

مطالعه‌ی اثر پستی و بلندی و کاربری اراضی بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک

(مطالعه موردی: دشت مادوان، استان کهگیلویه و بویراحمد)

حمیدرضا اولیایی^{*۱} و مهدی نجفی قیری^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۵/۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۴/۱۲)

چکیده

پستی و بلندی و کاربری اراضی از عوامل مهم تأثیرگذار بر تشکیل خاک می‌باشند. اشکال شیمیایی اکسید آهن و پذیرفتاری مغناطیسی (χ) به‌طور گسترده‌ای جهت ارزیابی تکامل خاک به کار رفته‌اند. این مطالعه به‌منظور بررسی عوامل ذکر شده بر تغییرات χ صورت گرفت. یک ردیف پستی و بلندی در دشت مادوان در شمال شهر یاسوج انتخاب و ۹ خاکرخ (با کاربری شالیزار و غیرشالیزار) در آن حفر و از افق‌های مشخصه نمونه خاک برداشته شد. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های خاک به‌وسیله دستگاه MS2 Meter, Bartington Dual Frequency در فرکانس‌های ۴۶/۰ و ۴/۶ کیلوهرتز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که به‌طور کلی خاک‌های شالیزاری دارای χ ، پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ($\chi_{fd}\%$) و آهن عصاره‌گیری شده با دی‌تیونات (Fe_d) کمتر (به ترتیب ۳/۱، ۲/۶ و ۱/۷ برابر) و آهن عصاره‌گیری شده با اگزالات (Fe_o) و نسبت اکسید آهن فعال (Fe_o/Fe_d) بیشتر (به ترتیب ۵ و ۷/۲ برابر) نسبت به خاک‌های غیرشالیزاری بود. بیشترین میزان χ به‌طور عمده در فیزیوگرافی‌های پایدارتر (پلاتو و دشت دامنه‌ای) با کاربری غیرشالیزار و کمترین مقدار مربوط به خاک موقعیت تراس رودخانه‌ای با کاربری شالیزاری مشاهده شد. هم‌چنین افزایش χ در سطح خاک‌های غیرشالیزاری ۱۷ درصد بیشتر از خاک‌های شالیزاری بوده‌است. ارتباط مثبت و معنی‌داری میان χ و برخی خصوصیات خاک از جمله Fe_d ، میزان رس و $\chi_{fd}\%$ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: اکسید آهن، پستی و بلندی، پذیرفتاری مغناطیسی، خاک شالیزار

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: h_owliaie@yahoo.com

مقدمه

گردد که بر این اساس به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\chi_{\text{mass}} = \kappa / \rho \quad [2]$$

در این معادله ρ جرم مخصوص ظاهری جسم بر حسب kg m^{-3} ، χ_{mass} پذیرفتاری مغناطیسی جرمی بر حسب $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ می‌باشد (۲۳). ذرات بسیار ریز، کوچکتر از $0.3 \mu\text{m}$ و متر دارای ویژگی‌های خاصی می‌باشند که به آن رفتار سوپر پارامگنتیک (SP) موسوم می‌باشد. میزان پذیرفتاری مغناطیسی این ذرات زیاد، اما خواص مغناطیسی آنها پس از حذف میدان مغناطیسی به سرعت کاسته می‌شود. رفتار ویژه مغناطیسی این ذرات بسیار ریز بستگی به فرکانس میدان مغناطیسی دارد (۱۰). حضور مواد سوپر پارامگنتیک که عمدتاً پدوژنیک بوده و در نتیجه فرایندهای بیوشیمیایی در خاک تشکیل می‌گردند، به وسیله کمیته به نام پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ($\chi_{\text{fd}}\%$) قابل اندازه‌گیری است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\% \chi_{\text{fd}} = (\chi_{\text{lf}} - \chi_{\text{hf}}) / \chi_{\text{lf}} \quad [3]$$

که در آن χ_{lf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پائین (0.46 کیلوهرتز)، χ_{hf} پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس زیاد ($4/6$ کیلوهرتز) می‌باشد. هر چه اختلاف میان پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس‌های زیاد و کم در یک خاک بیشتر باشد، نشان‌دهنده دخالت بیشتر ذرات مغناطیسی کوچکتر از $0.3 \mu\text{m}$ (عمدتاً پدوژنیک) می‌باشد (۱۰). در اکثر منابع از جمله این مقاله منظور از χ پذیرفتاری در فرکانس پایین (χ_{lf}) است. انتقال ترکیبات پویا مانند کربنات‌ها و گچ و هم‌چنین تجمع ماده آلی در سطح خاک و یا سایر تغییرات شدید در توده خاک می‌تواند میزان پذیرفتاری مغناطیسی در یک افق را نسبت به سایر افق‌ها تغییر دهد (۵).

بر طبق نظر ماهر (۲۰) در خاک‌های هیدرومورفیک، کاهش زیستی موجب تبدیل آهن سه‌ظرفیتی نامحلول موجود در کانی فری-مگنتیت، به شکل‌های محلول دو ظرفیتی می‌شود. این امر در خاک‌های با زهکشی ضعیف، منجر به افزایش نسبت Fe_0/Fe_d می‌گردد (۱ و ۳). مک‌کیگ و دی معتقدند که (۲۲) نسبت‌های Fe_0/Fe_d بالاتر از 0.25 بیان‌گر خاک‌های هیدرومورفیک می‌باشد. حضور مواد آلی در خاک و برهم‌کنش

