

## Analysis of changes in soil erosion and sediment yield in the last century in Khamsan representative-paired watershed

Negin Ghaderi Dehkordi<sup>1</sup>, Abdulvahed Khaledi Darvishan<sup>2\*</sup>, Mohamad Reza Zare<sup>3</sup>  
and Paolo Porto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>4</sup> Professor, Department of Agraria, University Mediterranea of Reggio Calabria, Italy

Received: 25 June 2024

Accepted: 27 November 2024

### Introduction

Estimation of erosion and sedimentation using radionuclides is one of the methods used to provide erosion/sedimentation maps and calculate sediment budget components at time scales ranging from storm to annual and even long-term annual averages. Comparing the results of long-term average annual erosion/sedimentation with observed sediment values over recent decades can be used to investigate trends in erosion and sediment yield. This study compares the average intensity of soil erosion over two periods: 100–120 years and the last 60 years, using the isotopes  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ , respectively. By analyzing changes in erosion and sediment production trends over the past century, this research was conducted in the reference sub-watershed of the Khamsan representative-paired watershed.

### Materials and methods

Soil sampling was performed at 57 systematically random points across various land uses within the reference sub-watershed. Erosion and deposition intensities were estimated using the diffusion and transfer model for non-agricultural lands and Mass Balance Model II for agricultural lands. These calculations were based on the soil inventories of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  ( $\text{Bq m}^{-2}$ ) along with other relevant parameters. Erosion, stable, and deposition area maps were generated by comparing isotope inventories with reference areas. The spatial distribution of erosion and deposition intensities was then mapped using the working unit approach, and sediment budget components were quantified for the 100–120-year and 60-year periods.

### Results and discussion

The sediment budget analysis indicated that total soil erosion increased from 292.87 to 526.87 tons year<sup>-1</sup>, total deposition rose from 7.07 to 20.26 tons year<sup>-1</sup>, and net soil erosion (sediment yield) grew from 285.79 to 506.61 tons year<sup>-1</sup> over the two periods. The estimated average erosion intensity increased from 2.92 to 5.25 tons ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, while sediment production rose from 2.85 to 5.05 tons ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Additionally, the sediment delivery ratio (SDR) was 0.98 for the 100–120-year period and 0.96 for the last 60 years, indicating that the proportion of eroded soil retained within the watershed increased from 2% to 4% in recent decades.

### Conclusions

The findings demonstrate a significant increase in soil erosion intensity over the past 60 years compared to the 100–120-year period. The average total erosion, total deposition, and net erosion have approximately doubled, tripled, and doubled, respectively. Field observations suggest that this rise in erosion and sediment production is primarily due to intensified tillage operations in rain-fed agricultural lands, particularly on steep slopes, and the prevalence of contour-plowing practices. In addition to understanding the trend of erosion and sediment yield changes in the last century, the results of this study can also be used to predict future soil erosion condition in the watersheds.

**Keywords:** Erosion history, Erosion map, Sediment budget, Sediment delivery ratio, Sediment sourcing

\* Corresponding author: a.khaledi@modares.ac.ir

Cite this article: Ghaderi Dehkordi, N., Khaledi Darvishan, A., Zare, M.R., Porto, P., 2025. Analysis of changes in soil erosion and sediment yield in the last century in Khamsan representative-paired watershed. *Water. Eng. Manag.* 17(1), 1-13.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



## تحلیل تغییرات فرسایش خاک و تولید رسوب در یک قرن اخیر در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان

نگین قادری دهکردی<sup>۱</sup>، عبدالواحد خالدی درویشان<sup>۲</sup>، محمدرضا زارع<sup>۳</sup> و پائولو پورتو<sup>۴</sup>  
<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران  
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران  
<sup>۴</sup> استاد، گروه کشاورزی، دانشگاه مدیترانه رگیو کالابریا، ایتالیا

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از عناصر پرتوزا، یکی از روش‌هایی است که برای ارائه نقشه فرسایش/رسوب‌گذاری و محاسبه اجزای بودجه رسوب در مقیاس‌های زمانی رگبار تا سالانه و حتی متوسط سالانه بلند مدت استفاده می‌شود. مقیاسه نتایج حاصل از میانگین سالانه بلند مدت فرسایش/رسوب‌گذاری با مقادیر رسوب مشاهداتی دهه‌های اخیر می‌تواند برای بررسی روند تغییرات فرسایش و تولید رسوب مورد استفاده قرار گیرد. پژوهش حاضر با هدف مقایسه شدت متوسط فرسایش خاک در دوره‌های زمانی ۱۲۰-۱۰۰ و ۶۰ سال اخیر، به ترتیب با استفاده از هسته‌های پرتوزای سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ از طریق اندازه‌گیری و تحلیل روند تغییرات شدت متوسط فرسایش خاک و تولید رسوب در یک قرن اخیر در زیرحوزه آبخیز شاهد حوضه معرف-زوجی خامسان انجام شد.

#### مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری از خاک در زیرحوزه آبخیز شاهد با روش نظام‌مند-تصادفی در تعداد ۷۵ نقطه با پراکنش مناسب در کاربری‌های مختلف انجام شد. برای محاسبه شدت فرسایش/رسوب‌گذاری در هر نقطه، مدل پخش و انتقال برای اراضی غیرکشاورزی و مدل موازنه جرمی نوع II برای اراضی زراعی با استفاده از میزان موجودی سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در خاک بر حسب بکرل بر مترمربع و دیگر عامل‌های مورد نیاز اجرا شد. نقشه محدوده‌های فرسایش/پایدار/رسوب‌گذاری از طریق مقایسه موجودی سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ با مناطق مرجع تهیه شد. در نهایت، نقشه توزیعی متوسط شدت فرسایش/رسوب‌گذاری با استفاده از رهیافت واحد کاری تهیه شده و اجزای بودجه رسوب به ترتیب برای متوسط ۱۲۰-۱۰۰ سال اخیر با استفاده از سرب-۲۱۰ و متوسط ۶۰ سال اخیر با استفاده از سزیم-۱۳۷ محاسبه شد.

