

بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در تعدادی از خاک‌های آهکی باغ‌های پرتقال (*Citrus sinensis* L.) در منطقه داراب، جنوب شرقی استان فارس

حمیدرضا بوستانی^{۱*}، مهدی نجفی‌قیری^۲، حسین امین^۲، عباس میرسلیمانی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹)

چکیده

کمبود آهن در خاک یک عامل محدودکننده برای رشد اکثر گیاهان است. فراهمی آهن در خاک بستگی به توزیع شکل‌های شیمیایی آن در بین اجزای تشکیل دهنده خاک داشته که خود تحت تأثیر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. هدف از پژوهش حاضر بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در تعدادی از خاک‌های آهکی باغ‌های پرتقال در منطقه داراب استان فارس و رابطه این شکل‌ها با برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و غلظت آهن در برگ درختان پرتقال می‌باشد. برای جداسازی شکل‌های شیمیایی آهن در خاک از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد که توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های مورد مطالعه به صورت اکسیدهای آهن بلوری < آهن باقی مانده < اکسیدهای آهن بی‌شکل < آهن محلول و تبادلی < آهن آلی \leq آهن کربناتی < آهن متصل به اکسیدهای منگنز بود. حدود ۹۸/۲ درصد از کل آهن خاک در شکل‌های اکسیدهای آهن بلوری و آهن باقی‌مانده وجود داشت که نشان دهنده حضور عمده آهن خاک در شکل‌های غیرقابل استفاده گیاهی است. در میان شکل‌های شیمیایی آهن، تنها اکسیدهای آهن بی‌شکل با آهن قابل استفاده خاک (عصاره‌گیری شده توسط DTPA) و غلظت آهن برگ همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد. هم‌چنین، در بین ویژگی‌های خاک، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل و ظرفیت تبادل کاتیونی از ویژگی‌های مؤثر در تعیین میزان قابلیت استفاده آهن و مقدار اکسید آهن بی‌شکل در خاک بودند. بین برخی از شکل‌های شیمیایی آهن در خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد که نشانگر رابطه‌ای پویا بین این شکل‌ها در خاک است. با توجه به نتایج به نظر می‌رسد که میزان ماده آلی خاک می‌تواند نقش مؤثری بر فراهمی آهن در خاک باغات پرتقال داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: آهن قابل استخراج با DTPA، اکسیدهای آهن بی‌شکل، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربنات کلسیم معادل

۱- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز (مکاتبه کننده)

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

۳- استادیار گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

*پست الکترونیک: hr.boostani@shirazu.ac.ir

مقدمه

می‌توان منبع، نحوه واکنش، فراهمی آهن در خاک کشاورزی و پویایی و حرکت آن را پیش‌بینی کرد (Pashapoor *et al.*, 2016). هم‌چنین با تعیین روابط بین شکل‌های شیمیایی آهن با پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک و هم‌چنین پاسخ‌های گیاهی از جمله غلظت و جذب آهن، می‌توان اقدامات لازم را برای بهینه کردن شرایط خاک برای جلوگیری از کمبود آهن در گیاه و افزایش قابلیت دسترسی آن در خاک انجام داد. وی و همکاران (Wei *et al.*, 2010) با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های لسی یک منطقه از شمال چین با استفاده از روش عصاره‌گیری تسیر و همکاران (Tessier *et al.*, 1979)، نتیجه گرفتند که کم‌ترین مقدار آهن در بخش تبادل و بیش‌ترین مقدار آن در بخش باقی‌مانده وجود دارد. آنان بیان کردند که شکل آلی آهن و آهن موجود در اکسیدهای آهن همبستگی مثبت و معنی‌داری با آهن قابل عصاره‌گیری با DTPA داشت که نشان دهنده نقش مؤثر این دو شکل در تأمین آهن مورد نیاز گیاه می‌باشد. کاظمی و همکاران (Kazemi *et al.*, 2012) با مطالعه‌ی سه خاک آهکی استان اصفهان گزارش کردند که بین ۶۰ تا ۸۰ درصد از کل آهن موجود در خاک مربوط به شکل‌های اکسیدی آهن (بلوری و بی‌شکل) است و ۲۰ تا ۴۰ درصد کل آهن در شکل باقی‌مانده (سولفیدی) وجود داشت. تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در برخی خاک‌های آهکی استان فارس با استفاده از روش سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) ترتیب شکل‌های شیمیایی آهن در خاک را به صورت باقی‌مانده < اکسیدهای آهن بلوری < اکسیدهای آهن بی‌شکل < کربناتی < آلی گزارش کردند. هم‌چنین پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) توزیع شکل‌های شیمیایی آهن را در برخی از خاک‌های استان آذربایجان شرقی با استفاده از روش سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) به صورت باقی‌مانده < اکسیدهای آهن بلوری < اکسیدهای آهن بی‌شکل < کربناتی < آلی < تبادل و هم‌چنین پاشاپور و همکاران (Sharifi *et al.*, 2016) همبستگی

آهن یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده سنگ کره (Lithosphere) بوده که غلظت کل آن در پوسته زمین حدود پنج درصد وزنی گزارش شده است (Monge *et al.*, 1993). مقدار آهن در خاک‌های طبیعی بین هفت تا ۴۲ گرم بر کیلوگرم متغیر است (Xing & Zhu, 2003). با این حال، مقدار آهن قابل استفاده برای گیاه در اکثر خاک‌های کشاورزی پایین بوده که حدود یک‌سوم از خاک‌های دنیا دچار کمبود آهن هستند. چون آهن در خاک عمدتاً به صورت اکسیدها و هیدرواکسیدهای فلزی و یا در کانی‌های اولیه و ثانویه موجود بوده (Connolly & Guerinot, 2002; Xing & Zhu, 2003) که این یک عامل محدود کننده برای رشد اکثر گیاهان می‌باشد. قابلیت استفاده آهن در خاک بستگی به توزیع شکل‌های شیمیایی آن در خاک داشته که خود تحت تأثیر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند مقدار بی-کربنات محلول و کربنات کلسیم فعال، پهاش خاک، پتانسیل اکسایش-کاهش، رطوبت خاک و مواد آلی می‌باشد (Pashapoor *et al.*, 2016). مقدار بالای پهاش خاک و کربنات کلسیم آزاد و میزان پایین ماده آلی خاک که اغلب ویژگی‌های بارز خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک بوده، از جمله عوامل اصلی کمبود آهن در گیاهان می‌باشند (Wei *et al.*, 2010). برای درک بهتر فرآیندهای مؤثر بر فراهمی آهن در خاک از روش‌های عصاره‌گیری دنباله‌ای استفاده شده که در این روش‌ها شکل‌های شیمیایی آهن در فاز جامد خاک به تفکیک جداسازی می‌شود (Khanmirzaei *et al.*, 2013). به‌طور کلی روش‌های عصاره‌گیری دنباله‌ای با ضعیف‌ترین عصاره‌گیرها شروع شده و به قوی‌ترین عصاره‌گیرها ختم می‌شود که معمولاً بین پنج تا هفت شکل از فاز جامد خاک را استخراج می‌کند (Kabala & Singh, 2001). شکل محلول و تبدالی عناصر بیش‌ترین فراهمی و پویایی در خاک را دارد. شکل باقی‌مانده که در ارتباط با شبکه‌های بلورین کانی‌های خاک بوه، پایدارترین شکل عنصر در خاک را تشکیل می‌دهد. شکل کربناتی، آلی و متصل به اکسیدهای منگنز و آهن عناصر غذایی بسته به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، تاحدی برای گیاه قابل استفاده هستند (Lu *et al.*, 2005). با تعیین شکل‌های شیمیایی آهن در خاک

