



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری



دستنامه فنی

روش‌های میدانی اندازه‌گیری فرسایش سطحی خاک

نویسندگان:

یحیی پرویزی، زهرا گرامی

شماره ثبت: ۶۹۵۳۸

۱۴۰۵

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

دستنامه فنی:

روش‌های میدانی اندازه‌گیری فرسایش سطحی خاک

نویسنده:

یحیی پرویزی، زهرا گرامی

شماره ثبت: ۶۹۵۳۸

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

عنوان: روش‌های میدانی اندازه‌گیری فرسایش سطحی خاک

نویسندگان: یحیی پرویزی، زهرا گرامی

ویراستار ادبی: سعید نبی‌پی لشکریان

طراحی جلد و صفحه‌آرایی: عباس صدیق

ناشر: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

شمارگان: ۱۰ نسخه

تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۵

این اثر در مورخه ۱۴۰۵/۰۴/۰۸ با شماره ۶۹۵۳۸ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است. حق چاپ محفوظ است. نقل مطلب، تصاویر، جداول، منحنی‌ها و نمودارها با ذکر مأخذ بلامانع است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده.....	۱
۱- مقدمه.....	۲
۲- طبقه‌بندی روش‌های سنجش فرسایش.....	۲
۲-۱- روش‌های مستقیم و غیرمستقیم.....	۳
۲-۱-۱- روش‌های مستقیم.....	۳
۲-۱-۲- روش‌های غیرمستقیم.....	۳
۲-۲- طبقه‌بندی براساس مقیاس زمانی و مکانی.....	۴
۲-۳- اهمیت انتخاب روش مناسب.....	۴
۳- مروری بر روش‌های اندازه‌گیری میدانی فرسایش خاک.....	۵
۳-۱- استفاده از ردیاب‌های رادیواکتیو.....	۵
۳-۲- استفاده از دیگر ردیاب‌ها: مغناطیسی، رنگی، فلورسنت و زیستی.....	۶
۳-۲-۱- ردیاب‌های مغناطیسی.....	۶
۳-۲-۲- ردیاب‌های رنگی و فلورسنت.....	۷
۳-۲-۳- ردیاب‌های زیستی (بیولوژیکی).....	۸
۳-۲-۴- فلزات سنگین و عناصر خاکی کمیاب.....	۸
۳-۳- اندازه‌گیری فرسایش به‌وسیله رسوب‌گیرها.....	۹
۴-۳- انواع کرت‌های اندازه‌گیری فرسایش.....	۱۱
۴-۳-۱- کرت‌های محصور اندازه‌گیری فرسایش.....	۱۱
۴-۳-۲- کرت‌های بزرگ یا حوزه‌های آبخیز تک‌منبع.....	۱۳
۴-۳-۳- کرت‌های فرسایش با هندسه طبیعی.....	۱۹
۴-۴-۳- برخی ملاحظات فنی در کرت‌های فرسایش.....	۲۰
۴-۵- مروری بر برخی روش‌های نمونه‌برداری از مخازن کرت‌های آزمایشی.....	۲۲
۵-۳- فناوری‌های نوین در پایش میدانی فرسایش (پهپاد، سنجش از دور و AI).....	۲۴

- ۳-۵-۱- پهپادها (UAVs) در پایش فرسایش خاک ۲۵
- ۳-۵-۲- سنجش از دور (Remote Sensing) در پایش فرسایش ۲۵
- ۳-۵-۳- هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) در تحلیل داده‌های فرسایش ۲۶
- ۳-۶-۶- تفسیر سه‌بعدی تصاویر (فتوگرامتری زمینی و برد کوتاه) ۲۷
- ۳-۶-۱- روش تفسیر سه‌بعدی عکس ۲۷
- ۳-۶-۲- روش اسکن لیزری و سنجنده‌های راداری ۲۹
- ۴- کاربردها، محدودیت‌ها و چالش‌های روش‌های میدانی اندازه‌گیری فرسایش خاک ۳۱
- ۴-۱- استفاده از ردیاب‌های رادیواکتیو در مطالعه فرسایش ۳۱
- کاربردها: ۳۱
- محدودیت‌ها: ۳۱
- چالش‌ها: ۳۲
- ۴-۲- ردیاب‌های جایگزین: مغناطیسی، رنگی، فلورسنت و زیستی ۳۲
- کاربردها: ۳۲
- محدودیت‌ها: ۳۲
- چالش‌ها: ۳۲
- ۴-۳- اندازه‌گیری فرسایش با استفاده از رسوب‌گیرها ۳۲
- ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۳۷
- ۵-۱- جمع‌بندی کلی ۳۷
- ۵-۲- توصیه‌ها برای انتخاب روش ۳۷
- مطالعات مقیاس کرت یا دامنه‌ای کوچک: ۳۸
- مطالعات حوضه‌ای یا منطقه‌ای: ۳۸
- پایش طولانی‌مدت و تحلیل تاریخی فرسایش: ۳۸
- پایش تغییرات کوتاه‌مدت و دقیق سطح خاک: ۳۸
- تحلیل مدل‌سازی و پیش‌بینی فرسایش: ۳۹
- ۵-۳- چشم‌اندازهای پژوهشی ۳۹

۴۰	 منابع مورد استفاده
۵۰	 Abstract

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱- نمونه‌برداری خاک برای استفاده در ردیابی با سزیم ۱۳۷ و طیف‌سنج گامای قابل حمل آژانس بین‌المللی انرژی اتمی طی آزمایش‌های میدانی در حوزه آبخیز میستل‌باخ اتریش (برگرفته از IAEA، ۲۰۱۴)	۶.....
شکل ۲- ذرات پلاستیکی مغناطیس‌شده با پودر مغناطیسی (Ventura و همکاران، ۲۰۰۰)	۹.....
شکل ۳- نمونه‌هایی از مخازن جمع‌آوری رسوب در مقیاس آبخیز کوچک در حوزه آبخیز پژوهشی سنگانه، خراسان رضوی (برگرفته از نور و عرب‌خدری، ۱۴۰۲)	۱۷.....
شکل ۲-۱- استفاده از پهباد برای تهیه تصویرهای رقومی از فرسایش خاک در سطح کرت‌های فرسایش خاک واقع در جزیره سیسیل ایتالیا	۲۹.....
شکل ۲-۲- تهیه نقشه پستی و بلندی خرد به با روش تفسیر سه‌بعدی تصویر حاصل از اسکن لیزری (Grandy و همکاران، ۲۰۲۰)	۳۰.....

چکیده

فرسایش خاک از مهم‌ترین فرایندهای تخریب سرزمین محسوب می‌شود که آثار آن در کاهش حاصلخیزی، از بین رفتن منابع طبیعی، رسوب‌گذاری مخازن و بروز سیلاب‌های ناگهانی آشکار می‌شود. پایش و سنجش کمی این پدیده نیازمند بهره‌گیری از روش‌های میدانی دقیق، قابل اعتماد و متناسب با شرایط اقلیمی و کاربری اراضی است. این اثر به بررسی اجمالی و معرفی برخی جزئیات فنی روش‌های میدانی اندازه‌گیری فرسایش سطحی، از جمله کرت‌های محصور، رسوب‌گیرها، ردیاب‌های فیزیکی و شیمیایی، اسکن لیزری، تصویربرداری سه‌بعدی و فناوری‌های نوین مانند پهپاد، سنجش از دور و هوش مصنوعی می‌پردازد. ضمن معرفی مختصر هر روش، مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های هر کدام از آن‌ها بیان شده است. همچنین، با ارائه توصیه‌هایی کاربردی، زمینه برای انتخاب روش مناسب در مطالعات تحقیقاتی و پروژه‌های اجرایی فراهم شده است. در پایان، چشم‌انداز پژوهشی برای توسعه فناوری‌های تلفیقی، بهره‌گیری از ابزارهای هوشمند و تدوین استانداردهای بومی پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اسکن لیزری، پایش میدانی، پهپاد، ردیاب‌های فرسایش، رسوب‌سنجی، روش‌های غیرمستقیم، سنجش از دور، کرت‌های آزمایشی، هوش مصنوعی.

۱- مقدمه

فرسایش خاک به فرایند جداشدن و انتقال ذرات خاک توسط عواملی مانند آب، باد، یخ، نیروی ثقل زمین و فعالیت‌های انسانی گفته می‌شود (Pimentel و همکاران، ۱۹۹۵). این فرایند یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب منابع طبیعی و کاهش حاصلخیزی خاک است که پیامدهای منفی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده‌ای دارد (Lal، ۲۰۰۱). فرسایش می‌تواند به شکل‌های مختلفی از جمله فرسایش سطحی، فرسایش شیبی و آب‌بندی، فرسایش بادی، حرکات دامنه‌ای و فرسایش خاک ناشی از یخ‌زدگی و شخم رخ دهد (Morgan، ۲۰۰۵).

اصلی‌ترین عامل فرسایش سطحی، بارش باران و رواناب حاصل از آن است که می‌تواند باعث جداشدن ذرات خاک از سطح زمین و حمل آن‌ها به پایین‌دست شود. شدت و میزان فرسایش تحت تأثیر عوامل متعددی نظیر نوع خاک، شیب زمین، پوشش گیاهی، مدیریت اراضی منابع طبیعی و روش‌های کشاورزی است (Boardman و Poesen، ۲۰۰۶).

۲- طبقه‌بندی روش‌های سنجش فرسایش

ارزیابی و سنجش فرسایش خاک یکی از ارکان اساسی در مطالعات حفاظت خاک و مدیریت پایدار منابع طبیعی به شمار می‌آید، زیرا این پدیده باعث اثرات منفی درون و بیرون عرصه می‌شوند (Burgess و Pimentel، ۲۰۱۳). همچنین، شدت، نرخ و الگوهای مکانی-زمانی فرسایش خاک، در صورت عدم پایش و سنجش دقیق، می‌تواند پیامدهایی نظیر کاهش حاصلخیزی اراضی کشاورزی، تهدید امنیت غذایی و تشدید فرایندهای تخریب سرزمین را به دنبال داشته باشد (Kriuchkov و Makarov، ۲۰۲۳). روش‌های اندازه‌گیری فرسایش خاک را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم و براساس مقیاس به دو دسته زمانی و مکانی تقسیم‌بندی کرد (Lal، ۱۹۹۴؛ Kriuchkov و Makarov، ۲۰۲۳).

۱-۲- روش‌های مستقیم و غیرمستقیم

۱-۱-۲- روش‌های مستقیم

- روش‌های مستقیم اندازه‌گیری فرسایش، روش‌هایی هستند که مستقیماً تغییرات خاک یا میزان خاک ازدست‌رفته را اندازه‌گیری می‌کنند. از جمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
- کرت‌های محصور فرسایش: که در آن بخشی از زمین با ابعاد مشخص محصور شده و میزان خاک منتقل‌شده در طول زمان اندازه‌گیری می‌شود (Morgan, ۲۰۰۵)؛
 - نمونه‌برداری از رسوبات: جمع‌آوری و اندازه‌گیری رسوبات انتقال‌یافته در مخازن، تله‌های رسوب و رواناب (Collins و Walling, ۲۰۰۸)؛
 - اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع یا حجم خاک: استفاده از تکنولوژی‌هایی مانند اسکن لیزری زمینی و فتوگرامتری برای سنجش تغییرات سه‌بعدی سطح خاک (Brophy و همکاران, ۲۰۱۹)؛
 - استفاده از ردیاب‌های فیزیکی و ردیاب‌های ایزوتوپی: مواد رنگی یا مغناطیسی و ردیاب‌های رادیواکتیو (Pb^{210} و Cs^{137}) برای تعیین میزان انتقال خاک (Walling و He, ۱۹۹۹).

۲-۱-۲- روش‌های غیرمستقیم

- روش‌های غیرمستقیم براساس مدل‌سازی، پیش‌بینی و تحلیل داده‌های غیرمیدانی است (صادقی و پرویزی, ۱۴۰۱). این روش‌ها معمولاً به کمک داده‌های اقلیمی، توپوگرافی، پوشش گیاهی و استفاده از مدل‌های ریاضی فرسایش را تخمین می‌زنند:
- مدل‌های تجربی و مفهومی: مانند معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه‌های اصلاح‌شده آن (RUSLE) که با استفاده از پارامترهای ساده و قابل اندازه‌گیری فرسایش سطحی را تخمین می‌زنند (Smith و Wischmeier, ۱۹۷۸؛ Renard و همکاران, ۱۹۹۷)؛
 - مدل‌های فرایندی: این مدل‌ها براساس فرایندهای فیزیکی واقعی فرسایش و انتقال خاک ساخته شده‌اند و پیچیده‌تر بوده و نیازمند داده‌های ورودی زیادتری هستند (Nearing, ۲۰۱۳)؛

----- تحلیلی اجمالی بر روش‌های میدانی اندازه‌گیری فرسایش سطحی خاک / ۴

- سنجش از دور و GIS: در این روش استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های هوایی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای تحلیل پراکنش فرسایش و شناسایی نواحی پرخطر صورت می‌گیرد (Panagos و همکاران، ۲۰۱۵).

۲-۲- طبقه‌بندی براساس مقیاس زمانی و مکانی

روش‌های سنجش فرسایش همچنین براساس مقیاس زمانی و مکانی به روش‌های کوتاه‌مدت (رویدادهای بارشی) یا بلندمدت (چند ساله تا چند دهه) و روش‌های نقطه‌ای (مکان‌های کوچک) تا گسترده (حوزه‌های آبخیز بزرگ) تقسیم می‌شوند (Morgan، ۲۰۰۵).

۲-۳- اهمیت انتخاب روش مناسب

انتخاب روش مناسب اندازه‌گیری فرسایش بستگی به هدف مطالعه، مقیاس مکانی و زمانی، امکانات مالی و فنی و همچنین نوع فرسایش مورد بررسی دارد (صادقی و پرویزی، ۱۴۰۱). برای مثال، روش‌های مستقیم معمولاً در مقیاس‌های کوچک و مطالعات تجربی کاربرد دارند، درحالی‌که مدل‌ها و داده‌های سنجش از دور برای مطالعات گسترده و برنامه‌ریزی منابع طبیعی مناسب‌تر هستند (Lal، ۱۹۹۴).

هیچ روش واحدی به‌تنهایی برای پایش جامع فرسایش کفایت نمی‌کند. ترکیب روش‌های مستقیم و غیرمستقیم، همراه با تلفیق داده‌های میدانی و مدل‌سازی، می‌تواند تصویر دقیق‌تری از فرایندهای فرسایشی ارائه دهد. روش‌های نوین مانند سنجش از دور و تصویربرداری سه‌بعدی، فرصت‌های جدیدی برای پایش غیرتهاجمی و با دقت بالا فراهم کرده‌اند، اما همچنان چالش‌هایی چون دقت، واسنجی و هزینه‌های بالا باقی است. روش‌های غیرتهاجمی روش‌هایی هستند که نیاز به نمونه‌برداری مستقیم از خاک و دست‌کاری سطح زمین ندارند (صادقی و پرویزی، ۱۴۰۱).