#### نتایج و بحث

مقایسه نتایج بودجه‌بندی رسوب در زیرحوزه آبخیز مورد مطالعه حاصل از دو روش سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ نشان داد که در دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال و ۶۰ سال اخیر متوسط فرسایش خاک کل به ترتیب ۲۹۲/۸۷ و ۵۲۶/۸۷ تن در سال، متوسط رسوب‌گذاری کل به ترتیب ۷/۰۷ و ۲۰/۲۶ تن در سال و متوسط فرسایش خاک خالص (رسوب‌دهی) به ترتیب ۲۸۵/۷۹ و ۵۰۶/۶۱ تن در سال بوده است. در دو دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ و ۶۰ سال اخیر متوسط شدت فرسایش به ترتیب ۲/۹۲ و ۵/۲۵ تن بر هکتار در سال و تولید رسوب به ترتیب ۲/۸۵ و ۵/۰۵ تن بر هکتار در سال برآورد شد. همچنین، نسبت تحویل رسوب زیرحوزه آبخیز مورد بررسی در دوره‌های زمانی ۱۲۰-۱۰۰ و ۶۰ سال اخیر

به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۹۶ بود. به عبارت دیگر، در دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال به طور متوسط تنها دو درصد از خاک فرسایش یافته مجدداً در سطح زیرحوزه آبخیز توزیع شده است و در دوره زمانی ۶۰ سال اخیر این مقدار به چهار درصد رسیده است.

### نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده و تحلیل تغییرات فرسایش خاک و تولید رسوب زیرحوزه آبخیز شاهد در حوزه آبخیز معرف خامسان با روش هسته‌های پرتوزا می‌توان بیان کرد که به طور کلی از ۱۲۰-۱۰۰ سال گذشته تا به امروز شدت فرسایش در سطح آبخیز افزایش یافته است. نتایج نشان داد که متوسط فرسایش کل، متوسط رسوب گذاری کل و متوسط فرسایش خالص در دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال اخیر نسبت به دوره زمانی ۶۰ سال اخیر به ترتیب حدود دو برابر، سه برابر و دو برابر افزایش پیدا کرده است. با بازدیدهای میدانی از زیرحوزه آبخیز مورد مطالعه مشخص شد که افزایش فرسایش و تولید رسوب در ۶۰ سال اخیر عمدتاً به دلیل تمرکز بیشتر عملیات خاک‌ورزی در کاربری کشاورزی دیم به ویژه در اراضی شیب‌دار و شخم در جهت شیب رخ داده است. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند علاوه بر درک روند تغییرات فرسایش و تولید رسوب در یک قرن اخیر، برای پیش‌بینی وضعیت فرسایش خاک آینده در حوزه‌های آبخیز نیز مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** بودجه رسوب، تاریخچه فرسایش، منشأیابی رسوب، نسبت تحویل رسوب، نقشه فرسایش

### مقدمه

(Onyando et al., 1997). همچنین، فرسایش خاک یکی از شاخص‌های مهم تغییر کیفیت محیط‌زیست (Deal, 2004) و از مهم‌ترین مشکلات اقتصادی و محیط‌زیستی بسیاری از کشورهای در حال توسعه است (Babcock, 1996). تخمین میزان فرسایش خاک و بار رسوب در حوزه‌های آبخیز از جمله مهم‌ترین اطلاعاتی هستند که برای عملیات حفاظت خاک و آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به دلیل مشکلات و محدودیت‌های موجود در روش‌ها و مدل‌های برآورد فرسایش خاک و رسوب، استفاده از روشی که بتواند با کمترین هزینه و صرف وقت، با دقت بالا و به سهولت میزان فرسایش و رسوب را برآورد کند، بسیار مهم به نظر می‌رسد. روش‌های متعددی برای برآورد فرسایش و رسوب و سهم منابع مختلف در فرسایش وجود دارد. روش برآورد فرسایش و رسوب با استفاده از هسته‌های پرتوزا به عنوان روشی با کارایی بالا مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است.

سرب-۲۱۰ یک هسته پرتوزای طبیعی با نیمه عمر ۲۲/۳ سال و منشأ زمین‌شناسی و بخشی از سری تجزیه اورانیوم-۲۳۸ است که در خاک و در جو زمین به سرب-۲۱۰ تجزیه می‌شود (Preiss et al., 1996)؛ (Mabit et al., 2008) که می‌توان از سرب-۲۱۰ برای

خاک یک منبع طبیعی ارزشمند است که عملکردهای حیاتی اکوسیستم را انجام می‌دهد و بسیاری از کالاها و خدمات محیط‌زیستی با ارزش مانند مواد غذایی، تولید الیاف و سوخت، ترسیب کربن، تنظیم آب و تأمین زیستگاه را فراهم می‌کند (Swinton et al., 2007; Costanza et al., 1997).

پیش‌بینی می‌شود طی قرن اخیر، تغییرات طبیعی خاک بسیار کم و دگرگونی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی شدید، عمدتاً منفی و کنترل‌ناپذیر باشند (Urushadze, 2002). این در حالی است که زمان بسیاری از خاک تا سطح اندکی از خاک تشکیل شود. فرسایش خاک، فرایند پیچیده‌ای است که در اثر جریان‌های طبیعی آب و باد ایجاد و به علت فعالیت‌های انسانی مانند از بین بردن گیاهان پوششی خاک، شهرنشینی گسترده، آتش‌سوزی جنگل‌ها، بهره‌برداری بی‌رویه از اراضی و برخی شرایط طبیعی زمین مانند توپوگرافی (شیب و ارتفاع زمین) و ویژگی‌های خاک (بافت، ساختار، رطوبت، سختی و مواد آلی) تسریع می‌شود (Sui et al., 1997).

فرسایش باعث از بین رفتن حاصلخیزی خاک، کاهش ظرفیت ذخیره، کاهش جریان آب پایین دست و از بین رفتن تنوع گیاهان و آبریان می‌شود

کردند. نتایج نشان داد نقشه‌های حاصل از استفاده از هر دو هسته پرتوزا مشابه بودند که نشان می‌دهد، فرایندهای فرسایش خاک در طول ۱۰۰ سال گذشته تغییر قابل توجهی نداشته است. در پژوهش دیگری توسط Cao et al., (2020) ویژگی مغناطیسی و کربن آلی خاک برای بررسی روند تغییرات فرسایش خاک استفاده شد که نتیجه گرفتند که با این ترکیب می‌توان تغییرات هدررفت خاک طی سال‌های ۱۹۵۴ تا دوره حاضر را مشخص و تفسیر کرد.

در همین راستا، Yuan et al., (2021) شدت توزیع مجدد خاک در یک حوزه آبخیز کوچک در نپال را با استفاده از روش‌های سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ مورد ارزیابی قرار دادند. نه شیب معرف تحت سه کاربری و یک منطقه مرجع از اراضی جنگلی با شیب ملایم در حوضه به‌عنوان قطعه نمونه انتخاب شدند. سپس، در هر قطعه نمونه یک ترانسکت در راستای شیب اصلی در نظر گرفته شد و نمونه‌های خاک در فواصل پنج متری در طول ترانسکت‌ها برداشت شد. نتایج نشان داد که تغییرات مکانی در شدت فرسایش خاک اندازه‌گیری شده با شدت فرسایش خاک حاصل از روش‌های سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ مطابقت دارد.

