



ارزیابی اولیه‌ی امکان استفاده از رادیونوکلید سرب-۲۱۰ اضافی در برآورد توزیع مجدد خاک در اراضی دیم منطقه‌ی کوهین

مارال خدادادی^۱، منوچهر گرجی^۲، محمد قنادی مراغه^۳، علی بهرامی سامانی^{۳*}، معین مفتاحی^۳، حسین میرسید حسینی^۲، قوام‌الدین زاهدی امیری^۴

۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران
۲. گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده‌ی علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۴۱۱۱، کرج - ایران
۳. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۳۶۵، تهران - ایران
۴. گروه مهندسی جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده‌ی منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۴۱۱۱، کرج - ایران

چکیده: در دهه‌های اخیر، در کشور ما از سزیم-۱۳۷ برای برآورد آهنگ فرسایش خاک و ته‌نشینی استفاده شده است. لیکن به دلیل کاهش مقدار آن در خاک در اثر فروپاشی پرتوزا، نیاز به بررسی امکان استفاده از یک ردیاب جای‌گزین با نهشت مداوم مانند سرب-۲۱۰ اضافی، ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعه‌ی حاضر، نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از یک مزرعه با وسعت هفت هکتار، برای تعیین مقدار و الگوی توزیع مکانی خاک مورد استفاده قرار گرفت. میزان فرسایش خالص خاک با استفاده از مدل موازنه‌ی جرم ۲، برای روش‌های مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی، به ترتیب، ۴۶ و ۱۲۳ تن بر هکتار-سال و نسبت باردهی ته‌نشست به ترتیب، ۵۲ و ۶۰ درصد محاسبه شد. به طور کلی میانگین فرسایش و ته‌نشینی برآورد شده با استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی بسیار بیش‌تر از سزیم-۱۳۷ بود، زیرا سزیم-۱۳۷، تخمینی از میانگین فرسایش از سال ۱۹۶۳ تا زمان نمونه‌برداری را به دست می‌دهد، در حالی که نتیجه‌های سرب-۲۱۰ اضافی بازتابی از دوره‌ی زمانی طولانی‌تر است. تغییرهایی که در مدیریت خاک و ویژگی‌های بارش‌ها در طی قرن گذشته در منطقه رخ داده است، تأثیر مهمی بر برآورد توزیع مجدد خاک با استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی گذاشته است. به طور کلی نتیجه‌های پژوهش حاضر امکان استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی در منطقه‌های نیمه خشک را تأیید نمود.

کلیدواژه‌ها: سرب-۲۱۰ اضافی، سزیم-۱۳۷، فرسایش خاک، رادیونوکلیدهای بارشی، مدل‌های موازنه‌ی جرم

Preliminary assessment of using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ radionuclide to estimate soil redistribution rate in kouhin dry farming region

M. Khodadadi¹, M. Gorji², M. Ghannadi-Maragheh³, A. Bahrami-Samani^{3*}, M. Meftahi³, H.M.S. Hoseini², Gh. Zahedi Amiri⁴

1. Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran
2. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P.O.Box: 4111, Karaj - Iran
3. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran
4. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, P.O.Box: 4111, Karaj - Iran

Abstract: Over the past decades, the ^{137}Cs approach has been successfully applied in Iran for estimating soil erosion and sedimentation rates. By the progressive reduction in ^{137}Cs activity due to radioactive decay, however, it is essential to investigate the use of an alternative environmental radionuclide with a constant deposition through time, such as Lead-210. In this study, soil samples were collected within seven hectares cultivated field to determine the magnitude and spatial pattern of soil redistribution budgets. The net erosion rates for ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ techniques were estimated to be 4.6 and 12.3t ha⁻¹ yr⁻¹ respectively and the sediment delivery ratio reached 52 and 60 percent respectively using mass balance model 2. Totally, soil erosion and deposition mean estimated from the $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements were much higher than those of ^{137}Cs , since in the case of ^{137}Cs , the results provided an estimate of the mean erosion rate over a period from 1963 to the time of sampling, whereas for the $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ technique, the estimates reflect a longer time period. The changes in the land management and rainfall characteristics that have occurred during the past century in the area under the study have had important influence on the soil redistribution estimates by the $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. This study has demonstrated the potential of using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements to estimate soil erosion and deposition in semiarid regions.

Keywords: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{137}Cs , Soil erosion, Fallout radionuclides, Mass balance models

*email: asamani@aeoi.org.ir



۱. مقدمه

در مقیاس جهانی، گرمایش کره‌ی زمین و استفاده‌ی نادرست از اراضی، تخریب خاک را تسریع نموده است. در کشور ما تشدید فعالیت‌های کشاورزی همراه با مدیریت‌های ناپایدار، شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک و شیب‌های تند، اراضی کشاورزی به ویژه دیمزارها را در معرض خطر جدی قرار داده است. بنابراین تخمین دقیق فرسایش خاک برای کمی‌سازی فرسایش و طراحی رویکردهای مؤثر در حفاظت خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. در بین روش‌های مختلف اندازه‌گیری کمی تلفات خاک، رادیونوکلیدهای بارشی به عنوان ردیاب در مطالعه‌ی فرسایش خاک به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. در دهه‌های اخیر سزیم-۱۳۷ به طور موفقیت‌آمیز در کمی‌سازی آهنگ فرسایش خاک و ته‌نشینی در ایران استفاده شده است، لیکن موجودی سزیم-۱۳۷ در خاک در اثر فروپاشی کاهش یافته است به طوری که در حدود ده سال آینده به کم‌تر از حد آشکارسازی خود می‌رسد [۲]. بنابراین نیاز به استفاده از یک ردیاب جای‌گزین با نهشت مداوم، ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر رادیونوکلید طبیعی سرب-۲۱۰ اضافی در مطالعه‌ی فرسایش خاک به طور موفقیت‌آمیزی استفاده شده است. مطالعه‌ی حاضر اولین بررسی قابلیت استفاده بودن سرب-۲۱۰ اضافی برای مطالعه‌ی فرسایش و ته‌نشینی در ایران است.

برخلاف سزیم-۱۳۷ که رادیونوکلید مصنوعی است، سرب-۲۱۰ اضافی، رادیونوکلید طبیعی با نیم-عمر ۲۲٫۳ سال، یکی از سازه‌های زنجیره‌ی واپاشی اورانیوم است. از واپاشی اورانیوم-۲۳۸ در یک زنجیره‌ی واپاشی، رادیم-۲۲۶ (با نیم-عمر ۱۶۲۲ سال) به وجود می‌آید. از واپاشی رادیم-۲۲۶ که در خاک و سنگ‌ها یافت می‌شود، راد-۲۲۲ گازی (با نیم-عمر ۳٫۸ روز) حاصل می‌شود که بخش اعظم آن در خاک به سرب-۲۱۰ اضافی تبدیل می‌شود و سرب-۲۱۰ اضافی پستیپانی شده^(۱) را ایجاد می‌کند که مقدار آن برابر با رادیم-۲۲۶ است [۳]. بخش کمی از راد-۲۲۲ گازی وارد جو شده و در آن‌جا در اثر واپاشی به رادیونوکلیدهای عمر- کوتاه تبدیل، و در نهایت بیسموت-۲۱۴ (با نیم-عمر ۱۹٫۸ دقیقه) و سپس سرب-۲۱۰ اضافی تولید می‌شود. سرب-۲۱۰ اضافی تولید شده از طریق بارش‌های خشک و مرطوب در سطح زمین رسوب می‌کند که به آن سرب اضافی یا بدون پشتوانه^(۲) می‌گویند [۱]

سرب-۲۱۰ اضافی همانند سزیم-۱۳۷، به سرعت توسط ذرات رس و ماده‌ی آلی خاک جذب می‌شود، در خاک، به صورت شیمیایی و زیستی از تحرک بسیار اندک برخوردار بوده و حرکت آن از محل اولیه از طریق فرسایش و عملیات شخم و شیار انجام می‌شود [۴]. روش مبتنی بر استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی نسبت به روش مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ فرسایش خاک را برای دوره طولانی‌تر (۱۰۰ سال در مقابل ۵۰ سال) برآورد می‌کند؛ از این‌رو استفاده‌ی هم‌زمان این دو می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از تاریخچه‌ی فرسایش منطقه، فراهم نماید [۱].