۳- مروری بر روش‌های اندازه‌گیری میدانی فرسایش خاک

۳-۱- استفاده از ردیاب‌های رادیواکتیو

ردیاب‌های رادیواکتیو ابزار مهمی در مطالعات فرسایش خاک محسوب می‌شوند که بر پایه ردیابی توزیع ایزوتوپ‌های پرتوزا در خاک کار می‌کنند. این ردیاب‌ها دارای نیمه‌عمرهای مختلف هستند و متناسب با مقیاس زمانی مورد مطالعه انتخاب می‌شوند. پرکاربردترین آن‌ها عبارتند از:

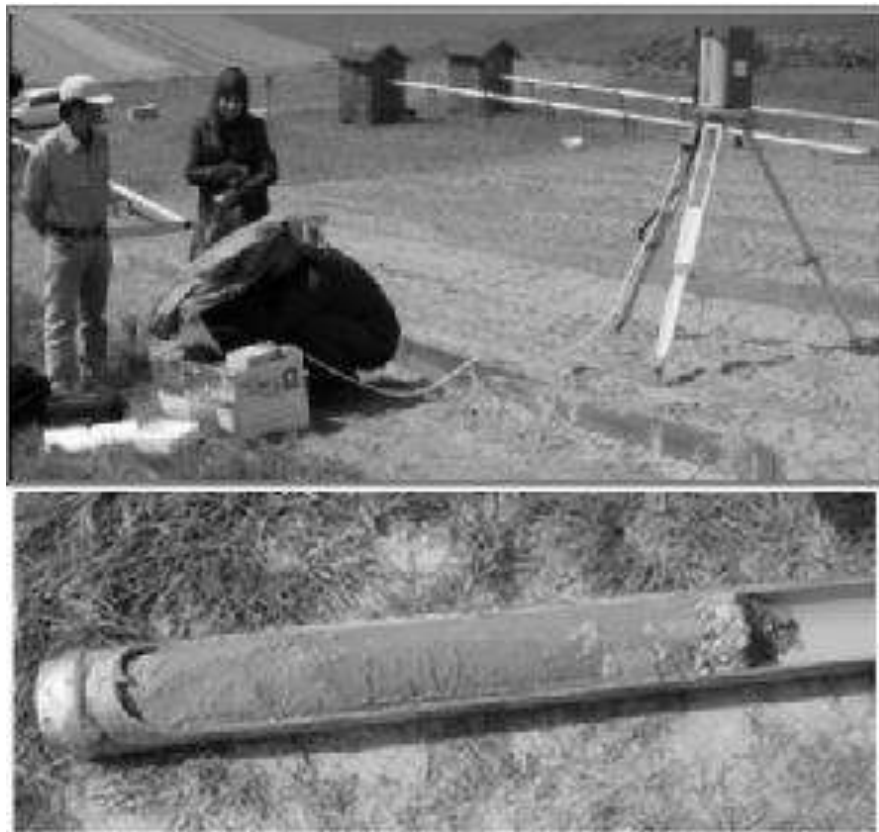
سزیم-۱۳۷ (^{137}Cs) با نیمه‌عمر حدود ۳۰ سال، یک ایزوتوپ مصنوعی است که عمدتاً در اثر انفجارهای هسته‌ای وارد محیط زیست شده و در ذرات خاک تثبیت می‌شود. با مقایسه غلظت ^{137}Cs بین مناطق شاهد (مناطق با پوشش گیاهی دست‌نخورده و بدون فرسایش یا رسوب‌گذاری مشخص، معمولاً سطوح مسطح با پوشش علفی یا جنگلی پایدار که غلظت اولیه ^{137}Cs در آن‌ها به‌عنوان مرجع حفظ شده است) و فرسایش‌یافته می‌توان متوسط فرسایش در بازه‌های ۳۰ تا ۵۰ سال گذشته را تخمین زد. این روش عمدتاً برای فرسایش سطحی کاربرد دارد و برای فرسایش شیاری یا آبراهه‌ای به تنهایی کافی نیست، مگر اینکه با روش‌های مکمل ترکیب شود (Seddighi و همکاران، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱؛ Zhang و Walling، ۲۰۰۹).

سرب-۲۱۰ (^{210}Pb) با منشأ طبیعی، از واپاشی اورانیوم-۲۳۸ حاصل شده و به‌واسطه ریزش‌های جوی وارد خاک می‌شود. این ایزوتوپ با نیمه‌عمر حدود ۲۲ سال برای مطالعات فرسایش بلندمدت (بیش از ۱۰۰ سال) عمدتاً برای فرسایش سطحی مناسب است، هرچند اندازه‌گیری آن به دلیل نیاز به طیف‌سنجی گامای دقیق با چالش‌هایی همراه است (IAEA، ۲۰۱۵؛ خدادادی و همکاران ۱۳۹۳).

بریلیوم-۷ (^7Be) با نیمه‌عمر ۵۳ روز، از برخورد پرتوهای کیهانی با اتمسفر زمین تولید می‌شود. ^7Be به سرعت با سطح خاک واکنش داده و برای بررسی فرسایش کوتاه‌مدت (چند هفته تا چند ماه) و فرسایش سطحی مناسب است. با این حال، وجود پوشش گیاهی می‌تواند باعث کاهش دقت اندازه‌گیری آن شود (Mabit و Blake، ۲۰۱۹).

سایر ردیاب‌ها مانند ایزوتوپ‌های $^{239+240}\text{Pu}$ ، ^{40}Sc ، ^{51}Cr و ^{59}Fe نیز در مطالعات خاص مورد استفاده قرار گرفته‌اند (IAEA، ۲۰۱۴). برای اندازه‌گیری غلظت این رادیونوکلئیدها، از طیف‌سنجی گاما با

آشکارسازهای ژرمانیومی (HPGe) استفاده می‌شود. امروزه دستگاه‌های قابل حمل طیف‌سنج گاما نیز توسعه یافته‌اند که امکان تحلیل مستقیم غلظت ایزوتوپ‌ها در مزرعه را فراهم می‌سازند (شکل ۱).



شکل ۱- نمونه‌برداری خاک برای استفاده در ردیابی با سزیم ۱۳۷ و طیف‌سنج گامای قابل حمل آژانس بین‌المللی انرژی اتمی طی آزمایش‌های میدانی در حوزه آبخیز میستل‌باخ اتریش (برگرفته از IAEA, ۲۰۱۴)

۳-۲- استفاده از دیگر ردیاب‌ها: مغناطیسی، رنگی، فلورسنت و زیستی

۳-۲-۱- ردیاب‌های مغناطیسی

روش‌های ردیابی مغناطیسی براساس ویژگی‌های مغناطیسی طبیعی برخی مواد معدنی خاک مانند مگنتیت، هماتیت و گوتیت یا به‌کارگیری ردیاب‌های مغناطیسی مصنوعی استوار هستند (Parsons و همکاران، ۱۹۹۳). این روش به‌دلیل حساسیت بالا و قابلیت ردیابی دقیق در مطالعات فرسایش و رسوب‌گذاری به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است.

Parsons و همکاران (۱۹۹۳) با استفاده از مگنتیت طبیعی موفق به بررسی فرسایش بین‌شیاری در مقیاس کرت‌های بزرگ شدند. در ادامه، Ventura و همکاران (۲۰۰۰) مهره‌های مغناطیسی ساخته‌شده از ترکیبات رزین یا پلاستیک را که در دمای بالا پخته شده و خاصیت مغناطیسی قوی داشتند، به‌عنوان ردیاب وارد خاک کردند. این مهره‌ها پس از قرارگیری در خاک، به‌کمک مغناطیس‌سنج‌های حساس قابل شناسایی و اندازه‌گیری هستند (Ventura و همکاران، ۲۰۰۰).

Hu و همکاران (۲۰۱۱) پنج نوع ردیاب ترکیبی مغناطیسی تولید کردند که می‌توانستند به‌طور هم‌زمان فرسایش شیاری و بین‌شیاری را بررسی کنند. این ردیاب‌ها توانایی تفکیک دقیق منشاء ذرات رسوبی را دارا بودند. به این‌صورت که تفکیک دقیق منشاء ذرات رسوبی با استفاده از اختلاف در شدت مغناطیس پسماند و رفتار مغناطیسی منحصربه‌فرد هر ردیاب در میدان‌های مغناطیسی مختلف امکان‌پذیر شده است. پس از اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر نمونه رسوب، هر ردیاب براساس آهنربایش ذاتی خود جداسازی شده و سهم فرسایش شیاری در مقابل بین‌شیاری از طریق آنالیز غلظت نسبی هر ردیاب در رسوب تعیین می‌شود. همچنین، Spencer و همکاران (۲۰۱۱)، از کانی مونتموریلونیت که با عنصر هولمیوم نشانه‌گذاری شده بود، به‌عنوان ردیاب مغناطیسی جهت پیگیری رسوبات ریز استفاده کردند که دقت بالایی در ردیابی انتقال رسوبات ریز داشت.

۳-۲-۲- ردیاب‌های رنگی و فلورسنت

ردیاب‌های رنگی و فلورسنت نیز در مطالعات فرسایش خاک به‌ویژه برای ردیابی ذرات و تعیین مسیر جریان‌های سطحی کاربرد دارند. این ردیاب‌ها معمولاً از رنگ‌های فلورسنت قابل شناسایی با نور ماوراءبنفش یا دستگاه‌های اسپکتروسکوپی ساخته می‌شوند (Walling و He، ۱۹۹۹).

مزیت این ردیاب‌ها، قابلیت شناسایی آسان و سریع آنها بدون نیاز به تجهیزات پیچیده است. با این حال، محدودیت‌هایی مانند احتمال انتقال رنگ‌ها توسط عوامل غیرفرسایشی (مثلاً باد یا حیات وحش) و تغییر رنگ یا کاهش شدت فلورسنس در طول زمان، از چالش‌های استفاده از این ردیاب‌ها محسوب می‌شود (Quinton و همکاران، ۲۰۱۰).

۳-۲-۳- ردیاب‌های زیستی (بیولوژیکی)

روش‌های زیستی شامل استفاده از ارگانیسیم‌ها یا مولکول‌های زیستی به‌عنوان ردیاب فرسایش هستند. برای مثال، برخی مطالعات از گرده گیاهان یا DNA باکتریایی به‌عنوان نشانگرهای طبیعی فرسایش استفاده کرده‌اند (Wallbrink و همکاران، ۲۰۰۳).

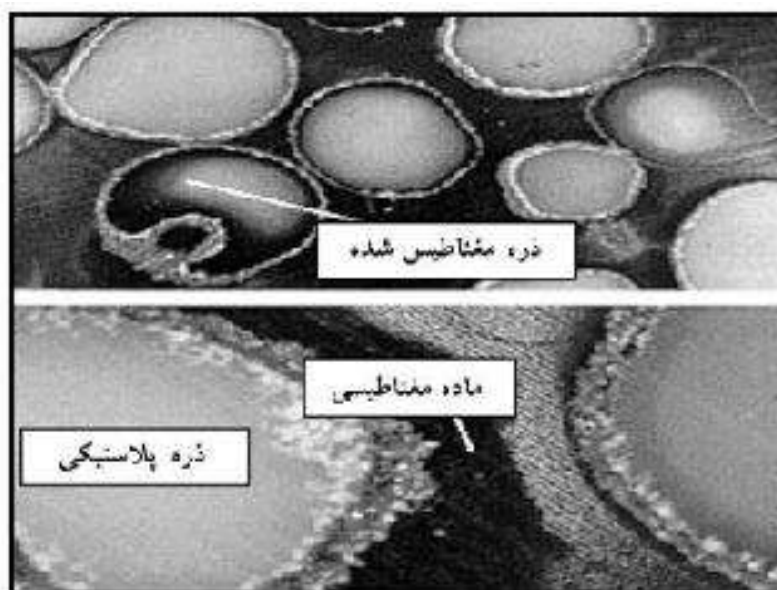
مزیت این روش‌ها، سازگاری زیست‌محیطی بالا و قابلیت پیگیری بلندمدت است. اما نیاز به روش‌های پیچیده و تخصصی در تحلیل داده‌ها، حساسیت به تغییرات زیستی و محیطی، و هزینه‌های بالای آزمایشگاهی، از محدودیت‌های آن است (Walling، ۲۰۰۶).

۳-۲-۴- فلزات سنگین و عناصر خاکی کمیاب

فلزات سنگین شامل آهن، نیکل، کروم، مس و کبالت، به‌صورت محلول و ذره‌ای در رسوبات جابه‌جا می‌شوند و به‌دلیل منشأ مشخص در منابع خاکی، به‌عنوان ردیاب‌های مؤثر در مطالعات فرسایش استفاده می‌شوند (Jain و Sharma، ۲۰۰۱؛ Dessouki و همکاران، ۲۰۰۵). سلیمانپور و همکاران (۱۴۰۱) از ترکیبات مختلف از ۵۶ عنصر ردیاب مختلف از جمله عناصر سنگین و عناصر خاکی کمیاب به منظور ردیابی منشأ رسوب در مقیاس حوزه آبخیز استفاده کردند و سهم اشکال فرسایش سطحی را در رسوب تولیدی حوزه آبخیز نی‌ریز استان فارس حدود ۱۹ درصد برآورد کردند.

عناصر خاکی کمیاب^۱ که شامل ۱۷ عنصر لانتانید به علاوه اسکاندیوم و ایتیریم هستند، به‌دلیل رفتار شیمیایی و فیزیکی مشابه، به‌عنوان ردیاب‌های حساس در مقیاس کرت، دامنه و حتی آبخیزهای کوچک کاربرد دارند (Díez و Quinton، ۲۰۱۰). مزیت اصلی این عناصر، تثبیت سریع در خاک و انتقال همزمان با فرسایش است که امکان ردیابی دقیق منابع و مسیرهای انتقال رسوب را فراهم می‌کند. البته هزینه بالای آزمایش و نیاز به تجهیزات تخصصی، محدودیت‌های این روش را تشکیل می‌دهد (Kiani-Harchegani و Sadeghi، ۲۰۱۳).

^۱ Rare Earth Elements - REEs



شکل ۲- ذرات پلاستیکی مغناطیس شده با پودر مغناطیسی (Ventura و همکاران، ۲۰۰۰)

۳-۳- اندازه گیری فرسایش به وسیله رسوب گیرها

یکی دیگر از روش های اندازه گیری فرسایش، استفاده از انواع مختلف تله های رسوب یا رسوب گیرها و مخازن جمع کننده رسوب در پایین دست دامنه ها و یا خروجی آبخیزهای کوچک است. این روش بر اندازه گیری مجموع بار رسوبی رسیده به مخازن یاد شده و نهایتاً دقت بالاتر اندازه گیری ها استوار است (Walling و Collins، ۲۰۰۸).

هرچه اندازه این واحد اندازه گیری بزرگ تر باشد، باید نسبت به تبدیل مقدار رسوب به فرسایش براساس ضریب رسوب دهی یا نسبت تبدیل رسوب، اقدام شود (Quinton و همکاران، ۲۰۱۰). هرچه محدوده کوچک تر باشد، این ضریب به یک نزدیک تر خواهد بود (Zhang و همکاران، ۲۰۱۸).

برای طراحی این واحدها در مزارع و دامنه های کوچک، از آنجا که رسوبات منتقل شده از مزارع شامل رسوبات ناشی از فرسایش شیار، بین شیار و بعضاً آبکندها است، معمولاً از مخازن نسبتاً بزرگ به منظور جمع آوری کل یا بخش عمده ای از رواناب و رسوب ناشی از رگبارهای کوچک تا متوسط استفاده می شود (Yin و همکاران، ۲۰۱۹). اما در مقیاس آبخیزهای کوچک ممکن است این مخازن جوابگو نبوده و بهتر است مقدار رواناب پس از عبور از فلولم یا سرریز اندازه گیری شود و دستگاه نمونه بردار رسوب نیز در فواصل زمانی مشخص به طور خودکار به نمونه برداری اقدام کند (نور و عرب خدری، ۱۴۰۲). همچنین از تلفیقی از هر دو ابزار یعنی

مخزن (برای وقایع کوچک) و فلوم (برای وقایع بزرگ) استفاده می‌شود. برای سهولت برداشت نمونه و نیز اجتناب از احداث مخازن بزرگ با هزینه و خطر تخریب بالا، این مخازن را می‌توان به صورت دو یا چند قسمتی همراه با سامانه مقسم از قبیل نمونه‌بردار رواناب نوع کاسه‌هوکتن طراحی کرد (USDA، ۱۹۷۹).

ترانشه‌ها و یا جمع‌آوری‌کننده‌های کوچکی که در انتهای دامنه‌های مطالعاتی و یا خاک‌برداری و با مقطع دوزنقه یا سهمی و با پوشش توری و بعضاً شیب‌دار به طرف مرکز احداث می‌شوند نیز در این دسته از روش‌های اندازه‌گیری طبقه‌بندی می‌شوند (Walling، ۲۰۰۶).

مرکز بین‌المللی پژوهش‌های کشاورزی حاره‌ای در کلمبیا از آبراهه‌های پوشیده شده با پلاستیک برای مقایسه هدررفت خاک سامانه‌های مختلف کشت گیاه سبزی ریشه‌ای دارویی کاساوا استفاده کرده است (Lal و همکاران، ۲۰۱۸). در آزمونی دیگر در تایلند از مخزن‌های متوالی با پوشش پلی‌تن برای جمع‌آوری و مقایسه رسوب ناشی از فرسایش خاک در کرت‌های مختلف کشت کپه‌ای برنج، بدون اقدامات حفاظتی، کشت نواری گیاهان و برنج، استفاده شد (Somchai و همکاران، ۲۰۲۰).