نکته جالب در زمینه کاربرد هم‌زمان سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ این است که با توجه به تعمیم میانگین ارائه شده برای فرسایش و رسوب به ترتیب ۱۰۰-۱۲۰ سال و ۶۰ سال می‌تواند به منظور مقایسه تاریخچه فرسایش و روند تغییرات زمانی آن مورد استفاده قرار گیرد (Mabit et al., 2008؛ Benmansour et al., 2013). لذا، با توجه به مطالب فوق در پژوهش حاضر تلاش شد که با مقایسه و تحلیل نتایج سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷، روند تغییرات شدت متوسط فرسایش خاک و تولید رسوب در بیش از یک قرن اخیر در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان در استان کردستان مد نظر قرار داده شده است.

#### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان با مساحت ۴۳۳۶ هکتار در جنوب استان کردستان و ۲۵ کیلومتری شمال کامیاران واقع شده است (Khaledi Darvishan et al., 2021). پژوهش

تعیین شدت بلندمدت فرسایش خاک به‌طور متوسط برای دوره زمانی ۱۰۰-۱۲۰ سال، با توجه به منابع مختلف که اعداد متفاوتی از بیش از ۸۰ سال (Dowell et al., 2024) تا ۱۵۰ سال (Chen et al., 2019) ذکر شده، در نظر گرفت. سزیم-۱۳۷ نیز یک هسته پرتوزای مصنوعی با نیمه عمر ۳۰/۱ سال است که در نتیجه فعالیت‌های هسته‌ای در سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰ به‌وجود آمده و همراه با بارش وارد خاک شده است.

بنابراین، بازه زمانی متوسط برای برآوردهای فرسایش خاک با استفاده از سزیم-۱۳۷ در حال حاضر حدود ۶۰ سال در نظر گرفته می‌شود. اولین پژوهش‌ها برای تخمین فرسایش خاک با استفاده از هسته‌های پرتوزا توسط Menzel در سال ۱۹۶۰ و اولین پژوهش‌ها با استفاده از روش سزیم-۱۳۷ توسط Ritchie et al., (1973) و Rogowsky et al., (1960) انجام شد که ضمن دارا بودن قابلیت ارائه نقشه توزیعی فرسایش و رسوب، در سراسر جهان برای ردیابی رسوبات و تغییرات آن و تهیه نقشه فرسایش و رسوب به رسمیت شناخته شده است (Walling and He, 1999).

سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ به سرعت جذب ذرات زیر افق خاک سطحی از جمله ذرات رس و ماده آلی خاک می‌شوند (Walling and Quine, 1991)، لذا، می‌توانند به عنوان شاخصی برای کم شدن و یا افزوده شدن خاک در یک نقطه مد نظر قرار گیرند تعدادی از پژوهشگران (Porto et al., 2009؛ Abbaszadeh Navas et al., 2011؛ Afshar et al., 2010؛ Gaspar et al., 2013؛ Ayoubi et al., 2012؛ Zhang et al., 2019؛ Bazshoushtari et al., 2016؛ Sedighi et Mouri, 2020؛ Gharibreza et al., 2020؛ Hancock et al., 2024؛ al., 2022) از یکی از هسته‌های پرتوزای سرب-۲۱۰ یا سزیم-۱۳۷ به‌عنوان یک ردیاب به‌منظور اندازه‌گیری شدت متوسط فرسایش خاک استفاده کردند.

Benmansour et al., (2013) شدت متوسط فرسایش و رسوب بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه مدت را با استفاده ترکیبی از سرب-۲۱۰، سزیم-۱۳۷ و نتایج مدل <sup>2</sup>RUSLE در مناطق کشاورزی مدیترانه بررسی

درجه سانتی‌گراد در کوره خشک شد. سپس نمونه‌ها توزین و از الک دو میلی‌متر عبور داده شد. پس از آن در آسیاب صنعتی خرد شده در نهایت از الک ۶۳ میلی‌متر عبور داده شد (Chiu et al., 2011).

مقدار ۲۹۳ گرم در ظروف مخصوص قرار داده و کدگذاری شد و در نهایت نمونه‌ها به منظور طیف‌نگاری و اندازه‌گیری فعالیت سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در آزمایشگاه انستیتو فیزیک کاربردی با آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص ارسال شد. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های خاک و رسوب در آزمایشگاه در شکل ۲، ارائه شده است.

سپس میزان تجمعی سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در نیم‌رخ خاک برحسب فعالیت در واحد جرم خاک (بکرل بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شد. برای محاسبه فرسایش/رسوب‌گذاری، میزان فعالیت بر حسب بکرل بر کیلوگرم با استفاده از رابطه (۱) به موجودی سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در خاک بر حسب بکرل بر مترمربع (Walling et al., 2003) تبدیل شد.

$$CPI = \sum Ci.Bi.Di.10^3 \quad (1)$$

که در آن،  $Ci$  فعالیت سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در خاک (بکرل بر کیلوگرم) همان مقدار اندازه‌گیری شده هر نمونه در آزمایشگاه،  $Bi$  جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)،  $Di$  عمق نمونه‌برداری (متر) برابر با ۰/۲۵ متر و  $CPI$  میزان موجودی سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در خاک (بکرل بر مترمربع) است.

برای ایجاد رابطه بین تغییر در مقدار هسته‌های پرتوزا با مقدار خاک جابجا شده از مدل پخش و انتقال (Diffusion and migration model) برای اراضی غیرکشاورزی (خاک دست‌نخورده) و مدل موازنه جرمی نوع II (Mass balance model II) برای اراضی زراعی استفاده شد (Sedighi et al., 2014; Walling et al., 2014) که در آنها موجودی عنصر پرتوزا در خاک عرصه با منطقه مرجع مقایسه شد (Zapata, 2003; Arata et al., 2016). آژانس بین‌المللی انرژی اتمی یک بسته ماکرو مبتنی بر نرم‌افزار Excel برای تبدیل موجودی عنصر پرتوزا به توزیع مجدد خاک، از طریق استفاده از مدل‌های مختلف طراحی نموده است.

