

## تحلیل وضعیت اکسایش - کاهش و روند تحول خاک‌های شالیزار در یک توپوسکوئنس

جواد سیدمحمدی<sup>۱\*</sup> - لایلا اسماعیل نژاد<sup>۲</sup> - حسن رمضانپور<sup>۳</sup> - کامران افتخاری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۵/۲۸

### چکیده

پتانسیل اکسایش و کاهش یکی از مهمترین عوامل در تعیین ویژگی‌های شیمیایی خاک‌های غرقاب بوده و تأثیر زیادی بر میزان فعالیت و جذب عناصر غذایی دارد. شرایط احیاء در خاک‌های خیس غیراشباع، مجموعه‌ای از تغییرات شیمیایی و الکتروشیمیایی ایجاد می‌کند. منطقه مورد مطالعه با وسعت حدود ۴۰ هزار هکتار در استان گیلان واقع شده است. تغییرات مورفولوژیکی، فیزیکوشیمیایی قابل توجهی در اثر شرایط اکسایش و کاهش در خاک‌های مورد مطالعه ایجاد شده است. برای این منظور پتانسیل اکسایش - کاهش، اشکال مختلف آهن از جمله آهن محلول، بلورین، بی‌شکل و کل در خاک‌های واقع در واحدهای مختلف فیزیوگرافی مورد بررسی قرار گرفت. آهن بی‌شکل در افق‌های سطحی همه خاک‌ها با مقدار متوسط ۲۴/۳ گرم بر کیلوگرم نسبت به عمق بیشتر بوده که با مقدار ماده آلی همبستگی مثبت داشت. هوادیدگی بیشتر در سطح، شرایط اکسیداسیون و احیاء و ماده آلی زیاد مانع از تبلور آهن بی‌شکل شده است. مقادیر کمتر پتانسیل اکسایش - کاهش با میانگین ۱۴۵/۷ میلی‌ولت و rH با متوسط ۱۹/۶ در خاک اراضی پست و ساحلی دلالت بر شرایط احیاء شدید در این خاک‌ها دارد. بررسی اختلاف آهن آزاد و بی‌شکل و نسبت آنها نشان دهنده مقادیر کمتر آهن متبلور با میانگین ۶/۸ گرم بر کیلوگرم در خاک‌های اراضی پست و ساحلی بوده و دلالت بر تحول کمتر خاک‌های واقع در این واحدها به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی و نوسان آن نسبت به خاک‌های اراضی فلات‌ها و تراس‌های فوقانی و آبرفت‌های رودخانه‌ای با مقدار متوسط آهن متبلور ۱۵/۸ گرم بر کیلوگرم دارد. همچنین مقایسه میانگین مقادیر شکل‌های مختلف آهن با استفاده از آزمون LSD اختلاف معنی‌دار در واحدهای فیزیوگرافی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آهن، تکامل خاک‌ها، فرآیندهای شیمیایی و الکتروشیمیایی، واحدهای مختلف فیزیوگرافی

### مقدمه

تشکیل عوارض اکسید و احیاء، خاکستری و لجنی شدن متن خاک شناخته می‌شوند (۲۵). توسعه، تکامل، مورفولوژی و خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های شالیزار به شدت تحت تأثیر شرایط غرقاب مصنوعی و خشک و تر شدن متناوب قرار دارد (۲۸). غرقاب و در نهایت شرایط احیاء در خاک می‌تواند کیفیت خاک و نحوه عکس‌العمل گیاه و موجودات زنده را تحت تأثیر قرار دهد. خاک‌های اراضی خیس از جنبه‌های مختلفی دارای اهمیت هستند که از آن جمله می‌توان به قابلیت ذخیره بالای آب در خاک و جلوگیری از هدر رفت آن، حاصلخیزی ذاتی نسبتاً خوب و کنترل خطرات ناشی از فرسایش در آنها اشاره نمود (۱۲).

غرقاب شدن یک خاک غیراشباع، مجموعه‌ای از فرآیندهای شیمیایی و الکتروشیمیایی را ایجاد می‌کند که در حاصلخیزی خاک بسیار مؤثر هستند. یکی از مهمترین خصوصیات شیمیایی خاک غرقاب، پتانسیل اکسایش و کاهش آنها است (۱۷). کاهش Eh می‌تواند به عنوان یکی از شناساگرهای خاک‌های با زهکشی ضعیف مورد استفاده قرار گیرد. تعیین پتانسیل اکسایش و کاهش از آن جهت

خاک‌های زیر کشت برنج بیشترین وسعت اراضی خیس آنتروپوژنیک را در زمین تشکیل می‌دهند (۱۲). خاک‌های شالیزاری منبع خاک مهمی برای تولید غذا بوده (۲۹) و عملیات مدیریتی در آنها به گونه‌ای است که منجر به ایجاد شرایط هیدرومورفیک در این خاک‌ها می‌گردد و وجود چنین شرایطی در این خاک‌ها باعث تغییر در مواد خاک می‌شود و عوارضی را ایجاد می‌نماید (۱). خاک‌های شالیزار به دلیل وجود شرایط اشباع منجر به احیاء و تخریب ساختمان خاک، با فرآیندهایی چون عمل گل‌خرابی و تشکیل سخت کفه در زیر لایه شخم، تجمع موادالی در اثر مدفون شدن بقایای گیاهی در لایه شخم،

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز  
(\*) نویسنده مسئول: (Email: seyedmohammadi.javad@gmail.com)  
۲- دانشجوی دکتری مهندسی علوم خاک، پردیس کشاورزی، دانشگاه تهران  
۳- دانشیار گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان  
۴- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج

استفاده از شاخص آهن آزاد ( $Fe_d$ ) را برای بررسی تحول و تکامل خاک‌ها شاخص مناسبی دانستند.

سیدوف و همکاران (۲۱) خاک‌های واقع در یک توپوسکوئس در مکزیک را مورد بررسی قرار دادند آنها خاک‌های واقع در اراضی بالادست به دلیل شرایط هواپدیدی مناسب، متحول و خاک‌های واقع در اراضی پست را به علت شرایط بالا بودن سطح آب زیرزمینی، کم تحول گزارش کردند. دیترو و همکاران (۷) از آهن قابل استخراج با سیترات بی‌کربنات دی‌تیونات و مقدار رس برای تخمین سن خاک‌های تشکیل شده بر روی سطوح مختلف استفاده کردند. در این مطالعه، مقدار آهن پدوژنیک ( $Fe_d$ ) در سنگ تازه، ساپرولیت، رسوبات یخچالی و رسوبات ثقیلی و همین‌طور اقل‌های خاک در سطوح پایدار اندازه‌گیری و گزارش گردید که مقدار آهن پدوژنیک و رس موجود در خاک‌ها با افزایش سن خاک در روی سطوح پایدار افزایش می‌یابد. رضایور و همکاران (۱۹) با بررسی اشکال مختلف اکسیدهای آهن و توزیع آنها بر روی واحدهای متفاوت فیزیوگرافی خاک‌های آهکی شمال غرب ایران، ضمن بررسی ارتباط بین مقادیر اکسیدهای آهن و شرایط تشکیل خاک‌ها، گزارش کردند که در واحد فلات با شرایط ژئومورفولوژیکی پایدار و هواپدیدی در جای خاک‌ها بیشترین مقدار  $Fe_d$  و کمترین مقدار  $Fe_o/Fe_d$  وجود دارد.

