

مقایسه برتری‌ها و کاستی‌های رادیونوکلئیدهای سزیم-۱۳۷، سرب-۲۱۰ و برلیوم-۷

برای ارزیابی فرسایش خاک

فریده عباس‌زاده افشار^۱

استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران. f.abbaszadeh@ujiroft.ac.ir

دریافت: آبان ۱۳۹۹ و پذیرش: تیر ۱۴۰۰

چکیده

رادیونوکلئیدهای ریزشی (سزیم-۱۳۷، سرب-۲۱۰ و برلیوم-۷) به‌طور قابل توجهی برای ارزیابی و بررسی اطلاعات کمی فرسایش و نرخ توزیع مجدد خاک در زمین‌نماهای کشاورزی، در بازه‌های زمانی مختلف استفاده می‌شوند. این روش می‌تواند مکمل مناسبی برای فناوری‌های مرسوم اندازه‌گیری فرسایش و رسوب‌گذاری خاک باشد. هدف این مقاله بررسی برتری‌ها و کاستی‌ها هر یک از سه رادیونوکلئید ریزشی و شناسایی شکاف‌های کلیدی علمی مرتبط با استفاده از آن‌ها است. علاوه بر این، دستورالعمل انتخاب مناسب‌ترین رادیونوکلئید و روش مرتبط، برای بررسی در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف و بررسی مجموعه‌های خاص از مشکلات زیست‌محیطی ارائه شده است. همچنین موارد کلیدی برای پژوهش‌های آتی و کاربرد این رادیونوکلئیدها در بررسی‌های فرسایش خاک، مشخص شده است. این موارد شامل افزایش استفاده از آن‌ها در مقیاس حوضه آبخیز و تبدیل آن از یک ابزار تحقیقاتی به یک ابزار پشتیبانی مناسب در تصمیم‌گیری مدیریت اراضی است.

واژه‌های کلیدی: رادیونوکلئیدهای ریزشی، فرسایش و رسوب‌گذاری خاک، توزیع مجدد خاک، تخریب اراضی

^۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.

تحقیقاتی استفاده از سزیم-۱۳۷ نشان داده که روشی مؤثر برای تعیین میزان فرسایش خاک و رسوب‌گذاری خاک و مکملی ارزشمند برای فناوری‌های اندازه‌گیری مرسوم فرسایش و رسوب‌گذاری خاک است. رادیونوکلئیدهای سزیم-۱۳۷ (^{137}Cs)، سرب-۲۱۰ (^{210}Pb) و برلیوم-۷ (^7Be) به عنوان ردیاب‌های بررسی فرآیندهای فیزیکی فرسایش و رسوب‌گذاری با موفقیت مورد استفاده قرار گرفتند، به دلیل اینکه در زمان ریزش، به سرعت و به شدت توسط خاک سطحی یا ذرات ریز خاک جذب و تثبیت می‌شوند چون رادیونوکلئیدها به شدت جذب سایت‌های تبادل کاتیونی می‌شود، حرکت آن در خاک به دلیل فرآیندهای شیمیایی و زیستی خیلی محدود است؛ بنابراین توزیع مجدد آن‌ها در زمین‌ها از طریق فرآیندهای فیزیکی مانند فرسایش خاک، خاک‌ورزی یا شخم رخ می‌دهد و به این ترتیب ردیاب مناسبی در توزیع مجدد خاک و رسوبات هستند (شکل ۱) (ریتیچی و ریتیچی، ۲۰۰۷).

ارزیابی میزان فرسایش و رسوب‌گذاری معمولاً براساس مقایسه میزان فعالیت یا موجودی رادیونوکلئیدها در نقاط نمونه‌برداری شده با میزان فعالیت یا موجودی آن‌ها در مکان مرجع است. مکان مرجع موقعیتی پایدار در زمین‌ها است که فرسایش و رسوب‌گذاری در آن صورت نمی‌گیرد و موجودی رادیونوکلئیدها در مکان مرجع منعکس‌کننده کل ورودی آن‌ها در منطقه مورد مطالعه است. اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط این روش، اطلاعاتی را ارائه می‌دهد که تأثیر همه فرآیندهای منجر به توزیع مجدد خاک را نشان می‌دهد که اغلب با روش‌های مرسوم اندازه‌گیری فرسایش و رسوب‌گذاری خاک امکان‌پذیر نیست. نرخ فرسایش یا رسوب‌گذاری را می‌توان، با استفاده از مدل‌های تبدیل^۲ که به صورت رابطه ریاضی بین افزایش یا کاهش موجودی رادیونوکلئیدها نسبت به موجودی مکان مرجع تخمین زد (والینگ و هه، ۱۹۹۹a). میزان فرسایش و رسوب‌گذاری برآورد شده با

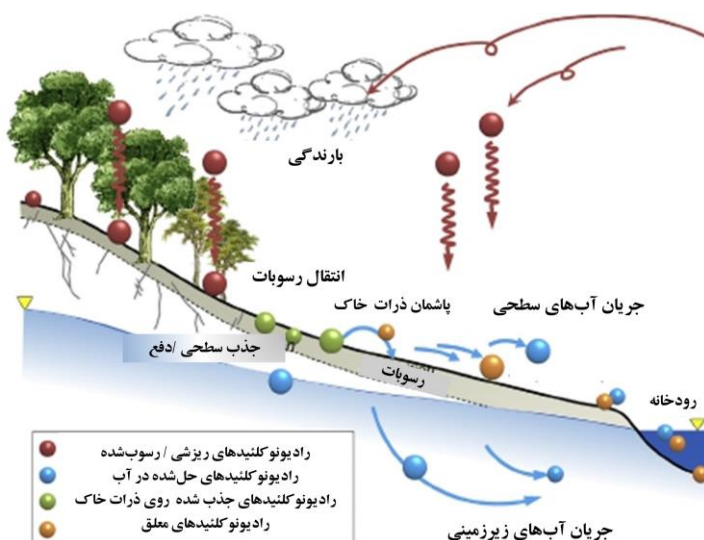
فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی، کشاورزی و تولید غذا در جهان است و تأثیرات مخربی بر تمام اکوسیستم‌های طبیعی و تحت مدیریت انسان دارد. این پدیده با کاهش حاصلخیزی، تنوع جانداران و ریز جانداران، باعث تخریب اکوسیستم‌های طبیعی نظیر مراتع و جنگل‌ها و اکوسیستم‌های کشاورزی می‌گردد. فرسایش خاک در طول تاریخ وجود داشته است؛ اما در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و دگرگونی فعالیت‌های انسانی شدت یافته است. به دست آوردن اطلاعات کمی معتبر از سرعت و وسعت فرسایش خاک یک نیاز ضروری است. به همین منظور تلاش‌های زیادی صورت گرفته تا روش‌های کمی و کیفی جهت برآورد مقدار فرسایش و تجمع رسوب ارائه گردد. این روش‌ها از روابط ساده تا مدل‌های پیچیده فرسایش و رسوب‌گذاری را شامل می‌شود که هر یک دارای برتری‌ها و کاستی‌هایی هستند. روش‌هایی که تاکنون در بررسی سرعت فرسایش به کار رفته‌اند، براساس نظرات مورگان (۲۰۰۵) در سه گروه قرار گرفته‌اند: ۱) کرت‌های اندازه‌گیری فرسایش (۲) مشاهده و اندازه‌گیری صحرائی عوارض ناشی از پدیده‌های فرسایش خاک (۳) مدل‌سازی. مدل‌های فرسایش به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند: الف) مدل‌هایی که بر اساس یک سری روابط تجربی بنا شده و سعی در ارتباط دادن برخی ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری، با سرعت هدر رفت خاک دارند. ب) مدل‌های فیزیکی که با تحلیل جزء به جزء عوامل مؤثر در پاشمان ذرات خاک و انتقال آن‌ها میزان هدررفت خاک را محاسبه می‌کنند.

یکی از مدل‌های فرسایش خاک، تکنیک رادیونوکلئیدهای ریزشی^۱، به‌ویژه سزیم-۱۳۷ که از سال ۱۹۷۰ با موفقیت برای تعیین کمیت فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری مورد استفاده قرار گرفتند (والینگ، ۲۰۰۲؛ زاپاتا، ۲۰۰۲). همان‌طور که انتشار بیش از ۴۰۰۰ مقاله

² -Conversion models¹ -Fallout radionuclides

(ولاسکو و همکاران، ۲۰۱۸؛ پورتو و همکاران، ۲۰۱۶؛ عباسی و میراختیاری، ۲۰۱۹؛ غریب‌رضا و همکاران، ۲۰۲۰؛ هنرجو و همکاران، ۱۳۸۷؛ خدادادی و همکاران، ۱۳۹۳؛ بابانژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ سو و همکاران، ۲۰۲۱).

استفاده از روش رادیونوکلئیدها در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم از جمله پلات‌های فرسایشی، پین‌های فرسایشی و مدل‌سازی فرسایش و رسوب‌گذاری، در طیف وسیعی از محیط‌ها مورد تأیید واقع شده است.