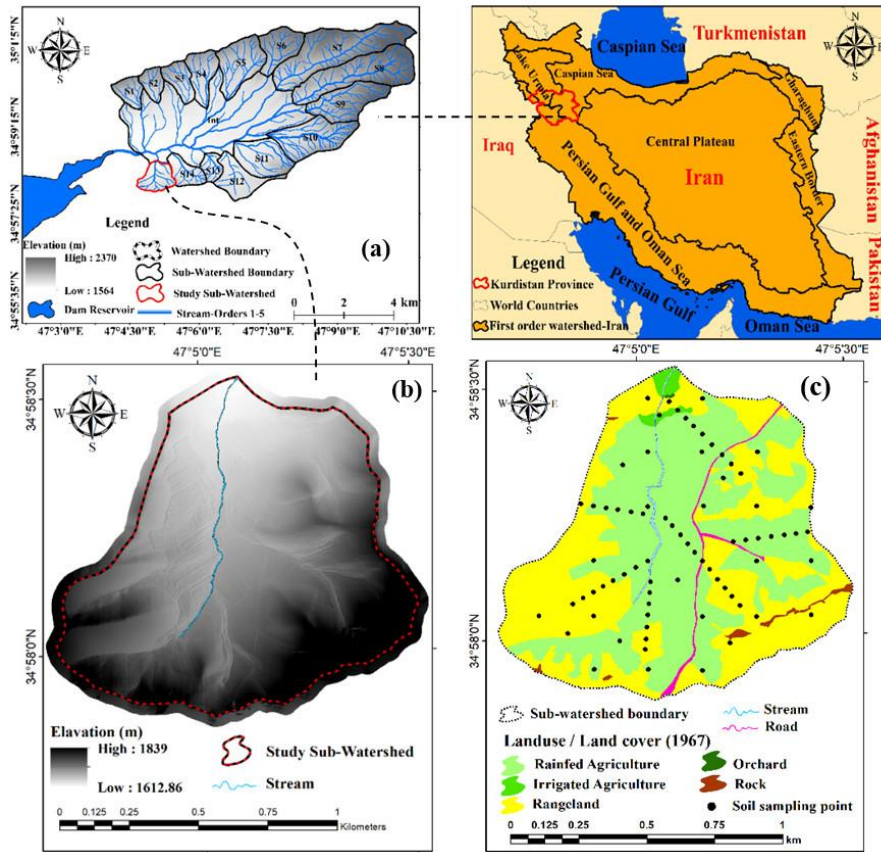
حاضر در زیرحوزه آبخیز شاهد واقع در جنوب غرب حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان انجام شد و دلیل نام‌گذاری این زیرآبخیز این است که هیچ‌گونه عملیات آبخیزداری در آن انجام نشده است.

بر اساس مدل رقومی ارتفاع با حاصل از پهباد فتوگرامتری، زیرحوزه آبخیز شاهد با مساحت حدود ۱۰۲/۱۴ هکتار، شیب متوسط ۲۸ درصد و ارتفاع متوسط ۱۷۱۲ متر از سطح آب‌های آزاد، در موقعیت جغرافیایی ۳۹° ۴' ۴۷" تا ۳۱° ۵' ۴۷" طول شرقی و ۵۲° ۵۷' ۳۴" تا ۳۳° ۵۸' ۳۴" عرض شمالی قرار گرفته است. بر اساس داده‌های ایستگاه اقلیم‌شناسی خامسان، میانگین دما و بارش سالانه در این محدوده به ترتیب ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد و ۴۲۸ میلی‌متر است.

زیرحوزه آبخیز شاهد در حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان دارای چهار نوع کاربری/پوشش اراضی باغ، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مرتع است. همچنین فرسایش غالب در این زیرحوزه آبخیز و کل حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان از نوع فرسایش سطحی است (Sedighi et al., 2021, 2022).

**بودجه‌بندی رسوب با استفاده از روش سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷:** برای توجه به اثر همزمان کاربری/پوشش اراضی و جهت شیب برای اندازه‌گیری دقیق فرسایش و رسوب‌گذاری نمونه‌برداری از خاک در زیرحوزه آبخیز شاهد با روش نظام‌مند-تصادفی (Walling et al., 2014) انجام شد. برای این منظور در یک شبکه ۲۰۰ متری همراه با تعدادی نمونه اضافی برای پوشش بهتر کاربری‌ها/پوشش‌های مختلف اراضی در نهایت تعداد ۳۱ نمونه خاک و همچنین تعداد ۴۴ نمونه نیز در شش مسیر هم‌راستا با شیب اصلی دامنه‌ها مکان‌یابی شد که در نهایت تعداد ۷۵ نمونه خاک در سطح زیرحوزه آبخیز شاهد برداشت شد.

به‌منظور برداشت نمونه‌های لایه‌ای خاک از یک مکعب نمونه‌برداری به نام اسکاتریلات (Scotter plot) به ابعاد ۲۰×۴۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و برای برداشت نمونه‌های عمقی خاک از اوگر (Auger) با ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر و مقطع دایره‌ای با قطر هشت سانتی‌متر استفاده شد. هر نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵



شکل ۱- موقعیت زیرحوزه آبخیز شاهد حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان در استان کردستان و کشور ایران (a)، مدل رقومی ارتفاع (b) و نقشه کاربری اراضی (c)

Fig. 1. The surface below the control sub-watershed of Khamasan representative-paired watershed in Kurdistan Province and Iran (a), digital elevation model (b) and land use map (c)



شکل ۲- مراحل آماده‌سازی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه: a: قرار دادن نمونه در کوره، b: توزین نمونه، c: آسیاب و عبور از الک ۶۳ میلی‌متری، d: قرار دادن نمونه‌ها در ظروف نگین

Fig. 2. Preparation steps of soil samples in the laboratory, a: placing the sample in the oven, b: weighing the sample, c: grinding and passing through a 63 mm sieve, d: placing the samples in precious containers

سزیم-۱۳۷ به مقادیر فرسایش و رسوب‌گذاری استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز برای استفاده از نرم‌افزار مذکور بر اساس هر یک از دو مدل انتخاب شده در جدول ۱ و ویژگی‌های توصیفی سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ در جدول ۲ نشان داده شده است.

این نرم‌افزار در ابتدا برای سزیم-۱۳۷ تهیه شد و سپس برای استفاده از برلیوم-۷ و سرب-۲۱۰ نیز در دسترس قرار گرفت (Walling, He and Walling, 2003). در مطالعه حال حاضر (Arata et al., 2016 et al., 2014). در مطالعه حال حاضر از نرم‌افزار مذکور برای تبدیل موجودی سرب-۲۱۰ و

جدول ۱- اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل‌های تبدیل

Table 1. information required to run transformation models

Transformation model	Model inputs
Mass balance model II	Year of Tillage Commencement, Bulk density of soil, Tillage depth
Diffusion and migration model	Proportion factor (Y), Relaxation depth (H), Migration rate (V), Annual fallout of radionuclide

جدول ۲- ویژگی‌های توصیفی سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰ در منطقه مورد مطالعه

Table 2. Descriptive characteristics of <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> in the study area

Feature	<sup>137</sup> Cs	<sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub>
Reference inventory (Bq m <sup>-2</sup> )	2542	6465
Minimum (Bq m <sup>-2</sup> )	215	2278
Maximum (Bq m <sup>-2</sup> )	4247	9836
Range (Bq m <sup>-2</sup> )	4033	7557
Mean (Bq m <sup>-2</sup> )	1806	6144
Median (Bq m <sup>-2</sup> )	1752	6383
Standard deviation (Bq m <sup>-2</sup> )	813	1525

کاری برای تعمیم نقاط نمونه‌برداری به سطح براساس مرز کاربری‌ها استفاده شد. در این مرحله نقشه واحدهای کاری از هم‌پوشانی نقشه کاربری اراضی و شیب در نرم‌افزار ArcMap تهیه شد. نقشه کاربری اراضی سال ۱۹۶۷ از عکس‌های هوایی سال ۱۳۴۶ (۵۴ سال قبل) موجود در سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری استفاده شد.