و ج) تعیین همبستگی بین شکل‌های شیمیایی آهن در خاک.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: بر اساس بررسی‌های میدانی و مشاهده عکس‌های هوایی منطقه، ۲۱ باغ پرتقال واشنگتن ناول (*Citrus sinensis* L. Osbeck) پیوند شده روی پایه نارنج (*Citrus aurantium*) با پراکندگی و یکنواختی مناسب در مناطق مختلف شهرستان داراب (جنوب شرقی استان فارس) انتخاب شدند (شکل ۱). سعی شد درختان انتخابی در دامنه سنی ۱۲ تا ۱۸ سال و سیستم مدیریت زراعی مشابه باشند. تمامی باغ‌ها از سیستم آبیاری قطره‌ای استفاده کرده و سیستم کاشت درختان عمدتاً مربعی (۵×۵) بود. هر باغ به سه قسمت مساوی تقسیم و در هر قسمت یک درخت سالم (بدون داشتن علائم بیماری یا آفت و کمبود یا سمیت شدید عناصر غذایی؛ در مجموع ۶۳ درخت) انتخاب شد. ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا بین ۹۰۰ تا ۱۵۰۰ متر بود. میانگین بارندگی و دمای سالیانه منطقه به ترتیب ۲۵۰ میلی‌متر و ۲۳ درجه سلسیوس می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های مناطق مورد مطالعه بر اساس نقشه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران (Banaei, 1998) به ترتیب یوستیک و هایپرترمیک می‌باشد. از هر باغ به‌طور تصادفی سه درخت سالم برای نمونه‌برداری خاک و گیاه انتخاب شدند.

مثبت و معنی‌داری بین درصد رس با شکل تبدالی، آلی، باقی‌مانده و آهن کل در برخی از خاک‌های استان گلستان مشاهده کردند. هم‌چنین آنان گزارش کردند که شکل‌های تبدالی، متصل به اکسیدهای منگنز و اکسیدهای آهن بلوری در تأمین آهن قابل استفاده (عصاره‌گیری شده با DTPA) گیاه نقش مؤثری داشتند. با عنایت به اینکه منطقه داراب یکی از مهم‌ترین قطب‌های تولید مرکبات بخصوص پرتقال در استان فارس بوده و با توجه به گزارش مکرر کلروز ناشی از کمبود آهن در مرکبات رشد یافته در خاک‌های آهنکی (Tadayon *et al.*, 2003) (به دلیل میزان بالای بی-کربنات و پ‌هاش بالا (Hong *et al.*, 2012)) که سبب کاهش تولید و کیفیت میوه در مرکبات می‌شود، به نظر می‌رسد که با اندازه‌گیری شکل‌های شیمیایی آهن در خاک و تعیین ارتباط این شکل‌ها با غلظت آهن در گیاه، آهن قابل استفاده خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، می‌توان عوامل مؤثر در تأمین آهن مورد نیاز گیاه را مشخص کرده و اقدامات لازم را جهت بهینه کردن شرایط خاک برای جلوگیری از کمبود آهن در گیاه و افزایش فراهمی آن در خاک انجام داد. بنابراین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از الف) بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در شماری از خاک‌های آهنکی تحت کشت پرتقال ناول در منطقه داراب ب) تعیین همبستگی شکل‌های شیمیایی آهن با برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مقدار آهن قابل استفاده (عصاره‌گیری شده توسط DTPA) و غلظت آهن در برگ



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان فارس (سمت راست) و شهرستان داراب (سمت چپ)
Figure 1. Location of the studied area in Fars province (right) and Darab region (left)

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک

متری از سطح زمین نمونه‌برداری شد. پس از شستشوی برگ‌ها توسط آب مقطر، تا رسیدن به وزن ثابت به مدت ۴۸ ساعت در آن و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند، سپس توسط آسیاب برقی پودر شده و به‌صورت خشک سوزانی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر و با استفاده از اسید کلریدریک دو نرمال به-صورت محلول در آورده شدند. غلظت آهن در عصاره‌های حاصل توسط دستگاه جذب اتمی (AAS; PG 990, PG Instruments Ltd. UK) اندازه‌گیری شد.

روش عصاره‌گیری دنباله‌ای: برای اندازه‌گیری شکل‌های شیمیایی آهن از روش سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) استفاده شد. این روش، آهن را به شکل‌های محلول + تبادلی، کربناتی، آلی، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن بی‌شکل، اکسیدهای آهن بلورین و باقی‌مانده جدا می‌کند (جدول ۱). شکل باقی‌مانده آهن از طریق تفاوت بین میزان کل آهن خاک با مجموع شکل‌های دیگر محاسبه شد (Kamali *et al.*, 2011). غلظت آهن کل خاک در عصاره به‌دست آمده از دو گرم خاک که به‌مدت یک شب توسط ۱۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک چهار نرمال در دمای ۸۰ درجه سلسیوس هضم شده، اندازه‌گیری شد (Sposito *et al.*, 1982). بعد از عصاره‌گیری آهن در هر مرحله، غلظت آهن به وسیله دستگاه جذب اتمی (AAS; PG 990, PG Instruments Ltd. UK) اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که استانداردهای آهن در محلول‌هایی که از نظر ترکیب و غلظت مشابه عصاره‌گیرهای هر مرحله بوده، تهیه شد.

در اواخر دی‌ماه ۱۳۹۴، از زیر درختان انتخابی و ناحیه سایه‌انداز هر درخت یک نمونه مرکب سطحی (از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در چهار جهت مختلف) در مجاورت قطره‌چکان‌ها و در مجموع ۶۳ نمونه خاک تهیه شد. پس از هواخشک کردن و عبور از الک دو میلی-متری برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها مانند بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، ماده آلی به روش اکسیداسیون با اسید کرومیک و سپس تیتره کردن توسط فروآمونیم سولفات و سپس تیتره کردن (Nelson & Sommers, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Loppert & Suarez, 1996)، پهاش در خمیر اشباع (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره خمیر اشباع (Rhoades, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جاننشینی کاتیون‌ها توسط استات سدیم (Chapman, 1965) و آهن قابل استفاده توسط عصاره‌گیر DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) اندازه‌گیری شدند. پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های بالا، ۱۰ نمونه از خاک‌ها را که دارای دامنه وسیع‌تری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بودند، برای انجام آزمایش عصاره‌گیری دنباله-ای (Singh *et al.*, 1988) انتخاب و به آزمایشگاه انتقال داده شدند.

