



دوره ۳۴، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۳۳، زمستان ۱۴۰۰، صفحه‌های ۷۴-۸۷
شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2021.353560.1390

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آن‌خرداری

منشأیابی ماده‌ی فرسایش یافته در آب‌خیز سد قشلاق سنندج به روش زمین‌شیمیایی و مبتنی بر تحلیل‌های آماری دو مرحله‌یی

پیام شریفی

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

سادات فیض‌نیا

استاد دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

حسن احمدی

استاد دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

کامران چپی

دانشیار دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: Sharifi.payam@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۶ بهمن ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۳۰ خرداد ۱۴۰۰

چکیده

توجه به اندازه‌ی نقش هر واحد سنگ‌شناسی در تولید رسوب حوزه یکی از اولویت‌های مهم در مدیریت آبخیز است. یکی از روش‌های مهم برای منشأیابی رسوب روش زمین‌شیمیایی است که برای تعیین منشأ فرسایش یافته‌های آبخیز سد قشلاق سنندج به کار گرفته شده است. نمونه‌های ماده‌ی فرسایش یافته بررسی شده در این پژوهش واحدهای سنگ‌شناسی مختلف منبع تولید رسوب، و رسوب‌های پشت سازه‌های رسوب‌گیر بود. در کل ۳۳ نمونه از رسوب و ماده‌ی فرسایش یافته تهیه و در آزمایشگاه بعد از الک کردن با الک ۶۲ میکرون، با دستگاه ICP بررسی شد. نه منشأیاب پتاسیم، کلسیم، فسفر، کربن، منیزیم، کروم، سدیم، کبالت و نیتروژن برای تعیین ترکیب بهینه از ردیاب‌ها به کار برده شد. با کاربرد روش‌های آماری دو مرحله‌یی تجزیه‌ی پراش و تابع تشخیص، سه عنصر کبالت، کروم و کلسیم منشأیاب‌های مناسب دانسته، و برای تعیین کردن منبع رسوب به روش گام‌به‌گام وارد معادله کرده شد. نتیجه نشان داد که واحدهای سنگ‌شناسی آندزیت با میان‌لایه‌هایی از پلمه‌سنگ و لایه‌های آهک میکروفسیل‌دار به ترتیب با ۵۶/۹۱٪ و ۳۰/۵۴٪ بیش‌ترین سهم را در تولید ماده‌ی رسوبی آبخیز داشت.

واژگان کلیدی: روش زمین‌شیمیایی، سد قشلاق سنندج، فرسایش، منشأیابی ماده‌ی رسوبی

مقدمه

به دلیل دشواری‌های زمانی و مکانی، نمونه‌برداری و دشواری‌های اجرایی کاری، و هزینه‌ی زیاد محدود شده است، روش‌های تجربی برآورد شدت فرسایش خاک و تولید رسوب مانند PSIAC (Pacific South-West inter-Agency comitte) و EPM (Erosion potential method) به دلیل توجه محدود و کلی به عامل زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، و غالب بودن عامل محیطی در وزن‌دهی سنج‌ها، با برآورد واقعی تفاوت دارند. به این دلیل‌ها می‌توان از روش‌هایی بهره‌گرفت که سریع، اقتصادی و بسیار دقیق است، و هم می‌تواند رابطه‌ی بین منبع رسوب و ماده‌ی فرسایش‌یافته‌ی خروجی حوزه را بیان کند. روش مؤثری که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرده است روش زمین‌شیمیایی است. این روش با توانایی‌های زیادی که دارد از جمله شناسایی ویژگی‌های رسوب و منبع حوزه‌ی بالادست آن‌ها، و کمی کردن اشتراک سازندها می‌تواند منبع ایجاد و تولید رسوب را شناسایی، و در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها نقش زیادی اجرا کند.

در حوزه‌ی توریج انگلستان منبع رسوب را از نظر کاربری در نظر گرفتند، و سپس توانایی هر ویژگی منشأیاب در تفکیک منبع رسوب با روش‌های آماری تعیین شد، و سهم هر منبع بر پایه‌ی مدل چندمتغیری ترکیبی تعیین شد (راسل و همکاران ۲۰۰۱). نتیجه‌ی پژوهش در کبک کانادا نشان داد که رسوب بسیاری از رودخانه، از ۲۵۰ کیلومتری بالادست آن بود، در حالی که این رودخانه در چند سال گذشته آب‌های ذوب یخ‌ها را زه‌کشی می‌کرد. قسمت اصلی این بار بستر واردشده به دهانه‌ی رودخانه از ۵۰ کیلومتری پایین رودخانه منشأ می‌گیرد (هاردی و همکاران ۲۰۱۰). با روش دریفتز (DRIFTS) در حوزه‌ی با مساحت ۲۰ کیلومترمربع در کوه‌های آلپ فرانسه نمونه‌های منبع رسوب با توان زیاد مانند مولاس، سنگ‌های آهکی و ژئوسوم در منطقه‌های زمین بد که در لایه‌های مختلف زمین پیش‌رفت کرده بود جمع‌آوری شد. مارن‌های سیاه بیش‌ترین سهم از ماده‌ی فرسایش‌یافته را در طول هر سیلاب داشت. روش دریفتز عبارت است از انتشار پرتو فرسوخ بازتابدنی، و ثبت تغییر شکل آن روی طیف سنج. این روش راهی برای متمایز کردن منبع رسوب با توان‌های مختلف را فراهم می‌کند (پولنارد و همکاران ۲۰۱۲). از منشأیابی رسوب‌ها با کمک روش CSSI یا ایزوتوپ پایدار ویژه‌ی چندجزیی یا مرکب برای ردیابی منبع رسوب متحرک بهره‌گرفته شد، ماده‌ی فرسایش‌یافته در طول سیلاب نمونه‌برداری و تجزیه شد (ویلیام و همکاران ۲۰۱۲). نتیجه نشان داد که منبع چراگاهی که ۶۵٪ مساحت حوزه را تشکیل می‌دهد بیش‌ترین رسوب‌های تولیدشده را دارد. برای اولین بار در سرشاخه‌ی کوچکی از آبخیز رودخانه‌ی ن با کاربری غالب کشاورزی در انگلستان برنامه‌ی جامع نرم‌افزاری SIFT (Sediment Fingerprinting Tool) برای تجزیه و تحلیل داده‌های نمونه‌برداری رسوب‌ها و منبع رسوب به‌کاربرده شد. از

خاک یکی از مهم‌ترین منبع‌های طبیعی در هر کشور است. فرسایش خاک یکی از خطرهای جدی و دشواری‌های انسان متمدن امروزی است. فرسایش یکی از معضلات عمده در بسیاری از منطقه‌های جهان است که در اثر بروز فرسایش، تاثیر منفی در توازن انرژی و تجمع انرژی در خاک می‌گذارد. بودن گیاهان در بیوسفر یا نابودی آن‌ها اتفاقی نیست، بل که حاصل تغییر پیچیده‌ی انرژی در محیط خاک و اتمسفر است. در واقع فرسایش تسریع‌یافته‌ی خاک به دلیل اثر آن بر اقتصاد و محیط زیست، مشکلی جهانی شده است (کی‌جی‌لیم و همکاران ۲۰۰۵). مسائل فرسایش خاک و تولید رسوب در کشورهای توسعه‌یابنده به‌علت نرخ زیاد رشد جمعیت، فشار بر زمین‌های حساس به فرسایش، و محدود بودن منبع‌های آب حادتر است (فیض‌نیا ۲۰۰۸). فرسایش خاک فرآیندی طبیعی و همیشگی است که شدت آن به‌دست انسان و با دخالت‌های نا اصولی از حد طبیعی بیش‌تر می‌شود. به دلیل دخالت‌های بشر و نبود مدیریت فعالیت‌های انسانی و بهره‌برداری‌های بی‌رویه، این نظم به هم خورده است (صادقی ۲۰۱۰).

