

ارزیابی حساسیت به فرسایش واحدهای سنگ‌شناسی حوزه آبخیز واز استان مازندران با استفاده از انگشت‌نگاری

دنیا خطیبی رودبارسرا^۱، عبدالواحد خالدی درویشان^{۲*} و سید جلیل علوی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲)

چکیده

فرسایش خاک و به‌دنبال آن تولید رسوب مهم‌ترین پدیده‌ای است که باعث تخریب خاک و محیط زیست در بسیاری از مناطق شده و در حال افزایش است. انگشت‌نگاری رسوبات روشی برای شناسایی منابع رسوب و تعیین سهم مشارکت هر یک از منابع در تولید رسوب است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی حساسیت به فرسایش نسبی واحدهای سنگ‌شناسی و تعیین سهم هر یک از واحدها در تولید رسوب بستر با بهره‌گیری از ویژگی‌های ژئوشیمیایی در رودخانه واز واقع در استان مازندران انجام گرفت. برای این منظور تعداد ۳۳ نمونه خاک از سطح حوزه آبخیز و یک نمونه رسوب بستر در خروجی حوزه آبخیز برداشت شد. سپس با استفاده از سه آزمون آماری دامنه، کروسکال والیس و تحلیل تابع تفکیک، پنج ردیاب B، Al، Sc، Mo، Sn به‌عنوان ترکیب بهینه انتخاب شدند. در نهایت با استفاده از ردیاب‌های بهینه و مدل ترکیبی چندمتغیره سهم واحدهای سنگ‌شناسی با طبقات حساسیت خیلی شدید (A)، شدید (B)، متوسط تا شدید (C) و متوسط (D) در تولید رسوب بستر با استفاده از بسته FingerPro در نرم‌افزار R به‌دست آمد. نتایج نشان داد که سهم طبقات حساسیت خیلی شدید (A)، شدید (B)، متوسط تا شدید (C) و متوسط (D) در تولید رسوب بستر به ترتیب برابر با ۲۴/۲۳، ۵۰/۷۷، ۱۵/۶۲ و ۹/۳۶ درصد است. در ادامه به‌منظور حذف اثر مساحت در نتایج، سهم ویژه هر یک از طبقات حساسیت نیز محاسبه شد. واحد سنگ‌شناسی Qal شامل رسوبات کواترنری بستر و کناره‌های رودخانه با حساسیت خیلی شدید نسبت به فرسایش (A) و سهم ویژه ۰/۸۰۷ درصد در هر هکتار بیشترین مشارکت را در تولید رسوب بستر حوزه آبخیز واز دارد.

واژه‌های کلیدی: ردیاب، رسوب‌دهی، فرسایش خاک، منابع رسوب، ویژگی‌های ژئوشیمیایی

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران.

۲. گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.khaledi@modares.ac.ir

مقدمه

خاک یک منبع طبیعی مهم و باارزش است و فرسایش خاک، به عنوان یک خطر جدی برای این منبع با ارزش به شمار می آید. فرسایش خاک دارای دو نوع اثر محلی مانند از بین بردن مواد آلی خاک، کاهش تولیدات کشاورزی و تهدید امنیت غذایی بشر و اثر برون محلی مانند تخریب جاده و مناطق مسکونی و پرشدن سدها دارد (۹). کاهش تولید رسوب به اجرای برنامه های حفاظت خاک و مهار رسوب در طرح های آبخیزداری نیازمند است و ضرورت اجرای این برنامه ها شناسایی و کسب اطلاعات از اهمیت منابع رسوب و در نتیجه شناسایی مناطق بحرانی در داخل آبخیز است (۷). با شناسایی دقیق تر سازندها و واحدهای سنگی حساس به فرسایش می توان راهکارهای مناسب و به موقع ارائه داد و از فرسایش بی رویه آن ها جلوگیری کرد.

انگشت نگاری رسوبات روشی برای شناسایی منابع رسوب و تعیین سهم مشارکت هر یک از منابع در تولید رسوب است. در این روش از فناوری ردیاب های طبیعی که ترکیبی از جمع آوری نمونه ها، تحلیل های آزمایشگاهی رسوبات و روش های مدل سازی آماری است، بهره گرفته می شود (۶ و ۱۵). در منشأیابی رسوب ردیاب های گوناگونی مانند شامل رنگ رسوب (۸ و ۲۴). اندازه ذرات (۱۲)، محتوای ماده آلی (۳۱)، ویژگی های مغناطیسی (۱۱)، عناصر رادیونوکلئید (۲۹)، نسبت های ایزوتوپ پایدار کربن و نیتروژن (۴)، کانی شناسی (۲۳)، و ویژگی های ژئوشیمیایی (۱، ۵ و ۳۲) استفاده می شود. در همین زمینه حکیم خانی و همکاران (۱۰) به تعیین سهم فرسایش سطحی و زیرسطحی در تولید رسوب با بهره گیری از ترکیبی مناسب از عناصر ژئوشیمیایی، رادیواکتیو، کربن آلی، نیتروژن و فسفر در حوزه حوضه قره آغاج، ماکو پرداختند و نتایج نشان داد سهم فرسایش های سطحی و زیرسطحی در تولید رسوب به ترتیب برابر با ۳۰/۶۵ و ۶۹/۳۵ است. در پژوهش صمدی و همکاران (۲۷) از ردیاب های مغناطیسی برای منشأیابی رسوبات و تفکیک منابع رسوب در حوزه آبخیز حسن

