بی‌شکل آهن ۱ و یا بلورهای ناقص^۲ فراهم می‌سازد. از بین شکل‌های آهن، آهن محلول در آب و آهن تبدالی به‌طور کامل، اکسیدهای آهن بی‌شکل (III) (منبع غالب آهن برای احیا) تا حدی (۵۰ - ۳۵ درصد) و اکسیدهای آهن بلوری (III) بسیار کمتر قابلیت احیا دارند (وان بودگوم و همکاران ۲۰۰۳) و از بین کانی‌ها ترتیب قابلیت احیا شدن به شکل زیر گزارش شده است (رایس ول و همکاران ۱۹۹۴):

¹ Amorphous

² Poorly Crystallized

خشک گیاهی (اسرکاسکی ۱۹۳۳) و محلول ۱/۵٪ ارتو-فنانترولین (کاتیال و شارما ۱۹۸۰) از بافت تازه گیاه اندازه‌گیری شد. در روش ارتوفنانترولین بعد از نمونه-برداری، برگ‌های ذرت ابتدا با آب شهری، سپس با اسید کلریدریک ۰/۱ نرمال و در نهایت با آب مقطر شسته شدند. دو گرم از نمونه‌هایی که با قیچی پلاستیکی به اندازه ۲-۱ میلی‌متری قطعه قطعه شده بودند را به داخل یک بشر شیشه‌ای ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و ۲۰ میلی‌لیتر از محلول ۱/۵٪ ارتوفنانترولین با pH=۳ را به آن افزوده و به آرامی جهت تماس نمونه گیاهی با عصاره‌گیر تکان داده شد. روی بشر با نایلون سفون کاملاً پوشانده شد و به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس داخل انکوباتور قرار گرفت. سپس با کاغذ صافی واتمن شماره ۱ صاف و Fe^{2+} با اسپکتروفتومتر مدل (APEL, PD-303) در طول موج عبوری 510^3 نانومتر قرائت شد. مطالعات آماری شامل ضرایب همبستگی خطی و رگرسیون چند متغیره گام به گام (Stepwise) با استفاده از نرم‌افزار SPSS صورت گرفت.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. بر پایه این جدول، دامنه تغییرات pH در خاک‌های مورد استفاده زیاد نبود (۷/۸ تا ۸/۳) و این مقادیر در خاک‌های آهکی کمتر تکامل یافته قابل انتظار بود. از داده های جدول استنباط می‌شود که خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق شور نبودند.

تعیین شکل‌های شیمیایی آهن: برای جداسازی و تعیین شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌ها از روش اصلاح شده سینگ و همکاران (۱۹۸۸) استفاده شد. برای این منظور ۲/۵ گرم از هر نمونه خاک هوا خشک عبور کرده از الک دو میلی‌متری در دو تکرار توزین و به درون لوله‌های سانتریفوژ که قبلاً وزن آن‌ها یادداشت شده بود، ریخته شد. مراحل عصاره‌گیری دنباله‌ای و ترکیب هر عصاره‌گیر به روشی که در پژوهش حاضر به کار رفته به طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. برای به حداقل رساندن تأثیر ماده زمینه، استانداردهای آهن در محلول‌هایی که از نظر ترکیب و غلظت تقریباً مشابه عصاره‌گیرهای هر مرحله بود تهیه گردید. آهن عصاره‌گیری شده با دستگاه جذب اتمی مدل شیمادزو (۶۳۰۰) اندازه‌گیری شد.

آزمایش گلخانه‌ای: آزمایش گلخانه‌ای با کشت گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ با ۲۱ نوع خاک در سه تکرار در گلدانهای چهار کیلوگرمی انجام شد. به غیر از آهن بقیه عناصر به صورت محلول طبق آزمون خاک و توصیه‌های رایج کودی مصرف شدند. سپس در هر گلدان ۱۰ عدد بذر در عمق مناسب کاشته شد و پس از استقرار و سبز شدن کامل بذور در پایان هفته دوم، تعداد گیاهان هر گلدان به سه بوته یکنواخت تنک گردید. آبیاری گلدان‌ها به طور روزانه با توزین گلدان‌ها و با آب مقطر صورت گرفت. رطوبت خاک در طول ۲ ماه رشد بین ۸۰ تا ۱۰۰٪ ظرفیت مزرعه نگه داشته شد. شاخص کلروفیل در برگ با استفاده از کلروفیل متر قبل از برداشت گیاه اندازه‌گیری شد. پس از ۶۰ روز از تاریخ کشت (اواخر دوره رشد رویشی) برداشت و برخی از صفات زراعی شامل وزن تر و وزن ماده خشک بخش هوایی و ریشه، جذب آهن توسط بخش هوایی و ریشه و غلظت آهن فعال اندازه‌گیری شدند. غلظت آهن کل با روش خشک‌سوزانی تعیین شد (کالرا ۱۹۹۷، جونز ۲۰۰۱). در این تحقیق آهن فعال ذرت با دو روش عصاره‌گیری یعنی با استفاده از HCl یک مولار از ماده

