

تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ و ارتباط آن با برخی ویژگی‌های خاک و پذیرفتاری مغناطیسی در سایت مرجع شهرستان فریدن

نسیم بازشوشتری زاده^۱ و شمس‌الله ایوبی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۷ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹	به منظور بررسی تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ در سایت مرجع شهرستان فریدن و ارتباط آن با برخی ویژگی‌های خاک، تعداد ۹۶ نمونه از اعماق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متری و هم‌چنین برای تعیین توزیع عمودی آن، ۸ نمونه خاک از دو پروفیل مرجع از اعماق ۰-۱۵، ۱۵-۲۵، ۲۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متری برداشته شد. دستگاه اسپکترومتری اشعه گاما برای آنالیز سزیم-۱۳۷ مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در دو فرکانس ۰/۴۶ و ۴/۶ کیلوهرتز به وسیله دستگاه Bartington اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های خاک، شامل نیتروژن کل، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، آهک، هدایت الکتریکی، pH، توزیع اندازه ذرات، سنگریزه و چگالی ظاهری در نمونه‌ها تعیین شد. سزیم-۱۳۷ از خود تغییرپذیری نسبتاً کم آشکار کرد. نتایج نشان داد، چگالی ظاهری بیش‌ترین همبستگی مثبت را با سزیم-۱۳۷ ($r=0/46, p<0/01$) دارد. بین رس و سزیم-۱۳۷، همبستگی منفی ($r=-0/52, p<0/01$) مشاهده شد. کانی‌شناسی رس نشان داد که کانی‌های ایلیت، کائولینیت و کلریت در سایت مرجع مورد مطالعه وجود دارند. نتایج تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه با روش گام به گام نشان داد که چگالی ظاهری، درصد رس و پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین، ۴۳ درصد از کل تغییرپذیری سزیم-۱۳۷ را در سایت مورد مطالعه توجیه می‌کنند.
کلمات کلیدی: سزیم-۱۳۷ تغییرپذیری سایت مرجع ویژگی‌های خاک پذیرفتاری مغناطیسی منطقه فریدن	
*عهده دار مکاتبات Email: ayoubi@cc.iut.ac.ir	

رادینونوکلئید در مطالعات فرسایش و رسوب خاک برای مقیاس‌های مختلف از سطح پلات تا حوضه آبخیز مورد استفاده قرار گرفته است (۳۳ و ۳۴).

عنصر سزیم-۱۳۷، به شدت جذب سطحی ذرات خاک می‌شود و حرکت آن در خاک توسط فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی بسیار محدود است؛ بنابراین

مقدمه

سزیم-۱۳۷، رادینونوکلئیدی مصنوعی با نیمه عمر ۳۰/۲ سال و تشعشع گاما است که به شکل ریزش‌های رادیواکتیو از اواخر دهه ۱۹۵۰ و اوایل دهه ۱۹۶۰ وارد محیط شده است. توزیع اولیه سزیم-۱۳۷ در طبیعت، یکنواخت و متناسب با مقدار بارندگی است. این

کربنات و اسیدپت خا، همبستگی منفی و معنی دار به دست آوردند.

پذیرفتاری مغناطیسی یا قابلیت مغناطیسی شدن، درجه-ای است که یک ماده، میدان مغناطیسی شناخته شده و معینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقدار این تأثیر، تابع غلظت و نوع کانی‌های مغناطیسی است که در نمونه وجود دارد (۲۷). توزیع کانی‌های مغناطیسی در پروفیل خاک، توانایی ارزیابی وضعیت توسعه یا تخریب خاک را فراهم می‌کند. در خاک‌های پایدار، پذیرفتاری مغناطیسی، به تدریج از لایه‌های عمقی خاک به طرف سطح افزایش می‌یابد (۱۳). تشکیل پدوژنیک کانی‌های فری مگنتیک، سبب افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌هاست (۱۴) و (۲۸). آبشویی 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 که این امر مربوط به افزایش یا کاهش غلظت ترکیبات مغناطیسی در خاک می‌باشد (۸).

تا کنون هیچ مطالعه‌ای در خصوص تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ در سایت‌های مرجع کشور ایران صورت نگرفته است. این مطالعه به منظور بررسی تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ و یافتن روابط آن با برخی ویژگی‌های خاک در سایت مرجع شهرستان فریدن در غرب استان اصفهان طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و طرح نمونه برداری

شهرستان فریدن با وسعت حدود ۲۱۰۷/۳۳ کیلومتر مربع در ارتفاع ۲۳۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. آب و هوای این شهرستان از نوع معتدل سرد، متوسط دمای سالانه آن بین ۱۱ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه در این شهرستان ۳۳۵/۶ میلی‌متر است. شهرستان فریدن از نظر زمین‌شناسی بسیار متنوع بوده و تشکیلات اکثر دوران‌های زمین‌شناسی را دارا می‌باشد. پوشش

فرآیندهای فیزیکی از قبیل فرسایش و خاکورزی یا شخم دلیل اصلی توزیع آن در خاک‌ها می‌باشد (۲۴) و (۳۴). در خاک‌های دست نخورده، حداکثر غلظت سزیم-۱۳۷ در عمق ۵-۱۵ سانتی‌متری از سطح است و به صورت تابع نمایی با عمق کاهش می‌یابد (۱۷ و ۲۲).

فرض اساسی در استفاده از سزیم-۱۳۷ برای ارزیابی فرسایش خاک، مقایسه مقدار سزیم-۱۳۷ موجود در خاک در معرض فرسایش با یک سطح مرجع می‌باشد. سطح مرجع، نسبتاً مسطح، تحت پوشش گیاهی دائم، دست نخورده و پایدار است که از ابتدای ورود سزیم-۱۳۷ به خاک تا زمان نمونه‌برداری تحت تأثیر فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری نبوده است. کاهش یا افزایش سزیم-۱۳۷ نسبت به موجودی مرجع، به ترتیب فرسایش و رسوب خاک را نشان می‌دهد، بنابراین برآورد دقیق و قابل اطمینان موجودی سزیم-۱۳۷ منطقه مرجع ضروری است (۴، ۵ و ۱۹).