ابدال زنجان استفاده شد. نتایج نشان داد که واحد متشکل از ماسه سنگ کواترنری، شیل و ماسه سنگ صورتی تا سفید و دولومیت توده ای با ۴۹/۷۶ درصد بیشترین سهم را در تولید رسوب دارد. نتایج پژوهش غیائی و همکاران (۹) نیز در بررسی حساسیت واحدهای سنگی به فرسایش با استفاده از ویژگی های کانی شناسی در حوزه آبخیز خیاوچای مشگین شهر در استان اردبیل نشان داد واحد سنگی Qal با ۴۵/۵۱ درصد بیشترین سهم را در تولید رسوب حوضه داشته است. همچنین مصفایی و همکاران (۲۲) در مقایسه عملکرد روش انگشت نگاری و اندازه گیری صحرایی فرسایش در منشأیابی رسوبات آبی با استفاده از تکنیک انگشت نگاری ترکیبی توانستند سهم و اهمیت نسبی منابع رسوب حوزه ورتوران قزوین در تولید رسوب را تعیین کنند. سه ردیاب کادمیوم، سرب و کلسیت به عنوان ترکیب بهینه ردیاب ها انتخاب و نتایج نشان داد در خروجی کل حوزه سهم واحدهای رسوبی تخریبی، تبخیری و آتشفشانی در خروجی کل حوزه به ترتیب برابر ۴۷/۶، ۳۷/۴، ۱۵/۱ درصد و اهمیت نسبی این منابع از نظر رسوب ویژه به ترتیب برابر ۱/۵۸، ۱/۰۴ و ۰/۴۸ است. همچنین، کارایی روش انگشت نگاری، توسط اندازه گیری های میدانی مورد تأیید قرار گرفت. در پژوهش شریفی و همکاران (۲۸) در حوزه آبخیز سد قشلاق سنندج واحدهای سنگ شناسی مختلف به عنوان منابع رسوب و رسوبات پشت سازه های رسوب گیر به عنوان مخزن رسوب در نظر گرفته شد. نتیجه نشان داد که واحدهای سنگ شناسی آندزیت و لایه ای از آهک میکروفسیل دار به ترتیب با ۵۶/۹۱ و ۳۰/۵۴ درصد بیشترین سهم را در تولید رسوب دارند. بنابراین، شناخت منابع تولید رسوب و تشخیص سهم هر یک از منابع به طور مشخص و همچنین تغییرات سهم منابع مختلف در بخش های مختلف حوزه های آبخیز برای تعیین موقعیت بهینه اقدامات حفاظت خاک در دامنه ها و اقدامات مهار رسوب به ویژه بندهای رسوب گیر در آبراهه ها از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو پژوهش حاضر با هدف

جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌های خاک و رسوب

نقاط نمونه‌برداری از خاک و رسوب بستر با توجه به نقشه حساسیت‌پذیری و با هدف ارزیابی حساسیت به فرسایش نسبی واحدهای سنگ‌شناسی در حوزه آبخیز واز تعیین (شکل ۲) و نمونه‌برداری از خاک سطحی در محدوده هر یک از طبقه حساسیت‌ها (خیلی شدید، شدید، متوسط تا شدید، متوسط) انجام شد. در مجموع ۳۳ نمونه خاک سطحی پس از حذف لایه لاشبرگ و مواد آلی روی خاک با استفاده از یک کرت یک متر مربعی با پنج تکرار نمونه‌برداری (گوشه‌ها و مرکز) و پس از ترکیب آنها به مقدار ۵۰۰ گرم برداشت شد (۲۵). تعداد نمونه‌ها در هر طبقه حساسیت واحدهای سنگ‌شناسی نسبت به فرسایش براساس مساحت هر یک از طبقه حساسیت‌ها، دسترسی به نقاط (عدم مسیر مناسب برای حضور در برخی مناطق و انجام نمونه‌برداری) و همچنین در نظر گرفتن فاصله نسبی یکسان بین نقاط نمونه‌برداری و شبکه زهکشی تعیین شد. به‌نحوی که برای حساسیت خیلی شدید A (۳)، البته لازم به ذکر است که از واحد سنگ‌شناسی Qs به‌دلیل مساحت بسیار کم در دورترین مرز حوزه آبخیز و عدم امکان دسترسی نمونه‌ای برداشت نشد، شدید B (۲۲)، متوسط تا شدید C (۴) و متوسط D (۴) نمونه در نظر گرفته شد. با توجه به اهمیت شانس برابر حساسیت‌های مختلف در انتقال رسوب به محیط آبراهه، تمامی نمونه‌ها در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از آبراهه جمع‌آوری شد (شکل ۳). عمق مناسب نمونه‌برداری خاک و رسوب بستر در مطالعات منشأیابی رسوب با هدف تعیین مشارکت نسبی انواع فرسایش تا پنج سانتی‌متر است و در این مطالعه نیز نمونه‌برداری خاک از همین عمق انجام شد (۱۴، ۱۶ و ۲۵). یک نقطه نمونه‌برداری از رسوب بستر نیز در محل خروجی حوزه آبخیز از بستر رودخانه انجام شد. برای نمونه‌برداری خاک و رسوب بستر از بیلچه پلاستیکی استفاده شد تا از اثرات احتمالی فلز بر نتایج اندازه‌گیری ویژگی‌های ژئوشیمیایی جلوگیری شود (۱۶). پس از نمونه‌برداری از خاک و رسوب بستر، نمونه‌ها برای آماده‌سازی و اندازه‌گیری

تفکیک سهم واحدهای سنگ‌شناسی در تولید رسوب بستر حوزه آبخیز واز با استفاده از ویژگی‌های ژئوشیمیایی انجام شد.

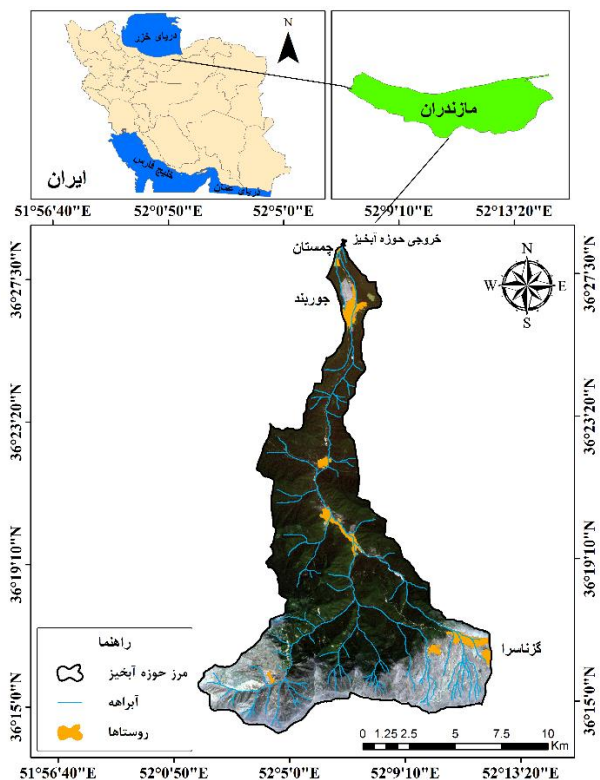
مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