پژوهش در زمینه‌ی منبع‌های رسوب ممکن است به تهیه‌ی فهرست کارکرد ماده‌ی فرسایش‌یافته‌ی آبخیز و در نتیجه شناسایی سامانه‌ی ایجاد رسوب، حمل و رسوب‌گذاری (والینگ و همکاران ۲۰۰۲؛ واله و همکاران ۲۰۲۰)، ارزیابی مدل‌های فرسایش و تولید ماده‌ی فرسایش‌یافته (تاخن و همکاران ۱۹۹۹)، و تفسیر داده‌های تولید ماده‌ی فرسایش‌یافته برحسب عامل اقلیم و ساختارشناسی (فیزیوگرافی) (سامر و همکاران ۱۹۹۶)، مقدار و توزیع مکانی فرسایش و الگوی شکل‌گیری سطح زمین (پیرت و والینگ ۱۹۸۶) نیز کمک کند. بر پایه‌ی تعادل جرمی بین منبع رسوب، چاله‌های رسوب‌گیر و خروجی ماده‌ی فرسایش‌یافته، محاسبه‌ی بده‌بستان ماده‌ی فرسایش‌یافته‌ی حوزه درک مناسبی از رابطه‌های متقابل بین تحرک، انتقال، ذخیره و تولید رسوب در آن به دست می‌دهد (اسلام‌مکر ۲۰۰۳). در دنیای امروز توجه به خاک و آب اهمیت زیادی دارد، زیرا بر بسیاری از جنبه‌های اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و تصمیم‌گیری‌های کلان مملکتی تأثیرگذار است. بنابراین بهره‌گیری از اصل‌های حفاظت و جلوگیری از تخریب منبع‌های خاک و آب حیاتی است و در ثبات و پیش‌رفت جامعه‌ها نقش مهمی دارد. شناخت منبع‌های خاک و ماده‌ی فرسایش‌یافته، بهره‌برداری اصولی از آن، و بهره‌برداری از منبع آب و مدیریت صحیح آن برای پیش‌برد هدف‌ها و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و منبع‌های طبیعی کشور اهمیت و اولویت ویژه‌ی دارد. بنابراین شناسایی آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. برای تعیین منبع رسوب و سهم هر واحد سنگی در تولید آن چند روش هست: ارزیابی پروفیل (نوی ۱۹۸۳)، پین‌ها و چهارچوب‌های فرسایشی (دیویس و گرگوری ۱۹۹۴)، ارزیابی چشمی منبع با عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرائی (بارکر و هوک ۱۹۹۷). کاربرد این روش‌ها

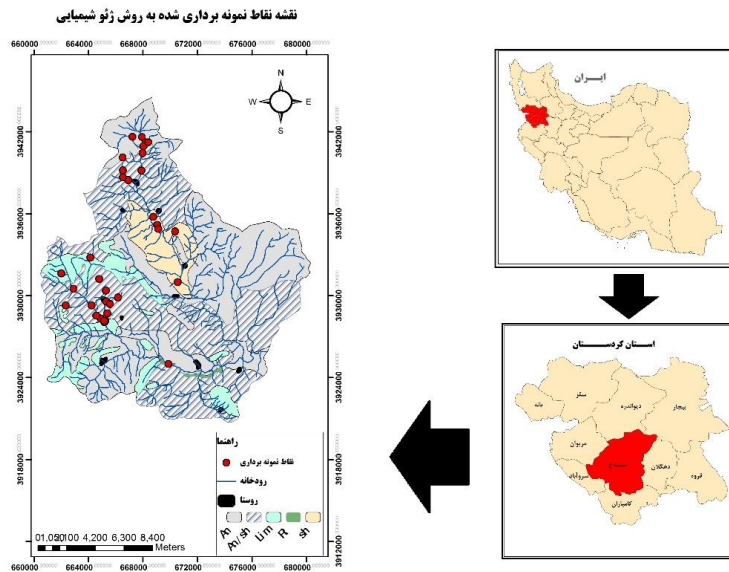
و همکاران (۲۰۰۰)، ساحل‌ها و رودخانه‌ها (آستورگا و همکاران ۲۰۲۰) شکل گرفته است. اما اهمیت موضوع و لزوم نوآوری در پژوهش‌های پیش‌رو، و برای رعایت اصل‌های علمی، و کاهش خطا در محاسبه، و این‌که بتوان همه‌ی ماده‌ی فرسایش‌یافته را به‌شکل واقعی در مرحله‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های آماری دخالت داد، بسیار مهم است. موقعیت راه‌بردی آب‌خیز، ساخت سازه‌های رسوب‌گیر در سال‌های گذشته و نرخ زیاد تله‌اندازی رسوب در آن‌ها (محلول، بار معلق و بار کف)، نمونه‌برداری از رسوب از پشت سدهای رسوب‌گیر یا سازه‌های آب‌خیزداری شده است. تفاوت پژوهش انجام‌شده در آب‌خیز سد قشلاق سنندج با پژوهش‌های قبلی در محل نمونه‌برداری ماده‌ی فرسایش‌یافته است. هدف از این پژوهش منشأیابی و تعیین دقیق منبع تولید رسوب با کمک روش زمین‌شیمیایی و مبتنی بر تحلیل‌های آماری دو مرحله‌یی برای تعیین سهم هریک از سازندهای زمین‌شناسی در تولید رسوب است.

مواد و روش‌ها

آب‌خیز سد قشلاق سنندج (پارسل A) حوزه‌یی است که خروجی آن ورودی دریاچه‌ی سد قشلاق است (۴۶ ۴۵ تا ۴۶ ۵۷ طول شرقی و ۳۵ ۲۵ تا ۳۵ ۳۸ عرض شمالی). این آب‌خیز ۱۵ زیر آب‌خیز دارد، مساحت کل آن ۲۷۲/۳ کیلومتر مربع و محیط آن ۸۴ کیلومتر است (شکل ۱). زمین تشخیص داده‌شده در منطقه اغلب کوهستانی، دامنه‌یی، فلات و تراس‌های بالایی، دشت دامنه‌یی و دشت آب‌زفتی است. به‌دلیل کوهستانی‌بودن، زیادبودن اندازه‌ی بارش توام با شیب زیاد زمین و بهره‌برداری ناصحیح از این حوزه، لزوم توجه هرچه بیشتر به حفاظت خاک و کاهش فرسایش و ماده‌ی فرسایش‌یافته در آن آشکار می‌شود. سازه‌های رسوب‌گیر ساخته‌شده شامل سدهای گابیونی و سنگی‌ملاتی است که از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ ساخته شده‌است. تنها چند سازه شرایط لازم را داشت، که از رسوب آن‌ها نمونه‌برداری شد. مهم‌ترین شرط، جا داشتن سازه در آبراهی است که ماده‌ی فرسایش‌یافته پس از عبور از چند واحد سنگ‌شناسی ته‌نشسته باشد. علاوه بر نمونه‌های برداشته از رسوب‌ها، از منبع رسوب (واحد‌های سنگ‌شناسی) ۲۸ نمونه گرفته شد (شکل ۱).