تاکنون مطالعه‌های متعددی از جمله، والینگ و هی [۵]، ژانگ و همکاران [۶]، والینگ و همکاران [۷] و گاسپر و همکاران [۸] موفقیت استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی را گزارش نموده‌اند. برای مثال ژانگ و همکاران [۶] روش استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی را برای تخمین فرسایش و رسوب در کشور چین ارزیابی نمودند. در مطالعه‌ی دیگری گاسپر و همکاران [۸] از این روش برای کمی‌سازی توزیع مجدد خاک در منطقه‌ای با شیب‌های تند، تراس‌های آبراه‌ای و کشت‌نوری^(۳) در شمال اسپانیا استفاده نمودند. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که وجود تراس‌های آبراه‌ای و نوارهای کشت تأثیر مهمی در کاهش آبدوی و ته‌نشینی دارد زیرا منجر به کاهش درجه و طول شیب شده و ذرات فرسایشی را به تله انداخته و توزیع مناطق فرسایشی و ته‌نشینی در طول شیب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پژوهش دیگری بن منصور و همکاران [۹] از دو رادیونوکلید سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی در مزرعه‌ای در مراکش، که عملیات شخم و شیار در جهت شیب انجام شده بود، استفاده نمودند. آن‌ها سرب-۲۱۰ اضافی را یک ردیاب مناسب برای برآورد فرسایش بلند-مدت گزارش نمودند. برخلاف این مطالعه‌ها، در برخی از مطالعه‌های انجام شده در نقاط مختلف دنیا سرب-۲۱۰ اضافی از دقت کافی برخوردار نبوده است؛ در این مورد می‌توان به مطالعه‌های میت و همکاران [۱۰]، پوتو و همکاران [۱۱] و کاتو و همکاران [۱۲] اشاره نمود. به عنوان مثال، میت و همکاران [۱۰] میزان فرسایش و ته‌نشینی را در یک حوضه‌ی آبخیز کشاورزی در کشور اتریش را با استفاده از رادیونوکلیدهای سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی، ارزیابی و فرسایش را در کرت‌های آزمایشی در حوضه‌ی آبخیز برای دوره‌ی ۱۳ ساله اندازه‌گیری نمودند. در مجموع، مقایسه‌ی مقدارهای اندازه‌گیری شده‌ی فرسایش در کرت‌ها با مقدارهای تخمین زده شده نشان داده که روش مبتنی بر استفاده از





تا $36^{\circ} 22'$ و 48° شمالی و 49° تا 35° ، 49° و $36'$ و $11'$ شرقی قرار دارد (شکل ۱). در داخل ایستگاه یک دامنه‌ی شیب رو به شمال با وسعت 6.6 هکتار، متوسط ارتفاع 1354 متر و حداکثر شیب 19% انتخاب شد (شکل ۱). میانگین مقدار بارندگی و متوسط درجه حرارت سالانه در ایستگاه به ترتیب، برابر با 330 میلی‌متر و 12.1 درجه‌ی سانتی‌گراد بود.

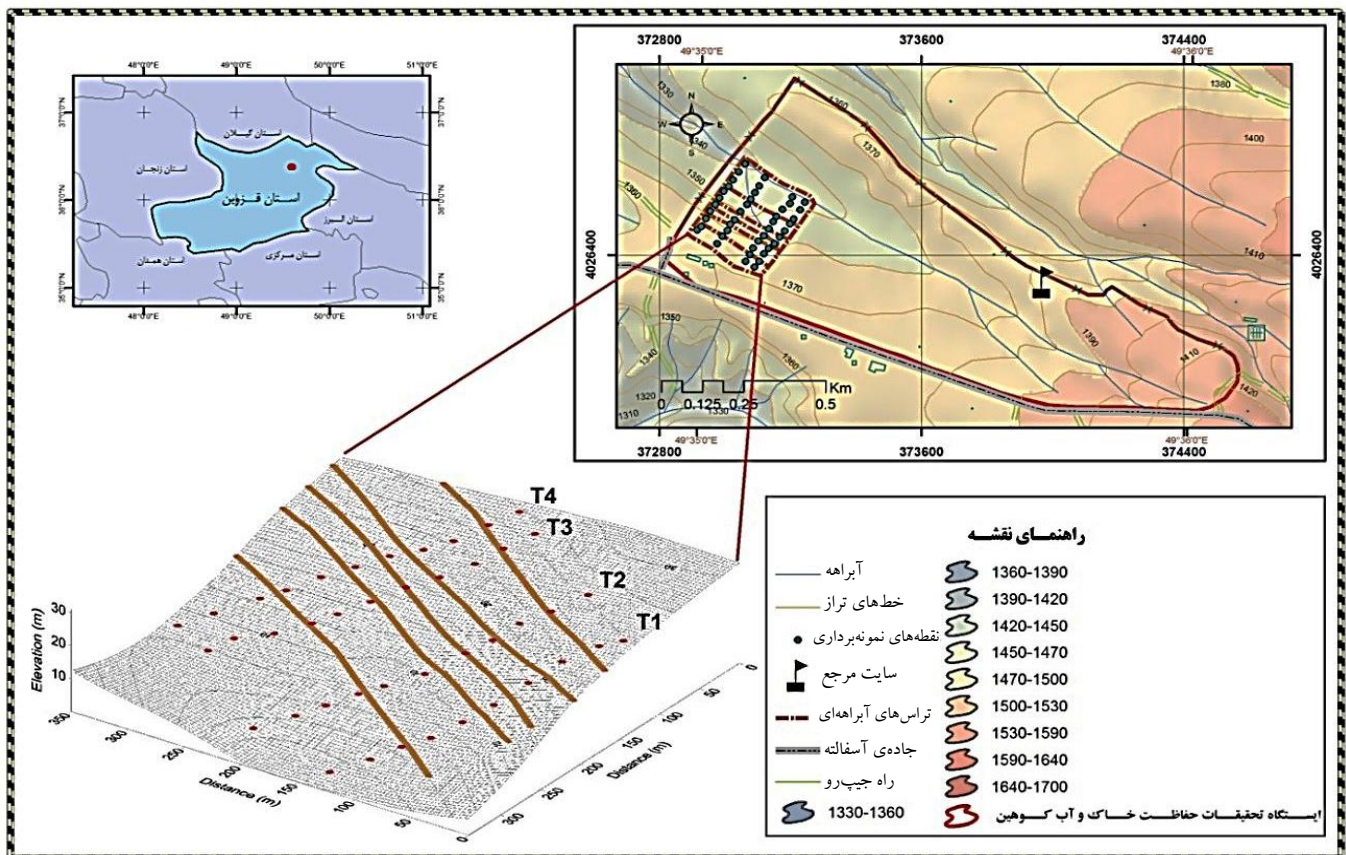
طبقه‌بندی خاک منطقه براساس سیستم آمریکایی در گروه بزرگ Vertic Calcixerepts و روند حرارتی خاک مزیک و رطوبتی آن زیریک بود [۱۳]. تناوب زراعی در داخل ایستگاه تحقیقاتی، گندم-عدس-آیش بود. در ایستگاه از حدود 40 سال پیش، عملیات حفاظت خاک شامل فرق، احداث تراس‌های آبراه‌ای پایه-پهن^(۴) و کشت و کار بر روی خطوط تراز^(۵) انجام شده بود؛ در حالی که در اراضی زراعی خارج از ایستگاه هیچ‌گونه عملیات حفاظتی انجام نشده و شخم در جهت شیب انجام شده بود.