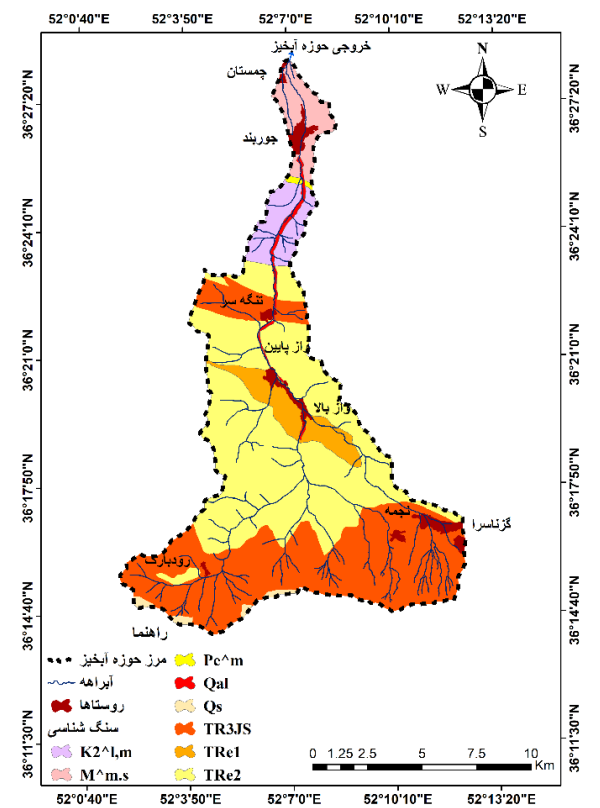
حوزه آبخیز واز در دامنه $۱۵^{\circ} ۵۵'$ تا $۱۵^{\circ} ۱۲'$ عرض شمالی طول شرقی و $۳۰^{\circ} ۱۲'$ تا $۳۶^{\circ} ۱۳'$ عرض شمالی گسترش یافته و با کاهش تدریجی ارتفاع به سمت شمال به منطقه جلگه‌ای دریای خزر متصل می‌شود. حداقل و حداکثر ارتفاع این حوزه آبخیز به ترتیب ۵۳۹ و ۴۶۵۲ متر بالاتر از سطح دریا و مساحت آن ۱۴۷۰۸ هکتار است. این حوزه دارای کاربری‌های جنگل، مرتع، کشاورزی و مسکونی است. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز واز در استان مازندران و ایران است. از مهم‌ترین گسل‌های حوزه آبخیز واز، گسل گلندرود شمالی، گسل گلندرود جنوبی، گسل وازرود، گسل گزناسرا، گسل رودبارک است. حوزه آبخیز واز بطور کلی دارای چهار طبقه حساسیت خیلی شدید، شدید، متوسط تا شدید و متوسط به فرسایش است (۳۰).

تهیه نقشه واحدهای سنگ‌شناسی و حساسیت به فرسایش

هدف اصلی از مطالعات کانی‌شناسی در حوزه‌های آبخیز، تعیین جنس اجزاء تشکیل دهنده رسوبات و نسبت دادن ذرات رسوبی به سازندهای منطقه و در نتیجه تعیین سهم هر یک از سازندها در رسوب‌زایی حوزه آبخیز است. در مطالعات فرسایش و رسوب عامل زمین‌شناسی یا واحدهای سنگ‌شناسی حوزه آبخیز یکی از مهم‌ترین عامل در فرسایش و تولید رسوب است (۲۰ و ۲۶). برای ارزیابی حساسیت‌پذیری واحدهای سنگ‌شناسی و سهم هر یک از آنها در تولید رسوب بستر حوزه آبخیز واز نقشه واحدهای سنگ‌شناسی و پتانسیل فرسایش‌پذیری سنگ‌ها از مطالعات تفصیلی - اجرایی آبخیزداری تهیه و در پژوهش حاضر استفاده شد (۳۰). جزئیات مقاومت واحدهای سنگی و مساحت حساسیت‌های مختلف واحدهای سنگ‌شناسی در برابر فرسایش به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت مکانی حوزه آبخیز واز در استان مازندران و ایران (رنگی در نسخه الکترونیکی)



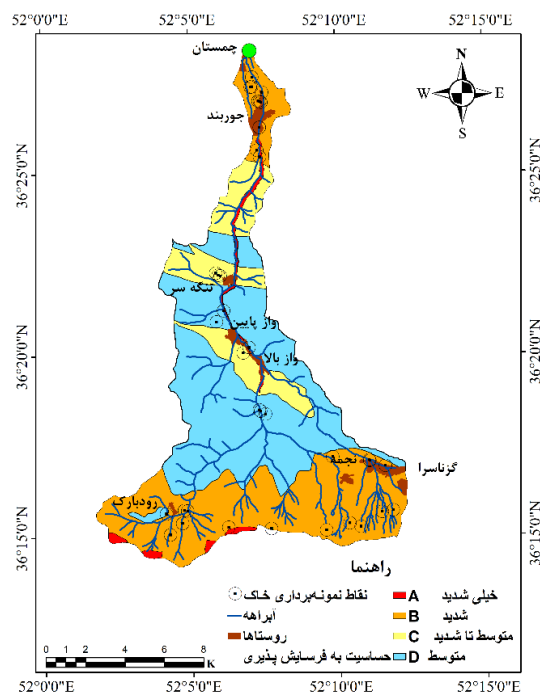
شکل ۲. نقشه واحدهای سنگشناسی حوزه آبخیز واز (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۱. مقاومت واحدهای سنگی نسبت به فرسایش و میزان رسوبدهی آنها با توجه به مطالعات فرسایش و رسوب با مدل تجربی MPSIAC