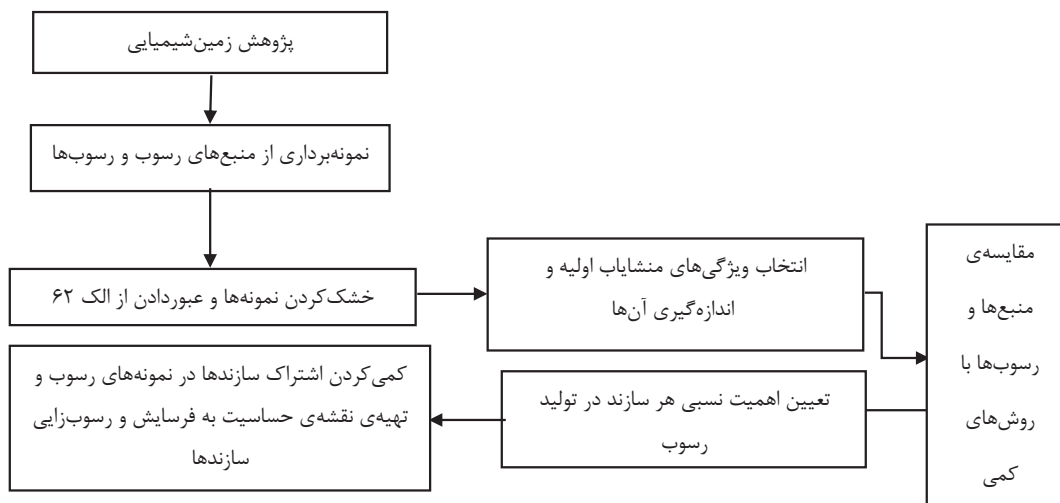
نتیجه‌ی این پژوهش افزایش دقت پژوهش‌های مشابه و کاهش خطا در تعیین ردياب‌ها و در محاسبه‌ها است (پولی و کولینز ۲۰۱۸). در حوزه‌ی آب‌خیز ال دورانو آرژانتین خطر فرسایش و تولید رسوب شدید به‌دلیل‌ها چرای شدید دام، کاربری‌های مختلف زمین و الگوی کاشت نامناسب از دشواری‌های پایه‌یی حوزه است. پژوهش‌هایی با روش پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDXRF) برای تعیین غلظت‌های مناسب و بعدتر همچون ردياب خاک برای توصیف ویژگی‌های شیمیایی انجام شد. نتیجه نشان داد که جاهای اولیه‌ی نمونه‌برداری از سازندهای زمین‌شناسی عامل اصلی، و ساحل، رودخانه و جاده‌ی خاکی عامل دومی در تولید رسوب است (رومیناتورس‌آستورگا و همکاران ۲۰۲۰). در آب‌خیز دریای بوهی چین تاثیر رودخانه‌های اطراف در تامین ماده‌ی فرسایش‌یافته واردشده به دریای بوهی تجزیه و تحلیل شد. از هفت منطقه‌ی منشأ نمونه‌برداری و ویژگی‌های مغناطیسی آن‌ها تجزیه شد. محتوای مواد مغناطیسی از منطقه‌های حاشیه‌یی به‌تدریج به سمت دریای بوهی کاهش می‌یابد. غلظت‌های مواد مغناطیسی فتر در رسوب‌های قسمت‌های مرکزی و شمالی بیش‌تر از دریای بوهی جنوبی است. دریای بوهی غربی دارای محتوای زیاد از مواد معدنی مغناطیسی است، زیرا منشأ سنگ‌های دگرگونی قدیمی مگنتیت است. دیگر نتیجه‌ی این پژوهش دقت و سرعت زیاد ویژگی‌های مغناطیسی در منشأیابی رسوب‌های است (مینگکون‌لی و همکاران ۲۰۲۰).

یکی از چالش‌های منشأیابی رسوب‌ها و تعیین منبع تولید رسوب، منطقه‌های نمونه‌برداری است. انتخاب جاهای مناسب از آن نظر اهمیت دارد که رسوب‌ها معرف کل ماده‌ی فرسایش‌یافته‌ی حوزه باشد و به شیوه‌یی اندازه‌ی خطا در انجام محاسبه را به کم‌ترین برساند. نمونه‌برداری ماده‌ی فرسایش‌یافته برای پژوهش‌های منشأیابی بسته به هدف پژوهش ممکن است از منطقه‌های مختلفی باشد، به‌طوری‌که در دیگر پژوهش‌های مشابه نمونه‌برداری از نمونه‌های ماده‌ی فرسایش‌یافته از محل‌هایی مانند منطقه‌های پخش سیلاب، بستر و آب‌زفت رودخانه‌ها (والینگ و همکاران ۲۰۰۶، پولی و کولینز ۲۰۱۸)، رسوب‌های مخزن‌ها (یو و الدفیلد ۱۹۹۳، فوستر و همکاران ۲۰۰۲، کلی و همکاران ۲۰۰۶، پیتارن و همکاران ۲۰۰۶)، رسوب‌های دشت‌های سیلابی (اوون و همکاران ۱۹۹۹، بوتربیل



شکل ۱- موقعیت مکانی آبخیز سد قشلاق سنندج و جاهای نمونه برداری روش زمین‌شیمیایی.

برای تبیین موضوع و بیان بهتر روش کاربردی نمودار روندنمای پژوهش زمین‌شیمیایی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار روندنمای پژوهش‌های زمین‌شیمیایی.