سرب- 210 اضافی روش قابل قبول نیست. دلیل این امر، مقدار کم سرب- 210 اضافی و نایبینی در اندازه‌گیری‌ها دانسته شد، به طوری که در بسیاری از نقاط، فعالیت پرتوزایی سرب- 210 اضافی و رادیم- 226 با هم برابر بود.

با توجه به مدیریت نامناسب اراضی شیب‌دار منطقه‌ی کوهین استان قزوین، تخمین دقیق فرسایش از اهمیت به ویژه بالایی برخوردار است. هدف این پژوهش، بررسی امکان استفاده از سرب- 210 اضافی در برآورد فرسایش خاک در مناطق نیمه خشک و در دامنه‌ی شیب با کاربری دیم بود. مقدار فرسایش و ته‌نشینی برآورد شده با این روش با نتیجه‌های حاصل از به‌کارگیری رادیونوکلید سزیم- 137 مقایسه شد.

۲. مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مطالعاتی، ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک و آب دانشگاه تهران، در منطقه‌ی کوهین واقع در 40 کیلومتری جاده‌ی ارتباطی قزوین-رشت و در موقعیت جغرافیایی 36° ، $22'$ و $22'$



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک و آب دانشگاه تهران، محل مرجع، تراس‌های آبراه‌ای و نقطه‌های نمونه‌برداری بر روی ترانسکت‌ها (T1 تا T4).



نمودن کامل خاک نرم و نمونه‌ی فرعی برای اندازه‌گیری فعالیت سزیم-¹³⁷ استفاده شد. برای تعیین فعالیت سرب-²¹⁰ اضافی، ۲۵۰ گرم نمونه‌ی آسیاب شده در ظرف‌های مخصوص ۲۵۰ میلی‌لیتری ریخته شده و به مدت ۲۰ روز برای اطمینان از تعادل بین رادن-²²² و رادیم-²²⁶ نگره‌داری شد [۱]. رادیم-²²⁶ و سرب-²¹⁰ اضافی اندازه‌گیری و از اختلاف آن‌ها، سرب-²¹⁰ اضافی محاسبه شد.

برای تعیین فعالیت سزیم-¹³⁷، از طیف‌سنج گاما با آشکارساز نوع P، با کارایی ۸۰٪ و با قدرت تفکیک ۱/۸ کیلو الکترون ولت و دامنه انرژی ۱۳۳۲/۵ کیلو الکترون ولت استفاده شد. اعتبار واسنجی با استفاده از مواد مرجع آرآنس بین‌المللی انرژی اتمی شامل خاک‌های شماره ۶ و ۳۷۵ بررسی شد. زمان شمارش نمونه با توجه به فعالیت سزیم-¹³⁷، برای رسیدن به خطای قابل قبول کم‌تر از $\pm 10\%$ درصد در سطح اعتماد ۹۵ درصد، بین ۲۰۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

برخلاف سزیم-¹³⁷، که پرتو گاما با انرژی ۶۶۲ کیلو الکترون ولت گسیل می‌کند، انرژی گامای گسیل شده از سرب-²¹⁰ اضافی، ۴۶/۵ کیلو الکترون ولت است که بسیار نزدیک به محدوده‌ی پایینی طیف گامای استاندارد است که برای اندازه‌گیری سزیم-¹³⁷ استفاده شد. بنابراین نمی‌شد از آن برای اندازه‌گیری سرب-²¹⁰ اضافی استفاده نمود. برای اندازه‌گیری سرب-²¹⁰ اضافی نیاز به طیف گاما با زمینه و انرژی پایین است. بنابراین فعالیت رادیونوکلیدهای سرب-²¹⁰ اضافی و رادیم-²²⁶ در نمونه‌های خاک با استفاده از طیف‌سنج گاما با آشکارساز نوع N با کارایی نسبی ۳۰٪ تعیین شد. زمان شمارش ۸۶۰۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد. فعالیت رادیم-²²⁶ با استفاده از قله‌ی بیسموت-²¹⁴ (دختر-هسته‌ی رادیم) در انرژی ۶۰۹ کیلو الکترون ولت محاسبه شد. چون پرتوهای گامای کم‌انرژی مانند سرب-²¹⁰ اضافی توسط خود ماده جذب می‌شوند. برای رفع این مشکل ضریب خود جذبی برای سرب-²¹⁰ اضافی محاسبه و در فعالیت نمونه‌ها لحاظ شد. از یک روش ساده که توسط کاتشال و همکاران [۱۶]، خطر و عباد [۱۷]، روبرو و جیاوانی [۱۸]، بن منصور و همکاران [۹] استفاده شده بود، برای اصلاح خودجذبی استفاده شد. در این روش از یک چشمه‌ی نقطه‌ای با انرژی نزدیک به انرژی سرب-²¹⁰ (۴۶/۵ کیلو الکترون ولت) یعنی، آمریسیم-²⁴¹ با انرژی ۵۹/۵ کیلو الکترون ولت، استفاده شد.

محاسبه‌ی آهنگ فرسایش به وسیله‌ی روش‌های مبتنی بر استفاده از سزیم-¹³⁷ و سرب-²¹⁰ اضافی، براساس مقایسه‌ی فعالیت رادیونوکلید موجود در خاک فرسایش یافته با یک مقدار آن در محل مرجع است [۱۴]. بدین منظور ابتدا مقدار فعالیت پرتوزایی رادیونوکلید در محل مرجع تعیین، سپس توزیع مکانی رادیونوکلید در منطقه‌ی مطالعاتی اندازه‌گیری و در نهایت ارتباط بین تلفات رادیونوکلید و آهنگ فرسایش و ته‌نشینی بررسی شد. تعیین محل مرجع، اصلی‌ترین بخش روش‌های مبتنی بر استفاده از سزیم-¹³⁷ و سرب-²¹⁰ اضافی است. در داخل ایستگاه تحقیقات حفاظت خاک و آب کوهین، محلی که برای سالیان متوالی دست نخورده باقی مانده و بر روی یک زمین نسبتاً مسطح که ته‌نشینی بر روی آن انجام نشده و خود نیز به سبب نداشتن شیب از فرسایش دور مانده بود، به عنوان مرجع انتخاب شد. این منطقه به محل نمونه‌برداری نزدیک و تقریباً دارای همان ارتفاع و برخوردار از پوشش گیاهی مترکم در تمام طول سال بود، به طوری که ارتفاع محل مرجع ۱۴۷۰ متر، شیب آن کم‌تر از ۱٪ و فاصله‌ی آن از محل نمونه‌برداری کم‌تر از ۸۰۰ متر بود (شکل ۱). رادیونوکلیدهای سزیم-¹³⁷ و سرب-²¹⁰ اضافی در خاک‌های دست نخورده در سطح خاک تمرکز داشته و دارای توزیع نامی با عمق هستند. بنابراین برای اطمینان از انتخاب صحیح محل مرجع، توزیع رادیونوکلید با عمق باید بررسی شود. برای این منظور، نمونه‌ها به روش جزء به جزء^(۶) (افزایش عمقی) با فاصله‌های ۲ سانتی‌متر (تا عمق ۵۰ سانتی‌متر) با استفاده از دستگاه صفحه تراش^(۷) طراحی شده توسط کمپل [۱۵]، جمع‌آوری شدند. برای تعیین توزیع رادیونوکلید در محل مرجع سه نمونه‌ی کلی به فاصله‌ی ۵ متر جمع‌آوری شد.