عکس‌های هوایی ابتدای اسکن و پس از آن در نرم افزارهای ArcMap10.3.1 و Google Earth زمین‌مرجع شد و نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲۱ از تصاویر برداشت شده توسط پهپاد فتوگرامتری و رقومی کردن در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. سپس نقشه شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی یک متر حاصل پهپاد فتوگرامتری تهیه شد.

سپس فرسایش/رسوب‌گذاری هر نقطه نمونه‌برداری با نقشه‌های واحد کاری (۱۹۶۷-۲۰۲۱) تلفیق و به نقشه توزیعی فرسایش/رسوب‌گذاری تبدیل شد. با در نظر گرفتن نقشه‌های حاصل از سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ به ترتیب برای دوره‌های زمانی ۱۲۰-۱۰۰ و ۶۰ سال اخیر، اجزای بودجه رسوب شامل فرسایش کل یا ناخالص، رسوب‌گذاری کل، فرسایش خالص و نسبت تحویل رسوب با استفاده از ابزار Zonal در نرم‌افزار ArcMap محاسبه شد.

برای این منظور، مساحت هر چندضلعی در حالت‌های فرسایشی، پایدار و یا رسوب‌گذاری در ارزش عددی فرسایش/رسوب‌گذاری آن ضرب شد. سپس جمع اعداد مثبت به‌عنوان رسوب‌گذاری کل و جمع

پس از تبدیل موجودی سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در خاک بر حسب بکرل بر مترمربع به مقادیر فرسایش/رسوب‌گذاری (Walling et al., 2003)، با بسته ماکرو مبتنی بر نرم‌افزار Excel که توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی طراحی شده است، داده‌های خروجی مدل‌های تبدیل که شامل مقادیر منفی و مثبت است، به‌منظور تعیین محدوده فرسایش/رسوب‌گذاری به‌ترتیب از رابطه‌های (۲) و (۳) استفاده شد.

$$(2) \text{ فرسایش} = \text{Mean} - 95\% \text{ confidence interval} = \text{مرز پایدار و}$$

$$(3) \text{ رسوب‌گذاری} = \text{Mean} + 95\% \text{ confidence interval} = \text{مرز پایدار و}$$

در این رابطه‌ها، Mean میزان میانگین موجودیت سرب-۲۱۰ و موجودیت سزیم-۱۳۷ و confidence interval ۹۵ درصد نیز فاصله اعتماد در سطح ۹۵ درصد با پذیرش خطای ۱۰ درصد بین موجودیت سرب-۲۱۰ و موجودیت سزیم-۱۳۷ در نقاط منطقه مرجع را نشان می‌دهد. همچنین محدوده‌ای بینابین محدوده فرسایش/رسوب‌گذاری به‌عنوان محدوده پایدار با این مفهوم که نشان‌دهنده برابری نسبی دو فرایند فرسایش و رسوب‌گذاری در طول زمان است (Walling et al., 2014)، در نظر گرفته شد.

داده‌های خروجی مدل‌های تبدیل در حقیقت نشان‌دهنده حالت‌های فرسایشی، پایدار و یا رسوب‌گذاری در هر نقطه نمونه‌برداری است. لذا، به‌منظور تهیه نقشه توزیعی فرسایش و رسوب حوضه از این داده‌های نقطه‌ای و برای تهیه نقشه فرسایش/رسوب از روش واحدهای



سال برآورد شده است که در تطابق نسبی با برآوردهای حاصل از مدل RUSLE برای سال‌های آبی ۱۳۹۴-۹۵ و ۱۳۹۶-۹۷ حاصل پژوهش‌های قبلی (Khaledi Darvishan et al., 2021) در همین زیرحوزه آبخیز است.

نتایج محاسبات بودجه‌بندی رسوب با استفاده از نقشه توزیعی متوسط شدت فرسایش/رسوب‌گذاری و محاسبه اجزای بودجه رسوب نیز با استفاده سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ در جدول ۳، ارائه شده است. مقایسه نتایج بودجه‌بندی فرسایش/رسوب‌گذاری برای دوره‌های زمانی ۱۲۰-۱۰۰ و ۶۰ سال اخیر نشان داد که متوسط فرسایش کل، متوسط رسوب‌گذاری کل و متوسط فرسایش خالص در دوره زمانی ۶۰ سال اخیر نسبت به دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال اخیر به ترتیب حدود دو برابر، سه برابر و دو برابر افزایش پیدا کرده است. همچنین، نسبت تحویل رسوب در دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال اخیر ۰/۹۸ درصد و در دوره زمانی ۶۰ سال اخیر ۰/۹۶ درصد برآورد شد.

اعداد منفی نیز به‌عنوان فرسایش کل در نظر گرفته شده و فرسایش خالص از کسر رسوب‌گذاری کل از فرسایش کل محاسبه شد. همچنین نسبت تحویل رسوب از تقسیم فرسایش خالص بر فرسایش ناخالص یا کل محاسبه شد (Sedighi et al., 2022).

در ادامه مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، مساحت و انحراف معیار فرسایش/رسوب‌گذاری برای هر یک از کاربری‌ها با استفاده از نقشه فرسایش/رسوب‌گذاری تهیه شده با روش رهیافت واحدکاری برای کل زیرحوزه آبخیز شاهد و ابزار Zonal در نرم‌افزار ArcMap استخراج و درنهایت با استفاده از میانگین فرسایش/رسوب‌گذاری و مساحت محدوده‌های فرسایش، پایدار و رسوب‌گذاری اجزای بودجه رسوب در هر یک از کاربری‌ها محاسبه شد.