شکل ۱- نمودار شماتیک از توزیع مجدد رادیونوکلئیدها در یک حوضه آبخیز

با توجه به مطالب گفته شده، هدف از این مقاله، بررسی برتری‌ها و کاستی‌های هر یک از رادیونوکلئیدها ^{137}Cs ، ^{210}Pb و ^7Be برای ارزیابی توزیع مجدد خاک و رسوبات در زمین‌نما است. شناسایی شکاف علمی و نیازهای تحقیقاتی و ارائه راهنمایی برای انتخاب مناسب‌ترین رادیونوکلئید است. همچنین مقایسه کاربرد رادیونوکلئیدها با سایر روش‌های ارزیابی فرسایش خاک است.

^{137}Cs : پرکاربردترین و معتبرترین ردیاب متوسط مدت خاک

^{137}Cs به‌عنوان پرکاربردترین ردیاب‌های رادیونوکلئید ریزشی در خاک شناخته شده و در بسیاری از مناطق مختلف جهان تحت شرایط مختلف زیست‌محیطی به کار گرفته شده است (عباسی و میراختیاری، ۲۰۱۹؛ پوتیرسکایا و همکاران، ۲۰۲۰؛ بابانژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛

منابع خاک، سرمایه عظیم ملی هر کشوری هستند که این منابع باید به گونه‌ای مدیریت و حفاظت شوند که ضمن انجام خدمات خود و رفع مایحتاج فعلی بشر، پاسخگوی نیاز نسل‌های آینده نیز باشند. مدیریت غیرپایدار منابع خاک موجب تخریب و فرسایش، تولید رسوب در رودخانه‌ها و پرشدن مخازن سدها، افزایش ریزگردها، طوفان‌های شن، سیل‌های مخرب، خشکسالی‌ها، آلودگی خاک، آب و هوا و تغییرات اقلیمی کره زمین می‌گردد. خوشبختانه یکی از کاربردهای فناوری هسته‌ای، در علوم خاک است که در سالیان اخیر فعالیت‌های پژوهشی مختلفی جهت رفع مسائل و چالش‌های عرصه خاک انجام شده است. استفاده از ایزوتوپ‌های سزیم-۱۳۷، سرب-۲۱۰ و برلیوم-۷ در مطالعات فرسایش خاک و رسوب‌گذاری از جمله مهم‌ترین کاربردهای فناوری هسته‌ای در علوم خاک است.

نمونه‌هایی از توزیع عمقی ^{137}Cs در خاک‌های دست‌نخورده و کشت‌شده در شکل ۲ ارائه شده است. در خاک‌های دست‌نخورده، غلظت ^{137}Cs در زیر چند سانتی‌متر فوقانی به‌طور معمول از نظر نمایی با عمق کاهش می‌یابد (شکل ۲). غلظت تقریباً ثابت ^{137}Cs در حدود پنج سانتی‌متر بالایی نمایانگر تأثیر فرآیندهای بهم‌خوردگی بیولوژیکی^۲ و ورودی سزیم به سطح خاک در دهه ۱۹۷۰ است. همچنین در مناطق کشت‌شده، غلظت‌ها ممکن است در لایه شخم به‌دلیل مخلوط‌شدن ناشی از شیوه‌های کشت تقریباً یکنواخت باشد (والینگ، ۲۰۱۲).

برای تخمین کمی فرسایش و رسوب‌گذاری خاک با استفاده از این روش، مدل‌های تبدیل برای مناطق کشت‌شده و همچنین برای مناطق دست‌نخورده تهیه شده است. مدل نسبی^۳ و انواع مدل‌های بیلان وزنی^۴ (MBM I, II, III)، به‌طور کلی برای خاک‌های کشت‌شده استفاده می‌شوند، در حالی که مدل‌های توزیع پروفیل^۵ و مدل انتشار و مهاجرت^۶ معمولاً برای خاک‌های غیرقابل کشت و دست‌نخورده استفاده می‌شوند (والینگ و همکاران، ۲۰۰۲). هر مدل برتری و کاستی‌های خاص خود را دارد.

سو و همکاران، (۲۰۲۱). این رادیونوکلئید، مصنوعی یا ساخته‌شده توسط انسان (با نیمه عمر ۳۰/۲ سال) است و محصول آزمایش‌های تسلیحات هسته‌ای که از اواسط دهه ۱۹۵۰ تا اوایل دهه ۱۹۷۰ انجام شد و یا حوادث هسته‌ای (به عنوان مثال چرنوبیل) است. طی آزمایش‌های تسلیحات هسته‌ای، ^{137}Cs به استراتوسفر منتشر شده و بعد به‌صورت جهانی توزیع می‌شود. توزیع مکانی آن، به محل آزمایش هسته‌ای، الگوی گردش استراتوسفر و میزان بارندگی سالانه بستگی دارد و به‌طور کلی میزان ریزش در نیمکره شمالی به‌صورت قابل توجهی بیشتر از نیمکره جنوبی است (ماییت و همکاران، ۲۰۰۸). قابل ذکر است که موجودی ^{137}Cs در نیمکره جنوبی با استفاده از ردیاب‌ها و زمان شمارش مناسب، هنوز قابل اندازه‌گیری هستند. ^{137}Cs توسط حوادث هسته‌ای، از جمله حادثه چرنوبیل به درون تروپوسفر منتشر شده که منجر به توزیع ناهمگن‌تر این رادیونوکلئید در منطقه می‌شود. این ناهمگنی محلی و منطقه‌ای می‌تواند مشکلاتی را برای تفسیر مکانی موجودی ^{137}Cs در منطقه مورد مطالعه‌ای که در آن از نظر آماری حادثه چرنوبیل رخ داده است، به‌وجود آورد (ماییت و همکاران، ۲۰۰۸).

اندازه‌گیری فعالیت ^{137}Cs معمولاً توسط طیف‌سنجی گاما با استفاده از یک آشکارساز ژرمانیوم نوع P، با دامنه انرژی ۱۰ KeV - ۴۰ MeV انجام می‌شود و ^{137}Cs در ۶۶۲ KeV آشکار می‌شود. به‌طور کلی، برای آشکارسازهای گاما با راندمان نسبی ۳۰٪، زمان شمارش لازم بین ۲۰۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ ثانیه، بسته به فعالیت نمونه و هندسه شمارش متغیر است (زایاتا، ۲۰۰۲). فعالیت ^{137}Cs را می‌توان به‌راحتی در محل، در مزرعه و بدون نیاز به جمع‌آوری نمونه، با استفاده از طیف‌سنج گاما قابل‌حمل^۱ به‌دست آورد. زمان شمارش معمولاً به‌طور قابل توجهی کوتاه‌تر از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی است و خاک هم کمتر دست‌خورده می‌شود (هه و والینگ، ۲۰۰۰).

^۲- Bioturbation

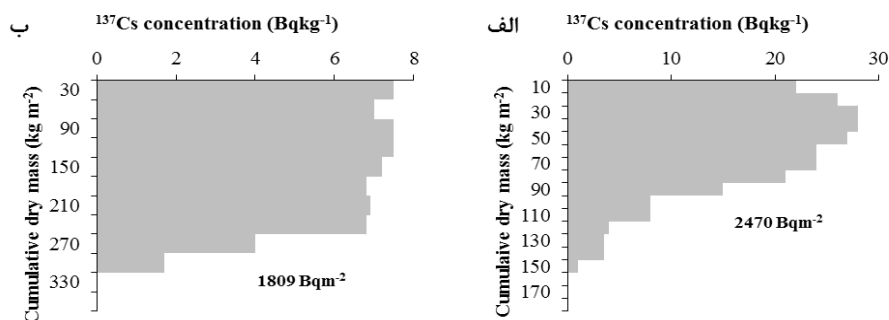
^۳- Proportional Model

^۴-Mass Balance Models

^۵-Profile Distribution

^۶-Diffusion and Migration

^۱-portable gamma spectrometer



شکل ۲- توزیع عمقی ^{137}Cs در یک خاک دست نخورده (الف) و خاک کشت شده (ب) در لندن (والینگ، ۲۰۱۲)

فرآیندهای رواناب و فرسایش طبیعی وجود ندارد (ولاسکو و همکاران، ۲۰۱۸).

کاستی‌های اصلی تکنیک ^{137}Cs را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱) در برخی مناطق، به‌خصوص در نیمکره جنوبی، موجودی ^{137}Cs کم است و برای به‌دست آوردن یک دقت قابل قبول اندازه‌گیری، زمان بیشتری برای آنالیز گاما نیاز دارد. ۲) حوادثی مانند چرنوبیل، ورودی‌های اضافی از ^{137}Cs را در برخی مناطق فراهم کرد. این ورودی‌ها باید هنگام اندازه‌گیری ^{137}Cs برای برآورد نرخ توزیع مجدد خاک، در نظر گرفته شوند. ۳) این روش در درجه اول برای تخمین متوسط مدت فرسایش خاک (۵۰ سال) مناسب است و به‌راحتی نمی‌توان اطلاعات لازم برای بررسی نرخ فرسایش دوره‌های کوتاه‌مدت از جمله تغییر در اثر استفاده از زمین و شیوه مدیریتی مختلف را فراهم کرد. ۴) این روش معمولاً شامل مقایسه موجودی نقاط اندازه‌گیری شده با موجودی مکان مرجع است. با توجه به اهمیت این موضوع موجودی مرجع باید به‌طور دقیق تعیین شود. همچنین مکان مرجع مورد استفاده باید نماینده‌ای از موجودی منطقه مورد مطالعه باشد (والینگ، ۲۰۰۲؛ مابیت و همکاران، ۲۰۰۸؛ علیزاده و علیپور، ۱۳۹۰).