تاکنون پژوهش‌های محدودی درباره تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ در سایت مرجع و ارتباط آن با ویژگی‌های خاک انجام گرفته است. کورچل^۱ و همکاران (۵)، تغییرپذیری موجودی سزیم-۱۳۷ را در سایت‌های مرجع واقع در جنوب مرکزی برزیل، ۳۱-۱۱ درصد گزارش کردند. آن‌ها بین سزیم-۱۳۷ و ماده آلی خاک، همبستگی مثبت و معنی دار در سطح ۱ درصد و برابر با ۰/۹۷ به دست آوردند. ناوس^۲ و همکاران (۱۶) در سایت‌های مرجع واقع در اسپانیا، همبستگی مثبت ($p < 0/01$) $r = 0/9$ ، بین موجودی سزیم-۱۳۷ و ذرات ریز خاک (۲ میلی‌متر) مشاهده کردند. گاسپر و ناوس^۳ (۹) نیز، در خاک‌های دست نخورده در شمال شرق اسپانیا، بین سزیم-۱۳۷ و ویژگی‌های هدایت الکتریکی، درصد گچ و ماده آلی، همبستگی مثبت و معنی دار و بین سزیم-۱۳۷ با

1- Correchel *et al.*

2- Navas *et al.*

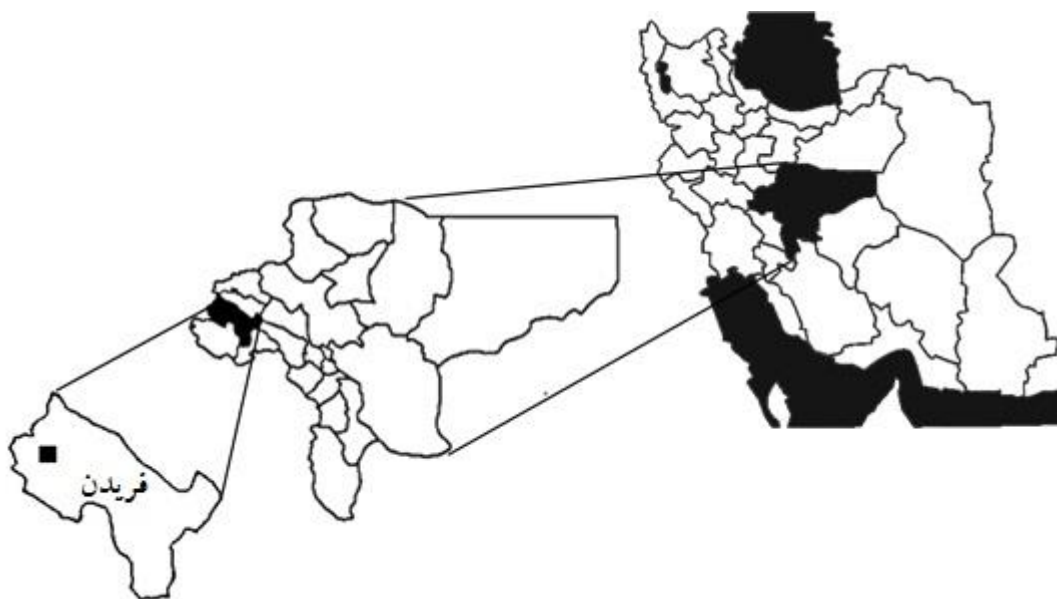
3- Gaspar and Navas

سایت مرجع مورد مطالعه تا عمق ۳۵ سانتی متری، ۲ پروفیل حفر شد و از هر کدام ۴ نمونه از اعماق ۵-۰، ۱۵-۵، ۲۵-۱۵ و ۳۵-۲۵ سانتی متری جمع آوری گردید. در نهایت مجموعاً ۱۰۴ نمونه خاک برای آماده سازی و تجزیه و تحلیل های بعدی به آزمایشگاه منتقل شد.

گیاهی شهرستان را عمدتاً گون، گز، کرفس کوهی و درختان پراکنده بلوط تشکیل می دهند.

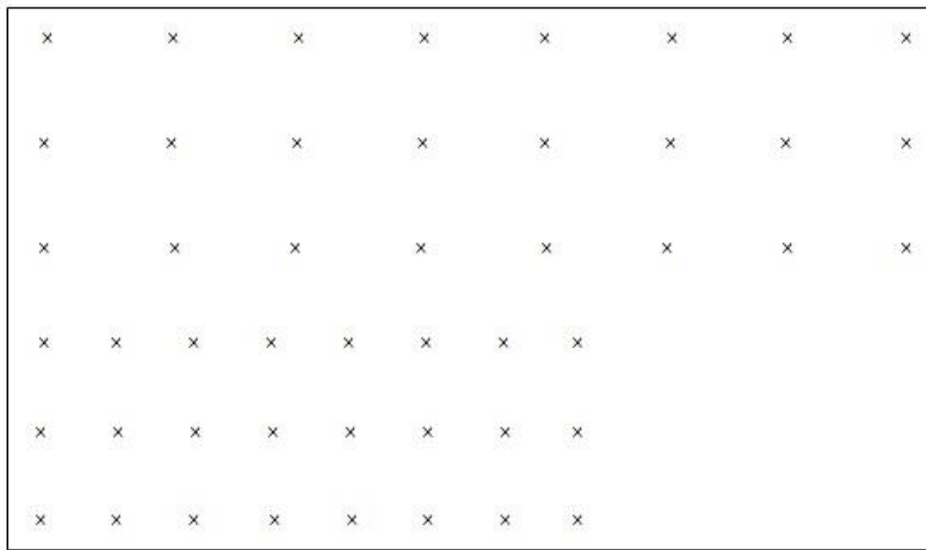
نمونه برداری از یک سایت مرجع واقع در این شهرستان در عرض جغرافیایی $32^{\circ} 06'$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 00'$ شرقی صورت گرفت. سایت مرجع انتخاب شده روی موقعیت مسطح بالای شیب (Summit) و تحت پوشش دائم بوته و علف (*Astragalus sp.*, *Mucronata* sp.) بود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی سایت مرجع مورد مطالعه در شهرستان فریدن را نشان می دهد.

از ۴۸ نقطه و در هر نقطه، دو نمونه از اعماق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی متری با سطح مقطع 20×20 سانتی متر برداشت شد (شکل ۲). برای تعیین توزیع عمقی فعالیت سزیم-۱۳۷ به منظور تفسیر موجودی و رفتار سزیم-۱۳۷ در



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی سایت مرجع مورد مطالعه در شهرستان فریدن
Figure (1) Geographical location of the reference site in the Fereydan district

بازشوستری زاده و ایوبی: تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ و ارتباط...



شکل (۲) طرح نمونه برداری خاک در سایت مرجع مورد مطالعه
Figure (2) Sampling design in the studied reference site

ظاهری با استفاده از استوانه‌ای به حجم ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد.

آنالیزهای آماری

توصیف آماری داده‌ها به کمک نرم افزار SPSS نسخه ۱۶ صورت پذیرفت. آماره‌های حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات، مقدار چولگی و کشیدگی برای هر عمق جداگانه محاسبه شد. برای آزمون نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف استفاده گردید. برای بررسی همبستگی بین متغیرهای مورد بررسی، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. برای تعیین ویژگی‌هایی از خاک که تأثیر معنی‌داری بر تغییرات سزیم-۱۳۷ در خاک سایت مرجع مورد مطالعه دارند، از رگرسیون خطی چندگانه با روش گام به گام استفاده شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری متغیرها

توصیف آماری سزیم-۱۳۷، پارامترهای مغناطیسی و برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری، به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک در مجاورت هوا، خشک و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و میزان سنگریزه هم‌زمان با کوبیدن و عبور از الک تعیین گردید. برای اندازه‌گیری سزیم-۱۳۷، ۹۰۰ گرم از هر نمونه داخل ظروف مخصوص ماریتلی ریخته شد (۱۰). آنالیز نمونه‌های سزیم-۱۳۷ در آزمایشگاه فیزیک هسته‌ای دانشگاه اصفهان توسط دستگاه اسپکترومتری اشعه گاما صورت گرفت.