اولیه که امکان تفکیک کردن منبع رسوب را داشته باشد، انتخاب شد. منشأیاب‌های اولیه در این پژوهش پتاسیم، کلسیم، فسفر، منیزیم، کروم، سدیم، کبالت، نیتروژن (ازت) و کربن بود. برای تعیین کردن منیزیم، کروم، کبالت، کلسیم، پتاسیم، سدیم و فسفر دستگاه دستگاه القای نشر پلاسما (ICP) به کار برده شد. نیتروژن با روش جلدال، و کربن به روش سوزاندن کربن

نمونه‌ها در آزمایشگاه کاملاً کوبیده شد تا خرد شود، و از الک ۶۲ میکرون عبور داده شد. در روش منشأیابی مرکب و کمی از ترکیبی از ویژگی‌های منشأیاب برای تفکیک منبع رسوب بهره‌گرفته شد. انتخاب این ویژگی‌ها در دو مرحله انجام شد. در مرحله‌ی اول تعداد زیادی از ویژگی‌های منشأیاب تعیین شد، و در مرحله‌ی دوم با روش‌های آماری، ترکیبی بهینه از ویژگی‌های

این معادله برای هر ویژگی منشأیاب تکرار شد، بنابراین به تعداد ویژگی‌ها معادله بود، و مدل چندمتغیری ترکیبی با تعدادی معادله مشخص شد. با حل کردن این معادله‌ها سهم هر منبع رسوب به دست آورده شد. چون مجموعه معادله‌های یادشده مجهول‌های زیادی داشت و راه‌حل‌های متنوعی ممکن بود، برای به دست آوردن نتیجه‌ی بهینه در تعیین سهم منبع رسوب، و به جای حل کردن مستقیم روش‌های بهینه‌سازی به کار برده شد (یو و الدفیلد ۱۹۹۳)، (رووان و همکاران ۲۰۰۰). برای به دست آوردن سهم بهینه‌ی منبع رسوب برآورده شده با مدل‌های چندمتغیری ترکیبی در پژوهش‌های منشأیابی، روش‌هایی از جمله کمینه‌کردن مجموع مربع‌های باقی‌مانده (راسل و همکاران ۲۰۰۱؛ والینگ و همکاران ۱۹۹۹)، یا کمینه‌کردن مجموع خطاهای نسبی (بوتریل و همکاران ۲۰۰۰)، یا هر دو به کار برده شد. مجموع مربع‌های باقی‌مانده به معادله‌ی ۲ نوشته شد.

$$R = \sum_{i=1}^m (X_i - \hat{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^m \left[X_i - \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} b_j z_j \right) \right]^2 \quad 2$$

R ، مجموع مربع‌های باقی‌مانده، \hat{X}_i مقدار اندازه‌گرفته‌ی خصوصیت i ام در نمونه‌ی رسوب، Z_j ضریب اصلاح‌شده‌ی ماده‌ی آلی، m تعداد ویژگی‌های ردیاب، n تعداد متغیر گروه‌بندی (سازندهای زمین‌شناسی)، b_j ضریب سهم هر منبع رسوب، و a_{ij} مقدار میانگین ردیاب i ام در منبع رسوب j ام است.

با حذف کردن تاثیر واحدهای مختلف اندازه‌گیری معادله‌ی ۳ به دست آمد.

$$R = \sum_{i=1}^m \left[\frac{X_i - \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} b_j z_j \right)}{X_i} \right]^2 \quad 3$$

مجموع خطاهای نسبی با معادله‌ی ۴ به دست آمد.

$$E = \sum_{i=1}^m \left| \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i} \right| = \sum_{i=1}^m \left| \frac{X_i - \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} b_j z_j \right)}{X_i} \right| \quad 4$$

E مجموع خطاهای نسبی است.

این معادله‌ها تابع هدف است. جواب‌های بهینه برای سهم منبع رسوب با کمینه کردن یکی از معادله‌های ۳ و ۴ با تکرار و سعی و خطا به دست آمد. اندازه‌های مختلف برای سهم منبع رسوب (b_j) انتخاب شد و مقدار تابع هدف (E یا R) محاسبه شد. این کار تا جایی ادامه یافت که E یا R به کم‌ترین مقدار خود برسد. برای به دست آوردن سهم بهینه‌ی رسوب برآورده شده

آلی با اسید سولفوریک غلیظ (وال کی بلک) اندازه گرفته شد. در مرحله‌ی دوم ترکیبی بهینه از ویژگی‌های اولیه که توان تفکیک کردن منبع رسوب را داشته باشد، انتخاب شد. برای انتخاب ترکیب بهینه تاکنون روش‌های کیفی از جمله مقایسه‌ی چشمی ردیاب در نمونه‌های ماده‌ی فرسایش‌یافته و خاک منبع (پیرت و والینگ ۱۹۸۶)، نمودارهای پراکنش دومتغیره (نمودار پراکنش اندازه‌های دو ویژگی در مقابل هم با داشتن توانایی لازم می‌تواند منبع رسوب را جدا کند) (والدن و همکاران ۱۹۹۷)، و روش‌های آماری (والینگ و وودوارد ۱۹۹۷) به کار برده شده است. عموماً در روش منشأیابی مرکب و کمی روش‌های آماری از جمله آزمون‌های مقایسه‌ی میانگین‌ها و تحلیل تشخیص (فوستر و همکاران ۲۰۰۲)، و روش آماری دو مرحله‌ی برای انتخاب ترکیب بهینه از ردیاب‌های اولیه به کار برده می‌شود.

منبع تولید رسوب ممکن است سنگ‌ها و سازندهای زمین‌شناسی، واحدهای خاک، زیرحوزه‌ها، فرسایش سطحی یا زیرسطحی و انواع کاربری‌های زمین باشد. در این پژوهش سازندهای زمین‌شناسی (واحدهای سنگ‌شناسی) در زیرحوزه‌های مختلف منشأ تولید رسوب گرفته شد. از روش آماری دو مرحله‌ی برای تعیین ترکیب بهینه ویژگی‌های منشأیاب بهره برده شد. آزمون تجزیه‌ی پراش برای بررسی این که کدام ویژگی منشأیاب اختلاف معنی‌داری با منبع‌های دیگر دارد به کار برده شد. تجزیه‌ی تابع تشخیص گام به گام برای کاهش ویژگی‌های انتخاب‌شده‌ی اولیه به کار گرفته شد، به طوری که همبستگی آن کمینه و توان تفکیک آن بیشینه باشد. اگر تجزیه‌ی تشخیص به روش گام به گام انجام گیرد، آن‌گاه برحسب مقدار F و لامبدای ویلکس در تابع نهایی متغیرهایی باقی می‌ماند که معنی‌دار است و برای ایجاد تابع تشخیص از آن‌ها بهره برده می‌شود. از بین روش‌های آماری مختلف مانند شبکه‌ی عصبی و نزدیک‌ترین همسایه، تحلیل تشخیص بیش‌ترین کاربرد را دارد و تا به حال تنها از آن بهره گرفته شده است (والینگ ۲۰۰۵). در مدل‌های چندمتغیری ترکیبی برای حل کردن برخی از معادله‌ها برنامه‌نویسی خطی می‌شود. در این مدل‌ها فرض بر این است که ترکیب و مخلوط شدن ویژگی‌های منشأیاب از منبع‌های مختلف خطی است (فوستر و لیس ۲۰۰۰). از این رو می‌توان مدل یا معادله‌ی ترکیبی را برای هر یک از ویژگی‌های منشأیاب نوشت (معادله‌ی ۱).

$$\hat{X}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} b_j \quad 1$$

\bar{X}_i مقدار برآورده‌ی خصوصیت i ام (m و ... و $1 = i$)، مقدار میانگین خصوصیت i ام در منبع رسوب j ام (n و ... و 2 و $1 = j$)، b_j سهم منبع رسوب j ام، n تعداد منبع رسوب و m ، تعداد ویژگی‌های منشأیاب است.

