

اشکال آهن خاک در مزارع تحت کشت نیشکر با مدت زمان بهره‌برداری متفاوت

محسن حبیبیان^۱، سیروس جعفری^۲ و محسن شکل آبادی^{۳*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱/۲۹)

چکیده

کشت نیشکر در سطح وسیعی از اراضی استان خوزستان انجام می‌شود. اما این نوع کشت نیاز به کاربرد آب فراوان برای آبیاری (۳۰۰۰۰ مترمکعب در هکتار) در فواصل زمانی کوتاه دارد. این بررسی به منظور تعیین اثر زراعت نیشکر بر روند تغییرات اشکال اکسیدهای آهن در مزارع نیشکر با سوابق مختلف کشت انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش سابقه بهره‌برداری، مقدار کل اکسیدهای آهن آزاد (Fea) و اکسیدهای متبلور آهن (Fea-Feo) افزایش پیدا کرده است. متوسط مقدار Fea از ۶۹۵۸ میلی‌گرم در کیلوگرم در مزارع با سابقه بهره‌برداری متوسط تا ۴۵۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در مزارع با سابقه کم بهره‌برداری به دست آمد. در روندی مشابه، متوسط مقدار اکسیدهای آهن متبلور از ۵۸۸۸/۳ در مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد تا ۵۰۰۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در مزارع با سابقه بهره‌برداری کم کاهش یافت. افزایش در مزارع با سابقه زیاد نشان‌دهنده اثر زراعت نیشکر بر تحول در خاک است. مقدار اکسیدهای غیرمتبلور آهن (Feo) از ۴۴۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم در لایه سطحی خاک تا ۲۷۳/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم در عمیق‌ترین آن کاهش یافت. افزایش در سطح ناشی از وجود مواد آلی و فعالیت میکروبی بیشتر است. مقدار آهن فعال ($\frac{Feo}{Fed}$) در تمام مزارع پس از بهره‌برداری نسبت به قبل از آن کاهش یافته است. همچنین این نسبت از ۰/۰۵۵ در مزارع با سابقه زیاد تا ۰/۰۶۴ در مزارع با سابقه کم به دست آمد که نشان‌دهنده روند افزایش اکسیدهای بلورین آهن در مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد است.

واژه‌های کلیدی: آهن غیرمتبلور، اکسید آهن متبلور، نیشکر، مدت زمان بهره‌برداری

۱. گروه آب و خاک کشت و صنعت امام خمینی (ره)، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. گروه علوم خاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان، خوزستان

۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: sheklabadi@yahoo.com

مقدمه

دیتینونایت (CBD) برای استخراج عصاره همه انواع اکسیدهای آهن مورد استفاده قرار گیرد (۴).

با افزایش سن خاک اکسیدهای متبلور آهن نسبت به اشکال غیرمتبلور یا با تبلور ضعیف افزایش می‌یابد (۱). لی و دب (۳۱) نشان دادند که تغییرات کاربری زمین می‌تواند در درازمدت اکسیدهای آهن خاک را تحت تأثیر قرار دهد. تحقیقات آنان نشان داد که با افزایش فرسایش و اثرات شخم، مقدار آهن کریستالی افزایش می‌یابد. تغییرات استخراج آهن در طول دو قرن سابقه استفاده از زمین نشان داد که خاک‌های تحت کشت مقدار Fe_e (مقدار آهن قابل استخراج با سیترات-بیکربنات-دیتینونایت) زیادی دارند. افزایش مقدار Fe_e در هر خاک نشان‌دهنده تکامل بیشتر آن است (۱۳). همچنین لی و دب (۳۱) مشاهده کردند که Fe_e با افزایش عمق افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش عمق مقدار ماده آلی نیز کاهش یافته و امکان تبلور بیشتر آهن غیرمتبلور فراهم می‌شود. مقادیر کم مواد آلی امکان احیای آهن بلورین کانی‌ها و تشکیل آهن غیرمتبلور را کاهش می‌دهد (۴۳). میرابلا و کارسینلی (۳۵) بیان کردند هماتیت و گنویت که از اشکال بلورین آهن هستند، تمایل زیادی به ارتباط با ذرات رس کریستالی دارند که موجب انتقال آنها به افق‌های تجمع می‌شوند.

بعضی از محققان نشان دادند که در اراضی با سابقه کشت طولانی، مقدار Fe_e (مقدار آهن قابل استخراج با اگزالات آمونیوم) کاهش پیدا می‌کند (۱۱). بین مقدار ماده آلی و مقدار آهن غیرمتبلور رابطه وجود دارد، این فرم در افق‌های سطحی حاوی مواد آلی بالا، بیشتر از افق‌های تحتانی بوده و با افزایش عمق کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند به دلیل تشدید فرایندهای اکسیداسیون و احیای وجود ماده آلی بالا و امکان هوادیدگی بیشتر در سطح خاک باشد که مانع تبلور آهن غیرمتبلور می‌شوند (۴۳).

نسبت آهن اگزالات (Fe_e) به آهن دیتینونایت (Fe_d) تعیین کننده برخی از خصوصیات مربوط به اکسیدهای آهن موجود در خاک است. از این نسبت برای تعیین بسیاری از خصوصیات

رفتار آهن در سیستم‌های طبیعی نظیر خاک‌ها و به‌ویژه در محیط‌های بی‌هوازی نظیر خاک‌های غرقابی و شالیزارها، تأثیر زیادی بر قابلیت استفاده و تغییر شکل تعداد زیادی از دیگر عناصر دارد (۱۷). یکی از اثرات شرایط احیای ناشی از غرقاب، تغییر در اشکال مختلف آهن خاک است. آهن کل در خاک یا به‌صورت احیای (Fe^{2+}) و یا به‌صورت اکسید (Fe^{3+}) است که به‌صورت کریستالی و غیرکریستالی است. در شرایط بی‌هوازی، بخشی از آهن (III) موجود در کانی‌ها و مواد آلی احیای و به آهن (II) تبدیل می‌شود. مقدار آهن (II) تولید شده بستگی به سطح ویژه کانی‌های حاوی آهن و فعالیت الکترون دارد (۱۷).

تجمع و یا تخلیه آهن و منگنز اکسید و یا احیای شده همراه با نوسان سطح آب زیرزمینی در خاک رخ باعث ایجاد ماتلینگ و یا رنگ‌های خاکستری تا تیره در خاک می‌شود (۶۱). نشانه‌های اکسید و احیای یکی از علایم اصلی وضعیت اشباع یا آکوئیک در خاک‌های اشباع با سطح آب زیرزمینی بالا هستند و الگوهای توزیع اکسیدهای پدوژنیک به شدت وضعیت احیای خاک بستگی دارد (۱۳) و با استفاده از آنها می‌توان اشباع فصلی اتفاق افتاده در خاک‌ها را پیش‌بینی کرد (۱۶ و ۲۳). سیکل‌های متناوب اکسایش و کاهش در دوره‌های طولانی و به‌دنبال آن تحرک و تجمع یا تخلیه آهن و منگنز با تلاطم آب زیرزمینی در ارتباط است (۱۰). در نتیجه این نشانه‌ها از عمق و نوسان آب زیرزمینی و مقدار آب مصرفی برای آبیاری تأثیر می‌پذیرند (۲، ۱۵، ۵۵، ۵۶ و ۵۷).

اندازه‌گیری مقدار آهن کل و اشکال مختلف آن در خاک و مشخص کردن نسبت آنها می‌تواند برای برآورد شرایط خاک از حیث دوره‌های اکسیداسیون و احیای استفاده شود. ترکیب و نوع اکسید آهن می‌تواند نشان‌دهنده برخی از شرایط گذشته خاک باشد. همچنین رخداد این فرایند و آزادسازی آهن از ساختار کانی‌های رسی می‌تواند به‌عنوان ابزار مفیدی در مطالعه کانی‌های رسی نیز استفاده شود. اگزالات آمونیوم می‌تواند برای استخراج اکسیدهای آهن ضعیف کریستالی و سیترات بیکربنات