³ Transmittancy

جدول ۱- خلاصه روش مورد استفاده در این تحقیق برای عصاره گیری دنباله‌ای آهن (سینگ و همکاران، ۱۹۸۸)

میلی لیتر عصاره‌گیر برای ۲/۵ گرم خاک	عصاره‌گیر	مدت زمان تکان دادن (ساعت)	علامت	شکل شیمیایی آهن
۱۰	1M Mg(NO ₃) ₂	۲	FeEx	محلول + تبدلی
۱۰	1M NaOAc + CH ₃ COOH (pH=5)	۵	FeCar	کربناتی
۵*	0.7M NaOCl (pH=8.5)	۰/۵ (حمام آب جوش)	FeOM	آلی
۲۵	0.1M NH ₂ OH.HCl + HNO ₃ (pH=2)	۰/۵	FeMnox	پیوسته به اکسیدهای منگنز
۲۵	0.25M NH ₂ OH.HCl + 0.25M HCl	۰/۵ (دمای ۵۰°C)	FeAFeox	پیوسته به اکسیدهای آهن بی- شکل
۲۵	0.2M (NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ +0.2M H ₂ C ₂ O ₄ +0.1M C ₆ H ₈ O ₆ (pH=3)	۰/۵ (حمام آب جوش)	FeCFeox	پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری
۳۱/۲۵	4M HNO ₃	۱۶ (حمام آب جوش)	FeRes	باقی مانده

* : دو مرتبه عصاره‌گیری می‌شود.

جدول ۲- توصیف آماری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	*ضریب تغییرات (%)
Sand	۱۲/۵۶	۸۶/۱۲	۴۱/۸۲	۲۱/۵۴	۵۱/۴۹
Clay	۵/۳۷	۵۳/۹۱	۲۵/۳۱	۱۲/۸۵	۵۰/۷۶
Silt	۸/۵۱	۵۳/۸۶	۳۲/۸۷	۱۲/۱۱	۳۶/۸۵
CCE	۱/۷۴	۲۶/۵۷	۱۳/۵۰	۸/۱۰	۶۰/۰۲
ACCE (g/100g)	۰/۹۲	۱۰/۸۳	۵/۴۶	۳/۳۲	۶۰/۷۷
OC	۰/۱۶	۲/۳۱	۰/۹۴	۰/۵۲	۵۴/۶۶
OM	۰/۲۸	۲/۹۸	۱/۶۳	۰/۸۹	۵۴/۵۹
FC	۱۱	۳۰	۲۲	۵/۵	۲۵
SP	۲۱/۶۷	۵۳/۲۴	۳۹/۳۲	۹/۹۸	۲۵/۳۹
pH	۷/۸۰	۸/۳۷	۸/۱۴	۰/۱۶	۱/۹۴
CEC (cmol _c /kg)	۱۰/۲۲	۴۲/۵۳	۲۶/۶۳	۹/۲۵	۳۴/۷۲
EC (dS/m)	۰/۶۹	۳/۶۶	۱/۶۵	۰/۸۳	۵۰/۲۳
Fe** (mg/kg)	۰/۷۷	۱۴/۸۶	۴/۴۸	۳/۹۱	۸۷/۲۳

CCE: کربنات کلسیم معادل، ACCE: کربنات کلسیم معادل فعال، OC: کربن آلی، SP: درصد رطوبت اشباع

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، Fe** آهن قابل جذب خاک ×۱۰۰ (میانگین/انحراف معیار) = ضریب تغییرات*