تجزیه برگ و اندازه‌گیری غلظت آهن: هم‌زمان با نمونه‌برداری خاک، نمونه‌برداری از برگ درختان انتخابی نیز انجام شد. تعداد ۱۰۰ برگ کامل شش ماهه (برگ‌های چهارم و پنجم از شاخه‌های رشد تابستانه) (Davis & Alberigo, 1994) از اطراف هر درخت و در ارتفاع ۱/۵

جدول ۱- روش عصاره‌گیری دنباله‌ای سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988)

Table 1. Sequential extraction procedure of Sing *et al.* (1988)

Chemical forms of Fe	Specific gravity (g.cm ⁻³)	Used extractant	Time of shaking (h)	Time of abbreviation
(Exchangeable and soluble)	1.10	1 M Mg(NO ₃) ₂	2	WsEx-Fe
(Carbonatic)	1.04	1 M NaOAc (PH=5)	5	Car-Fe
(Organic)	1.00	0.7 M NaOCl (pH=8.5)	0.5	OM-Fe
(Mn oxides)	1.00	0.1 M NH ₂ OH, HCl (pH=2, HNO ₃)	0.5	MnOx-Fe
(Amorphous Fe oxides)	1.01	0.25 M NH ₂ OH, HCl + 0.25 M HCl	0.5	AFeOx-Fe
(Crystalline Fe oxides)	1.02	0.2 M (NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ + 0.2 MH ₂ C ₂ O ₄ + 0.1 M C ₆ H ₈ O ₆	0.5	CFeOx-Fe

استفاده خاک و غلظت آهن در برگ با استفاده از نرم-افزار آماری SPSS 17.0 انجام پذیرفت.

پردازش داده‌ها: مطالعه آماری داده‌ها برای بررسی همبستگی میان شکل‌های شیمیایی آهن در خاک با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مقدار آهن قابل

نتایج و بحث

است (Haghparast Tanha, 1992). بنابراین حدود ۸۰ درصد خاک‌های انتخابی مقدار آهن قابل استفاده آن‌ها کم‌تر از حد بحرانی بود. دامنه تغییرات آهن کل (عصاره‌گیری شده توسط اسید نیتریک ۴چهار نرمال) بین ۲/۶۰ گرم در کیلوگرم خاک تا ۷/۵۶ گرم در کیلوگرم خاک بود. بهرا و سینگ (Behra & Singh, 2010) محدوده طبیعی آهن کل در خاک‌ها را بین پنج تا ۵۰ گرم در کیلوگرم خاک گزارش کردند. بنابراین مقدار آهن کل در حدود ۸۰ درصد از خاک‌های مورد مطالعه در دامنه گزارش شده قرار دارد. پاشپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) مقدار آهن کل را در برخی از خاک‌های استان آذربایجان شرقی بین ۱۵/۲۵ تا ۵۰/۸۴ گرم در کیلوگرم خاک گزارش کردند که بیشتر از مقدار آن در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد. هم‌چنین عباسی‌کلو و همکاران (Abbasi-Kalo *et al.*, 2014) گزارش کردند که مقدار آهن کل در خاک‌های مرند بین ۵/۱۰ تا ۱۴/۸۷ گرم در کیلوگرم خاک متغیر بود.

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. مقدار پهاش خاک از ۷/۱۴ تا ۷/۸۵، قابلیت هدایت الکتریکی خاک از ۰/۲۴ تا ۵/۰۴ دسی‌زیمنس بر متر، ماده آلی از ۱/۹ تا ۷ درصد، کربنات کلسیم معادل از ۲۱/۳ تا ۸۶/۳ درصد، مقدار شن از ۳۱ تا ۸۵ درصد، مقدار سیلت از ۱۰ تا ۵۲ درصد و مقدار رس نیز از ۵ تا ۲۱ درصد متغیر بود. هم‌چنین ظرفیت تبادل کاتیونی خاک بین ۴/۵ تا ۱۵/۲ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم خاک تغییر کرد. در بین ۱۰ خاک انتخابی کم‌ترین مقدار آهن قابل استفاده خاک (عصاره‌گیری شده با DTPA) ۲/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و بیش‌ترین مقدار آن ۵/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک با میانگین ۴/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. حد بحرانی آهن در خاک بسته به شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و نوع گیاه متفاوت بوده اما به‌طور متوسط حدود پنج میلی‌گرم در کیلوگرم خاک (عصاره‌گیری شده توسط DTPA) گزارش شده

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 2. Selected physicochemical properties of studied soils

(Soil Number)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(pH)	7.40	7.51	7.76	7.19	7.65	7.17	7.85	7.47	7.14	7.76
EC (dS m ⁻¹)	1.89	1.13	0.76	0.97	0.24	5.04	0.55	0.84	1.55	1.13
Organic matter (%)	7.0	5.8	4.8	6.0	3.9	4.4	1.9	3.7	4.8	2.7
CCE (%)	21.3	58.8	51.9	56.9	86.3	60.6	51.3	48.8	45.0	41.9
CEC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	15.2	11.0	10.8	14.1	8.7	9.7	4.5	8.3	10.5	6.1
Sand (%)	73	63	47	43	79	31	53	85	53	73
Silt (%)	20	28	40	44	14	52	34	10	26	20
Clay (%)	7	9	13	13	7	17	13	5	21	7
Total iron (g kg ⁻¹)	7.56	6.36	6.82	5.08	2.60	5.96	5.40	3.97	6.20	5.30
DTPA-Fe (mg kg ⁻¹)	5.6	4.0	4.7	5.5	3.5	2.9	3.5	4.5	4.5	4.0

توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های مورد مطالعه در خاک‌های مورد مطالعه غلظت شکل محلول و تبدالی بین ۴/۸۴ تا ۵/۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، کربناتی ۳/۹۸ تا ۴/۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، آلی ۴/۳۷ تا ۴/۸۹ میلی‌گرم در کیلوگرم، متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل ۱۴/۱۰ تا ۳۲۲/۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، متصل به اکسید آهن بلوری ۲۴۲۲/۰۰ تا ۵۲۶۴/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و باقی‌مانده حدود ۰/۱، ۰/۰۸۷، ۰/۰۹۰، ۰/۴۹۶، ۷۵/۶۵۸ و ۲۲/۵۶۹ درصد بود. بنابراین ترتیب فراوانی شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های مورد مطالعه

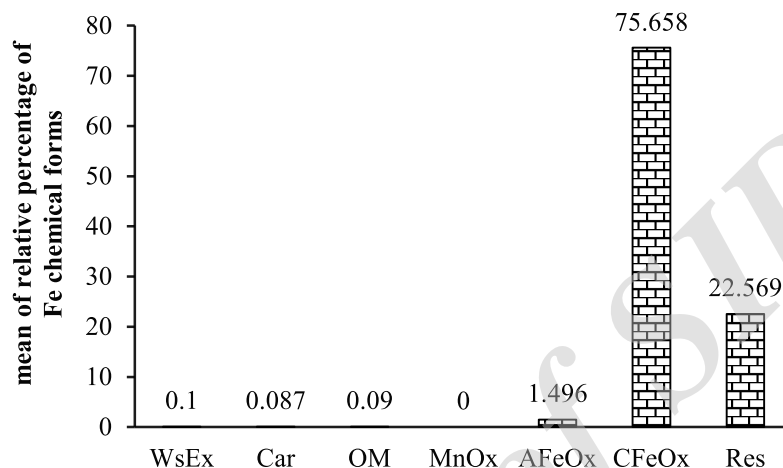
توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های مورد مطالعه در خاک‌های مورد مطالعه غلظت شکل محلول و تبدالی بین ۴/۸۴ تا ۵/۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، کربناتی ۳/۹۸ تا ۴/۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، آلی ۴/۳۷ تا ۴/۸۹ میلی‌گرم در کیلوگرم، متصل به اکسیدهای آهن بی‌شکل ۱۴/۱۰ تا ۳۲۲/۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، متصل به اکسید آهن بلوری ۲۴۲۲/۰۰ تا ۵۲۶۴/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و باقی‌مانده از ۱۴۰/۵۶ تا