مطالعات متعددی در مورد زراعت در شرایط غرقاب و خاک‌های شالیزاری در جهان صورت گرفته است ولی این مطالعات عمدتاً خاص منطقه بوده و با شرایط منطقه مورد مطالعه از نظر اقلیمی، مواد مادری و سایر خصوصیات متفاوت می‌باشد. سطح آب زیرزمینی بالا و غرقاب نمودن خاک سطحی، شرایط ویژه‌ای را در خاک‌های شالیزار شمال کشور از جمله گیلان فراهم آورده است، به‌طوری‌که شناسایی و تعیین خصوصیات ویژه این اراضی برای بهره‌برداری پایدار ضروری می‌باشد. هدف از این مطالعه بررسی اثر تغییرات پتانسیل اکسید و احیاء روی خصوصیات خاک‌ها و همچنین تحلیل روند تحول و تکامل خاک‌های واقع در واحدهای مختلف فیزیوگرافی با استفاده از شاخص آهن خاک می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه به وسعت ۴۰۰۰۰ هکتار جزء اراضی مرکزی استان گیلان در محدوده مناطق بالا دست سد سنگر رشت تا ساحل دریای خزر بوده و در طول جغرافیایی شرقی ۴۹ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۴۵ دقیقه و عرض جغرافیایی شمالی ۳۷ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۷ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). به لحاظ فیزیوگرافیکی منطقه مورد مطالعه به فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، آبرفت‌های رودخانه‌ای، اراضی پست و دشت ساحلی تقسیم می‌شود.

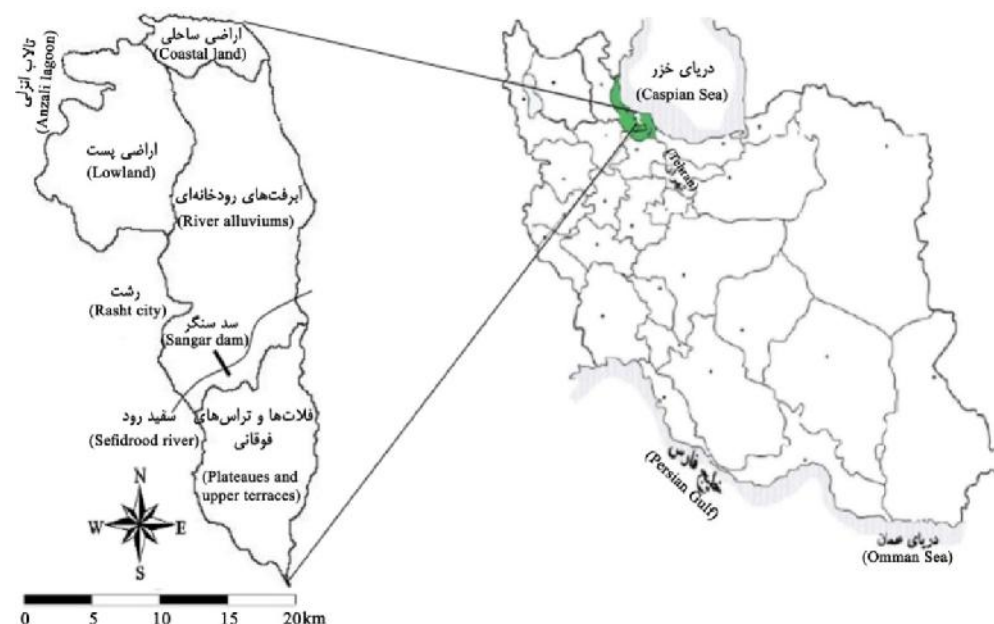
حائز اهمیت است که تغییرات الکتروشیمیایی و بیوشیمیایی حاصل از غرقاب شدن خاک به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر بسیاری از خصوصیات خاک اعم از حلالیت، قابلیت دسترسی عناصر غذایی و انحلال و رسوب کانی‌ها در خاک تأثیر دارد. یکی از مهمترین عوارض ناشی از تغییرات شیمیایی حاصل از غرقاب شدن خاک، احیاء آهن و افزایش حلالیت آن می‌باشد که در نتیجه آن رنگ خاک از قهوه‌ای به خاکستری تغییر نموده و مقادیر زیادی آهن (II) وارد فاز محلول می‌شود غلظت آهن دو ظرفیتی در خاک‌های شالیزار به وسیله pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، دما، ماده آلی، رس، نوع و مقدار هیدروکسیدهای آهن سه ظرفیتی کنترل می‌شود (۳۰).

عوارض اکسید و احیاء بیش از سه دهه است که برای تشخیص و ارزیابی شرایط خاک‌های خیس استفاده می‌شود. اندازه‌گیری پتانسیل اکسایش-کاهش با الکترودهای پلاتینی توسط تعداد زیادی از محققین جهت بررسی وضعیت اکسایش و کاهش در خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۲۰، ۲۵ و ۲۷). یکی از پارامترهایی که بر اساس آن می‌توان عوارض ناشی از اکسیداسیون و احیاء خاک را به خصوصیات شیمیایی آنها مرتبط نمود rH است که طبق فرمول زیر به دست می‌آید (۱۲).

$$rH = 2pH + 2\left(\frac{Eh}{59}\right) \quad (1)$$

rH بیشتر از ۳۳ نشان‌دهنده عدم شرایط احیاء، کمتر از ۲۰ بیانگر وجود شرایط احیاء کامل و  $20 < rH < 33$  بیانگر وجود تجمع‌های قهوه‌ای رنگ آهن و سیاه‌رنگ منگنز در شرایط خاک مرطوب می‌باشد (۸). پتانسیل اکسایش و کاهش یک شاخص کیفی مناسب برای احیاء آهن و منگنز و خصوصیات اکسید و احیاء در خاک‌های غرقاب فصلی بوده (۵) و همچنین نشان‌دهنده فراهمی عناصر غذایی و تحرک عناصر سنگین می‌باشد و در توسعه و پیشرفت بسیاری از خصوصیات پدوژنیک از جمله رنگ خاک و تخلیه و تجمع آهن مؤثر است (۹).

pH و Eh بر روی انتقال آهن در شرایط خاک‌های غرقاب بسیار مؤثر هستند، به گونه‌ای که هم آهن محلول و هم آهن تبادل با کاهش pH و Eh (افزایش شرایط احیاء) افزایش می‌یابد. مقدار آهن و منگنز به اشکال مختلف سخت‌دانه، نودول و پوشش‌های سطحی در خاک دیده می‌شوند. درباره توزیع و قابلیت فراهمی اکسیدهای آهن و منگنز مطالعات بسیاری انجام شده است ولی اطلاعات درباره کانی‌شناسی منگنز بر خلاف اکسیدهای آهن کم است، زیرا که شناسایی منگنز در بسیاری از خاک‌ها به علت تبلور ضعیف، غلظت کم و شباهت پیک‌هایش با سایر کانی‌های همراه مشکل است. درجه تبلور اکسیدهای آهن خاکساز از روی اختلاف آهن قابل استخراج با سیترات بی‌کربنات دی‌تیونات و آهن قابل استخراج با اگزالات آمونیوم و همچنین نسبت آنها به عنوان یکی از فاکتورهای مهم تکامل خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (۹، ۲۱ و ۲۹). کاستانتینی و همکاران (۶)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه  
Figure 1- Location of study area

بایستی اصلاح گردد برای تصحیح آن رابطه زیر استفاده شد چون الکترومد مرجع  $Ag/AgCl$  بود (۱۶). پتانسیل اکسایش و کاهش = ضریب تصحیح (عدد ۱۹۷) + عدد ولتمتر در صحرا

DTPA برای استخراج فرم محلول و قابل تبادل آهن، سیترات بی‌کربنات دی‌تیونات جهت اندازه‌گیری اکسیدهای آهن آزاد، اگزالات آمونیوم در تاریکی برای اندازه‌گیری اشکال بی‌شکل اکسیدهای آهن و اسیدنیتریک ۴ نرمال جهت اندازه‌گیری آهن کل استفاده گردید (۴). غلظت شکل‌های مختلف آهن استخراج شده نیز به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. برای بررسی تحول خاک‌ها از مقادیر شکل‌های مختلف آهن استفاده شد. با توجه به اینکه ضخامت افق‌ها در خاک‌های مختلف، متفاوت است بنابراین در دو عمق سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۱۵۰-۳۰ سانتی‌متر) میانگین مقادیر آهن برای همه خاک‌ها (۲۰ خاک‌خ) محاسبه شد. مقایسه میانگین‌ها در دو عمق مطرح شده به صورت مجزا در واحدهای مختلف فیزیوگرافی در نرم‌افزار SPSS با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال یک درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

خاک‌های شالیزاری منطقه مورد مطالعه از یک طرف دارای سطح ایستابی بالا بوده و از طرف دیگر تحت تأثیر اشباع مصنوعی ایجاد

نهشته‌های رودخانه‌ای و دلتایی تشکیل یافته در مصب رودخانه سفیدرود از مهم‌ترین رسوبات این ناحیه به شمار می‌رود که به دوره کواترنر تعلق دارد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۱۳۹۳/۶ میلی‌متر و متوسط دما ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد است. رژیم رطوبتی خاک در واحدهای فلات‌ها و تراس‌های فوقانی و بخشی از آبرفت‌های رودخانه‌ای یودیک و در بخش دیگری از آبرفت‌های رودخانه‌ای، اراضی پست و دشت ساحلی آکوئیک و رژیم حرارتی خاک منطقه ترمیک تشخیص داده شد (۳). اقلیم منطقه به روش دومارتن خیلی مرطوب است.