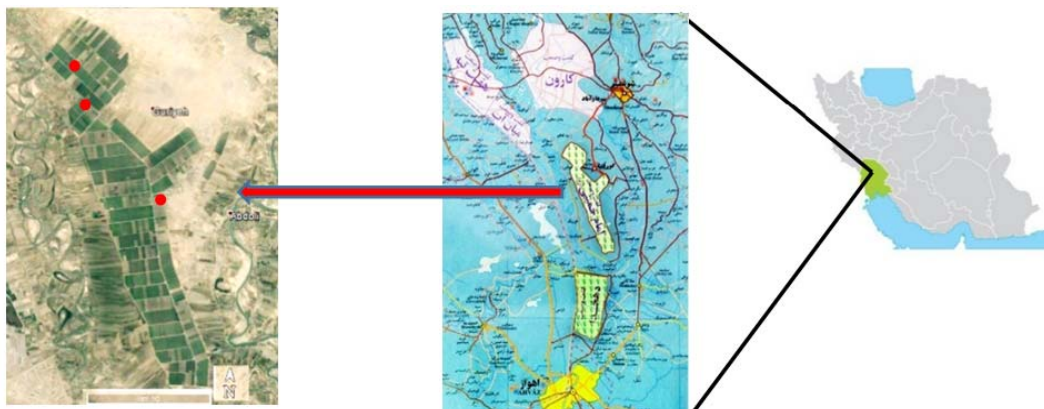
خلیرغم سوزاندن بقایای گیاهی و خروج ساقه‌های قابل آسیاب از خاک، ریشه‌ها و طوقه‌ها هر ساله به مقدار حدود ۴۰ تن در هکتار به خاک اضافه می‌شوند (۲۱). مواد آلی در خاک‌های تحت کشت نیشکر با گذشت زمان و افزایش سابقه کشت مزارع، افزایش یافته است (۵۳). با توجه به کشت متراکم و بدون تناوب نیشکر در بسیاری از اراضی حاصلخیز دشت خوزستان که همراه با آبیاری شدید و سنگین این اراضی در طی سال زراعی بوده و همچنین بافت سنگین خاک‌های منطقه، شرایط غرقابی و چرخه‌های متناوب اکسید و احیای در خاک حتی به صورت موضعی ایجاد می‌شود. بررسی روند تغییرات ویژگی‌های خاک در این اراضی زراعی از لحاظ کیفی و کمی کمک می‌کند تا از تخریب هر چه بیشتر این منبع عظیم خدادادی جلوگیری و از آنها بهره‌وری بیشتری انجام شود. همچنین این مطالعات اطلاعات مفیدی را برای مدیریت این اراضی در آینده و به‌ویژه برای کشت نیشکر با شرایط مناسب‌تر در اختیار قرار دهد. این تحقیق اثر زراعت متراکم و تک محصولی نیشکر با سابقه‌های کوتاه تا بلندمدت را بر ویژگی‌های خاک به‌ویژه مقادیر آهن و اشکال آن بررسی می‌کند.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹۳ در مزارع نیشکر شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) در فاصله ۴۰ کیلومتری جنوب شوشتر و ۵۰ کیلومتری شمال اهواز در استان خوزستان شکل (۱) به اجرا درآمد. زمین‌های زراعی این شرکت بین طول‌های جغرافیایی 31° و 39° تا 48° و 49° شرقی و عرض‌های جغرافیایی 31° و 39° تا 31° و 54° شمالی واقع شده که از شمال به تپه ماهورها و از طرف شرق به رودخانه شطیط و از غرب و جنوب به رودخانه دز محدود شده و ۲۴ تا ۴۰ متر از سطح دریا ارتفاع دارند. با توجه به آمار هواشناسی درازمدت ایستگاه‌های شوشتر و اهواز، اقلیم منطقه خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود. متوسط بارندگی ۱۰ ساله ۲۵۱/۴ میلی‌متر،

خاک مثل جذب فسفر یا پدوژنز خاک استفاده می‌شود. مقدار $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ با افزایش عمق کاهش یافته و کاهش آن با عمق به کند شدن سرعت آزاد شدن آهن از کانی‌های سیلیکاته مربوط می‌شود (۴۴). با افزایش سن خاک اکسیدهای متبلور آهن نسبت به اشکال غیرمتبلور یا با تبلور ضعیف افزایش می‌یابد، یعنی مقدار آهن قابل استخراج با دیتیونایت زیادتر می‌شود بنابراین مقدار $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ با افزایش سن خاک کاهش می‌یابد (۵۸). جلالیان و رمضانپور (۴۴) و هوانگ و همکاران (۱۸ و ۱۹) نشان دادند که مقدار نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ در خاک‌های تکامل یافته (سن بیشتر) کمتر از خاک بدون تکامل (سن کمتر) است. لایر و همکاران (۳۰) با بررسی تأثیر سن خاک بر کریستالی شدن اکسید آهن در خاک‌های با سنین مختلف در ساحل رودخانه وینا استرالیا نشان دادند که نسبت آهن اگزالات به دیتیونایت ($\frac{Fe_o}{Fe_d}$) به صورت فزاینده‌ای از مقدار ۰/۵ به کمتر از ۰/۲ با افزایش سن خاک کاهش یافت. این نسبت شاخصی قابل اعتماد برای تشخیص سن و بلوغ خاک است.

نیشکر (*Saccharum Officinarum L.*) در اغلب کشورهای که کشت می‌شود به صورت دیم بوده و نیاز به آبیاری ندارد. اما در استان خوزستان تقریباً تمام نیاز آبی گیاه از طریق آبیاری تأمین می‌شود. در استان خوزستان میانگین مصرف آب گیاه نیشکر ۳۰ هزار مترمکعب در هکتار در سال بود و فصل آبیاری در منطقه برای کشت اول بین ۱۳-۱۴ ماه و برای دوره‌های بازرویی بین ۸-۹ ماه به طول می‌انجامد. آبیاری با حجم زیاد و فواصل کم در مزارع نیشکر در طول دوره رشد رویشی گیاه باعث ایجاد شرایط احیای و کاهش تهویه خاک در ناحیه ریشه گیاه می‌شود. بافت سنگین مزارع تحت کشت نیشکر در استان خوزستان نیز مزید بر علت شده و این شرایط را تشدید می‌کند. زراعت نیشکر موجب افزایش ماده آلی در خاک شده و تجزیه ماده آلی در محیط‌های بدون اکسیژن الکترون لازم برای فرایندهای احیای عناصر خاک را فراهم می‌کند. در مزارع نیشکر



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محل اجرای تحقیق در کشت و صنعت امام خمینی (ره) در استان خوزستان

متوسط درجه حرارت سالیانه هوا ۲۵/۰ درجه سانتی‌گراد، حداقل و حداکثر مطلق آن به ترتیب ۴/۰- و ۵۱/۲ درجه سانتی‌گراد است (۱).

قبل از اجرای طرح کشت نیشکر عمده اراضی موجود در کشت و صنعت امام خمینی (ره) بایر و عمدتاً پوشیده از بوته‌های شورپسند بوده و بخشی از اراضی به صورت سنتی تحت کشت گندم و جو به صورت دیم و اندکی نیز با نهرهای سنتی آبیاری می‌شده است. مقدار نمک موجود در خاک‌های بایر قبل از آبیاری فوق‌العاده زیاد با متوسط هدایت الکتریکی ۸۰ دسی‌زیمنس بر متر بوده و مقدار مواد آلی خاک بسیار کم اندازه‌گیری شده است. به‌طور کلی خاک منطقه عمدتاً در دو گروه خاک با بافت سنگین و نیمه‌سنگین قرار می‌گیرد. خاک‌های با بافت سبک بسیار کم بوده که در این نوع خاک نیز مقدار سیلت نسبتاً زیاد است که باعث کم شدن نفوذپذیری در این خاک‌ها شده و مقدار آبگذری در آنها را کاهش داده است. شیب کلی اراضی منطقه ملایم و کمتر از دو درصد و غالباً مسطح است. اغلب خاک‌ها دارای منشأ آبرفتی با افق‌های تقریباً یکنواخت و تکامل نیافته است (۱). طی سالیان متمادی اراضی موجود در کشت و صنعت امام خمینی با احداث زهکش‌های زیرزمینی آبخوبی شده و به تدریج به کشت نیشکر اختصاص یافته است. بنابراین با توجه به زمان اصلاح و آبخوبی خاک‌ها در این منطقه، مزارع با سوابق کشت و مدت زمان بهره‌برداری مختلف نیشکر وجود

دارد.

در این تحقیق سه گروه مزرعه با سه تکرار که از لحاظ زمان بهره‌برداری متفاوت بودند انتخاب شدند.

- مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد که قبلاً به صورت سنتی زیر کشت گندم و جو بوده و سپس تغییر کاربری یافته و به کشت نیشکر متراکم برای بیش از ۲۰ سال اختصاص یافته‌اند.

- مزارع با سابقه بهره‌برداری متوسط (ده سال)

- مزارع با سابقه بهره‌برداری کم (سه سال)

مزارع انتخاب شده همگی جزء واحد فیزیوگرافی دشت‌های آبرفتی و پادگانه‌های رودخانه‌ای هستند. در مزارع هیچ نوع کود آلی و یا کودی که محتوی آهن باشد، مصرف نمی‌شود. در طول دوره آبیاری از فروردین تا آذرماه سال ۱۳۹۳ به مدت ۹ ماه به صورت ماهانه نمونه‌برداری خاک از مزارع منتخب انجام شد. در هر نقطه در هر ماه از چهار عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری (عمق شروع کارگزاری لترال‌های زهکش‌های زیرزمینی) نمونه‌برداری خاک انجام شد. نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه، خشک کردن در هوای آزاد و کوبیدن با چکش پلاستیکی، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. همچنین در گذشته قبل از عملیات آبخوبی و هرگونه کشت نیشکر از خاک‌های این مزارع در عمق‌های صفر تا ۹۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شده و در بانک خاک مدیریت مطالعات

موجود است. بنابراین برای مقایسه شرایط فعلی با زمان گذشته، این نمونه‌های خاک تهیه شده و همراه با نمونه‌های جدید تجزیه شدند. این نمونه‌ها فاقد عمق ۱۲۰-۹۰ بودند.

اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی نمونه‌های خاک به روش آزمایشگاه شوری آمریکا به ترتیب در گل اشباع و توسط دستگاه pH متر JENWAY مدل ۳۵۱۰ و در عصاره گل اشباع به وسیله دستگاه EC متر WTW مدل ۷۲۰ انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتر بایوکاس (۹) اندازه‌گیری شد. مواد آلی خاک به روش اکسیداسیون مرطوب و الکلی - بلک به دست آمد (۶۰). مقدار کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون با سود و گچ به روش استن تعیین شد (۳۸). جرم مخصوص ظاهری نمونه‌ها فقط در زمان حاضر و به وسیله روش سیلندر اندازه‌گیری شد (۶).

مجموع آهن کریستالی و غیرمتبلور که نشان‌دهنده اکسیدهای آهن در خاک بوده و آهن پدوژنیک (Fe_d) نیز نامیده می‌شود از روش تیمار خاک با سیترات - بی کربنات - دیتینونایت سدیم (CBD) و برای اندازه‌گیری آهن غیرمتبلور (Fe_o) از تیمار آمونیوم اگزالات اسیدی استفاده شد. تفاضل این دو آهن کریستالی را نشان می‌دهد. نمونه‌ها دور از نور نگهداری شد (۳۶). مقدار آهن نمونه‌های عصاره‌گیری شده به روش‌های فوق با دستگاه جذب اتمی Varian مدل A220 Spectra قرائت شد.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و مقدار آهن و اندازه‌گیری شده و اشکال آن در خاک‌ها با توجه به سن مزارع برای تعیین اثرات کشت و آبیاری بر این تغییرات تجزیه و تحلیل آماری شد.

نتایج و بحث

نتایج برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در اعماق مختلف در جدول (۱) ارائه شده است. بافت خاک مزارع نمونه‌برداری شده عمدتاً رسی سیلتی است. مقدار شوری خاک مزارع قبل از شروع بهره‌برداری زیاد و بیشترین مقدار آن ۴۴/۶ دسی زیمنس بر متر بوده است. این مقدار شوری، طی عملیات آبخویی و سپس در خلال آبیاری‌ها که

همراه با آب اضافه برای شستشوی املاح در نظر گرفته شده به حد مطلوب نیشکر رسیده است. مقدار گچ موجود در خاک‌ها نیز در جریان اصلاح شوری خاک و کشت مداوم به صفر رسیده است (جدول ۱). مقدار pH گل اشباع خاک‌ها از سطح به عمق افزایش پیدا کرده است. بخشی از علت کمتر بودن pH در سطح خاک، به دلیل مقدار بیشتر مواد آلی در سطح خاک است. رویینز (۴۵)، گوپتا و همکاران (۱۴) نیز کاهش pH خاک را، در اثر افزایش pCO₂ حاصل از تنفس ریشه گیاه و تجزیه مواد آلی گزارش کردند.

بیشترین مقدار ماده آلی خاک‌ها مربوط به خاک سطحی مزارع با سابقه متوسط (۱/۲۴ درصد) و کمترین آن مربوط به عمق ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متری مزارع با سابقه زیاد و برابر ۰/۱۷ درصد است. به صورت کلی با تبدیل کاربری به نیشکر مقدار مواد آلی خاک‌ها افزایش یافته اما شدت این افزایش وابسته به زمان بهره‌برداری بوده و در مزارع قدیمی‌تر مقدار افزایش ماده آلی در افق‌های سطحی بیشتر است. افزایش کشت و کار و پوشش گیاهی، ترشحات ریشه گیاه و ساقه‌های نسوخته، بقایای کلش نسوخته و ریشه‌ها می‌تواند منبع مهمی از مواد آلی افزوده شده به خاک باشد (۲۱). در مزارع با سابقه بهره‌برداری متوسط، مقدار مواد آلی قبل از بهره‌برداری بیشتر از سایر مزارع است که این می‌تواند به دلیل شرایط خاص این مزارع قبل از بهره‌برداری باشد. مقدار کربنات کلسیم معادل در خاک‌ها زیاد بود. اختلاف اندکی بین مقادیر آهک قبل و بعد از بهره‌برداری در مزارع مشاهده شد. با توجه به آهک زیاد خاک‌ها، علیرغم کشت و کار و مصرف آب فراوان در نیشکر به دلیل اقلیم خشک و مقدار تبخیر و تعرق زیاد مقدار آب مصرفی برای آبخویی و حذف آهک از خاک‌رخ کافی نبوده است. اما به دلیل کاربرد زیاد آب برای آبیاری زراعت نیشکر و آبخویی اولیه، گچ از خاک‌رخ خاک‌ها شسته شده است.

جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها با افزایش سابقه بهره‌برداری و در افق‌های سطحی بیشتر شده که به دلیل سیستم مکانیزه و استفاده مداوم از ماشین‌آلات سنگین در کشت، داشت و

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه قبل و بعد از بهره‌برداری

| جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3) | بعد از بهره‌برداری | | | | قبل از بهره‌برداری | | | | توزیع ذرات خاک | | | | سابقه بهره‌برداری | |
|------------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------|------|--------|-----------------|----------------------|-----|
| | گچ | کربنات معادل | pH _e | EC _e (ds/m) | گچ | کربنات معادل | pH _e | EC _e (ds/m) | شن | سیلت | رس | عمق (Cm) | | افق |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| ۱/۸۲ | ۰ | ۴۰/۲ | ۱/۸۸ | ۱/۶۳ | ۸/۲ | ۷/۴۶ | ۴۴/۶ | ۱۷/۳ | ۴۹/۹ | ۳۲/۸ | ۰-۳۰ | AP | | |
| ۱/۸۹ | ۰ | ۴۱/۲ | ۰/۶۹ | ۲/۱۵ | ۱/۴ | ۷/۵۶ | ۲۱/۳ | ۱۶/۴ | ۵۰/۹ | ۳۲/۷ | ۳۰-۶۰ | AP | زیاد | |
| ۱/۸۳ | ۰ | ۴۱/۷ | ۰/۴۰ | ۱/۳۲ | ۰/۸ | ۷/۶۶ | ۱۵/۰ | ۱۲/۳ | ۴۶/۹ | ۴۰/۸ | ۶۰-۹۰ | Bw ₁ | | |
| ۱/۷۳ | ۰ | ۴۰/۰ | ۰/۱۷ | ۱/۸۸ | - | - | - | ۶/۴ | ۵۰/۸ | ۲۲/۸ | ۹۰-۱۲۰ | Bw ₁ | | |
| ۱/۶۸ | ۰ | ۳۷/۸ | ۱/۲۴ | ۱/۸۳ | ۳/۶ | ۷/۳۸ | ۲۵ | ۹/۲ | ۴۴/۰ | ۲۶/۸ | ۰-۳۰ | AP | | |
| ۱/۸۵ | ۰ | ۳۹/۵ | ۰/۸۱ | ۱/۹۵ | ۱/۹ | ۷/۶۵ | ۱۴ | ۷/۲ | ۵۰/۰ | ۴۲/۸ | ۳۰-۶۰ | AP | | |
| ۱/۸۸ | ۰ | ۴۰/۹ | ۰/۳۷ | ۲ | ۳/۲ | ۷/۷۵ | ۱۱/۵ | ۹/۲ | ۵۰/۷ | ۲۰/۱ | ۶۰-۹۰ | Bw | متوسط | |
| ۱/۷۷ | ۰ | ۴۱/۲ | ۰/۲۷ | ۱/۹۳ | - | - | - | ۵/۲ | ۵۲/۷ | ۲۲/۱ | ۹۰-۱۲۰ | Bk | | |
| ۱/۵۹ | ۰ | ۳۹/۰ | ۰/۹۴ | ۳/۲۹ | ۳/۱ | ۷/۵۸ | ۲۲/۷ | ۹/۲ | ۳۳/۷ | ۲۷/۱ | ۰-۳۰ | AP | | |
| ۱/۸۲ | ۰ | ۳۹/۲ | ۰/۴۷ | ۲/۷۵ | ۶/۳ | ۷/۷۱ | ۲۰/۴ | ۷/۲ | ۴۶/۵ | ۲۶/۳ | ۳۰-۶۰ | AP | کم | |
| ۱/۸۲ | ۰ | ۴۰/۰ | ۰/۲۴ | ۳/۵۸ | ۷/۲ | ۷/۸۴ | ۱۷/۲ | ۸/۱ | ۴۷/۶ | ۲۴/۳ | ۶۰-۹۰ | Bw | | |
| ۱/۸۹ | ۰ | ۳۷/۳ | ۰/۲۰ | ۴/۹۸ | - | - | - | ۶/۲ | ۴۹/۵ | ۲۴/۳ | ۹۰-۱۲۰ | Bk ₁ | | |