است. با توجه به غالب بودن هر یک از این اجزاء در خاک و تفاوت در توانایی آن‌ها در جذب و نگهداری آهن، ماده آلی می‌تواند نقش متفاوتی را در نگهداری آهن در خاک داشته باشد (Lindsay, 1991). سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) علت میزان کم آهن در شکل آلی در خاک‌های آهکی را ناشی از پایین بودن درصد نسبی مواد آلی خاک و همچنین متفاوت بودن اجزاء ترکیبات آلی خاک دانستند. بنابراین احتمالاً در خاک‌های مورد مطالعه جزئی از ماده آلی غالب است که توانایی کمی در جذب و نگهداشت آهن در خاک دارد. همچنین ممکن است کودهای دامی استفاده شده به اندازه کافی پوسیده نشده‌اند تا بتوانند تأثیرگذاری قابل قبولی داشته باشند. مقدار آهن کربناتی نیز در این پژوهش به‌طور میانگین ۰/۰۸۷ درصد بود. پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) و تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) به ترتیب با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در برخی خاک‌های استان آذربایجان شرقی و فارس مقدار آهن کربناتی را به‌طور میانگین حدود ۰/۰۷۳ و ۰/۰۵۲ درصد گزارش کردند. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) تفاوت در میزان آهن عصاره‌گیری شده به شکل کربناتی در خاک‌های آهکی مختلف را مربوط به اندازه ذرات کربنات کلسیم در خاک دانستند و بیان کردند که اهمیت اندازه ذرات بیش‌تر از مقدار کل کربنات کلسیم معادل در خاک است. فیلیگورز و همکاران (Filgueiras *et al.*, 2002) گزارش کردند که شکل کربناتی درصد نسبتاً کمی از کل مقدار آهن در خاک را شامل می‌شود و می‌تواند به‌صورت بالقوه برای گیاهان قابل استفاده باشد. همچنین ما و اورن (Ma & Uren, 1995) شکل کربناتی آهن را کم‌ترین مقدار شکل آهن پس از جزء محلول و تبادل در خاک‌های مورد مطالعه خود گزارش کردند. مجموعاً به‌طور میانگین حدود ۷۷ درصد از کل آهن در خاک به‌صورت اکسیدهای آهن (بلوری و بی‌شکل) وجود داشت و مقدار اکسیدهای آهن بلوری به‌طور قابل ملاحظه‌ای از اکسیدهای آهن بی‌شکل بیش‌تر بود به‌طوری‌که اکسید آهن بلوری شکل غالب آهن در خاک‌های مورد مطالعه بود. کاظمی و همکاران (Kazemi *et al.*, 2012) و ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 1997) گزارش کردند که شکل اکسیدهای آهن

به‌صورت اکسید آهن بلوری < آهن باقی‌مانده > اکسید آهن بی‌شکل < آهن محلول و تبدالی > آهن آلی \leq آهن کربناتی < آهن متصل به اکسیدهای منگنز بود. مقدار آهن در شکل متصل به اکسیدهای منگنز ناچیز و کم‌تر از حد کشف دستگاه جذب اتمی بود. در مطالعه تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) بر روی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در برخی از خاک‌های آهکی استان فارس ترتیب شکل‌های شیمیایی آهن به‌صورت آهن باقی‌مانده < اکسید آهن بلوری > اکسید آهن بی‌شکل < آهن کربناتی > آهن آلی < آهن محلول و تبدالی > آهن متصل به اکسیدهای منگنز گزارش شد. آنان نیز مقدار آهن در شکل متصل به اکسیدهای منگنز را ناچیز گزارش کردند. شریفی و همکاران (Sharifi *et al.*, 2016) با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در ۱۰ خاک استان گلستان ترتیب غلظت شکل‌های مختلف آهن را به‌صورت آهن باقی‌مانده < اکسید آهن بلوری > اکسید آهن بی‌شکل < متصل به اکسید منگنز > آهن آلی < محلول و تبدالی > کربناتی گزارش کردند. همچنین پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) توزیع شکل‌های شیمیایی آهن را در برخی از خاک‌های استان آذربایجان شرقی به صورت آهن باقی‌مانده < اکسید آهن بلوری > اکسید آهن بی‌شکل < آهن پیوسته به اکسیدهای منگنز > آهن آلی < آهن محلول و تبدالی \leq آهن کربناتی بیان کردند. همان‌طور که از نتایج این پژوهش مشخص است، شکل‌های محلول و تبدالی، کربناتی و آلی مجموعاً کم‌تر از ۰/۳ درصد از آهن کل موجود در خاک را شامل می‌شوند که مقدار بسیار پایینی است. مقدار کم آهن در شکل محلول و تبدالی احتمالاً به پهاش بالای خاک‌های مورد مطالعه ارتباط دارد. پهاش بالای خاک، تشکیل ترکیبات اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن نامحلول و اشغال مکان‌های تبدالی توسط آهن هیدروکسیلی می‌تواند از عوامل مؤثر بر کاهش شکل محلول و تبدالی آهن در خاک باشد (Mathur *et al.*, 1998). با وجود اینکه مقدار ماده آلی خاک‌های مورد مطالعه بین دو تا هفت درصد (به دلیل استفاده زیاد از کودهای حیوانی توسط کشاورزان منطقه) بود (جدول ۲)، اما مقدار کمی از آهن در شکل آلی وجود داشت. ماده آلی شامل اجزای مختلفی شامل اسید هومیک، اسید فولویک و هومین

در خاک در شکل‌هایی با پایداری بالا و در شبکه بلوری کانی‌ها موجود بوده که عملاً برای گیاه غیرقابل استفاده می‌باشد. زمبریوا و همکاران (Zemberyova *et al.*, 2004) گزارش کردند که قسمت عمده آهن در خاک به شکل اکسیدهای آهن بلوری و باقی‌مانده می‌باشد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

بلوری یا بی‌شکل به طور میانگین حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد آهن خاک‌های مورد مطالعه آن‌ها را تشکیل داده است. همچنین به طور میانگین حدود ۲۲/۵ درصد از کل آهن در خاک‌های مورد مطالعه به شکل آهن باقی‌مانده وجود داشت که بعد از اکسیدهای آهن بلوری بیش‌ترین سهم آهن در خاک را به خود اختصاص داد. این مطلب نشان دهنده این است که مقدار قابل توجهی از آهن موجود



شکل ۲- میانگین درصد نسبی شکل‌های شیمیایی آهن (درصد) در خاک‌های مورد مطالعه

Figure 2. Mean of relative percentage of Fe chemical forms (%) in studied soils

WsEx; Exchangeable and soluble, Car; Carbonatic, OM; organic, MnOx; Mn oxides, AFeOx; Amorphous Fe oxides, CFeOx; Crystalline Fe oxides, Res; Residual

کردند. همچنین تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) همبستگی منفی معنی‌داری بین آهن کربناتی با مقدار شن، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم معادل خاک در برخی از خاک‌های آهکی استان فارس را گزارش کردند در صورتی که پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) فقط همبستگی منفی معنی‌داری بین کربن آلی خاک با آهن کربناتی در برخی از خاک‌های استان آذربایجان شرقی را گزارش کردند. ریحانی‌تبار و همکاران (Reyhanitabar *et al.*, 2006) نشان دادند که اندازه ذرات کربنات کلسیم در خاک همبستگی بیش‌تری با عناصر کم‌مصرف در خاک-ها نسبت به مقدار کل کربنات کلسیم معادل داشته که این موضوع اهمیت اندازه ذرات کربنات کلسیم در مقایسه با مقدار کل آن در خاک را نشان می‌دهد. آهن آلی نیز با قابلیت هدایت الکتریکی خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد، درحالی که با مقدار ماده