عدد ۰ به این معنی است که مدل به‌دست آمده برآوردی بهتر از میانگین مشاهده‌ها (ردیاب‌ها) ندارد. پس از انجام پژوهش‌های زمین‌شیمیایی هر سازه، ارتباط این رسوب‌ها با منبع تولیدکننده‌ی آن‌ها به کمک روش منشأیابی بررسی شد. مقدار اهمیت نسبی با تقسیم‌کردن سهم کل به درصد، بر درصد مساحت هر واحد سنگ شناسی به‌دست آمد. پس از به‌دست آوردن درصد سهم هر واحد سنگی به روش زمین‌شیمیایی، نقشه‌ی حساسیت به فرسایش با نرم‌افزار GIS تهیه شد.

نتایج

برای تعیین ویژگی‌های منشأیاب ابتدا تجزیه‌ی پراش آزموده شد. عنصر Co، Cr، Ca و C کم‌تر از ۰/۰۱ معناداری بود (جدول ۱).

از مدل‌های چندمتغیری ترکیبی بهره گرفته شد. جواب بهینه برای سهم منبع رسوب با کمینه‌کردن این معادله و با تکرار و سعی و خطا، با در نظر گرفتن دو شرط $0 \leq bj \leq 1$ و مجموع $\sum_{j=1}^m bj = 1$ ، با ابزار solver به‌دست آمد. برای ارزیابی نتیجه‌ی مدل چند متغیری ترکیبی معیار ضریب کارایی مدل به کار برده شد. ضریب کارایی مدل با معادله‌ی ۵ محاسبه شد.

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad 5$$

ME، ضریب کارایی مدل، و \bar{X}_i میانگین اندازه‌های خصوصیت i ام برای همه‌ی نمونه‌های ماده‌ی فرسایش‌یافته است. اندازه‌های نزدیک به ۱ بیان‌گر کارایی خوب مدل است، و

جدول ۱- نتیجه‌ی آزمون تجزیه‌ی پراش.

عنصرها (منبع رسوب)	Sig.
Co	۰/۰۰۰
Cr	۰/۰۰۰
Na	۰/۹۵۳
P	۰/۹۷۰
Ca	۰/۰۰۰
K	۰/۲۶۲
Mg	۰/۹۴۱
C	۰/۰۰۱
N	۰/۵۶۸

F، متغیرهایی باقی ماند که معنی‌دار بود، و برای ایجاد تابع تشخیص از آن‌ها بهره گرفته شد. مقدار F با درجه‌ی آزادی ۴ و ۱۱ برای سه ردیاب Co، Cr و Ca معنی‌دار، و مقدار ویلکس لامبدا برای آن‌ها کم‌ترین بود (جدول ۲).

آزمون کولموگراف اسمیرنوف نشان داد که همه‌ی عنصرها بیش‌تر از ۰/۰۱ و ۰/۰۵ معنادار بود که نشان‌دهنده‌ی بهنجار بودن توزیع آماری برای همه‌ی آن‌ها در نمونه‌ها است. در تحلیل تشخیص به‌روش گام به گام بر حسب ویلکس لامبدا و مقدار

جدول ۲- آزمون میانگین گروه‌ها.

عنصرها ویلکس لامبدا	F	df ₁	df ₂	Sig.
Co	۶۹/۶۹۲	۱۱	۱۱	۰/۰۰۰
Cr	۹۷/۰۴۵	۴	۱۱	۰/۰۰۰
Na	۰/۱۶۲	۴	۱۱	۰/۹۵۳
P	۰/۱۲۶	۴	۱۱	۰/۹۷۰
Ca	۳۴/۲۳۷	۴	۱۱	۰/۰۰۰
K	۱/۵۲۵	۴	۱۱	۰/۲۶۲
Mg	۰/۱۸۶	۴	۱۱	۰/۹۴۱
C	۱۱/۶۷۰	۴	۱۱	۰/۰۰۱
N	۰/۷۶۸	۴	۱۱	۰/۵۶۸

منشأیابی ماده‌ی فرسایش یافته در آبخیز سد قشلاق سنندج...

مقدار ویلکس لامبدا و مجذور کای برای تابع گام به گام در جدول ۳ آورده شد.

جدول ۳- مقدار ویلکس لامبدا و مجذور کای.

Sig.	درجه‌ی آزادی	مجدور کای	ویلکس لامبدا	آزمون تابع
۰/۰۰۰	۱۲	۹۰/۳۱۸	۰/۰۰۰	۱
۰/۰۰۰	۶	۴۷/۲۶۹	۰/۰۱۴	۲
۰/۰۰۱	۲	۱۴/۱۷۳	۰/۲۷۶	۳

در جدول ۴ چارچوب ساختاری و هم‌بستگی‌های درون گروهی درصد پراش برآورد شده و مقدار ویژه با تابع تشخیص نشان داده ترکیبی بین متغیرهای مستقل و تابع تشخیص، و در جدول ۵ شد.

جدول ۴- چارچوب ساختاری و هم‌بستگی‌های درون گروهی ترکیب.

	تابع		
	۱	۲	۳
Cr	۰/۷۷۶	۰/۵۷۱	۰/۲۹۶
C	-۰/۶۸۶	-۰/۰۸۷	-۰/۲۹۴
Co	۰/۶۲۸	۰/۵۱۴	-۰/۵۸۵
P	۰/۳۴۷	-۰/۲۳۲	-۰/۰۵۳
Mg	-۰/۲۸۹	-۰/۲۴۳	-۰/۱۲۶
K	۰/۱۷۲	۰/۰۴۳۶	۰/۳۸۳
N	-۰/۱۴۶	۰/۲۰۵	-۰/۱۸۳
Ca	-۰/۳۳۶	۰/۵۲۴	۰/۷۸۲
Na	-۰/۳۶۵	۰/۲۷۸	۰/۵۷۵

جدول ۵- درصد پراش برآورد شده و مقدار ویژه با تابع تشخیص.

تابع	مقدار ویژه	پراش (%)	تجمعی (%)	همبستگی متعارف
۱	۴۹/۰۷۷	۶۹/۲	۶۹/۲	۰/۹۹۰
۲	۱۹/۲۶۳	۲۷/۱	۹۶/۳	۰/۹۷۵
۳	۲/۶۲۷	۳/۷	۱۰۰/۰	۰/۸۵۱

نتیجه‌ی ضریب کارایی مدل بیان‌گر کارایی خوب آن است زیرا ضریب ME برابر ۰/۹۹۸ بود، و برآوردی بهتر از میانگین مشاهده‌ها (ردیاب‌ها) داشت (رابطه‌ی ۵).

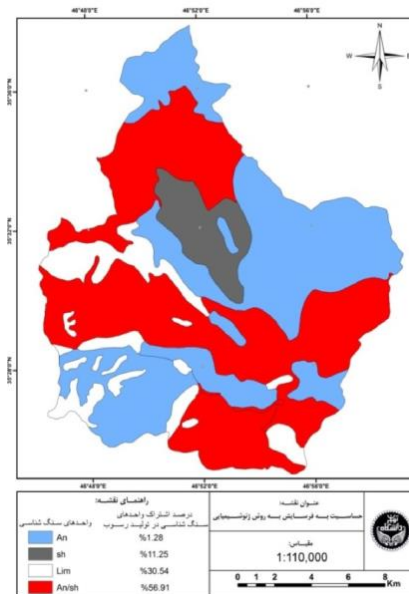
با توجه به رابطه‌های دو، سه و چهار می‌توان سهم اشتراک هر کدام از واحدهای سنگ‌شناسی را به دست آورد (جدول ۶).