در دامنه‌ی شیب مورد مطالعه، برای تعیین توزیع مکانی رادیونوکلید در اثر توزیع مجدد خاک، نمونه‌برداری در چهار ترانسکت و در هر ترانسکت به فاصله‌های تقریبی ۲۵ متر به انجام رسید (شکل ۱). نمونه‌ها با استفاده از استوانه‌ی نمونه‌برداری به قطر ۸/۳ سانتی‌متر از عمق ۰ تا ۴۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شدند. در قسمت پایین شیب برای در نظر گرفتن تمامی سزیم-¹³⁷، نمونه‌برداری تا عمق ۵۰ سانتی‌متری به انجام رسید.

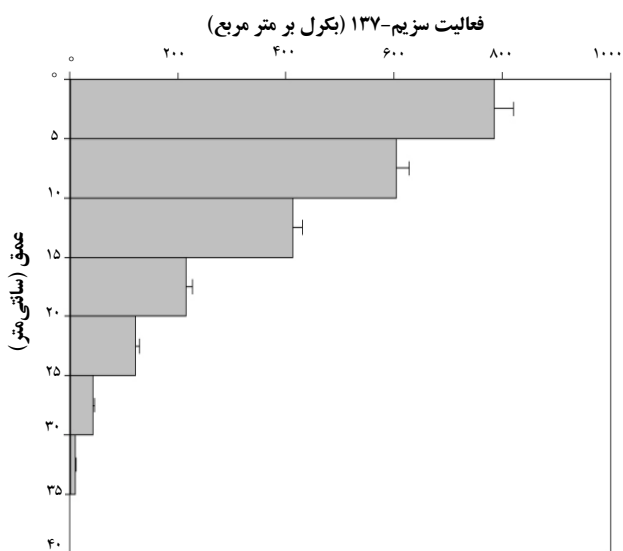
برای تعیین فعالیت پرتوزایی سزیم-¹³⁷ و سرب-²¹⁰ اضافی نمونه‌های خاک در هوا خشک شده، توزین و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده و آسیاب شدند. مواد باقی مانده بر روی الک شسته شده و سنگریزه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر جدا و وزن سنگریزه‌ها پس از خشک کردن کامل تعیین شد. پس از مخلوط

۳. نتایج و بحث

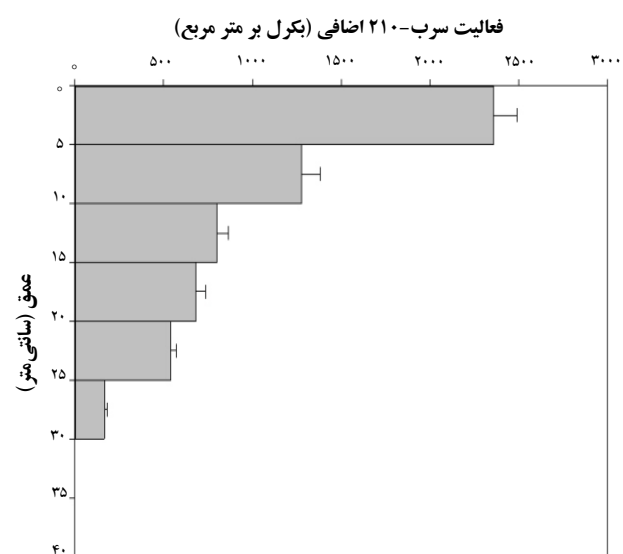
۱.۳ توزیع عمقی رادیونوکلیدها در محل مرجع

فعالیت متوسط سزیم-۱۳۷ در محل مرجع، 2195 ± 120 بکرل بر متر مربع بود که با در نظر گرفتن واپاشی سزیم-۱۳۷ بسیار نزدیک به مقدار به دست آمده توسط گرجی و همکاران [۱۳] در مرکز تحقیقاتی کوهین است. فعالیت سزیم-۱۳۷ با افزایش عمق به طور نمایی کاهش یافت و ۹۰ درصد سزیم پرتوزا در عمق صفر تا ۱۸ سانتی متری قرار داشت (شکل ۲). در عمق‌های پایین تر از ۳۵ سانتی متر رادیونوکلیدی وجود نداشت و یا مقدار آن پایین تر از حد آشکارسازی بود.

(الف)



(ب)



شکل ۲. توزیع عمقی فعالیت (الف) سزیم-۱۳۷ و (ب) سرب-۲۱۰ اضافی در پروفیل مرجع.

برای برآورد آهنگ فرسایش خاک باید فعالیت رادیونوکلید در نمونه‌ها با مقدار آن در محل مرجع مقایسه شود. برای تخمین کمی فرسایش و ته‌نشینی، باید بین مقدار اختلاف فعالیت رادیونوکلیدها و اتلاف خاک رابطه‌ایی ایجاد شود؛ برای این منظور، از مدل‌های تبدیل استفاده می‌شود [۱۹]. در روش مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷، مدل‌های تناسبی و موازنه‌ی جرم برای اراضی زراعی و مدل‌های توزیع پروفیل و انتشار و انتقال برای خاک‌های دست نخورده به کار گرفته می‌شوند [۱۹]. در روش مبتنی بر استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی، مدل‌های موازنه‌ی جرم در اراضی زراعی [۲۰] و مدل‌های انتشار و انتقال، در اراضی دست نخورده به کار گرفته می‌شوند [۲۱]. در مطالعه‌ی حاضر از مدل موازنه‌ی جرم-۲، با استفاده از نرم‌افزاری که توسط والینگ و همکاران [۲] ارایه شده است، آهنگ فرسایش و ته‌نشینی در همه‌ی نقاط محاسبه شد. شکل کلی مدل موازنه‌ی جرم-۲، برای محل فرسایش یافته در روش مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷، این است

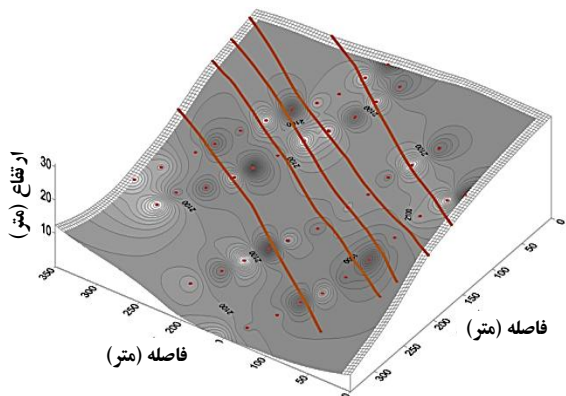
$$\frac{dA(t)}{dt} = (1 - \Gamma)I(t) - (\lambda + P \frac{R}{d_m})A(t) \quad (1)$$