پارامترهای مغناطیسی نمونه‌های خاک، شامل پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین (χ_{lf}) و پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا (χ_{hf}) به وسیله دستگاه Bartington در دو فرکانس ۰/۴۶ و ۴/۶ کیلوهرتز اندازه‌گیری شد. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) از رابطه ۱ محاسبه گردید (۷).

$$\chi_{fd} = (\chi_{lf} - \chi_{hf} / \chi_{lf}) \times 100 \quad (1)$$

درصد رس، سیلت و شن به روش پییت (۶)، ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۰)، نیتروژن کل به روش کلدال (۳)، آهک به روش تیتراسیون معکوس (۲۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم (۲۹)، هدایت الکتریکی و pH در سوسپانسیون ۱ به ۲/۵ خاک به آب و چگالی

منظم سزیم-۱۳۷ در سایت مرجع مورد مطالعه را تأیید می-کند. ساترلند^۱ (۳۱) با بررسی متون منتشر شده در مورد تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ در سایت‌های مرجع، ضریب تغییرات فعالیت سزیم-۱۳۷ در نقاط مختلف دنیا را ۱۳-۲۳/۴ درصد (میان ۱۹/۳ درصد) گزارش کرد. آونز و والینگ^۲ (۱۹) تغییرپذیری مکانی موجودی سزیم-۱۳۷ را در دو سایت مرجع واقع در انگلستان و زیمبابوه، به ترتیب ۱۲/۲ و ۴۸/۹ درصد به دست آوردند. آن‌ها علت تغییرپذیری بالاتر در سایت مرجع زیمبابوه را ریزش ناچیز سزیم-۱۳۷، عدم قطعیت اندازه‌گیری، نوع پوشش گیاهی و طبیعت ناهمگن خاک گزارش کردند. مطالعه پیناک^۳ (۲۱) نشان داد، ضریب تغییرات محتوای سزیم-۱۳۷ در سایت‌های مرجع واقع در ساسکاچوان کانادا و شمال شرق غنا تقریباً ۲۰ درصد و احتمالاً به علت تغییرپذیری مکانی تصادفی است.

در میان ویژگی‌های فیزیکی مورد مطالعه، بیش‌ترین ضریب تغییرات در هر دو عمق متعلق به درصد سنگریزه برابر با ۲۶/۶۳ درصد با میانگین ۱۷/۵۳ درصد، حداقل ۷/۶۹ و حداکثر ۳۰ درصد در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری و ۳۱/۷ درصد با میانگین ۱۸/۳۲ درصد، حداقل ۱۰ و حداکثر ۳۰ درصد در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری است. علت تفاوت در مقادیر حداقل و حداکثر درصد سنگریزه را می‌توان به طبیعت خاک سایت مرجع مورد مطالعه نسبت داد.

درصد رس در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری به علت جابه‌جایی با جریان رو به پایین آب افزایش یافته و شن بیش‌تری در سطح خاک باقی مانده و تجمع یافته است. هم‌چنین فرسایش انتخابی توسط قطرات باران و رواناب سطحی، باعث کاهش مقدار رس افق سطحی و افزایش شن شده است. با توجه به میانگین مقادیر شن، سیلت و رس در سایت مرجع مورد مطالعه، بافت خاک در هر دو عمق، لوم به دست آمد.

با توجه به اعداد آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (KS) ارائه شده در جداول ۱ و ۲، در بین ویژگی‌های شیمیایی خاک، شاخص فعالیت رس و pH در عمق ۰-۱۵ سانتی-متری، در بین ویژگی‌های فیزیکی خاک، چگالی ظاهری در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری و درصد شن در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری و در بین ویژگی‌های مغناطیسی خاک، پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین و بالا در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری از توزیع نرمال پیروی نکرده (با توجه به آزمون کولموگروف اسمیرنوف، $KS < 0.05$) و مقادیر چولگی هم این مطلب را تأیید می‌کند که در تمامی ویژگی‌ها، به جز ویژگی‌های مذکور بین +۱ و -۱ قرار دارد. برای انجام محاسبات بعدی، داده‌های غیر نرمال با استفاده از لگاریتم پایه طبیعی به داده‌های نرمال تبدیل شد.

در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری، نسبت ماده آلی به کل رس که بیانگر مقدار ماده آلی مستقل از مقدار رس (بافت خاک) است (۱۱) و نیتروژن کل خاک با میانگین ۰/۰۹ درصد در هر دو عمق، دارای بالاترین ضریب تغییرات، به ترتیب برابر با ۲۷/۸۲ و ۲۶/۵۴ درصد می‌باشند. مقدار گردش عناصر غذایی در خاک با مقدار ماده آلی در ارتباط هستند و مقدار ماده آلی هر کجا بیش‌تر باشد، عناصر غذایی به صورت جذب سطحی شده همراه با آن وجود دارند و گردش عناصر غذایی نیز از ماده آلی تبعیت می‌کند (۲۵). با توجه به مقادیر میانگین ماده-آلی، عدم تفاوت معنی‌دار درصد ماده آلی در عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتی‌متری را می‌توان به وجود پوشش گیاهی چند ساله در سایت مرجع مورد مطالعه نسبت داد.

در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری، بالاترین ضریب تغییرات متعلق به آهک برابر با ۳۰/۳۲ درصد با میانگین ۱۱/۰۳ درصد و حداقل ۲/۵ و حداکثر ۱۸ درصد است. آهک بیش‌تر در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری به علت ماده مادری آهکی در منطقه و شست‌شو، انتقال و رسوب آن از سطح خاک به عمق دوم می‌باشد.

ضریب تغییرات سزیم-۱۳۷ در عمق ۰-۱۵ سانتی-متری برابر با ۱۵/۰۵ درصد و در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری برابر با ۱۴/۰۵ درصد است که فرض توزیع یکنواخت و

1- Sutherland
2- Owens and Walling
3- Pennock

جدول (۱) خلاصه‌ای از وضعیت آماری متغیرهای مورد مطالعه در عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری
Table (1) Summary of descriptive statistics of studied variables in 0-15 cm depth