همبستگی بین شکل‌های شیمیایی آهن و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک: شکل‌های شیمیایی آهن با برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه همبستگی معنی‌داری نشان دادند (جدول ۳). شکل محلول و تبدالی آهن فقط با مقدار رس خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد که با نتایج پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) مطابقت دارد. افزایش مقدار رس یکی از عوامل مؤثر در افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی بوده که در نتیجه آن می‌تواند شکل تبدالی آهن را افزایش دهد. شکل کربناتی آهن همبستگی مثبت و معنی‌داری با سیلت خاک و همبستگی منفی معنی‌داری با شن خاک داشت درحالی که با مقدار کربنات کلسیم معادل کل همبستگی معنی‌داری را نشان نداد. سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) همبستگی آهن کربناتی را با مقدار رس و سیلت مثبت و با مقدار شن منفی گزارش

کربنات کلسیم بر روی کانی‌های پایدار حاوی آهن ایجاد شده و مانع تشکیل آهن به شکل باقی‌مانده می‌شود. مقدار آهن کل خاک با سیلت، ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری را نشان داد، درحالی‌که بین آهن کل خاک با مقدار شن خاک همبستگی منفی معنی‌داری وجود داشت. ژلیک و همکاران (Jelic *et al.*, 2011) نیز با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در هفت خاک ورتی‌سول، همبستگی منفی معنی‌داری را بین آهن کل و مقدار شن خاک گزارش کردند که با پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که هر چه بافت خاک درشت‌تر باشد، ظرفیت جذب آهن توسط خاک کاهش یافته و آهن کم‌تر وارد ساختار کانی‌های مانند سیلیکات‌ها و کوارتز شده و آهن کل خاک در خاک‌های درشت بافت نسبت به خاک‌های با بافت سنگین کم‌تر است (Sánchez-Martín *et al.*, 2007). همبستگی مثبت معنی‌دار بین ظرفیت تبادل کاتیونی و آهن کل خاک نشان دهنده این است که خاک‌هایی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتر ممکن است مقدار کل آهن بیشتری داشته باشند (Jassal *et al.*, 2000). در این پژوهش برخلاف همبستگی معنی‌دار بین آهن کل با درصد سیلت خاک، یک ارتباط هم‌سوی ضعیف بین آهن کل خاک با درصد رس خاک مشاهده شد ($r=0/34$). عباسی‌کلو و همکاران (Abbasi-kalo *et al.*, 2014) نیز ارتباط ضعیف مقدار آهن کل خاک با مقدار رس در برخی از افق‌های خاک‌های منطقه مرنند آذربایجان شرقی را گزارش کردند. آنان این‌طور تفسیر کردند که برخی از کانی‌های آهن‌دار از قبیل بیوتیت و ایلمنیت در بخش سیلت و شن حضور داشته که موجب همبستگی ضعیف بین میزان آهن کل با مقدار رس خاک می‌شود. از آنجایی که در این پژوهش همبستگی منفی معنی‌داری بین مقدار شن و آهن کل خاک به‌دست آمد، به‌نظر می‌رسد که احتمالاً کانی‌های حاوی آهن که مقدار کل آهن خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بیش‌تر در بخش سیلت و رس خاک وجود دارد. همچنین بین مقدار آهن کل با درصد کربنات کلسیم معادل نیز همبستگی منفی معنی‌داری وجود داشت. بین مقدار آهن عصاره‌گیری شده توسط DTPA (احتمالاً قابل استفاده گیاهی) با مقدار ماده آلی خاک و ظرفیت تبادل

آلی همبستگی معنی‌داری را نشان نداد. نتایج یاد شده با یافته‌های تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) که از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) برای جداسازی شکل‌های شیمیایی آهن در برخی خاک‌های آهکی استان فارس استفاده کردند، مطابقت دارد. در صورتی که پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) با استفاده از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 1988) در خاک‌های استان آذربایجان شرقی و تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) با استفاده از روش عصاره‌گیری دنباله‌ای اسپوزیتو و همکاران (Sposito *et al.*, 1982) در برخی از خاک‌های استان فارس ارتباط مثبت و معنی‌داری را بین آهن آلی با مواد آلی خاک گزارش کردند. بنابراین به نظر می‌رسد احتمالاً نوع روش عصاره‌گیری دنباله‌ای، ویژگی‌های متفاوت فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها، ماهیت متفاوت مواد آلی خاک مانند نسبت کربن به نیتروژن و تفاوت در اجزاء تشکیل دهنده مواد آلی خاک می‌تواند در ایجاد همبستگی بین شکل آلی آهن با مقدار ماده آلی خاک مؤثر باشد. نتایج نشان داد که بین اکسید آهن بی‌شکل با ماده آلی و ظرفیت تبادل کاتیونی همبستگی مثبت و معنی‌دار و با کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی معنی‌داری وجود داشت. تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) نیز همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین اکسید آهن بی‌شکل با ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار رس و همبستگی منفی معنی‌داری را با کربنات کلسیم معادل و شوری خاک گزارش کردند. در صورتی که پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) ارتباط معنی‌داری بین این شکل آهن با ویژگی‌های خاک را مشاهده نکردند. بین شکل اکسید آهن بلوری با ویژگی‌هایی مانند شوری و مقدار سیلت همبستگی مثبت معنی‌دار و با پهاش و مقدار شن خاک همبستگی منفی معنی‌داری مشاهده شد. همبستگی منفی معنی‌داری بین اکسید آهن بلوری و پهاش خاک در برخی از خاک‌های استان آذربایجان شرقی گزارش شده است (Pashapoor *et al.*, 2016). در پژوهش حاضر همبستگی منفی معنی‌داری بین کربنات کلسیم معادل در خاک با آهن باقی‌مانده مشاهده شد. احتمالاً با افزایش میزان کربنات کلسیم معادل در خاک پوششی از

ریز موجودات خاکزی بیش تر شده و سبب ایجاد شرایط کاهش در خاک می شود. وجود شرایط کاهش سبب حل شدن بیش تر کربنات ها در اثر کاهش پهاش و تبدیل آهن سه ظرفیتی به دو ظرفیتی شده و میزان تحرک آهن در خاک بیش تر شده و بنابراین قابلیت استخراج آهن توسط عصاره گیر DTPA افزایش می یابد. شارما و همکاران (Sharma *et al.*, 2008) همبستگی مثبت و معنی داری را بین ماده آلی خاک با آهن عصاره گیری شده توسط DTPA مشاهده نمودند. آن ها دلیل این امر را تشکیل کلات آهن و کاهش آهن سه ظرفیتی به آهن دو ظرفیتی بر اثر به وجود آمدن شرایط احیا دانستند. سینگ و رام (Singh & Ram, 2007) نیز بین آهن عصاره گیری شده توسط DTPA و ماده آلی خاک همبستگی مثبت و معنی داری را گزارش نمودند.