| علامت | واحد سنگشناسی | سن | مقاومت نسبت به فرسایش | میزان رسوبزایی |
|-------|--------------------------------------|----------|-----------------------|----------------|
| Qs | رس ماسه‌ای سیلت‌دار | کواترنری | غیر مقاوم | خیلی زیاد |
| TRe2 | دولومیت، سنگ آهک | تریاس | مقاوم | کم |
| TR3JS | سنگ آهک دولومیتی، دولومیت سنگ آهک | تریاس | مقاوم | کم |
| k2^1m | سنگ آهک، مارن، سنگ آهک مارنی | کرتاسه | مقاومت کم | متوسط |
| Qal | رسوبات رودخانه‌ای | کواترنری | غیر مقاوم | خیلی زیاد |
| TRe1 | دولومیت، آهک، ماسه سنگ | تریاس | مقاومت کم | متوسط |
| M^m.s | مارن، ماسه سنگ آهکی، سنگ آهک ماسه‌ای | میوسن | غیرمقاوم | زیاد |
| pe^m | آهک ماسه‌ای، مارن، مارن سیلتی | پالئوسن | غیرمقاوم | خیلی زیاد |

جدول ۲. مساحت حساسیت‌های مختلف واحدهای سنگشناسی در برابر فرسایش

| ردیف | حساسیت به فرسایش واحدهای سنگشناسی | مساحت (هکتار) | مساحت (درصد) |
|------|-----------------------------------|---------------|--------------|
| ۱ | خیلی شدید (A) | ۲۹۹/۹۵۶۲ | ۲/۰۲۷ |
| ۲ | شدید (B) | ۵۸۳۶/۲۶۳۲ | ۳۹/۴۵۵ |
| ۳ | متوسط تا شدید (C) | ۲۱۲۰/۰۸۶۷ | ۱۴/۳۳۲ |
| ۴ | متوسط (D) | ۶۵۳۵/۷۸۸۶ | ۴۴/۱۸۴۳ |



شکل ۳. نقشه حساسیت سازندها و موقعیت نقاط نمونه برداری خاک و رسوب بستر در حوزه آبخیز واژ (رنگی در نسخه الکترونیکی)

$$\sum_{j=1}^m a_{i,j} \cdot w_j = b_i \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad 0 < w_j < 1$$

مشروط به اینکه:

در این رابطه b_i ویژگی ردیاب i از رسوب، $a_{i,j}$ ویژگی ردیاب i را در نوع منبع j نشان می‌دهد، w_j سهم نسبی نوع منبع j ، m تعداد منابع بالقوه رسوب و n تعداد ویژگی‌های ردیاب انتخاب شده است. تمام ترکیبات احتمالی هر یک از مشارکت‌های منابع (صفر تا ۱۰۰ درصد) با استفاده از نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین بررسی می‌شوند (۱۹). در نهایت صحت نتایج با استفاده از شاخص نکویی برازش (GOF) و براساس مجموع مربعات خطای نسبی اندازه‌گیری می‌شود (۱۷)، (رابطه ۲):

$$GOF = 1 - \frac{1}{n} \times \left(\sum_{j=1}^n \frac{(b_i \sum_{j=1}^m w_j a_{i,j})}{\Delta i} \right) \quad (2)$$

در این رابطه Δi محدوده ویژگی ردیاب i است و به‌عنوان یک عامل نرمال‌کننده عمل می‌کند. ترکیبی از مشارکت‌های نسبی منابع با حداکثر شاخص نکویی برازش به‌عنوان سهم قابل قبول منابع رسوب انتخاب شدند (۱۷).

نتایج و بحث

انتخاب ردیاب‌های مناسب

در جدول ۳ نتایج انتخاب ردیاب برای منشأیابی رسوبات بستر در حوزه آبخیز واز با استفاده از آزمون‌های آماری دامنه، کروسکال والیس و تحلیل تابع تشخیص برای ۵۷ عنصر در هر نمونه خاک و رسوبات بستر ارائه شده است. نتایج سه آزمون و بررسی آن‌ها نشان داد که در آزمون اول از میان ۵۷ عنصر هیچ عنصر نامناسبی شناسایی و حذف نشد. در آزمون دوم ۳۸ عنصر حذف و ۱۹ عنصر باقی‌ماند. در ادامه با انجام آزمون سوم ۱۴ عنصر نامناسب حذف و پنج عنصر (Sn Mo, Sc, Al, B) به‌عنوان ردیاب‌های بهینه انتخاب شدند. روش انتخاب ردیاب نمی‌تواند تنها بر اساس آزمون‌های

ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک و رسوب به آزمایشگاه انتقال داده شدند. در ابتدا سنگ‌ریزه و ریشه گیاهان از نمونه‌های خاک و رسوب بستر جدا شده و سپس حدود ۳۰ الی ۴۰ گرم از آن در ظروف پتری ریخته شد. سپس نمونه‌های خاک و رسوب بستر در دستگاه خشک‌کن انجمادی خشک شده و در هاون کوبیده و سپس از الک ۶۳ میکرون عبور داده شدند (۳۱).