### نتایج و بحث

نتایج نشان داد که متوسط فرسایش خاک در زیرآبخیز شاهد با استفاده از روش سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷ به ترتیب ۲/۹۲ و ۵/۲۵ تن در هکتار بر

جدول ۳- نتایج بودجه‌بندی رسوب زیرحوزه‌آبخیز شاهد حوزه آبخیز معرف-زوجی خامسان به روش سرب-۲۱۰ و سزیم-۱۳۷

Table 2. Results of budgeting control sub-watershed of Khamsan representative-paired watershed using  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $^{137}\text{Cs}$  methods

Sediment budget components	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ method	$^{137}\text{Cs}$ method	Change (%)
Gross erosion ( $\text{t y}^{-1}$ )	-292.87	-526.87	$\approx +80$
Specific gross erosion ( $\text{t ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )	-2.92	-5.25	
Gross sedimentation ( $\text{t y}^{-1}$ )	7.08	20.26	$\approx +186$
Specific gross sedimentation ( $\text{t ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )	0.07	0.20	
Sediment yield ( $\text{t y}^{-1}$ ) = Net erosion	-285.80	-506.61	$\approx +77$
Specific net erosion ( $\text{t ha}^{-1} \text{y}^{-1}$ )	-2.85	-5.05	
Sediment delivery ratio	0.98	0.96	$\approx -2$

فرسایش و بازتوزیع رسوب در سطح آبخیز و در نهایت افزایش انتقال و تحویل رسوب به خروجی آبخیز مورد مطالعه است.

شواهد نشان می‌دهد که افزایش کاربری کشاورزی دیم و تخریب اراضی و به‌ویژه شخم در جهت شیب یکی از مهم‌ترین دلایل افزایش متوسط فرسایش در دهه‌های اخیر است که توسط بسیاری از پژوهشگران (Walling, 1999؛ Dedkov and Mozzherin, 1992؛ Gellis et al., 2006؛ Zhou et al., 2008؛ Szilassi et al., 2010؛ Moustakim et al., 2016؛ Moradi et al., 2010؛ Gharibreza et al., 2019؛ Aneseyee et al., 2020؛ Sedighi et al., 2020, 2021؛ Mohammadi et al., 2021)

تحلیل تغییرات اجزای بودجه رسوب در دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال نسبت به ۶۰ سال گذشته نشان داد که متوسط فرسایش کل ویژه، متوسط رسوب‌گذاری کل ویژه و متوسط فرسایش خالص ویژه به ترتیب حدود ۸۰ درصد، ۱۸۶ درصد و ۷۷ درصد افزایش و همچنین نسبت تحویل رسوب دو درصد کاهش یافته است.

با توجه به این نتایج فرسایش نسبت به گذشته بیشتر رخ می‌دهد و رسوب بیشتری هم از زیرآبخیز خارج می‌شود و به‌همین دلیل نسبت تحویل رسوب تقریباً ثابت مانده است. به بیان دیگر، نتایج مربوط به تمامی اجزای بودجه‌بندی رسوب نشان‌دهنده افزایش

کشاورزی دیم در پایین دست دامنه‌های مرتعی است. با استفاده از این نتایج تصویر نسبتاً روشنی از رویدادهای درون زیرحوزه آبخیز در یک قرن اخیر به دست آمده است.

### نتیجه‌گیری

ردیاب‌های رادیونوکلوئید جزء قوی‌ترین ردیاب‌ها برای تعیین منابع رسوب و ردیابی نرخ فرسایش هستند، شناخت روند تغییرات وضعیت فرسایش برای بهینه‌سازی مدیریت خاک و آب در آینده ضروری است. لذا در پژوهش حاضر با توجه به نتایج به دست آمده و تحلیل تغییرات فرسایش خاک و تولید رسوب زیرآبخیز شاهد در حوزه آبخیز معرف خامسان با روش هسته‌های پرتوزا می‌توان بیان کرد که به‌طور کلی از ۱۲۰-۱۰۰ سال گذشته تا به امروز شدت فرسایش افزایش و بازتوزیع رسوب در سطح آبخیز کاهش یافته است. نتایج نشان داد که متوسط فرسایش کل، متوسط رسوب‌گذاری کل و متوسط فرسایش خالص در دوره زمانی ۱۲۰-۱۰۰ سال اخیر نسبت به دوره زمانی ۶۰ سال اخیر به ترتیب حدود دو برابر، سه برابر و دو برابر افزایش پیدا کرده است.

با بازدیدهای میدانی از زیرحوزه آبخیز مورد مطالعه مشخص شد که افزایش تولید رسوب در کشاورزی دیم به دلیل تخریب اراضی و برهم‌خوردگی خاک در اثر عملیات خاکورزی و کشت که گام نخست در فروپاشی خاک است. همچنین تغییر کاربری اراضی مرتعی به زمین‌های کشاورزی دیم به‌ویژه در مناطق پرشیب‌تر عموماً موجب تشدید فرسایش خاک می‌شود. لذا ضرورت توجه و اهمیت بیشتر در تغییر کاربری و تدوین برنامه‌های مدیریتی و اصلاح کاربری اراضی با توجه به قابلیت‌های منطقه مورد مطالعه و اقدامات هدفمند حفاظت از منابع خاک و آب برای آیندگان احساس می‌شود. از جمله دلایل احتمالی افزایش متوسط شدت فرسایش در دوره ۶۰ سال اخیر نسبت به دوره ۱۲۰-۱۰۰ سال اخیر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی دیم همراه با شخم اراضی در جهت شیب (که قبلاً اشاره شد)

Qian et al., Khodamoradi et al., 2023؛ al., 2021 (2024) نیز تأکید شده است.

لازم به ذکر است که در بخش قابل توجهی از کاربری مرتع که به‌عنوان محدوده پایدار شناسایی شده است نیز فرسایش خاک اتفاق افتاده است، اما شدت فرسایش کم بوده و با توجه به معیار فاصله اعتماد در سطح ۹۵ درصد، این بخش‌ها به‌عنوان محدوده پایدار قلمداد شده و در محاسبات سهم فرسایش و یا رسوب‌گذاری دخیل نبود است. همچنین در کاربری‌های زراعت آبی و باغ شامل محدوده‌ای کم‌شیب و کوچک در نزدیکی خروجی زیرحوزه آبخیز نیز شدت فرسایش کم بوده و هر دو کاربری در نقشه فرسایش/رسوب‌گذاری نهایی به‌عنوان محدوده پایدار لحاظ شدند و طبعاً سهمی در فرسایش زیرآبخیز نداشتند. با توجه به نتایج به دست آمده بیشترین سهم در تولید رسوب به دلیل انجام عملیات خاکورزی (شخم) در راستای شیب در دامنه‌ها متعلق به کاربری کشاورزی دیم است و محدوده فرسایشی قلمداد می‌شود.