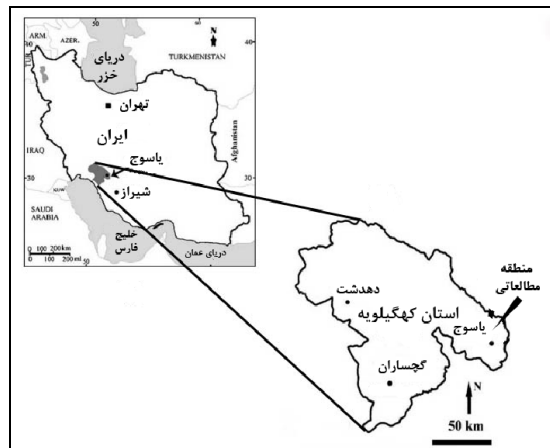
پستی و بلندی با تأثیر بر خصوصیات خاک و شرایط زهکشی به عنوان یک عامل طبیعی و تغییر کاربری اراضی به عنوان عامل انسانی، از عوامل مهم‌تر بر تغییر و تحول خاک می‌باشند. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی در مطالعات مختلفی در خاک‌شناسی از جمله تشخیص ایجاد تغییرات در فرایندهای خاک‌سازی (۳۱)، مطالعه اثرات مواد مادری (۱۸)، درک فرایندهای رسوب‌گذاری (۷)، مطالعه شرایط زهکشی خاک (۱۷ و ۲۱)، آلودگی خاک (۶ و ۱۶) و حتی مرزبندی در تهیه نقشه‌های خاک (۱۳) کاربرد دارد.

شرایط اکویک به دلیل تأثیر بر فرایندهای اکسایش-کاهش به ویژه بر تغییر شکل شیمیایی ترکیبات آهن و به دنبال آن تأثیر بر خصوصیات مغناطیسی در خاک اثرات زیادی دارد. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در دامنه‌ای از ترکیبات بی‌شکل تا ترکیبات کاملاً متبلور وجود دارند (۳۳). در خاک، میزان اکسید آهن سه ظرفیتی بی‌شکل به وسیله اگزالات آمونیم اسیدی (Fe_0) اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که مقدار کل ترکیبات آهن پدوژنیک (Fe_d) به وسیله سیترات-بیکربنات - دی تیونات (CBD) عصاره‌گیری می‌شود. بنابراین نسبت (Fe_0/Fe_d) معیاری از اکسیدهای آهن فعال می‌باشند (۲۴).

با استفاده از اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی که روشی سریع، غیر مخرب، ساده و نسبتاً ارزان می‌باشد، می‌توان تخمین نسبتاً دقیقی از وضعیت اشکال مختلف آهن را در خاک ارائه داد (۲۳ و ۳۴). پذیرفتاری مغناطیسی یا قابلیت مغناطیسی شدن کمیته است که میزان مغناطیسی شدن یک جسم در یک میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد (۲۳). این کمیت به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\kappa = M/H \quad [1]$$

در این معادله M میزان مغناطیس‌پذیری جسم، H شدت میدان مغناطیسی (هر دو بر حسب آمپر بر متر) و κ پذیرفتاری مغناطیسی حجمی است. در این معادله κ بدون واحد است. پذیرفتاری مغناطیسی می‌تواند بر حسب واحد جرمی نیز بیان



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی در استان و کشور

جدول ۱. مشخصات عمومی خاک‌رخ‌های مطالعه‌شده

رده‌بندی WRB (2006)	رده‌بندی USDA (2010)	مختصات جغرافیایی	کاربری اراضی	فیزیوگرافی	کلاس زهکشی	ارتفاع از سطح دریا (m)	خاک‌رخ
Haplic Regosols	Typic Xerorthents	۴۱°۳۳'۰۳۰" N ۳۰°۵۴'۰۵۱" E	مرتع	تپه	خوب	۱۷۵۷	۱
Calcic Luvisols	Calcic Haploxeralfs	۴۱°۲۸'۰۳۰" N ۳۱°۱۲'۰۵۱" E	گندم	دشت دامنه‌ای	خوب	۱۷۲۴	۲
Fluvic Anthrosols	Typic Epiaqualfs	۴۱°۳۰'۰۳۰" N ۳۱°۲۰'۰۵۱" E	شالیزار	تراس بالایی رودخانه	ضعیف	۱۷۱۱	۳
Haplic Fluvisols	Typic Xerofluents	۴۱°۳۲'۰۳۰" N ۳۱°۲۹'۰۵۱" E	شالیزار	تراس پایینی رودخانه	نسبتاً ضعیف	۱۷۱۴	۴
Fluvic Anthrosols	Fluvaquentic Epiaquolls	۴۱°۳۳'۰۳۰" N ۳۱°۴۶'۰۵۱" E	شالیزار	تراس بالایی رودخانه	ضعیف	۱۷۶۱	۵
Haplic Calcisols	Typic Calcixerpts	۴۱°۳۴'۰۳۰" N ۳۲°۰۲'۰۵۱" E	گندم	دشت دامنه‌ای	خوب	۱۷۷۲	۶
Haplic Luvisols	Typic Haploxeralfs	۴۱°۳۹'۰۳۰" N ۳۲°۳۴'۰۵۱" E	گندم	دشت مرتفع	خوب	۱۷۹۰	۷
Calcic Kastanozems	Typic Calcixerolls	۴۲°۰۸'۰۳۰" N ۳۳°۲۶'۰۵۱" E	گندم	دشت دامنه‌ای	خوب	۱۸۲۲	۸
Haplic Regosols	Typic Xerorthents	۴۲°۲۵'۰۳۰" N ۳۳°۴۹'۰۵۱" E	مرتع	تپه	خوب	۱۸۷۱	۹

مدیریت می‌شوند. عملیات مدیریتی بر روی این خاک‌ها شامل تسطیح اراضی، پادینگ (گل‌خرابی)، نگهداری آب طی ۴ الی ۵ ماه کشت برنج، زهکشی و خشک کردن اراضی در هنگام برداشت می‌باشد. این عملیات منجر به تغییرات زیاد در پتانسیل