اندازه‌گیری ویژگی‌های ژئوشیمیایی

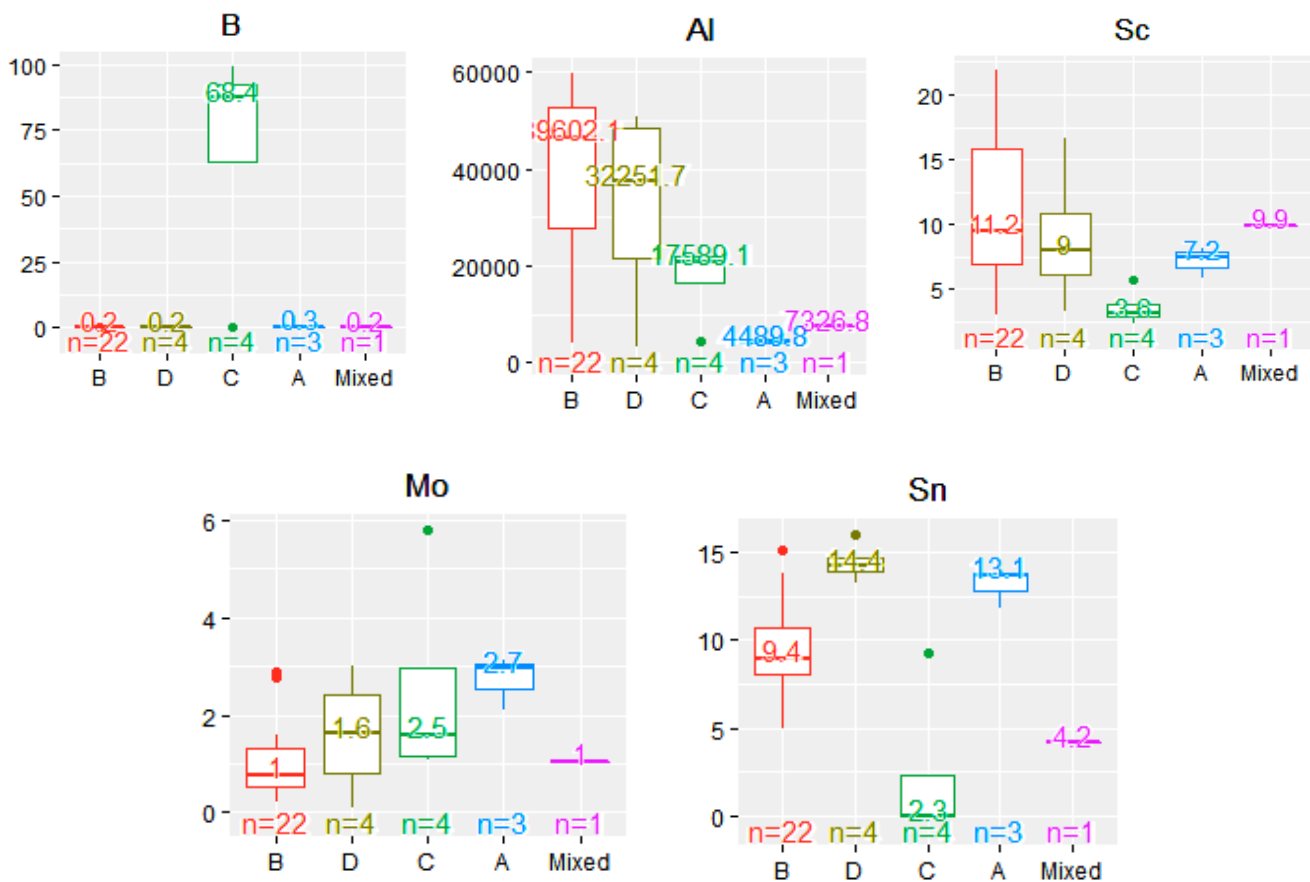
برای اندازه‌گیری عناصر ژئوشیمیایی با دستگاه جذب اتمی (ISP-MS)، در ابتدا نمونه‌های خاک و رسوب هضم اسیدی شدند، به‌طوری که سه گرم نمونه خشک کوچک‌تر از ۶۳ میکرون توسط محلول Aqua regia (ترکیب سه به یک اسید کلریدریک غلیظ و اسید نیتریک) به مدت دو ساعت روی حمام آبی قرار داده شد. در نهایت پس از سرد شدن، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی با قطر منفذ ۰/۲ میکرون صاف شد. در پایان نیز با استفاده از دستگاه ICP-OES GBC Integra و با استفاده از نمونه استاندارد Merck و رسم منحنی واسنجی، ویژگی‌های ژئوشیمیایی بر حسب میکروگرم بر گرم نمونه خاک و یا قسمت در میلیون اندازه‌گیری شد (۱۸). ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک و رسوب که در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد شامل ۵۷ عنصر است.

منشأیابی رسوبات بستر

در ابتدا و پیش از انگشت‌نگاری رسوبات مجموعه‌ای از ردیاب‌های بهینه با استفاده از آزمون‌های دامنه و کروسکال والیس و آزمون تحلیل تابع تشخیص انتخاب شدند که بتوانند منابع تولید رسوب را تفکیک کنند. سپس سهم نسبی هر منبع با استفاده از یک مدل ترکیبی چندمتغیره خطی برآورد شد. در این مطالعه مراحل انتخاب ردیاب و استفاده از مدل ترکیبی چند متغیره در تعیین مشارکت نسبی حساسیت به فرسایش واحدهای سنگ‌شناسی در تولید رسوب بستر با استفاده از روش‌های کدنویسی شده در بسته آماری FingerPro در نرم‌افزار R انجام (۱۷) و از طریق رابطه (۱) مشخص شد.

جدول ۳. نتایج انتخاب ردیاب‌های مناسب برای منشأیابی رسوبات بستر در حوزه آبخیز واز

| ردیاب مناسب | ردیاب ناپایا و غیرمناسب | آزمون |
|---|---|-------|
| Na, K, Ca, Mg, Li, Be, B, Al, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, In, Sn, Sb, Te, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U | — | RT |
| Na, Li, B, Al, Sc, Y, Mo, Cd, In, Sn, Sb, La, Ce, Pr, Eu, Dy, Tm, Lu, Hg | K, Ca, Mg, Be, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Sr, Zr, Nb, Te, Ba, Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Er, Yb, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U | KW |
| B, Al, Sc, Mo, Sn | Na, Li, Y, Cd, In, Sb, La, Ce, Pr, Eu, Dy, Tm, Lu, Hg | DFA |



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای غلظت پنج ردیاب بهینه (رنگی در نسخه الکترونیکی)

حساسیت‌های مختلف در واحدهای سنگ‌شناسی مختلف غلبه دارند و بنابراین، بسته به اینکه موجودیت هر عنصر در هر یک از سازندها یا واحدهای سنگ‌شناسی مختلف چقدر بوده است، فرسایش غالب در آن سنگ‌شناسی توانسته عناصر را در غلظت‌های مختلف همراه با رسوب انتقال دهد. همچنین، در هر فرسایش لایه‌های متفاوتی از خاک دچار فرسایش می‌شوند و

آماري مذکور باشد، بلکه دانش تخصصی فرایندهای ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی حوزه آبخیز نیز در این فرایند اثرگذار است (۳). بنابراین، نتایج نمودارهای جعبه‌ای (شکل ۴) نشان داد غلظت بعضی عناصر در سنگ‌های با حساسیت شدید و خیلی شدید بالا است و برای این موضوع می‌توان دو دلیل ذکر کرد: اول) واحد سنگ‌شناسی، دوم) لایه‌های بافت خاک.