جدول ۲. تغییرات غلظت شکل‌های مختلف آهن در خاک‌های مورد مطالعه

| Fe _d -Fe _o /Fe _d | | Fe _d -Fe _o | | Fe _o /Fe _d | | Fe _o | | Fe _d | | عمق | افق | سابقه بهره‌برداری |
|---|-------|----------------------------------|---------|----------------------------------|-------|-----------------|-------|-----------------|---------|--------|-----------------|-------------------|
| قبل | بعد | قبل | بعد | قبل | بعد | قبل | بعد | قبل | بعد | | | |
| (mg/kg) | | | | | | | | | | | | |
| ۰/۹۱۳ | ۰/۹۳۸ | ۵۱۰۵/۲ | ۶۱۶۲/۹ | ۰/۰۸۷ | ۰/۰۶۲ | ۴۸۸/۷۶ | ۴۰۱/۱ | ۵۵۹۴/۰ | ۶۵۶۴/۰ | ۰-۳۰ | Ap | زیاد |
| ۰/۹۲۷ | ۰/۹۴۳ | ۵۶۱۱/۱ | ۵۶۸۵/۴ | ۰/۰۷۳ | ۰/۰۵۷ | ۴۴۰/۹ | ۳۳۹/۳ | ۶۰۵۲/۰ | ۶۰۲۴/۷ | ۳۰-۶۰ | Ap | |
| ۰/۹۳۱ | ۰/۹۵۲ | ۵۵۸۱/۸ | ۵۹۴۷/۵۹ | ۰/۰۶۹ | ۰/۰۴۸ | ۴۱۴/۱۸ | ۲۹۳/۷ | ۵۹۹۶/۰ | ۶۲۴۱/۳۳ | ۶۰-۹۰ | Bw ₁ | |
| - | ۰/۹۵۰ | - | ۵۷۵۷/۵ | - | ۰/۰۵۰ | - | ۲۸۲/۳ | - | ۶۰۳۹/۷۸ | ۹۰-۱۲۰ | Bw ₁ | |
| ۰/۸۲۹ | ۰/۹۳۰ | ۴۷۸۱/۶ | ۶۴۶۰/۵۳ | ۰/۱۷۱ | ۰/۰۷۳ | ۹۸۶/۴ | ۴۹۷/۷ | ۵۷۶۸/۰ | ۶۹۵۸/۲۲ | ۰-۳۰ | Ap | متوسط |
| ۰/۹۰۸ | ۰/۹۳۶ | ۵۶۱۸/۳ | ۵۶۶۱/۰ | ۰/۰۹۲ | ۰/۰۶۴ | ۵۶۹/۷ | ۳۸۲/۸ | ۶۱۸۸/۰ | ۶۰۴۳/۸ | ۳۰-۶۰ | Ap | |
| ۰/۹۲۵ | ۰/۹۳۶ | ۴۴۳۸/۵ | ۴۸۶۲/۷۷ | ۰/۰۷۵ | ۰/۰۶۴ | ۳۶۱/۵ | ۳۲۹/۹ | ۴۸۰۰/۰ | ۵۱۹۲/۶۷ | ۶۰-۹۰ | Bw | |
| - | ۰/۹۵۰ | - | ۵۷۴۰/۱۲ | - | ۰/۰۵۰ | - | ۲۹۵/۷ | - | ۶۰۳۵/۷۸ | ۹۰-۱۲۰ | Bk | |
| ۰/۹۰۹ | ۰/۹۱۱ | ۴۶۳۸/۶ | ۴۴۵۲/۷۲ | ۰/۰۹۱ | ۰/۰۸۹ | ۴۶۵/۳۶ | ۴۳۲/۸ | ۵۱۰۴/۰ | ۴۸۸۵/۵۶ | ۰-۳۰ | Ap | کم |
| ۰/۹۲۳ | ۰/۹۲۴ | ۴۷۲۵/۱ | ۴۲۲۵/۶ | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۷۶ | ۳۹۲/۹ | ۳۳۴/۲ | ۵۱۱۸/۰ | ۴۵۵۹/۸ | ۳۰-۶۰ | Ap | |
| ۰/۹۲۷ | ۰/۹۵۱ | ۴۷۲۷/۸ | ۵۴۷۷/۷۹ | ۰/۰۷۳ | ۰/۰۴۹ | ۳۷۲/۱۸ | ۲۶۷/۱ | ۵۱۰۰/۰ | ۵۷۴۴/۸۹ | ۶۰-۹۰ | Bw | |
| - | ۰/۹۵۹ | - | ۵۸۵۹/۶۵ | - | ۰/۰۴۱ | - | ۲۴۳/۵ | - | ۶۱۰۳/۱۱ | ۹۰-۱۲۰ | Bk1 | |

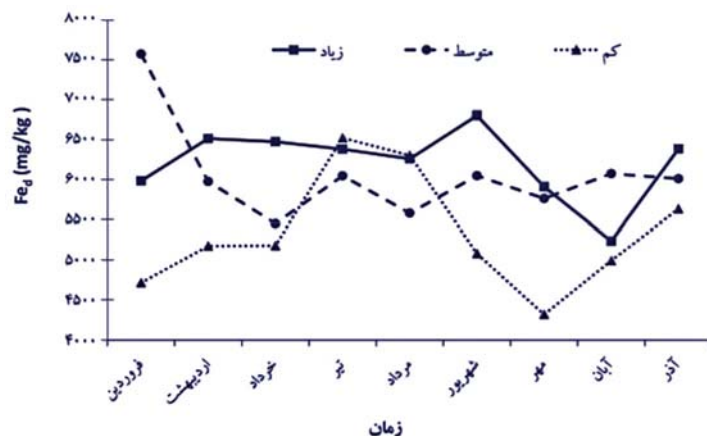
قبل: قبل از بهره‌برداری، بعد: بعد از بهره‌برداری

است. متوسط Fe_d اندازه‌گیری شده در تمام مزارع پس از بهره‌برداری بیشتر از متوسط آن قبل از بهره‌برداری است (جدول ۲). بیشترین افزایش مربوط به مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد و کمترین آن مربوط به مزارع کم سابقه بود. در دو افق سطحی مزارع با سابقه زیاد و متوسط، مقدار Fe_d بعد از بهره‌برداری نسبت به قبل از بهره‌برداری افزایش نشان داد. در مزرعه با سابقه کم این وضعیت در عمق ۶۰-۹۰ سانتی‌متری مشاهده شده است. بیشترین مقدار متوسط Fe_d اندازه‌گیری شده در عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متری مزرعه با سابقه بهره‌برداری متوسط (۶۹۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار آن در عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متری مزرعه با سابقه بهره‌برداری کم (۴۵۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. لی و دب (۳۱) نیز نشان دادند که تغییر در استفاده از زمین می‌تواند در دراز مدت اکسیدهای آهن خاک را

برداشت نیشکر است (۳۷). با به هم خوردن ساختمان خاک در اثر عملیات خاک‌ورزی و نیز بر اثر خرد کردن خاکدانه‌ها، این واحدهای ساختمانی به ذرات ریزتری تبدیل شده‌اند و در خلل و فرج خاک جای گرفته و تردد ماشین‌آلات سنگین باعث متراکم شدن خاک و افزایش چگالی ظاهری شده است (۳۷).

توزیع شکل‌های مختلف اکسیدهای آهن در خاک

مقادیر اکسیدهای آهن استخراج شده با عصاره‌گیری‌های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. مقدار آهن عصاره‌گیری شده با دیتینوات-سیترات-بیکربنات (Fe_d) که نشان‌دهنده اکسیدهای آهن متبلور و غیرمتبلور خاک بود در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری از ۲۷۰۰ تا ۹۳۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود. مقدار Fe_d با افزایش سابقه بهره‌برداری افزایش یافته



شکل ۲. تغییرات میانگین آهن پدوژنیک (Fe_e) در ماه‌های مختلف نمونه‌برداری در مزارع با مدت بهره‌برداری متفاوت

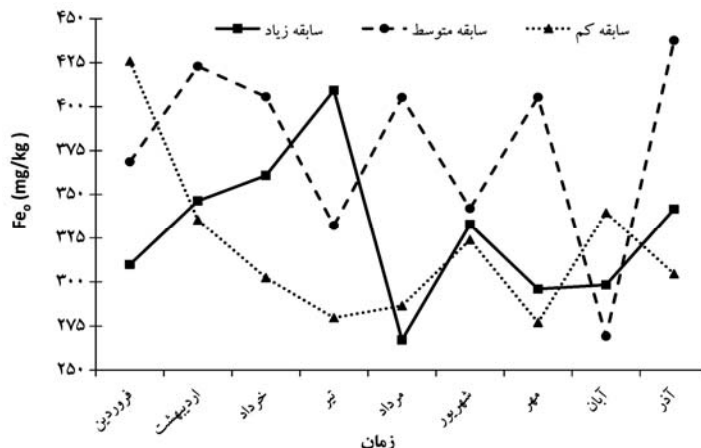
اندازه‌گیری شده در فروردین و با سابقه بهره‌برداری متوسط (۷۵۷۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین آن در مهرماه و با سابقه کم (۴۳۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (شکل ۲). تامپسون و همکاران (۵۴) افزایش در میزان تبلور اکسید آهن را در طی تناوب اکسایش و کاهش خاک در طی آزمایش‌های غیرمزرعه‌ای در طی ۵۶ روز مشاهده کردند.