کاتیونی همبستگی مثبت و معنی دار و با میزان کربنات کلسیم معادل خاک همبستگی منفی معنی داری مشاهده شد. ماده آلی فقط همبستگی مثبت معنی داری با شکل اکسید آهن بی شکل و آهن کل خاک داشت که نشان دهنده این است که هر چه ماده آلی در خاک بیش تر شود، شکل اکسیدی آهن بی شکل و در پی آن آهن کل خاک زیاد شده و از طرفی آهن قابل استفاده نیز با مقدار اکسید آهن بی شکل همبستگی مثبت و معنی داری نشان داد. بنابراین می توان گفت که با افزایش ماده آلی خاک میزان آهن در شکل شیمیایی اکسیدی بی شکل زیاد شده و در پی آن آهن قابل استفاده خاک تحت تأثیر قرار می گیرد. همچنین این موضوع بیانگر این بوده که در اثر افزایش ماده آلی خاک که نتیجه آن افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک است، احتمالاً میزان نگهداری آب در خاک و فعالیت

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شکل های شیمیایی آهن و آهن قابل عصاره گیری با دی تی پی ا با برخی ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک

Table 3. The Pearson correlation coefficient between Fe chemical forms and DTPA-Fe with some physicochemical characteristics of the studied soils

Parameters	(CCE)	(OM)	(Clay)	(Silt)	(Sand)	(pH)	(EC)	(CEC)
WsEx	0.29 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.40*	0.10 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	-0.26 ^{ns}	0.28 ^{ns}
Car	-0.23 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.15 ^{ns}	0.57**	-0.50**	0.09 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.22 ^{ns}
OM	-0.23 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.29 ^{ns}	-0.24 ^{ns}	-0.10 ^{ns}	0.44*	0.10 ^{ns}
AFeOx	-0.70**	0.65**	-0.31 ^{ns}	-0.33 ^{ns}	0.35 ^{ns}	-0.10 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.58**
CFeOx	-0.28 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.53**	-0.51**	-0.45*	0.41*	0.26 ^{ns}
Res	-0.62**	0.29 ^{ns}	0.18 ^{ns}	0.12 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.29 ^{ns}
Total	-0.72**	0.47**	0.34 ^{ns}	0.40*	-0.41*	-0.16 ^{ns}	0.28 ^{ns}	0.43*
DTPA-Fe	-0.55**	0.61**	-0.19 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	0.22 ^{ns}	-0.16 ^{ns}	-0.47**	0.67**

WsEx; Exchangeable and soluble, Car; Carbonatic, OM; organic, MnOx; Mn oxides, AFeOx; Amorphous Fe oxides, CFeOx; Crystalline Fe oxides, Res; Residual

** و * و ns به ترتیب معنی دار در سطح یک درصد، پنج درصد و غیر معنی دار

** , * are significant at 1 and 5 % probability levels, respectively and ns, not significant

شیمیایی آهن در خاک نشان گر وجود رابطه ای پویا بین اشکال مختلف آهن در خاک و تبدیل شدن شکل های شیمیایی آهن در طول زمان به یکدیگر می باشد. پاشاپور و همکاران (Pashapoor *et al.*, 2016) با بررسی توزیع شکل های شیمیایی آهن در خاک های استان آذربایجان شرقی همبستگی مثبت و معنی داری را بین شکل کربناتی آهن با اکسیدهای آهن بی شکل و آهن متصل به اکسیدهای منگنز گزارش کردند. تابنده و کریمیان (Tabande & Karimian, 2014) نیز بین مقدار آهن کل با آهن باقی مانده همبستگی مثبت و معنی داری را گزارش کردند، در حالی که بین آهن کربناتی با

همبستگی بین شکل های شیمیایی آهن در خاک: همان طور که در جدول شماره ۴ نشان داده شده است، بین برخی از شکل های شیمیایی آهن در خاک همبستگی معنی داری وجود داشت. بین شکل کربناتی آهن با شکل های آهن آلی، اکسیدهای آهن بلوری و آهن کل همبستگی مثبت و معنی داری مشاهده شد. همچنین بین شکل اکسید آهن بی شکل با شکل آهن باقی مانده و کل همبستگی مثبت و معنی داری وجود داشت و شکل اکسید آهن بلوری و باقی مانده نیز همبستگی مثبت و معنی داری با آهن کل نشان دادند. وجود چنین همبستگی های معنی داری بین شکل های

گزارش کردند. هم‌چنین شارما و همکاران (Sharma *et al.*, 2008) نیز با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در چهار رده خاک مختلف در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بین شکل‌های مختلف آهن همبستگی مثبت و معنی‌داری را مشاهده کردند.

اکسیدهای آهن بی‌شکل و بلوری همبستگی منفی معنی‌داری مشاهده شد. بهرا و سینگ (Behra & Singh, 2010) با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در یک خاک قلیایی همبستگی معنی‌داری را بین شکل کربناتی آهن با شکل‌های محلول و تبدالی و جذبی آهن

جدول ۴- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های مورد مطالعه

Table 4. The Pearson correlation coefficient (r) among Fe chemical forms in studied soils

Parameters	(WsEx)	(Car)	(OM)	(AFeOx)	(CFeOx)	(Res)	(Total)
WsEx	1	0.25 ^{ns}	-0.31 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	0.059 ^{ns}	0.02 ^{ns}
Car		1	0.39 [*]	0.19 ^{ns}	0.68 ^{**}	0.14 ^{ns}	0.54 ^{**}
OM			1	0.21 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.24 ^{ns}
AFeOx				1	0.18 ^{ns}	0.55 ^{**}	0.61 ^{**}
CFeOx					1	0.09 ^{ns}	0.54 ^{**}
Res						1	0.79 ^{**}
Total							1

WsEx; Exchangeable and soluble, Car; Carbonatic, OM; organic, MnOx; Mn oxides, AFeOx; Amorphous Fe oxides, CFeOx; Crystalline Fe oxides, Res; Residual

** و * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح یک درصد، پنج درصد و غیر معنی‌دار

** , * are significant at 1 and 5 % probability levels, respectively and ns, not significant

آهن در خاک منبعی برای تأمین آهن مورد نیاز گیاه در خاک می‌باشد. آنان دلیل این همبستگی مثبت را این طور تفسیر کردند که در اثر افزایش ماده آلی خاک شرایط احیاء در خاک ایجاد شده و اکسیدهای آهن کاهش یافته و آهن متصل به اکسیدها آزاد شده و وارد محلول خاک می‌شود، بنابراین میزان آهن قابل استخراج توسط DTPA افزایش می‌یابد. هم‌چنین دسانتیاگو و همکاران (Dsantiago *et al.*, 2008) گزارش کردند که اکسیدهای آهن ضعیف شده به صورت کریستاله، منابع آهن برای گیاهان روینده در خاک‌های آهکی می‌کنند. ساندهو و همکاران (Sandhu *et al.*, 2016) نیز با بررسی توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های منطقه پنجاب هند (درصد آهک بین ۰/۶ تا ۱۹/۶ درصد)، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین آهن عصاره‌گیری شده با DTPA و آهن پیوسته به اکسیدهای آهن بی-شکل را گزارش کردند که با نتیجه پژوهش حاضر مطابقت دارد. مقدار آهن عصاره‌گیری شده توسط DTPA با میزان آهن کل همبستگی معنی‌داری نشان نداد. این نتیجه نشان‌دهنده این است که در خاک‌های مورد بررسی قابلیت استفاده آهن مستقل از مقدار کل آهن در خاک است (Jelic *et al.*, 2011).