که در آن، $A(t)$ فعالیت تجمعی سزیم-۱۳۷ در واحد سطح (بکرل بر متر مربع)، t زمان نهشت سزیم-۱۳۷ (سال)، R آهنگ فرسایش (کیلوگرم بر متر مربع در سال)، d_m عمق میانگین شخم، λ ثابت واپاشی سزیم-۱۳۷ (سال)، $I(t)$ فرونهشت سالانه‌ی سزیم-۱۳۷ در زمان t (کیلوگرم بر متر مربع در سال) و Γ ، درصد سزیم-۱۳۷ حذف شده از طریق فرسایش در قبل از مخلوط شدن در لایه‌ی شخم، است [۱۹]. برای جزئیات بیشتر به والینگ و همکاران [۱۹] مراجعه شود. تغییرهایی در مدل موازنه‌ی جرم-۲ روش مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ ایجاد شده است تا منشاء طبیعی و نهشت دائمی سرب-۲۱۰ اضافی، در نظر گرفته شود [۲]. پارامترهای مدل‌های تبدیل سرب-۲۱۰ اضافی مشابه پارامترهای مدل‌های سزیم-۱۳۷ است، هر چند نیاز به دقت بیش تر در تعیین آن‌ها دارد، زیرا رفتار سرب-۲۱۰ اضافی در خاک می‌تواند متفاوت از سزیم-۱۳۷ باشد. مدل، نهشت دائمی سرب-۲۱۰ اضافی و متعاقباً واپاشی و توزیع مجدد آن در نتیجه‌ی فرسایش و رسوب را در نظر می‌گیرد [۲].

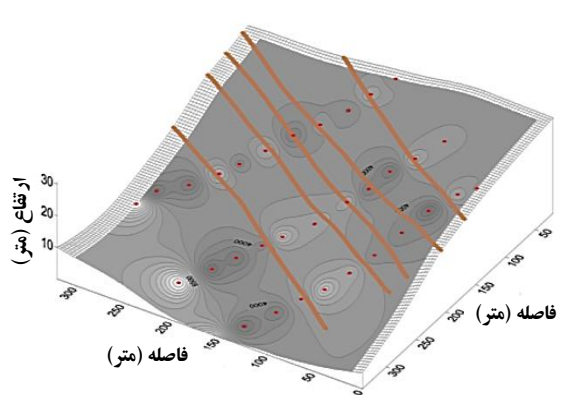
**۲.۳ توزیع مکانی رادیونوکلیدها در منطقه‌ی مورد مطالعه**

مقدار سزیم-۱۳۷ در نقطه‌های نمونه‌برداری شده بین ۶۶۲ تا ۳۵۴۸ بکرل بر متر مربع متغیر بود (شکل ۳ الف). ضریب تغییرات فعالیت سزیم-۱۳۷ برابر با ۲۹ درصد بود، که نشان‌دهنده‌ی توزیع مجدد سزیم بر اثر فرایند فرسایش و ته‌نشینی در منطقه‌ی مطالعاتی است. با توجه به محدودیت‌های موجود در مطالعه‌ی حاضر، مقدار سرب-۲۱۰ اضافی در ۳۳ نقطه اندازه‌گیری شد که دامنه‌ای بین ۱۹۲۹ تا ۱۰۱۳۱ بکرل بر متر مربع داشت (شکل ۳ ب). مقدار سرب در طول سه ترانسکت دارای تغییرات زیادی بود به طوری که ضریب تغییرات فعالیت سرب-۲۱۰ اضافی در دامنه‌ی شیب، برابر با ۴۵ درصد بود، که این مقدار بسیار بیش‌تر از ضریب تغییرات سزیم در دامنه‌ی شیب است. به طور کلی در بیش‌تر نقطه‌ها، فعالیت سرب-۲۱۰ اضافی کم‌تر از محل مرجع بود، به طوری که براساس نتیجه‌ها، در ۶۲ درصد از دامنه‌ی شیب فرسایش و در مابقی آن ته‌نشینی رخ داده است.

(الف)



(ب)



شکل ۳. نقشه‌ی توزیع مقدار (الف) سزیم-۱۳۷ و (ب) سرب-۲۱۰ اضافی (بکرل بر متر مربع) در دامنه‌ی شیب مورد مطالعه؛ موقعیت نقطه‌های نمونه‌برداری و تراس‌های آبراهه‌ای (خطوط پیوسته).

فعالیت سرب-۲۱۰ اضافی در محل مرجع 5825 ± 297 بکرل بر متر مربع بود. نهشت سالانه‌ی سرب-۲۱۰ اضافی $I(t)$ در منطقه‌ی مورد مطالعه با توجه به معادله‌ی $I(t) = A_{ref} \cdot \ln(2) / 22.3$ [۲] ۱۸۱ بکرل بر متر مربع بود. فعالیت سرب-۲۱۰ اضافی با افزایش عمق، به طور نمایی کاهش می‌یافت به طوری که ۹۰ درصد سرب-۲۱۰ اضافی در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر قرار داشت (شکل ۲). در عمق‌های پایین‌تر از ۳۰ سانتی‌متر، این رادیونوکلید وجود نداشت و یا مقدار آن کم‌تر از حد آشکارسازی بود.

براساس اطلاعات موجود، نهشت سالانه‌ی سرب-۲۱۰ اضافی در منطقه‌های مختلف جهان، دامنه‌ای بین ۲۳ تا ۳۶۷ بکرل بر متر مربع دارد که با در نظر گرفتن نهشت دایم و واپاشی برابر با موجودی بین ۷۶۷ و ۱۲۲۳۳ بکرل بر متر مربع است [۲۲، ۲۳]. در ایران، اطلاعاتی در ارتباط با مقدار سرب-۲۱۰ اضافی در خاک موجود نیست. مقدار سرب-۲۱۰ اضافی در جاهای دیگر دنیا توسط سایر پژوهش‌گران بررسی شده است؛ برای مثال، ۵۱۷۰ بکرل بر متر مربع در انگلستان [۲۰]، ۵۷۳۰ و ۱۲۸۶۰ بکرل بر متر مربع در چین [۲۴، ۶]، ۱۹۷۰۳ و ۸۴۵۳ بکرل بر متر مربع در ژاپن [۲۵، ۲۶]، ۶۳۱۰ بکرل بر متر مربع در مغولستان [۱۲]، ۱۴۵۷۲ و ۷۷۹۴ بکرل بر متر مربع در ایتالیا [۱۱، ۲۷]، ۲۰۰۰ بکرل بر متر مربع در زامبیا [۲۸]، ۳۳۰۵ بکرل بر متر مربع در مراکش [۹]، ۶۲۰ بکرل بر متر مربع در اتریش [۱۰]، ۳۴۰۰۰ بکرل بر متر مربع در تایوان [۲۹]، بین ۳۵۸۰ و ۱۰۰۶۰ بکرل بر متر مربع در دشت‌های مختلف در انگلستان و ولز [۳۰]، ۲۰۲۰ بکرل بر متر مربع در اسپانیا [۸] و بین ۱۰۴۴ تا ۸۲۰۴ در منطقه‌های مختلف اسپانیا [۳۱]. مقایسه‌ی مقدار سرب-۲۱۰ اضافی محل مرجع پژوهش حاضر با دیگر نقطه‌های دنیا، نشان می‌دهد که این مقدار در گستره‌ی تغییرات جهانی واقع است. براساس منبع‌ها، به غیر از بارندگی، عامل‌های بسیاری هم‌چون عرض جغرافیایی و موقعیت قراگیری منطقه‌ی مورد مطالعه در قاره‌ها، در میزان نهشت سرب-۲۱۰ اضافی تأثیر دارد. لیکن از بین مطالعه‌های انجام شده به نظر می‌رسد که مقدار سرب-۲۱۰ اضافی در مغولستان با بارندگی ۲۰۰ میلی‌متر، قابل مقایسه با فعالیت سرب پرتوزا در منطقه‌ی مورد مطالعه باشد. در سایر مطالعه‌ها، بارندگی سالیانه دامنه‌ای بین ۴۰۵ در مراکش تا ۲۴۰۰ میلی‌متر در تایوان دارد.