تغییرات مقدار Fe_e در ماه‌های نمونه‌برداری به تغییر وضعیت مزارع از لحاظ تر و خشک شدن متناوب در اثر دوره‌های آبیاری شدید و تبخیر و تعرق خاک‌ها و گیاهان مربوط بود. این عامل بر روند رهاسازی و قابلیت اکسیداسیون و احیای خاک اثرگذار است. چرخه‌های متناوب اکسایش و کاهش در دوره‌های طولانی و به‌دنبال آن تحرک و تجمع یا تخلیه آهن و منگنز با عمق سطح آب زیرزمینی در ارتباط است. در مناطقی که سطح آب زیرزمینی در طی فصول مختلف بالا و پایین می‌شود عناصری مانند آهن و منگنز در زمان بالا آمدن سطح آب احیای شده و هنگامی که سطح آب پایین می‌رود و افق‌های خاک از آب تخلیه می‌شوند، این عناصر اکسید می‌شوند. در شرایط احیای، آهن و منگنز متحرک شده، در طول افق‌های خاک به حرکت در آمده و با رسیدن به مکان اکسیدی‌تر (با تهویه بهتر) از حالت محلول به شکل نامحلول در آمده و رسوب می‌کنند (۱۱). همچنین ترشحات ریشه که خود بر ایجاد شرایط احیای خاک اثر دارد می‌تواند بر مقدار آهن اثرگذار باشد.

تحت تأثیر قرار داده و با افزایش فرسایش و اثرات شخم، مقدار Fe_e افزایش یابد. این امر می‌تواند ناشی از تحول کانی‌های رسی، تر و خشک شدن متوالی و افزایش ماده آلی و ترشحات ریشه باشد که سبب کلاته شدن آهن و استخراج آن از کانی‌ها شده است.

مقدار اکسیدهای آهن (Fe_e) با عمق تغییر داشت. بیشترین مقدار آن در سطح خاک (۳۰-۰ سانتی‌متری) و کمترین آن در عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متری مزارع بود. افزایش در سطح خاک می‌تواند به دلیل تأثیر ماده آلی و شرایط احیای ناشی از غرقاب شدید در اثر آبیاری باشد. مقدار آهن پدوژنیک (Fe_e) در افق‌های A و B خاک‌ها با افزایش پیشرفت هوازدگی، افزایش می‌یابد (۵۲). بخشی از علت افزایش آهن در عمق خاک ناشی از شستشو و انتقال از سطح توسط آبیاری است که هنوز فرصت خروج از خاک‌ریز خاک را پیدا نکرده است. علت کاهش در عمق ۳۰ تا ۹۰ سانتی‌متری می‌تواند ناشی از اشباع بودن در طول زمان بیشتری از سال در این اعماق نسبت به سطح باشد. در شرایط بی‌هوای امکان تبدیل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن غیربلورین به اشکال بلورین به حداقل می‌رسد (۴۸ و ۴۹).

در طول دوره نمونه‌برداری در ماه‌های مختلف، بیشترین مقدار Fe_e در تیرماه و کمترین آن در مهرماه بود. مقدار متوسط آهن پدوژنیک (Fe_e) در تیرماه برابر با ۶۳۱۸/۰ و در مهرماه ۵۳۲۸/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. از طرفی بیشترین میزان Fe_e



شکل ۳. تغییرات زمانی میانگین آهن غیربلوری در مزارع با مدت بهره‌برداری متفاوت

با افزایش عمق خاک، متوسط مقدار آهن غیرمتبلور (Fe_0) در مزارع کاهش یافت و از $443/9$ میلی‌گرم در کیلوگرم در سطح خاک به $273/8$ میلی‌گرم در کیلوگرم در عمق $120-90$ سانتی‌متری رسید. راهب و حیدری (۴۳) نشان دادند که بین مقدار ماده آلی و مقدار آهن غیربلوری رابطه وجود دارد به طوری که مقدار این شکل آهن در افق‌های سطحی حاوی مواد آلی بالا، بیشتر از افق‌های تحتانی بوده و با افزایش عمق کاهش پیدا می‌کند. این شرایط می‌تواند به دلیل امکان هوادیدگی بیشتر کانی‌های آهن دار در سطح خاک در اثر تشدید فرایندهای اکسیداسیون و احیای و همچنین افزایش ماده آلی و واکنش‌های تجزیه‌ای آنها است که مانع تبلور آهن غیربلوری می‌شود. کمبود مقدار ماده آلی به همراه کمبود فعالیت میکروبی در عمق خاک از دلایل کاهش مقدار تبدیل Fe^{2+} به Fe^{3+} است (۸).

بیشترین مقدار Fe_0 در آذر و کمترین مقدار آن مربوط به مرداد بود. مقدار Fe_0 در آذرماه برابر با $437/6$ و در مردادماه $267/1$ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (شکل ۳). مقدار دائم Fe_0 در حال نوسان است، که به دلیل تغییر شرایط خاک از لحاظ تر و خشک شدن ناشی از آبیاری است. در مزارع نیشکر به دلیل آبیاری‌های سنگین در طول فصل داشت محصول، خاک حالت غرقابی پیدا می‌کند. آبیاری مزارع از اسفند با یک بار در ماه شروع و تا حدود اواخر مهرماه (بسته به زمان برداشت مزرعه) ادامه دارد. دفعات آبیاری در خرداد تا مرداد به پنج بار در ماه نیز

مقدار آهن غیر بلوری در تمام مزارع و اعماق قبل از بهره برداری بالا بوده که پس از بهره‌برداری کاهش یافته است. دلیل این امر می‌تواند ناشی از احداث زهکش‌های مصنوعی در مزارع پس از بهره‌برداری باشد که منجر به خروج آهن از طریق آنها شده است. اندازه‌گیری میزان آهن در زهاب‌ها مؤید میزان قابل توجهی از میزان آهن در این زهاب‌هاست (۵). مقدار آهن غیرمتبلور (Fe_0) در طول دوره نمونه‌برداری از 162 تا 986 میلی‌گرم در کیلوگرم متغیر بود. بیشترین مقدار متوسط آن در مزارع با سابقه بهره‌برداری متوسط ($376/5$ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین مقدار متوسط آن در مزارع با سابقه بهره‌برداری کم ($319/41$ میلی‌گرم بر کیلوگرم) وجود داشت. مزارع با سابقه بهره‌برداری متوسط در واحد فیزیوگرافی اراضی پست (Low Land) احداث شده و بعد از احداث زهکش تغییر کاربری یافته‌اند (۱). بنابراین زیاد بودن مقدار Fe_0 در این اراضی می‌تواند به علت وضعیت قبلی خاک باشد. بیشتر بودن اکسیدهای آهن غیر بلورین (Fe_0) در مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد نیز مربوط به مدت زمان بیشتر آبیاری این مزارع و شرایط غرقابی طولانی‌تر این اراضی است. در شرایط غرقابی و کمبود اکسیژن، آهن و منگنز به فرم دوظرفیتی با حلالیت بیشتر تبدیل می‌شوند. در این شرایط امکان تشکیل اکسیدهای بلورین کمتر می‌شود و ترکیبات آهن و منگنز به‌طور عمده به شکل آلی و بدون ساختار بلورین هستند (۴۰ و ۵۱).

کمتر بودن نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ در مزارع با سابقه بهره‌برداری بالا نسبت به مزارع با سابقه بهره‌برداری کم نشان‌دهنده روند افزایشی تولید اکسیدهای بلورین آهن در مزارع با سابقه بالا است. وحیدی و همکاران (۵۸) نشان دادند که با افزایش سن خاک اکسیدهای متبلور آهن نسبت به اشکال غیرمتبلور یا با تبلور ضعیف افزایش می‌یابد یعنی مقدار آهن قابل استخراج با دیتیونایت زیادتر شده، بنابراین نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ با افزایش سن خاک کاهش می‌یابد. همچنین پژوهشگران مختلفی نشان دادند که مقدار نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ در خاک‌های تکامل یافته (سن بیشتر) کمتر از خاک بدون تکامل (سن کمتر) است (۴، ۲۲، ۲۳ و ۴۴).

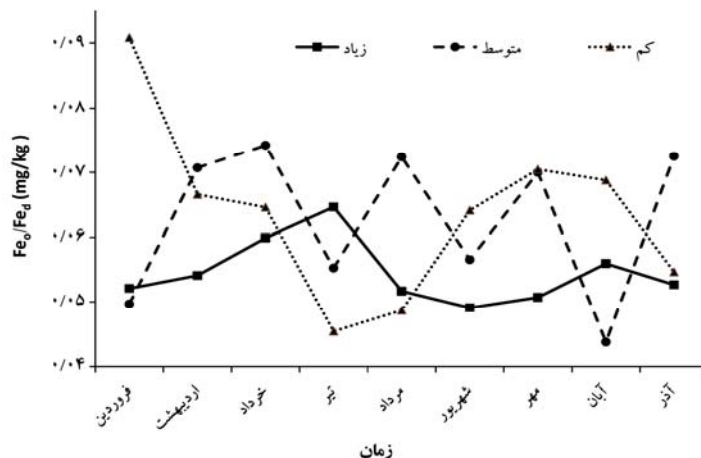
با افزایش عمق خاک‌ها نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ کاهش یافت. کاهش مقدار نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ با افزایش عمق در تمام مزارع با سوابق مختلف بهره‌برداری مشاهده شد. حداکثر این نسبت به مقدار ۰/۰۸۹ در عمق ۳۰-۰ سانتی متری مزرعه با سابقه کم و حداقل آن نیز به مقدار ۰/۰۴۱ در عمق ۱۲۰-۹۰ سانتی متری همین مزرعه به دست آمد که علت آن افزایش آهن بلورین و کاهش آهن غیربلوری با افزایش عمق است. کاهش آن با عمق به کند شدن سرعت آزاد شدن آهن از کانی‌های سیلیکاته مربوط می‌شود. نتایج مشابهی توسط فیدلر و سومر (۱۳)، جلالیان و رمضانپور (۴۴) و اولیایی و رضایی (۴۱) ارائه شده است.