جدول ۶- حساسیت سازندها به روش زمین‌شیمیایی.

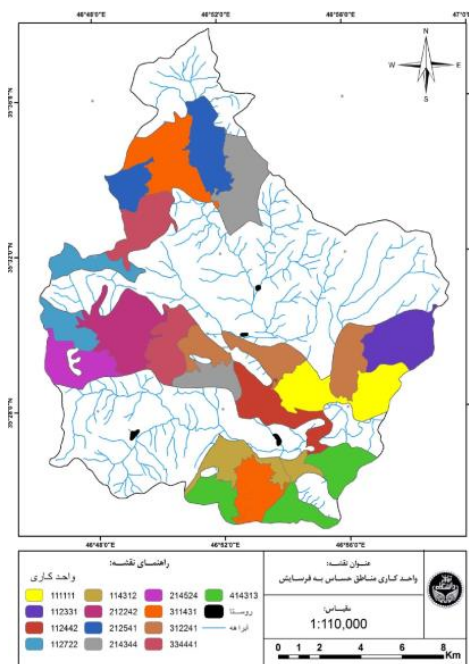
منبع تولید رسوب	سهم کل (%)	مساحت (ha)	درصد مساحت	اهمیت نسبی	درصد اهمیت نسبی
An/Sh	۸۳/۹۷	۱۲۸۶۹	۴۷/۲۷	۱/۷۷	۵۶/۹۱
An	۱/۵۳	۹۲۴۲	۳۳/۹	۰/۰۴	۱/۲۸
Sh	۱/۹	۱۴۳۷/۵	۵/۲۸	۰/۳۵	۱۱/۲۵
Lim	۱۲/۶	۳۵۹۶/۵	۱۳/۲۱	۰/۹۵	۳۰/۵۴
Ri	.	۷۵	۰/۲۷	.	.

شش سنجهی زمین‌شناسی، شیب، جهت شیب، کاربری زمین، رخساره‌های فرسایشی، و طبقه‌های ارتفاعی تعیین شد، به‌طوری‌که هر واحد ممکن است شامل یک یا چند چندضلعی باشد. تعداد واحدهای کاری منطقه‌های حساس به فرسایش ۱۳ بود.

منطقه‌های حساس و مقاوم به فرسایش به روش زمین‌شیمیایی برآورد شد (شکل ۳). بهتر است کارهای حفاظتی و کنش‌های آبخیزداری روی واحدهای کاری متمرکز شود. واحدهای کاری منطقه‌های حساس به فرسایش در شکل ۴، و اطلاعات این واحدها در جدول ۷ آورده شد. این واحدها بر پایه‌ی



شکل ۳- نقشه‌ی حساسیت به فرسایش به روش زمین‌شیمیایی.



شکل ۴- نقشه‌ی واحدهای کاری منطقه‌های حساس به فرسایش.

جدول ۷- ویژگی‌های واحدهای کاری منطقه‌های حساس به فرسایش آبخیز سد قشلاق سنندج.

واحد کاری	زمین شناسی	شیب (درصد)	جهت شیب	کاربری زمین	رخساره‌ی فرسایشی	طبقه‌های ارتفاعی (متر)	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)	تعداد چندضلعی
۱۱۱۱۱۱	An/Sh	۰-۸	شمال	مرتع	سطحی	۱۶۰۰-۱۹۰۰	۳۱۴/۹	۷/۰۸	۲
۱۱۲۳۳۱	An/Sh	۰-۸	جنوب	مرتع	سطحی	۱۶۰۰-۱۹۰۰	۵۱۸/۴	۱۱/۶	۱
۱۱۲۴۴۲	An/Sh	۰-۸	غرب	مرتع	شیاری	۱۹۰۰-۲۲۰۰	۴۷۸/۸	۱۰/۷	۲
۱۱۲۷۲۲	An/Sh	۰-۸	شرق	مرتع	شیاری	۲۲۰۰-۲۵۰۰	۱۷۴/۵۲	۳/۹	۲
۱۱۴۳۱۲	An/Sh	۰-۸	شمال	مرتع	شیاری	۱۶۰۰-۱۹۰۰	۱۲۹	۲/۹	۳
۲۱۲۲۴۲	An/Sh	۸-۲۰	غرب	مرتع	شیاری	۱۶۰۰-۱۹۰۰	۴۶۴/۹	۱۰/۴	۱
۲۱۲۵۴۱	An/Sh	۸-۲۰	غرب	زراعت آبی	سطحی	۱۹۰۰-۲۲۰۰	۱۴۵/۸	۳/۲	۲
۲۱۴۳۴۴	An/Sh	۸-۲۰	شرق	مرتع	خندقی	۱۶۰۰-۱۹۰۰	۴۷۷/۱۱	۱۰/۷	۲
۲۱۴۵۲۴	An/Sh	۸-۲۰	غرب	مرتع	خندقی	۱۹۰۰-۲۲۰۰	۳۲۶/۵	۷/۴	۱
۳۱۱۴۳۱	An/Sh	۲۰-۳۰	جنوب	مرتع	سطحی	۲۲۰۰-۲۵۰۰	۲۴۶/۲	۵/۶	۲
۳۱۲۲۴۱	An/Sh	۲۰-۳۰	غرب	مرتع	سطحی	۱۶۰۰-۱۹۰۰	۳۸۱/۲	۸/۷	۳
۳۳۴۴۴۱	An/Sh	۲۰-۳۰	غرب	زراعت دیم	سطحی	۱۹۰۰-۲۲۰۰	۴۷۸/۸	۱۰/۷	۲
۴۱۴۳۱۳	An/Sh	۳۰-۶۰	شمال	مرتع	آبراهی	۱۹۰۰-۲۲۰۰	۳۰۵/۸	۶/۸	۳

رسوب‌های تولید شده) همچون واحد سنگ‌شناسی نگریسته می‌شود بیش‌ترین اندازه‌ی ماده‌ی فرسایش یافته را در پی دارد. علت آن را می‌توان بودن لایه‌های سست و فرسایش‌پذیر شیل در بین سنگ‌های آندزیتی دانست که با فرسایش خود باعث به‌هم‌ریختن و از بین رفتن نظم لایه‌های آندزیتی می‌شود و تخریب و فرسایش آن‌ها را تسریع می‌بخشد. دلیل دیگر نیز می‌تواند جا گرفتن آن‌ها در منطقه‌های با شیب زیاد باشد، زیرا در شرایط یکسان شیب تاثیر مستقیم در زیاد شدن اندازه‌ی فرسایش و تولید رسوب دارد.