همبستگی بین شکل‌های شیمیایی آهن با آهن قابل استخراج با DTPA و آهن برگ: همبستگی بین آهن قابل استفاده خاک (عصاره‌گیری شده توسط DTPA) و مقدار آهن موجود در برگ گیاه با شکل‌های شیمیایی آهن در خاک در جدول ۵ ارائه شده است. بین شکل‌های اکسید آهن بی‌شکل و آهن کل با مقدار آهن برگ همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد. هم‌چنین نتایج رگرسیون گام به گام نقش مؤثر شکل اکسیدهای آهن بی‌شکل مؤثر در غلظت آهن برگ را تأیید کرد (Leaf Iron = ۴۲/۹۶ + ۰/۱۲۸ AFeOx; r = p < ۰/۰۱). هم‌چنین، اکسید آهن بی‌شکل تنها شکلی از آهن با همبستگی مثبت و معنی‌دار با آهن قابل استفاده خاک بود. نتایج رگرسیون گام به گام نیز به صورت $p < ۰/۰۱$ بود. بنابراین به نظر می‌رسد که در خاک‌های آهکی تحت کشت پرتقال در منطقه داراب، شکل اکسیدهای آهن بی‌شکل که فقط حدود ۱/۵ درصد از کل آهن خاک را شامل می‌شوند، احتمالاً نقش مؤثر و بالقوه‌ای در تأمین عنصر آهن برای درختان پرتقال داشته باشند. در پژوهش وی و همکاران (Wei *et al.*, 2010) نیز یک همبستگی قوی و مثبتی بین شکل اکسیدی آهن با آهن قابل استخراج با عصاره-گیر DTPA گزارش شده و بیان کردند که این شکل

جدول ۵- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین میزان آهن برگ و آهن قابل استفاده خاک با شکل‌های شیمیایی آهن
Table 5. The Pearson correlation coefficient (r) between leaf-Fe content and soil available Fe with Fe chemical forms

	(Wsex)	(Car)	(OM)	(AFeOx)	(CFeOx)	(Res)	(Total)
Leaf Fe	0.13 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.50 ^{**}	0.20 ^{ns}	0.31 ^{ns}	0.43 [*]
DTPA-Fe	0.18 ^{ns}	0.12 ^{ns}	-0.15 ^{ns}	0.57 ^{**}	0.04 ^{ns}	0.34 ^{ns}	0.31 ^{ns}

Wsex; Exchangeable and soluble, Car; Carbonatic, OM; organic, MnOx; Mn oxides, AFeOx; Amorphous Fe oxides, CFEOx; Crystalline Fe oxides, Res; Residual

** , * are significant at 1 and 5 % probability levels, respectively and ns, not significant

از حد بحرانی بود که نتیجه بالا را تأیید می‌کند. هم‌چنین حدود ۷۶ درصد از کل آهن در شکل اکسیدهای آهن بلوری (شکل غالب) نشانگر نقش مهم این کانی‌ها در نگه‌داشت و جذب سطحی آهن در خاک‌های مورد مطالعه است. در بین ویژگی‌های خاک، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل و ظرفیت تبادل کاتیونی از ویژگی‌های مؤثر در تعیین قابلیت استفاده آهن در خاک بودند. هم‌چنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های مورد مطالعه وجود داشت که بیانگر رابطه‌ای پویا و تبدیل شکل‌های شیمیایی مختلف آهن به یکدیگر در طول زمان در خاک است. از آنجا که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین مقدار ماده آلی خاک با شکل اکسیدهای آهن بی‌شکل و آهن قابل استفاده در خاک وجود داشت، بنابراین به نظر می‌رسد که میزان ماده آلی خاک می‌تواند نقش مؤثری بر فراهمی آهن در خاک باغات پرتقال داشته باشد.

نتیجه‌گیری کلی

توزیع شکل‌های شیمیایی آهن در خاک‌های مورد مطالعه به‌صورت اکسید آهن بلوری < آهن باقی‌مانده > اکسید آهن بی‌شکل < آهن محلول و تبادلی > آهن آلی ≤ آهن کربناتی < آهن متصل به اکسیدهای منگنز بود. به‌طور کلی سهم شکل‌های محلول و تبادلی، آلی، کربناتی، اکسیدهای منگنز و اکسیدهای آهن بی‌شکل حدود ۱/۸ درصد از آهن کل خاک و ۹۸/۲ درصد از آهن کل در شکل‌های باقی‌مانده و اکسیدهای آهن بلوری وجود داشت. از طرفی تنها شکلی از آهن که با آهن قابل استفاده خاک (عصاره‌گیری شده توسط DTPA) و میزان آهن برگ همبستگی مثبت معنی‌داری نشان داد، آهن موجود در اکسیدهای آهن بی‌شکل بوده که به‌طور میانگین فقط حدود ۱/۵ درصد از کل آهن خاک‌ها را تشکیل می‌داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عمده آهن خاک در منطقه مورد مطالعه در شکل‌های غیرقابل استفاده گیاهی است. آهن قابل استفاده خاک در ۸۰ درصد خاک‌های مورد مطالعه کم‌تر

References

- Abbasi-Kalo A., Jafarzadeh A.A., Eghbal M., Ustan S., and Jahangiri A. 2014. Effect of Different Geomorphologic Surfaces on Soil Evolution Using Pedogenic Changes and Various Forms of Iron in Marand Region, East Azarbaijan. *Water and Soil Science*, 24(1): 85-101. (In Persian)
- Banaei, M.H. 1998. Soil Moisture and Temperature Regime Map of Iran. Soil and Water Research Institute. Ministry of Agriculture, Iran. (In Persian)
- Behera S.K., and Singh, D. 2010. Fractions of Iron in Soil under a long-term experiment and their contribution to iron availability and uptake by maize- wheat cropping sequence. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41: 1538-1550.
- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. Pp.811 – 903 In: Black CA (ed) *Methods of Soil Analysis*. Part II. Monograph No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Connolly E.L., and Guerinot M.L. 2002: Iron stress in plants. *Genome Biology*, 3:1024.1-1024.4.
- Dsantiago A., Diaz I., and Delgado A. 2008. Predicting the incidence of iron deficiency chlorosis from hydroxylamine-extractable iron in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 1493-1499.
- Davis F., and Albrigo L. 1994. Citrus. CAB International. Wallingford, UK.
- Filgueiras A.V., Lavilla I., and Bendicho C. 2002. Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples. *Journal of Environmental Monitoring*, 4 (6): 823-857.
- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis, hydrometer method. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 1, USA. Madison, Wisconsin, pp. 404-408.
- Hong H., Cheng X.H., Qiling T., Xiaoming H., Xuecheng S., and Lei B. 2012. Effects of Fe EDDHA application on iron chlorosis of citrus trees and comparison of evaluations on nutrient balance with three approaches. *Scientia Horticulturae*, 146: 137-142
- Haghparsat tanha, M. R. 1992. Nutrition and plant metabolism (Translation). Published by Islamic Azad University of Rasht, Iran. (In Persian)
- Jassal H.S., Sidhu P.S., Sharma B.D., and Mukhopadhyay S.S. 2000. Mineralogy and geochemistry of some soils of Siwalik Hills. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 48:163-172.
- Jelic M.Z., Milivojevic J.Z., Trifunovic S.R., Dalovic I.G., Milosev D.S., and Seremesic S.I. 2011. Distribution and forms of iron in the vertisols of Serbia. *Journal of Serbian Chemical Society*, 76(5): 781-794.
- Kamali S., Ronaghi A., and Karimian N. 2011. Soil zinc transformations as affected by applied zinc and organic materials. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 42(9): 1038-1049.
- Khanmirzaie A., Bazargan K., Moezzi A.A., Shahbazi K. 2013. Chemical forms of soil cadmium and its concentration in wheat grain in some calcareous soils of Khuzestan province. *Iranian Journal of Soil Research*, 26(4): 347-355. (In Persian)
- Kazemi A., Shariatmadari H., and Kalbasi M. 2012. Chemical forms changes and extractable iron in soils treated with slag and convertor sludge of Esfahan iron melting factory. *Journal of Water and Soil Resources Conversation*, 16(59): 87-99. (In Persian)
- Kabala C., and Singh B.R. 2001. Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter. *Journal of Environmental Quality*, 30: 485-492.
- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42:421-428.
- Lindsay W.L. 1991. Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Plant and Soil*, 130:27-34.
- Loeppert R.H., and Suarez L. 1996. Carbonate and gypsum. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of soil analysis*, Part 3, USA. Madison, Wisconsin, 437-474.
- Lu A., Zhang S., and Shan X. 2005. Time effect on the fractionation of heavy metals. *Geoderma*, 125: 225-234.
- Ma Y.B., and Uren N.C. 1995. Application of a new fractionation scheme for heavy metals in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26 (19-20): 3291-3303.
- Monge E., Perez C., Pequerul A., Madero P., and Val J, 1993. Effect of iron chlorosis on mineral nutrition and lipid composition of thylakoid biomembrane in *Prunus persica* (L.) Bastch. *Plant and Soil* 154: 97-102.