آنها با ریزجانداران خاک منجر به آزادسازی ترکیبات آهن به شکل محلول گردیده که در شرایط اکوییک به صورت ترکیبات آلی و غیر بلورین می‌باشند (۳۰). خاک‌های شالیزاری خاک‌هایی هستند که با روش ویژه‌ای برای کشت آبی برنج

اکسایش و کاهش (Eh) عناصر به‌ویژه آهن می‌گردد (۲۷). همان‌گونه که ذکر شد، پذیرفتاری مغناطیسی از ویژگی‌هایی است که در زمان کوتاهی قابل اندازه‌گیری است. مطالعات نشان داده‌است که این ویژگی ارتباط خوبی با برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، تکاملی و شرایط زهکشی خاک دارد. تحقیقات چندانی در ارتباط با خصوصیات مغناطیسی و ارتباط آن با اشکال شیمیایی آهن، شرایط پستی و بندی و اثر کشت طولانی مدت برنج بر خصوصیات مغناطیسی در خاک‌های آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد صورت نگرفته‌است. لذا این مطالعه به‌منظور بررسی اثر شرایط پستی و بندی و کشت برنج (کاربری) بر شکل‌های شیمیایی آهن و برخی خصوصیات مغناطیسی خاک در منطقه مادوان در استان کهگیلویه و بویراحمد صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در منطقه مادوان در ۵ کیلومتری شمال‌غرب شهر یاسوج صورت گرفت (شکل ۱). در یک ردیف پستی و بندی به‌طول ۵ کیلومتر ۹ خاکرخ در فیزیوگرافی‌های مختلف و کاربری‌های مختلف حفر شدند (جدول ۱). از افق‌های مشخصه نمونه خاک برداشته شد. برای مطالعات پذیرفتاری مغناطیسی ۳ نمونه خاک از قسمت‌های مختلف افق برداشته شد. مواد مادری خاک‌ها همگی آهکی و متعلق به رسوبات دوران چهارم بوده‌اند. خاکرخ‌ها پس از تشریح بر مبنای سیستم‌های رده‌بندی تاکسونومی (۳۲) و WRB (۳۶) رده‌بندی گردیدند. توزیع اندازه‌ی ذرات توسط روش پی‌پت (۹) اندازه‌گیری گردید. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در عصاره‌ی گل اشباع و پ-هاش خاک در خمیر اشباع صورت گرفت (۳۵). اندازه‌گیری میزان کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون برگشتی انجام یافت (۲۹). کربن آلی به روش جکسون (۱۵) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش چاپمن (۸) اندازه‌گیری شدند. اندازه‌گیری ترکیبات آهن بی‌شکل و آلی (Fe_0) توسط عصاره‌گیری به‌وسیله آمونیوم اگزالات اسیدی در پ-هاش ۳ در تاریکی صورت

گرفت (۲۲). ترکیبات آهن متبلور، بی‌شکل و آلی (Fe_d) به‌وسیله عصاره‌گیری توسط سیترا- بی‌کربنات- دی تیونات (CBD) استخراج گردید (۱۴). پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های خاک عبور نموده از الک دو میلی‌متری به‌وسیله دستگاه MS2 Meter, Bartington Dual Frequency در فرکانس‌های ۴۶/۰ و ۴/۶ کیلوهرتز اندازه‌گیری گردید. برای این منظور حدود ۱۰ گرم خاک خشک را در ظروف پلاستیکی کوچک با قطر ۲/۲ سانتی‌متر ریخته تا ارتفاع آن به حدود ۲ سانتی‌متر برسد. قرائت‌های شاهد بر روی ظروف خالی در ابتدا و انتهای قرائت نمونه خاک، جهت تصحیح اثرات احتمالی ظرف بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی انجام گرفت. میانگین مقادیر ۳ نمونه خاک هر افق برای تفسیر نتایج مورد استفاده قرار گرفت. واحد پذیرفتاری مغناطیسی جرمی $m\ kg^{-1}$ می‌باشد که به‌دلیل بزرگ‌بودن در ضرب 10^{-8} ضرب و گزارش می‌شوند.

نتایج و بحث

جدول ۱ اطلاعات عمومی خاکرخ‌های مطالعه‌شده را نشان می‌دهد. خاکرخ‌ها در ۴ راسته‌ی اتی‌سولز، آلفی‌سولز، مالی‌سولز و اینسپتی‌سولز رده‌بندی شدند (جدول ۱). کلاس‌های زهکشی خاکرخ‌های مطالعه‌شده بسته به بافت خاک، کاربری و شیب اراضی در دامنه‌ی بسیار ضعیف تا خوب قرار داشتند. خاکرخ‌های ۳ تا ۵، به‌مدت حداقل ۳۰ سال کاربری شالیزار داشته‌اند. جدول ۲ برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی خاکرخ‌های مطالعه‌شده را نشان می‌دهد. براساس نتایج این جدول میزان رس خاک‌های مطالعه‌شده در دامنه‌ی ۱۲ تا ۵۷ درصد، پ-هاش در دامنه‌ی ۷/۲ تا ۷/۸، هدایت الکتریکی در دامنه‌ی ۰/۳ تا ۰/۸ دسی‌زیمنس بر متر، ظرفیت تبادل کاتیونی در دامنه‌ی ۵/۳ تا ۲۷/۲ سانتی‌مول (+) بر کیلوگرم، کربن آلی در دامنه‌ی ۰/۲ تا ۳/۳ درصد، کربنات کلسیم معادل در دامنه‌ی ۱۸ تا ۶۴/۴ درصد، Fe_0 در دامنه‌ی ۰/۰۲ تا ۰/۳۳ درصد، Fe_d در دامنه‌ی ۰/۲۶ تا ۱/۴۵ درصد، χ_{if} در دامنه‌ی ۴ تا ۵۲ و χ_{fd} در دامنه‌ی ۰/۵ تا ۵/۰ بوده‌است.

جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی خاک‌های مطالعه‌شده.