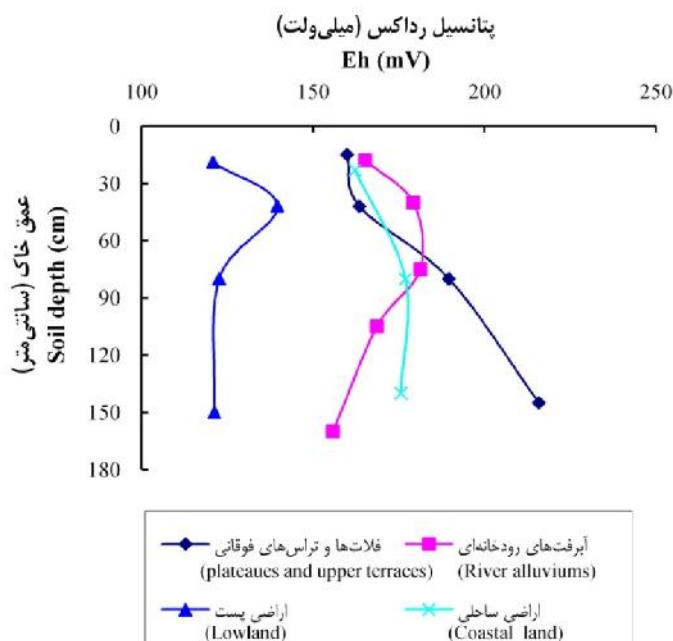
جهت تفکیک واحدها و نمونه‌برداری، ابتدا عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای منطقه مطالعاتی تفسیر گردید و حدود واحدهای فیزیوگرافی شامل فلات‌ها و تراس‌های فوقانی، آبرفت‌های رودخانه‌ای، اراضی پست و دشت ساحلی تعیین و بر روی نقشه‌های توپوگرافی منتقل شد. در هر واحد پنج خاک‌خ حفر و نسبت به مطالعه و تشریح خاک‌خ‌ها اقدام شد (۸). خاک‌ها بر اساس کلید رده‌بندی آمریکایی طبقه‌بندی شدند (۲۴). از تمامی افق‌ها نمونه‌برداری انجام گردید. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و آزمایش‌های لازم از جمله بافت به روش هیدرومتر، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر و ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از روش اسات آمونیوم انجام گردید (۴). پتانسیل اکسایش و کاهش عددی که در صحرا توسط Eh متر قرائت می‌گردد واقعی نیست،

گئوتایت به همراه دیگر اکسیدهای ثانویه آهن تأثیر زیادی بر روی رنگ خاک داشته و معمولاً رنگ آن قهوه‌ای متمایل به زرد تا قهوه‌ای است که در مطالعات صحرایی در مجاری ریشه‌ها و حفرات به وضوح مشاهده شد (جدول ۱). محققان لپیدوکروسایت را به عنوان تنها ترکیب بلورین موجود در پوشش‌های آهن بر روی ریشه برنج و لیتیوفوریت، بیرنسایت، فری‌هیدریت و گئوتایت را به عنوان کانی‌های غالب آهن و منگنز موجود در نودول‌های خاک‌های خیس چین گزارش نمودند (۲). در مطالعه دیفراکتوگرام‌های مربوط به اکسیدهای آهن در ماتل‌ها و نودول‌های اراضی شالیزاری شرق گیلان نیز غالبیت گوتایت و لپیدوکروسایت گزارش گردیده است (۲۵).

پتانسیل اکسایش و کاهش کمتر، شاخصی برای شناسایی خاک‌های با زهکشی ضعیف است و تغییرات آن در اراضی شالیزاری به سطح آب زیرزمینی، تغییرات سالیانه آن و مدت زمان غرقاب بستگی دارد. مقادیر پتانسیل اکسایش و کاهش با شدت و ضعف شرایط اکسایش و کاهش و وجود عوارض ناشی از آن هماهنگی نشان می‌دهد. تجمع عوارض ناشی از اکسایش و کاهش در قسمت‌های میانی خاک‌های اراضی آبرفتی مطالعه شده را می‌توان تحت تأثیر نوسانات سطح آب زیرزمینی دانست. تغییرات پتانسیل اکسایش و کاهش خاک می‌تواند در ارتباط با عدم یکنواختی بافت خاک، ساختمان خاک، مقدار ماده آلی و شرایط رطوبتی باشد (۲۵).

شده برای کشت برنج قرار دارند، و به همین دلیل خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیکوشیمیایی ویژه‌ای را نشان می‌دادند. برخی از خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۱) و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در جدول (۲) ارائه شده است. متن خاک به ویژه در افق‌های تحت‌الارضی دارای حالت احیاء بود، هر چند افق‌های سطحی در برخی خاک‌ها، الگوی رنگی احیاء را نشان نمی‌دادند (جدول ۱). وجود منقوطة‌های رنگی تجمعات آهن به رنگ‌های نارنجی، قهوه‌ای متمایل به زرد و قرمز در اطراف ریشه‌های برنج، دیواره حفرات بین خاکدانه‌ای با حداکثر تجمع در قسمت میانی خاک‌های اراضی آبرفتی که حاکی از نوسان سطح آب زیرزمینی و عمق ریشه دوانی برنج است، مشاهده می‌شدند. تجمعات سیاه‌رنگ منگنز در مطالعات صحرایی قابل شناسایی بودند.

لپیدوکروسایت در خاک‌های هیدرومورف مثل گلی و شبه‌گلی به وفور دیده می‌شود و ماتل‌های نارنجی رنگ مشاهده شده در مطالعات صحرایی نیز شاهد دیگری بر حضور این کانی است، کوژل-کنابتر و همکاران (۱۲) دلیل تشکیل این کانی در خاک‌های شالیزار را اکسیداسیون سریع آهن (II) در اثر زهکشی آب که با کاهش قدرت یونی محلول خاک همراه است، دانسته‌اند. گئوتایت رایج‌ترین اکسید آهن موجود در سخت دانه‌ها و نودول‌ها بوده و در خاک‌هایی که حداقل دوره کوتاهی از سال مرطوب می‌باشند، تشکیل می‌شود.



شکل ۲- روند تغییرات پتانسیل رد اکس با عمق خاک در واحدهای مختلف فیزیوگرافی  
Figure 2- Eh changes trend with soil depth in different physiographic units



نتایج بررسی‌های میکرومورفولوژی خاک‌های منطقه (۲۲) نشان‌دهنده حضور کوارتز، فلدسپار، کانی‌های تیره به عنوان مهمترین کانی‌های مقاطع نازک می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که به دلیل رطوبت فراوان و بهم خوردن خاک طی انجام عملیات آماده‌سازی خاک، هوادیدگی مواد معدنی در افق‌های سطحی به ویژه افق سطحی فلات‌ها بیشتر است. در افق‌های سطحی اراضی فلات‌ها و آبرفت‌های رودخانه‌ای به دلیل هوادیدگی در طول تشکیل خاک به احتمال زیاد آهن از کانی‌های آهن‌دار آزاد شده و باعث تلقیح متن خاک شده است مقدار آهن اندازه‌گیری شده در این افق‌ها هم زیاد می‌باشد در اراضی پست و ساحلی احتمالاً کانی‌ها کمتر تخریب یافته‌اند نتایج آزمایش‌ها پایین بودن مقدار آهن آنها را تأیید کرد (جدول ۲). مطالعات مشابه در مناطق مجاور نیز حضور کانی‌های آهن‌دار را تأیید می‌کند (۲۵).