روش ^{137}Cs به‌طور متوسط تخمین‌هایی از توزیع مجدد خاک طی چند دهه را فراهم می‌کند؛ بنابراین برای تخمین دوره‌های متوسط‌مدت، میانگین فرسایش و میزان رسوب‌گذاری سالانه خاک مفید و مناسب است

تکنیک ^{137}Cs دارای چندین برتری عمده نسبت به روش‌های سنتی و مرسوم برای بررسی میزان فرسایش و رسوب‌گذاری خاک است. برتری عمده آن را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

۱) با استفاده از این روش میزان فرسایش گذشته را می‌توان از نمونه‌های جمع‌آوری شده در زمان فعلی برآورد کرد. ۲) تخمینی از نرخ متوسط مدت توزیع مجدد خاک (۵۰ سال) را ارائه می‌دهد. ۳) اطلاعاتی در مورد فرسایش و رسوب‌گذاری را در اختیار ما قرار می‌دهد و بنابراین مقدار کمی فرسایش خالص و رسوب‌گذاری با این روش هم قابل برآورد است. ۴) ارزیابی توزیع مجدد خاک با استفاده از ^{137}Cs ، کلیه فرآیندهای مربوط به انتقال ذرات خاک (فرسایش آبی، فرسایش بادی و توزیع در اثر خاک‌ورزی) را در برمی‌گیرد. ۵) این تکنیک امکان تعیین کمیت فرسایش و رسوب‌گذاری خاک مرتبط با فرسایش ورقه‌ای را فراهم می‌کند که ارزیابی آن با استفاده از سایر روش‌های مرسوم در مقیاس مزرعه، معمولاً به دلیل کم بودن عمق برداشت و انباشت خاک، دشوار است. ۶) نمونه‌برداری نسبتاً ساده و مقرون‌به‌صرفه است و بسته به تعداد نقاط نمونه‌برداری و مساحت منطقه مورد مطالعه، در مدت زمان کوتاه قابل انجام است. ۷) هنگام نمونه‌برداری حداقل تخریب و دست‌خوردگی در منطقه مورد مطالعه را دارد و در عملیات کشت و کار اختلالی ایجاد نمی‌کند، علاوه بر این، هیچ گونه اختلال در

(والینگ و هه، ۱۹۹۹). ^{137}Cs در تحقیقات فرسایش خاک در طیف وسیعی از مقیاس‌های مختلف، از جمله کرت‌های آزمایشی، مزارع چندهکتاری تا حوضه‌های آبخیز کوچک چند کیلومترمربعی استفاده شده است. ماییت و همکاران (۲۰۰۷) از ترکیب روش ^{137}Cs و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی فرسایش و رسوب‌گذاری خاک استفاده کردند و ترکیب این روش را برای بررسی هدررفت خاک را مناسب بیان کردند. نصرتی و همکاران (۱۳۹۶) از روش ^{137}Cs برای تخمین نرخ فرسایش و رسوب و تأثیر تغییر کاربری (کشاورزی، مرتع و جنگل) در حوضه آبخیز زیارت استان گلستان استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاربری کشاورزی بیشترین میزان فرسایش و رسوب را در منطقه مورد مطالعه داشته است. آن‌ها اذعان داشتند که آگاهی از توزیع مجدد خاک ناشی از فرآیندهای فرسایشی مختلف، یکی از ابزارهای مدیریتی در مدیریت فرسایش و رسوب حوضه آبخیز محسوب می‌شود و روش ^{137}Cs توانایی مناسبی برای بررسی توزیع مجدد خاک در این منطقه داشته است. متین‌فر و همکاران (۱۳۹۱) بررسی توانایی روش ^{137}Cs در برآورد فرسایش و رسوب در اراضی کشاورزی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش اندازه‌گیری ^{137}Cs می‌تواند به‌عنوان یک روش سریع و با دقت مناسب برای برآورد فرسایش و رسوب به‌کار گرفته شود. نتایج این تحقیق در توافق با نتایج عباس‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) و ایوبی و همکاران (۲۰۱۲) رحیمی و همکاران (۲۰۱۳) بود. همچنین اسدی و همکاران (۱۳۹۰)، از روش ^{137}Cs برای برآورد فرسایش سطحی خاک استفاده کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که استفاده از روش ^{137}Cs به‌عنوان یک روش فیزیکی از یک سو نیاز به کار صحرایی کمی داشته و از سوی دیگر دست‌یابی به نتایج مورد نظر در کمترین زمان امکان‌پذیر است. غریب‌رضا و همکاران (۲۰۲۰) کاربرد تکنیک‌های رادیونوکلیدها را به‌عنوان روشی قابل‌اعتماد در اندازه‌گیری برخی از اثرات جانبی جنگل‌زدایی

به‌خصوص در رسوبات لسی توصیه کرده‌اند. همچنین مطالعه حاضر اطلاعات کلیدی را برای کاربران اراضی و تصمیم‌گیرندگان در مورد اجرای اقدامات حفاظتی استراتژیک و پایدار برای احیا اراضی تخریب‌شده فراهم می‌کند. هنرجو و همکاران (۱۳۸۷) پیشنهاد کردند تعداد نمونه‌های بیشتر و در جهت‌های مختلف شیب برداشته شود تا برآورد دقیق‌تری از میزان فرسایش خاک با استفاده از روش ^{137}Cs بدست آید.

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$: ردیاب بلند مدت توزیع مجدد خاک و رسوب‌گذاری در زمین‌نما

^{210}Pb یک رادیویزوتوپ طبیعی با منشأ زمین‌شناسی (با نیمه عمر ۲۲/۳ سال) است که شامل بخشی از سری واپاشی اورانیوم است. این پدیده از طریق واپاشی ^{226}Ra صورت می‌گیرد که در بیشتر خاک‌ها و سنگ‌ها یافت می‌شود و همچنین در این پدیده ^{222}Rn گازی با نیمه عمر ۳/۸ روز نیز تولید می‌شود. ^{210}Pb بیشتر به ^{210}Pb در خاک واپاشی می‌شود و ^{210}Pb تولیدشده با منشأ خودشان ^{226}Ra در تعادل هستند. با این حال، برخی از ^{222}Rn گازی به درون اتمسفر پخش می‌شود و به‌سرعت ^{210}Pb تبدیل می‌شود، این ^{210}Pb به‌عنوان منبع ریزشی ذخیره می‌شود و از آنجایی که در تعادل با منشأ اصلی خودش (^{226}Ra) نیست، معمولاً ^{210}Pb اضافی ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) نامیده می‌شود تا از ^{210}Pb که در تعادل با منشأ خودشان ^{226}Ra است در خاک متمایز شود. برخلاف ^{137}Cs ، احتمال ریزش $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ با منشأ طبیعی در طول زمان ثابت است (خدادادی و همکاران ۱۳۹۳b؛ پورتو و همکاران، ۲۰۱۴؛ مسبورگر و همکاران، ۲۰۱۸؛ زانگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ باسکاران و همکاران، ۲۰۲۰؛ سو و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به مطالب ذکر شده، هنگام استفاده از اندازه‌گیری‌های ^{210}Pb برای توزیع مجدد خاک، باید کل ^{210}Pb و ^{226}Ra تعیین شوند، همچنین $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ، برای محاسبه مقدار اضافی ^{210}Pb استفاده می‌شود. استفاده از طیف‌سنجی گاما، برای اندازه‌گیری

مشابه همان تعداد نمونه‌ها در مناطق فرسایش‌یافته باشد. این کار برای بهبود طرح‌های نمونه‌برداری و در نتیجه دقت برآورد فرسایش خاک حاصل از روش ^{137}Cs مفید خواهد بود. پورتو و همکاران (۲۰۱۴) مقایسه کارایی رادیونوکلیدهای ^{137}Cs و $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ با روش سنتی برای ارزیابی فرسایش شیاری-بین‌شیاری و فرسایش گالی را در ایتالیا انجام دادند. به دلیل نیمه عمر و منشأ متفاوت ^{137}Cs و $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ می‌توانند اطلاعاتی در مورد روند تخریب اراضی در بازه‌های زمانی مختلف ارائه دهند. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که اندازه‌گیری‌های ^{137}Cs و $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ را به عنوان یک مکمل بالقوه مهم برای اندازه‌گیری‌های سنتی در نظر گرفت.