بیشترین و کمترین مقدار نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ به ترتیب در خردادماه و تیرماه مشاهده شد (شکل ۴). نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ در خردادماه برابر با ۰/۰۶۶ و نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ در تیر برابر با ۰/۰۵۵ است (شکل ۴). بدین ترتیب مشاهده می‌شود که این نسبت در زمان‌های مختلف در نوسان بوده است. علت این امر ناشی از آبیاری‌های متناوب و سنگین (نوسانات سطح آب در پروفیل خاک و شسته شدن املاح) از یک سو و رشد گیاه و ترشحات

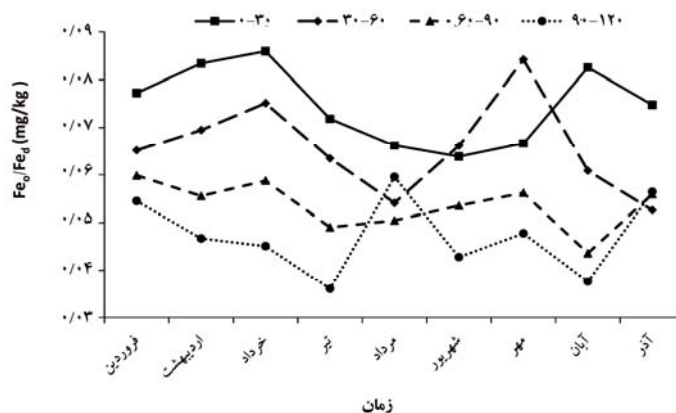
بالغ می‌شود. بنابراین با توجه به بافت سنگین خاک‌ها، خاک‌رخ به‌طور مرتب در طول این ماه‌ها تر و خشک شده و پتانسیل اکسید و احیای در تغییر است. یکی از مهم‌ترین عوارض ناشی از غرقاب شدن خاک، احیای آهن و افزایش حلالیت آن است که باعث می‌شود مقادیر زیادی Fe^{2+} وارد فاز محلول شود (۴۷). با برگشت شرایط اکسیدی، آهن آزاد شده اکسید و به‌صورت اکسید آهن غیربلوری رسوب می‌کند. کلباسی و حسین پور (۲۶) نتایج مشابهی را برای خروج آهن از خاک گزارش کردند.

مقایسه نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$

در تمام مزارع با سوابق مختلف بهره‌برداری و در تمامی اعماق مقدار نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ قبل از بهره‌برداری بیشتر از عدد آن در حال حاضر (پس از بهره‌برداری) بود که نشان‌دهنده کاهش این نسبت بر اثر کشت و کار است (جدول ۲). کمترین مقدار این نسبت در مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد و معادل ۰/۰۵۵ و بیشترین آن در مزارع کم سابقه و معادل ۰/۰۶۴ مشاهده شد. در ارزیابی فرایندهای خاک‌ساز و تعیین درجه تکامل خاک‌رخ از نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ استفاده می‌شود (۳، ۱۳ و ۲۲). نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ به‌عنوان شاخصی از آهن فعال برای کمی کردن فعالیت آهن استفاده می‌شود (۲۷). درجه بلوری شدن اکسیدهای آهن ($\frac{Fe_o}{Fe_d}$) نشان‌دهنده سهم ترکیبات غیربلوری آهن پدوژنیک است. مقدار آن نسبت در سطوح جوان، بالا بوده و با افزایش تکامل خاک مقدار آن کاهش می‌یابد (۵۲). با گذشت زمان مقدار Fe_o کاهش و مقدار Fe_d افزایش (۴۰) می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود مقدار این نسبت در خاک‌های مسن کمتر از خاک‌های جوان باشد. جلالیان و رمضانپور (۴۴)، ماهانی و همکاران (۳۳) و هوانگ و همکاران (۱۸ و ۱۹) نشان دادند که مقدار نسبت $\frac{Fe_o}{Fe_d}$ در خاک‌های تکامل یافته (سن بیشتر) کمتر از خاک بدون تکامل (سن کمتر) است.



شکل ۴. تغییرات نسبت $\frac{Fe_0}{Fe_d}$ در ماه‌های مختلف در مزارع با مدت بهره‌برداری مختلف



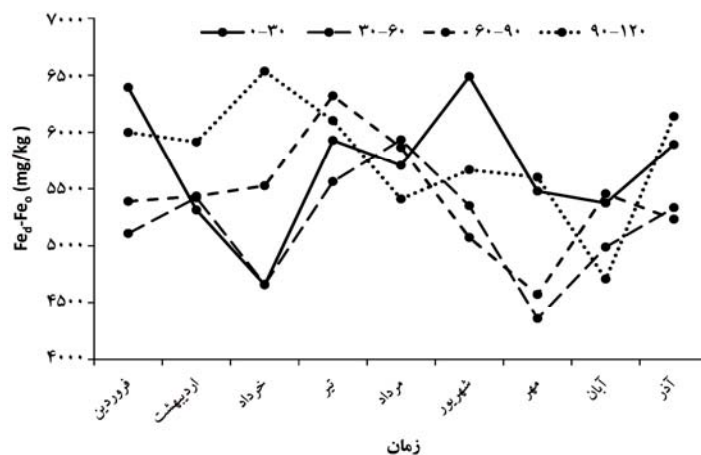
شکل ۵. میانگین تغییرات زمانی نسبت $\frac{Fe_0}{Fe_d}$ در عمق‌های مختلف

آهن بلورین یا کریستالی (Fe_d-Fe_0)

بیشترین مقدار آهن بلورین در مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد ($5888/3$ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و کمترین آن در مزارع با سابقه بهره‌برداری کم ($503/9$ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۲). بدین ترتیب با افزایش سابقه بهره‌برداری مقدار آهن بلورین نیز افزایش پیدا کرد. با گذشت زمان مقدار Fe_0 کاهش (۵۲) و مقدار Fe_d افزایش (۴۲) می‌یابد. بنابراین افزایش مقدار اشکال بلورین اکسیدهای آهن (Fe_d-Fe_0) در خاک‌ها نشانگر تحول و تکامل خاک است. روند تغییرات آهن بلورین با عمق در مزارع با مدت

ریشه‌ای و در نتیجه اثر آن بر pH است.

شکل (۵) نشان‌دهنده تغییرات زمانی نسبت $\frac{Fe_0}{Fe_d}$ در عمق‌های مختلف است. بیشترین مقدار نسبت $\frac{Fe_0}{Fe_d}$ مربوط به خرداد و عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری و کمترین نسبت $\frac{Fe_0}{Fe_d}$ مربوط به تیر و عمق ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری است. نسبت $\frac{Fe_0}{Fe_d}$ در خرداد ۰/۰۸۶ و در تیرماه ۰/۰۳۶ است. در اکثر عمق‌ها روند نسبت $\frac{Fe_0}{Fe_d}$ در ماه‌های تیر و مرداد و شهریور کاهش یافته است (شکل ۵).



شکل ۶. مقایسه تغییرات زمانی آهن بلورین (FeD - FeO) در زمان‌های مختلف بهره‌برداری

دلیل این نوسانات ناشی از آبیاری مزارع است. بدین ترتیب پروفیل خاک به‌طور مرتب در طول این ماه‌ها تر و خشک شده و پتانسیل اکسید و احیای در تغییر است.

نسبت آهن بلورین (کریستالی) به کل اکسیدهای آزاد آهن (FeD-FeO / FeD)

با افزایش سابقه بهره‌برداری از مزارع نیشکر نسبت آهن کریستالی به اکسیدهای آهن افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقدار آن در مزارع با سابقه بهره‌برداری زیاد و معادل ۰/۹۴۵۴ و کمترین آن در مزارع با سابقه کم بهره‌برداری و معادل ۰/۹۳۶۲ حاصل شد. افزایش این نسبت نشان‌دهنده بالا بودن سهم اکسیدهای آهن بلوری در خاک نسبت به کل اکسیدهای آهن آزاد است. در همه مزارع با مدت بهره‌برداری متفاوت با افزایش عمق نسبت آهن بلورین (کریستالی) به کل اکسیدهای آزاد آهن (FeD-FeO/FeD) افزایش پیدا کرد. همچنین در تمام مزارع با مدت بهره‌برداری متفاوت و عمق‌ها مقدار آن بعد از بهره‌برداری افزایش پیدا کرده است. البته در مزارع با سابقه کم، مقدار این افزایش کمتر است (جدول ۲).

نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان می‌دهد که کشت نیشکر و مدت زمان بهره‌برداری از مزارع نیشکر، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و

بهره‌برداری مختلف متفاوت است. مقدار آهن بلورین از سطح تا عمق ۶۰ سانتی‌متری کاهش نشان داد ولی مجدداً از عمق ۶۰ سانتی‌متری به بعد شروع به افزایش کرد. البته در مزرعه با سابقه بهره‌برداری متوسط تا عمق ۹۰ سانتی‌متری کاهش روی داد. دلیل کاهش در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری می‌تواند ناشی از اثر ترشحات ریشه و مواد آلی برای جذب آهن باشد. عمدتاً عمق توسعه ریشه‌های گیاه نیشکر در شرایط موجود خاک‌های منطقه حدود ۵۰-۶۰ سانتی‌متری سطح خاک بوده و حدود ۷۵-۸۰ درصد وزن ریشه‌ها در این محدوده از عمق قرار دارند (۴۶) و (۲۴). تشکیل ترکیبات محلول‌تر آهن در مجاورت ریزمکان‌هایی که شرایط احیای برقرار است، مانند نزدیکی ریشه‌های فعال و ذرات موادآلی در حال تجزیه محتمل‌تر است (۳۲). مواد آلی، ریشه گیاهان و میکروبی‌های خاک به‌صورت طبیعی ترکیبات آلی محلول تولید می‌کند (۷). این ترکیبات چنگک دار یا کیلیت‌ها (سیدروفوریا ناقل آهن) با آهن سه ظرفیتی ترکیب شده و سپس در سلول‌های ریشه به‌علت ترشح عوامل احیای کننده ریشه، آهن سه ظرفیتی به آهن دو ظرفیتی تبدیل و جذب ریشه گیاه می‌شود (۲۹).

میزان آهن بلورین در عمق‌های مختلف در طول دوره نمونه‌برداری (ماه‌های مختلف) مرتباً دچار نوسان شده است (شکل ۶). دلیل این موضوع ناشی از نوسانات میزان آهن پدوژنیک (FeD) و آهن غیربلورین (FeO) در طول دوره است و

سنگین خاک‌ها در مزارع مورد بررسی باعث ایجاد چرخه‌های متناوب تر و خشک شدن و تغییر پتانسیل اکسید و احیای شده است و در این شرایط اکسید و احیا شدن متناوب آهن و همچنین افزایش مواد آلی خاک در افق‌های سطحی باعث شده است تا فرم‌های آهن در خاکرخ تغییر پیدا کند و فرایند تحول خاک در اثر کشت و کار نیشکر با سرعت بیشتر انجام گیرد. چرخه‌های متناوب اکسید و احیای باعث تحرک بیشتر آهن و حرکت در طول افق‌های خاک شده و در مکان با تهویه بهتر رسوب کرده است. بنابراین کشت و کار نیشکر به‌عنوان یک تغییر استفاده از زمین (توسط انسان) در درازمدت باعث تغییر در مقدار و شکل اکسیدهای آهن خاک شده و در نهایت منجر به ایجاد تحول و تکامل در خاک شده است.

شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه را تغییر داده است. از جمله در اثر آبخوبی و کاربرد آب فراوان برای آبیاری، عمده نمک‌ها و گچ از خاکرخ خاک شسته و خارج شده است. مقدار مواد آلی خاک در اثر کشت و کار در لایه‌های سطحی افزایش یافته و با افزایش مدت زمان بهره‌برداری از مزارع، این تغییر نیز بیشتر شده است. مقدار کل آهن آزاد (Fe_d)، مقدار آهن پدوژنیک متبلور ($Fe_d - Fe_o$)، نسبت آهن متبلور به کل آهن آزاد ($\frac{Fe_d - Fe_o}{Fe_o}$) افزایش یافته و نسبت آهن غیرمتبلور به کل آهن آزاد ($\frac{Fe_o}{Fe_d}$) کاهش یافته است. وجود شرایط غرقابی به مدت طولانی در برخی از اراضی باعث افزایش مقدار آهن غیرمتبلور (Fe_o) شده است. آبیاری سنگین در طول سال به همراه بافت

منابع مورد استفاده

1. Abkhan Consult Engineering. 1991. Final Report of Soil Survey. Vol. 4. Sugarcane Development Company and by Products. Danial Agro-Industry Co. Tehran, Iran. (In Farsi).
2. Akef, M., S. Mahmoodi, K. M. Eghbal and F. Sarmadian. 2003. Studying the changes of physicochemical and micromorphological characteristics of soils in converted natural forests to paddy soils in Foumanat region in Guilan province. *Iran Natural Resources* 56(4): 407-423. (In Farsi).
3. Alexander, F. B. 1974. Extractable iron in relation to soil ash on terraces along the Truckee River. *Soil Science Society America Proceeding* 36: 121-124.
4. Aloge, U. 2012. Clay mineralogy as affecting disaggregation in some palygorskite containing soils of the Jordan and Bet-She'an Valleys. *Australian Journal of Soil Research* 46: 76-89.
5. Bazrkar, H. 2016. Correlation between drainage water composition and clay minerals transformation under sugarcane cultivation. MSc. Thesis. Agricultural and Natural Resources University of Khuzestan. Khuzestan.
6. Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 363-375. In: A. Klute (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. 2nd Edition. Agron. Monogr. 9, ASA, Madison, WI.
7. Brady, C. B. and R. R. Weil. 2002. *The Nature and Properties of Soils*. 13th Edition. Prentice Hall.
8. Bouma, J. 1983. Hydrology and soil genesis of soil with aquic moisture regimes. PP. 253-281. In: L. P. Wilding et al. (Eds.). *Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions*. Dev. Soil Sci. 11A. Elsevier Science Publishing, New York.
9. Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54: 464-465.
10. Costantini, E. A. C., S. Pellegrini, N. Vignozzi and R. Barbetti. 2006. Micromorphological characterization and monitoring of internal drainage in soils of vineyard and olive groves in central Italy, *Geoderma* 131: 388-403.
11. Cui, J., C. Liu, Z. Li, L. Wang, X. Chen, Z. Ye and C. Fang. 2012. Long-term changes in topsoil chemical properties under centuries of cultivation after reclamation of coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China. *Soil & Tillage Research* 123: 50-60.
12. Diaza M. C. and J. Torrentb. 2003. Mineralogy of iron oxides in two soil chronosequences of Central Spain. *Soil Science Society of America Proceeding* 15: 337-342
13. Fiedler, S. and M. Sommer. 2004. Water and redox conditions in wetland soils-their influence on pedogenic oxides and morphology. *Soil Science Society of America Journal* 68: 326-335
14. Gupta, R. K., D. K. Bhumbla and I. P. Abrol. 1984. Effect of sodicity, pH, organic matter and calcium carbonate on the dispersion behavior of soils. *Soil Science* 137: 245-251.
15. Hassannezhad, H., A. Pashae, F. Khormali and M. Mohammadian. 2008. Morphology and micromorphology of

- paddy soils under different soil moisture regime and ground water table in Mazandaran Province, Northern Iran, Amol. *International Journal Soil Science* 3(3): 149-156.
16. He, Y., M. J. Vepraskas, D. L. Lindbo and R. W. Skaggs. 2003. A method to predict soil saturation frequency and duration from soil color. *Soil Science Society of America Journal* 67: 961-969.
 17. Hiemstra, D. and V. Riemsdijk. 2007. Effect of redox on the solubility and availability of iron. *Soil Science Society of America Journal* 47: 210-217.
 18. Huang, L., H. Yu and Y. Shi. 2008. On the strategies and measures to improve cropland soil fertility of the Chongming Island. *Shanghai Agriculture Technology* 5: 20-21
 19. Huang, L., J. Hong, W. Tan, H. Hu, F. Liu. and M. Wang. 2008. Characteristics of micromorphology and element distribution of iron-manganese cutan in typical soils of central china. *Geoderma* 146: 40-47.
 20. Jafari, S. 2006. Study of changes in structural, physicochemical, potassium fixation and clay minerals transformation of soils under sugarcane, rotational cropping and non-cultivated soils (Khuzestan), Iran. PhD. Thesis, Shiraz University. Shiraz.
 21. Jafari, S., M. Baghernejad and M. Chorom. 2005. Evaluation some changes of physicochemical properties of cultivated land (under sugarcane cultivation and crop rotation) and Haft Tapeh pristine region of Khuzestan. *Journal of Agriculture Science* 22(1): 165-181. (In Farsi).
 22. Jahnson, M. G. and M. B. McBride. 1989. Mineralogical and chemical characteristics of Adirondack spodosols evidence for para and noncrystallin aluminosilicate minerals. *Soil Science Society of America Journal* 53: 482-490.
 23. Jien, S. H., Z. Y. Hsue and Z. S. Chen. 2004. Relations between morphological color index and soil wetness condition of anthraquic soils in Taiwan. *Soil Science* 169: 871-882.
 24. Imam Khomeini Agro-Industrial Research Staff. 2000. Investigating the status of sugarcane fields in terms of phosphorus and potassium and depth of root penetration, *Shekarshekan Magazine* 44: 10-11.
 25. Kalbasi, M. and A. R. Hosseinpour. 1997. Effect of temporary waterlogging on some chemical properties of three calcareous soils, *Iranian Journal of Agriculture Science* 28(3): 50-58. (In Farsi).
 26. Kalbasi, M., N. Manuchehri and F. Filsoof. 1986. Local acidification of soil as a means to alleviate iron chlorosis in Quince orchards. *Plant Nutrition* 9: 1001-1007.
 27. Kampf, N., A. C. Scheinost and D. G. Schulze. 1999. Oxideminerals. pp. F125 - F168. In: M. E. Sumner (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press. Florida.
 28. Kropff, M. L., R. C. Muchow, R. Rabbinge and P. K. Rand Aggarwal. 1997. Limits to intensive agricultural systems and opportunities for sustainable agricultural development. PP. 17-35. In: B. A. Keating, J. R. Wilson, (Eds.), *Intensive Sugarcane Production: Meeting the Challenges Beyond 2000*. CAB International, Wallingford, UK.
 29. Kochian, L. V. 1991. Mechanism of micronutrient uptake and translocation in plants. PP. 229-296. In: J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman and R. M. Welch (Eds.), *Micronutrients in Agriculture*. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI.
 30. Lair, G. J., M. Hrachowitz, N. Franz, F. J. Maringer and M. H. Gerzabek. 2009. Dating of soil layers in a young floodplain using iron oxide crystallinity. *Quaternary Geochronology* 4: 260-266.
 31. Li, J. and D. Deb. 2012. Effects of two-century land use changes on soil iron crystallinity and accumulation in Southeastern Piedmont region, USA. *Geoderma* 173-174: 184-191.
 32. Lindsay, W. L. 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soil. PP. 89-112. In: J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman and R. M. Welch (Eds.), *Micronutrients in Agriculture*. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI.
 33. Mahaney, W. C., R. G. V. Honcock and K. Sanmugas. 1991. Extractable Fe-Al and geochemistry of late Pleistocene Paleosol in the Dalijia Shan, *Western China Journal of Southeast Asian Earth Sciences* 6: 75-82.
 34. McKeague, J. A. and J. H. Day. 1966. Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian Journal of Soil Science* 46: 13-22.
 35. Mirabela, A. and G. Carsinli. 1993. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. *Soil & Tillage Research* 73: 80-86
 36. Munch, J. C. and J. C. G. Ottow. 1983. Reductive transformation mechanism of ferric oxides in hydromorphic soils. *Environment Biogeochem Ecological Bulletins* 35: 383-394.
 37. Naseri A. A., S. Jafari and M. Alimohammadi. 2007. Soil compaction due to sugarcane (*Saccharum officinarum*) mechanical harvesting and the effects of subsoiling on the improvement of soil physical properties. *Journal of Applied Sciences* 7: 3639-3638.
 38. Nelson, R. E. 1982. Carbonate and gypsum. pp. 181-199. In: A.L. Page (Ed.). *Methods of Soil Analysis*, part 2. American Society of Agronomy, Madison. WI.
 39. Owliaie, H. R., R. J. Heck and A. Abtahi. 2006. Distribution of magnetic susceptibility in Kohgilouye Boyerahmad soils, southwestern Iran. In: *Proceeding of the 18th World Congress of Soil Science*. Philadelphia, Pennsylvania. USA.