طبق گزارش فروهن و همکاران (۱۰) و مایی و همکاران (۱۴) با تداوم شرایط احیاء و کاهش Eh و pH هم آهن محلول و هم آهن تبدالی، افزایش می‌یابند. هر چند در خاک‌های مورد مطالعه با توجه به وضعیت اشباع خاک‌ها از سطح و عمق جابجایی آهن محلول به طور مرتب دست‌خوش تغییر شده و روند خاصی در تغییرات آن با کاهش عمق مشاهده نگردید. وجود مقادیر زیاد اشکال قابل استخراج با اسید نیتریک، اکسیدهای آهن بی‌شکل و اکسیدهای آهن آزاد از یک طرف و مقادیر کمتر آهن استخراج شده با DTPA از طرف دیگر، مؤید وجود کمپلکس‌های بسیار قوی مواد آلی به ویژه اسید فولیک با فرم‌های مذکور آهن بود (۱۴). به‌گونه‌ای که به نظر می‌رسد شرایط احیاء ناشی از غرقاب نیز نتوانسته باعث شکستن این پیوندهای قوی و افزایش فرم محلول گردد.

نتایج این تحقیق نشان داد که بین مقدار ماده آلی و مقدار آهن بی‌شکل یک رابطه همبستگی مثبت وجود داشت چرا که مقدار آهن قابل استخراج با اگزالات آمونیوم در افق‌های سطحی حاوی مواد آلی زیاد، بیشتر از افق‌های تحتانی بوده و با افزایش عمق کاهش یافت (جدول ۲، ۳، ۴ و شکل ۳)، که از دلایل آن می‌توان به امکان هوادیدگی بیشتر در سطح و تشدید فرایندهای اکسیداسیون و احیاء وجود ماده آلی زیاد اشاره نمود که فعالیت میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی در حضور ماده آلی زیاد مانع تبلور آهن بی‌شکل شده و حفاظت و پایداری آن را با تشکیل پیوندهای قوی سبب می‌شود (۵) و (۱۲). حضور ماده آلی زیاد و تجزیه میکروبی آنها باعث تولید الکترون و جذب این الکترون‌ها توسط اکسید آهن با  $Fe^{3+}$  می‌شود و نهایتاً از تبلور آهن جلوگیری نموده و مقدار آهن بی‌شکل بیشتر می‌شود (۲۹). مقدار آهن قابل استفاده (قابل استخراج با DTPA) در افق‌های سطحی بیشتر از افق‌های تحتانی بود (جدول ۳ و ۴) که از دلایل عمده آن می‌توان به احیاء آهن فریک به آهن فرو در حضور مقدار کافی مواد آلی اشاره کرد که با نتایج زو و همکاران (۳۰) مطابقت دارد.

علی‌رغم وجود حالت غرقاب و شرایط احیاء در افق‌های تحتانی خاک‌های مورد مطالعه مقدار عددی Eh در خاک اراضی پست به علت شرایط شدید احیایی نسبت به واحدهای دیگر کمتر بود همچنین مقدار آن در افق‌های سطحی همه واحدها نسبت به افق‌های تحتانی کمتر بدست آمد (جدول ۲ و شکل ۲)، به طوری که با افزایش عمق و افزایش مدت و شدت شرایط کاهشی مقدار پتانسیل اکسایش و کاهش افزایش یافت. روند تغییرات پتانسیل اکسایش و کاهش در این خاک‌ها دارای رابطه معکوس با ماده آلی بود، دلیل این مساله این است که در محیط غرقاب در مجاورت مواد آلی زیاد، فعالیت میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی افزایش یافته و به تبع آن امکان احیاء هر چه بیشتر آهن فراهم و درجه احیاء در افق‌های سطحی کاهش یافته است (۱۰ و ۱۲). به‌طور کلی وجود مواد آلی زیاد در خاک و یا افزودن آن به خاک، کاهش پتانسیل احیایی را تشدید و تسریع می‌کند.

همان‌طور که اشاره گردید rH یکی از پارامترهای نشان‌دهنده خصوصیات مورفولوژیکی اکسید و احیایی و ارتباط آن با خصوصیات شیمیایی خاک می‌باشد. بر اساس جداول استاندارد فائو (۸) به طور کلی مقادیر rH خاک‌های مورد مطالعه (جدول ۲) نشان‌دهنده شرایط احیاء هستند که در دامنه rH‌های به دست آمده وجود تجمعات قهوه‌ای رنگ آهن و سیاه‌رنگ منگنز (جدول ۱) در شرایط مرطوب خاک تأیید می‌شود.

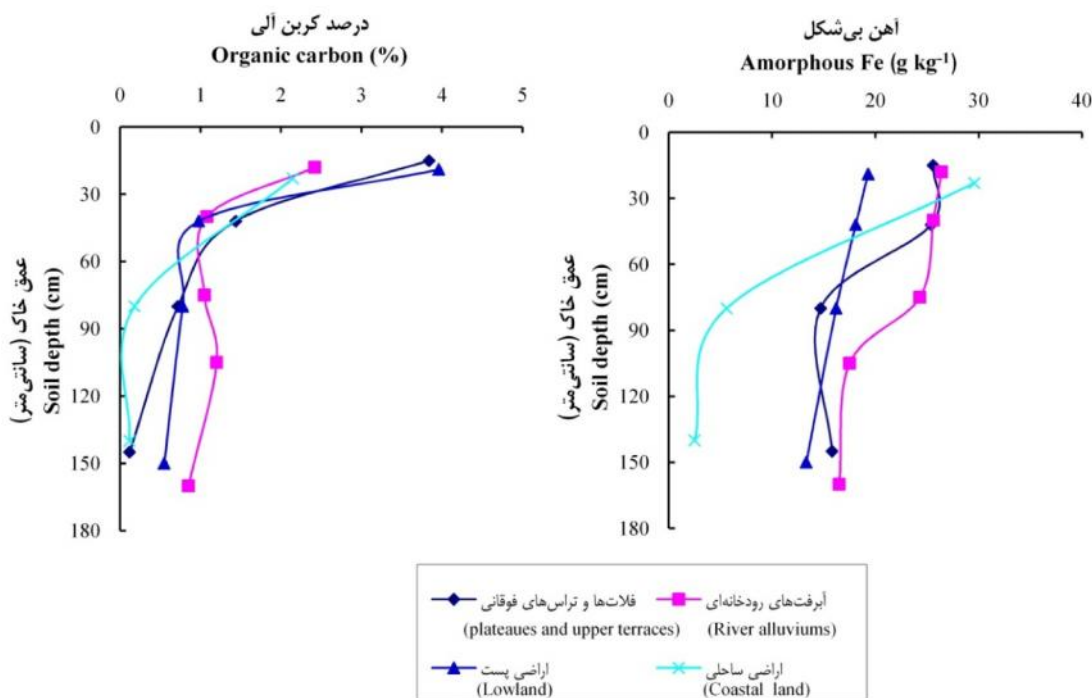
نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که ظرفیت تبادل کاتیونی افق‌های سطحی به دلیل مقدار مواد آلی و درصد رس بیشتر اغلب بیش از افق‌های زیرین بود. در واحد اراضی پست به دلیل شرایط احیایی شدید و تجمع زیاد مواد آلی مقدار CEC نسبت به واحدهای دیگر بیشتر است. مقدار آن در اراضی ساحلی و افق‌های تحتانی واحد فلات‌ها و تراس‌های فوقانی به دلیل کمتر بودن مقدار رس و ماده آلی خاک به حداقل رسیده است.