در منطقه‌های حساس به فرسایش روستاهای زیادی متمرکز اند که چرای بیش‌از اندازه‌ی دام، تشدید بهره‌برداری، و تغییر کاربری زمین در کنار روستاها بیش‌تر از دیگر منطقه‌ها است. این اثر نقش ویژه‌ی بر افزایش فرسایش و تولید رسوب دارد. واحد سنگ‌شناسی آهک فسیل‌دار نیز با ۳۰/۵۴٪ در رتبه‌ی دوم است، که با نتیجه‌ی موسوی حرمی (۲۰۰۷) و پژوهش و لطفی (۲۰۱۶) که آهک در واحد سنگی را دلیل مقاوم بودن واحد سنگی می‌دانند، مطابقت ندارد. دلیل آن تفکیک‌کنندگی روش زمین‌شیمیایی در منشأیابی عنصرهای سازنده‌ی واحدهای سنگ‌شناسی در مقایسه با دیگر روش‌ها، و تعیین واحدهای فرسایش‌پذیر است.

منطقه‌های حساس به فرسایش در هشت زیرحوزه در آبخیز سد قشلاق سنندج دیده شد، که نشان‌دهنده‌ی گسترش نسبتاً زیاد این منطقه‌ها و اهمیت توجه به آن است. حدود ۹۰٪ از سازه‌های آبخیزداری ساخته‌شده در این منطقه‌ها است، که می‌تواند توجهی برای ساخت تعداد زیاد سازه‌ها یا اقتصادی بودن آن‌ها باشد. برپایه‌ی یافته‌های این پژوهش

نتیجه‌ی پژوهش کوهپیمای (۲۰۰۹) نشان می‌دهد که ردیاب‌های مهم در هر زیرحوزه غالباً جزو سنجه‌های مغناطیسی یا کانی‌های رسی نبودند. برای جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی و تعیین سهم آن‌ها در تولید رسوب، به‌کارگیری عنصرهای زمین‌شیمیایی کافی است و نیازی به اندازه‌گیری دیگر ردیاب‌ها (مانند عنصرها رادیو اکتیو) نیست. این نتیجه با نتیجه‌ی محققان دیگری مانند کولینز و همکاران (۱۹۹۷ و ۱۹۹۸)، روان و همکاران (۲۰۰۰)، حکیم‌خانی (۲۰۰۶)، و حسامی (۲۰۱۱) نیز هم‌خوانی دارد. از این‌رو در این پژوهش از نه منشأیاب اولیه شامل کبالت، کروم، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، فسفر، کربن، نیتروژن بهره‌گرفته شد. اندازه‌ی تغییر هر ویژگی منشأیاب در نمونه‌های رسوب کم‌تر از نمونه‌های منبع رسوب بود. این موضوع با نتیجه‌ی معظمی (۲۰۰۶) و کوهپیمای (۲۰۰۹) مطابقت دارد. در بین نه خصوصیت انتخابی سه خصوصیت شامل کبالت، کروم و کلسیم توانست منبع رسوب را به‌خوبی تفکیک کند، و بنابراین بهترین ویژگی‌های منشأیاب برای این منطقه‌ها است، که با نتیجه‌ی والینگ (۲۰۰۸) و کوهپیمای (۲۰۰۹) مطابقت دارد. نتیجه‌ی روش زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد که به‌طور کلی و با چشم‌پوشی از افزایش‌های موضعی در بار رسوبی ناشی از نزدیکی به خروجی یا مساحت زیاد، واحد سنگ‌شناسی آندزیت با میان‌لایه‌هایی از پلمه‌سنگ (An/Sh) اهمیت زیادی در تولید رسوب دارد. این واحد سنگ‌شناسی با ۵۶/۹۱٪ بیش‌ترین سهم را در فرسایش و تولید رسوب دارد. واحد سنگ‌شناسی گدازه‌های آندزیتی به‌تنهایی سهم کمی در تولید رسوب دارد (۱/۲۸٪ از کل رسوب‌های تولیدشده)، اما هنگامی که با شیل که خود سهم متوسطی در ایجاد رسوب‌ها دارد (۱/۲۵٪ از کل

شناسایی واحدهای زمین‌شناسی باشد. یکی از دشواری‌های پیش روی کاربران مدل‌های تجربی برای برآورد کردن فرسایش و تولید رسوب در ایران کاربرد مدلهایی است که برای کشورهای دیگر تهیه شده است و با برخی از عامل‌ها در ایران هم‌خوانی ندارد. در راستای کاهش دشواری‌های مدل‌های تجربی، افزایش بهره‌وری و بومی‌سازی و روش‌هایی مانند منشأیابی به روش زمین‌شیمیایی ضروری است.

می‌توان نتیجه‌گیری کرد که منشأیابی ماده‌ی فرسایش‌یافته در آبخیز سد قشلاق سنندج به روش زمین‌شیمیایی و مبتنی بر تحلیل‌های آماری دو مرحله‌ی ممکن است نقش مهمی در مدیریت تولید رسوب و دریاچه‌ی سد بازی نماید. با توجه به تاثیر فراوان سازندهای زمین‌شناسی بر تولید رسوب، باید در اجرای برنامه‌های حفاظت خاک به این عامل مهم توجه شود. ساخت هرگونه سازه برای کاهش ماده‌ی فرسایش‌یافته باید با

- Barker R, Dixon L, Hooke J. 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22: 1217–1227.
- Blake WH, Ficken KJ, Taylor P, Russell MA, Walling DE. 2012. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments. *Geomorphology*, 139(1): 322–329.
- Bottrill LJ, Walling DE, Leeks GJL. 2000. Using recent over bank deposits to investigate contemporary sediment sources in larger river basins. In *Tracers in Geomorphology*, pp. 369–387.
- Collins AL, Walling DE, Leeks GJL. 1997. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *Catena*, 29(2): 1–27.
- Collins AL, Walling DE, Leeks GJL. 1998. Use of composite fingerprinting to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 31v52.
- Davis RJ, Gregory KJ. 1994. A new distinct mechanism of riverbank erosion in a forested catchment. *Journal of Hydrology*, 157: 1–11.
- Feiznia S. 2008. Applied sedimentology with emphasis on soil erosion and sediment production. Gorgan University Press, 356 p. (In Persian).
- Foster IDL, Lees JA, Jones AR, Chapman AS, Turner SE. 2002. The possible role of agricultural land drains in sediment delivery to a small reservoir, Worcestershire, UK: A multiparameter fingerprint study. In: Hodgkinson, R., (Ed.), *The Structure, Function and Management Implications of Fluvial Sedimentary Systems*. IAHS Publ, 276(2): 433–442.
- Foster IDL, Lees JA. 2000. Tracers in geomorphology. In: Foster, I. D. L. (Ed.), *Tracers in geomorphology*, Wiley, Chi Chester, pp. 3–20.
- Hardy F, Baritaeu L, Lorrain S, Theriault I, Gagnon D, Rougerie JF. 2010. Geochemical tracing and spatial evolution of the sediment bed load of the Romaine river, Quebec, Canada. *Catena*, 81(1):66–76.
- Hesami D. 2011. Source studies of sediments in Zarivar Lake, Kurdestan for determining erodibility and sediment yield of formation. M.sc Thesis. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 138 p. (In Persian).
- Kelley DW, Brachfeld SA, Nater EA, Wright JHE. 2006. Sources of sediment in Lake Pepin on the Upper Mississippi River in response to Holocene climatic changes. *Journal of Paleolimnology*, 35(4): 193–206.
- Koohpaima A. 2009. Investigating sediment in small Dams and its relation with watershed characteristics (Semnan province). M.sc Thesis. Faculty of Natural Resources. Tehran University, 114 p. (In Persian).
- Mingkun li, Shanying zhu, Tingping Ouyang, Jianhui tang, Chenjian he. 2020. Magnetic fingerprints of surface sediment in the Bohai Sea, China. *Journal of Marine geology*, 427 p.
- Moazami M. 2006. Fingerprinting fluvial fine sediment source using natural soil tracers. M.Sc thesis, Tehran University, 158 p.
- Mousavi Harami R. 2007. 11th edition, *Sedimentology*, Astan Ghods Razavi Press. (In Persian).
- Owens PN, Walling DE, Leeks GJ. 1999. Use of floodplain sediment cores to investigate recent historical changes in overbank sedimentation rates and sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Catena*, 36(1–2): 21–47.
- Pajouhesh M, Lotfi M. 2016. Lime removal impacts on the soil particles and erodibility case study: Watershed Jooneghan, chaharmahal va bakhtiari province). *Journal of Environmental*