مهم‌ترین دلیل برای کاهش متوسط رسوب‌گذاری کل زیرحوزه آبخیز در سال‌های اخیر را می‌توان به کاهش بارندگی در این محدوده از کشور (Eblaghian et al., 2019)، افزایش شخم اراضی تا حاشیه آبراهه اصلی زیرحوزه آبخیز و در نتیجه کاهش رواناب نسبت داد. در حوزه آبخیز معرف خامسان از مقایسه مقادیر عددی اجزای بودجه رسوب در ۱۲۰-۱۰۰ و ۶۰ سال اخیر، محدوده‌های فرسایش/پایدار/رسوب‌گذاری به منظور بررسی تاریخچه فرسایش زیرآبخیز شاهد شناسایی شد.

نتایج نشان داد که از ۱۲۰-۱۰۰ سال گذشته نسبت به دوره ۶۰ سال اخیر میزان فرسایش و رسوبدهی در این زیرآبخیز افزایش داشته است. نکته مهم افزایش توزیع مجدد رسوب در این دوره زمانی است که به دلیل امتداد شخم تا پای دامنه‌ها و شکست ناگهانی شیب است که منجر به تله‌اندازی رسوب حاصل از فرسایش مراتع بالادست اراضی کشاورزی دیم است. تصاویر دقیق پهپاد و مدل رقومی ارتفاع تهیه شده با دقت مکانی یک متر برای زیرحوزه آبخیز نیز کاملاً نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی شیب در لبه‌های اراضی

برای کمک در آماده‌سازی نمونه‌های خاک در آزمایشگاه قدردانی نمایند.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

- تغییر رژیم و نوع بارش در دهه‌های اخیر به سمت کاهش شدید ضریب برف و افزایش بارندگی و رواناب - تخریب و کاهش پوشش گیاهی در اراضی مرتعی

### تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از آقای حمید خدامرادی برای کمک در نمونه‌برداری خاک و آقای رضا زارعی و خانم‌ها نبیه کریمی و فاطمه صدیقی

### منابع مورد استفاده

- Abbaszadeh Afshar, F., Ayoubi, S., Jalalian, A., 2010. Soil redistribution rate and its relationship with soil organic carbon and total nitrogen using  $^{137}\text{Cs}$  technique in a cultivated complex hillslope in western Iran. *J. Environ. Radioact.* 101, 606-614.
- Aneseyee, A.B., Elias, E., Soromessa, T., Feyisa, G.L., 2020. Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Sci. Total Environ.* 728, 138776.
- Arata, L., Meusburger, K., Frenkel, E., A'Campo-Neuen, A., Iurian, A.R., Ketterer, M.E., Mabit, L., Alewell, C., 2016. Modelling Deposition and Erosion rates with RadioNuclides (MODERN) e Part 1: A new conversion model to derive soil redistribution rates from inventories of fallout radionuclides. *J. Environ. Radioact.* 162-163, 45-55.
- Ayoubi, S., Ahmadi, M., Abdi, M.R., Abbaszadeh Afshar, F., 2012. Relationships of  $^{137}\text{Cs}$  inventory with magnetic measures of calcareous soils of hilly region in Iran. *J. Environ. Radioact.* 112, 45-51.
- Babcock, B.A., Lakshminarayan, P.G., Wu, J.J., Zilberman, D., 1996. The economics of a public fund for environmental amenities: a operator characteristics and the perception of soil erosion. *Land Economics* 65, 167-182.
- Bazshoushtari, N., Ayoubi, S., Abdi, M.R., Mohammadi, M., 2016. Variability of  $^{137}\text{Cs}$  inventory at a reference site in west-central Iran. *J. Environ. Radioact.* 160, 86-92.
- Benmansour, M., Mabit, L., Nouria, A., Moussadek, R., Bouksirate, H., Duchemin, M., Benkdad, A., 2013. Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ . *J. Environ. Radioact.* 115, 97-106.
- Cao, Z., Zhang, Z., Zhang, K., Wei, X., Xiao, S., and Yang, Z., 2020. Identifying and estimating soil erosion and sedimentation in small karst watersheds using a composite fingerprint technique. *Agricul. Ecosys. Environ.* 294, 106881
- Chen, X., Qiao, Q., McGowan, S., Zeng, L., Stevenson, M. A., Xu, L., Cao, Y., 2019. Determination of geochronology and sedimentation rates of shallow lakes in the middle Yangtze reaches using  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and spheroidal carbonaceous particles. *Catena* 174, 546-556.
- Chiu, Y.J., Chang, K.T., Chen, Y.C., Chao, J.H., Lee, H.Y., 2011. Estimation of soil erosion rates in a subtropical mountain watershed using  $^{137}\text{Cs}$  radionuclide. *Nat. Hazards* 59(1), 271-284.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Van Den Belt, M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630), 253-260.
- Deal, J.L., 2004. Crop insurance, government agricultural policies, and soil erosion. Annual AAEA Meetings, Denver, North Carolina State University.
- Dedkov, A.P., Mozzherin V.I., 1992. Erosion and sediment yield in mountain regions of the world. In: Walling, D.E., T.R. Davies and B. Hasholt (Eds), *Erosion, Debris flows and environment in mountain regions*. IAHS Publication No. 209, 29-36.
- Dowell, S.M., Humphrey, O.S., Gowing, C.J., Barlow, T.S., Chenery, S.R., Isaboke, J., Watts, M.J., 2024. Suitability of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  as soil erosion tracers in western Kenya. *J. Environ. Radioact.* 271, 107327.
- Eblaghian, A., Ali, A.A., Radmanesh, F., Zarei, H., 2019. Trend Analysis of Temperature, Precipitation, and Relative Humidity Changes in Iran. *Irriga. Sci. Engineer.* 42(3), 197-212 (in Persian).
- Gaspar, L., Navas, A., Walling, D.E., Machín, J., Gómez Arozamena, J., 2013. Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  to assess soil redistribution on slopes at different temporal scales. *Catena* 102, 46-54.
- Gellis, A., 2010. Agricultural soil erosion rates for the Langanore Creek watershed in the piedmont physiographic province of the Chesapeake watershed. In: 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, USA. 1-8.