KS	کشیدگی Kurtosis	چولگی Skewness	ضریب تغییرات Coefficient of variance (%)	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min	متغیر Variable
0.22	-0.16	0.37	15.05	67.27	446.91	621.00	317.25	¹³⁷ Cs (Bq m ⁻²)
0.82	-0.18	0.16	26.54	0.02	0.09	0.16	0.04	TN (%)
0.92	0.29	0.60	19.70	0.39	1.98	3.19	1.41	OM (%)
0.09	1.23	0.79	27.82	0.03	0.11	0.21	0.06	OM/Clay
0.44	1.03	0.50	6.32	1.41	22.32	26.00	19.01	CEC (Cmol ⁺ kg ⁻¹)
0.66	4.03	1.32	13.88	0.17	1.23	1.91	0.95	CEC/Clay (Cmol ⁺ kg ⁻¹ /kg 100kg ⁻¹)
0.18	2.52	1.33	11.99	0.02	0.17	0.24	0.14	EC (dS m ⁻¹)
0.00	14.87	-2.80	1.37	0.11	7.74	7.94	7.19	pH
0.67	0.09	0.42	25.64	2.63	10.27	17.00	6.00	CCE (%)
0.36	0.58	0.20	15.34	2.83	18.46	25.60	11.20	Clay (%)
0.93	0.75	-0.38	9.90	3.15	31.86	38.28	22.54	Silt (%)
0.95	0.54	-0.09	8.37	4.16	49.68	60.58	40.54	Sand (%)
0.09	0.38	-0.07	26.63	4.67	17.53	30.00	7.69	Gravel (%)
0.02	4.59	1.82	7.35	0.10	1.40	1.80	1.27	BD (g cm ⁻³)
0.92	-0.52	0.00	12.70	26.70	210.22	262.95	158.48	χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
0.91	-0.47	-0.04	12.84	26.66	207.59	259.18	151.60	χ_{hf} (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
0.54	-0.26	0.21	22.35	0.27	1.22	1.78	0.65	χ_{fd} (%)

¹³⁷Cs: سزیم-۱۳۷، TN: نیتروژن کل، OM: ماده آلی، OM/Clay: نسبت ماده آلی به کل رس، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی خاک،

CEC/Clay: شاخص فعالیت رس، EC: هدایت الکتریکی خاک، CCE: کربنات کلسیم معادل، BD: چگالی ظاهری، χ_{lf} : پذیرفتاری مغناطیسی

در فرکانس پایین، χ_{hf} : پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا، χ_{fd} : پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، KS: شاخص کولموگروف اسمیرنوف

¹³⁷Cs: Cesium-137, TN: Total Nitrogen, OM: Organic Matter, OM/Clay: The ratio of Organic Matter to total Clay, CEC: Cation Exchange Capacity, CEC/Clay: Clay activity index, EC: Electrical Conductivity, CCE: Calcium Carbonates Equivalent, BD: Bulk Density, χ_{lf} : Low Frequency Magnetic Susceptibility, χ_{hf} : High Frequency Magnetic Susceptibility, χ_{fd} : Dependent Frequency Magnetic Susceptibility, KS: Kolmogorov-Smirnov

جدول (۲) خلاصه‌ای از وضعیت آماری متغیرهای مورد مطالعه در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری

Table (2) Summary of descriptive statistics of studied variables in 15-30 cm depth

KS	کشیدگی Kurtosis	چولگی Skewness	ضریب تغییرات Coefficient of variance (%)	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min	متغیر Variable
0.99	-0.02	0.10	14.05	5.23	37.23	50.02	26.88	¹³⁷ Cs (Bq m ⁻²)
0.87	-0.70	0.21	23.48	0.02	0.09	0.14	0.05	TN (%)
0.92	-0.08	0.38	20.35	0.37	1.82	2.72	1.21	OM (%)
0.88	-0.72	0.21	23.43	0.02	0.09	0.12	0.04	OM/Clay
0.87	0.50	-0.05	8.36	1.99	23.85	29.10	19.40	CEC (cmol ⁺ kg ⁻¹)
0.53	1.88	0.90	13.54	0.15	1.11	1.59	0.81	CEC/Clay (cmol ⁺ kg ⁻¹ /kg 100kg ⁻¹)
0.67	0.35	-0.55	10.41	0.02	0.16	0.19	0.12	EC (dS m ⁻¹)
0.49	0.18	0.70	0.92	0.07	7.75	7.93	7.63	pH
0.97	-0.28	-0.30	30.32	3.34	11.03	18.00	2.50	CCE (%)
0.83	0.21	-0.48	13.12	2.87	21.87	27.20	13.60	Clay (%)
0.29	0.30	-0.88	17.09	5.34	31.23	40.05	18.22	Silt (%)
0.01	2.07	1.20	12.34	5.79	49.90	64.18	35.84	Sand (%)
0.45	-0.64	0.49	31.70	5.80	18.32	30.00	10.00	Gravel (%)
0.76	-0.87	-0.26	5.84	0.08	1.33	1.46	1.18	BD (g cm ⁻³)
0.01	7.24	1.91	21.50	40.51	192.49	372.12	122.12	χ_{lf} (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
0.01	7.31	1.92	21.19	40.27	190.09	369.00	120.05	χ_{hf} (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
0.77	0.32	0.56	23.15	0.29	1.27	2.12	0.75	χ_{fd} (%)

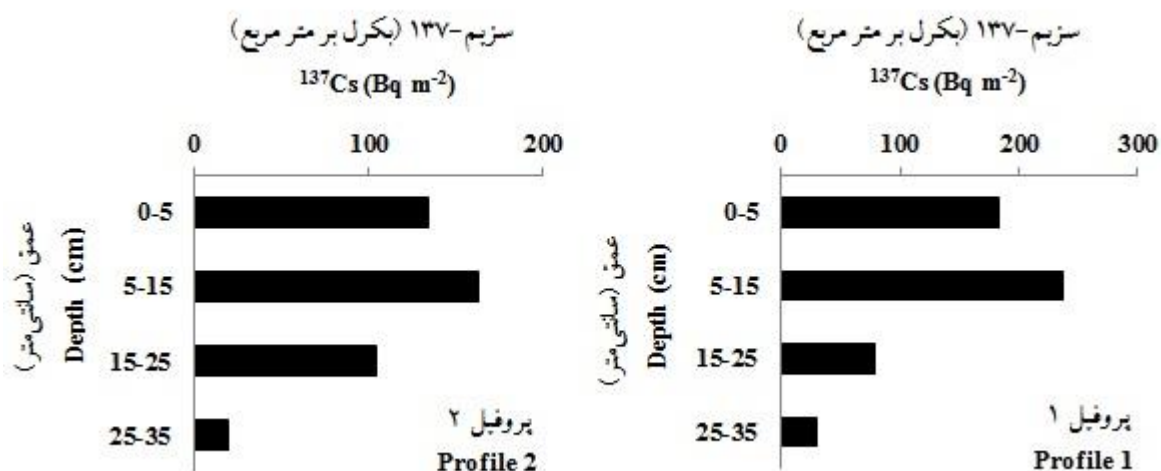
¹³⁷Cs: سزیم-۱۳۷، TN: نیتروژن کل، OM: ماده آلی، OM/Clay: نسبت ماده آلی به کل رس، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، CEC/Clay: شاخص فعالیت رس، EC: هدایت الکتریکی خاک، CCE: کربنات کلسیم معادل، BD: چگالی ظاهری، χ_{lf} : پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین، χ_{hf} : پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا، χ_{fd} : پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، KS: شاخص کولموگروف اسمیرنوف

¹³⁷Cs: Cesium-137, TN: Total Nitrogen, OM: Organic Matter, OM/Clay: The ratio of Organic Matter to total Clay, CEC: Cation Exchange Capacity, CEC/Clay: Clay activity index, EC: Electrical Conductivity, CCE: Calcium Carbonates Equivalent, BD: Bulk Density, χ_{lf} : Low Frequency Magnetic Susceptibility, χ_{hf} : High Frequency Magnetic Susceptibility, χ_{fd} : Dependent Frequency Magnetic Susceptibility, KS: Kolmogorov-Smirnov

۳۷/۲۳ بکرل بر متر مربع می‌باشد که نشان می‌دهد حداکثر فعالیت سزیم-۱۳۷ در سطح خاک است و مقدار آن با افزایش عمق کاهش می‌یابد. شکل ۳ توزیع نمایی سزیم-۱۳۷ با عمق در پروفیل‌های مرجع را نشان می‌دهد. روند نمایی کاهش فعالیت سزیم-۱۳۷ در هر دو پروفیل بیانگر پایداری و عدم به هم خوردگی خاک در سایت مرجع مورد مطالعه است.