همچنین، کیسه‌های توری و یا سدهای توری، یکی دیگر از گزینه‌های قابل‌استفاده برای مقایسه تولید رسوب ناشی از فرسایش خاک در تیمارهای مختلف است. در این روش ساده و ارزان، مقداری از خاک‌های جابه‌جاشده در سطح زمین در داخل کیسه‌ها به دام افتاده و مقدار آنها پس از زهکشی و توزین نشان‌گر تولید رسوب ناشی از فرسایش مناطق بالادست آنها است. در این روش ساده و ارزان، کیسه‌های توری^۱ با ابعاد معمول ۱۵×۱۵ تا ۳۰×۳۰ سانتی‌متر از جنس نایلون (با چشمه ریز ۰/۱ میلی‌متر در کف و چشمه درشت چهار میلی‌متر در رویه) ساخته می‌شوند. برای اجرا در صحرا، ابتدا پوشش گیاهی در محل نصب کیسه کاملاً حذف شده و کیسه به نحوی روی سطح خاک قرار می‌گیرد که کاملاً در تماس با سطح زمین بوده و چین‌خوردگی نداشته باشد. کیسه‌ها با استفاده از چند گیره یا میخ فلزی در چهار گوشه به زمین ثابت می‌شوند تا جابه‌جایی آنها در اثر باد یا رواناب جلوگیری شود. پس از یک یا چند رویداد بارندگی، کیسه‌ها جمع‌آوری شده و خاک جمع‌شده روی و داخل آنها پس از خشک‌شدن در آون (۴۸ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه

^۱ Mesh Bags

سانتی‌گراد) توزین می‌شود. مقدار خاک توزین‌شده تقسیم بر سطح کیسه، میزان فرسایش (بر حسب گرم بر مترمربع) را نشان می‌دهد. این روش قادر به تشخیص میزان فرسایش تا کمتر از ۰/۱ تن در هکتار است (Giménez و همکاران، ۲۰۲۱).

۳-۴- انواع کرت‌های اندازه‌گیری فرسایش

۳-۴-۱- کرت‌های محصور اندازه‌گیری فرسایش

از روش‌های دیرپای و متداول اندازه‌گیری فرسایش، استفاده از انواع کرت‌های محصور در مقیاس دامنه است. این کرت‌ها با ابعاد و طراحی‌های متفاوتی ساخته شده‌اند که از مساحت‌های کمتر از یک مترمربع تا بیش از یک هکتار را دربر می‌گیرند (Hudson، ۱۹۹۳؛ Kriuchkov و Makarov، ۲۰۲۳).

شناخته‌شده‌ترین نوع این کرت‌ها، کرت‌های استاندارد فرسایش خاک یا کرت‌های ویشمایر (Wischmeier و Smith، ۱۹۷۸) است که برای اولین بار به منظور توسعه پارامترهای معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) طراحی و به‌کار گرفته شدند. این کرت‌ها معمولاً دارای ابعاد ۱/۸۳ متر عرض در ۲۲/۱۳ متر طول هستند و با مدیریت خاصی بر سطح زمین، شرایط کنترل‌شده‌ای را برای اندازه‌گیری فرسایش فراهم می‌کنند.

کرت‌هایی با ابعاد کوچک‌تر یا بزرگ‌تر نیز بسته به هدف پژوهش و ویژگی‌های منطقه‌ای طراحی و به‌کار گرفته شده‌اند. مثلاً کرت‌های کوچک‌تر برای اندازه‌گیری دقیق‌تر در مقیاس‌های کوچک‌تر و کرت‌های بزرگ‌تر برای مطالعات حوزه‌های آبخیز وسیع‌تر کاربرد دارند (Ollesch و Vacca، ۲۰۲۰؛ Laflen و همکاران، ۲۰۲۱). ابعاد کرت‌های اندازه‌گیری فرسایش بر دقت و صحت داده‌های جمع‌آوری‌شده تأثیرگذار است. این اثر از طریق سازوکار اتصال هیدرولوژیکی^۱ توجیه می‌شود. در کرت‌های کوچک (چند مترمربع)، رواناب به‌سرعت به خروجی رسیده و فرایندهای طبیعی مانند رسوب‌گذاری مجدد یا جذب آب توسط خاک به‌درستی شبیه‌سازی نمی‌شوند که این امر منجر به کاهش غلظت رسوب (مثلاً از ۱/۳۲ گرم بر لیتر در حوضه به ۰/۱۷ گرم بر لیتر در کرت یک مترمربع) و در نتیجه کم‌برآوردی فرسایش در مقیاس بزرگ‌تر می‌شود. در مقابل، کرت‌های بزرگ

^۱ Hydrological Connectivity

(بیش از ۲۰-۱۵ متر طول) به دلیل شکل‌گیری رواناب متمرکز و فرسایش شیاری، اتصال هیدرولوژیکی واقعی تری داشته و دقت بالاتری در برآورد فرسایش در مقیاس مزرعه و حوضه دارند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که افزایش یا کاهش اندازه کرت می‌تواند نتایج فرسایش را به شکل قابل توجهی تغییر دهد و در تفسیر داده‌ها نیز نقش مهمی ایفا می‌کند (Lafren و همکاران، ۲۰۲۱؛ Kriuchkov و Makarov، ۲۰۲۳). بنابراین انتخاب ابعاد مناسب کرت (طول بهینه ۱۵-۲۰ متر در بسیاری از مناطق) متناسب با هدف مطالعه و شرایط محیطی از اهمیت بالایی برخوردار است.

علاوه‌براین، کرت‌های فرسایشی به‌عنوان ابزارهای کلیدی برای جمع‌آوری داده‌های پایه‌ای جهت توسعه، واسنجی و اعتبارسنجی، ارزیابی مدل‌های تجربی و فرآیندی فرسایش خاک به‌کار می‌روند (Kriuchkov و Makarov، ۲۰۲۳). این داده‌ها کمک می‌کنند تا عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی میزان فرسایش در شرایط واقعی بهتر سنجیده و اصلاح شود.

همچنین، استفاده از کرت‌های محصور امکان انجام آزمایش‌های کنترل‌شده مانند تغییر نوع پوشش گیاهی، تغییر شیب و تغییر نوع خاک را در مقیاس میدانی فراهم می‌کند که برای فهم بهتر فرآیندهای فرسایش بسیار مفید است (Renschler و Harbor، ۲۰۰۲). اگرچه این روش در ابتدا برای مطالعه فرسایش خاک در اراضی شخم‌خورده و کشاورزی توسعه یافته است، اما کاربرد آن در مراتع مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌هایی همراه است: (۱) پوشش گیاهی این مناطق به‌صورت لکه‌ای^۱ و ناهمگن است و کرت‌های کوچک نمی‌توانند نماینده مناسبی از این الگوی مکانی-زمانی باشند؛ (۲) وجود الگوی سه‌فازی شامل بوته‌ها، مسیرهای تردد دام و نواحی بین‌بوته‌ای، باعث تغییرات شدید محلی در رواناب و رسوب می‌شود که در یک کرت محصور به خوبی قابل شبیه‌سازی نیست؛ (۳) دام‌ها (به‌ویژه دام‌های اهلی) با ایجاد مسیرهای تردد و لگدکوبی، اتصال هیدرولوژیکی را به‌طور طبیعی افزایش می‌دهند و کرت‌های محصور معمولاً این اثر را نادیده می‌گیرند. در مورد جنگل‌ها نیز مشکلات خاص خود وجود دارد: (۱) حضور لایه لاشبرگ ضخیم و ریشه‌های درختان، فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی را کاملاً متفاوت از اراضی کشاورزی می‌کند؛ (۲) کرت‌های کوچک قادر به ثبت اثر

^۱ Patchy

درختان منفرد بر توزیع باران (قطره‌چکانی از تاج درختان) و الگوی رواناب نیستند؛ (۳) کرت‌های محصور معمولاً ارتباط بین جریان‌های زیرسطحی و سطحی را که در جنگل‌ها بسیار مهم است، قطع می‌کنند.

۳-۴-۲- کرت‌های بزرگ یا حوزه‌های آبخیز تک‌منبع

نوع دیگر کرت‌های مطالعاتی و پژوهشی در فرسایش خاک، یک حوزه آبخیز کوچک، یا به عبارت دیگر حوزه آبخیزی با یک زهکش طبیعی است. چنین کرت‌هایی اغلب به حوزه‌های آبخیز تک‌منبع^۱ موسوم هستند. علت نام‌گذاری این نوع کرت‌ها به حوزه‌های آبخیز تک‌منبع، لزوم وجود و یا انجام نوع کاربری یا مدیریت خاصی است که در آن اعمال می‌شود (Merritt و همکاران، ۲۰۱۶). مقصود از تک‌منبع این است که این حوضه‌ها برای کاهش تنوع عوامل محیطی، به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که از نظر پوشش گیاهی، نوع خاک و شرایط زمین‌شناسی تقریباً یکنواخت (همگن) باشند تا بتوان اثر یک متغیر خاص (مثلاً نوع مدیریت یا بارش) را بر فرسایش و رواناب با دقت بیشتری بررسی کرد.

این کرت‌های بزرگ ممکن است شامل تراس‌ها یا سایر عملیات حفاظتی نیز باشد. جالب‌ترین جنبه کاربردی چنین کرت‌هایی، امکان تلفیق نتایج تمام فرایندهای مربوط به فرسایش خاک و عملیات حفاظتی در حوزه آبخیز مشخص و مستقل و نیز مقایسه نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از کرت‌هایی با ابعاد مختلف با یکدیگر است. یکی از مزایای مهم حوزه‌های آبخیز کوچک یا تک‌منبعی این است که می‌توان آثار اقدامات حفاظت آب و خاک از جمله بانکت، تراس‌ها و بندهای حفاظت آب و خاک را به راحتی در این مقیاس از کرت ارزیابی کرد، در حالی که امکان این ارزیابی در مقیاس کرت وجود ندارد (نور و عرب‌خدری، ۱۴۰۲).

این ارزیابی از طریق دو رویکرد اصلی انجام می‌شود:

۱. رویکرد میدانی (مقایسه حوزه شاهد و تیمار): در این روش، دو حوزه آبخیز مشابه از نظر ویژگی‌های

طبیعی (نوع خاک، پوشش گیاهی، شیب و مساحت) انتخاب می‌شوند. یک حوضه به عنوان شاهد

بدون هیچ اقدام حفاظتی رها می‌شود و در حوزه دیگر اقدامات حفاظتی (مانند تراس، بند یا

بانکت) اجرا می‌شود. سپس با نصب تجهیزات اندازه‌گیری رواناب و رسوب در خروجی هر دو حوضه

^۱ Unit-Source Watershed

و مقایسه داده‌های بلندمدت (چند ساله) می‌توان درصد کاهش رواناب و رسوب ناشی از اقدامات حفاظتی را محاسبه کرد. برای مثال، مطالعات میدانی در اتیوپی نشان داده که بندهای اصلاحی و تراس‌ها می‌توانند رواناب سطحی را بین ۴۰ تا ۸۸ درصد و فرسایش خاک را بین ۶۰ تا ۹۰ درصد کاهش دهند.

۲. رویکرد مدلسازی (شبیه‌سازی سناریوهای مختلف): در این روش، پس از واسنجی و اعتبارسنجی یک مدل هیدرولوژیکی مناسب (مانند SWAT یا LISEM) برای حوزه آبخیز مورد مطالعه، سناریوهای مختلف اجرای اقدامات حفاظتی به صورت مجازی شبیه‌سازی می‌شود. به این ترتیب می‌توان اثر ترکیبی اقدامات مختلف (به‌طور مثال تراس + بانکت + بند) را بر کاهش رسوب خروجی پیش‌بینی کرد و اقتصادی‌ترین یا مؤثرترین گزینه را بدون صرف هزینه اجرایی انتخاب نمود. مدل SWAT در حوزه‌های آبخیز کوچک هند نشان داد که احداث بندهای اصلاحی و تراس‌ها می‌تواند به ترتیب باعث کاهش معنی‌دار رسوب و مواد مغذی خروجی از حوضه شود.

حوزه‌های آبخیز کوچک می‌توانند با واسنجی مجدد، سال‌های متوالی استفاده شده و در ادامه یک نوع تیمار دیگر در سطح آن اعمال شود. به این معنا که پس از اعمال یک تیمار (مثلاً احداث تراس) و اندازه‌گیری اثر آن در یک سال، محقق می‌تواند رابطه بین بارش و رواناب/رسوب را برای شرایط جدید حوزه بازتنظیم (واسنجی مجدد) کند. سپس در سال بعد، تیمار دیگری (مثلاً کپه کاری گیاهان) را در همان حوضه اعمال کرده و اثر خالص تیمار دوم را با استفاده از شرایط پایه جدید محاسبه کند. این فرایند بدون نیاز به احداث حوضه‌های جدید و با صرفه‌جویی قابل توجه در زمان و هزینه انجام می‌پذیرد.

همچنین، دو حوزه آبخیز با تیمارهای مختلف و به صورت زوجی می‌توانند برای سالیان متمادی مورد استفاده قرار گیرند. هر دو روش فوق زمان‌بر بوده و لحاظ کردن تغییرات ناشی از فرسایش قبلی در سطح حوزه آبخیز ضروری است. یکی دیگر از کاربردهای مهم حوزه‌های آبخیز کوچک، ارزیابی و تأیید^۱ مدل‌های فرسایش و رسوب است. منظور از «مدل» در اینجا، یک ابزار ریاضی یا نرم‌افزاری کامپیوتری است که فرایندهای

^۱ Calibration and Validation

هیدرولوژیکی و فرسایشی (مانند تولید رواناب، جداسازی ذرات، انتقال رسوب و ته‌نشینی) را در حوزه آبخیز شبیه‌سازی می‌کند. برای ارزیابی یک مدل، ابتدا داده‌های اندازه‌گیری‌شده در حوزه آبخیز کوچک (شامل بارندگی، رواناب و رسوب خروجی) به دو بخش تقسیم می‌شوند: بخش اول برای واسنجی^۱ مدل استفاده می‌شود تا پارامترهای مجهول مدل تعیین شوند و بخش دوم برای اعتبارسنجی^۲ مدل به کار می‌رود تا صحت پیش‌بینی‌های مدل تأیید شود. استفاده از یک مدل تأییدشده، سریع بوده و مهم‌ترین مزیت آن، قابلیت تعمیم نتایج تجربی به حوزه‌های آبخیز فاقد ایستگاه اندازه‌گیری^۳ است. نمونه‌هایی از این مدل‌ها شامل WEPP (مناسب برای دامنه‌ها و حوزه‌های کوچک)، SWAT (مناسب برای حوزه‌های با مقیاس بزرگ‌تر) و RUSLE (مدل تجربی برای برآورد فرسایش سطحی) هستند. تهیه و به‌کارگیری مدل نیازمند تجربه کافی در واسنجی و اعتبارسنجی است تا مدل به‌عنوان یک مبنا و اساس مناسب برای شبیه‌سازی سامانه حوزه آبخیز به کار گرفته شود (Makarov و Kriuchkov، ۲۰۲۳).

پژوهش‌های فرسایش خاک، با استفاده از کرت‌های معرف یک منطقه و یا بخشی از آن انجام می‌شود. یک طرح دقیق پژوهشی این اطمینان را می‌دهد که مطالعه روی بخش مشخصی از فرآیند فرسایش متمرکز شده و مبنایی مفید برای پژوهش‌های بیشتر و یا رفع مشکلات فرسایش خاک در سطح منطقه فراهم کند. به‌هرحال، استفاده از کرت‌های بزرگ فرصت مناسبی برای آگاهی از بخش‌های مختلف فرآیند فرسایش خاک را فراهم می‌کند (Poesen و همکاران، ۲۰۱۹).