۳.۲ تعیین توزیع مجدد خاک با استفاده از مدل‌های تبدیل

آهنگ فرسایش و ته‌نشینی با استفاده از مدل موازنه‌ی جرم-۲ برآورد شد. دامنه‌ی تغییرهای فرسایش و ته‌نشینی برای روش مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ به ترتیب، ۰/۱-۴۴ و ۲/۳-۲۲/۵ و برای روش مبتنی بر استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی به ترتیب، ۵/۸-۶۲/۸ و ۰/۹۴-۵۹/۲ تن بر هکتار-سال برآورد شد. با استفاده از مدل موازنه‌ی جرم-۲ برای روش‌های مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی آهنگ فرسایش خالص به ترتیب، ۴/۶ و ۱۲/۳ تن بر هکتار-سال و مقدار نسبت باردهی ته‌نشست^(۸) ۵۲ و ۶۰ درصد محاسبه شد (جدول ۱). براساس اطلاعات جدول ۱ بیش از نیمی از خاک فرسایش یافته به خارج از دامنه‌ی شیب منتقل شده و مابقی آن مجدداً در دامنه شیب نهشته شده است. لیکن این مقادارها کم‌تر از مقدار برآورد شده به وسیله‌ی سایر مطالعه‌ها مانند مورد بن منصور و همکاران [۹] است که مقدار فرسایش را با استفاده از روش مبتنی بر استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی در مزرعه‌ای در مراکش با حداکثر شیب ۱۷ درصد که در جهت شیب شخم زده شده بود، برآورد کردند. علت این امر را می‌توان وجود تراس‌های آبراهه‌ای و هم‌چنین شخم در خلاف جهت شیب دانست.

بارندگی متوسط سالیانه‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه، در حدود ۳۳۰ میلی‌متر است که کم‌تر از سایر نقطه‌هایی مانند زامبیا

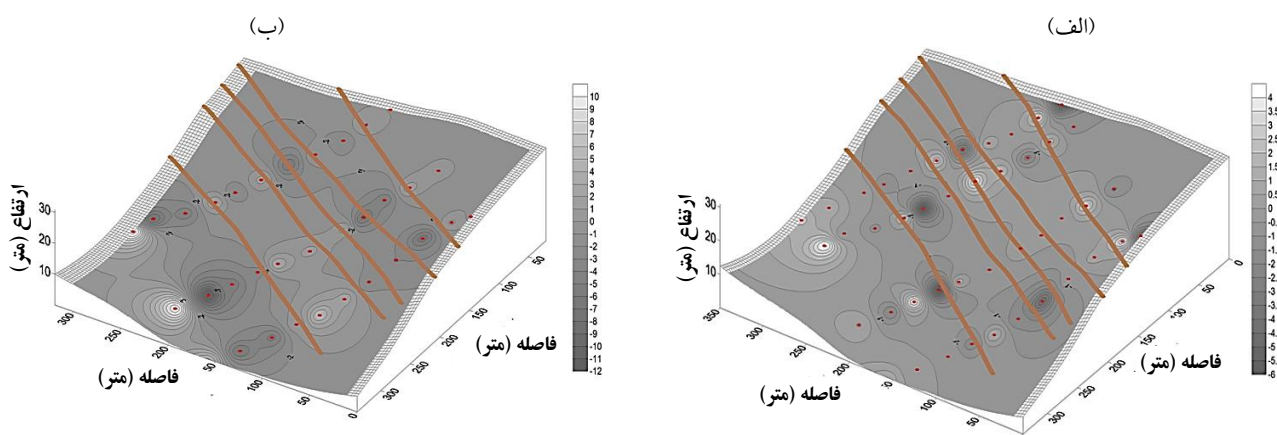
(۸۰۰-۹۰۰ میلی‌متر)، شمال کالیفرنیا، آمریکا (۷۶۰ میلی‌متر) و مرکز ژاپن (۲۰۰۰ میلی‌متر) است که استفاده‌ی موفقیت‌آمیز از روش مبتنی بر سرب-۲۱۰ اضافی در آن‌ها گزارش شده است. مطالعه‌های محدودی در مورد استفاده از این روش در منطقه‌های خشک و نیمه خشک وجود دارد، به عنوان مثال استفاده از روش مبتنی بر سرب-۲۱۰ اضافی توسط کاتو و همکاران [۱۲] در مغولستان با بارندگی سالیانه‌ی ۲۰۰ میلی‌متر گزارش شده است. نتیجه‌های پژوهش حاضر امکان استفاده از روش مبتنی بر استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی در منطقه‌های نیمه خشک را تأیید می‌نماید.

۴.۳ الگوی توزیع مجدد خاک در منطقه‌ی کوهین

الگوی توزیع مجدد خاک برای هر دو رادیونوکلید، به شدت تحت تأثیر محل تراس‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه بوده است (شکل ۴). گاسپر و همکاران [۸] نیز الگوهای مشابهی را در منطقه‌های دارای تراس‌های آبراهه‌ای و کشت‌نوازی با استفاده از سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی به دست آوردند. در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از هر دو رادیونوکلید بیش‌ترین مقدار تلفات خاک در ناحیه‌ی شانه‌ی شیب برآورد شد، که دلیل این امر را می‌توان در شیب زیاد این ناحیه دانست. در پای شیب در تمامی نقطه‌ها ته‌نشینی مشاهده شد. لیکن در روش مبتنی بر سرب-۲۱۰ اضافی مقادارها بسیار بیش‌تر از روش مبتنی بر سزیم-۱۳۷ است.

جدول ۱. مقادارهای توزیع مجدد خاک برحسب تن بر هکتار بر سال برای مدل موازنه‌ی جرم ۲ در روش‌های مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی

رادیونوکلید	دامنه‌ی فرسایش	میانگین فرسایش	میانگین ته‌نشینی	فرسایش ناخالص	ته‌نشست ناخالص	فرسایش خالص	نسبت باردهی ته‌نشست (درصد)
سزیم-۱۳۷	۰/۱-۴۴	۱۴/۲	۱۱/۱	۸/۸	۴/۲	۴/۶	۵۲
سرب-۲۱۰ اضافی	۵/۸-۶۲/۸	۳۳/۴	۲۱/۱	۲۰/۵	۸/۱	۱۲/۳	۶۰

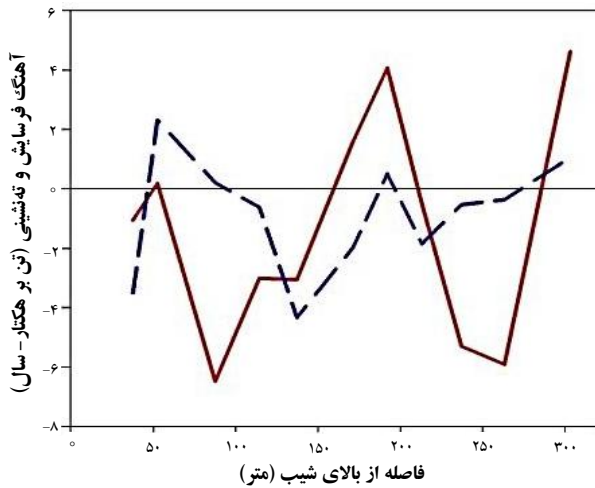


شکل ۴. نقشه‌ی آهنگ توزیع مجدد خاک (تن بر هکتار بر سال) برآورد شده به وسیله‌ی مدل موازنه‌ی جرم ۲ در روش‌های (الف) سزیم-۱۳۷ و (ب) سرب-۲۱۰ اضافی (مقدارهای منفی نشان‌دهنده‌ی فرسایش و مقدارهای مثبت نشان‌دهنده‌ی ته‌نشینی هستند).