- Erosion Research. pp. 31–45.
- Pearl MR, Walling DE. 1986. Fingerprinting sediment source: the example of a drainage basin in Devon, International Association of Hydrological Science Publication, 159: 41–55.
- Pearl MR, Walling DE. 1988. Techniques for establishing suspended sediment sources in two drainage, basin in Devon, UK: A comparative assessment. In Bordas, M. P., and Walling, D.E., Sediment budgets, Walling ford, I Alts publication, 174(1): 269 – 279.
- Pittarn NJ, Mighall TM, Foster IDL. 2006. The effect of sediment source changes on pollen records in lake sediments. Water, Air, and Soil Pollution, 6: 677–683.
- Poulenard J, Legout C, Nemery J, Bramorski J, Navratil O, Douchin A, Fanget B, Perrette Y, Evrard O, Esteves M. 2012. Tracing sediment sources during floods using Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectrometry (DRIFTS): A case study in a highly erosive mountainous catchment (Southern French Alps). Journal of Hydrology, pp. 452–462.
- Pully S, Collins AL. 2018. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (Sediment Fingerprinting Tool) open source software. Journal of Science of Total Environment, pp. 838–858.
- Romina TA, Yanina G, Gisela B, Hugo V, Roman P, Gerd D, Lionel M. 2020. Use of geochemical fingerprints to trace sediment sources in an agricultural catchment of Argentina. Journal of International Soil and Water Conservation Research. pp. 410–417.
- Rowan JS, Goodwill P, Franks SW. 2000. Uncertainly estimation in fingerprinting suspended sediment sources. In: Foster, I.D. L. (Ed.), Tracers in Geomorphology, John Wiley, Chichester, pp. 279–290.
- Russell MA, Walling DE, Hodgkinson RA. 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. Journal of Hydrology, 252(2): 1–24.
- Sadeghi M. 2010. Study and measurement of water erosion. Tarbiat Modares University Press. (In Persian).
- Slaymaker O. 2003. The sediment budget as conceptual framework and management tool. Hydrobiology, 494: 71–82.
- Summer W, Klaghofer E, Hintersteiner K. 1996. Trends in soil erosion and sediment yield in the alpine basin of the Austrian Danube. In: Walling, D.E., and Webb, B.W. (Eds.), Erosion and sediment yield. Global IAHS publ., 236: 473 – 479.
- Takhen I, Beuselinck L, Nachtergaele J, Govers G, Poesen J, Degraer G. 1999. Spatial evaluation of a physically based distributed erosion mode (LISEM) Catena, 37:431–447.
- Tang Z, Engel BA, Pijanowski BC, Lim KJ. 2005. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. Journal of Environmental Management 76(2): 35–45.
- Toy TJ. 1983. A linear erosion/elevation measuring instrument (LEMI). Earth Surface Processes and Landforms, 8: 313–322.
- Vale SS, Fuller IC, Procter JN, Basher LR, Dymond JR. 2020. Storm event sediment fingerprinting for temporal and spatial sediment source tracing. Hydrological Processes, 34(15): 3370–3386.
- Walden J, Slattery MC, Burt TP. 1997. Use of mineral magnetic measurements to fingerprint suspended sediment sources: approaches and techniques for data analysis. Journal of Hydrology, 202(4): 353–372.
- Walling DE, Collins AL, Jones PA, Leeks GJL, Old G. 2006. Establishing fine-grained sediment budgets for the Pang and Lambourn LOCAR catchments, UK. Journal of Hydrology, 330(1): 126–141.
- Walling DE, Collins AL. 2008. The catchment sediment budget as a management tool. Environmental Science and Policy, 11(2):136–143.

- Walling DE, Owens PN, Leeks GJL. 1999. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the river Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, 13: 955–975.
- Walling DE, Russell MA, Hodgkinson RA, Zhang X. 2002. Fine grained sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK. *Catena*, 47(2):323–353.
- Walling DE, Woodward JC. 1995. Tracing sources of suspended sediment in river basins: a case study of the River Culm, Devon, UK. *Marine and Freshwater Research*, 46(1): 327–336.
- Walling DE. 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment*, 344(3): 159–184.
- Yu L, Oldfield F. 1993. Quantitative sediment source ascription using magnetic measurements in a reservoir-catchment system near Nijar, S.E. Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18(1): 441–454.



Watershed Management Research

VOL. 34, No.4, Ser. No: 133, Winter 2022, pp. 74-87
DOI: 10.22092/WMRJ.2021.353560.1390

Research Paper



Sediment Fingerprinting in the Gheslagh Dam Watershed, Sanandaj, Using the Geochemical Method based on the Two-Stage Statistical Analyses

Payam Sharifi

(Corresponding Author)* Ph.D. Student in Watershed Management Science and Engineering,
Department Of Range and Watershed Management, Urmia University, Urmia, I.R. Iran

Sadat Feiznia

Professor of the Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

Hasan Ahmadi

Professor of the Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

Kamran Chapi

Associate Professor of the Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, I.R. Iran

Corresponding Author's Email: Sharifi.payam@ut.ac.ir

Received: 14 February 2021

Accepted: 20 June 2021

Abstract

Determination of the role of each lithological unit in sediment production is an important priority of watershed management. The geochemical method provides the means to determine the origin of sediments in the Gheslagh Dam, Sanandaj. Various lithological units were studied as sources of sediment deposited behind sediment-retaining structures. A total of 33 samples of sediment and sediment sources were collected and examined in the laboratory after sieving through a 62-micron sieve and identifying by instrument an ICP. Initially, 9 sources of potassium, calcium, phosphorus, carbon, magnesium, chromium, sodium, cobalt, and nitrogen were used to determine the optimal composition of the tracers. Using the 2-stage analysis of variance and detection function, 3 elements, namely: cobalt, chromium, and calcium were selected as suitable tracers and entered the equation stepwise to determine the sources of sediment. The results indicated that the andesite lithological units with interlayers of shale (An/Sh) and microfossilized limestone (Lim) with 56.91 and 30.54%, respectively, had the highest share in the sediment production in the study area.

■ **Keywords:** Erosion, Geochemical method, Gheslagh Dam, Sediment fingerprinting ■