ضریب تغییرات برای پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین، پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا و پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری بیش‌تر از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری می‌باشد و آن به ترتیب برابر با ۲۱/۵، ۲۱/۱۹ و ۲۳/۱۵ درصد است. میانگین سزیم-۱۳۷ در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری، ۴۴۶/۹۱ بکرل بر متر مربع و در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری،

بازشوستری زاده و ایوبی: تغییرپذیری محتوای سزیم-۱۳۷ و ارتباط...



شکل (۳) توزیع عمقی سزیم-۱۳۷ در پروفیل‌های مرجع
Figure (3) Depth distribution of ^{137}Cs in two reference profiles

یکنواخت است که این امر در خاک‌های دست نخورده رخ می‌دهد (۳۰).

فرآیندهای خاک‌سازی دائماً باعث متکامل تر شدن یک خاک و در نتیجه تجمع ترکیبات آهن‌دار خاک‌ساز بیش‌تر در خاک می‌شوند (۳۰). البته باید به این نکته اشاره کرد که در شرایط مختلف و به ویژه مواد مادری متفاوت، توزیع پذیرفتاری مغناطیسی با عمق یکسان نیست.

دی‌جانگ^۲ و همکاران (۸) در منطقه‌ای با ماده مادری غنی از کانی‌های فرومغناطیس به ارث رسیده در طول پروفیل نقاط دست نخورده، مشاهده کردند که پذیرفتاری مغناطیسی با افزایش عمق دارای افزایش نمایی است.

سادیکی^۳ و همکاران (۲۷) در منطقه‌ای با ماده مادری فقیر از نظر کانی‌های فرومغناطیس به ارث رسیده در طول پروفیل نقاط دست نخورده مشاهده کردند که پذیرفتاری مغناطیسی با افزایش عمق دارای کاهش نمایی است.

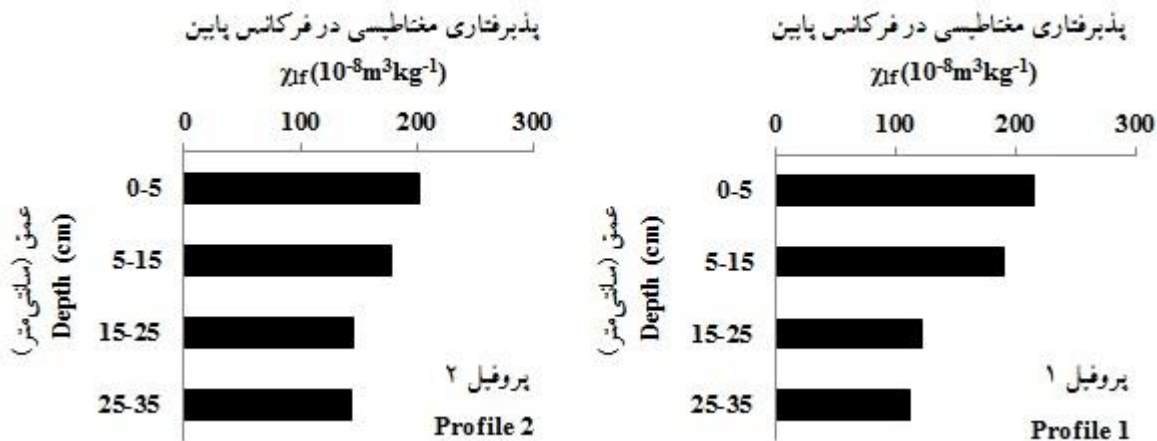
والبرینک^۱ و همکاران (۳۱) و نصرتی و همکاران (۱۸)، حداکثر فعالیت سزیم-۱۳۷ خاک‌های دست نخورده را در ۱۰ سانتی‌متری سطح خاک گزارش کردند. محققان دیگری مانند عباس‌زاده‌افشار و همکاران (۱)، ایوبی و همکاران (۲) و رحیمی آشجردی و همکاران (۲۴)، کاهش نمایی سزیم-۱۳۷ را با افزایش عمق برای پروفیل‌های مرجع به دست آوردند.

با توجه به مقادیر میانگین پذیرفتاری مغناطیسی در سایت مرجع مورد مطالعه، با افزایش عمق، پذیرفتاری مغناطیسی کاهش یافته است (شکل ۴) که آن به دلیل شست‌شو و هوادیدگی بیش‌تر خاک و در نتیجه، تجمع ترکیبات آهن‌دار در لایه‌های نزدیک به سطح خاک و متعاقباً تشکیل در جای ذرات ریز مغناطیسی (مگنتیت و مگهمیت) در اثر فرآیندهای متناوب اکسیداسیون و احیا و هم‌چنین فرآیندهای خاک‌سازی که در سطح خاک بیش‌ترین شدت را دارند، می‌باشد (۱۵ و ۲۸).

کاهش در پذیرفتاری مغناطیسی با افزایش عمق یک ویژگی ثابت برای خاک‌های با موقعیت طبیعی و تقریباً

2- De Jung *et al.*
3- Sadiki *et al.*

1- Wallbrink *et al.*



شکل (۴) توزیع عمقی پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین (χ_{lf}) در پروفیل‌های مرجع
 Figure (4) Depth distribution of Low Frequency Magnetic Susceptibility (χ_{lf}) in two reference profiles

و چگالی ظاهری ($r=0/46$) در سطح ۱ درصد با سزیم-۱۳۷ همبستگی مثبت و معنی‌دار نشان دادند. درصد رس ($r=-0/52, p<0/01$) با سزیم-۱۳۷ همبستگی منفی و معنی‌دار نشان داد.

همبستگی مثبت بین درصد ماده آلی با میزان سزیم-۱۳۷، نشان دهنده این مطلب است که سزیم سریعاً در تماس با مواد آلی جذب می‌شود. نسبت ماده آلی به کل رس، مقدار ماده آلی را مستقل از مقدار رس (بافت خاک) بیان می‌کند. در صورت افزایش این نسبت، ذرات رس بیش‌تر از ماده آلی اشباع شده و سزیم بیش‌تری جذب می‌شود. ماده آلی به دلیل وجود سطح ویژه زیاد، جاذب این رادیوایزوتوپ در مکان‌های غیر فرسایشی است (۲۴).