χ_{id}	χ	Fe_0/Fe_d	Fe_d	Fe_0	کربنات		کربن آلی		ظرفیت		هدایت		رس	سیلت	شن	عمق	افق
					کلسیم معادل	کربن آل	تبادل کاتیونی	تبادل کاتیونی	کاتیونی	کاتریکی	کتریکی						
(%)	$10^{-6} m^3 kg^{-1}$				cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	dSm ⁻¹	dSm ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	(cm)				
۲/۸	۳۴	۰/۰۶	۰/۷۲	۰/۰۴	۲۰/۲	۳/۳	۲۱/۰	۰/۸	۷/۳	۳۶	۳۴	۳۰	۰-۲۲	۱	خاکریخ ۱	A	
۲/۰	۲۶	۰/۰۵	۰/۵۹	۰/۰۳	۴۸/۴	۰/۷	۱۹/۰	۰/۶	۷/۵	۳۴	۴۲	۲۴	۲۲-۵۵		C1		
۱/۷	۲۰	۰/۰۵	۰/۴۳	۰/۰۲	۵۲/۶	۰/۴	۱۶/۷	۰/۵	۷/۷	۳۰	۲۴	۲۶	۵۵-۹۵		Ck		
۳/۱	۴۱	۰/۰۷	۰/۹۴	۰/۰۷	۱۸/۰	۱/۷	۲۰/۵	۰/۶	۷/۲	۴۰	۲۵	۲۵	۰-۲۵	۲	خاکریخ ۲	Ap	
۳/۲	۳۷	۰/۰۴	۰/۸۲	۰/۰۳	۲۶/۴	۱/۰	۲۵/۷	۰/۵	۷/۴	۴۸	۳۸	۱۴	۲۵-۶۰		Bt1		
۲/۵	۳۴	۰/۰۴	۰/۷۷	۰/۰۳	۳۲/۱	۰/۹	۲۶/۳	۰/۳	۷/۷	۵۰	۳۵	۱۵	۶۰-۸۵		Btk1		
۱/۸	۲۳	۰/۰۳	۰/۶۴	۰/۰۲	۴۰/۰	۰/۵	۲۰/۲	۰/۴	۷/۸	۴۳	۳۵	۲۲	۸۵-۱۲۵		Btk2		
۱/۵	۱۶	۰/۶۳	۰/۵۲	۰/۳۳	۲۲/۱	۱/۷	۲۲/۲	۰/۴	۷/۵	۴۴	۳۲	۲۴	۰-۲۸	۳	خاکریخ ۳	Ap	
۱/۰	۱۷	۰/۴۹	۰/۵۷	۰/۲۸	۲۵/۷	۱/۱	۲۵/۶	۰/۳	۷/۷	۵۲	۳۴	۱۴	۲۸-۵۵		Btg1		
۰/۹	۱۴	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۲۵	۲۹/۸	۰/۸	۲۵/۴	۰/۳	۷/۷	۵۰	۲۰	۳۰	۵۵-۸۵		Btg2		
۱/۰	۱۳	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۱۹	۳۳/۴	۰/۹	۲۳/۳	۰/۳	۷/۸	۴۸	۳۱	۲۱	۸۵-۱۳۰		Btgk		
۱/۱	۷	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۱۴	۲۲/۲	۲/۸	۱۳/۳	۰/۵	۷/۳	۲۶	۵۸	۱۶	۰-۱۸	۴	خاکریخ ۴	Ap _g	
۰/۵	۵	۰/۳۶	۰/۲۸	۰/۱۰	۵۳/۸	۱/۴	۵/۶	۰/۶	۷/۴	۱۴	۶	۸۰	۱۸-۴۵		2Cg1		
۰/۵	۴	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۰۹	۵۶/۱	۱/۰	۵/۳	۰/۵	۷/۶	۱۲	۱۰	۷۸	۴۵-۸۵		2Cg2		

ادامه جدول ۲. برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی خاک‌های مطالعه‌شده

χ_{eff}	χ	Fe_0/Fe_d	Fe_d	Fe_0	کربنات		هدایت		پ هاش	رس	سیلت	شن	عمق	افق
					کلسیم معادل	کربن آلی	ظرفیت تبادل کاتیونی	الکتریکی						
(%)	$10^4 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$				٪	٪	cmol kg^{-1}	dSm^{-1}	٪	٪	٪	٪	(cm)	
۱/۵	۱۰	۰/۳۵	۰/۶۳	۰/۲۴	۲۲/۵	۲/۴	۲۴/۳	۰/۷	۷/۵	۴۶	۳۴	۲۰	۰-۲۲	خاک‌خ ۵ Apg
۱/۲	۷	۰/۳۸	۰/۴۷	۰/۱۹	۴۵/۵	۰/۹	۲۲/۶	۰/۵	۷/۷	۳۸	۳۵	۲۷	۲۲-۵۵	Bg1
۱/۲	۴	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۱۷	۵۹/۱	۰/۶	۱۹/۸	۰/۶	۷/۸	۳۶	۳۹	۲۵	۵۵-۱۱۰	Bg2
۳/۷	۳۵	۰/۱۰	۰/۸۲	۰/۰۸	۲۷/۸	۱/۳	۲۷/۲	۰/۸	۷/۲	۴۹	۳۹	۱۲	۰-۳۰	خاک‌خ ۶ Ap
۲/۷	۳۳	۰/۰۸	۰/۷۵	۰/۰۶	۲۸/۳	۰/۸	۲۵/۹	۰/۵	۷/۵	۵۰	۳۵	۱۵	۳۰-۸۰	Bk
۲/۱	۲۴	۰/۰۶	۰/۵۲	۰/۰۳	۴۶/۶	۰/۶	۲۲/۶	۰/۳	۷/۶	۳۹	۳۵	۲۵	۸۰-۱۲۵	C
۴/۷	۴۹	۰/۰۵	۱/۳	۰/۰۷	۲۲/۲	۱/۶	۲۵/۴	۰/۶	۷/۴	۵۲	۳۸	۲۰	۰-۲۵	خاک‌خ v Ap
۵/۰	۵۲	۰/۰۴	۱/۴۵	۰/۰۶	۲۷/۱	۱/۲	۲۷/۲	۰/۴	۷/۵	۵۷	۲۵	۱۸	۲۵-۶۰	Bt1
۴/۱	۴۵	۰/۰۵	۱/۲۸	۰/۰۶	۳۲/۵	۰/۷	۲۲/۶	۰/۴	۷/۵	۵۰	۲۶	۲۴	۶۰-۹۰	Bt2
۱/۸	۲۸	۰/۰۳	۰/۶۹	۰/۰۲	۴۹/۵	۰/۳	۱۷/۴	۰/۵	۷/۸	۳۱	۴۴	۲۵	۹۰-۱۲۵	C
۲/۷	۳۰	۰/۰۹	۰/۷۵	۰/۰۷۰	۵۰/۴	۱/۴	۲۵/۲	۰/۷	۷/۴	۴۴	۳۶	۲۰	۰-۲۰	خاک‌خ ۸ Ap
۲/۴	۲۰	۰/۰۷	۰/۶۸	۰/۰۵	۵۷/۲	۰/۶	۲۳/۸	۰/۵	۷/۶	۳۴	۳۶	۳۰	۲۰-۶۵	Bk1
۱/۷	۱۷	۰/۰۵	۰/۶۰	۰/۰۳	۶۴/۴	۰/۴	۲۰/۰	۰/۵	۷/۹	۳۲	۳۷	۳۱	۶۵-۱۱۰	Bk2