به‌رغم توانایی‌ها و مزایای برشمرده برای کرت‌های بزرگ و یا آبخیزهای تک‌منبع، محدودیت‌هایی نیز در استفاده از آن‌ها در شرایط طبیعی وجود دارد. برای مثال، به‌منظور افزایش ضریب اطمینان نتایج، یافتن حوزه‌های آبخیز طبیعی کاملاً مشابه با تیمارهای پژوهشی متفاوت و حتی ویژگی‌ها و شرایط نسبتاً یکسان به‌عنوان شاهد، به‌آسانی مقدور نیست. همچنین، یافتن آبخیزهای بزرگ و برخوردار از عملیات وسیع حفاظت خاک، به‌سادگی امکان‌پذیر نیست، مگر آن‌که مساحت حوزه آبخیز مذکور از چند هکتار تجاوز کند. یکی دیگر

^۱ Calibration

^۲ Validation

^۳ Ungauged Basins

از مزایای مهم حوزه‌های آبخیز کوچک (کرت‌های بزرگ) امکان ارزیابی نتایج اقدامات حفاظت خاک و مدیریت اراضی در مقیاسی است که برای کشاورزان و ساکنان محلی قابل درک و پذیرش باشد. با این حال، تعمیم نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در یک حوزه آبخیز کوچک به حوزه‌های آبخیز بزرگ (اصلی) با مشکلات اساسی مواجه است. دلیل اصلی این است که حوزه‌های کوچک به دلیل عدم شامل شدن کلیه فرایندهای فرسایشی (مانند فرسایش آبراهه‌ای و خندقی، شبکه آبراهه‌ها) و عدم تنوع کاربری‌های اراضی موجود در حوزه‌های بزرگ، نمی‌توانند نماینده مناسبی برای آن‌ها باشند. بنابراین نتایج حاصل از حوزه‌های کوچک عمدتاً فقط به حوزه‌های دیگر با اندازه و ویژگی‌های مشابه قابل تعمیم است و برای برآورد فرسایش در حوزه‌های آبخیز بزرگ، نیاز به مدل‌های مقیاس‌برگشتی^۱ یا استفاده مستقیم از حوزه‌های بزرگ به عنوان واحد مطالعه است (Zhang و همکاران، ۲۰۲۱).

همچنین، همان‌طور که بیان شد، حوزه‌های آبخیز کوچک برای مطالعات و پژوهش‌های مربوط به ارزیابی سامانه‌های حفاظت خاک بسیار مناسب است و از طرفی می‌توان از آن‌ها برای مدل‌سازی هیدرولوژی جدید و یا ارزیابی مدل‌های موجود نیز استفاده کرد. افزون بر آن، حوزه‌های آبخیز آزمایشی برای تهیه برخی داده‌های پایه برای مطالعات و پژوهش‌های درازمدت، سودمند است (Morgan، ۲۰۲۰).

در همین راستا، صادقی و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از آبخیزهای کوچک با مساحت بین ۲۸۵۰ تا ۲۲۱۰۰ مترمربع در حوزه آبخیز کسلیان، نقش کاربری‌های مختلف جنگل، مرتع و کشاورزی را بر تولید رواناب و رسوب مقایسه کردند. همچنین، Sadeghi و همکاران (۲۰۰۸) در ژاپن، فرایند فرسایش خاک و تولید رسوب را در یک آبخیز جنگلی پنج هکتاری که مشتمل بر چندین زیرآبخیز کوچک بود، مورد بررسی قرار دادند.

همچنین، انجام مطالعات هیدرولوژی، مطالعه و بررسی فرایندهای تولید رواناب، تحلیل پدیده فرسایش خاک و تولید رسوب و نیز ارزیابی تأثیر اقدامات مختلف آبخیزداری و سنجش عملکرد آن‌ها با استفاده از کرت‌های بزرگ آزمایشی و یا حوزه‌های آبخیز و در قالب طرح حوزه‌های آبخیز معرف، زوجی و نمایشی در

^۱ Upscaling

نقاط مختلف کشور، به وسیله وزارتخانه‌های نیرو و جهاد کشاورزی از چند سال پیش آغاز شد و تاکنون نیز با هدف تکمیل پایگاه‌های داده و بهبود مدل‌های برآورد فرسایش در مقیاس‌های مختلف ادامه دارد. در همین راستا، شکل ۳ نشانگر نمونه‌ای از یک آبخیز کوچک مطالعاتی در پایگاه پژوهشی سنگانه در شمال شرق کشور به همراه کرت‌های کوچک و مطابق با اندازه کرت‌های مدل USLE است (نور و عرب‌خدری، ۱۴۰۲).



شکل ۳- نمونه‌هایی از مخازن جمع‌آوری رسوب در مقیاس آبخیز کوچک در حوزه آبخیز پژوهشی سنگانه،

خراسان رضوی (برگرفته از نور و عرب‌خدری، ۱۴۰۲)

Cheggour و همکاران (۲۰۰۹) فرایندهای فرسایش را در سه مقیاس مختلف شامل کرت‌های یک مترمربعی، دامنه‌های ۱۵۰ مترمربعی و یک حوزه آبخیز کوچک (با اندازه‌گیری رسوب در خروجی) مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که در مقیاس کرت‌های کوچک، عامل اصلی تغییرپذیری فرسایش، نفوذپذیری سطحی و درصد خاک لخت است. در مقیاس دامنه نیز دامنه‌های با خاک سیلتی و اراضی فرسایش‌پذیر، عامل اصلی تولید رسوب بوده و ۹۵ درصد از رسوب کل دامنه را به خود اختصاص دادند. اما نکته مهم این است که میزان

رسوب خروجی از حوزه آبخیز کوچک (که معادل رسوب‌دهی حوضه است) با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در دو مقیاس کرت و دامنه همخوانی نداشت. به‌طوری که رسوب خروجی حوزه آبخیز حدود ۳۰ درصد بیشتر از مقادیر برآوردشده در مقیاس کرت و دامنه بود. این اختلاف می‌تواند ناشی از فرسایش در آبراهه‌های اصلی و خندق‌ها باشد که در دو مقیاس کوچک‌تر (کرت و دامنه) قابل اندازه‌گیری نیستند.

Han و همکاران (۲۰۱۲) تولید رواناب را در سه مقیاس کرت بزرگ (۱۶۰۰ متر مربع)، مزرعه شش هکتاری و آبخیز کوچک ۱۳۶ هکتاری برای ۳۰ رگبار مقایسه کردند. آنان دریافتند رواناب در واحد سطح در دو مقیاس مزرعه و آبخیز به‌طور معنی‌داری در همه وقایع بارندگی بیش از مقیاس دامنه یا کرت بزرگ بود که دلیل آن را اضافه‌شدن جریان زیرقشری دانستند. همچنین ایشان نشان دادند که ضریب رواناب در سه مقیاس به‌ترتیب در کرت کمترین و در مزرعه بیش‌ترین بود و در مقیاس آبخیز ضریب رواناب بین این دو مقیاس قرار داشت. این درحالی است که نتایج تحقیقات Srdan و همکاران (۲۰۰۴) و Van der Giesen و همکاران (۲۰۱۰) بیان‌گر رابطه معکوس ضریب رواناب با مساحت بود. آنان دلیل این امر را اثر جریان زیرقشری به‌ویژه در مقیاس مزرعه و کرت بزرگ دانستند. در حالی است که در مقیاس کرت‌های کوچک عنصر اصلی در وقوع رواناب صرفاً جریان سطحی است.

با بررسی دقیق ویژگی‌های آبخیزهای کوچک یا کرت‌های بزرگ، امکان انتقال نتایج به حوزه‌های آبخیز فاقد اندازه‌گیری و سپس تهیه یا تأیید مدل‌ها به وجود خواهد آمد. در این نوع کرت‌ها نیز مانند سایر کرت‌های اندازه‌گیری و مطالعه فرسایش، لازم است با نصب یک دستگاه باران‌سنج ثبات نسبت به محاسبه شدت، انرژی و نیز تجزیه و تحلیل پراکنش بارندگی‌های اتفاق افتاده اقدام کرد. از طرفی برای بررسی، اندازه‌گیری و ثبت رواناب حاصل از رگبارها در حوزه‌های آبخیز مناطق دشتی و مسطح، از یک پارشال فلوم و یک ثبات ارتفاع سطح آب، استفاده می‌شود. همچنین، به‌منظور تهیه نمونه‌های غلظت رسوب در فاصله‌های زمانی از قبل تعیین‌شده، می‌توان از یک نمونه‌بردار خودکار پمپی استفاده کرد. فاصله‌های زمانی نمونه‌برداری با توجه به امکانات و وسایل موجود در شروع کار معمولاً پنج دقیقه بوده و سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل رگبار، فاصله زمانی طولانی‌تر انتخاب می‌شود. در عین حال ابعاد فلوم مورد استفاده، نوع نمونه‌بردار رسوب و فاصله‌های زمانی

داده‌برداری با توجه به فرآیندهای مورد مطالعه، اندازه آبخیز، نوع کاربری حاکم، هدف‌ها و سایر شرایط خاص موجود در منطقه تعیین می‌شود (Sadeghi و همکاران، ۲۰۰۸).

حوزه‌های آبخیز کوچک دارای نسبت تحویل رسوب بالا بوده، بدین معنی که تنها بخش کمی از مواد فرسایش‌یافته در نقاط مختلف حوزه آبخیز، برجا گذاشته می‌شوند. بنابراین از داده‌های رسوب حوزه‌های آبخیز کوچک می‌توان برای سنجش و ارزیابی فرسایش خاک با پذیرش خطای کم بهره جست. با بررسی شواهد تهنشینی رسوب در حوزه آبخیز، می‌توان نسبت تحویل رسوب ویژه را تخمین زد. همچنین، براساس تجزیه و تحلیل دانه‌بندی خاک و بار رسوبی حوزه آبخیز، می‌توان نسبت تحویل رسوب را برآورد کرد. اطلاعات در زمینه رواناب آبخیزهای تک‌منبع می‌تواند در تحلیل بهتر اثر اقدامات آبخیزداری بیولوژیک و سازه‌ای در سرشاخه کمک شایانی کند. پیشنهاد می‌شود با ایجاد مخازن و یا فلوم و لیمنوگراف اقدام به داده‌برداری مستمر از رواناب و رسوب کرد تا نسبت تحویل رسوب با دقت بالاتری محاسبه شود.

۳-۴-۳- کرت‌های فرسایش با هندسه طبیعی

در شرایط طبیعی و در دامنه‌های طبیعی، پیچیدگی و تنوع قابل ملاحظه‌ای از نظر انحنا، تحدب و تقعر نیمرخ دامنه، شکل یا واگرایی و همگرایی دامنه و جهت دامنه وجود دارد (Makarov و Kriuchkov، ۲۰۲۳؛ Morgan، ۲۰۰۵). تلفیق این شاخص‌ها در یک شاخص واحد برای کمی‌کردن هندسه دامنه می‌تواند کمیت واقعی تری را نسبت به شرایط طبیعی در اندازه‌گیری فرسایش خاک فراهم کند (Keesstra و همکاران، ۲۰۱۸). اگرچه این موضوع در مطالعات مرتبط با فرسایش خاک در مقیاس دامنه اهمیت زیادی دارد، در مقیاس حوزه آبخیز به سبب وجود شرایط ترکیبی مختلف و امکان تعدیل‌کنندگی شرایط از اهمیت کمتری برخوردار است (Cerdà، ۲۰۱۰).

بااین حال، در مدل‌های فرایندی نظیر WEPP تلاش شده است الگوهای ریاضی برای کمی‌سازی اثر هندسه زمین بر کمیت رواناب و فرسایش خاک توسعه یابد (Flanagan و Nearing، ۱۹۹۵؛ Rieckhoff و Nearing، ۲۰۰۵). Kiani-Harchegani و همکاران (۲۰۲۱) پاسخ اجزای فرسایش سطحی روی چهار دامنه مستقیم موازی، مستقیم همگرا، مقعر-همگرا و محدب-همگرا تحت شدت بارندگی ۴۵ میلی‌متر بر ساعت روی خاک

لومی شنی در کرت به ابعاد دو در یک متر در شرایط آزمایشگاهی را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که اثر جداگانه و ترکیبی رگبارهای متوالی و شکل دامنه بر مقدار رواناب و هدررفت خاک در سطح احتمال کمتر از یک درصد معنی‌دار بوده است. فرسایش و رسوب‌گذاری در دامنه تابع شکل هندسی و دیگر ویژگی‌های دامنه نظیر طول شیب و شدت شیب خواهد بود (Lal, ۲۰۱۴).

با در نظر گرفتن این حقایق، برای احداث واحد پایش فرسایش در دامنه، در نظر گرفتن این مؤلفه‌ها ضروری است (نور و عرب‌خدری، ۱۴۰۲). در پژوهشی که توسط Rieke-Zapp و Nearing (۲۰۰۵) انجام شد، نتایج نسبتاً متفاوتی به دست آمد. آن‌ها بسته به انحنا و دید از بالا، کرت‌های آزمایشگاهی با شیب‌های با شکل‌های هندسی مختلف طراحی و روی آن‌ها باران با شدت ۶۰ میلی‌متر بر ساعت به مدت ۹۰ دقیقه اعمال کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در میان کرت‌های با هندسه مختلف، شیب یکنواخت بیش‌تر از دیگر انواع هندسی شیب، فرسایش شیاری و بین‌شیاری داشت (Rieke-Zapp و Nearing, ۲۰۰۵).

در همین رابطه، تفاوت رفتاری هیدرولوژی کرت‌های دو در یک متر روی دامنه با شکل‌های ترکیبی نیمرخ و شکل تحت یک بارش با شدت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت با دوام ۱۵ دقیقه توسط Kiani-Harchegani و همکاران (۲۰۲۱) تایید شده است.

۳-۴-۴- برخی ملاحظات فنی در کرت‌های فرسایش

در استفاده از کرت‌های آزمایشی محصور در مطالعات فرسایش، یکی از محدودیت‌های مهم، ایجاد یک بوم‌سازگان محصور و متفاوت با شرایط اطراف در اثر استفاده بلندمدت از این کرت‌ها است. به این معنی که حصارکشی و جداسازی فیزیکی کرت از محیط اطراف، روند طبیعی تبادل موجودات، مواد و انرژی را مختل می‌کند. برای مثال، جلوگیری از ورود دام به داخل کرت در بلندمدت باعث افزایش پوشش گیاهی و تشکیل لاشبرگ در داخل کرت می‌شود، در حالی که در عرصه مجاور (خارج از کرت) وضعیت متفاوت است. همچنین عدم تردد جانوران خاکزی و بذریشان طبیعی، ترکیب گونه‌های گیاهی و تنوع زیستی داخل کرت را تغییر می‌دهد. در نتیجه، کرت پس از چند سال دیگر معرف شرایط واقعی حوزه نیست و نتایج حاصل از آن (مانند

میزان رواناب و رسوب) با مقادیر واقعی در همان منطقه، اما خارج از کرت اختلاف پیدا می‌کند. این پدیده که به اثر حصار^۱ یا بوم‌سازگان بسته^۲ معروف است، اعتبار تعمیم نتایج کرت‌های بلندمدت را کاهش می‌دهد.

از این‌رو، به دلیل تغییر تدریجی ویژگی‌های بوم‌سازگان داخل کرت در اثر حصارکشی بلندمدت (همان اثر حصار که پیشتر توضیح داده شد)، داده‌های حاصل از کرت‌های محصور تنها برای یک دوره زمانی محدود (معمولاً دو تا پنج سال پس از احداث کرت) قابل اعتماد هستند. پس از این مدت، پوشش گیاهی، ساختمان خاک، نفوذپذیری و جمعیت جانوران خاکزی داخل کرت به‌طور قابل توجهی با شرایط خارج از کرت تفاوت پیدا می‌کند. بنابراین توصیه می‌شود که کرت‌های محصور بیشینه تا پنج سال مورد استفاده قرار گیرند و پس از آن یا محل کرت جابجا شود یا حصار برداشته شده و کرت برای مدتی (مثلاً یک تا دو سال) در معرض چرای آزاد و تردد طبیعی قرار گیرد تا دوباره با شرایط اطراف هماهنگ شود (Morgan, ۲۰۰۵).

ملاحظه دیگر در کرت‌های آزمایشی، طراحی و ساخت مخازن جمع‌آوری در این کرت‌ها در هر سه مقیاس اندازه کرت (کوچک، نمونه USLE و آبخیزهای تک‌منبع) است. هنگام طراحی اندازه و ظرفیت سامانه جمع‌کننده، باید دو عامل مدیریت بیشینه سرعت احتمالی جریان و ذخیره بیشینه حجم احتمالی رواناب را در نظر گرفت (Kriuchkov و Makarov, ۲۰۲۳).