- Mathur B.S., Singh S.K., Gupta, B.P., and Kumar P. 1998. Studies on some forms of iron and aluminum and their release in relation to acidity of Chotanagpur soils. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 46(3) 456-458.
- Nodehsharif G., Dordipour E., Barani Motlagh M., and Olamaee M. 2016. Distribution of soil Iron chemical forms in some Golestan Province soils. *Applied Soil Research*, 4(1): 28-33. (In Persian)
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3*, Madison, Wisconsin: USA. 961-1010.
- Pashapoor N., Reyhanitabar A., and Oustan Sh. 2016. Determination of Iron Fractions and their Relations with Soil properties in Some Soils of East Azerbaijan. *Water and Soil Science*, 26(1): 205-215. (In Persian)
- Rhoades J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved salts. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3*, Madison, Wisconsin: USA. 961-1010.
- Reyhanitabar A., Karimian N.A., Ardalan M., Savaghebi G.R., and Ghanadha M.R. 2006. Zinc fractions of selected calcareous soils of Tehran province and their relationships with soil characteristics. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 3: 125-136. (In Persian)
- Sanchez-Martín M.J., Garcia-Delgado M., Lorenzo L.F., Rodriguez-Cruz M.S., and Arienzo M. 2007. Heavy metals in sewage sludge amended soils determined by sequential extractions as a function of incubation time of soils. *Geoderma*, 142: 262-273.
- Sandhu O.P., Jassal H.S., Dhallwal S.S., and Rolaniya L.K. 2016. Fractionation and distribution of iron in the salt affected soils of Muktsar district of Punjab. *The Ecoscan*, 10(2): 33-39.
- Sharma B.D., Chahal D.S., Singh P.K., and Raj-Kumar L. 2008. Forms of iron and their association with soil properties in four soil taxonomic orders of arid and semi-arid soils of Punjab, India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39: 2550-2567
- Sposito G., Lund L.J., and Chang A.C. 1982. Trace Metal Chemistry in Arid-zone Field Soils Amended with Sewage Sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in Solid Phases 1. *Soil Science Society of America Journal*, 46(2), pp.260-264.
- Singh J.P., Karwasra S.P.S., and Singh M. 1988. Distribution and forms of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soil of India. *Soil Science*, 146: 359-366.
- Singh V., and Ram N. 2007. Relationship of available micronutrients with some chemical properties and their uptake by rice-wheat-cowpea system in a Mollisol. *Journal of Soils and Crops*, 17: 191-197.
- Tabande L., and Karimian N. 2014. Comparison of two laboratory methods for investigation distribution of iron chemical forms in Some Soils of Fars Province. *Water and Soil Science*, 24(1):41-54. (In Persian)
- Tadayon M.S., Talai, A.R., Malakouti M.J., and Hassanpour A. 2003. The effect of ethylene on iron uptake and iron chlorosis paradox in sour lime (*Citrus aurantifolia*). *Water and Soil Science*, 17(1): 1-7. (In Persian)
- Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. 1979: Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51: 844-851.
- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 3*, USA. Madison, Wisconsin, 475-490.
- Wei X., Shao M., Zhuang J., and Horton R. 2010. Soil iron fractionation and availability at selected landscape positions in a loessial gully region of northwestern China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56: 617-626.
- Xing G.X., Zhu J.G. 2003. *Soil Chemistry of Trace Elements and Rare Earth Elements*. Science Press, Beijing. (In Chinese)
- Zemberyova M., Bartekova J., Bajcan D., and Vysinska D. 2004. Utilization of modified BCR three-step sequential extraction procedure for iron fractionation in soil reference materials. In: *Proceedings book 277, Adnan Menderes University, 4th AACD Congress*, 29 Sep-3 Oct. Kusadasi- Aydin, Turkey, pp. 536-538.
- Zhang M., Alva A.K., Li Y.C., and Calvert D.V. 1997. Fractionation of iron, aluminum, and phosphorous in selected sandy soils under citrus production. *Soil Science Society of America Journal*, 61:797-801.

Investigation of Iron Chemical Fractions in Some Calcareous Soils of Orange (*Citrus sinensis* L.) Orchards in Darab Region, Southeast of Fars Province

Hamid Reza Boostani^{1*}, Mahdi Najafi Ghiri², Hosein Amin³, Abbas Mirsoleimani³

(Received: February 2017

Accepted: October 2017)

Abstract

Iron (Fe) deficiency in soil is a limiting factor for the growth of most plants. Fe availability in soil depends on distribution of Fe chemical forms among soil components which it is affected by physicochemical characteristics of soil. The aim of the present study was to investigate the distribution of Fe chemical fractions in some calcareous soils of orange orchards in Darab region (Fars province) and their relationships with some soil physicochemical properties and Fe concentration in leaves of orange trees. A sequential extraction procedure was used to fractionate Fe chemical forms in the studied soils. The results showed that the distribution of Fe chemical fractions in the studied soils were in the order: CFeOx > Fe-Res > AFeOx > Fe-WsEx > Fe-OM > Fe-Car > Fe-MnOx. There was about 98.2 percent of total soil-Fe in both CFeOx and Fe-Res fractions which it indicates the presence of Fe in unavailable forms for plant in the studied soils. Among the Fe chemical forms, AFeOx fraction only showed a significant and positive correlation with DTPA extractable Fe in soil and Fe concentration in leaves of orange trees. Also, among the soil properties, organic matter, calcium carbonate equivalent and cation exchange capacity were the effective characteristics of soil in determining the bioavailability of Fe and content of AFeOx form in soil. There were significant and positive correlations among some Fe chemical forms in soil that it represents a dynamic relationship between Fe chemical forms in soil. According to the results, it seems that the amount of soil organic matter can have an effective role on the availability of Fe in calcareous soils of orange orchards.

Keywords: Amorphous Fe oxides, Calcium carbonate equivalent, Cation exchange capacity, DTPA-extractable Fe, Organic matter.

1- Assistant Professor, Department of Watershed and Range Management, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Iran

2- Associate Professor, Department of Watershed and Range Management, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Iran

3-Assistant Professor, Department of Plant Production, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Iran

* Corresponding Author Email: hr.boostani@shirazu.ac.ir