χ_{td}	χ	Fe_0/Fe_d	Fe_d	Fe_0	کربنات		ظرفیت		هدایت الکتریکی	رس	سیلت	شن	عمق	افق
					کلسیم معادل	کربن آلی	تبادل کاتیونی	ظرفیت						
(%)	$10^{-8} m^3 kg^{-1}$				cmol _c kg ⁻¹	ds m ⁻¹			(cm)					
۲/۳	۲۵	۰/۰۹	۰/۶۴	۰/۰۶	۱۹/۰	۱/۲	۲۰/۴	۰/۸	۷/۵	۴۲	۴۱	۲۷	۰-۱۵	خاکریخ ۹ A
۱/۳	۱۴	۰/۰۵	۰/۴۵	۰/۰۲	۴۸/۹	۰/۴	۱۶/۷	۰/۶	۷/۷	۳۵	۳۳	۲۴	۱۵-۵۵	2C1
۱/۱	۱۱	۰/۰۴	۰/۳۹	۰/۰۲	۶۴/۴	۰/۲	۱۳/۵	۰/۷	۷/۷	۲۵	۴۵	۳۰	۵۵-۱۰۰	2C2
۱/۰	۹/۷	۰/۴۳	۰/۴۵	۰/۲	۳۹/۰	۱/۴				۳۶/۶				خاک شالیزار
۲/۶	۲۹/۹	۰/۰۶	۰/۷۶	۰/۰۴	۴۲/۰	۱/۰				۴۰/۸				خاک غیرشالیزار

الف) توزیع اکسیدهای آهن در خاکها

در اغلب خاکرخها حداکثر غلظت آهن با تبلور ضعیف (Fe_0) در سطح خاک مشاهده شد. تجمع ترکیبات آلی در سطح خاک عاملی کمکی برای انحلال اکسیدهای آهن در شرایط بی‌هوازی می‌باشند (۲۷). میانگین میزان Fe_0 در خاک شالیزار و غیر شالیزاری به ترتیب ۰/۲ و ۰/۴ (اختلاف ۵ برابری) بوده است. در خاک‌های با رژیم اکوییک، اکسیدهای آهن سه ظرفیتی در شرایط Eh پایین به صورت محلول در می‌آیند. این ترکیبات احتمالاً توسط باکتری‌های کاهش‌دهنده که برای تنفس بی‌هوازی از آنها استفاده می‌نمایند، به عنوان الکترون گیرنده و ماده آلی به عنوان منبع انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۶). میزان Fe_0 با میزان رس در خاک شالیزاری ($P < 0/01$ و $r^2 = 0/73$) رابطه مثبت و معنی‌داری را نشان داد. ارتباط مشابهی بین مقدار Fe_0 و میزان شن یا سیلت در هیچ‌کدام از خاکها به دست نیامد. این امر احتمالاً بیان‌کننده اهمیت رس در تأمین آهن بی‌شکل خاک می‌باشد.

میزان آهن پدوژنیک (Fe_d) نیز در همه خاکرخها با افزایش عمق کاهش یافت (به جز خاکرخ ۷). دو عامل آبشویی آهک از سطح و همچنین خروج بیشتر اکسیدهای آهن از کانی‌ها در نتیجه هوادیدگی از دلایل عمده بیشتر بودن Fe_d در سطح خاک است. در شرایط غیراکوییک عمده آهن پدوژنیک به صورت بلورین می‌باشد. میزان آهن پدوژنیک خاک‌های شالیزاری و غیرشالیزاری به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۷۶ درصد بوده است (تفاوت ۱/۷ برابری). میزان Fe_d نیز با میزان رس در خاک شالیزاری ($P < 0/01$ و $r^2 = 0/75$) و غیر شالیزاری ($P < 0/01$ و $r^2 = 0/63$) رابطه مثبت و معنی‌داری را نشان داد. بیشترین میزان Fe_d در افق Bt خاکرخ ۷ اندازه‌گیری شد که ضمن دارا بودن بیشترین میزان رس، دارای شرایط غیر اکوییک و تکامل بالای خاک نیز بوده است.