سهم زیاد رویدادهای شدید و نادر از رواناب سالیانه و تلفات خاک به خوبی ثابت شده است. در شرایط گرمسیری، این نسبت می‌تواند به سه‌چهارم از تلفات خاک سالیانه در طول یک رگبار منفرد برسد (Lal, ۲۰۱۴). بنابراین سامانه جمع‌آوری رواناب و رسوب و حتی سامانه نمونه‌برداری باید طوری طراحی شود که رگبارهای خاص و شدید را مدیریت کند.

بیشینه دبی احتمالی رواناب را می‌توان از بیشینه نسبت رواناب احتمالی از یک خاک از قبل اشباع‌شده و بیشینه شدت احتمالی در یک دوره کوتاه محاسبه کرد. برای مثال، در یک کرت ۱۰۰ مترمربعی برای باران حدی به مقدار ۱۶۰ میلی‌متر، شدت اوج ۹۰ میلی‌متر بر ساعت، کمینه ضریب رواناب ۷۰ درصدی خواهد داشت؛ از این‌رو سرعت جریان اوجی حدود چهار لیتر بر ثانیه تولید می‌کند. برای انسداد جزئی با رسوبات

¹ Enclosure Effect

² Closed Ecosystem

انباشته شده یا زباله‌های شناور، لوله‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر مناسب است. همچنین، به فضای ذخیره‌سازی ۱۱ متر مکعب و یقیناً نوعی سامانه مقسم نیز نیاز است (Morgan, ۲۰۰۵؛ Wischmeier و Smith, ۱۹۷۸).

ذکر این نکته ضروری است که استفاده از مخازن خیلی بزرگ برای ذخیره رواناب توصیه نمی‌شود. زیرا از یک‌سو در بارش‌های معمولی، اندازه‌گیری حجم رواناب دشوار و از سوی دیگر هزینه ساخت و نگهداری این مخازن زیاد است. به‌علاوه، به‌دلیل وزن و ابعاد بزرگ، در شرایط طبیعی امکان تخریب آن بیش‌تر است. برای این منظور، استفاده از دو یا چند مخزن با کمک یک سامانه مقسم پسندیده‌تر است (Makarov و Kriuchkov, ۲۰۲۳). بدین ترتیب مخزن اول در وقایع معمولی مورد استفاده است و در وقایع حدی مخزن اول نقش مقسم را داشته و بعد از رسیدن ارتفاع آب به حد مشخصی، آب وارد لوله تخلیه و مقسم شده و به مخزن بعدی وارد می‌شود.

از آنجایی که بیشتر شبیه‌سازی‌های باران، مدت دوام ۳۰ تا ۶۰ دقیقه دارند و طبعاً زمان لازم برای اشباع لایه خاک به‌ندرت فراهم می‌شود، اشباع خاک قبل از شکل‌گیری رواناب سطحی ضروری است (Zhang و همکاران, ۲۰۲۲). آبنمودهای حاصل از کرت‌های کوچک صحرایی نشان می‌دهند که شدت رواناب پس از مدتی به حالت ثابت می‌رسد. این وضعیت برای شرایط اولیه خشک خاک پس از حدود ۴۵ دقیقه و برای شرایط اولیه مرطوب خاک پس از ۵ تا ۱۵ دقیقه رخ می‌دهد. در مقابل، زمان لازم برای نفوذ کامل و اشباع شدن نیم‌رخ بالایی خاک (عمق ۱۵ سانتی‌متر) معمولاً طولانی‌تر از مدت زمان استاندارد سنجش فرسایش‌پذیری خاک در باران‌سازها (با شدت ۴/۶ سانتی‌متر در ساعت) است. با این حال، در بارندگی‌های با شدت پایین، نتایج متفاوت خواهد بود. به‌عنوان نمونه، برخی خاک‌های حاصل از تشکیلات آذرین (ماگمایی) دارای شدت نفوذ بسیار بالایی هستند و حتی در بارندگی‌های با شدت متوسط نیز ممکن است رواناب سطحی قابل توجهی تولید نکنند (Seyfried و همکاران, ۲۰۰۱).

۳-۴-۵- مروری بر برخی روش‌های نمونه‌برداری از مخازن کرت‌های آزمایشی

رواناب و رسوب جمع‌شده در مخازن کرت‌های آزمایشی را می‌توان با روش‌های مختلفی اندازه‌گیری کرد. اندازه‌گیری حجم رواناب در مخازنی با شکل هندسی منظم ساده‌تر است و به‌سهولت می‌توان با نصب یک

خط‌کش در دیواره مخزن و قرائت ارتفاع رواناب جمع‌آوری‌شده و نیز استفاده از رابطه‌های هندسی، حجم رواناب را محاسبه کرد (Morgan, ۲۰۰۵). برای مخازن فاقد حجم هندسی منظم نیز می‌توان با تخلیه به داخل ظروف با حجم مشخص، حجم رواناب را تعیین کرد (Zhang و همکاران، ۲۰۲۲). در رویدادهای حدی با حجم رواناب بالا نیز استفاده از مخازن مرکب یا استفاده از مقسم، محاسبه حجم را تسهیل خواهد کرد (Makarov, ۲۰۲۳؛ Kriuchkov و همکاران، ۲۰۱۷).

نمونه‌برداری از مخازن جمع‌آوری‌کننده رواناب کرت‌های آزمایشی برای تعیین غلظت رسوب یکی از چالش‌های جدی در مطالعات فرسایش خاک است. چراکه اندازه‌گیری مستقیم تمام رسوب جمع‌آوری‌شده با تخلیه کامل مخزن و خشک‌کردن در آون و توزین آن، در بیشتر موارد، به‌ویژه در رویدادهای حدی، دشوار و بعضاً غیرممکن است (Walling و He, ۱۹۹۹). به‌ناچار از مخلوط رواناب و رسوب جمع‌شده در مخزن، نمونه معرف گرفته و با اندازه‌گیری غلظت رسوب در این نمونه و تعمیم آن به کل رواناب جمع‌شده در مخزن، میزان فرسایش در محدوده کرت محاسبه خواهد شد (Govers و همکاران، ۲۰۱۱).

نمونه‌برداری دستی از مخازن کرت‌ها به‌وسیله بطری‌هایی با حجم نیم تا چهار لیتر و از عمق تصادفی و پس از هم‌زدن کامل مخزن، به‌دلیل سادگی و کم‌هزینه بودن بسیار متداول است. با این روش، در برداشت نمونه از این مخازن خطاهایی صورت می‌گیرد که در تحلیل نتایج، پژوهشگر را گمراه می‌کند. منابع اصلی خطا در این شیوه از اندازه‌گیری فرسایش خاک، به تصادفی بودن عمق نمونه‌برداری در مخزن، سرعت مخلوط‌کردن و تجربه فرد نمونه‌بردار مربوط است (نیک‌کامی، ۱۳۹۹). در این حالت، منبع اصلی خطا در اندازه‌گیری ذرات درشت‌دانه رسوب است که با هم‌زدن مخزن به حالت معلق درنیامده و طی نمونه‌برداری قابل برداشت نیستند (Fernández و همکاران، ۲۰۱۹). برای برداشت این بخش از ذرات، در داخل مخزن اصلی یک ظرف کوچک قرار داده می‌شود تا نقش حوضچه آرامش را ایفا و ذرات غیرقابل تعلیق در مخزن را در خود به تله بیندازد.

نیک‌کامی و همکاران (۱۳۹۹) نشان دادند که استفاده از این ظروف یا پیش‌مخزن‌ها، خطای نمونه‌برداری را از ۷۲ درصد به حدود ۱۲ درصد کاهش می‌دهد. به‌علاوه، آن‌ها معتقدند علی‌رغم استفاده از این ظروف، برای حذف دیگر منابع خطا، اعمال ضریب ۱/۱۳ به حذف تقریبی دیگر منابع خطا در مرحله نمونه‌گیری از

مخازن کرت‌های فرسایش منجر خواهد شد (نیک‌کامی، ۱۳۹۹). یکی دیگر از راهکارها استفاده از ابزارهای نمونه‌گیری ویژه برای مخازن کرت‌هاست که در این راستا ابتکارات و طرح‌های مختلفی ارائه شده است. نمونه‌برداری با استفاده از بطری به‌صورت ترکیبی از اعماق مختلف مخزن و نمونه‌برداری با استفاده از پیپت و با کمک دستگاه مکش از جمله این وسایل است (Fernández و همکاران، ۲۰۱۹).

طراحی ابزارهای اشاره‌شده در بالا به گونه‌ای صورت می‌گیرد که قادر به برداشت نمونه از تمام عمق مخزن باشند. در همین ارتباط، نیک‌کامی و همکاران (۱۳۸۱) به طراحی و ساخت دستگاه نمونه‌بردار استوانه‌ای در پژوهشکده تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی اقدام کردند و نشان دادند که دقت این دستگاه نمونه‌بردار بالاتر از نوع پیپت و دستگاه نمونه‌برداری بطری مرکب است (نیک‌کامی، ۱۳۹۹). در عین حال، روش ساده‌ی دیگری نیز وجود دارد: برداشت مقطعی نمونه‌ها در حین تخلیه رواناب از کرت در طول آزمایش، با رعایت فاصله زمانی مناسب بین برداشت‌ها. این روش به تازگی در آزمایشگاه شبیه‌ساز باران و فرسایش خاک دانشگاه تربیت مدرس مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج کاملاً موفقی به همراه داشته است.

۳-۵- فناوری‌های نوین در پایش میدانی فرسایش (پهپاد، سنجش از دور و AI)

پایش و ارزیابی فرسایش خاک از مهم‌ترین چالش‌های حوزه حفاظت خاک است که به‌دلیل گستردگی حوزه‌ها و پیچیدگی فرایندها، نیازمند استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای جمع‌آوری داده‌های دقیق و به‌روز است. در سال‌های اخیر، فناوری‌های نوین مانند پهپادها (UAVs)، سنجش از دور (Remote Sensing) و هوش مصنوعی (Artificial Intelligence - AI) به‌طور گسترده در مطالعات فرسایش خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این فناوری‌ها امکان پایش سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه فرسایش را فراهم کرده و باعث تحول در شیوه‌های سنتی اندازه‌گیری و مدل‌سازی فرسایش شده‌اند (Gomez و همکاران، ۲۰۱۶؛ Jin و همکاران، ۲۰۲۱).

۳-۵-۱- پهپادها (UAVs) در پایش فرسایش خاک

پهپادها به عنوان یکی از مهم ترین فناوری های نوین در سنجش از دور، قابلیت تصویربرداری با وضوح مکانی بسیار بالا و انعطاف پذیری بالا را در مناطق سخت گذر فراهم می کنند (Anderson و Gaston، ۲۰۱۳). استفاده از پهپادها (UAVs) در پایش فرسایش خاک، بر پایه فتوگرامتری هوایی و تولید مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت بالا استوار است. پهپاد مجهز به دوربین، با پرواز در ارتفاع پایین و ثبت تصاویر همپوشان از سطح زمین، امکان ساخت مدل سه بعدی از توپوگرافی را فراهم می کند. با مقایسه مدل های ارتفاعی تهیه شده در دو زمان متفاوت (پیش و پس از یک یا چند رویداد بارندگی)، می توان تغییرات پستی و بلندی سطح زمین (نظیر تشکیل آب گرفتگی ها، ایجاد و گسترش شیارهای فرسایشی و الگوی پراکندگی رسوبات) را با دقت سانتی متری تا میلی متری نقشه برداری کرد. این روش برای مقیاس های کوچک تا متوسط (از چند هکتار تا چند ده کیلومتر مربع) بسیار کارآمد است و امکان پایش فرسایش را با سرعت و دقتی فراتر از روش های زمینی سنتی فراهم می سازد (Merritt و همکاران، ۲۰۱۶).

به علاوه، تصاویر تهیه شده توسط پهپادها را می توان با استفاده از روش های فتوگرامتری سه بعدی پردازش کرد و مدل های رقومی ارتفاعی (DEM) با دقت بالا تولید کرد. در این مدل ها، تغییرات حجم خاک و مقدار فرسایش به صورت کمی اندازه گیری می شود (James و همکاران، ۲۰۱۷). پهپادها همچنین امکان تکرارپذیری بالای پایش را در فواصل زمانی کوتاه تر فراهم می آورند که برای مطالعات دینامیکی فرسایش بسیار حیاتی است (Turner و همکاران، ۲۰۱۶).

۳-۵-۲- سنجش از دور^۱ در پایش فرسایش

سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره ای و هوایی به عنوان روشی غیرمخرب و کارآمد در پایش فرسایش خاک مورد توجه قرار گرفته است. این روش با بهره گیری از داده های طیف های مختلف (مرئی، مادون قرمز، رادار) می تواند ویژگی های سطح زمین، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و شاخص های مرتبط با فرسایش را در مقیاس های محلی تا جهانی اندازه گیری و تحلیل کند (Rango و Laliberte، ۲۰۰۹).

^۱ . Remote Sensing

داده‌های سنجش از دور امکان استفاده از ابزارهای مختلفی را برای تخمین فرسایش خاک و تغییرات پوشش گیاهی فراهم می‌کنند. از جمله این ابزارها می‌توان به شاخص ^۱NDVI برای ارزیابی پوشش گیاهی و مدل ^۲RUSLE برای برآورد فرسایش خاک اشاره کرد (Kheir و همکاران، ۲۰۱۶). داده‌های راداری (SAR) نیز به دلیل قابلیت تصویربرداری در هر شرایط آب و هوایی و شبانه‌روزی، در شناسایی تغییرات زبری سطح و ناهمواری‌های ناشی از فرسایش کاربرد دارند (Zhao و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین ترکیب داده‌های سنجش از دور با مدل‌های فرسایش خاک باعث افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و امکان پایش همزمان تغییرات مکانی و زمانی فرسایش شده است (Borrelli و همکاران، ۲۰۱۷).

۳-۵-۳- هوش مصنوعی^۳ در تحلیل داده‌های فرسایش

با افزایش حجم داده‌های حاصل از سنجش از دور و پهپادها، تحلیل و استخراج اطلاعات مفید از این داده‌ها چالشی مهم به شمار می‌رود. هوش مصنوعی و به‌ویژه یادگیری ماشین^۴ و یادگیری عمیق^۵ به‌عنوان فناوری‌هایی نوین در تحلیل داده‌های بزرگ به کار گرفته شده‌اند (Reichstein و همکاران، ۲۰۱۹). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند الگوهای پیچیده در داده‌های محیطی را شناسایی کرده و مدل‌های پیش‌بینی فرسایش را با دقت بالاتری توسعه دهند. به‌عنوان مثال، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، درخت تصمیم^۶ و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در تخمین نرخ فرسایش خاک، ارزیابی تأثیر متغیرهای اقلیمی و خاکی بسیار موفق بوده است (Aksoy و همکاران، ۲۰۱۸؛ Saha و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه‌براین، فناوری‌های AI در تلفیق داده‌های چندمنبع (مانند داده‌های ماهواره‌ای، داده‌های پهپادی و داده‌های میدانی) برای ایجاد نقشه‌های دقیق‌تر و مدل‌های دینامیکی فرسایش نقش مهمی دارند (Tayyebi

^۱ Normalized Difference Vegetation Index

^۲ Revised Universal Soil Loss Equation

^۳ Artificial Intelligence

^۴ Machine Learning

^۵ Deep Learning

^۶ Decision Trees

و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین AI در پایش زنده و خودکار فرسایش با استفاده از دوربین‌های هوشمند و سنسورهای متصل به اینترنت اشیاء (IoT) نیز کاربرد دارد (Khatami و همکاران، ۲۰۲۱).

فناوری‌های نوین مانند پهپادها، سنجش از دور و هوش مصنوعی امکان پایش سریع، دقیق و مقرون به صرفه فرسایش خاک را فراهم کرده‌اند. این فناوری‌ها علاوه بر افزایش دقت اندازه‌گیری، توانسته‌اند ابعاد جدیدی از تحلیل فرآیندهای فرسایش را به پژوهشگران ارائه دهند و چشم‌اندازهای نوینی در مدیریت و حفاظت خاک ایجاد کنند. با پیشرفت مداوم این فناوری‌ها و تلفیق آن‌ها با داده‌های میدانی، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک توانمندی‌های پایش و مدیریت فرسایش خاک به شکل قابل توجهی بهبود یابد.