سنگ‌شناسی نسبت به فرسایش در تولید رسوب بستر حوزه آبخیز واز در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج ضمن برخورداری از شاخص نکویی برازش ۶۸ درصد در محدوده قابل قبول، تفاوت سهم حساسیت‌ها را در تولید رسوب بستر در بخش‌های مختلف حوزه آبخیز واز را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج ارائه شده بیشترین سهم تولید رسوب برای واحدهای سنگ‌شناسی TR3JS، $M^m.s$ ، Pe^m با طبقه حساسیت شدید (B) ۵۰/۷۷ درصد است پس از آن واحد سنگ‌شناسی Qal با طبقه حساسیت خیلی شدید (A) ۲۴/۲۳ درصد سهم دارد. سپس واحدهای سنگ‌شناسی $K2^l$ ، m ، TR3JS، TRe1، و TRe2 با طبقه حساسیت‌های متوسط تا شدید (C) و متوسط (D) به ترتیب ۱۵/۶۲ و ۹/۳۶ درصد در تولید رسوب بستر سهم دارند.

در ادامه برای نتیجه‌گیری بهتر و دقیق تر از مشارکت سازندها سهم ویژه تولید رسوب به دست آمد. سهم ویژه به آن معناست که سهمی که برای هر منبع (سازند، فرسایش، کاربری، سنگ‌شناسی و....) در خروجی FingerPro تعیین می‌شود، سهم کلی آن منبع است به عبارت دیگر مساحت هر یک از منابع در سهم کلی اثرگذار بوده است. بنابراین، بخش عظیمی از بزرگی یا کوچکی سهم کلی هر منبع می‌تواند ناشی از مساحت زیاد و یا کم آن باشد. برای شناخت سهم دقیق و قابل قیاس منابع با هم دیگر لازم است که اثر مساحت حذف و به نوعی سهم ویژه محاسبه شود. بنابراین، سهم کلی هر منبع بر مساحت آن تقسیم شده و عدد به دست آمده به عنوان سهم ویژه آن منبع به ازای هر هکتار بیان می‌شود. نتایج محاسبه سهم ویژه نشان داد که حساسیت‌های A، B، C و D به ترتیب با ۰/۰۸۰۷، ۰/۰۰۸۶، ۰/۰۰۷۳ و ۰/۰۰۱۴ درصد به ازای هر هکتار در تولید رسوب بستر سهم دارند.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از بسته FingerPro (جدول ۴) سهم و میزان مشارکت هر یک از حساسیت‌ها در تولید رسوب نشان می‌دهد که در حوزه آبخیز واز بیشترین مقدار تولید رسوب

در هر لایه از خاک درصد حضور عناصر متفاوت است. بنابراین، به عنوان مثال فرسایش‌های سطحی بیشتر عناصر با غلظت بیشتر در خاک سطحی را منتقل می‌کنند و فرسایش‌های عمقی مانند شیاری و آبراهه‌ای عناصر با غلظت بیشتر در لایه‌های زیرین خاک را همراه با رسوب حمل می‌کنند. همچنین، ممکن است موجودیت بیشتر یک عنصر در لایه‌ی سطحی خاک حاصل فعالیت پوشش گیاهی و انتقال عنصر از لایه‌های پایینی به بافت‌های گیاهی و سپس خزان و انتقال عنصر به لایه‌ی سطحی خاک باشد که این نکته در پژوهش نصرتی و همکاران تأیید شده است (۱۸).

شکل ۵ نتایج آزمون تحلیل تابع تشخیص به منظور انتخاب مجموعه ردیاب‌های مناسب برای منشأیابی رسوبات بستر را نشان می‌دهد. نتایج نمودارهای تحلیل تابع تشخیص ضمن تأیید اثرپذیری غلظت عناصر ردیاب از طبقه حساسیت به فرسایش‌پذیری واحدهای سنگ‌شناسی، نشان‌دهنده امکان تفکیک حساسیت‌ها است.

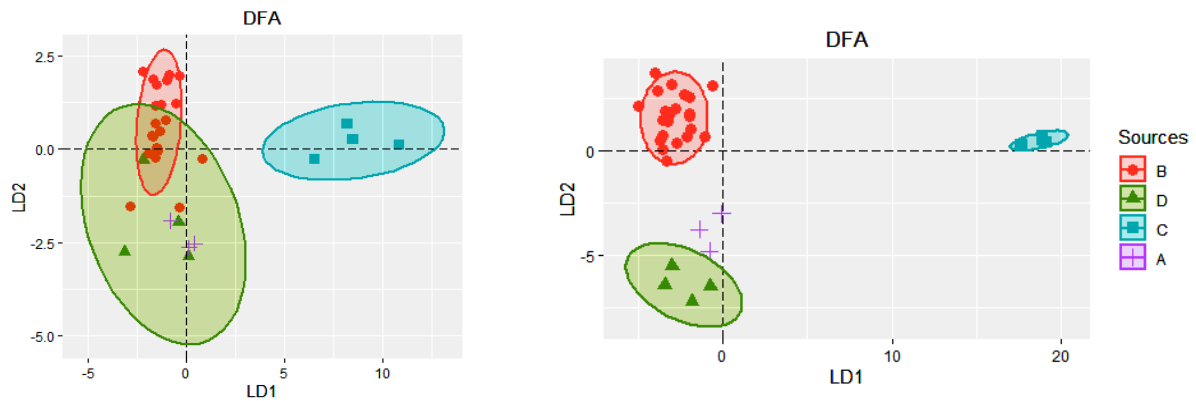
در شکل ۶ نتایج تحلیل مؤلفه اصلی ارائه شده در قبل و بعد از حذف ردیاب‌های نامناسب نشان می‌دهد که قبل از حذف ردیاب‌ها به طور کلی ردیاب‌ها ۶۷ درصد تغییرات نمونه رسوب بستر را توجیه می‌کنند. اما بعد از حذف ردیاب‌های نامناسب ۷۴ درصد تغییرات توجیه‌پذیر است.