40. Owliaie, H. R. 2012. Study of chemical forms of Fe and Mn in soils of a catena, Yasouj region. *Journal of Water and Soil Science* 62: 217-226. (In Farsi).
41. Owliaie, H. R. and S. Rezaei. 2014. Effect of topography and land use on genesis, chemical forms of Fe and Mn, and clay mineralogy of soils of Yasouj western plain. *Journal of Water and Soil Conservation* 21(2): 109-129.
42. Pope R, K. Wilkinson, E. Skourtsos, M. Triantaphyllou and G. Ferrier. 2008. Clarifying stages of alluvial fan evolution along the Sfakian piedmont, Southern Crete: New evidence from analysis of post-incisive soils and OSL dating. *Geomorphology* 94: 206-225.
43. Raheb, A. and A. Haidari. 2012. An investigation of oxidoreduction condition and some electrochemical, chemical and mineralogical characteristics of paddy and nonpaddy soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 43(1): 47-54. (In Farsi).
44. Ramazanpour, H. and A. Jalalian. 2002. Soli Variability along a Chrono- Toposequence in Two Climatic Zones of Central Zagros. *Journal of Water and Soil Science, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 6(1): 131-147. (In Farsi).
45. Robbins, C. W. 1986. Sodic calcareous soil reclamation as affected by different amendments and crops. *Agronomy Journal* 78: 916-20
46. Sadeghzadeh Hemayati, S., H. Hamdi, F. Taleghani and H. Amili, 2011. Strategic Framework for Sugarcane Research. Khuzestan Sugarcane Research and Development and Lateral Industries Institute, Iran. (In Farsi).
47. Sajwan, A. and W. L. Lindsay. 1986. Effects of redox on zinc deficiency in paddy rice. *Soil Science Society of America Journal* 50: 1264-1269.
48. Scarciglia, F., P. Tuccimei, A. Vacca, D. Barca, I. Pulice, R. Salzano and M. Soligo. 2011. Soil genesis, morphodynamic processes and chronological implications in two soil transects of SE Sardinia, Italy: Traditional pedological study coupled with laser ablation ICP-MS and radionuclide analyses. *Geoderma* 162: 39-64.
49. Schwertmann, U. and R. Cornell. 1985. Iron Oxides in the Laboratory. Preparation and Characterization. Wiley-VCH, Weinheim.
50. Schwertmann, U. and D. S. Fanning. 1976. Iron- manganese concertion in hydrosequences of soils in loess in Bavaria. *Soil Science Society of America Journal* 40: 731-738.
51. Schwertmann, U. and R. M. Taylor. 1989. Iron oxides. PP. 379-438. In: Dixon, J. B. and S. B. Weed, (Eds.), Minerals in Soil Environment. Soil Science Society of America, Madison, USA.
52. Simon, M., S. Sanchez and I. Garcia. 2000. Soil-landscape evolution on a Mediterranean high mountain. *Catena* 39: 211-231.
53. Silva, A. and F. Carvalho. 2007. Impact of sugarcane cultivation on soil carbon fraction, consistence limits and aggregate stability of a yellow Latosol in Northeast Brazil. *Soil & Tillage Research* 94: 420-424.
54. Thompson, R. and F. Oldfield. 1986. Environmental Magnetism. Allen and Unwin, London.
55. Torabi Golsefidi, H., K. M. Eghbal and J. Givi. 2000. Iron oxide coating characteristics on root surface in the East of Guilan Province, Northern Iran. *Journal of Soil and Water Science* 14: 121-129.
56. Torabi Golsefidi, H. 2001. Genesis, Classification and suitability evaluation of wetland soils for rice cultivation on different landforms in Guilan Province, Northern Iran. PhD. Thesis. Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Farsi).
57. Torabi Golsefidi, H., K. M. Eghbal and J. Givi. 2003. Morphology and micromorphology of paddy soils on different landforms in guilan province, northern Iran. In: Proceeding of the Article Colletions of 8th Iranian Soil Science Congress, Rasht, Iran. (In Farsi).
58. Vahidi, M. J., A. A. Jafarzadeh, SH. Oustan and F. Shahbazi. 2012. Two physiographic units' impact on origin and distribution of extractable iron oxide forms in some soils of southern Ahar. *Water and Soil Science* 22(2): 121-135.
59. Walkly, A. and I. A. Black. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Science* 37: 29-38.
60. Zeng-Yei, H. and C. Zeng-Sang. 2001. Quantifying soil hydromorphology of a rice-growing ultisol toposequence in Taiwan. *Soil Science Society American Journal* 65: 270-278.

Soil Fe Forms in Sugarcane Cultivations with Different Utilization Histories

M. Habibian¹, S. Jafari² and M. Sheklabadi^{3*}

(Received: November 21-2016 ; Accepted: April 18-2018)

Abstract

Sugarcane is cultivated in the wide area in Khuzestan province. In these areas, irrigated sugarcane cultivation consumes more than 30,000 cubic meters per hectare annually. This research was carried out to determine the effect of sugarcane cultivation on the soil development process and forms of iron oxides. Different sugarcane fields with different utilization times were selected and soil physico-chemical properties and different Fe forms were measured. The results showed that with enhancing the utilization time, the total amount of total iron oxides (Fe_d) and crystalline iron oxides (Fe_d-Fe_o) was increased. The average value of the Fe_d from 6958 mg/kg in the fields with a medium utilization history was decreased to 4560 mg/kg in fields with a short utilization history. Similarly, the average amount of crystalline iron oxide from 5888.3 mg/kg in the fields with a long utilization history was decreased to 5003.9 mg/kg in the fields with a short utilization history. This increase reflected the effect of sugarcane cultivation on the soil development process in the cultivated fields. The amount of non-crystalline iron oxides (Fe_o) was decreased from 443.9 mg/kg from the soil surface to 273.8 mg/kg to the subsurface. This increase was related to the more organic matter and the microbial activity in the surface soil. The amount of active iron (Fe_o/Fe_d) was dropped in all fields after the cultivation. Also, this ratio was dropped from 0.055 in the fields with a long cultivation history to 0.064 in the fields with a short utilized field. The results, therefore, showed that the increase of crystalline iron oxides was due to sugarcane and its heavy irrigation.

Keywords: Crystalline Iron Oxide, Non-crystalline Iron, Utilization History, Sugarcane Plantation

1. Master of Water and Soil Agro-Industry Imam Khomeini, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran.
2. Associate Professor, Ramin agriculture and Natural Resources University of Khuzestan, Molla Sani – Khuzestan, Iran.
3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Bu-Ali Sina, Hamedan, Iran.
*: Corresponding Author, Email: sheklabadi@yahoo.com