۳-۶- تفسیر سه بعدی تصاویر (فتوگرامتری زمینی و برد کوتاه)

۳-۶-۱- روش تفسیر سه بعدی عکس

استفاده از روش عکسبرداری برای اندازه‌گیری تغییرات تراز سطح خاک مستلزم به کارگیری تجهیزاتی با دقت بالا، واسنجی شده و همچنین سکوه‌های ثابت یا متحرک بر روی زمین یا پروازهای کم‌ارتفاع است (James و Robson، ۲۰۱۲).

فرایند تولید تصاویر سه بعدی شامل سه مرحله کلیدی است: (الف) شناسایی نقاط کلیدی، (ب) تطبیق پدیده‌ها در تصاویر مختلف، و (ج) بازسازی موقعیت دوربین و ساختار سه بعدی صحنه (Westoby و همکاران، ۲۰۱۲). حاصل این فرایند، مجموعه‌ای از نقاط سه بعدی موسوم به «ابر نقاط» است که برای تحلیل نیاز به ثبت ژئورفرنس دارند (Eltner و همکاران، ۲۰۱۶).

در کاربردهای ارزیابی فرسایش، فاصله ۱۵ متری از سطح زمین و انجام تصویربرداری در بازه‌های زمانی چندساله (معمولاً پنج سال) توصیه می‌شود تا تغییرات معنی‌دار سطح قابل سنجش باشد (Rieke-Zapp و Nearing، ۲۰۰۵). نقشه‌های پستی و بلندی با مقیاس ۱:۲۴ و خطوط تراز با دقت ۰/۱۵ متر با این روش قابل تهیه هستند. همچنین می‌توان با استفاده از عکس‌های هوایی تهیه شده از ارتفاع ۱۸۰ تا ۲۷۵ متر، میزان فرسایش شیاری و آب‌بندی را با دقتی در حدود ۲۵ میلی‌متر تخمین زد (Palmeri و همکاران، ۲۰۲۴).

کنترل زمینی^۱ و نمونه‌برداری میدانی، اجزای کلیدی برای صحت‌سنجی نتایج این روش هستند (Chen و همکاران، ۲۰۲۴). از روش تفسیر عکس سه‌بعدی، نه تنها برای ارزیابی مستقیم، بلکه برای اعتبارسنجی و تعیین دقت سایر روش‌های اندازه‌گیری فرسایش (مثلاً روش‌های تماسی یا نیمه‌مستقیم) استفاده می‌شود. برای نمونه، مطالعه‌ای توسط Thomsen و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که دقت مکانی روش تصویربرداری سه‌بعدی حدود ۵/۷ برابر بیشتر از روش صفحات مشبک است.

از منظر پردازش داده‌ها، روش‌های متعددی برای تحلیل تصویرها در دسترس هستند که تحت عنوان پردازش تصویر شناخته می‌شوند. یکی از روش‌های نوین در این زمینه، تحلیل سایه با تغییر زاویه تابش نور برای تشخیص تفاوت‌های ریز زبری سطح خاک است (Bretar و همکاران، ۲۰۱۳). از این طریق، شاخص‌های آماری مانند انحراف معیار، ضریب تغییرات، ضریب اعوجاج سطح^۲ و ضریب همبستگی طولی^۳ برای کمی‌سازی میزان فرسایش استخراج می‌شوند (Bretar و همکاران، ۲۰۱۳).

علاوه بر روش‌های آماری کلاسیک، تحلیل زمین‌آماري^۴ با نیم‌تغییرنما و تحلیل ابعاد فراکتالی نیز برای مدل‌سازی ناهمواری سطح خاک و استخراج شاخص‌های ساختاری پستی‌وبلندی استفاده می‌شود (Bretar و همکاران، ۲۰۱۳؛ Chen و همکاران، ۲۰۲۴). این مدل‌ها با استفاده از DEM‌های تولیدشده از مجموعه تصاویر، تغییرات حجمی سطح را به‌طور دقیق ارزیابی می‌کنند.

در حال حاضر، مجموعه‌ای از ابزارها و نرم‌افزارهای پیشرفته برای این منظور در دسترس هستند. از جمله پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به Micmac، Bundler، PMVS2، Arc3D و Photosynth Microsoft اشاره کرد (James و همکاران، ۲۰۱۹). کاربرد این ابزارها در کرت‌های آزمایشی فرسایش خاک نیز در مطالعاتی مانند Bagarello و Ferro (۲۰۱۷) گزارش شده است.

¹ Ground control points

² Surface skewness

³ Longitudinal correlation coefficient

⁴ Geostatistical interpolation



شکل ۴- استفاده از پهپاد برای تهیه تصاویرهای رقومی از فرسایش خاک در سطح کرت‌های فرسایش خاک واقع در جزیره سیسیل ایتالیا

۳-۶-۲- روش اسکن لیزری و سنجنده‌های راداری

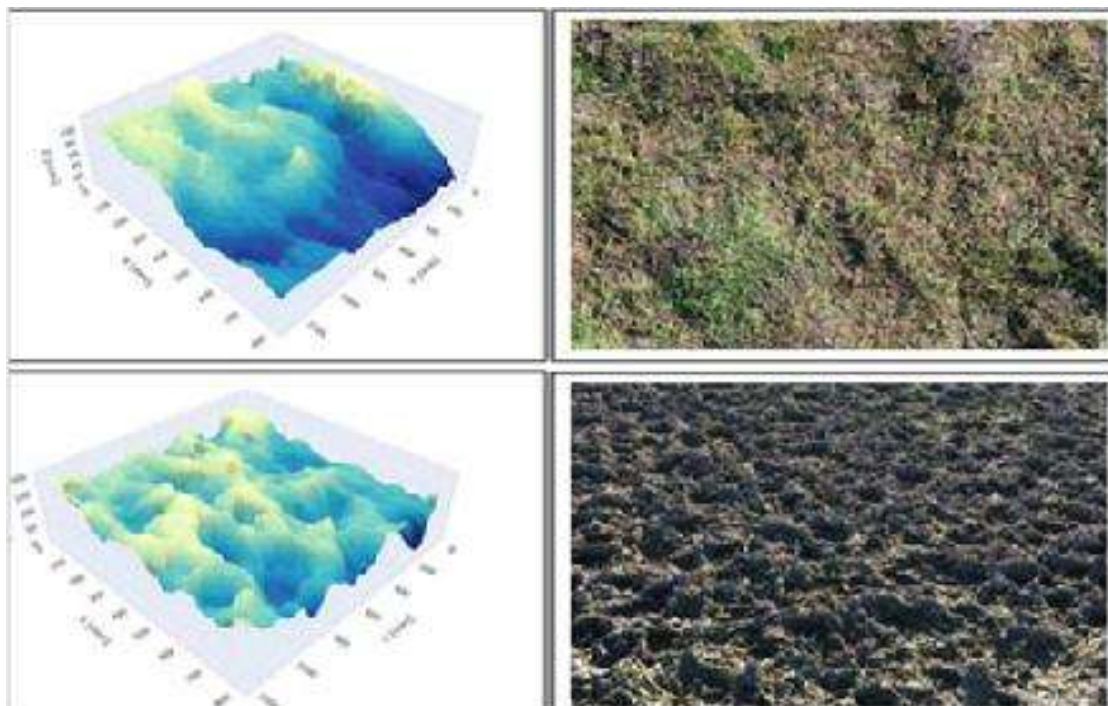
در روش اسکن لیزری، پرتوهای لیزر به سطح زمین تابانده شده و بازتاب آن توسط حسگرهای نوری یا دوربین‌های دیجیتال ثبت می‌شود. این داده‌ها سپس برای تولید مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک بالا و تعیین تغییرات تراز سطح خاک تحلیل می‌شوند (Chiari و همکاران، ۲۰۰۹). تفکیک عمودی این روش بسیار بالا است، به‌طوری‌که در برخی مطالعات دقت آن تا ۰/۰۷ میلی‌متر نیز گزارش شده است (Polyakov و Nearing، ۲۰۱۹). بنابراین، این فناوری برای شناسایی و پایش ریزعارضه‌های سطح خاک، به‌ویژه در مطالعات فرسایش سطحی و شیاری، بسیار مناسب است.

در این روش، سطح خاک پیش و پس از رویداد فرسایشی اسکن شده و اختلاف تراز به‌عنوان شاخص فرسایش مورد تحلیل قرار می‌گیرد. به‌طور معمول از اسکنرهای لیزری زمینی^۱ برای مطالعات دقیق در مقیاس مزرعه‌ای استفاده می‌شود. در مقیاس‌های وسیع‌تر، از فناوری اسکن لیزری هواپرد^۲ استفاده می‌شود که برای بررسی تغییرات سطحی گسترده مانند بستر رودخانه‌ها یا تحلیل ژئومورفولوژیکی مناطق وسیع کارایی دارد.

^۱ Terrestrial Laser Scanners (TLS)

^۲ Airborne LiDAR

(Grandy و همکاران، ۲۰۲۰). شکل ۵، نمونه‌ای از تهیه نقشه پستی و بلندی خردمقیاس با استفاده از داده‌های اسکن لیزری را نشان می‌دهد.



شکل ۵- تهیه نقشه پستی و بلندی خرد به با روش تفسیر سه‌بعدی تصویر حاصل از اسکن لیزری (Grandy و همکاران، ۲۰۲۰)

با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر در فناوری LiDAR، محدودیت‌هایی نیز گزارش شده‌اند. به‌عنوان مثال، Wells . همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که وضوح مکانی فناوری LiDAR هوابرد معمولاً برای بررسی آبکندهای موقتی کافی نیست (کمتر از ۱۰ سانتی‌متر). در مقابل، سامانه‌های لیزر اسکنر زمین‌پایه^۱ و نیز روش فتوگرامتری با استفاده از تصاویر زمینی دارای وضوح بالا، دقت بیشتری در بررسی چنین عوارضی فراهم می‌کنند. TLS یک دستگاه نقشه‌برداری سه‌بعدی است که بر روی سه‌پایه در سطح زمین نصب شده و با چرخش ۳۶۰ درجه، پرتو لیزر را به محیط اطراف تابش می‌کند. با اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت پرتو لیزر به هر نقطه از سطح زمین، موقعیت دقیق آن نقاط (شامل مختصات X، Y و Z) با دقت میلی‌متری محاسبه و

^۱ Terrestrial Laser Scanner (TLS)

به صورت ابری از نقاط^۱ ذخیره می‌شود. در مطالعات فرسایش خاک، از TLS برای تهیه مدل رقومی سطحی (DSM) با دقت بسیار بالا، مقایسه تغییرات توپوگرافی در بازه‌های زمانی مختلف، محاسبه حجم دقیق خاک فرسایش یافته (به جای صرفاً سطح آن)، و رصد تشکیل شیارها، آب‌گرفتگی‌ها و خندق‌ها استفاده می‌شود. در کنار اسکن لیزری، سنجنده‌های راداری هوابرد و فضابرد نیز برای تحلیل تغییرات سطح زمین و فرسایش خاک به‌ویژه در مقیاس‌های وسیع کاربرد دارند. به عنوان نمونه، سامانه‌های تصویربرداری با استفاده از رادار دهانه ترکیبی (Synthetic Aperture Radar: SAR) از دهه ۱۹۹۰ میلادی به منظور پایش تغییرات پستی و بلندی زمین توسعه یافته‌اند، اما هنوز کاربرد آن‌ها در مطالعات فرسایش خاک محدود باقی مانده است (Kulemin, ۱۹۹۹; Wells و همکاران، ۲۰۱۶). این سامانه‌ها قادرند با تغییرات تداخلی (InSAR)، تغییرات میلی‌متری سطح زمین را در طی زمان شناسایی کنند، اما تفکیک مکانی آن‌ها به گونه‌ای است که برای ردیابی و اندازه‌گیری فرسایش‌های ریزمقیاس نظیر فرسایش سطحی باید با احتیاط استفاده شوند.

۴- کاربردها، محدودیت‌ها و چالش‌های روش‌های میدانی اندازه‌گیری فرسایش خاک

۴-۱- استفاده از ردیاب‌های رادیواکتیو در مطالعه فرسایش

کاربردها:

- برآورد میزان جابه‌جایی خاک در بازه‌های زمانی بلندمدت
- منشأیابی رسوبات در آبخیزها با دقت بالا (Walling و He, ۱۹۹۷)

محدودیت‌ها:

- نیاز به مجوزهای خاص برای استفاده از مواد پرتوزا
- تجهیزات گران‌قیمت و حساس برای آشکارسازی ایزوتوپ‌ها

^۱ . Point Cloud

چالش‌ها:

- مسائل ایمنی زیست‌محیطی و الزامات حمل‌ونقل
- دشواری در تفکیک سیگنال در خاک‌های با زمینه پرتوزایی طبیعی

۴-۲- ردیاب‌های جایگزین: مغناطیسی، رنگی، فلورسنت و زیستی

کاربردها:

- جایگزین ایمن‌تر برای ردیاب‌های رادیواکتیو
- بررسی فرسایش شیار، بین‌شیاری و انتقال رسوب (Hu و همکاران، ۲۰۱۱)

محدودیت‌ها:

- دقت پایین‌تر نسبت به ایزوتوپ‌ها در مسیرهای پیچیده فرسایش
- احتمال جذب یا تغییر رفتار در خاک‌های مختلف

چالش‌ها:

- نیاز به توسعه ردیاب‌های مناسب برای شرایط خاص خاک
- تأثیر ترکیبات آلی خاک و رطوبت بر بازیابی ردیاب‌ها (Quinton و Díez، ۲۰۱۰)

۴-۳- اندازه‌گیری فرسایش با استفاده از رسوب‌گیرها

کاربردها:

- تخمین مستقیم بار رسوبی منتقل‌شده به پایین‌دست دامنه یا آبخیز
- ارزیابی اثربخشی عملیات آبخیزداری (Sadeghi و همکاران، ۲۰۱۲)

محدودیت‌ها:

- عدم توانایی در تفکیک مکانی منشأ رسوبات
- نیاز به تخلیه منظم مخازن و رسوب‌زدایی

چالش‌ها:

- طراحی بهینه حجم مخزن متناسب با شدت بارش
- امکان انسداد یا سرریز در رخدادهای شدید

۴-۴- کرت‌های محصور اندازه‌گیری فرسایش سطحی

کاربردها:

- جمع‌آوری داده‌های دقیق از رواناب و رسوب در مقیاس پلات
- ارزیابی کارایی تیمارهای حفاظتی (Kriuchkov و همکاران، ۲۰۱۷؛ Makarov، ۲۰۲۳)

محدودیت‌ها:

- مقیاس کوچک و نمایندگی محدود از شرایط واقعی دامنه
- وابستگی به طراحی هندسی و جهت‌گیری کرت

چالش‌ها:

- نگهداری مستمر و واسنجی تجهیزات اندازه‌گیری
- اثر مرزهای مصنوعی بر مسیر رواناب

۴-۵- کرت‌های بزرگ مقیاس و حوزه‌های آبخیز تک‌منبع

کاربردها:

- بررسی فرآیندهای فرسایشی در مقیاس واقعی تر
- واسنجی مدل‌های فرسایش برای کاربرد منطقه‌ای (Ziadat و Taimeh، ۲۰۱۳)

محدودیت‌ها:

- هزینه بالای ساخت و نگهداری
- تأثیرگذاری متقابل پارامترهای طبیعی و انسانی

چالش‌ها:

- عدم کنترل دقیق بر ورودی و خروجی آب و رسوب در حوضه‌های با بارندگی طبیعی

- لزوم دوره‌های بلند پایش برای دریافت نتایج معنی‌دار

۴-۶- کرت‌های با هندسه طبیعی و شرایط واقعی میدانی

کاربردها:

- نزدیک‌سازی شرایط اندازه‌گیری به واقعیت‌های اکولوژیکی
- بررسی برهم‌کنش پوشش گیاهی، خاک و توپوگرافی (Berhe و همکاران، ۲۰۱۸)

محدودیت‌ها:

- کاهش دقت تکرارپذیری نتایج به دلیل تغییرپذیری زیاد - به این معنی که اگر یک آزمایش در یک کرت طبیعی چندین بار تکرار شود، نتایج یکسان به دست نمی‌آید.
- مشکل در تعمیم نتایج به سایر مناطق - به این معنی که نتایج به دست آمده از یک کرت طبیعی فقط برای همان مکان و شرایط خاص آن معتبر است.