نسبت Fe_0/Fe_d در خاکها بیان‌گر عواملی چون شرایط اکسایش-کاهش، حضور لیگاندهای آلی، شرایط تکاملی خاک و درجه هوادیدگی می‌باشد (۱۹). این نسبت در خاک‌های

شالیزاری و غیرشالیزاری به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۰۶ (اختلاف ۷/۲ برابری) بوده است. مقدار کمتر این نسبت در خاک‌های غیرشالیزاری بیان‌گر مقادیر بیشتر اکسیدهای آهن بلورین (هماتیت و مگمیت) می‌باشد (۴). کاهش میزان تشکیل اکسیدهای بلورین آهن در خاک‌های با زهکشی ضعیف، منجر به افزایش نسبت میزان ترکیبات آهن بی‌شکل و آلی به ترکیبات بلورین آهن می‌شود (۲، ۱۰، ۱۳ و ۲۶). براساس نظر لو و همکاران (۱۹) خاک‌های شالیزاری تشکیل شده بر روی مواد مادری مختلف دارای نسبت Fe_0/Fe_d ، ۵۵ تا ۶۰ درصد می‌باشند. تحقیقات صورت گرفته توسط اولیایی و نجفی (۴) در شالیزارهای این استان نشان داد که کشت طولانی مدت برنج موجب افزایش در میزان رس، کربن آلی، رطوبت اشباع، ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی و کاهش میزان کربنات کلسیم معادل خاک سطحی شده است. همچنین این کاربری منجر به افزایش میزان آهن Fe_0 ، آهن کل و کاهش میزان Fe_d شد.

ب) توزیع پذیرفتاری مغناطیسی در خاکها

همان‌گونه که نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد در تمامی خاکرخها (به جز خاکرخ ۷) با افزایش عمق، میزان پذیرفتاری مغناطیسی کاهش یافته است. میانگین χ در افق سطحی خاکرخ‌های مطالعه شده ۳۵/۶ و در عمقی ترین افق ۲۰/۵ بوده است (افزایش ۷۰ درصدی در سطح). این افزایش در میزان χ در افق سطحی خاک‌های شالیزاری و غیرشالیزاری به ترتیب ۱/۵ و ۱/۸ برابر نسبت به افق‌های زیرین بوده‌اند. افزایش بیشتر میزان χ در افق سطحی خاک غیرشالیزاری نیز به همان دو عامل ذکر شده در مورد آهن پدوژنیک نسبت داده می‌شود: الف) آبشویی بیشتر مواد دیامگنتیک به خصوص کربنات کلسیم از افق سطحی در خاک غیرشالیزاری و ب) امکان تبدیل بیشتر درجای اکسیدهای غیرمغناطیسی آهن به بلورهای بسیار ریز فرّی-مگنتیت در خاک غیرشالیزاری. بر طبق نظر گریملی و همکاران (۱۳) افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در لایه‌های سطح خاک به میزان زیادی به تبدیل درجای اکسیدهای آهن غیرمغناطیسی و اکسی

هیدروکسیدهای آهن به ریزبلورهای فری مگنتیک بستگی دارد. به‌طور کلی تغییرات عمودی پذیرفتاری مغناطیسی در طول خاکرخ به‌میزان زیادی به‌تبدیل در جای اکسیدهای غیرمغناطیسی آهن به بلورهای بسیار ریز فری-مگنتیک بستگی دارد. محلول شدن Fe^{+2} و متعاقب آن رسوب مجدد به‌صورت شکل‌های مغناطیسی‌تر از عوامل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در سطح خاک می‌باشد (۱۲). عامل دیگر در توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی به ویژه در خاک‌های آهکی، نحوه توزیع ترکیب دیامگنتیک کربنات کلسیم در نیمرخ خاک می‌باشد (۲۶). انتقال عمودی اکسیدهای آهن به‌همراه ذرات ریزرس نیز بر توزیع عمودی پذیرفتاری مغناطیسی مؤثر می‌باشد (۲۸).

در خاکرخ ۷ مقدار بیشینه پذیرفتاری مغناطیسی در افق Bt1 مشاهده شد. در این خاکرخ به‌نظر می‌رسد که آبشویی ذرات بسیار ریز فری-مگنتیک و انتقال آنها از افق سطحی به افق B و یا تشکیل در جای این کانی‌ها، منجر به افزایش پذیرفتاری مغناطیسی گردیده‌است. اولیایی و همکاران (۱ و ۲) نتایج مشابهی را در خاک‌های استان فارس گزارش نمودند. گاهی نیز عواملی مانند انقطاع سنگی، پوشیده‌شدن خاک با رسوبات جدید و یا اختلاط خاک به‌صورت طبیعی یا تحت تأثیر دخالت انسان، می‌تواند عاملی برای عدم یکنواختی کاهش پذیرفتاری مغناطیسی با عمق باشد (۲۵).

خاکرخ‌های ۳، ۴ و ۵ دارای شرایط اکوییک در تمام و یا بخشی از افق‌های خود بوده‌اند. میانگین χ در این خاکرخ‌ها به مراتب کمتر از خاک‌های غیرشالیزاری بوده‌است (۹/۷ در برابر ۲۹/۹) بوده‌است. در شرایط هیدرومورفیک و کمبود اکسیژن، آهن از شکله ظرفیتی به دو ظرفیتی تبدیل می‌گردد. در این شرایط امکان تشکیل اکسیدهای آهن بلورین کمتر وجود دارد و ترکیبات آهن عمدتاً به شکل آلی و بی‌شکل (عمدتاً غیرپدوژنیک) می‌باشند (۳۰). لو و همکاران (۱۹) اشاره نمودند هر چه میزان χ در خاک اولیه غیرشالیزار بیشتر باشد، میزان کاهش χ در نتیجه‌ی کشت برنج بیشتر خواهد بود. چرخه‌های اکسایش و کاهش در خاک‌های شالیزاری می‌تواند منجر به