علیزاده و علیپور (۱۳۹۰) از رادیونوکلیدهای ریزشی (^{137}Cs ، $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ، ^7Be) در جابه‌جایی ذرات خاک در لس‌های مراوه‌تپه استان گلستان استفاده کردند. نتایج ناشی از طیف‌سنجی در عرصه، حاکی از این است مقدار $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ هر چند با عدم قطعیت بالا، بسیار بالاست و در مناطقی که مقدار ^{137}Cs بسیار کم است، می‌توان از $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ به عنوان یک ردیاب مناسب در مطالعات فرسایش و رسوب خاک استفاده کرد. همچنین از رادیونوکلوئید ^7Be در موارد عدم وجود منطقه‌ی مرجع، جابه‌جایی خاک ناشی از تغییرات عملیات مختلف حفاظتی (انواع شخم، کاربری اراضی و رخدادهای ناگهانی) به‌راحتی توسط آشکارساز ژرمانیوم فوق‌خالص قابل حمل، می‌توان استفاده کرد. همچنین استفاده توأم رادیونوکلیدهای ریزشی در دو حالت در عرصه و آزمایشگاه، ابزار قدرتمند مدیریتی در جابه‌جایی ذرات خاک محسوب شده و در کوتاهترین زمان به نتایج مطلوب می‌توان رسید.

استفاده از اندازه‌گیری‌های $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ برای تعیین نرخ توزیع مجدد خاک در اراضی کشاورزی دارای همان برتری‌های کلی ^{137}Cs است. علاوه بر این برتری‌های بیشتری از جمله موارد زیر را شامل می‌شود:

^{210}Pb وقت‌گیر و مشکل است. پس از تیمارهای استاندارد و قبل از اندازه‌گیری ^{210}Pb ، نمونه‌های خاک باید در ظروف محکم (به عنوان مثال ظروف آلومینیومی) حداقل ۲۰ روز در آن نگهداری شوند تا از تعادل بین ^{226}Ra و ^{222}Rn اطمینان حاصل شود. فعالیت $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ در نمونه‌های خاک و رسوب با اندازه‌گیری هر دو ^{210}Pb و ^{226}Ra تعیین می‌شود. از آنجایی که ^{210}Pb در طیف ۴۶/۵ keV توسط یک آشکارساز کواکسیال ژرمانیوم نوع N با محدوده انرژی ۱۰ MeV - ۳ keV استفاده می‌شود. مقدار $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ با کم کردن ^{210}Pb در تعادل با ^{226}Ra از کل فعالیت ^{210}Pb تعیین می‌شود (زاپاتا، ۲۰۰۲). همچنین اگر نمونه‌های آنالیزشده چندین سال قبل جمع‌آوری شده باشد، در اثر فروپاشی رادیواکتیو، نیاز به تصحیح مقدار $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ است. به‌منظور تخمین نرخ توزیع مجدد خاک با روش $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ برای خاک‌های کشت‌شده، مدل توازن جرمی استفاده می‌شود (والینگ و هه، ۱۹۹۹b). همچنین مدل انتشار و مهاجرت استفاده‌شده برای ^{137}Cs در مناطق دست‌نخورده نیز با موفقیت برای اندازه‌گیری موجودی $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ در مناطق دست‌نخورده (به عنوان مثال مراتع) مورد استفاده قرار می‌گیرد (والینگ و همکاران، ۲۰۰۲).

خدادادی و همکاران (۱۳۹۳b) از دو رادیونوکلوئید ^{137}Cs و $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ برای تخمین میزان هدررفت خاک استفاده کردند. نتایج آن‌ها یک توافق کلی بین الگوهای توزیع مجدد خاک توسط این دو رادیونوکلوئید را در منطقه نشان داد. میزان بالای فرسایش تخمین‌زده شده با استفاده از $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ نسبت به ^{137}Cs بازتاب دوره‌ی زمانی بسیار طولانی‌تری است که توسط $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ برآورد شده است. زانگ و همکاران (۲۰۱۹) از روش زمین‌آمار برای بهبود نمونه‌برداری و ارزیابی فرسایش خاک توسط ^{137}Cs و $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ در مقیاس‌های کوچک استفاده کردند و به این نتیجه دست یافتند که برای اندازه‌گیری فرسایش به کمک تکنیک ^{137}Cs که فاصله‌ی حداقل ۱۰ متر بین نمونه‌ها مناسب است. همچنین پیشنهاد کردند که تعداد نمونه‌ها در مکان مرجع

بسیار بالا خاک را با فرونشست کم $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ کمتر منعکس کند (ماییت و همکاران، ۲۰۰۸؛ مسبورگر و همکاران، ۲۰۱۸؛ باسکاران و همکاران، ۲۰۲۰).

^7Be : یک ردیاب کوتاه‌مدت خاک

^7Be یک رادیونوکلید طبیعی با منشأ کیهانی است که در جو فوقانی با پاشش پرتوی کیهانی ازت و اکسیژن تولید می‌شود (بلاک و همکاران، ۱۹۹۹). این رادیونوکلید دارای نیمه عمر بسیار کمی (۵۳/۳ روز) نسبت به ^{137}Cs و ^{210}Pb است، در نتیجه پتانسیل بررسی فرآیندهای فرسایش خاک که در بازه‌های زمانی کوتاه به‌ویژه طوفان یا باران‌های شدید رخ می‌دهند، فراهم می‌کند. این به نوبه خود می‌تواند فرصتی برای ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی یا عملیات خاک‌ورزی در فرسایش خاک را فراهم کند. ^7Be به‌طور کلی توسط چند میلی‌متر بالایی خاک به سرعت تثبیت می‌شود و به ندرت در عمق بیشتر از حدود سه سانتی‌متر یافت می‌شود. نیمه عمر کوتاه آن به این معنی است که مدت زمان کافی برای انتقال رادیونوکلید به قسمت‌های عمیق‌تر خاک وجود ندارد؛ بنابراین اگر در قسمت‌های عمیق‌تر یافت شود، به‌طور کلی با حرکت رو به پایین ذرات خاک از طریق شکاف‌ها، فرآیندهای زیستی و یا فرآیندهای شخم و شیار مرتبط است (سپولودا و همکاران، ۲۰۰۸؛ ماییت و بلاک، ۲۰۱۹). فعالیت ^7Be را می‌توان در $477/6 \text{ keV}$ به آسانی با استفاده از یک آشکارساز ژرمانیوم نوع P تعیین کرد. به‌طور کلی برای تبدیل موجودی‌های ^7Be به نرخ توزیع مجدد خاک، از مدل توزیع پروفیل روش ^{137}Cs استفاده می‌شود (خدادادی و همکاران، ۱۳۹۳a؛ بلاک و همکاران، ۱۹۹۹).

نکات کلیدی استفاده از ^7Be برای ارزیابی توزیع مجدد خاک، شامل موارد زیر می‌شوند:

- استفاده از ^7Be برای بررسی نرخ توزیع مجدد خاک در کوتاه مدت شامل فرضیه‌های مهمی است، از جمله: (۱) ورودی ^7Be مرتبط با رویداد فرسایشی یکنواخت است و (۲) ^7Be موجود از قبل به‌طور یکنواخت

(۱) استفاده از اندازه‌گیری‌های $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ می‌تواند بازه زمانی مرتبط با اندازه‌گیری‌های ^{137}Cs را گسترش دهد و ارزیابی بلندمدت توزیع مجدد خاک (۱۰۰ سال) فراهم کند. (۲) روش ^{210}Pb را می‌توان در نیمکره جنوبی استفاده کرد، مکان‌هایی که موجودی ^{137}Cs برای اندازه‌گیری‌های دقیق خیلی کم هستند و همچنین در مناطقی که تحت تأثیر حادثه چرنوبیل قرار گرفتند و باعث شده ورودی‌های اضافی رادیوسزیم تفسیر اندازه‌گیری‌های این عنصر را پیچیده کند. (۳) ورودی ریزش ^{137}Cs ناشی از تسلیحات اتمی و موجودی ^{137}Cs به‌دلیل فروپاشی رادیواکتیو در حال کاهش است؛ بنابراین در آینده، استفاده از ^{137}Cs به‌ویژه در نیمکره جنوبی امکان‌پذیر نخواهد بود. از آنجا که ریزش $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ به‌طور پیوسته و متداوم است، استفاده از این رادیونوکلید با این مشکلات روبرو نیست (ماییت و همکاران، ۲۰۰۸؛ علیزاده و علیپور، ۱۳۹۰؛ سو و همکاران، ۲۰۲۱).

کاستی‌های اصلی روش ^{210}Pb شامل موارد زیر است:

(۱) ^{210}Pb در $46/5 \text{ keV}$ آشکار می‌شود که خیلی نزدیک به حد پایین دامنه انرژی یک آشکارساز استاندارد است. در نتیجه برای اندازه‌گیری ^{210}Pb ، یک ردیاب حساس‌تر با برد انرژی از 3 keV تا 10 MeV نیاز است. (۲) علاوه‌براین، مشکلات به‌دست آوردن اندازه‌گیری دقیق ^{210}Pb نیز مطرح می‌شود و اندازه‌گیری ^{210}Pb با استفاده از طیف‌سنجی گاما با انرژی کم کار ساده‌ای نیست و به کارشناس آموزش‌دیده و باتجربه نیاز دارد. (۳) ورود منابع اضافی ^{222}Rn به اتمسفر ممکن است مشکلاتی را ایجاد کند. ^{222}Rn و محصولات فروپاشی کوتاه‌مدت آن معمولاً در اتمسفر در مقادیر بسیار پایین‌تر از خاک موجود هستند. با این‌حال، افزایش فعالیت‌ها در مجاورت آتشفشان‌ها، چشمه‌های آب‌گرم و دیگر منابع گازی ناشی از مناطقی که دارای سنگ‌ها یا مواد معدنی حاوی مقادیر زیاد رادیوم، می‌تواند رخ دهد. (۴) در برخی از مناطق، مقدار $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ در خاک بسیار کم و حتی پایین‌تر از سطح ردیابی است و این محدودیت می‌تواند نرخ فرسایش

نمونه‌برداری باید با دقت برنامه‌ریزی شود تا اهداف مطالعه را منعکس کند (والینگ و همکاران، ۱۹۹۹؛ مابیت و همکاران، ۲۰۰۸؛ مابیت و بلاک، ۲۰۱۹).