بنابراین، با در نظر گرفتن جمیع موارد شامل استفاده از آزمون‌های دامنه و کروسکال‌والیس، تحلیل تابع تشخیص و همچنین کاربرد بصری نمودارهای جعبه‌ای و تحلیل مؤلفه اصلی، در نهایت ردیاب‌های مناسب برای منشأیابی رسوبات بستر در نقطه رسوب بستر مورد بررسی انتخاب شدند و درصد توجیه‌پذیری واریانس ارائه شده در تحلیل مؤلفه اصلی حاکی از انتخاب صحیح و قابلیت ردیاب‌ها برای هدف منشأیابی است.

نتایج منشأیابی و تفکیک سهم طبقات حساسیت به فرسایش

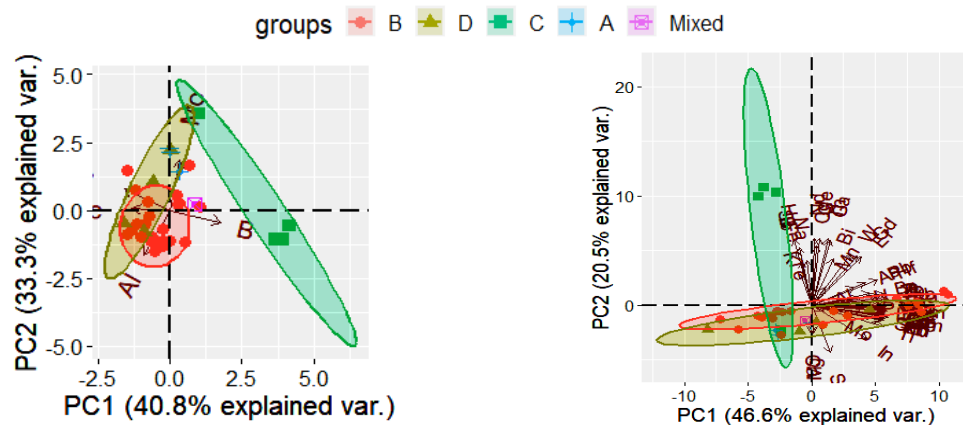
واحدهای سنگ‌شناسی در تولید رسوب بستر

نتایج منشأیابی و برآورد سهم هر یک از حساسیت واحدهای



شکل ۵. نتایج تحلیل تابع تشخیص برای انتخاب نهایی ردیاب‌های بهینه

(سمت راست: قبل از حذف ردیاب نامناسب، سمت چپ: بعد از حذف ردیاب‌های نامناسب) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۶. نتایج تحلیل مؤلفه اصلی برای تشخیص توجه‌پذیری واریانس منابع رسوب توسط ردیاب‌ها

(سمت راست: قبل از حذف ردیاب نامناسب، سمت چپ: بعد از حذف ردیاب‌های نامناسب) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۴. نتایج منشأیابی و تفکیک سهم درجات حساسیت به فرسایش واحدهای سنگ‌شناسی در تولید رسوب بستر

| ردیف | حساسیت به فرسایش واحدهای سنگ‌شناسی | سهم تولید رسوب (درصد) | سهم ویژه (هکتار) |
|------|--|-----------------------|------------------|
| ۱ | Qal, Qs (A) | ۲۴/۲۳ | ۰/۰۸۰۷ |
| ۲ | TR3JS, Pe ^m , M ^m .s (B) | ۵۰/۷۷ | ۰/۰۰۸۶ |
| ۳ | TRe1, TR3JS, K2Al. m (C) | ۱۵/۶۲ | ۰/۰۰۷۳ |
| ۴ | TRe2 (D) | ۹/۳۶ | ۰/۰۰۱۴ |

سنگ‌های این طبقه از حساسیت (TR3JS, Pe^m, M^m.s)، نسبت به فرسایش، مساحت ۱۹/۵ برابری آن هم تأثیر دارد و بخشی از این طبقه از حساسیت در نزدیکی خروجی حوزه آبخیز دارای کاربری کشاورزی و تحت فرسایش خاک‌ورزی است. همچنین، بخش وسیعی از طبقه حساسیت شدید در بالادست حوزه آبخیز واز قرار دارد که از لحاظ ارتفاعی

را سنگ‌های با حساسیت شدید (B) به مقدار ۵۰/۷۷ درصد در رسوبات خروجی این حوزه دارد. در ادامه مناطق با حساسیت خیلی شدید (A) با ۲۴/۲۳ درصد و پس از آن متوسط تا شدید (C) ۱۵/۶۲ درصد و متوسط (D) ۹/۳۶ سهم مشارکت در تولید رسوب بستر دارند. علت بالابودن سهم حساسیت شدید نسبت به حساسیت خیلی شدید علاوه بر بالابودن ذاتی جنس

سنگ‌شناسی نیز مؤید کم‌بودن حساسیت به فرسایش است. بنابراین، در مجموع طبقات خیلی شدید، متوسط، متوسط تا کم و کم به ترتیب برای چهار گروه A، B، C و D مناسب‌تر است. در نهایت لازم به ذکر است که در مطالعات منشأیابی رسوب همواره محدودیت‌هایی از قبیل هزینه نمونه‌برداری خاک و رسوب و به ویژه هزینه اندازه‌گیری غلظت عناصر در آزمایشگاه با استفاده از ICP-MS و نیز عدم یقین‌های مربوط به منابع خطا و آزمون‌های آماری وجود دارد. با این حال همانطور که اشاره شد مطالعه خصوصیات واحدهای سنگی در حوزه‌های آبخیز اهمیت فراوانی دارند و تهیه نقشه واحدهای سنگی و ژئومورفولوژی به‌عنوان نقشه‌های پایه در مطالعات توجیهی و عملیات‌های اجرایی طرح‌های آبخیزداری باید مدنظر قرار داده شوند.