مقدار رس در افق سطحی خاک اراضی فلات‌ها نسبت به سایر واحدها کمتر است (جدول ۲). دلیل آن هوادیدگی و آبشویی در این خاک‌ها می‌تواند باشد که نشان‌دهنده تحول خاک‌های این واحد است (۲۹). مقدار رس در افق‌های تحتانی واحد آبرفت‌های رودخانه‌ای زیاد بوده ولی روند افزایش آن به شکل نامنظم است به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در این واحدها سرعت هوادیدگی کم است. با توجه به نتایج مطالعات مورفولوژی و میکرومورفولوژی آثار و شواهدی از تشکیل پوسته‌های رسی در خاک‌های مورد مطالعه مشاهده نشد (۲۲). به نظر می‌رسد عدم تشکیل پوسته‌های رسی ناشی از نوسان سطح آب زیرزمینی باشد نوسان آب به عنوان عامل پدوتوربیشن<sup>۱</sup> عمل کرده و مانع تحول و تکامل خاک‌های واحدهای اراضی آبرفتی و پست شده است که با نتایج ناتاپورن و همکاران (۱۵) مطابقت دارد.

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی خاک‌های شاهد

Table 2- Some of physical, chemical and electrochemical characteristics of representative profiles

افق Horizon	عمق Depth (cm)	اجزاء بافت (%)			CEC (cmol(+)/kg <sup>-1</sup> )	OC (%)	ECe (dS m <sup>-1</sup> )	pH <sub>(1:2)</sub>		Eh (mV)	rH
		Texture fractions						CaCl <sub>2</sub> (0.01M)	H <sub>2</sub> O		
		رس Clay	سیلت Silt	شن Sand							
<b>(Plateaus and upper terraces unit representative profile) خاک‌خ شاهد واحد فلات‌ها و تراس‌های فوقانی</b>											
Apg	0-15	29.1	48	22.9	27.6	3.84	0.3	7.3	7.6	159.9	20.1
ABg	15-42	17.1	52	30.9	15.5	1.44	0.2	7.5	7.7	163.5	20.5
Bw	42-80	5.1	30	64.9	6.4	0.72	0.4	7.4	7.7	189.6	21.2
C	80<	11	4	85	5.8	0.12	0.3	6.9	7.2	215.8	21.1
<b>(River alluviums unit representative profile) خاک‌خ شاهد واحد آبرفت‌های رودخانه‌ای</b>											
Apg	0-18	38	37.6	24.4	27.3	2.42	1.1	7.1	7.5	165.3	19.8
AB	18-40	47.8	41.2	11	27.8	1.08	0.8	7.3	7.7	179.2	20.6
Bg1	40-75	40.6	36.2	23.2	23.7	1.05	0.5	7.2	7.6	181.2	20.5
Bg2	75-105	42.8	38	19.2	25.2	1.2	0.5	7.4	7.4	168.6	20.5
BCg	105-160	36	17	47	20.1	0.85	2.1	7.4	7.6	155.8	20.1
<b>(Lowland unit representative profile) خاک‌خ شاهد واحد اراضی پست</b>											
Apg	0-19	39	44.2	16.8	32.2	3.96	1.2	7.2	7.2	120.8	18.4
ABg	19-42	39	45	16	22.4	0.98	1.3	7.4	7.4	139.6	19.5
Bg1	42-80	41.8	42	16.2	23.1	0.78	1.4	7.5	7.9	123.6	19.1
Bg2	80-150	48.2	30	21.8	25.1	0.55	0.9	7.4	8	121.2	18.9
<b>(Coastal plain unit representative profile) خاک‌خ شاهد واحد دشت ساحلی</b>											
Apg	0-23	21.2	51.4	27.4	18.1	2.15	1.2	7.4	7.6	162.3	20.3
Cg1	23-80	6	4.8	89.2	4.9	0.18	1.4	7.4	7.8	176.9	20.7
Cg2	80<	6	5.6	88.4	3.8	0.12	2.2	7.4	7.8	175.6	20.7



شکل ۳- روند تغییرات آهن بی‌شکل و کربن آلی با عمق خاک در واحدهای مختلف فیزیوگرافی

Figure 3- Organic carbon and amorphous Fe changes trend with soil depth in different physiographic units

معنی‌دار را نشان داد (جدول ۴) به نظر می‌رسد حضور آب زیرزمینی و نوسان آن در اراضی پست و ساحلی باعث کاهش هوادیدگی و تحول در این خاک‌ها شده است. رضایور و همکاران (۱۹) نیز در مطالعه خود مقدار آهن آزاد را در واحد فلات به دلیل هوادیدگی بیشتر گزارش کرده‌اند. زانگ و گانگ (۲۹) مقدار  $Fe_d$  را در اراضی بالادست (مرتفع) نسبت به اراضی پست زیاد گزارش نموده و دلیل آن را پایین بودن سطح آب زیرزمینی و هوادیدگی بیشتر در اراضی مرتفع دانسته‌اند.

مقدار آهن پدوژنیک یا آهن آزاد در افق‌های A و B خاک‌ها با افزایش پیشرفت هوادیدگی و تحول خاک‌ها افزایش می‌یابد (۲۳). در خاک‌های مطالعه شده نیز  $Fe_d$  در افق‌های A و B به مراتب بیش از افق‌های BC و C بود (جدول ۳ و ۴). مقدار زیاد  $Fe_d$  در افق‌های A و B با مقدار رس در این افق‌ها (۲۶) و افزوده شدن اکسیدهای آهن در اثر هوادیدگی کانی‌های رسی حاوی آهن در افق‌های A و B (۷) مرتبط می‌باشد. مقدار آهن آزاد در اراضی فلات‌ها و آبرفتی به مراتب بیشتر از اراضی پست و ساحلی است که مقایسه میانگین نیز اختلاف

جدول ۳- شکل‌های مختلف آهن در خاک‌های شاهد

Table 3- Different Fe forms in representative profiles

افق Horizon	عمق Depth(cm)	$Fe_{DTPA}$ ( $mg\ kg^{-1}$ )	$Fe_t$	$Fe_d$	$Fe_o$	$Fe_d-Fe_o$	$Fe_o/Fe_d$	$(Fe_d-Fe_o)/Fe_t$
<b>خاک‌خ شاهد واحد فلات‌ها و تراس‌های فوقانی (Plateaus and upper terraces unit representative profile)</b>								
Apg	0-15	107.1	62.6	38.7	25.6	13.1	0.66	0.21
ABg	15-42	47.2	62.7	38.8	25.4	13.4	0.65	0.21
Bw	42-80	34.2	61.1	37.3	14.7	22.6	0.39	0.37
C	80<	23.9	53.9	30.5	15.8	14.7	0.51	0.27
<b>خاک‌خ شاهد واحد آبرفت‌های رودخانه‌ای (River alluviums unit representative profile)</b>								
Apg	0-18	83.3	62.9	39	26.4	12.6	0.67	0.20
AB	18-40	41.1	62.1	38.3	25.6	12.7	0.66	0.20
Bg1	40-75	39.3	63.7	39.8	24.3	15.5	0.61	0.24
Bg2	75-105	42.7	59.7	36	17.5	18.5	0.48	0.31
BCg	105-160	35.9	55.1	31.6	16.5	15.1	0.52	0.27
<b>خاک‌خ شاهد واحد اراضی پست (Lowland unit representative profile)</b>								
Apg	0-19	110.8	53.6	30.1	19.3	10.8	0.64	0.20
ABg	19-42	39.3	53.3	29.8	18.1	11.7	0.61	0.21
Bg1	42-80	35.9	47.9	24.8	16.2	8.5	0.66	0.17
Bg2	80-150	30.8	42.4	19.5	13.3	6.2	0.68	0.14
<b>خاک‌خ شاهد واحد دشت ساحلی (Coastal plain unit representative profile)</b>								
Apg	0-23	79.9	62.2	38.3	29.6	8.7	0.77	0.13
Cg1	23-80	25.6	23.8	10.4	5.6	4.8	0.53	0.20
Cg2	80<	21.6	24.3	6.8	2.5	4.3	0.37	0.17

جدول ۴- مقایسه میانگین مقادیر شکل‌های مختلف آهن در دو عمق متفاوت (سطحی و زیرسطحی)