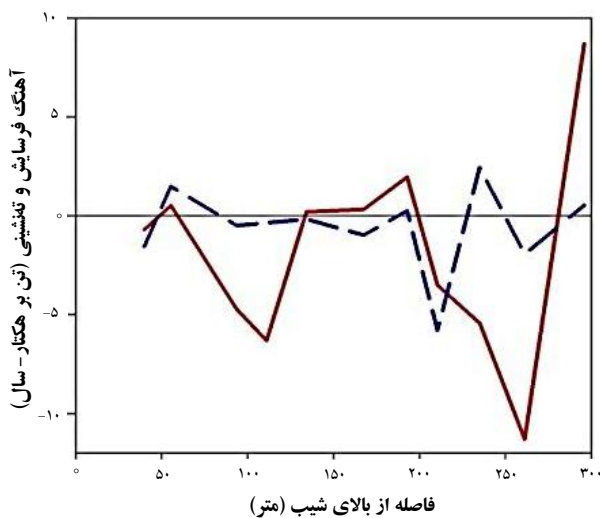
**۵.۳ مقایسه‌ی نتیجه‌های سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی**

در مجموع یک توافق کلی بین الگوهای توزیع مجدد خاک تعیین شده در طول ترانسکت‌ها با استفاده از دو رادیونوکلید مشاهده شد. لیکن میانگین ته‌نشینی در پایین شیب در روش مبتنی بر استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی به طور قابل ملاحظه‌ای بیش تر از روش مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ بود (شکل ۵). هم‌چنین مقدارهای میانگین فرسایش و ته‌نشینی برآورد شده توسط این دو روش با یکدیگر اختلاف قابل ملاحظه‌ای داشتند (جدول ۱). در این زمینه ژانگ و همکاران [۶] اظهار داشته‌اند که روش مبتنی بر استفاده از سزیم-۱۳۷ برآوردی از میانگین فرسایش از سال ۱۹۶۳ تا زمان نمونه‌برداری فراهم می‌نماید، در حالی که نتیجه‌های سرب-۲۱۰ اضافی بازتاب‌کننده دوره‌ی زمانی بسیار طولانی‌تری است. والینگ و همکاران [۲۱]، ژانگ و همکاران [۶] و گاسپر و همکاران [۸] تأیید نمودند بعید است که دو رادیونوکلید نتیجه‌های یکسانی ایجاد نمایند زیرا تغییرهای کاربری اراضی در دوره‌های زمانی مختلف تأثیرات مهمی داشته‌اند، هم‌چنین تغییرها در شدت بارندگی در دو دوره‌ی مختلف ممکن است تأثیرگذار باشد. به نظر می‌رسد که احداث ترانس‌های آبراهه‌ای در حدود ۴۰ سال پیش در منطقه‌ی مورد مطالعه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش مقدارهای فرسایش و ته‌نشینی داشته باشد. به علاوه در طول قرن اخیر ویژگی‌های نزول‌های آسمانی نیز تغییر نموده، که منجر به بیش‌تر شدن میانگین فرسایش در دوره‌ی زمانی ۱۰۰ ساله شده است. واکياما و همکاران [۲۵] نیز چنین عدم تطابقی را بین نتیجه‌های سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی در ژاپن گزارش نمودند. در مطالعه‌ی پرتو و والینگ [۳۲] و کاتو و همکاران [۱۲] آهنک فرسایش و ته‌نشینی برآورد شده با استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی بیش‌تر از سزیم-۱۳۷ بود. در هر حال باید این واقعیت را در نظر گرفت که نایقینی مربوط به اندازه‌گیری سرب-۲۱۰ اضافی (حدود ۳۰ درصد) بسیار بیش‌تر از اندازه‌گیری‌های سزیم-۱۳۷ (حدود ۴ درصد) است. در این ارتباط بن منصور و همکاران [۹] نایقینی اندازه‌گیری فعالیت سرب-۲۱۰ اضافی را بین ۱۵ تا ۳۵ درصد و سزیم-۱۳۷ را بین ۵ تا ۷ درصد گزارش کردند.

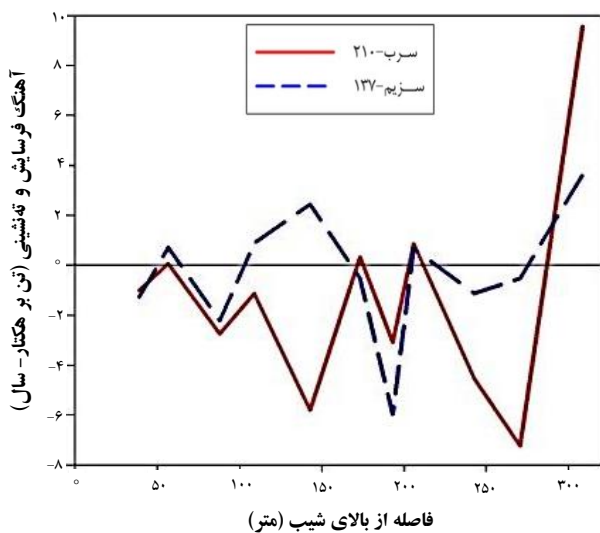
ترانسکت ۱



ترانسکت ۲



ترانسکت ۳



شکل ۵. آهنک فرسایش و ته‌نشینی برآورد شده (تن بر هکتار-سال) با استفاده از دو رادیونوکلید سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ اضافی در امتداد سه ترانسکت.



مرجع‌ها

- [1] L. Mabit, M. Benmansour, D.E. Walling, Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^7Be for assessing soil erosion and sedimentation, *Journal of Environmental Radioactivity*, 99 (2008) 1799–1807.
- [2] D.E. Walling, Y. Zhang, Q. He, Models for deriving estimates of erosion and deposition rates from fallout radionuclide (caesium-137, excess lead-210 and beryllium-7) measurements and the development of user-friendly software for model implementation, *Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality*, IAEA-TECDOC-1665. International Atomic Energy Agency Publication (2011) 11-33.
- [3] R.A. Robbins, Geochemical and geophysical application of radioactive lead, In: J.O. Nriagu, (Ed.), *The Biogeochemistry of Lead in the Environment*, Elsevier, Amsterdam (1978) 286–383.
- [4] Q. He, D.E. Walling, Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments, *Journal of Environmental Radioactivity*, 30 (1996) 117–137.
- [5] D.E. Walling, Q. He, Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land, *Soil Science Society American Journal*, 63 (1999) 1404–1412.
- [6] X. Zhang, Y. Qi, D.E. Walling, X. He, A. Wen, J. Fu, A preliminary assessment of the potential for using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurement to estimate soil redistribution rates on cultivated slopes in the Sichuan Hilly Basin of China, *Catena*, 68 (2006) 1-9.
- [7] D.E. Walling, A.L. Collins, H.M. Sickingabula, Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment, *Geomorphology*, 52 (2003) 193-213.
- [8] L. Gaspar, A. Navas, J. Machin, D.E. Walling, Using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements to quantify soil redistribution along two complex toposequences in Mediterranean agroecosystems, northern Spain. *Soil and Tillage Research*, 130 (2013) 81-90.