^7Be از اواخر دهه ۱۹۹۰ برای تخمین فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری خاک، مربوط به رخدادهای رگباری ناگهانی و شدید، در مقیاس پلات چند مترمربع تا مزارع چند هکتاری استفاده شده است (ویلسون و همکاران، ۲۰۰۳؛ اسکولر و همکاران، ۲۰۰۶). والینگ و همکاران (۱۹۹۹) پتانسیل استفاده ^{137}Cs و ^7Be برای تخمین میان‌مدت و کوتاه مدت فرسایش خاک در اراضی کشاورزی بررسی کردند. نتایج به دست آمده از این تحقیق، پتانسیل استفاده از اندازه‌گیری ^{137}Cs و ^7Be را در تحقیقات فرسایش خاک تأیید می‌کند. همچنین بیان کردند یکی از کاربردهای بالقوه اطلاعات مربوط به نرخ توزیع مجدد خاک ارائه‌شده توسط ^7Be می‌تواند برای اعتبارسنجی و کالیبراسیون مدل‌های فرسایش خاک ناشی از رخدادهای ناگهانی و دوره‌های کوتاه‌مدت استفاده شود. خدادادی و همکاران (۱۳۹۳a) برای برآورد توزیع مجدد خاک در اراضی دیم استان کرمانشاه از رادیونوکلوئید ^7Be استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که مقدار زیاد فرسایش خالص در منطقه، حاکی از شرایط بحرانی منطقه مورد مطالعه و نیاز به انجام کارهای حفاظتی و مدیریتی ضروری است. همچنین نتایج این تحقیق پتانسیل استفاده از روش ^7Be برای تعیین مقدار توزیع مجدد خاک در دوره زمانی کوتاه‌مدت در منطقه نیمه‌خشک را تأیید نمود؛ اما در هر حال نیاز به بررسی بیشتر برای بررسی امکان اجرای روش در سایر نقاط با اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. ویلسون و همکاران (۲۰۰۳) برای ارزیابی کوتاه‌مدت فرسایش خاک از رادیونوکلوئید ^7Be استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ^7Be ابزار جدیدی برای ارزیابی کمی‌سازی فرسایش خاک ناشی از رواناب و رخدادهای ناگهانی است.

در سراسر منطقه مورد بررسی توزیع می‌شود (بلاک و همکاران، ۱۹۹۹؛ مابیت و همکاران، ۲۰۰۸a).

- از آنجا که ^7Be به راحتی توسط پوشش گیاهی سطحی و بخشی از آن با توجه به تراکم و ماهیت پوشش گیاهی توسط خاک جذب می‌شوند، استفاده از این رادیونوکلوئید برای بررسی نرخ توزیع مجدد خاک معمولاً به خاک‌های بدون پوشش محدود می‌شود (مابیت و همکاران، ۲۰۰۸a؛ خدادادی و همکاران، ۱۳۹۳a).

- روش‌های نمونه‌برداری و در دسترس بودن تجهیزات نمونه‌برداری مناسب می‌تواند یک محدودیت بالقوه مهم در استفاده از ^7Be در ارزیابی توزیع مجدد خاک باشد. همچنین نیاز به جمع‌آوری نمونه‌های خاک از اعماق کم دارد، زیرا ^7Be به لایه سطحی خاک محدود می‌شود. اگر نمونه‌ها در عمق مناسب جمع‌آوری نشود، موجودی کل ^7Be را شامل نمی‌شود. نمونه‌هایی با ضخامت حدود ۲ میلی‌متر اغلب مورد نیاز است. برای برآورده کردن این مورد واحد علوم خاک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی یک نمونه‌گیر اولیه ^7Be برای این منظور تهیه کرده است (مابیت و همکاران، ۲۰۰۸a).

- اگرچه نیمه عمر کوتاه ^7Be یک ویژگی مهم این رادیونوکلوئید است، اما می‌تواند یک محدودیت هم باشد؛ بنابراین توزیع مجدد خاک فقط در دوره‌های کوتاه قابل ثبت است. اگر دوره در نظر گرفته شده بیش از حد طولانی باشد، میزان فرسایش کل خاک در طول دوره ممکن است کمتر برآورد شود (سپولودا و همکاران، ۲۰۰۸؛ علیزاده و علیپور، ۱۳۹۰).

- اندازه‌گیری درجا روشی مؤثر برای به‌دست آوردن موجودی ^7Be از منطقه مورد مطالعه است که نیاز به روش‌های نمونه‌برداری وقت‌گیر و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ندارد. با این حال، مطالعات انجام شده توسط یکی از نویسندگان نشان می‌دهد که زمان شمارش باید حداقل دو برابر بیشتر از زمان مورد نیاز برای ^{137}Cs باشد و این مورد ممکن است یک محدودیت مهم باشد.

روندهای اخیر و آینده استفاده از رادیونوکلئیدها برای بررسی فرسایش و توزیع مجدد خاک در جدول (۱) مزایا و محدودیت‌های رادیونوکلئیدهای ^{137}Cs ، ^{210}Pb و ^7Be در تحقیقات فرسایش خاک به صورت خلاصه ارائه شده است. اگرچه در بسیاری از تحقیقات، یک رادیونوکلئید برای بررسی

انتخاب می‌شود، اما استفاده همزمان دو یا حتی سه رادیونوکلئید در بازه‌های زمانی مختلف، اطلاعات ارزشمندی در مورد تاریخچه فرسایش یک منطقه را ارائه می‌دهد. استفاده همزمان از رادیونوکلئیدهای ریزشی باید به عنوان پتانسیل قابل توجهی در آینده در نظر گرفته شود.

جدول ۱- مقایسه برتری‌ها و کاستی‌ها رادیونوکلئیدهای ^{137}Cs ، ^{210}Pb و ^7Be برای بررسی فرسایش و توزیع مجدد رسوب (ماییت و همکاران، ۲۰۰۸)

تاریخ‌نگاری رسوب	اندازه‌گیری درجا	اندازه‌گیری آزمایشگاهی	تجهیزات مورد نیاز	مساحت مورد مطالعه	نمونه‌برداری	ارزیابی فرسایش	مدت زمان	نیمه عمر	انتشار انرژی (keV)	منشأ رادیونوکلئید	رادیونوکلئید
ممکن	آسان	آسان	آشکارساز ژمانیوم	پلات تا حوضه آبخیز	ساده	متوسط مدت ^۱	۵۰ سال	۳۰/۲ سال	۶۶۲	مصنوعی	^{137}Cs
ممکن	محدود و غیرقابل اعتماد	خیلی سخت	آشکارساز ژمانیوم با دامنه گسترده انرژی	پلات تا حوضه آبخیز	ساده	بلند مدت	۱۰۰ سال	۲۲/۳ سال	۴۶/۵	طبیعی زمین‌شناسی	^{210}Pb
ممکن ^۲	حداقل دوبرابر زمان شمارش مورد نیاز توسط ^{137}Cs نیاز دارد ^۲	آسان	آشکارساز ژمانیوم	پلات تا مزرعه	به نمونه‌برداری مناسب افزایشی با عمق نیاز دارد	کوتاه مدت	≤۶ ماه	۵۳/۳ روز	۴۷۷/۶	طبیعی کیهانی	^7Be

۱. در برخی از کشورهای اروپایی حادثه راکتور چرنوبیل ورودی اصلی ^{137}Cs به داخل زمین‌نما را فراهم کرد. در این مناطق می‌توان فرسایش خاک و توزیع مجدد آن را از سال ۱۹۸۶ تعیین کرد. این بازه زمانی حدود ۲۰ سال است که به‌طور قابل توجهی کوتاه‌تر از آن است که توسط تسلیحات هسته‌ای ارائه شده است.
۲. براساس بررسی اندازه‌گیری درجا که توسط آژانس بین‌المللی انرژی هسته‌ای IAEA و CU در مارس و آگوست ۲۰۰۷ در حوزه آبخیز میتلیاخ (اتریش) انجام شده است.
۳. آنالیز ^7Be همچنین می‌تواند اطلاعات مربوط به فرآیندهای رسوب‌گذاری اخیر و فصلی را ارائه دهد.