Table 4- Mean comparison of different Fe forms values invarious depths (surface and subsurface)

واحد فیزیوگرافی (Physiographic unit)	عمق مقایسه (cm) (Comparison depth)	$Fe_{DTPA}$ ( $mg\ kg^{-1}$ )	$Fe_t$	$Fe_d$	$Fe_o$	$Fe_d-Fe_o$	$Fe_o/Fe_d$	$(Fe_d-Fe_o)/Fe_t$
فلات‌ها و تراس‌های فوقانی (Plateaus and upper terraces)	0-30	107.3 <sup>ab</sup>	62.7 <sup>a</sup>	38.9 <sup>a</sup>	25.4 <sup>a</sup>	13.1 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	0.22 <sup>a</sup>
آبرفت‌های رودخانه‌ای (River alluviums)	0-30	83.2 <sup>b</sup>	62.4 <sup>ac</sup>	38.9 <sup>a</sup>	25.5 <sup>a</sup>	12.7 <sup>b</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.22 <sup>a</sup>
ارضای پست (Lowland)	0-30	110.4 <sup>c</sup>	53.3 <sup>b</sup>	29.6 <sup>b</sup>	18.5 <sup>b</sup>	10.6 <sup>c</sup>	0.67 <sup>b</sup>	0.18 <sup>b</sup>
دشت ساحلی (Coastal plain)	0-30	80.1 <sup>d</sup>	62.2 <sup>c</sup>	38.3 <sup>a</sup>	27.9 <sup>c</sup>	9.1 <sup>d</sup>	0.73 <sup>c</sup>	0.17 <sup>b</sup>
	30-150	21.6 <sup>d</sup>	24.1 <sup>d</sup>	8.5 <sup>d</sup>	3.9 <sup>d</sup>	4.5 <sup>d</sup>	0.47 <sup>a</sup>	0.17 <sup>d</sup>

\* میانگین‌ها با حروف متفاوت دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ هستند

(Means followed by different letters are significant difference at the 0.01 level (P<0.01))

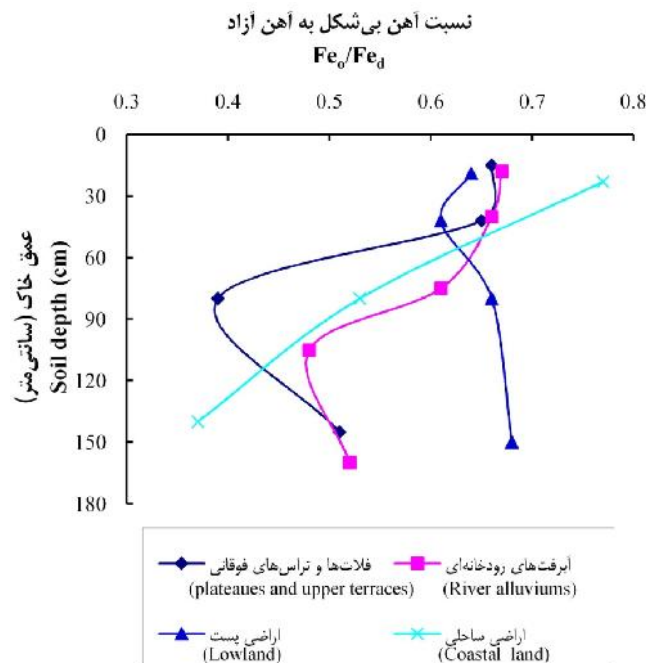


داشته و به تبع آن تحول کم این خاک‌ها دارد این وضعیت می‌تواند به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در خاک‌های این واحدها باشد، فروهن و همکاران (۱۰) نیز در مطالعه خود مقدار اکسیدهای آهن بی‌شکل را در خاک‌های هیدرومورف غالب گزارش کرده‌اند. در واحد اراضی پست مقدار آهن آمورف اندازه‌گیری شده به ویژه در افق‌های تحتانی کم بود که دلیل آن احتمالاً خارج شدن آهن احیاء در اثر نوسان سطح آب زیرزمینی، از خاک است. مقایسه میانگین نتایج مربوط به نسبت  $Fe_o/Fe_d$  در خاک‌های مطالعه شده در خاک‌های واحدهای مختلف فیزیوگرافی نشان می‌دهد (جدول ۴) که خاک واحدهای فلات‌ها و تراس‌های فوقانی و آبرفت‌های رودخانه‌ای در مقایسه با خاک‌های اراضی پست و دشت ساحلی از تحول بیشتری برخوردار می‌باشند که این مسأله ناشی از تفاوت در سطح آب زیرزمینی و نوسان آن است زانگ و گانگ (۲۹) نیز در مطالعه خود به چنین نتیجه‌ای رسیده‌اند.

عبارت  $(Fe_d-Fe_o)/Fe_d$  نشان‌دهنده نسبت آهن بلوری به آهن کل می‌باشد. با توجه به ثابت بودن مقدار آهن کل در یک خاک، افزایش این نسبت نشان‌دهنده زیاد بودن سهم اکسیدهای آهن بلوری در آن خاک می‌باشد. از طرف دیگر با گذشت زمان مقدار  $Fe_o$  کاهش (۲۳) و مقدار  $Fe_d$  افزایش (۱۷) می‌یابد.

مقادیر مطلق ترکیبات آهن علاوه بر فرآیندهای خاک‌سازی تابع ماده مادری نیز می‌باشد، لذا شاخص‌های  $Fe_d-Fe_o$  (درجه بلوری شدن اکسیدهای آهن)،  $Fe_o/Fe_d$  (نسبت آهن بی‌شکل به آهن آزاد) و  $(Fe_d-Fe_o)/Fe_d$  (نسبت آهن بلوری) برای مقایسه تکامل خاک‌ها به کار می‌رود. شاخص  $Fe_d-Fe_o$  نشان‌دهنده میزان اکسیدهای آهن بلوری می‌باشد. زیاد بودن مقدار  $Fe_d-Fe_o$  نشان‌دهنده این است که بیشتر ترکیبات آهن به صورت بلوری می‌باشد (۱۱) و هر چه این اختلاف بیشتر باشد دلالت بر هوادیدگی بیشتر و تکامل خاک دارد (۱۳). مقایسه میانگین مقادیر  $Fe_d-Fe_o$  در دو عمق سطحی و زیرسطحی اختلاف معنی‌داری در واحدهای مختلف فیزیوگرافی را نشان داد (جدول ۴). مقدار میانگین این پارامتر در واحدهای فلات‌ها و آبرفت‌ها بیشتر از اراضی پست و ساحلی بوده که دلالت بر تحول خاک در واحدهای فلات‌ها و آبرفت‌ها دارد.

نسبت  $Fe_o/Fe_d$  نشان‌دهنده سهم ترکیبات بی‌شکل آهن پدوژنیک می‌باشد. مقدار آن در سطوح جوان (با تکامل کم)، زیاد بوده و با افزایش تکامل خاک کاهش می‌یابد (۲۳). در خاک‌های مطالعه شده روند نسبت  $Fe_o/Fe_d$  از سطح به عمق خاک کاهش یافته است (جدول ۴). این مطلب حاکی از هوادیدگی و تحول بیشتر در افق‌های سطحی است. مقدار این نسبت در اراضی پست و ساحلی بیشتر است (جدول ۳، ۴ و شکل ۴) و دلالت بر مقادیر کم اکسیدهای آهن بلوری



شکل ۴- تغییرات نسبت آهن بی‌شکل به آهن آزاد با عمق خاک در واحدهای مختلف فیزیوگرافی