۴. نتیجه‌گیری

نتیجه‌های پژوهش حاضر، پیچیدگی فرایند توزیع مجدد خاک را روشن نموده و بر ضرورت توجه به تعداد زیادی از عامل‌ها شامل کاربری و مدیریت اراضی، جای‌نگاری و شدت بارندگی، در هنگام تفسیر الگوهای توزیع مجدد خاک در مقیاس زمانی و مکانی تأکید می‌کند. آهنگ‌های فرسایش و ته‌نشینی برآورد شده با استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی بیش‌تر از سزیم-۱۳۷ بود. زیرا سزیم-۱۳۷ تخمینی از میانگین فرسایش از سال ۱۹۶۳ تا زمان نمونه‌برداری را به دست می‌دهد در حالی که نتیجه‌های سرب-۲۱۰ اضافی، بازتابی از دوره‌ی زمانی بسیار طولانی‌تری است. تغییرهای کاربری و مدیریت اراضی و ویژگی‌های بارندگی در طول قرن گذشته در منطقه‌ی مورد مطالعه، تأثیرهای مهمی بر میزان فرسایش و رسوب برآورد شده با استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی گذاشته است. هر چند که استفاده‌ی موفقیت‌آمیز رادیونوکلید سرب-۲۱۰ اضافی در منطقه‌های مرطوب در منبع‌های مختلف ذکر شده است لیکن مطالعه‌های محدودی از استفاده از این رادیونوکلید در منطقه‌های خشک و نیمه خشک گزارش شده است. نتیجه‌های پژوهش حاضر امکان استفاده از سرب-۲۱۰ اضافی در منطقه‌های نیمه خشک را تأیید نمود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که سرب-۲۱۰ اضافی می‌تواند به عنوان جای‌گزین سزیم-۱۳۷ مورد استفاده قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

1. Supported ^{210}Pb
2. Excess or unsupported ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)
3. Buffer strips
4. Broad-base terraces
5. Contour farming
6. Incremental sampling
7. Scraper plate
8. Sediment delivery ratio (SDR)



- [9] M. Benmansour, L. Mabit, A. Nouira, R. Moussadek, H. Bouksirate, M. Duchemin, A. Benkdad, Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, *Journal of Environmental Radioactivity*, 115 (2013) 97-106.
- [10] L. Mabit, A. Klik, M. Benmansour, A. Toloza, A. Geisler, U.C. Gerstmann, Assessment of erosion and deposition rates within an Austrian agricultural watershed by combining ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and conventional measurements, *Geoderma*, 150 (2009) 231-239.
- [11] P. Porto, D.E. Walling, G. Callegari, Investigating the effects of afforestation on soil erosion and sediment mobilization in two small catchments in Southern Italy, *Catena*, 79 (2009) 181-188.
- [12] H. Kato, Y. Onda, Y. Tanaka, Using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements to estimate soil redistribution rates on semi-arid grassland in Mongolia, *Geomorphology*, 114 (2010) 508-519.
- [13] M. Gorji, H. Refahi, S. Shahooi, M. Ardalan, Effects of surface soil removal (erosion simulation) on crop yield and evaluation of fertilizer compensating effects, PhD thesis, University of Tehran, (2004).
- [14] F. Zapata, Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, The Netherlands (2002) 1-15.
- [15] B.L. Campbell, R.J. Loughran, G.L. Elliott, A method for determining sediment budgets using caesium-137, In M.P. Bordas, D.E. Walling, (Eds.), *Sediment budgets*. International Association of Hydrological Sciences Publication, 174 (1988) 171-179.
- [16] N.H. Cutshall, I.L. Larsen, C.R. Olsen, Direct analysis of ^{210}Pb in sediment samples: self-absorption corrections, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 206 (1-2) (1983) 309-312.
- [17] A.E.M. Khater, Y.Y. Ebaid, A simplified gamma-ray self-attenuation correction in bulk samples, *Applied Radiation and Isotopes*, 66 (3) (2008) 407-413.
- [18] E. Robu, C. Giovani, Gamma-ray self-attenuation corrections in environmental samples, *Romanian Reports in Physics*, 61 (2) (2009) 295-300.
- [19] D.E. Walling, Q. He, P.G. Appleby, Conversion models for use in soil-erosion, soil-redistribution and sedimentation investigations, In: F. Zapata, (Ed.), *Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation using Environmental Radionuclides*. Kluwer Ac. Publ., Dordrecht, The Netherlands (2002) 111-164 (Chapter 7).
- [20] D.E. Walling, Q. He, Using fallout Lead-210 measurements to estimate soil erosion in cultivated land, *Soil Science Society of America Journal*, 63 (1999) 1404-1412.
- [21] D.E. Walling, A.L. Collins, H.M. Sickingabula, Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment, *Geomorphology*, 52 (2003) 193-213.
- [22] H. Liu, D.J. Jacob, I. Bey, R.M. Yantosca, Constraints from Pb-210 and Be-7 on wet deposition and transport in a global three-dimensional chemical tracer model driven by assimilated meteorological fields, *Journal of Geophysical Research*, [Atmospheres] 106 (D11) (2001) 12109-12128.
- [23] K.K. Turekian, Y. Nozaki, L.K. Benniger, Geochemistry of atmospheric radon and radon products, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 5 (1977) 227-255.
- [24] X. Zhang, D.E. Walling, M. Feng, A. Wen, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ depth distribution in soil and calibration models for assessment of soil erosion rates from $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements, *Chinese Science Bulletin*, 48 (8) (2003) 813-818.
- [25] Y. Wakiyama, Y. Onda, S. Mizugaki, H. Asai, S. Hiramatsu, Soil erosion rates on forested mountain hillslopes estimated using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, *Geoderma*, 159 (2010) 39-52.
- [26] T. Fukuyama, Y. Onda, C. Takenaka, D.E. Walling, Investigating erosion rates within a Japanese cypress plantation using Cs-137 and Pb-210_{ex} measurements, *Journal of Geophysical Research*, 113 (2008) 1-15.



- [27] P. Porto, D.E. Walling, Validating the use of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements to estimate rates of soil loss from cultivated land in southern Italy, *Journal of Environmental Radioactivity*, 106 (2012) 47-57.
- [28] D.E. Walling, A.L. Collins, H.M. Sickingabula, Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment, *Geomorphology*, 52 (2003) 193-213.
- [29] C.A. Huh, C.C. Su, Distribution of fallout radionuclides (^7Be , ^{137}Cs , ^{210}Pb and $^{239, 240}\text{Pu}$) in soils of Taiwan, *Journal of Environmental Radioactivity*, 77 (1) (2004) 87-100.
- [30] P. Du, D.E. Walling, Using ^{210}Pb measurements to estimate sedimentation rates on river floodplains, *Journal of Environmental Radioactivity*, 103 (2012) 59-68.
- [31] J.A. Sánchez-Cabeza, M. Garcia-Talavera, E. Costa, V. Pena, J. Garcia-Orellana, C. Nalda, Regional calibration of erosion radiotracers (^{210}Pb and ^{137}Cs): Atmospheric fluxes to soils (N Spain), *Environ. Sci. Technol.* 41(4) (2007) 1324-1330.
- [32] P. Porto, D.E. Walling, Using plot experiments to test the validity of mass balance models employed to estimate soil redistribution rates from ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements, *Applied Radiation and Isotopes*, 70 (2012) 2451-2459.