تشکیل نانوبلورهای اکسید آهن (با خواص کمتر مغناطیسی) گردد. کمترین میزان χ در خاکرخ ۳ مشاهده گردید. این خاکرخ بر روی تراس پایینی رودخانه حفر شده و ضمن داشتن شرایط اکوییک دارای بافت سبک (حاوی مقدار زیاد مواد دیامگنتیک شن کوارتزی) می‌باشد. از نظر تأثیر فیزیوگرافی بیشتری پذیرفتاری مغناطیسی به‌ترتیب در واحدهای پلاتو، دشت دامنه‌ای، تپه و در نهایت در واحد تراس رودخانه‌ای مشاهده شد. اولیایی و همکاران (۲۶) نیز در مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد حداکثر مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی را در موقعیت‌های پایدار ژئومورفولوژیک مشاهده نمودند. رابطه مثبت و معنی‌داری میان χ و میزان رس در هر دو خاک شالیزاری ($p < 0/01$ و $r^2 = 0/65$) و غیرشالیزاری ($p < 0/01$ و $r^2 = 0/67$) مشاهده شد. هم‌چنین رابطه مثبت و معنی‌داری بین χ و Fe_d در هر دو خاک شالیزاری ($p < 0/01$) و غیرشالیزاری ($p < 0/01$ و $r^2 = 0/49$) مشاهده شد. بیشتر بودن ضریب تبیین میان χ و Fe_d در خاک غیرشالیزاری احتمالاً به بیشتر بودن نقش آهن پدوژنیک در افزایش χ در این خاک‌ها دلالت دارد. رضاپور و همکاران (۲۸) در مطالعه شکل‌های اکسید آهن در یک ترانسکت آهکی در شمال‌غرب ایران نیز بین میزان رس خاک و آهن پدوژنیک رابطه معنی‌داری گزارش نمودند.

اختلاف χ در دو فرکانس کم و زیاد بیان‌گر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) می‌شود. این مشخصه همان‌گونه که در مقدمه ذکر شد حضور ذرات بسیار ریز سوپر پارامگنتیک را نشان داده که عمدتاً پدوژنیک می‌باشند. این عامل نیز در اکثر خاکرخ‌ها با افزایش عمق کاهش می‌یابد. رابطه مثبت و معنی‌داری میان میزان χ و χ_{fd} در خاک غیرشالیزاری ($p < 0/01$) و $p < 0/01$ و $r^2 = 0/89$) مشاهده شد. چنین روندی در خاک شالیزاری مشاهده نشد. این امر نشان می‌دهد که منشأ χ در خاک‌های شالیزاری مربوط به ذرات بزرگتر از $0/3$ میکرومتر می‌باشد. رابطه مثبت و معنی‌داری میان میزان Fe_d و χ_{fd} در خاک غیرشالیزاری ($p < 0/01$ و $r^2 = 0/90$) و شالیزاری ($p < 0/01$) و

خاکرخها (با هر دو نوع کاربری) با افزایش عمق، میزان χ کاهش یافته است. افزایش χ در سطح خاک‌های غیرشالیزاری ۱۷ درصد بیشتر از خاک‌های شالیزاری بوده است. نتایج نشان داد که میانگین χ در خاک‌های شالیزاری به مراتب کمتر از خاک‌های غیرشالیزاری بوده است (کاهش ۳/۱ برابری). کمترین میزان χ در خاکرخ حفرشده بر روی تراس پایینی رودخانه مشاهده شد که ضمن داشتن شرایط اکوییک دارای بافت بسیار شنی بود. در مجموع میزان χ در واحدهای پلاتو، دشت دامنه‌ای، تپه و تراس رودخانه‌ای به ترتیب کاهش یافت. رابطه مثبت و معنی‌داری میان میزان χ و میزان رس در هر دو خاک شالیزاری و غیرشالیزاری مشاهده شد. هم‌چنین رابطه مثبت و معنی‌داری بین χ و Fe_d در هر دو خاک شالیزاری و غیرشالیزاری مشاهده شد. بین میزان χ و χ_{fid} در خاک غیرشالیزاری رابطه مثبت و معنی‌داری مشاهده شد. چنین روندی در خاک شالیزاری مشاهده نشد.

$r^2=0/67$) مشاهده شد. این ارتباط نشان می‌دهد که با افزایش میزان آهن پدوژنیک، میزان ریزیلورهای مغناطیسی آهن در هر دو نمونه خاک افزایش یافته است. نتایج مشابهی توسط اولیایی و همکاران (۳ و ۲۶) گزارش شده است.

نتیجه‌گیری کلی

به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که در اغلب خاکرخ‌های مطالعه‌شده مقدار Fe_o و Fe_d با افزایش عمق کاهش می‌یابد. میزان Fe_o با میزان رس در خاک‌های شالیزاری و Fe_d در هر دو گروه خاک رابطه مثبت و معنی‌داری را نشان داد. میانگین میزان Fe_o در خاک شالیزاری ۵ برابر خاک غیرشالیزاری (۰/۲ و ۰/۴ درصد) بوده است. میانگین میزان Fe_d در خاک غیرشالیزاری ۱/۷ برابر خاک شالیزاری (۰/۷۶ و ۰/۴۵ درصد) بوده است. بیشترین میزان Fe_d در خاک‌هایی مشاهده شد که ضمن دارا بودن بیشترین میزان رس، دارای شرایط غیر اکوییک و تکامل بالای نیم‌رخ‌ی بودند. هم‌چنین کشت برنج موجب افزایش ۷/۲ برابری نسبت Fe_o/Fe_d در خاک‌های مورد مطالعه گردید. در اکثر