Figure 4-  $Fe_o/Fe_d$  changes with soil depth in different physiographic units

غیرفعال شدن فعالیت‌های هوزی در شرایط احیاء از عوامل مؤثر در روند تغییرات پتانسیل اکسایش و کاهش در خاک‌های اراضی خیس مورد مطالعه می‌باشد. به گونه‌ای که در شرایط بی‌هوزی یکسان، وجود مواد آلی بیشتر در افق‌های سطحی خاک‌های دارای شرایط آکوتیک موجب کاهش پتانسیل اکسایش و کاهش و بالعکس وجود مواد آلی کمتر در اعماق خاک سبب افزایش پتانسیل اکسایش و کاهش شده است. شواهد مورفولوژیکی مشاهده شده در تشریح صحرائی، میکرومورفولوژیکی و محاسبه پارامتر rH نشان‌دهنده شرایط احیاء منجر به ایجاد رنگ خاکستری بوده و تجمعات قهوه‌ای رنگ آهن نیز مؤید شرایط تناوب اکسایش و کاهش می‌باشد. کمتر بودن مقدار rH و Eh در خاک‌های اراضی پست نشان‌دهنده احیاء شدید در این خاک‌هاست. بررسی توزیع شکل‌های مختلف آهن به درک بهتر خاک‌ها و تکامل آنها کمک می‌کند. با افزایش عمق مقدار ماده آلی در اکثر خاک‌ها به طور منظم کاسته شده است، هماهنگ با آن از مقدار آهن بی‌شکل قابل استخراج با اگزالات آمونیوم کاسته شده که به نقش مواد آلی در به تأخیر انداختن تبلور کانی‌های آهن‌دار در سطح خاک برمی‌گردد. بررسی اختلاف آهن آزاد و بی‌شکل و نسبت آنها نشان‌دهنده مقادیر کمتر آهن متبلور در خاک‌های اراضی پست و ساحلی بوده و دلالت بر تحول کمتر خاک‌های واقع در این واحدها به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی و نوسان آن نسبت به خاک‌های اراضی فلات‌ها و تراس‌های فوقانی و آبرفت‌های رودخانه‌ای دارد. همچنین مقایسه میانگین مقادیر شکل‌های متفاوت آهن اختلاف معنی‌دار در واحدهای مختلف فیزیوگرافی را نشان داد. به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که قضاوت در مورد تکامل خاک‌ها بر اساس توزیع شکل‌های مختلف آهن، درک بهتری از روند تحول خاک‌ها و شرایط خاکسازای حاکم بر آنها را ارائه می‌دهد.

بنابراین انتظار می‌رود مقدار این نسبت در خاک‌های متحول بیشتر از خاک‌های جوان باشد. در خاک‌های مطالعه شده، مقایسه میانگین نسبت  $(Fe_4-Fe_0)/Fe_1$  نشان داد که واحدهای فلات‌ها و تراس‌های فوقانی و آبرفت‌های رودخانه‌ای با واحدهای دیگر دارای اختلاف معنی‌دار هستند (جدول ۴) و میانگین نسبت  $(Fe_4-Fe_0)/Fe_1$  در واحدهای ذکر شده بیشتر بوده و نشان‌دهنده تحول و تکامل خاک‌های واقع در این واحدها می‌باشد که با نتایج زانگ و گانگ (۲۹) مطابقت دارد.

در مجموع می‌توان ادعا کرد که قضاوت در مورد تکامل خاک‌ها بر اساس توزیع شکل‌های مختلف آهن، درک بهتری از روند تحول خاک‌ها و شرایط خاکسازای حاکم بر آنها را ارائه می‌دهد. به عنوان مثال از مقایسه واحد فلات‌ها با اراضی پست بر اساس خواص فیزیکی و شیمیایی این نتیجه حاصل می‌شود که واحد اراضی پست به علت داشتن خاک عمیق‌تر و شرایط افقی بهتر، متکامل‌تر از واحد فلات‌ها می‌باشد، اما اگر قضاوت بر مبنای توزیع شکل‌های مختلف آهن در خاک باشد کاملاً روشن می‌شود که عمیق بودن خاک در واحد اراضی پست به دلیل تکامل یافتگی آن نبوده بلکه دلیل آن مساعد نبودن شرایط برای پیشرفت فرایندهای خاکساختی می‌باشد و واحد فلات‌ها هر چند خاک عمیقی ندارد ولی به لحاظ هوادیدگی بیشتر و وقوع فرایندهای خاک ساختی متکامل‌تر است.

## نتیجه‌گیری

غرقاب شدن، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و نوسان شدید آن در طول سال تغییرات قابل توجهی را در ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و الکتروشیمیایی خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه ایجاد کرده است. مقدار قابل توجه مواد آلی ورودی و مدفون شدن آنها در اثر عملیات گل‌خرابی از یک سو و تجزیه کند آنها به علت

## منابع

- 1- Aimrun W., Amin M.S.M., and Eltiab S.M. 2003. Effective prosity of paddy soils as an estimation of its saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, 121: 197-203.
- 2- Bacha R.E., and Hossner L.R. 1977. Characteristics of coating-formed on rice roots as affected by iron and manganes addition. *Soil Science Society of America Journal*, 41: 931-935.
- 3- Banaee M.H. 1998. Moistural and temporal regimes map of Iran soils. Iranian Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian)
- 4- Burt R. 2014. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil survey investigations report No. 42, Version 5. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- 5- Cheng Y.Q., Yang L.Z., Cao Z.H., Ci E., and Yin S. 2009. Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils. *Geoderma*, 151: 31-41.
- 6- Costantini E.A.C., Lessovaia S., and Vodyanitskii Y. 2006. Using the analysis of iron and iron oxides in paleosols (TEM, geochemistry and iron forms) for the assessment of present and past pedogenesis. *Quaternary International*, 156-157: 200-211.

- 7- Dethier D.P., Birkeland P.W., and Mc Carth J.A. 2012. Using the accumulation of CBD-extractable iron and clay content to estimate soil age on stable surfaces and nearby slopes, Front Range, Colorado. *Geomorphology*, 173-174: 17-29.
- 8- FAO. 2006. *Guidelines for Soil Description*. 4<sup>th</sup> ed. Rome, Italy.
- 9- Fiedler S., and Sommer M. 2004. Water and redox conditions in wetland soils-their influence on pedogenic oxides and morphology. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 326-335.
- 10- Frohne T., Rinklebe J., Diaz-Bone R.A., and Du Laing G. 2011. Controlled variation of redox conditions in a floodplain soil: Impact on metal mobilization and biomethylation of arsenic and antimony. *Geoderma*, 160: 414-424.
- 11- Howard J.L., Clawson C.R., and Daniels L.W. 2012. A comparison of mineralogical techniques and potassium adsorption isotherm analysis for relative dating and correlation of Late Quaternary soil chronosequences. *Geoderma*, 179-180: 81-95.
- 12- Kogel-Knabner I., Amelung W., Cao Z., Fiedler S., Frenzel P., Jahn R., Kalbitz K., Kölbl A., and Schlotte M. 2010. Biogeochemistry of paddy soils. *Geoderma*, 157: 1-14.
- 13- Lair G.J., Zehetner F., Hrachowitz M., Franz N., Maringer F.J., and Gerzabek M.H. 2009. Dating of soil layers in a young floodplain using iron oxide crystallinity. *Quaternary Geochronology*, 4: 260-266.
- 14- Maie N., Watanabe A., and Kimura M. 2004. Chemical characteristics and potential source of fulvic acids leached from the plow layer of paddy soil. *Geoderma*, 120: 309-323.
- 15- Nattaporn P., Anchalee S., Irb K., and Gilkes R.J. 2007. Micromorphological Properties of Thai Paddy Soils. *Journal of Kasetsart (Natural Science)*, 41: 42-48.
- 16- PCRA (Protection cathodique et revêtements associés). 2007. Recommendations for the verification of reference electrodes. Recommendations PCRA 005, Rev 1. Committee for Cathodic Protection and Associated Coatings, Centre Français de l'Anticorrosion. Accessible at: <http://www.cefracor.org/html/publications.htm>.
- 17- Pezeshki S.R., and DeLaune R.D. 2012. Soil oxidation-reduction in wetlands and its impact on plant functioning. *Biology*, 1: 196-221.
- 18- Pope R., Wilkinson K., Skourtsos E., Triantaphyllou M., and Ferrier G. 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(1): 206-225.
- 19- Rezapour S., Jafarzadeh A.A., Samadi A., and Oustan Sh. 2009. Distribution of iron oxides forms on a transect of calcareous soils, north-west of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56(2): 165-182.
- 20- Rostaminia M., Mahmoodi S., Torabi Golsefidi H., Pazira E., and Kafaee S.B. 2011. Study of reduction-oxidation potential and characteristics of a paddy field during rice growing season. *Journal of Applied Science*, 11(6): 1004-1011.
- 21- Sedov S., Solleiro-Rebolledo E., Fedick S.L., Gama-Castro J., Palacios-Mayorga S., and Vallejo-Gómez E. 2007. Soil genesis in relation to landscape evolution and ancient sustainable land use in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *Atti della Societa Toscana de Scienze Naturali Di Piza*, 112: 115-126.
- 22- Seyedmohammadi J., Akef M., Eftekhari K., and Ramezanzpour H. 2011. The effects of ground water table and rice cultivation on paddy soils micromorphological characteristics along Rasht Sangar Dam uplands to Caspian Sea Coastal Plain. *Journal of Water and Soil Conservation*, 18(1):33-57. (In Persian with English abstract)
- 23- Simon M., Sanchez S., and Garcia I. 2000. Soil-landscape evolution on a Mediterranean high mountain. *Catena*, 39: 211-231.
- 24- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, United States Department of Agriculture, 12<sup>th</sup> ed. Natural Resources Conservation Service.
- 25- Torabi Golsefidi H. 2001. Genesis, Classification and suitability evaluation of wetland soils for rice cultivation on different landforms in Guilan Province, Northern Iran. Isfahan University of Technology, College of Agriculture, Ph.D. Dissertation, 485p. (In Persian with English abstract)
- 26- Torrent J., Liu Q.S., and Barron V. 2010. Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: Origin and paleoenvironmental significance. *Geoderma*, 154: 465-472.
- 27- van Bochove E., Beauchemin S., and Theriault G. 2002. Continuous multiple measurement of soil redox potential using platinum microelectrodes. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1813-1820.
- 28- Witt C., and Haefele S.M. 2005. Paddy Soils, In D. Hillel. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 1<sup>st</sup> ed. 220p.
- 29- Zhang G.L., and Gong Z.T. 2003. Pedogenic evolution of paddy soils in different soil landscapes. *Geoderma*, 115: 15-29.
- 30- Zou Y., Lu X., and Jiang M. 2009. Dynamics of dissolved iron under pedohydrological regime caused by pulsed rainfall events in wetland soils. *Geoderma*, 150: 46-53.