در منطقه مورد مطالعه با توجه به مواد مادری آهکی که پتانسیل مغناطیسی کمی دارند، پذیرفتاری مغناطیسی اندازه‌گیری شده به دلیل تشکیل پدوژنیک ذرات بسیار ریز مغناطیسی (کانی‌های فرومغناطیس با منشأ خاک‌ساز) است و دانه‌های بسیار ریز کانی‌های فرومغناطیس تحت فرآیندهای خاک‌سازی در سطح خاک تشکیل شده‌اند.

ارتباط بین سزیم-۱۳۷ با ویژگی‌های خاک

به منظور بررسی اثر ویژگی‌های خاک بر سزیم-۱۳۷، ضرایب همبستگی برخی ویژگی‌های خاک با سزیم تعیین شد (جدول ۳). ماده آلی ($r=0/21$) در سطح ۵ درصد، نسبت ماده آلی به کل رس ($r=0/45$)، شاخص فعالیت رس ($r=0/38$)، هدایت الکتریکی خاک ($r=0/27$)، درصد شن ($r=0/29$)

جدول (۳) ضریب همبستگی برخی ویژگی‌های خاک با سزیم-۱۳۷ در سایت مرجع مورد مطالعه ($n=96$)
 Table (3) Correlation coefficient of some soil properties with ^{137}Cs in the studied reference site ($n=96$)

$\text{Ln } \chi_{lf}$	$\text{Ln } \chi_{lf}$	Ln BD	Sand	Silt	Clay	pH	EC	CEC/Clay	OM/Clay	OM	TN	^{137}Cs
0.30**	0.30**	0.46**	0.29**	0.06	-0.52**	0.05	0.27**	0.38**	0.45**	0.21*	0.13	^{137}Cs

* معنی‌داری در سطح ۵ درصد و ** معنی‌داری در سطح ۱ درصد

*: significant at $p<0.05$, **: significant at $p<0.01$

و ۲۸). با توجه به این که مکان و چگونگی جذب سطحی شدن ذرات ریز مغناطیسی و سزیم-۱۳۷ بر روی ذرات خاک بسیار مشابه می‌باشد، بنابراین در سایت مرجع مورد مطالعه بین پذیرفتاری مغناطیسی و پرتوایی سزیم-۱۳۷ همبستگی مثبت وجود دارد.

رویال (۲۶) در مزرعه گیلبرت واقع در شمال غربی آلاباما آمریکا با ماده مادری آهکی، همبستگی مثبت بین پذیرفتاری مغناطیسی و محتوای سزیم-۱۳۷ در هر دو نوع پروفیل دست نخورده و تحت تأثیر هدر رفت و رسوب به دست آورد. ایوبی و همکاران (۲) نیز بین سزیم-۱۳۷ و پذیرفتاری مغناطیسی همبستگی مثبت ($r=0/58$, $p<0/01$) گزارش دادند.

شکل ۵ و ۶، نمودارهای رگرسیون خطی تک متغیره بین سزیم-۱۳۷ و چگالی ظاهری و شاخص فعالیت رس را، به ترتیب در دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی متری نشان می‌دهند.

رابطه رگرسیونی بین سزیم-۱۳۷ و ویژگی‌های خاک

سزیم-۱۳۷، به عنوان متغیر وابسته و ویژگی‌های خاک به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. معادله به دست آمده و نتایج اعتبارسنجی در جدول ۴ ارائه شده است.

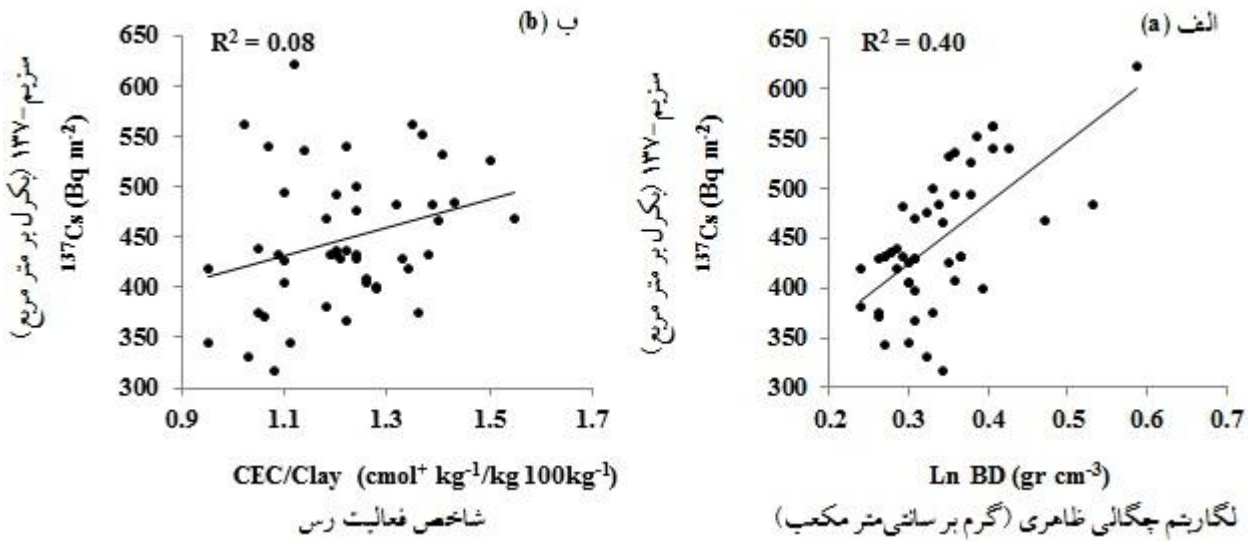
مقادیر پایین میانگین خطای تخمین (ME) و مجذور میانگین مربعات خطای تخمین (RMSE) مدل مبین دقت قابل قبول تخمین است.

معادله رگرسیونی به دست آمده بین سزیم-۱۳۷ و ویژگی‌های خاک، ۴۳ درصد از کل تغییرات را توجیه می‌کند. چگالی ظاهری بیش‌تر از سایر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی اندازه‌گیری شده، تغییرات سزیم-۱۳۷ را توجیه کرده است. ضریب منفی درصد رس در معادله نشان دهنده این مطلب است که تغییرات درصد رس و سزیم-۱۳۷ در یک جهت نبوده، روند یکسانی ندارند.