اختصاص دادند. در حالی که آهن پیوسته به اکسیدهای بلوری ۳۹/۴۸ و آهن باقی‌مانده ۵۷/۵۹ درصد آهن را تشکیل دادند. تقریباً می‌توان اظهار داشت که آهن خاک

در جدول ۳ توصیف آماری شکل‌های آهن خاک ارائه شده است. آهن تبدلی، آهن کربناتی و آهن پیوسته به مواد آلی مقادیر ناچیزی از آهن کل را به خود

آهن باقی‌مانده < پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری > پیوسته به اکسیدهای آهن بی شکل > پیوسته به اکسیدهای منگنز < پیوسته به مواد آلی > آهن تبدلی < آهن کربناتی.

همانند نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر، ضرابی و همکاران (۱۳۹۰) در خاک‌های آهکی استان یزد و محمدی و همکاران (۱۳۹۲) در خاک‌های آهکی استان کردستان نیز شکل کربناتی آهن را کمترین مقدار آهن گزارش کرده‌اند. محمدی و همکاران (۱۳۹۲) با تعیین شکل‌های مختلف آهن به روش اصلاح شده اداره استاندارد اروپا BCR (۱۹۹۹) و بررسی تأثیر کشت ذرت بر وضعیت آهن در خاک‌های آهکی استان کردستان گزارش کردند که میزان شکل‌های تبدلی و محلول در آب و اسید و همچنین شکل اکسیدی آهن، افزایش معناداری را پس از کشت ذرت در برداشت ولی شکل باقی‌مانده آهن کاهش یافته بود.

عمدتاً در همین دو شکل توزیع شده است که می‌تواند حاکی از نقش مهم این کانی‌ها در جذب سطحی و نگهداشت آهن در این خاک‌ها باشد. سینگ و همکاران (۱۹۸۸) نیز با بررسی توزیع شکل‌های آهن در ۱۱ خاک آهکی هند گزارش کردند که شکل‌های تبدلی، کربناتی، آلی و بخش متصل به اکسیدهای منگنز، کمترین مقدار آهن را به خود اختصاص دادند. بنا به گزارش آنان قسمت عمده آهن خاک را آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری و آهن باقی‌مانده به ترتیب با ۳۰ تا ۵۷/۲ درصد و ۳۸/۸ تا ۵۸/۴ درصد از آهن کل خاک را به خود اختصاص داده بودند. عباسی کلو و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که در دشت تبریز بخش اعظم آهن به شکل بلوری می‌باشد که با تحقیق حاضر از خاک‌های استان مطابقت دارد. فراوانی مقادیر مختلف آهن به طور میانگین در خاک‌های مورد مطالعه را می‌توان بدین صورت نشان داد:

جدول ۳- توصیف آماری شکل‌های آهن در خاک‌های مورد مطالعه

مجموع	Fe-Res	Fe-CFeox	Fe-AFeox	Fe-Mnox	Fe-OM	Fe-Car	Fe-Ex	
	(g/ kg)			(mg/ kg)				
۱۵/۳۹۸	۷/۶۱۱	۶/۵۸۷	۰/۵۵۳	ناچیز	۱/۵۹	ناچیز	۰/۲۹	کمینه
۵۱/۵۳۰	۲۷/۱۴۲	۲۳/۶۰۰	۱/۹۱۵	۴۰/۷۷	۸/۳۲	۸/۳۴	۳/۵۴	پیشینه
۳۰/۰۳۵	۱۷/۲۰۳	۱۱/۶۹۲	۰/۷۹۸	۶/۳۰	۵/۰۵	۱/۹۲	۲/۱۷	میانگین
۹/۵۱۲	۵/۷۴۷	۴/۵۱۶	۰/۲۸۲	۱۰	۲/۱۳	۱/۶۳	۰/۷۵	انحراف معیار
۲۹/۰۶	۱۷/۷۲	۱۰/۵۶	۰/۷۵	۲/۱۶	۴/۸۱	۱/۶۱	۲/۲	میانه

برای شرح علامت‌های اختصاری به جدول ۱ مراجعه شود.