- Gharibreza, M., Bahrami Samani, A., Arabkhedri, M., Zaman, M., Porto, P., Kamali, K., Sobh-Zahedi, S., 2021. Investigation of on-site implications of tea plantations on soil erosion in Iran using  $^{137}\text{Cs}$  method and RUSLE. *Environ. Earth Sci.* 80(1), 1-14.
- Gharibreza, M., Zaman, M., Porto, P., Fulajtar, E., Parsaei, L., Eisaei, H., 2020. Assessment of deforestation impact on soil erosion in loess formation using  $^{137}\text{Cs}$  method, case study: Golestan Province, Iran. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 8(4), 393-405.
- Hancock, G.R., Gibson, A., Kirk, E., Conway, I., Parrod, A., 2024. Soil erosion and carbon export: A case study in a steep slope grazing landscape. *Geoderma Region.* e00751.
- He, Q., Walling, D.E., 2003. Testing distributed soil erosion and sediment delivery models using  $^{137}\text{Cs}$  measurements. *Hydrological Processes*, 17(5), 901-916.
- Khaledi Darvishan, A., Faraji, J., Gholami, L., Khorsand, M., 2021. Spatio-temporal variation of soil erosion in Khamsan representative watershed using RUSLE. *Watershed Engin. Manage.* 13(3), 534-547 (in Persian).
- Khodamoradi, H., Khaledi Darvishan, A., Sadeghi, S.H.R., 2023. Performance evaluation of watershed management measures in reducing soil erosion in treated and control sub-watersheds of Khamsan representative watershed using Cs-137 Method. *J. Watershed Manage. Res.* 36(2), 2-17 (in Persian).
- Mabit, L., Benmansour, M., Walling, D.E., 2008. Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  and  $^7\text{Be}$  for assessing soil erosion and sedimentation. *J. Environ. Radioactiv.* 99(12), 1799-1807.
- Menzel, R.G., 1960. Transport of  $^{90}\text{Sr}$  in runoff. *Science*, 131, 499-500.
- Mohammadi, M., Khaledi Darvishan, A., Dinelli, E., Bahramifar, N., Alavi, S.J., 2021. How does land use configuration influence on sediment heavy metal pollution Comparison between riparian zone and sub-watersheds. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.* 1-16.
- Moradi, A.R., Jafari, M., Arzani, H., Ebrahimi, M., 2016. Assessment of land use changes into dry land using satellite images and Geographical information system (GIS). *J. RS GIS Nat. Resou.* 7(1), 89 - 120-100 (in Persian).
- Mouri, G., 2020. Reproduction of sediment deposition and prediction of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in the major urban rivers of Tokyo. *Sci. Reports* 10(1), 1-15.
- Moustakim, M., Benmansour, M., Zouagui, A., Nouria, A., Benkdad, A., Damnati, B., 2019. Use of caesium-137 re-sampling and excess Pb-210 techniques to assess changes in soil redistribution rates within an agricultural field in Nakhla watershed. *J. African Earth Sci.* 156, 158-167.
- Navas, A., Gaspar, L., Lopez-Vicente, M., Machin, J., 2011. Spatial distribution of natural and artificial radionuclides at the catchment scale (South Central Pyrenees). *Radia. Measure.* 46(2), 261-269.
- Onyando, J.O., Kisoyan, P., Chemelil, M.C., 2005. Estimation of potential soil erosion for river Perkerra catchment in Kenya. *J. Water Resour. Manage.* 19, 133-143.
- Porto, P., Walling, D.E., Callegari, G., Capra, A., 2009. Using caesium-137 and unsupported Pb-210 measurements to explore the relationship between sediment mobilisation, sediment delivery and sediment yield for a Calabrian catchment. *Marine Freshwater Res.* 60(7), 680-689.
- Preiss, N., Me'lie` res, M.A., Pourchet, M., 1996. A compilation of data on Pb-210 concentration in surface air and fluxes at the air-surface and water-sediment interfaces. *J. Geophys. Res.* 101, 28847-28862.
- Qian, X., Zhao, L., Fang, Q., Fan, C., Zi, R., Fang, F., 2024. Rill formation and evolution caused by upslope inflow and sediment deposition on freshly tilled loose surfaces. *Soil Tillage Res.* 235, 105868.
- Ritchie, J.C., McHenry, J.R., 1973. Determination of fallout  $^{137}\text{CS}$  and naturally occurring gamma-ray emitters in sediments. *Int. J. Applied Radia. Isotopes* 24(10), 575-578.
- Rogowsky, A.S., Tamura, T., 1960. Movement of  $^{137}\text{Cs}$  by runoff, erosion and infiltration on the alluvial Captina silt loam. *Health Phys.* 11, 1333-1340.
- Sedighi, F., Khaledi Darvishan, A., Golosov, V., Zare, M.R., Spalevic, V., 2022. Influence of land use on changes of sediment budget components: western Iran case study. *Turkish J. Agricul. Forestry* 46(6), 838-851.
- Sedighi, F., Khaledi Darvishan, A., Zare, M.R., 2021. Effect of watershed geomorphological characteristics on sediment redistribution. *Geomorphol.* 375, 107559.
- Sui, J., He, Y., Liu, C., 2009. Changes in sediment transport in the Kuye River in the Loess Plateau in China. *Int. J. Sediment Res.* 24, 201-213.
- Swinton, S.M., Lupi, F., Robertson, G.P., Hamilton, S.K., 2007. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecologi. Econom.* 64(2), 245-252.
- Szilassi, P., Jordan, G., Van Rompaey, A., Csillag, G., 2006. Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary. *Catena* 68(2-3), 96-108.

- Urushadze Tengizz, F., 2002. Soil in space and time: Realities and challenge for 21st century. Thailand: Key book of 17th WCSS.
- Walling DE., 1999. Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. In: Man and River Systems, Springer, Dordrecht. 223-240.
- Walling, D.E., He, Q., 1999. Improved models for estimating soil erosion rates from  $^{137}\text{Cs}$  measurements. J. Environ. Quality 28(2), 611-622.
- Walling, D.E., He, Q., Whelan, P.A., 2003. Using  $^{137}\text{Cs}$  measurements to validate the application of the AGNPS and ANSWERS erosion and sediment yield models in two small Devon catchments. Soil Tillage Res. 69(1-2), 27-43.
- Walling, D.E., He, Q., Zhang, Y., 2014. Conversion models and related software. In: Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies. IAEA-TECDOC-1741. IAEA Publication, Vienna, Austria, 46(7), 125-148.
- Walling, D.E., Quine, T.A., 1991. Use of  $^{137}\text{Cs}$  measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. Europ. J. Soil Sci. 42(1), 147-160.
- Yuan, Y., Xiong, D., Wu, H., Liu, L., Li, W., Chidi, C. L., Neupane, N., 2021. Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  to trace soil erosion rates for a small catchment in the mid-hills of Nepal. J. Soils Sediments 21(1), 403-418.
- Zapata, F., 2003. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Vol. 219. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 219 pp.
- Zhang, F., Wang, J., Liu, D., Bi, Q., Du, J., 2019. Distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea: sources, budgets and environmental implications. Sci. Total Environ. 672, 120-1004-1016.
- Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., Nieminen, J., 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. Catena 75(3), 319-325.