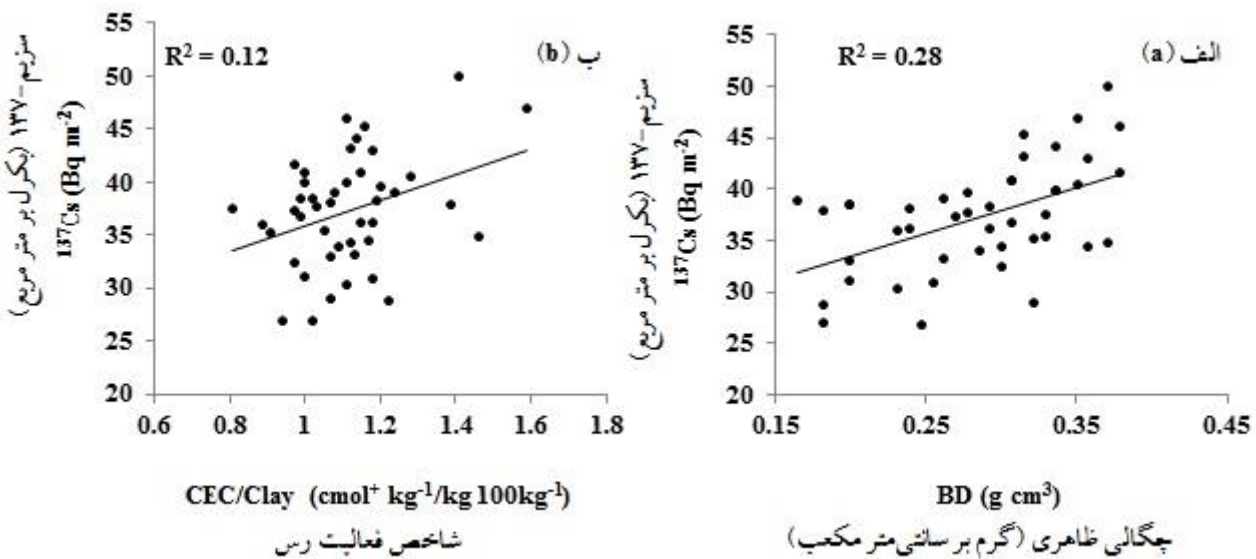
مابیت^۱ و همکاران (۱۲)، همبستگی مثبت ($p<0/05$) $r=0/31$ ، بین درصد شن کل و سزیم-۱۳۷ و همبستگی منفی ($r=-0/44$, $p<0/01$) را بین سیلت ریز و سزیم-۱۳۷ به دست آوردند. رحیمی آشجردی و همکاران (۲۴) در فریدون‌شهر اصفهان بین سزیم-۱۳۷ با ماده آلی، و درصد رس همبستگی مثبت و معنی‌دار گزارش کردند. ذرات رس، به دلیل اندازه بسیار کوچک خود، توانایی قرار گرفتن بین سایر ذرات درشت‌تر خاک و افزایش میزان تراکم و فشردگی خاک را دارند؛ بنابراین، در سایت مرجع مورد مطالعه بین چگالی ظاهری و پرتوایی سزیم-۱۳۷ همبستگی مثبت وجود دارد؛ به این معنا که چگالی ظاهری خاک با افزایش محتوای سزیم، افزایش پیدا می‌کند.

در روابط همبستگی ارائه شده در منابع، اثر مقدار رس بر سزیم-۱۳۷ افزایشی است؛ به این معنا که با افزایش درصد رس، سزیم-۱۳۷ افزایش می‌یابد؛ ولی در این پژوهش، همبستگی منفی و معنی‌دار بین درصد رس و سزیم-۱۳۷ را می‌توان به نوع رس در سایت مرجع مورد مطالعه نسبت داد. همبستگی مثبت بین نسبت ظرفیت تبادل کاتیونی به کل رس که نشان دهنده فعالیت رس و نوع کانی‌های رسی می‌باشد، این مطلب را تأیید می‌کند. کمیت CEC/Clay بیان می‌کند که هر چه رس خاک فعال‌تر باشد (کانی‌های سیلیکاته لایه‌ای ۲:۱ در خاک)، جذب سزیم-۱۳۷ بیش‌تر است. با توجه به محدودیت تجزیه‌های کانی‌شناسی، دو نمونه خاک مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل از دیفرکتوگرام‌های اشعه X نمونه‌ها، نشان داد کانی‌های ایلیت، کائولینیت و کلریت در سایت مرجع وجود دارند.

پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین و پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس بالا، هر دو دارای ضریب همبستگی برابر با ۰/۳۰ و معنی‌دار در سطح ۱ درصد با سزیم-۱۳۷ می‌باشند. محققان معتقدند ذرات ریز مغناطیسی همراه با ذرات رس به صورت پوشش روی رس انتقال می‌یابند (۲۳)



شکل (۵) روابط خطی بین سزیم-۱۳۷ و چگالی ظاهری (الف) و شاخص فعالیت رس (ب) در عمق ۰-۱۵ سانتی متری
 Figure (5) Linear relationships between ^{137}Cs and bulk density (a) and clay activity index (b) in 0-15 cm depth



شکل (۶) روابط خطی بین سزیم-۱۳۷ و چگالی ظاهری (الف) و شاخص فعالیت رس (ب) در عمق ۱۵-۳۰ سانتی متری
 Figure (6) Linear relationships between ^{137}Cs and bulk density (a) and clay activity index (b) in 15-30 cm depth

جدول (۴) مدل رگرسیونی سزیم-۱۳۷ و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سایت مرجع مورد مطالعه (n=۹۶)

Table (4) Regression model of ^{137}Cs and some soil physico-chemical properties in the studied reference site (n=96)

مدل رگرسیون	R ²	ME نسبی	RMSE نسبی
$^{137}\text{Cs} = -452.20 - 26.03 \text{ Clay} + 686.51 \text{ BD} + 1.42 \chi_{\text{if}}$	0.43	-0.04	0.64

مغناطیسی در فرکانس بالا با سزیم-۱۳۷ همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح ۱ درصد مشاهده شد. پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس، همبستگی معنی‌دار با پرتوژی سزیم-۱۳۷ نشان نداد. در آنالیز رگرسیون چند متغیره، چگالی ظاهری، درصد رس و پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین به عنوان متغیرهای مستقل وارد مدل رگرسیونی شدند و سایر متغیرها تأثیری در مدل به دست آمده نداشتند. چگالی ظاهری بیش‌ترین تغییرات سزیم-۱۳۷ را توجیه کرد.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود مطالعات مشابه در سایر سایت‌های مرجع در مراتع مورد مطالعه انجام شود و در خصوص عدم ارتباط مثبت و معنی‌دار بین رس و سزیم-۱۳۷، تحقیقات بیش‌تری صورت گیرد.

رحیمی آشجردی و همکاران (۲۴) در کاربری مرتع، بین سزیم-۱۳۷ و پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین همبستگی خطی بالا با ضریب تبیین ۰/۶۹ گزارش کردند. گاسپر و ناوس^۱ (۹) در شمال شرق اسپانیا، بیان کردند در بین ویژگی‌های خاک، ماده آلی قادر به توصیف ۸۰ درصد از تغییرات سزیم-۱۳۷ است.