فعالیت‌های رادیونوکلئیدهای ریزشی و شاخص‌های کیفیت خاک، (۶) استفاده از رادیونوکلئیدهای ریزشی به عنوان اثر انگشت در مطالعات ردیابی منبع رسوب، (۷) استفاده از درون‌یابی مکانی و ابزارهای زمین‌آماری برای کمک به برون‌یابی مکانی و نقشه‌برداری نتایج در مقیاس‌های مختلف، (۸) کاربرد استفاده از رادیونوکلئیدها و پذیرفتاری مغناطیسی در بررسی توزیع مجدد خاک، (۹) بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر توزیع مجدد خاک توسط رادیونوکلئیدها (عباس زاده و همکاران، ۲۰۱۰؛ ایوبی و همکاران، ۲۰۱۲؛ بازشوستری و همکاران، ۲۰۱۶؛ رحیمی و همکاران، ۲۰۱۳؛ ولاسکو و همکاران، ۲۰۱۸؛

چندین موضوع مهم دیگر که با کاربرد رادیونوکلئید ریزشی مرتبط است و در حال حاضر توسط جامعه علمی نیز مورد توجه قرار گرفته و شامل موارد زیر است:

- (۱) ایجاد درک بهتر از رفتار پس از ریزش رادیونوکلئید در خاک و محیط‌های مرتبط (به عنوان مثال قطع گیاهان، مکانیسم‌های جذب/دفع ترجیحی)، (۲) ارائه دستورالعمل‌های دقیق‌تر برای انتخاب مکان مرجع، (۳) کاربرد گسترده‌تر اندازه‌گیری‌های درجا برای ^7Be و ^{137}Cs ، (۴) بهبود مدل‌های تبدیل مورد استفاده برای تخمین میزان توزیع مجدد خاک، (۵) بررسی رابطه بین

منطقه، نتایج آن‌ها دقت بالای روش ^{137}Cs در اندازه‌گیری میزان فرسایش را تأیید کرد. همچنین نتایج ناشی از مقایسه روش ^{137}Cs با مدل RUSLE-3D دارای همبستگی پایینی بود که عدم تناسب مدل را برای نهشته‌های لسی نشان می‌دهد. یوسف کلافی (۱۳۷۳) فرسایش سطحی را در مراتع با استفاده روش سزیم ۱۳۷ اندازه‌گیری کرد و نتایج را با مدل USLE مقایسه نمود. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش ^{137}Cs نسبت به مدل معادله جهانی فرسایش به سهولت و دقت قابل قبولی می‌تواند فرسایش سطحی را روی یک سطح شیب‌دار محاسبه نماید. همچنین خواجهی و همکاران (۱۳۹۴) هدررفت خاک را با دو روش پلات‌های آزمایشی و روش ^{137}Cs مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت‌های تغییر فرسایش و هدررفت خاک بین دو روش، از چند برابر تا چند صد برابر، در کاربری‌های مختلف (جنگل، مرتع و دیم) متغیر است و تفاوت‌های بنیادی بین دو روش از دلایل اصلی بروز چنین اختلافاتی است. در این پژوهش کمی آمار و اطلاعات موجود از فرسایش و هدررفت خاک، عدم بررسی شرایط طبیعی مانند فرسایش‌های رودخانه‌ای، خندقی و لغزش در روش‌های ^{137}Cs و پلات‌های آزمایشی و عدم بررسی میزان تأثیر تغییر مقیاس‌های مکانی و زمانی در ارقام موجود را از مهم‌ترین محدودیت‌های مربوط به این پژوهش بیان کردند. کلهر (۱۳۷۷) به‌منظور برآورد فرسایش و رسوب، مقایسه دو روش ^{137}Cs و مدل USLE را در حوزه آبخیز ریمله (لرستان) انجام دادند و بین دو روش همبستگی بالایی در سطح پنج درصد مشاهده کردند. همچنین نتایج تحقیق فنگ و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که میزان فرسایش خاک بدست‌آمده از مدل سزیم ۱۳۷- در توافق با مدل USLE بود.

نتایج مطالعه آلونسو و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که نرخ فرسایش خالص با روش ^{137}Cs مشابه معادله USLE است. اگرچه مقاله ارائه‌شده نتیجه یک تحقیق آزمایشی در تعیین میزان فرسایش با استفاده از تکنیک

پورتو و همکاران، ۲۰۱۶؛ عباسی و میراختیاری، ۲۰۱۹؛ هولیکا و همکاران، ۲۰۲۰؛ دینگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ نصرتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ غریب رضا و همکاران، ۲۰۲۰؛ خدادادی و همکاران، ۱۳۹۳b؛ بابانژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ سو و همکاران، ۲۰۲۱).

یکی از اصلی‌ترین نیازها برای توسعه بیشتر کاربرد رادیونوکلئیدهای ریزشی در مطالعه خاک و توزیع مجدد رسوب در حوضه‌های آبخیز است که تا به امروز بیشتر مطالعات در مقیاس مزارع انجام شده است. گام مهم بعدی که تاکنون فقط توسط معدود محققان با استفاده از رادیونوکلئیدهای ریزشی صورت گرفته است، ارزیابی تأثیر فعالیت کشاورزی بر فرسایش و توزیع مجدد خاک از مقیاس مزرعه به حوضه آبخیز است. این امر به استراتژی‌ها و روش‌های مختلف نمونه‌برداری نیاز دارد. با این حال، این روش باید در طیف وسیعی از شرایط محیطی مختلف (آب و هوا، خاک، توپوگرافی و سیستم‌های کشت) بیشتر توسعه یابد و اعتبارسنجی شود (ماییت و همکاران، ۲۰۰۷)؛ بنابراین اگر تعداد رادیونوکلئیدهای ریزشی بیشتری و در مقیاس بزرگ‌تر مورد استفاده قرار بگیرند و مستقیماً در تصمیم‌گیری مشارکت داشته باشند، چالش مهم دیگر، ترویج انتقال کاربرد آن‌ها از روش‌های تحقیقی به ابزارهای پشتیبانی تصمیم‌گیری و استفاده از آن‌ها به‌عنوان شاخص کلیدی کیفیت خاک خواهد بود.

مقایسه تکنیک رادیونوکلئیدهای ریزشی با سایر روش‌های اندازه‌گیری فرسایش خاک

داده‌های مورد نیاز در روش رادیونوکلئیدهای ریزشی در مقایسه با روش‌های دیگر، با سهولت بیشتری قابل حصول می‌باشند؛ که این برتری در پژوهش سیدعلیپور و همکاران (۱۳۹۳) کاملاً مشهود است. در این پژوهش از دو مدل ^{137}Cs و RUSLE-3D برای اندازه‌گیری فرسایش خاک در نهشته‌های لسی شمال شرق ایران استفاده شد. با توجه به نبود داده‌های مشاهداتی در

کردند که روش ^{137}Cs اطلاعات ارزشمندی را در مورد هدررفت خاک فراهم کرده است، اما باید در جمع‌آوری نمونه‌های مرجع و استفاده از مدل تبدیل احتیاط شود.

نتیجه‌گیری

استفاده روزافزون رادیونوکلئیدهای ریزشی برای بررسی فرسایش و توزیع مجدد خاک در طیف وسیعی از اراضی کشاورزی قابلیت و پتانسیل این روش را تأیید می‌کند. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات انجام شده تا به امروز پایه‌ای برای شناسایی برتری‌ها و کاستی‌های احتمالی مرتبط با رادیونوکلئیدهای ریزشی را فراهم کرده است. اگرچه مطالعات کاربرد ^{137}Cs و تا حدودی $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ بیشتر صورت گرفته، اما هنوز نیاز به کار بیشتر در ارتباط با استفاده ^7Be ، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه و در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان وجود دارد. ^7Be پتانسیل خوبی در ارزیابی فرسایش و توزیع مجدد خاک در ارتباط با رویدادهای ناگهانی یا دوره‌های کوتاه‌مدت با بارندگی شدید، اثرات تغییر کاربری اراضی و اقدامات خاص برای حفاظت خاک را ارائه می‌دهد. با این حال، اندازه‌گیری رادیونوکلئیدهای ریزشی توسط طیف‌سنجی گاما با آشکارساز ژرمانیوم، به‌ویژه در مورد $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ، به پرسنل ماهر و سیستم‌های تضمین کیفیت تحلیلی مناسب، از جمله روش‌های عملیاتی استاندارد نیاز دارد. انتخاب و کاربرد رادیونوکلئیدهای ریزشی خاص برای بررسی فرسایش و توزیع مجدد خاک باید منعکس‌کننده اهداف کاربر، برتری‌ها و کاستی‌های هر روش و در دسترس بودن منابع انسانی و آزمایشگاهی باشد. نیاز به افزایش استفاده از رادیونوکلئیدهای ریزشی از مقیاس مزرعه به حوضه آبخیز، استفاده از ابزارهای اضافی (به عنوان مثال GIS، سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی (GPS) و زمین‌آمار) را برای کمک به تفسیر پیچیدگی مکانی زمین‌نما ضروری می‌کند. همچنین بیشتر به ترکیب رادیونوکلئیدهای ریزشی با روش‌های مرسوم توجه شود زیرا روش رادیونوکلئیدهای ریزشی پتانسیل قابل توجهی دارند که هنوز به‌طور کامل مورد بهره‌برداری