منابع مورد استفاده

- اولیایی، ح. ر.، ا. ادهمی، م. چاکر حسینی، م. رجائی و ع. کسرائیان. ۱۳۸۷. ارزیابی منشاء پذیرفتاری مغناطیسی با استفاده از تیمار CBD و تصاویر میکروکت اسکن در برخی خاک‌های استان فارس. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۴۶: ۷۷۳-۷۸۹.
- اولیایی، ح. ر.، ا. ادهمی، س. جعفری، م. رجائی و ر. قاسمی. ۱۳۸۸. توزیع پذیرفتاری مغناطیسی در ارتباط با ترکیبات آهن در برخی از خاک‌های انتخابی استان فارس. مجله پژوهش‌های خاک. ۲۳(۲): ۱۹۱-۲۰۴.
- اولیایی، ح. ر.، ا. ادهمی، ک. اجرائی، م. نجفی و م. رجائی. ۱۳۸۹. مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی در برخی خاک‌های اکوییک و غیراکوییک استان فارس. مجله علوم کشاورزی ایران. ۴۶: ۱۴۸-۱۵۹.
- اولیایی، ح. ر. و م. نجفی قیری. ۱۳۹۱. بررسی اثرات کشت طولانی‌مدت برنج بر برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی رس خاک در منطقه یاسوج. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. در دست چاپ.
- Blume, H. P. and U. Schwertmann. 1969. Genetic evaluation of profile distribution of Al, Fe and Mn oxides. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33: 438-444.
- Blundell, A., J. A. Dearing, J. F. Boyle and J. A. Hannam. 2009. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales. Earth-Science Reviews, 95: 158-188.
- Caitcheon, G. G. 1993. Applying environmental magnetism to sediment. Tracer in Hydrology. Proceeding of the Yokohama Symposium, 215. JAHS Publ.
- Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. pp. 891-901. In: Black, C. A. (Ed.), Methods of soil analysis, part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Day, P. R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. PP. 545-567. In: Black, C. A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, part 1. American Society of Agronomy, Madison, WI.

10. Dearing, J. A., K. L. Hay, S. M. J. Balsan, A. S. Huddleston, E. M. H. Wellington and P. J. Loveland. 1996. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of contributing theories using a national data set. *Geophys. J. Intern.* 127: 728-734.
11. De Jong, E., D. J. Pennock and P. A. Nestor. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena* 40: 291-305.
12. Fine, P., M. J. Singer, R. Laven, K. Verosub and R. J. Southard. 1989. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences. *Geoderma* 44: 287- 306.
13. Grimley, D. A., N. K. Arruda and M. W. Bramstedt. 2004. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the Midwestern USA. *Catena*, 58: 183-213.
14. Holmgren, G. G. S. 1976. A rapid citrate-dithionate extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 210-211.
15. Jackson, M. L. 1975. Soil chemical analysis-advanced course. Univ. of Wisconsin, College of Agric. Dept. of Soil Sci., Madison, WI.
16. Karimi, R., S. Ayoubi, A. Jalalain, A. R. Sheikh-Hossenli and M. Afyuni. 2011. Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran. *J. Appl. Geophys.* 74: 1- 7.
17. Kravchenko, A. N., G. A. Bollero, R. A. Omonode, and D. G. Bullock. 2002. Quantitative mapping of soil drainage classes using topographical and soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 235-243.
18. Lu, S.G. 2000. Lithological factors affecting magnetic susceptibility of subtropical soils, Zhejiang Province, China. *Catena* 40: 359-373.
19. Lu, Sh., L. Zhu and J. Yu. 2012. Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its implications. *Catena* 93: 9-17.
20. Maher, B. A. 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Inter.* 42: 76-92.
21. Mathe, V. and F. Leveque. 2003. High resolution magnetic survey for soil monitoring: detection of drainage and soil tillage effects. *Earth Planet. Sci. Lett.* 212: 241- 251.
22. McKeague, J. A. and J. H. Day. 1966. Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.* 46: 13-22.
23. Mullins, C. E. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science-A review. *J. Soil Sci.* 28: 223-246.
24. Munch, J. C. and J. C. G. Ottow. 1983. Reductive transformation mechanism of ferric oxides in hydromorphic soils. *Environ. Biogeochem. Ecol. Bull.* 35: 383-394.
25. Oades, J. M. 1963. The nature and distribution of iron compounds in soils. *Soils and Fert.* 26: 69-80.
26. Owliaie, H. R., R. J. Heck and A. Abtahi. 2006. The magnetic susceptibility of soils in Kohgilouye, Iran. *Canadian J. Soil Sci.* 86: 97-107.
27. Ponnampuruma, F. N. 1978. Electrochemical change in submerged soil and the growth of rice. PP: 421-441 *In: Soils and rice.* IRRI, Losbanos, Philippines.
28. Rezapour, S., A. Jafarzadeh, A. Samadi, and S. Oustan. 2010. Distribution of iron oxides forms on a transect of calcareous soils, north-west of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Sci.* 56:165-182.
29. Richards, L. A. (Ed.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook No. 60. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
30. Schwertmann, U. and R. M. Taylor. 1989. Iron oxides. P. 379-438. *In: Dixon, J. B. and S. B. Weed, (Eds.), Minerals in soil environment.* Soil Sci. Soc. of America, Madison USA.
31. Singer, M. J., K. L. Verosub, P. Fine and J. Tenpas. 1996. A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. *Quarter. Int.* 34: 243- 248.
32. Soil Survey Staff. 2010. Keys to Soil Taxonomy, U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
33. Thomasson, A. J. and P. Bullock. 1975. Pedology and hydrology of some surface water gley soils. *Soil Sci.* 119: 339-348.
34. Thompson, R. and F. Oldfield. 1986. Environmental Magnetism. Allen and Unwin, London 227 p.
35. U.S. Salinity Laboratory Staff. 1945. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA. Handbook 60, Washington D.C.
36. WRB. IUSS Working Group. 2006. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports No. 103. Rome, FAO.