نتیجه‌گیری

مطالعه اخیر در مورد بررسی تغییرپذیری سزیم-۱۳۷ در سایت مرجع منطقه فریدن استان اصفهان نشان داد که موجودی سزیم-۱۳۷ در سایت مرجع انتخاب شده در منطقه از خود تغییرپذیری نسبتاً کم نشان داد. از میان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، اسیدیته خاک، درصد سیلت، سنگریزه، نیتروژن و آهک با پرتوژی سزیم-۱۳۷ همبستگی معنی‌داری نشان ندادند. بیش‌ترین همبستگی مثبت را چگالی ظاهری با پرتوژی سزیم-۱۳۷ نشان داد که در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. بین درصد رس و سزیم همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح ۱ درصد مشاهده شد که آن می‌تواند به دلیل نوع رس (ایلیت، کائولینیت و کلریت) در سایت مرجع مورد مطالعه باشد. از میان ویژگی‌های مغناطیسی خاک، بین پذیرفتاری مغناطیسی در فرکانس پایین و پذیرفتاری

منابع

1. Abbaszadeh Afshar, F., Ayoubi, S., and Jalalian, A. 2010. Soil redistribution rate and its relationship with soil organic carbon and total nitrogen using ^{137}Cs technique in a cultivated complex hillslope in western Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101: 606-614.
2. Ayoubi, S., Ahmadi, M., Abdi, M.R., and Abbaszadeh Afshar, F. 2012. Relationships of ^{137}Cs inventory with magnetic measure of calcareous soils of hilly region in Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*, 112: 45-51.
3. Bremner, J. M., and Mulvaney, C. S. 1982. Total nitrogen. In: Pages, A. L. (Ed.), *Methodes of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties*, 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. pp: 595-624.
4. Chappell, A., Hancock, G., Raphael, A., Rossel, V., and Loughran, R. 2011. Spatial uncertainty of the ^{137}Cs reference inventory for Australian soil. *Journal of Geophysical Research*, 116: 1-15.
5. Correchel, V., Bacchi, O. O. S., Reichardt, K., and De Maria, I. C. 2005. Random and systematic spatial variability of ^{137}Cs inventories at reference sites in south-central Brazil. *Scientia Agricola*, 62(2): 173-178.
6. Day, R. 1965. Particle fraction and particle size analysis. In: Page, A. L. (Eds.), *Methods of Soil Analysis Part 1*. pp: 545-566.
7. Dearing, J. A. 1999. *Environmental Magnetic Susceptibility, using the Bartington MS2 System*, 2nd ed. Chi Publishing, England.
8. De Jong, E., Pennock, D. J., and Nestor, P. A. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan. *Catena*, 40(3): 291-305.
9. Gaspar, L., and Navas, A. 2013. Vertical and lateral distributions of ^{137}Cs in cultivated and uncultivated soils on Mediterranean hillslopes. *Geoderma*, 207-208: 131-143.
10. ISO 11929-1, 2000. *Determination of the Detection Limits and Decision Threshold for Ionising Radiation Measurements-Part 1. Fundamentals and Application to Country Measurements*. Int. Organ. Standard., Geneve, Switzerland.
11. Kelishadi, H., Mosaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., and Ayoubi, S. 2013. Evaluating and Developing Pedotransfer Functions to Predict Soil Saturated Hydraulic Conductivity at Landscape Scale in Central Zagros. *Soil Applied Research*, 1(2).
12. Mabit, L., Bernard, C., Makhlouf, M., and Laverdiere, M. R. 2008. Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from ^{137}Cs measurements and geostatistics. *Geoderma*, 145: 245-251.
13. Maher, B. A. 1986. Characterization of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42: 76-92.

14. Mokhtari Karchegani, P., Ayoubi, S., Lu, S. G., and Honarju, N. 2011. Use of magnetic measures to assess soil redistribution following deforestation in hilly region. *Journal of Applied Geophysics*, 75: 227-236.
15. Mullins, C. E. 1977. Magnetic Susceptibility of the soil and its significance in soil. *Science (a review)*. *Journal of Soil Science*, 28: 223-246.
16. Navas, A., Walling, D. E., Quine, T., Machín, J., Soto, J., Domenech, S., and López-Vicente, M. 2007. Variability in ^{137}Cs inventories and potential climatic and lithological controls in the central Ebro valley, Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 274(2): 331-339.
17. Nolin, M. C., Cao, Y. Z., Coote, D. R., and Wang, C. 1993. Short-range variability of fallout ^{137}Cs in an uneroded forest soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 73: 381-385.
18. Nosrati, k., Haddadchi, A., Zare, M. R., and Shirzadi, L. 2014. An evaluation of the role of hillslope components and land use in soil erosion using ^{137}Cs inventory and soil organic carbon stock. *Geoderma*, 243-244: 29-40.
19. Owens, P. N., and Walling, D. E. 1996. Spatial variability of Caesium-137 inventories at reference sites: an example from two contrasting sites in England and Zimbabwe. *Applied Radiation and Isotopes*, 47(7): 699-707.
20. Page, A. L., Miller, R. H., and Keeney, D. R. 1982. *Methodes of Soil Analysis Part2: Chemical and Biological Properties*, 2nd ed. Soil Science American Journal. Inc. Publisher Lected soil properties. *Soil Science Society American Journal*, 56: 557-561.
21. Pennock, D.J. 2000. Suitability of ^{137}Cs redistribution as an indicator of soil quality. *Acta Geologica Hispanica*, 35: 213-217.
22. Quijano, L., Gaspar, L., and Navas, A. 2015. Spatial patterns of SOC, SON, ^{137}Cs and soil properties as affected by redistribution processes in a Mediterranean cultivated field (Central Ebro Basin). *Soil Tillage Research*, 155: 318-328.
23. Rahimi, M. R., and Ayoubi, S. 2013. Impact of land use change and slope positions on some soil properties and magnetic susceptibility in Fereydunshahr district, Isfahan province. *Journal of Water and Soil*, 27(5): 882-895.
24. Rahimi, M. R., Ayoubi, S., and Abdi, M. R. 2012. Magnetic susceptibility and ^{137}Cs inventory variability as influenced by land use change and slope positions in a hilly region of west-central Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 89: 68-75.
25. Reddy, T. Y., and Reddi, G. H. S. 1992. *Principal Agronomy*, 1st ed. Kalyani Publishers, Calcutta, India. 190 p.
26. Royal, D. 2001. Use of mineral magnetic measurement to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. *Catena*, 46(1): 15-34.

27. Sadiki, A., Faleh, A., and Navas, A. 2007. Using magnetic susceptibility to assess soil degradation in the Eastern Rif, Morocco. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 2057-2069.
28. Singer, M. J., Verousb, K. L., Fine, P., and Tempas, J. 1996. A conceptual Model for the enhancement of Magnetic susceptibility in soils. *Quaternary International*, 34-36: 243-248.
29. Smith, K. A. 1991. *Soil Analysis*, 2nd ed, Marced Decker, New York. 659 p.
30. Soto, J., and Navas, A. 2008. A simple model of Cs-137 profile to estimate soil redistribution in cultivated stony soils. *Radiation Measurements*, 43: 1285-1293.
31. Sutherland, R. A. 1996. Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference samples: A literature survey. *Hydrological Processes*, 10: 43-53.
32. Wallbrink, P.J., Belyaev, V., Golosov, V. N., Sidorchuk, A. S., and Murray, A. S. 2002. Use of radionuclide field based and erosion modeling method for quantifying rates and amounts of soil erosion processes. CSIRO land and water Consultancy Report.
33. - Walling, D. E., and Quine, T. A. 1993. Use of Cesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for the application of Cesium-137 Thechnique. UK Overseas Development Administration Research Scheme R4579, Department of Geography, University of Exeter, United Kingdom.
34. Wang, Y., Zhang, J.H., and Zhang, Z.H. 2015. Influences of intensive tillage on water-stable aggregate distribution on a steep hillslope. *Soil Tillage Research*, 151: 82-92.