هوایی و ریشه به عنوان متغیر وابسته و مقدار شکل-های آهن به عنوان متغیر مستقل) نشان داد که مقدار شکل باقی‌مانده آهن برای ماده خشک بخش هوایی و ریشه وارد معادله می‌شود. معادلات رگرسیونی به صورت زیر بودند:

$$\text{Dry matter} = 0.24 \text{ FeRes} + 2.03$$

$$r = 0.70^{**}$$

برای ریشه:

$$\text{Dry matter} = 0.03 \text{ FeRes} + 0.15$$

$$r = 0.66^{**}$$

توصیف آماری صفات زراعی گیاه ذرت اندازه‌گیری شده در خاک‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. جدول ۵ همبستگی خطی شاخص‌های مذکور با آهن قابل جذب و شکل‌های آهن خاک را نشان می‌دهد. در این تحقیق همبستگی خطی ماده خشک بخش هوایی و ریشه گیاه با آهن به شکل‌های تبدلی، پیوسته به مواد آلی، آهن باقی‌مانده و آهن قابل جذب خاک معنادار بود. رگرسیون چند متغیره گام به گام (ماده خشک بخش

و باقی‌مانده که از شکل‌های با حلالیت کم آهن هستند به صورت محلول در می‌آیند. همچنین پس از جذب آهن توسط ریشه مقدار آهن قابل جذب در محیط اطراف ریشه کاهش یافته و آهن از شکل‌های با حلالیت کم آزاد و توسط ریشه جذب می‌شود. همچنین می‌توان احتمال داد به دلیل بالا بودن غلظت آهن باقی‌مانده نسبت به سایر شکل‌های آهن و توانایی گیاه ذرت در استفاده از آهن نامحلول‌تر در شرایط کمبود، آهن باقی‌مانده و پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل منابع مهم آهن برای گیاه ذرت در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشند. دسانتیاگو و همکاران (۲۰۰۸) گزارش نمودند اکسیدهای آهن که به طور ضعیف بلوری شده‌اند، برای گیاهانی که در خاک‌های آهکی رشد می‌کنند آهن قابل جذب محسوب می‌شوند. همبستگی بسیار خوب شاخص کلروفیل با Fe-DTPA احتمالاً یک دلیل دیگر بر برتر بودن عصاره‌گیر DTPA در خاک‌های مورد مطالعه است. در این تحقیق غلظت آهن کل بخش هوایی ذرت با هیچ کدام از شکل‌های آهن خاک همبستگی معناداری نشان نداد. این امر با یافته چلیک و کت کات (۲۰۰۷) مطابقت دارد. در مورد بخش ریشه، همبستگی غلظت آهن با آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل و آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری معنادار شد ($p < 0.05$)، ولی با بقیه شکل‌های آهن رابطه آماری معناداری مشاهده نشد. رگرسیون چند متغیره گام به گام (شکل-های آهن و آهن قابل جذب به عنوان متغیر مستقل و غلظت آهن کل ریشه به عنوان متغیر وابسته) نشان داد که فقط شکل آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل می‌تواند وارد مدل رگرسیونی شود.

$$\text{Total-Fe} = 0.36\text{FeAFeOx} + 1.02 \quad r = 0.51^{**}$$

با توجه به معادلات رگرسیونی می‌توان چنین نتیجه گرفت که احتمالاً مقدار آهن باقی‌مانده در خاک تغییرات ماده خشک بخش هوایی و ریشه را کنترل می‌نماید. البته به دلیل همبستگی آهن باقی‌مانده با شکل‌های تبادلی آهن و آهن پیوسته به مواد آلی احتمالاً این شکل از آهن تأثیر غیر مستقیم در تأمین آهن قابل جذب خاک دارد. مقدار جذب آهن در بخش هوایی ذرت با شکل‌های پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری در سطح احتمال ۵ درصد و با آهن قابل جذب، آهن تبادلی و شکلی باقی‌مانده آهن در سطح احتمال ۱ درصد همبستگی مثبت معناداری نشان داد. همچنین می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش عصاره‌گیری با DTPA می‌تواند آهن قابل جذب ذرت را در خاک‌های مورد مطالعه پیش‌بینی کند. ضریب همبستگی جذب آهن در ریشه ذرت با تمامی شکل‌های آهن به جز آهن کربناتی و آهن پیوسته به اکسیدهای منگنز معنادار بود. معادلات رگرسیونی جذب بخش ریشه گیاه به صورت زیر بودند:

شکل‌های شیمیایی آهن و آهن قابل جذب به عنوان متغیر مستقل:

$$\text{Fe Uptake} = 0.09 \text{DTPA-Fe} + 0.58 \\ r = 0.82^{**}$$

شکل‌های شیمیایی آهن به عنوان متغیر مستقل:

$$\text{Fe Uptake} = 0.052\text{FeRes} + 0.09 \\ r = 69^{**}$$

$$\text{Fe Uptake} = 0.04\text{FeRes} + 0.26\text{FeEx} - 0.22 \\ r = 0.78^{**}$$

$$\text{Fe Uptake} = 0.03\text{FeRes} + 0.21\text{FeEx} + 0.509 \\ \text{FeAFeOx} - 0.51 \quad r = 0.85^{**}$$

احتمالاً در ریزوسفر ذرت به دلیل تولید اسیدهای آلی و فیتوسیدروفورها آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری

جدول ۴- توصیف آماری چند صفت زراعی و شاخص کلروفیل ذرت

صفات	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%)
وزن خشک بخش هوایی	g/pot	۲/۰۹	۱۰/۴۴	۶/۲۱	۱/۹	۳۰/۰۴
وزن تر بخش هوایی		۲۱/۲۸	۹۰/۰۵	۶۴/۶۵	۱۷/۷	۲۷
وزن خشک ریشه		۰/۲۶	۱/۴	۰/۷۶	۰/۳۱	۴۰/۷۸
وزن تر ریشه		۱/۳۸	۱۳/۸۰	۶/۴۷	۳/۲۳	۴۹/۹
ارتفاع بوته (cm)		۶۶/۲۲	۱۱۶/۶۷	۱۰۱/۹۳	۱۱/۷۴	۱۱/۵۱
قطر ساقه (mm)		۳۲۶/۱۱	۴۹۵/۵۵	۴۳۴/۴۹	۳۸/۷۶	۸/۹
شاخص کلروفیل		۴/۶	۱۴/۴۱	۸/۸۲	۲/۶۳	۲۹/۸
غلظت آهن فعال (HCl) (mg/kg dw)		۴۱/۶	۶۴/۸۳	۵۴/۳۴	۵/۹۵	۱۰/۹۴
غلظت آهن فعال (ارتوفنانتروپین) (mg/kg fw)		۸/۵۴	۱۷/۵۹	۱۲/۸۲	۲/۷۱	۲۱/۱۳
غلظت آهن کل بخش هوایی (mg/kg dw)		۹۷/۴۱	۱۵۸/۵۹	۱۲۰/۷۴	۱۷/۵۱	۱۴/۵

احتمالاً دلیل همبستگی بالای درصد رطوبت اشباع با صفات زراعی گیاه ذرت، تحت تأثیر قرار گرفتن این صفت از درصد رس، ماده آلی و CEC می‌باشد. نظر به سهولت و اقتصادی بودن اندازه گیری درصد رطوبت اشباع این یافته می‌تواند حائز اهمیت باشد. ظرفیت تبادل کاتیونی با شاخص کلروفیل و آهن فعال اندازه-گیری شده با ارتوفنانتروپین در سطح احتمال ۵ درصد و با مقدار جذب آهن، وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی در سطح احتمال ۱ درصد همبستگی مثبت و معناداری داشت؛ در حالی که درصد کربنات کلسیم معادل فعال، pH و EC همبستگی معناداری با هیچ کدام از شاخص‌های رشد گیاه ذرت نداشتند. شعبان علی الحدق (۲۰۰۷) گزارش کرد که آهن فعال (اندازه‌گیری شده با HCl) در گیاه جو همبستگی منفی معناداری با کربنات کلسیم معادل و کربنات کلسیم معادل فعال داشت.

همبستگی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با صفات زراعی ذرت

جدول ۶ همبستگی خطی بین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و صفات زراعی ذرت را نشان می‌دهد. درصد رس با شاخص کلروفیل برگ‌ها در سطح احتمال ۵ درصد و با آهن فعال اندازه‌گیری شده با ارتوفنانتروپین، مقدار جذب آهن، وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی همبستگی مثبت معناداری در سطح احتمال ۱ درصد داشت. درصد ماده آلی با شاخص کلروفیل برگ‌ها ($r = 0/457$ ، $p < 0/05$) و آهن فعال اندازه‌گیری شده با ارتوفنانتروپین ($r = 0/57$ ، $p < 0/01$) همبستگی مثبت معناداری داشت. درصد رطوبت اشباع با شاخص کلروفیل در سطح احتمال ۵ درصد و با آهن فعال اندازه‌گیری شده با ارتوفنانتروپین، مقدار جذب آهن، وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی همبستگی مثبت معناداری در سطح احتمال ۱ درصد داشت.