چالش‌ها:

- طراحی انعطاف‌پذیر و درعین حال استاندارد
- مدیریت تداخل تیمارها در کرت‌های مجاور

۴-۷- فناوری‌های نوین در پایش میدانی فرسایش (پهپاد، سنجش از دور و AI)

کاربردها:

- تهیه DEM های بسیار دقیق و با دقت بالا در زمان کوتاه (Eltner و Sofia، ۲۰۲۰)
- شناسایی تغییرات سطحی ناشی از فرسایش در مقیاس بزرگ (Castillo و همکاران، ۲۰۱۲)
- تحلیل خودکار تصاویر و پیش‌بینی روند فرسایش با الگوریتم‌های هوش مصنوعی (Xiao و همکاران، ۲۰۲۳)

محدودیت‌ها:

- نیاز به تخصص فنی در پردازش داده‌ها

- وابستگی شدید به شرایط جوی، به‌ویژه برای پهپادها - به این معنی که پرواز پهپاد و کیفیت تصاویر و داده‌های جمع‌آوری‌شده تحت تأثیر عواملی مانند باد شدید (اختلال در کنترل و تاری تصاویر)، باران (آسیب به دستگاه و نویز در تصاویر)، مه و ابر (کاهش دید و کنتراست)، نور شدید خورشید (ایجاد سایه‌های مزاحم) و دمای بسیار پایین یا بالا (کاهش عمر باتری و اختلال در عملکرد سنسورها) قرار دارد. به همین دلیل، زمان‌بندی پروازها باید کاملاً با پیش‌بینی شرایط جوی هماهنگ شود و در بسیاری از روزهای سال امکان پرواز وجود ندارد.

چالش‌ها:

- تهیه داده‌های مرجع برای آموزش مدل‌های AI
- اطمینان از دقت و صحت طبقه‌بندی در محیط‌های پیچیده

۸-۴- تفسیر سه‌بعدی تصاویر (فتوگرامتری زمینی و برد کوتاه)

۸-۴-۱- روش تفسیر سه‌بعدی عکس

کاربردها:

- تولید داده‌های دقیق سه‌بعدی از سطوح کوچک و با وضوح بالا (Luhmann و همکاران، ۲۰۱۴)
- امکان اندازه‌گیری تغییرات بسیار کوچک در تراز زمین
- تحلیل الگوهای فرسایش و رسوب‌گذاری
- ارزیابی تأثیر عوامل مدیریتی
- عدم نیاز به تجهیزات بسیار گران‌قیمت
- قابلیت استفاده در شرایط میدانی متنوع (James و Robson، ۲۰۱۴)
- قابلیت بازسازی سریع مدل‌های سه‌بعدی
- امکان پایش تغییرات فرسایش در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت

محدودیت‌ها:

- نیاز به نور مناسب و ثابت در زمان تصویربرداری

- حساسیت به تغییرات آب‌وهوایی
- نیاز به پردازش‌های پیچیده داده‌ها (Westoby و همکاران، ۲۰۱۲)

چالش‌ها:

- مستلزم دانش تخصصی و زمان بالا
- در شرایط پوشش گیاهی متراکم یا سطوح بسیار ناهموار، دسترسی به خطوط دید کامل دشوار و باعث کاهش دقت مدل‌های سه‌بعدی شود (James و Robson، ۲۰۱۲)

۴-۸-۲- کاربرد اسکن لیزری زمینی و سنجنده‌های راداری

کاربردها:

- تهیه مدل‌های دقیق از ریزناهمواری‌های سطح خاک (Tarolli، ۲۰۱۴)
- پایش تغییرات سطح خاک در بازه‌های زمانی کوتاه
- شناسایی مسیرهای جریان سطحی و مناطق تمرکز فرسایش (Eltner و همکاران، ۲۰۱۶)

محدودیت‌ها:

- هزینه بالای تجهیزات اسکنرهای لیزری و رادارهای زمینی
- نیاز به دقت بالا در ژئورفرنسینگ و تنظیم موقعیت اسکنر
- عدم کارایی مناسب در شرایط پوشش گیاهی انبوه (James و همکاران، ۲۰۱۹)

چالش‌ها:

- حساسیت زیاد به شرایط نوری و رطوبتی سطح
- نیاز به تکرار اسکن در شرایط یکسان برای مقایسه‌های زمانی دقیق

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۵-۱- جمع‌بندی کلی

مطالعه و ارزیابی فرسایش خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای تخریب سرزمین، نیازمند به‌کارگیری روش‌های دقیق، متناسب با مقیاس و هدف تحقیق است. همان‌طور که در فصول پیشین بررسی شد، روش‌های سنجش فرسایش خاک را می‌توان در قالب دو رویکرد اصلی مستقیم (مانند کرت‌های اندازه‌گیری و رسوب‌گیرها) و غیرمستقیم (مانند استفاده از ردیاب‌ها، تصویربرداری سه‌بعدی، و فناوری‌های سنجش از دور) طبقه‌بندی کرد. هریک از این روش‌ها دارای مزایا، محدودیت‌ها، دقت اجرایی و نیازمندی‌های خاصی هستند و کاربرد آن‌ها وابسته به هدف مطالعه، مقیاس مکانی و زمانی، ویژگی‌های منطقه و امکانات فنی و مالی موجود است (Boardman, ۲۰۰۶؛ Kriuchkov و همکاران، ۲۰۱۷؛ Makarov, ۲۰۲۳).

در دهه‌های اخیر، توسعه فناوری‌های نوین مانند فتوگرامتری برد نزدیک، اسکن لیزری زمینی (TLS)، پهپادها (UAV)، سنجش از دور ماهواره‌ای و کاربرد هوش مصنوعی، تحولی در پایش فرسایش خاک ایجاد کرده‌اند. این روش‌ها امکان پایش گسترده و با دقت بالا را فراهم نموده، اما همچنان نیازمند داده‌های میدانی به‌عنوان مرجع (ground truth) برای واسنجی و اعتبارسنجی هستند (Eltner و Sofia, ۲۰۲۰؛ Xiao و همکاران، ۲۰۲۳).

همچنین استفاده از ردیاب‌های ایزوتوپی، مغناطیسی، رنگی و عناصر خاکی کمیاب، فرصت‌هایی برای مطالعه فرآیندهای بلندمدت و ردیابی منشأ رسوب ایجاد کرده است، بااین‌حال هرکدام دارای چالش‌هایی مانند هزینه، خطرات زیست‌محیطی یا محدودیت در تکرارپذیری نتایج هستند (Walling و He, ۱۹۹۷؛ Díez و Quinton, ۲۰۱۰؛ Hu و همکاران، ۲۰۱۱).

۵-۲- توصیه‌ها برای انتخاب روش

با توجه به یافته‌های حاصل از بررسی روش‌های میدانی سنجش فرسایش، توصیه‌های زیر برای انتخاب روش مناسب ارائه می‌شود:

مطالعات مقیاس کرت یا دامنه‌ای کوچک:

استفاده از کرت‌های محصور، صفحات جمع‌آوری رواناب^۱، و ردیاب‌های فلورسنت یا مغناطیسی به دلیل سهولت نصب، دقت بالا و هزینه پایین پیشنهاد می‌شود. صفحات جمع‌آوری رواناب، صفحاتی از جنس فلز گالوانیزه یا پلاستیک مقاوم هستند که در انتهای پایین‌دست کرت نصب می‌شوند و با داشتن شیب ملایم، تمام رواناب خروجی از کرت را جمع‌آوری کرده و به سمت یک مخزن یا فلوم هدایت می‌کنند. این صفحات اطمینان حاصل می‌کنند که هیچ بخشی از رواناب از دست نرود و نمونه‌برداری از رسوب به‌طور کامل انجام شود.

مطالعات حوضه‌ای یا منطقه‌ای:

ترکیب داده‌های کرت‌های بزرگ‌مقیاس، نمونه‌برداری از رسوب‌گیرها و روش‌های سنجش از دور) مانند UAV، LiDAR یا تصاویر چندطیفی برای تخمین فرسایش و منشأیابی رسوبات مفید است.

پایش طولانی‌مدت و تحلیل تاریخی فرسایش:

استفاده از ایزوتوپ‌های پرتوزا مانند ^{137}Cs یا ^{210}Pb مناسب بوده، اما نیازمند امکانات فنی خاص، مجوزهای ایمنی و تحلیل‌های آزمایشگاهی است.

پایش تغییرات کوتاه‌مدت و دقیق سطح خاک:

روش‌هایی مانند اسکن لیزری، تصویربرداری سه‌بعدی و تصویربرداری از پهپادها^۲ می‌توانند تغییرات ریز سطح را به‌دقت ثبت کنند.

^۱ Runoff Collection Plates

^۲ Structure-from-Motion

تحلیل مدل سازی و پیش بینی فرسایش:

ترکیب داده های میدانی با الگوریتم های یادگیری ماشین^۱ و شبکه های عصبی مصنوعی برای مدل سازی غیرخطی و پیش بینی فرسایش در شرایط مختلف پیشنهاد می شود (Xiao و همکاران، ۲۰۲۳؛ Gholami و همکاران، ۲۰۲۲).

۵-۳- چشم اندازهای پژوهشی

مطالعات آینده در حوزه پایش و سنجش فرسایش خاک باید در مسیرهای زیر متمرکز شوند: یکپارچه سازی روش های میدانی و غیرمستقیم: ایجاد سامانه های ترکیبی که داده های سنجنده های مختلف (زمینی، هوایی، ماهواره ای) را تلفیق کرده و با استفاده از مدل های هوشمند، نتایج جامع تری از فرسایش ارائه دهند.

پیشرفت در ردیاب های زیستی و ایمن تر: توسعه ردیاب های زیستی با قابلیت بازیابی بالا، ارزان و بدون خطر برای محیط زیست برای استفاده گسترده تر در مطالعات فرسایش.

بهبود دقت مکانی و زمانی مدل ها با کمک AI: استفاده از هوش مصنوعی برای تحلیل خودکار داده های تصویری، تشخیص الگوهای فرسایشی و پیش بینی نواحی مستعد فرسایش در شرایط اقلیمی مختلف (Zhou و همکاران، ۲۰۲۳).

استفاده از سامانه های پایش برخط^۲: طراحی سامانه های هوشمند و حسگرهای متصل به اینترنت اشیاء (IoT) برای پایش همزمان شدت بارش، رواناب و انتقال رسوب.

توسعه استانداردهای ملی و منطقه ای برای سنجش فرسایش: تدوین دستورالعمل های بومی شده برای انتخاب، اجرا و تحلیل داده های روش های مختلف، به ویژه در کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه خشک مانند ایران.

¹ Machine Learning

² . Online monitoring

ملاحظات اخلاقی

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان اعلام می‌دارند که این اثر با رعایت کامل اخلاق نشر تهیه شده و هیچ‌گونه سرقت ادبی، رفتار سوء، جعل داده‌ها، ارسال یا انتشار هم‌زمان در جای دیگر صورت نپذیرفته است. همچنین هیچ منافع تجاری در راستای آن وجود نداشته و وجهی بابت ارائه اثر پیش از این دریافت نشده است.

مشارکت نویسندگان: نویسنده اول: یحیی پرویزی (طرح‌ریزی، مفهوم‌سازی، بررسی منابع، دسته‌بندی علمی متن، تدوین نسخه اولیه دستنامه)، نویسنده دوم: زهرا گرامی (ویرایش نسخه اولیه، تکمیل بررسی منابع در بخش فناوری‌های نوین و تفسیر عکس، دسته‌بندی موضوعی متن).

بیانیه: در طول تهیه این اثر، نویسندگان از هوش مصنوعی و یا دیگر ابزارهای هوشمند استفاده نکردند و مسئولیت کامل محتوای منتشرشده را بر عهده می‌گیرند.

منابع مورد استفاده

- صادقی، ح.ر.، پرویزی، ی. ۱۴۰۱. مطالعه و اندازه‌گیری فرسایش خاک، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. تهران، ۳۹۸ صفحه.
- خدادادی، م.، گرجی، م.، قنادی مراغه، م.، بهرامی سامانی، ع.، مفتاحی، م.، میرسید حسینی، ح.، زاهدی امیری، ق. ۱۳۹۳. ارزیابی اولیه امکان استفاده از رادیونوکلید سرب-۲۱۰ اضافی در برآورد توزیع مجدد خاک در اراضی دیم منطقه کوهین. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۳۵(۴): ۵۳-۶۳.
- سلیمان‌پور، م.، غلامی ح.، رحمتی ا.، شادفر، ص. ۱۴۰۱. بررسی سهم منابع تولیدکننده رسوب ناشی از فرسایش‌های ورقه‌ای، شیاری، خندقی و آبراهه‌ای با استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب در حوزه آبخیز نیریز استان فارس. پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۱۲(۳): ۷۷-۵۷.

- نور، ح. و عرب خدری، م. ۱۴۰۲. برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۱): ۴۲-۵۳.
- نیک کامی، د. ۱۳۹۹. افزایش دقت نمونه برداری از رواناب و رسوب مخازن کرت های فرسایش. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۲(۳): ۶۳۵-۶۴۲.

- Aksoy, H., Kavvas, M.L., Yoon, J., Şimşek, O. & Kişi, Ö. 2018. Application of machine learning algorithms for soil erosion modeling: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(3): 161.
- Anderson, K. & Gaston, K.J. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3): 138–146.
- Bagarello, V. & Ferro, V. 2017. Application of close-range photogrammetry for soil erosion monitoring on experimental plots. *Catena*, 150: 202–214.
- Boardman, J. & Poesen, J. 2006. Soil erosion in Europe: Major processes, causes and consequences. Wiley. pp. 487, <https://doi.org/10.1002/0470859202.ch36>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L. & Panagos, P. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8(1): 2013. pp 13. doi: 10.1038/s41467-017-02142-7.
- Bretar, F., Arab-Sedze, M., Champion, J., Pierrot-Deseilligny, M., Heggy, E. & Jacquemoud, S. 2013. An advanced photogrammetric method to measure surface roughness: Application to volcanic terrains in the Piton de la Fournaise, Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, 135: 1-11.
- Bretar, F., Arab-Sedze, M., Champion, J., Pierrot-Deseilligny, M., Heggy, E. & Jacquemoud, S. 2013. An advanced photogrammetric method to measure surface roughness: Application to volcanic terrains in the Piton de la Fournaise, Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, 135: 1-11.
- Brophy, N., Chiverrell, R.C., Foster, G.C. & Baggaley, P. 2019. Terrestrial laser scanning for soil erosion monitoring: A review. *Geomorphology*, 332: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.021>.

- Castillo, C. & Gómez, J.A. 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160: 300–319.
- Cerdà, A. 2010. Effects of slope length and slope gradient on water erosion on Mediterranean vineyards. *Catena*, 81(1): 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.02.001>.
- Cheggour, M., Chaker, M. & Bernoussi, A. 2009. Soil erosion processes at different scales in the Atlas Mountains. *Catena*, 78(1): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.004>.
- Chen, G., Zhao, J., Duan, X., Tang, B., Zuo, L., Wang, X. & Guo, Q. 2024. Spatial Quantification of Cropland Soil Erosion Dynamics in the Yunnan Plateau Based on Sampling Survey and Multi-Source LUCC Data. *Remote Sensing*, 16(6): 977. <https://doi.org/10.3390/rs16060977>.
- Chiari, M., Teza, G., Galgaro, A. & Pesci, A. 2009. Laser scanning for soil erosion studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(2): 190–200.
- Collins, A.L. & Walling, D.E. 2002. Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland England rivers. *Geomorphology*, 29(1–2): 187–206.
- Dessouki, A.M., Mahmoud, A.A. & Mohamed, H.F. 2005. Use of heavy metals as tracers of sediment sources in the Nile River Basin, Egypt. *Water, Air & Soil Pollution*, 165(1): 203–217. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-1205-1>.
- Díez, J. & Quinton, J.N. 2010. Application of rare earth elements (REEs) as tracers of sediment sources in catchments: A review. *Earth-Science Reviews*, 102(3–4): 92–107. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.002>.
- Eltner, A. & Sofía, G. 2020. Structure from motion photogrammetric techniques for high-resolution topographic measurements: Applications and challenges. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(2): 328–345.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F. & Abellán, A. 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4: 359–389.
- Fernández, N., Carreño, L. & Rios, E. 2019. Sediment sampling techniques in small experimental plots: A review. *Geomorphology*, 327: 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.003>.