^{137}Cs است، اما اعتقاد بر این است که کار میدانی بیشتر و بهبود روش‌های آزمایشگاهی می‌تواند این روش را به یک ابزار قدرتمند مدیریت اراضی در مناطق بزرگ‌تر تبدیل کند. ایوانز و همکاران (۲۰۱۷) روش مرسوم اندازه‌گیری فرسایش خاک و تکنیک ^{137}Cs را در اراضی کشاورزی و مرتعی در انگلیس را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان فرسایش با استفاده از تکنیک ^{137}Cs نسبت به روش مرسوم بیشتر برآورد شده است. همچنین برآورد فرسایش خاک مبتنی بر روش تکنیک ^{137}Cs در این منطقه تنها میزان فرسایش آبی را منعکس نمی‌کند، اما در عوض، مجموعه‌ای از فرآیندهای انتقالی مختلف، از جمله: انتقال ناشی از خاک‌ورزی، از دست دادن خاک مرتبط با برداشت محصول، رواناب‌های حاوی ذرات خاک و فرسایش بادی شامل می‌شود. مقایسه‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که مدل‌های تبدیل باید با دقت بیشتری براساس ارزیابی دقیق مبتنی بر مشاهدات صحرائی و جمع‌آوری داده‌ها برای فرآیندهایی مانند فرسایش ناشی از خاک‌ورزی و برداشت محصول کالیبره شوند. در پژوهش مارتینز و همکاران (۲۰۰۹) مدل RUSLE به‌طور قابل توجهی نرخ فرسایش خاک را در این مطالعه بیش از حد تخمین زده بود و نرخ فرسایش به‌دست آمده از دو مدل SIBERIA و ^{137}Cs مشابه هم بودند. همچنین نتایج این مطالعه محدودیت‌های مربوط به استفاده از مدل‌های تبدیل نظری ^{137}Cs را در محیط‌هایی که برای آن‌ها مناسب نیست نشان داد.

لی و همکاران (۲۰۲۱) از دو روش ^{137}Cs و پلات‌های فرسایشی برای تخمین میزان هدررفت خاک در چین استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان هدررفت خاک خاک‌های زیر کشت حاصل از هر دو روش به‌طور قابل توجهی بالاتر از خاک‌های بدون کشت بود. اختلافاتی بین میزان هدررفت خاک حاصل از ^{137}Cs و پلات‌های فرسایشی وجود دارد که به دلیل فرآیندهای مختلف فرسایش و مقیاس‌های مکانی-زمانی که این دو روش بر روی آن‌ها تمرکز کرده‌اند است. همچنین بیان

رسوبگذاری خاک است. همچنین با بررسی میزان هدررفت خاک با استفاده از این فناوری امکان مدیریت مناسب و بهینه از اراضی و حفظ منابع خاک و آب برای آیندگان فراهم می‌شود.

قرار نگرفته است. با توجه به میزان زیاد فرسایش خاک در کشور ایران، به دست آوردن اطلاعات کمی معتبر از سرعت و وسعت فرسایش خاک یک امر ضروری است. فناوری رادیونوکلئیدهای ریزشی روش صلح‌آمیز هسته‌ای مناسب، سریع و دقیق برای ارزیابی میزان فرسایش و

فهرست منابع

۱. اسدی، ت؛ شاهوئی، س.ص؛ اسدی، م و شهسوار، ا.م. ۱۳۹۰. کاربرد روش سزیم-۱۳۷ به منظور برآورد فرسایش و رسوب در خاک‌های حوزه آبخیز طاسران کبودرآهنگ. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز. جلد ۳، شماره ۲. صفحه ۹۴-۱۰۱.
۲. بابانژاد، ن؛ کیانی، ف؛ خرمالی، ف؛ ایزدپناه، ع و اصغریزاده؛ ف. ۱۳۹۷. امکان‌سنجی استفاده از رادیونوکلئید سزیم-۱۳۷ در تخمین فرسایش خاک‌های حوزه آبخیز شصت کلا استان گلستان. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. جلد هشتم، شماره دوم. صفحه ۱۴۷-۱۳۳.
۳. خدادادی، م؛ گرجی، م؛ قنادی مراغه، م؛ بهرامی سامانی، ع؛ میرسید حسینی، ح؛ زاهدی امیری، ق و مفتاحی، م. ۱۳۹۳a. استفاده از رادیونوکلئید بریلیم-۷ در برآورد توزیع مجدد خاک در زمین‌های دیم استان کرمانشاه. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. جلد چهارم، شماره چهارم. صفحه ۱۴۸-۱۲۷.
۴. خدادادی، م؛ گرجی، م؛ قنادی مراغه، م؛ بهرامی سامانی، ع؛ میرسید حسینی، ح؛ مفتاحی، م و زاهدی امیری، ق. ۱۳۹۳b. ارزیابی اولیه‌ی امکان استفاده از رادیونوکلئید سرب-۲۱۰ اضافی در برآورد توزیع مجدد خاک در اراضی دیم منطقه‌ی کوهین. مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای. جلد ۷۰. صفحه ۶۳-۵۳.
۵. خواجوی، ا؛ عربخدری، م؛ مهدیان، م.ح؛ شادفر، ص. ۱۳۹۴. بررسی مقادیر فرسایش و تلفات خاک در سطح کشور با استفاده از ارقام اندازه‌گیری‌شده روش سزیم ۱۳۷ و پلات‌های آزمایشی. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز جلد ۶، شماره ۱۱. صفحه ۱۵۱-۱۳۷.
۶. سیدعلیپور، ح؛ فیض نیا، س؛ احمدی، ح؛ زارع، م.ر؛ حسینعلی‌زاده، م. ۱۳۹۳. مقایسه فرسایش خاک به روش سزیم ۱۳۷ و مدل RUSLE-3D در نهشته‌های لسی شمال شرق ایران (مطالعه موردی: حوزه آبخیز آقامام). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۵. صفحه ۴۸-۲۸.
۷. عزیززاده، ح و علیپور، س.ح. ۱۳۹۰. کاربرد رادیونوکلئیدهای ریزشی (^{137}Cs ، ^{210}Pb ، ^7Be) در جابه‌جایی ذرات خاک در لس‌های مراوه‌تپه استان گلستان. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک. جلد دوم، شماره هفتم. صفحه ۱۰۱-۸۳.
۸. کلهر، م. ۱۳۷۷. مقایسه دو روش سزیم ۱۳۷- و مدل جهانی تلفات خاک (USLE) به منظور برآورد فرسایش و رسوب در حوزه آبخیز ریمله (لرستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی اصفهان.
۹. نصرتی ک، جلالی س، زارع م. ر. و شیرزادی ل. ۱۳۹۶. برآورد فرسایش و رسوب در حوزه آبخیز زیارت‌گران با استفاده از سزیم ۱۳۷. محیط‌زیست و مهندسی آب، جلد ۳، شماره ۲، صفحات: ۱۱۸-۱۰۹.

۱۰. هنرجو، ن؛ علی محمدی، ع؛ چرخابی، ا.ح؛ محمودی، ش؛ جلالیان، ا. ۱۳۸۷. مطالعه تاثیرات واحدهای ژئومورفولوژی در میزان فرسایش و رسوب به کمک سزیم رادیواکتیو در یک لنداسکیپ حوضه آبخیز گرگک. مجله علمی کشاورزی، جلد ۳۱، شماره ۲، صفحه ۹۹-۱۰۹.
۱۱. یوسف کلانی، س. ۱۳۷۳. استفاده از سزیم-۱۳۷ در اندازه گیری فرسایش سطحی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.
12. Abbasi, A., and F. Mirekhtariy. 2019. ^{137}Cs and ^{40}K concentration ratios (CRs) in annual and perennial plants in the Caspian coast. *Marine Pollution Bulletin*. 146: 671-677.
13. Abbaszadeh, F., S. Ayoubi. and A. Jalalian. 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.
14. Alonso, J., Audicio, P., Martinez, L., Scavone, M., Rezzano, E. 2012. Comparison of measured Cs-137 data and USLE/RUSLE simulated long term erosion rates. *Agrociencia Uruguay*. 261-267.
15. Ayoubi, S., M. Ahmadi. M.R. Abdi. and F. Abbaszadeh Afshar. 2012. Relationships of ^{137}Cs inventory with magnetic measures of calcareous soils of hilly region in Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*. 112: 45-51.
16. Baskaran, M., R. Mudbidre and L. Schweitzer. 2020. Quantification of Po-210 and Pb-210 as tracer of sediment resuspension rate in a shallow riverine system: Case study from southeast Michigan, USA. *Journal of Environmental Radioactivity*. 222: 106339.
17. Bazshoushtari, N., S. Ayoubi and M. R. Abdi. 2016. Variability of ^{137}Cs inventory at a reference site in west-central Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*. 165: 86-92.
18. Blake, W. D.E. Walling, and Q. He 1999. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations. *Applied Radiation and Isotopes*. 51 (5): 599-605.
19. Ding, Z., Z. Zhang, Y. Li, L. Zhang and K. Zhang. 2020. Characteristics of magnetic susceptibility on cropland and pastureland slopes in an area influenced by both wind and water erosion and implications for soil redistribution patterns. *Soil and Tillage Research*. 199:104568.
20. Evans, R., A.L.Collins, Y. Zhang, I.D.L.Foster, J.Boardmane, H. Sint, M.R.F Lee and B.A. Griffith. 2017. A comparison of conventional and ^{137}Cs -based estimates of soil erosion rates on arable and grassland across lowland England and Wales. *Earth-Science Reviews*. 173: 49-64.
21. Feng, T., Chen, H., Polyakov, V.O., Wang, K., Zhang, X., Zhang, W. 2016. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with ^{137}Cs measurements. *Geomorphology*, 253: 217-224.
22. Gharibreza, M.R., M. Zaman, P. Porto, E. Fulajtar, L. Parsaei and H. Eisaei. 2020. Assessment of deforestation impact on soil erosion in loess formation using ^{137}Cs method (case study: Golestan Province, Iran). *International Soil and Water Conservation Research*. 8(4): 393-405.
23. He, Q. and D.E. Walling. 2000. Calibration of a field-portable gamma detector to obtain in situ measurements of the ^{137}Cs inventories of cultivated soils and floodplain sediments. *Applied Radiation and Isotopes*. 52: 865-872.
24. Holiaka, D., V. Yoschenko, S. Levchuk, and V. Kashparov. 2020. Distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity concentrations in trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Chernobyl zone. *Journal of Environmental Radioactivity*. 222: 106319.
25. Li, Y., Wang, Z., Zhao, J., Lin, Y., Tang, G., Tao, Z., Gao, Q., Chen, A. 2021. Characterizing soil losses in China using data of ^{137}Cs inventories and erosion plots. *Catena*. 203: 105296.
26. Mabit, L. and W. Blake. 2019. Assessing Recent Soil Erosion Rates through the Use of Beryllium-7 (Be-7). Springer.