## Analysis of Eh Condition and Evolutional Trend of Paddy Soils in a Toposequence

J. Seyedmohammadi<sup>1\*</sup> - L. Esmaeelnejad<sup>2</sup> - H. Ramezanpour<sup>3</sup> - K. Eftekhari<sup>4</sup>

Received: 30-09-2014

Accepted: 19-08-2015

**Introduction:** Paddy soils are important and the base of agriculture in Guilan province. It is necessary to recognize these soils for understanding of their limitations and optimum use. Unsaturated soil submerging is the cause of collection of chemical and electrochemical process that has significant effects on soil fertility. Eh, rH and pH are important indexes that are used to investigate oxidation and reduction condition in submerged soils and have abundant effects on activity and sorption rate of nutrients. Decrease of Eh and rH in poorly drainage of paddy soils affects availability and solubility of nutrient. Different Fe forms are used for analysis of soils evolution trend and submerging influences on changes of Fe forms. The aim of the present study was conducted to investigate the effect of redox potential changes on soil characteristics and analysis of soils evolutional trend in different physiographic units.

**Materials and Methods:** The study area with 40000ha (at the east of Rasht city) is located between 49° 31' to 49° 45' E longitude and 37° 7' to 37° 27' N latitude in North of Guilan Province, Northern Iran, in the southern coast of the Caspian sea with different water table depth. The climate of the region is very humid with the mean annual precipitation of 1293.6 mm. The mean annual temperature is 15.8°C. The soil moisture and temperature regimes are Aquic, Udicand Thermic, respectively. The parent materials are derived from river sediments. The soils formed on the plateaus and upper terraces, river alluvial plain and lowland physiographic units were classified as Inceptisols and the soils formed on coastal plain physiographic unit as Entisols. Air-dried soil samples were crushed and passed through a 2mm sieve. Particle-size distribution, organic carbon and cation exchange capacity were determined by hydrometric, wet oxidation and ammonium acetate methods, respectively. Eh by Eh electrode, total iron, free iron and amorphous iron were determined using nitric acid, dithionite-citrate-bicarbonate and ammonium oxalate methods, respectively. The means of different Fe forms values compared through LSD test.

**Results and Discussion:** It can be seen especial morphological and physicochemical characteristics in studied paddy soils with high groundwater table due to artificial submerging in rice growing season. Different Fe mottles such as orange mottles include lepidocrocite mineral was observed in studied soils. Low redox potential with average 145/7mV and rH with average 19.6 in lowland and coastal soils implicate intense reduction condition. In lowland soils Eh was lower than other units and it was lower in top horizons than to sub horizons in all of units. Eh index had inverse relationship with organic matter, because of high organic matter amount caused high activity of anaerobic micro-organisms, increase of iron reduction and reduction soils degree decrease. rH index amounts showed that studied soils had reduction condition and presence of brown iron and black manganese minerals proved this condition. CEC was high in top soil of physiographic units due to high amount of organic matter and clay content. Clay particles in plateaus were lower than other units because of alteration and suitable aeration and showed high evolution in these soils. Clay coatings were not observed due to high ground water table and its alternative fluctuation. Results showed amorphous iron in surface horizons with average amount of 24.3g kg<sup>-1</sup> was higher than subsurface in all soils and had positive correlation with organic matter, because of high activity of anaerobic micro-organisms that prevent from transformation of amorphous iron to crystallized iron, therefore amorphous iron amount increased in presence of organic matter. Pedogenic iron was high in A and B horizons with regard to BC and C horizons due to aeration and weathering. In lowland and coastal land Fe<sub>d</sub> was lower than plateaus and upper terraces and river alluviums units because of ground water presence and its alternative fluctuation. Fe<sub>d</sub>-Fe<sub>o</sub> index showed crystallized iron oxides, high amount of Fe<sub>d</sub>-Fe<sub>o</sub> index proved soils evolution and high weathering. Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> ratio was related to amorphous pedogenic iron and

1- Ph.D. Student, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

(\*- Corresponding Author Email: seyedmohammad.javad@gmail.com)

2- Ph.D. Student, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tehran

3- Associate Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Guilan

4- Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Karaj

high amount of this index showed few evolution of soil.  $Fe_d/Fe_o$  and  $Fe_d-Fe_o$  indexes indicated the lower rate of crystallized iron with average  $6.8g\ kg^{-1}$  in lowland and coastal soils and implicated the lower evolution of these units' soils, due to higher surface groundwater and its more fluctuation than soils of plateaus, upper terraces and river alluviums unites with average amount of crystallized iron  $15/8g\ kg^{-1}$ . The comparison of different Fe forms using LSD method showed significant difference at the 0.01 level for different Fe forms values in different physiographic units.

**Conclusion:** Submerging, high groundwater table and severe fluctuation caused noticeable changes in morphological, physical, chemical and electrochemical properties of studied paddy soils. Noticeable organic matter amount added to soil and their burial by puddling operation and slow decomposition were effective factors in redox potential changes of studied wet soils. In equal anaerobic condition, more organic matter caused to decrease redox potential in surface horizons of soils with aquic condition and reverse, lower organic matter caused increasing in redox potential. lower amount of Eh and rH proved severe reduction condition in lowland. Investigation of  $Fe_d-Fe_o$  and  $Fe_o/Fe_d$  showed that their amount in lowland and coastal land were lower than plateaus and river alluviums, therefore lowland and coastal soils had lower evolution. Mean comparison of different Fe forms values using LSD method showed significant difference at the 0.01 level for different Fe forms in different physiographic units.

**Keywords:** Chemical and Electrochemical Processes, Different Physiographic Units, Fe, Soil Evolution