- Flanagan, D.C. & Nearing, M.A. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation (USDA-ARS NSERL Report No. 10). DOI: 10.13031/2013.23968.
- Giménez, R., Navarro, A. & Martínez-Casasnovas, J.A. 2021. Using sediment traps to estimate soil erosion under Mediterranean conditions. *Catena*, 198: 105041. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105041>.
- Gomez, C., Hayakawa, Y. & Obanawa, H. 2016. UAV-based photogrammetry and geocomputing for mapping soil erosion. *Geomorphology*, 252: 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.023>.
- Govers, G., Quine, T.A. & Desmet, P.J.J. 2011. Soil erosion processes in Europe: A review. *Earth-Science Reviews*, 97(1–4): 141–158. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.002>.
- Grandy, S., Smith, P. & Robertson, G.P. 2020. High-resolution surface topography from laser scanning for soil microrelief assessment. *Soil & Tillage Research*, 199: 104576.
- Han, X., Wu, P., Zhao, X. & Gao, X. 2012. Runoff and soil loss from plots, fields and catchments. *Hydrological Processes*, 26(22): 3331–3339. <https://doi.org/10.1002/hyp.8401>.
- Hu, W., Shao, M., Wang, Q. & Horton, R. 2011. Use of magnetic tracers to study soil erosion on a hillslope. *Soil & Tillage Research*, 115: 1–10.
- Hu, Z., Wang, L., Li, X. & Gao, P. 2011. Development of magnetic tracers for soil erosion and sediment transport studies. *Geomorphology*, 131(3–4): 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.020>.
- Hudson, N. 1993. *Soil conservation* (3rd ed.). Cornell University Press. Pp. 233.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2014. Guidelines for using fallout radionuclides to assess soil erosion and effectiveness of soil conservation strategies. International Atomic Energy Agency. Pp 226. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.02.016
- Jain, C.K. & Sharma, M. 2001. Use of heavy metals as tracers for identifying sediment sources in a watershed. *Water, Air, & Soil Pollution*, 128(1–2): 235–250. <https://doi.org/10.1023/A:1010373921735>.
- James, M.R. & Robson, S. 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F3).

- James, M.R. & Robson, S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10): 1413–1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>.
- James, M.R., Robson, S. & Smith, M.W. 2019. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(13): 2274–2297. <https://doi.org/10.1002/esp.4624>.
- James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S. & Niethammer, U. 2019. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280: 51–66.
- James, M.R., Robson, S., Smith, M.W., d'Oleire-Oltmanns, S. & Niethammer, U. 2017. A review of UAV photogrammetry for monitoring erosion and geomorphic change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(10): 1584–1601. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>.
- Jin, X., Jie, Y., Wang, Y. & Li, Z. 2021. Remote sensing and AI techniques for soil erosion monitoring: A review. *Remote Sensing*, 13(12): 2301. <https://doi.org/10.3390/rs13122301>.
- Keesstra, S.D., Mol, G., de Leeuw, J., Okx, J., de Cleen, M. & Visser, S. 2018. The way forward: Can connectivity in landscape be useful to predict soil loss? *Earth-Science Reviews*, 185: 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.005>.
- Khatami, A., Hosseini, S.A. & Rahmati, O. 2021. Integration of IoT and AI for soil erosion monitoring. *Sensors*, 21(9): 3120. <https://doi.org/10.3390/s21093120>.
- Kheir, R., Abdallah, C. & Khawlie, M. 2016. Remote sensing applications for soil erosion and conservation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 34–47. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.002>.
- Kiani-Harchegani, M. & Sadeghi, S.H. 2013. Application of rare earth elements as sediment tracers in soil erosion studies. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4): 704–715.
- Kiani-Harchegani, M., Sadeghi, S.H., & Asadi, H. 2019. Effect of rainfall intensity and slope on sediment particle size distribution during erosion using partial eta squared. *Catena*, 176: 65-72.

- Kriuchkov, N.R. & Makarov, O.A. 2023. Modeling Dynamics of Soil Erosion by Water Due to Soil Organic Matter Change (1980–2020) in the Steppe Zone of Russia. *Agronomy*, 13(10): 2527. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102527>.
- Kulemin, G.P. 1999. Use of airborne radar remote sensing for erosion studies. *International Journal of Remote Sensing*, 20(3): 511–520.
- Lal, R. 1994. Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society. DOI: 10.1201/9780203739358.
- Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6): 519–539.
- Lal, R. 2014. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 78: 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.017>.
- Lal, R., Nair, P.R. & Owen, J.S. 2018. Soil erosion and conservation strategies in tropical agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal*, 82(4): 789–798. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.12.0457>.
- Laliberte, A.S. & Rango, A. 2009. UAV imagery for rangeland assessment, monitoring, and management. *Journal of Rangeland Applications*, 9(2): 192–198.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. 2014. Close-range photogrammetry and 3D imaging. de Gruyter, Berlin DOI: 10.1515/9783110607253.
- Mabit, L. & Blake, W.H. 2019. The potential of Beryllium-7 for short-term soil erosion studies. *Journal of Environmental Radioactivity*, 201: 1–11.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A. & Jakeman, A.J. 2016. Unmanned aerial vehicles for soil erosion monitoring: A review. *Geosciences*, 6(4): 46. <https://doi.org/10.3390/geosciences6040046>.
- Morgan, R.P.C. 2005. Soil erosion and conservation (3rd ed.). Blackwell Publishing. pp 304.
- Nearing, M.A. 2013. Soil erosion modeling: A review. *Agricultural Sciences*, 4(2): 223–235. <https://doi.org/10.4236/as.2013.42028>.
- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J. & Finkner, S.C. 2017. Measurements and models of soil loss rates. *Catena*, 150: 117–123.
- Nearing, M.A., Xie, Y., Liu, B. & Ye, Y. 2017. Soil erosion: A global threat to food security. *Soil and Tillage Research*, 165: 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.006>.

- Ollesch, G. & Vacca, A. 2002. Influence of time on measurement results of erosion plot studies. *Soil and Tillage Research*, 67(1): 23-39.
- Palmeri, V., Di Stefano, C., Nicosia, A., Pampalone, V. & Ferro, V. 2024. Terrestrial Photogrammetry–GIS Methodology for Measuring Rill Erosion at the Sparacia Experimental Area, Sicily. *Remote Sensing*, 16(22): 4232. <https://doi.org/10.3390/rs16224232>.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L. & Alewell, C. 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54: 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>.
- Parsons, A.J., Wainwright, J., Powell, D.M., Kaduk, J. & Brazier, R.E. 1993. Use of magnetic tracers to investigate soil erosion in cultivated fields. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18(5): 449–462. <https://doi.org/10.1002/esp.3290180503>.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. & Blair, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201): 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>.
- Poesen, J., Panagos, P., Ballabio, C. & Van Oost, K. 2019. Soil erosion in Europe: Status, challenges and policy. *Journal of Environmental Management*, 250: 109462. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109462>.
- Polyakov, V.O. & Nearing, M.A. 2019. Soil microtopography and erosion analysis using terrestrial laser scanning. *Soil & Tillage Research*, 186: 235–244.
- Quinton, J.N., Govers, G. & Van Oost, K. 2010. The impact of land use change on soil erosion in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 129(1–3): 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.08.015>.
- Quinton, J.N., Govers, G., Van Oost, K. & Bardgett, R.D. 2010. Tracers for investigating the sources and fate of fine sediment in catchments: A review. *Earth-Science Reviews*, 111(1–2): 50–75. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.10.001>.
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N. & Prabhat. 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. *Nature*, 566(7743): 195–204. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0912-1>.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. & Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised

- Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook No. 703. Pp 223.
- Renschler, C.S. & Harbor, J. 2002. Soil erosion assessment tools from point to regional scales—The role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*, 47(2–4): 189–209. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00079-0).
 - Rieckhoff, G.C. & Nearing, M.A. 2005. Effects of slope geometry on soil erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4): 1307–1315.
 - Rieke-Zapp, D. & Nearing, M.A. 2005. Digital photogrammetry for measurement of soil erosion. *Transactions of the ASAE*, 48(3): 957–964. <https://doi.org/10.13031/2013.18507>.
 - Sadeghi, S.H., Kiani-Harchegani, M. & Asadi, H. 2012. Application of heavy metals as tracers for sediment source fingerprinting. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(5): 2217–2231. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0962-5>.
 - Saha, S., Roy, S.S. & Roy, N. 2020. Machine learning approaches for soil erosion estimation: A comprehensive review. *Environmental Research*, 187: 109676. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109676>.
 - Seddighi, H., Kiani-Harchegani, M. & Sadeghi, S.H. 2020. Application of Cs-137 for soil erosion assessment in semi-arid catchments. *Catena*, 187: 104351.
 - Seddighi, H., Kiani-Harchegani, M. & Sadeghi, S.H. 2021. Long-term soil redistribution analysis using fallout radionuclides. *Land Degradation & Development*, 32(5): 1821–1835.
 - Seyfried, M.S., Grant, L.E., Du, E. & Humes, K.S. 2001. Soil water infiltration and hydraulic conductivity in a semiarid rangeland. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2): 466–474.
 - Somchai, K., Nuntanun, P. & Worawit, K. 2020. Sediment yields under different cropping systems in Northern Thailand. *Agricultural Water Management*, 240: 106258.
 - Spencer, K.L., Droppo, I.G. & Wood, P.J. 2011. Using holmium-labelled montmorillonite clay as a tracer for fine sediment transport studies. *Catena*, 85(2): 85–93.
 - Srdan, M., Petkovic, S. & Kostadinov, S. 2004. Runoff coefficients and rainfall characteristics in small catchments. *Journal of Hydrology*, 289(1–4): 117–134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.022>.

- Tayyebi, A., Pijanowski, B.C., Tayyebi, A.H. & Delavar, M.R. 2020. Fusion of multi-source data using AI for soil erosion modeling: Recent advances and perspectives. *Environmental Modelling & Software*, 127: 104668. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104668>.
- Thomsen, L., Baartman, J.E.M. & Wallinga, J. 2015. Comparison of surface change detection methods for soil erosion studies. *Remote Sensing*, 7(3): 3363–3387.
- Thomsen, R., Baartman, J.E.M. & Wallinga, J. 2015. Assessment of soil erosion using structure-from-motion photogrammetry: Comparison to traditional methods. *Earth Surface Dynamics*, 3(1): 87–103. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-87-2015>.
- Turner, D., Lucieer, A. & Watson, C. 2016. Spatial and temporal applications of UAVs in geomorphology: A review. *Progress in Physical Geography*, 40(6): 770–799. <https://doi.org/10.1177/0309133316661890>.
- United States Department of Agriculture (USDA). 1979. Field manual for research in agricultural hydrology (USDA Agriculture Handbook No. 224), pp 547.
- Van der Giesen, N., Stomph, T.J. & De Ridder, N. 2010. Scale dependency of runoff and soil loss processes in small catchments. *Water Resources Research*, 46(5): <https://doi.org/10.1029/2009WR008255>.
- Ventura, M., Nearing, M.A. & Norton, L.D. 2000. Development and testing of magnetic tracer particles for soil erosion studies. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6): 1780–1785. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6461780x>.
- Wallbrink, P.J., Murray, A.S. & Olley, J.M. 2003. Use of biological markers to study soil erosion and sediment transport. *Environmental Science & Technology*, 37(19): 4444–4450. <https://doi.org/10.1021/es0343864>.
- Walling, D.E. 2006. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment*, 344(1–3): 159–184. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.10.009>.
- Walling, D.E. & Collins, A.L. 2008. Sediment source fingerprinting and its potential for informing catchment management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 63(4): 292–302.
- Walling, D.E. & He, Q. 1997. Use of fallout ¹³⁷Cs in investigations of overbank sediment deposition on floodplains. *Catena*, 29(3–4): 263–282.

- Walling, D.E. & He, Q. 1999. Improved approaches to sediment source fingerprinting. *Hydrological Processes*, 13(3): 625–628. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990315\)13:3<625::AID-HYP777>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990315)13:3<625::AID-HYP777>3.0.CO;2-V).
- Walling, D.E. & Zhang, X. 2009. Application of fallout radionuclides in erosion and sedimentation studies: A review. *Hydrological Processes*, 23(3): 402–413.
- Wells, R.R., Momm, H.G. & Bennett, S.J. 2016. Limitations of airborne LiDAR for detecting ephemeral gully erosion. *Transactions of the ASABE*, 59(3): 733–742.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. & Reynolds, J.M. 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179: 300–314.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning (USDA Agriculture Handbook No. 537). Pp 58.
- Xiao, R., Guo, Y., Bai, Y., Zhang, T. & Wang, J. 2023. Machine learning in soil erosion modeling: Advances and prospects. *Environmental Modelling & Software*, 161: 105553.
- Yin, H., Li, X. & Shi, Z. 2019. Evaluation of sediment yield using sediment traps in agricultural catchments. *Science of the Total Environment*, 655: 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.293>.
- Zhang, L., Wang, Y. & Chen, X. 2021. Advances in soil erosion research: Integrating hydrology and geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(8): 1600–1615. <https://doi.org/10.1002/esp.5135>.
- Zhang, L., Wang, Y., Chen, X. & Li, Z. 2022. Impact of soil moisture on runoff generation and soil erosion under simulated rainfall events. *Catena*, 210: 105805. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.105805>.
- Zhang, X., Nearing, M.A. & Nichols, M.H. 2018. The effect of plot size on soil erosion measurement. *Soil Science Society of America Journal*, 82(3): 593–601. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.10.0363>.
- Zhao, G., Mu, X., Wen, Z., Wang, F. & Gao, P. 2018. Using SAR data for soil erosion assessment: Opportunities and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 210: 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.034>.
- Ziadat, F. & Taimeh, A. 2013. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment. *Land Degradation & Development*, 24(6): 582–591.

Abstract

Soil erosion is one of the most significant land degradation processes, the impacts of which are evident in reduced soil fertility, loss of natural resources, reservoir sedimentation, and the occurrence of flash floods. Monitoring and quantitatively assessing this phenomenon requires the use of precise, reliable field methods suited to specific climatic conditions and land uses. This technical handbook provides a concise overview of field-based soil surface erosion measurement techniques, including bounded plots, sediment collectors, physical and chemical tracers, laser scanning, three-dimensional imaging, and emerging technologies such as unmanned aerial vehicles (UAVs), remote sensing, and artificial intelligence. Alongside brief introductions to each method, their advantages, limitations, and practical challenges are discussed. In addition, applied recommendations are presented to facilitate the selection of appropriate methods for research studies and implementation projects. Finally, a research outlook is proposed, emphasizing the development of integrated technologies, the use of intelligent tools, and the establishment of localized standards.

Keywords: Field monitoring, Experimental plots, Erosion tracers, Laser scanning, UAV, Remote sensing, Artificial intelligence, Indirect methods, Sediment measurement

Ministry of Agriculture-Jahad
Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Title: Field-based methods for measuring surface soil erosion

Authors: Yahya Parvizi, Zahra Gerami

Text Editing: Saeed Nabipay Lashkarian

Document Formatting: Abbas Seddigh

Publisher: Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Circulation: 10 Copies

Date of publication: Summer 2026

This scientific work has been registered with the series number of **69538** at the date of **2026-06-29** the Agriculture Information and Scientific Documents Center. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or translated without the original reference.

Ministry of Agriculture-Jahad
A Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

Technical Handbook:
Field-based methods for measuring surface soil erosion

Authors:
Yahya Parvizi, Zahra Gerami

Series number: 69538

2026



Ministry of Agriculture Jihad
Agricultural Research, Education and Extension Organization
Soil Conservation and Watershed Management Research Institute



Technical Handbook

Field-based methods for measuring surface soil erosion

Authors:

Yahya Parvizi, Zahra Gerami

Series Number: 69538

2026