جدول ۵- ضرایب همبستگی خطی (r) برخی از صفات زراعی نرت با آهن قابل جذب و شکل‌های آهن در خاک

صفات/ شکل‌های آهن	Fe-DTPA	Fe-Ex	Fe-Car	Fe-OM	Fe-Mnox	Fe-AFeox	Fe-CFeox	Fe-Res
ماده خشک بخش هوایی	۰/۷۱**	۰/۵۲*	۰/۰۳۲	۰/۴۵*	۰/۰۲	۰/۱۹	۰/۳۸	۰/۷۰**
ماده خشک بخش ریشه	۰/۶۶**	۰/۵۲*	-۰/۱۰	۰/۴۵*	۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۲۵	۰/۶۶**
جذب آهن بخش هوایی	۰/۸۵**	۰/۵۹**	-۰/۰۲۵	۰/۴۰	۰/۰۸	۰/۲۷	۰/۴۶*	۰/۶۸**
جذب آهن بخش ریشه	۰/۸۱**	۰/۵۹**	-۰/۰۶۹	۰/۴۴*	۰/۱۳	۰/۴۹*	۰/۴۷*	۰/۶۹**
آهن کل بخش هوایی	۰/۴۲	۰/۰۸	-۰/۰۲	-۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۰۷
آهن کل ریشه	۰/۲۹	۰/۰۶	۰/۰۸	-۰/۰۶	۰/۳۰	۰/۵۱*	۰/۴۹*	۰/۱۰
AFe-HCl	۰/۵۵*	۰/۲۹	-۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۵۹**	۰/۶۹**
AFe-Ortho	۰/۵۷**	۰/۴۶*	-۰/۳۴	۰/۵۵**	-۰/۳۶	-۰/۱۹	۰/۳۴	۰/۵۱*
شاخص کلروفیل	۰/۸۴**	۰/۵۳*	-۰/۱۸	۰/۵۰*	۰/۰۹	۰/۳۱	۰/۷۱**	۰/۸۲**

۱: برای شرح علامت‌های اختصاری به جدول ۱ مراجعه شود.

AFe-HCl: آهن فعال اندازه‌گیری شده با HCl, AFe-Ortho: آهن فعال اندازه‌گیری شده با ارتوفانتروپین

* و ** به ترتیب معنادار در سطح احتمال پنج و یک درصد

جدول ۶- ضرایب همبستگی (r) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با برخی از صفات زراعی نرت

شاخص کلروفیل	Fe-HCl	Fe-Orto	جذب آهن	وزن خشک بخش هوایی	تر بخش هوایی	وزن خشک ریشه	تر ریشه	
۰/۴۷*	-۰/۱۷	-۰/۶۴**	۰/۵*	-۰/۶۳**	-۰/۶۸**	-۰/۵۹**	-۰/۵۶**	Sand
۰/۵۱*	۰/۳۸	۰/۶۴**	۰/۶۲**	۰/۶۴**	۰/۶**	۰/۵۶**	۰/۵۷**	Clay
۰/۳	-۰/۰۱	۰/۴۷*	۰/۲۴	۰/۴۴*	۰/۵۷**	۰/۴۴*	۰/۳۹	Silt
-۰/۰۸	-۰/۵۶**	۰/۰۸	-۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۰۱	-۰/۱	CCE
-۰/۰۱	-۰/۳۶	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۲	۰/۱۱	-۰/۰۱	ACCE
۰/۴۶*	۰/۳۸	۰/۵۷**	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۳	-۰/۳۶	۰/۴	OC
۰/۵۴*	۰/۳۹	۰/۶۴**	۰/۶۵**	۰/۷۲**	۰/۷۷**	۰/۷۲**	۰/۷۴**	SP
-۰/۴	-۰/۲	-۰/۱۶	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۱۶	-۰/۰۱	۰/۱۵	pH
۰/۵۱*	۰/۴۲	۰/۴۴*	۰/۶۷**	۰/۶۷**	۰/۷۷**	۰/۶۵**	۰/۶۲**	CEC
-۰/۰۴	-۰/۱۴	۰/۰۵	-۰/۳	-۰/۲۶	-۰/۳	-۰/۲۸	-۰/۳۵	EC