27. Mabit, L., A. Toloza, and A. Nirschl 2008a. Development of a fine soil increment collector (FSIC) to solve the main limitation of the use of ^7Be as soil tracer. In: IAEA-Soils Newsletter, vol. 30(2), Laboratory Activities-Research, pp. 21–22.
28. Mabit, L., C. Bernard, and M.R. Laverdie`re. 2002. Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 (^{137}Cs) data. *Canadian Journal of Soil Science*. 82 (4): 423–431.
29. Mabit, L., C. Bernard, and M.R. Laverdie`re. 2007. Assessment of erosion in the Boyer River watershed (Canada) using a GIS oriented sampling strategy and ^{137}Cs measurements. *Catena*. 71 (2): 242–249.
30. Mabit, L., C. Bernard, M. Makhlof, M.R. Laverdie`re. 2008b. spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from ^{137}Cs measurements and geostatistics. *Geoderma*. 145 (3–4): 245–251.
31. Martinez, C., Hancock, G.R., Kalma, J.D. 2009. Comparison of fallout radionuclide (caesium-137) and modelling approaches for the assessment of soil erosion rates for an uncultivated site in south-eastern Australia. *Geoderma*. 151: 128–140.
32. Meusburger, K., P. Porto, L. Mabit, C. La Spada, L. Arata and C. Alewell. 2018. Excess Lead-210 and Plutonium-239+240: Two suitable radiogenic soil erosion tracers for mountain grassland sites. *Environmental Research*. 160: 195-202.
33. Morgan, R.P.C., 2005. *Soil Erosion and Conservation*, third ed. Blackwells, 314 pp.
34. Nosrati, K., A. Haddadchi, M. R. Zare and L. Shirzadi. 2015. 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.
35. Porto, P., D.E. Walling, C. La Spada, and G. Callegari. 2016. Validating the Use of ^{137}Cs measurements to derive the slope component of the sediment budget of a small rangeland catchment in southern Italy. *Land Degradation and Development*. 27: 798-810.
36. Porto, P., D.E. Walling and A. Capra. 2014. Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements and conventional surveys to investigate the relative contributions of interrill/rill and gully erosion to soil loss from a small cultivated catchment in Sicily. *Soil and Tillage Research*. 135: 18-27.
37. Putyrskaya, V., E. Klemt, S. Röllin, J.A. Corcho-Alvarado, and H. Sahli. 2020. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using ^{137}Cs and ^{210}Pb . *Journal of Environmental Radioactivity*. 212: 106135.
38. Rahimi, M.R., S. Ayoubi, and M.R. Abdi. 2013. Magnetic susceptibility and Cs-137 inventory variability as influenced by land use change and slope positions in a hilly, semiarid region of west-central Iran. *Journal Applied Geophysics*. 89: 68–75.
39. Ritchie, J.C. and C.A. Ritchie. 2007. Bibliography of publications of ^{137}Cs studies related to erosion and sediment deposition. <http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=15237>.
40. Schuller, P., A. Iroume´, D.E., Walling, B., Mancilla, A. Castillo, and R.E. Trumper. 2006. Use of beryllium-7 to document soil redistribution following forest harvest operations. *Journal of Environmental Quality*. 35: 1756–1763.
41. Sepulveda, A., P. Schuller, D.E. Walling, and A. Castillo. 2008. Use of ^7Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall. *Journal of Environmental Radioactivity*. 99 (1): 35–49.
42. Su, Z., T. Zhou, X. Zhang, X. Wang, J. Wang, M. Zhou, J. Zhang, Z. He and R. Zhang. 2021. A Preliminary Study of the Impacts of Shelter Forest on Soil Erosion in Cultivated Land: Evidence from integrated ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ Measurements. *Soil and Tillage Research*. 206: 104843.
43. Velasco, H., R. Torres Astorgaa, D. Joseph, J.S. Antoineb, L. Mabitd, A. Tolozad, G. Dercond and E. Wallinge. 2018. Adapting the Caesium-137 technique to document soil redistribution rates associated with traditional cultivation practices in Haiti. *Journal of Environmental Radioactivity*. 183: 7–16.
44. Wallbrink, P.J., D.E. Walling, and Q. He. 2002. Radionuclide measurements using HpGe gamma spectrometry. In: Zapata, F. (Ed.), *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides*. Kluwer, Dordrecht, pp. 67–96.

45. Walling, D.E. 2002. Recent advances in the use of environmental radionuclides in soil erosion investigations. IAEA C&S Papers Series 11/C. In: Nuclear Techniques in Integrated Plant Nutrient, Water and Soil Management. IAEA, Vienna, pp. 279–301.
46. Walling, D.E. 2012. Fallout Radionuclides and the Study of Erosion and Sedimentation. P: 3705-3768. In R.A. Meyers (ed). Springer, New York, NY.
47. Walling, D.E. and Q. He. 1997. Use of fallout ^{137}Cs in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains. *Catena*. 29: 263–282.
48. Walling, D.E. and Q. He. 1999a. Improved models for estimating soil erosion rates from ^{137}Cs measurements. *Journal of Environmental Quality*. 28: 611–622.
49. Walling, D.E. and Q. He. 1999b. Using fallout Lead-210 measurements to estimate soil erosion in cultivated land. *Soil Science Society of America Journal*. 63: 1404–1412.
50. Walling, D.E., A.L. Collins, P.A. Jones, G.J.L. Leeks, and G. Old. 2006. Establishing finegrained sediment budgets for the Pang and Lambourn LOCAR catchments, UK. *Journal of Hydrology*. 330 (1–2): 126–141.
51. Walling, D.E., Q. He, and P.G. Appleby. 2002. Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations. In: Zapata, F. (Ed.), *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation using Environmental Radionuclides*. Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 111–164 (Chapter 7).
52. Walling, D.E., Q. He, and W. Blake. 1999. Use of ^7Be and ^{137}Cs measurements to document short-and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land. *Water Resources Research*. 35 (12): 3865–3874.
53. Wilson, C., G. Matisoff, and P. Whiting. 2003. Short-term erosion rates from a ^7Be inventory balance. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28: 967–977.
54. Zapata, F. 2002. *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation using Environmental Radionuclides*. Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, The Netherlands, 219 p.
55. Zhang, X.C., V.O. Polyakov, B.Y. Liu and M.A. Nearing. 2019. Quantifying geostatistical properties of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ at small scales for improving sampling design and soil erosion estimation. *Geoderma*. 334: 155-164.

Comparison of the advantages and limitations of ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, and ^7Be fallout radionuclides in soil erosion assessments

F. Abbaszadeh Afshar¹

Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran.

f.abbaszadeh@ujiroft.ac.ir

Received: November 2020, and Accepted: July 2021

Abstract

Fallout radionuclides, FRNs, (i.e., ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, and ^7Be) are being increasingly used to obtain quantitative information on soil erosion and sediment redistribution within agricultural landscapes over different timescales. The technique is frequently regarded as a valuable complement to conventional measurement methods. The objective of the present article is two-fold: to review the advantages and limitations of each of the above three FRNs and to identify the key gaps in the current knowledge on their application. In addition, guidelines are introduced for selecting the most appropriate FRNs and the associated application methods for a wide range of spatial and temporal scales. Also, the key objectives to be pursued in future investigations including upscaling FRN applications in soil erosion to catchment scale and the shift from their use as a research tool to a decision support one will be explored.

Keywords: Fallout radionuclides (FRNs), Soil erosion and sedimentation, Soil redistribution, Soil degradation

¹ - Corresponding author: Department of Soil Science, College of Agriculture, University of Jiroft, Jiroft, Iran.