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

هوایی نرت با شکل‌های پیوسته به اکسیدهای آهن بلوری و با آهن قابل جذب، آهن تبادلی و شکل باقی‌مانده آهن همبستگی مثبت معناداری نشان داد. همچنین به دلیل همبستگی بسیار خوب شاخص کلروفیل با Fe-DTPA می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش عصاره‌گیری با DTPA می‌تواند آهن قابل جذب نرت را در خاک‌های مورد مطالعه پیش‌بینی کند.

بر اساس نتایج این آزمایش بیشترین میزان آهن خاک‌های مورد مطالعه به آهن باقی‌مانده تعلق داشت. از بین شکل‌های شیمیایی آهن خاک، آهن تبادلی، پیوسته به اکسیدهای آهن بی‌شکل و باقی‌مانده با بیشتر صفات مورد مطالعه نرت همبستگی معناداری نشان دادند و چنین نتیجه‌گیری شد که این شکل‌های آهن در تغذیه این گیاه نقش به‌سزایی دارند. مقدار جذب آهن در بخش

منابع مورد استفاده

- خان‌میرزایی ع، بازرگان ک، معزی ع و شهبازی ک، ۱۳۹۱. رابطه بین شکل‌های شیمیایی کادمیوم خاک و غلظت آن در دانه گندم در برخی از خاک‌های استان خوزستان. *مجله علوم خاک*، ۲۶ (۴): ۳۵۵-۳۴۷.
- علوی ه، بارانی مطلق م و دردی پور الف، ۱۳۹۱. تعیین شکل‌های شیمیایی مس و ارتباط آن‌ها با پاسخ‌های گیاه و ویژگی‌های خاک در برخی خاک‌های استان گلستان. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۹ (۴): ۶۲-۴۳.
- عباسی کلو الف، جعفرزاده ع، کریمیان اقبال م، اوستان ش و جهانگیری الف، ۱۳۹۳. تاثیر سطوح مختلف زئومرفولوژیک بر تکامل خاکها با استفاده از تغییرات پدوژنیک و شکلهای مختلف آهن در منطقه مرند آذربایجان شرقی. *دانش آب و خاک*، ۲۴ (۱): ۸۵-۶۹.
- غفاری‌نژاد ع و کریمیان ن ع، ۱۳۸۶. تعیین شکل‌های شیمیایی منگنز و ارتباط آن‌ها با پاسخ‌های گیاه سویا در شماری از خاک‌های استان فارس. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۱ (۱): ۱۳۳-۱۲۵.
- ریحانی‌تبار ع، کریمیان ن ع، معزاردلان م، ثواقبی غ ر و قنادها م، ۱۳۸۵. توزیع شکل‌های مختلف روی و ارتباط آنها با ویژگی‌های خاک در برخی خاک‌های استان تهران. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۰ (۳): ۱۳۵-۱۲۵.
- سماوات س، تدین م س، رضایی ح، طهرانی م م، اردکانی م س، بشارتی ح و فلاح ع ر، ۱۳۸۹. آهن در خاک و گیاه. *موسسه تحقیقات خاک و آب*، نشر آموزش کشاورزی.
- ضرابی الف، یثربی ج و رونقی ع، ۱۳۹۰. بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی عناصر روی و آهن در خاک‌های آهکی استان یزد. *دوازدهمین کنگره علوم خاک ایران*. تبریز، شهریور ۱۴، ۱۳۹۰-۱۲.
- محمدی ب، فرقانی ا و حسینی س م ط، ۱۳۹۲. تعیین شکل‌های مختلف آهن و بررسی تأثیر کشت بر وضعیت آهن در خاک‌های آهکی استان کردستان. *سیزدهمین کنگره علوم خاک ایران*. اهواز، بهمن ماه ۱۳۹۴.
- Abedi T, Alemzadeh A and Kazemeini AR, 2010. Effect of organic and inorganic fertilizers on grain yield and protein banding pattern of wheat. *Journal of Crop Science*, 4(6): 384-389.
- Allison LE and Moodie CD, 1965. Carbonate. In: Black CA (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI 1379-1396.
- Bawer CA, Reitemeier RF and Fire-man M, 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soil. *Soil Science*, 73: 251-261.
- Çelik H and Katkat V, 2007. Some parameters in relation to iron nutrition status of peach orchards. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 1(3): 111-115.
- Desantiago A, Diaz I and Delgado A, 2008. Predicting the incidence of iron deficiency chlorosis from hydroxylmine-extractable iron in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 1493-1499.
- Drouineau G, 1942. Dosage rapide du calcaire actif du sol: Nouvelles donne'es sur la se'paration et la nature des fractions calcaires. *Ann. Agron*, 12: 441-450.
- Gruhn P, Goletti F and Yudelman M, 2000. Integrated nutrient management, soil fertility and sustainable agriculture: current issues and future challenges, *Int. Food Policy Res Inst*.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle size analysis. In: H D Jacob and G Clarke Topp, (eds.), *Methods of Soil Analysis*. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America . Madison, WI. 201-214.
- Gunkel P, Roth E and Faber B, 2004. Sequential extraction of copper from soil and relationships with copper in maize. *Environmental Chemistry Letters*, 2: 99-103.

- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL and Nelson WL, 1999. Soil Fertility and Fertilizers, 6 Ed. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin.
- Han FX, Kingery WL and Selim HM, 2003. Accumulation, redistribution, transport, and bioavailability of heavy metals in waste-amended soil. In: Iskandar IK Kirkham MB, (eds.), Trace elements in soil, LEWIS Publisher. Pp. 145-173.
- Hoff DJ and H J Mederski, 1958. The chemical estimation of plant available soil manganese. Soil Science Society of America, Proceedings. 22: 129-132.
- Kalra Y, 1997. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis, CRC Press.
- Katyal JC and Sharma BD, 1984. Some modification in the assay of Fe²⁺ in 1-10, o-phenanthroline extracts of fresh plant tissues. Plant and Soil, 79: 449-450.
- Levitt J, 1980. Responses of plant to environmental stresses, water, radiation, salt and other stresses. 2nd ed. Vol. II. Academic Press, New York.
- Lindsay WL and Norvell WA, 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal, 42: 421-428.
- Li X, Coles B J, Ramsey MH and Thornton I, 1995. Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES. Chemical Geology, 124: 109-123.
- Jones JB, 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis, CRC press.
- Nelson DW and Sommers LE, 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Sparks, DL. (Eds). Methods of Soil Analysis: part3. Chemical Methods. Soil Science Society of America. Madison, WI. 961-1010.
- Raiswell R, Canfield DE and Berner RA, 1994. A comparison of iron extraction methods for the determination of degree of pyritisation and the recognition of iron-limited pyrite formation. Chemical Geology, 111: 101-110.
- Richards LA, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. USDA Handbook. no, 60, U. S. Government printing office, Washington, Dc, 84.
- Roden E E and Zachara JM, 1996. Microbial reduction of crystalline iron (III) oxides: influence of oxide surface area and potential for cell growth. Environmental Science and Technology, 30: 1618-1628.
- Shuman L M, 1985. Fractionation method for soil micronutrients. Soil Science, 140: 11-22.
- Shabaan Aly El-Hedek K 2007, Iron in calcareous soils. Thesis of Ph.D. Faculty of Agriculture. Benha University. Egypt.
- Singh JP, Karwasra SPS and Singh M, 1988. Distribution and forms of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soil of India. Soil Science, 146: 359-366.
- Stover RC, Sommers LE and Silveira DJ, 1976. Evaluation of metals in waste water sludge. Journal of the Water Pollution Control Federation, 48: 2165-2175.
- Sposito G, Lund LJ and Chang AC, 1982. Trace metal chemistry in arid zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in soil phases. Soil Science Society of American Journal, 46: 260-264.
- Tessier A, Campbell PGC and Bisson M, 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal. Analytical Chemistry, 51: 844-851.
- Oserkowsky J. 1933. Quantitative relation between chlorophyll and iron in green and chlorotic pear leaves. Plant Physiology. 8(3): 449-468.
- Van Bodegom PM, Van Reeven J and Van Der Gon HACD, 2003. Prediction of reducible soil iron content from iron extraction data. Journal of Biogeochemistry, 64: 231-245.