با توجه به یافته‌های این پژوهش، موارد زیر به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود:

الف: کاربست منشأیابی ترکیبی و استفاده همزمان از چند ردیاب مختلف مانند ویژگی‌های ژئوشیمیایی و رادیونوکلوئیدها (بالاخص سزیم-۱۳۷ و سرب-۲۱۰) با هدف افزایش دقت و صحت بررسی سهم واحدهای سنگ‌شناسی در حوزه آبخیز واز و سایر حوزه‌های آبخیز کشور.

ب: تعیین سهم منابع مختلف رسوب با اندازه‌گیری‌های میدانی و مقایسه آن با نتایج روش انگشت‌نگاری.

ج: به کاربرد نتایج پژوهش حاضر برای جانمایی بهینه اقدامات مدیریتی و اجرایی مناسب به‌منظور کاهش تولید و انتقال رسوب بستر به‌ویژه تثبیت دیواره‌های کنار رودخانه و مهار حرکات توده‌ای در حوزه آبخیز واز.

سپاسگزاری

تیم نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از آقای دکتر مازیار محمدی و سرکار خانم‌ها دکتر نیبه کریمی و مهندس نگین قادری که در انجام مراحل نمونه‌برداری و بازدیدهای میدانی ما را یاری رساندند صمیمانه قدردانی کنند.

بیشترین ارتفاع و دارای پوشش گیاهی مرتعی فقیر است که موجب بیشتربودن سهم کلی این طبقه از حساسیت شده است.

نتایج سهم ویژه نیز نشان داد که میزان تولید رسوب و علت بالابودن سهم مشارکت سنگ‌های با حساسیت خیلی شدید (Qal) بیشتر به علت رسوبات کواترنری داخل بستر آبراهه در دره‌ها است. همچنین لغزش‌های کم‌عمق حاشیه رودخانه‌ای که ناشی از زیرکنش رودخانه‌ای است، این سنگ‌ها مقدار قابل توجهی رسوب را وارد رودخانه اصلی حوضه می‌کند. نهشته‌های کواترنری کاملاً در حاشیه آبراهه اصلی حوضه قرار گرفته‌اند و فرسایش کنار رودخانه‌ای معمولاً به‌صورت نوار باریکی در حاشیه رودخانه است و نسبت به دیگر شکل‌های فرسایش از مساحت کمتری برخوردار است. بنابراین، در محاسبات مربوط به سهم شکل‌های فرسایش در تولید رسوب بستر بالاخص زمانی که سهم ویژه مد نظر باشد، همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع معرفی شده است (۲۱). یکی دیگر از دلایل بسیار مهم در حوزه مورد مطالعه وجود شاخه فرعی گزناسرا که دارای گسل فعالی است و موجبات تولید حجم زیادی از رسوبات بستر را فراهم کرده و شیب زیاد بستر رودخانه منجر به انتقال حجم زیادی از رسوبات بستر تولید شده در این شاخه فرعی می‌شود. به عبارت دیگر شاخه گزناسرا با رسوب‌دهی زیاد از انواع بار بستر و حتی گل‌آلودگی رسوبات بستر، رسوبات معلق، دیواره‌های ریزشی و حرکات توده‌ای در مجموع مشارکت کناره‌های رودخانه (Qal) در تولید رسوب بستر را افزایش داده است (۱۳). نتایج پژوهش حاضر با پژوهش غیائی و همکاران (۹)، صمدی و همکاران (۲۷) بلوطی و غضنفری (۲) مطابقت دارد. به نظر می‌رسد با توجه به داده‌های کمی سهم ویژه هر یک از طبقات حساسیت طبقه‌بندی کیفی حساسیت به فرسایش واحدهای سنگ‌شناسی نیاز به اصلاح دارد. به عبارت دیگر فاصله طبقه اول (خیلی شدید) تا طبقه دوم (شدید) حدود ۱۰ برابر است و نشان می‌دهد که طبقه دوم بهتر است با عنوان شدید اطلاق نشود. همچنین، طبقه آخر از نظر کمی بسیار کمتر از دیگر طبقات است و جنس واحد

منابع مورد استفاده

1. Atapourfard, S.A. 1401. Investigation on the ability of rare earth elements for discrimination sediments of lithological units, case study: Chandab Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management* 14(2): 202-215 (In Farsi).
2. Baluti, S. and P. Ghazanfari. 2010. Study of the sensitivity of rock units to erosion by Sediment Yield Potential method in Sorhe drainage basin, North of Karaj. *New Findings in Applied Geology* 5(10): 73-85 (In Farsi).
3. Blake, W. H. 2018. A deconvolutional Bayesian mixing model approach for river basin sediment source apportionment. *Scientific Reports* 8(1): 1-12.
4. Blake, W. H., K. J. Ficken, P. Taylor, M. A. Russell and D. E. Walling. 2012. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments. *Geomorphology* 139-140: 322-329.
5. Collins, A. L. and D. E. Walling. 2002. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of Hydrology* 261(1-4): 218-244.
6. Davis, C. M., M. Asce, J. F. Fox and M. Asce. 2009. Sediment fingerprinting: Review of the method and future improvements for allocating nonpoint source pollution. *Journal of Environmental Engineering* 135(7): 490-505.
7. Faiznia, S. and S. D. Hasami. 2015. Determining the sediment yield of geological formation using sediment fingerprint (Case study: Kurdistan Zarivar Lake Watershed). *Environment and Water Engineering* 3(2): 246-236 (In Farsi).
8. Grimshaw, D. L. and J. Lewin. 1980. Source identification for suspended sediments. *Journal of Hydrology*. 47: 151-162.
9. Ghiyathi, S. S., S. Faiznia, A. R. Moghadamnia and S. Najirad. 2016. Investigation of lithological units' susceptibility of erosion using mineralogical characteristics. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 3(6): 1-18 (In Farsi).
10. Hakimkhani, S., H. Ahmadi and J. Ghayoumian. 2008. Determining Erosion Types Contributions to the Sediment Yield Using Sediment Fingerprinting Method (Case study: Margan watershed, Makoo). *Water and Soil Science* 83-96 (In Farsi).
11. Hatfield, R. G. and B. A. Maher. 2009. Fingerprinting upland sediment sources: particle size-specific magnetic linkages between soils, lake sediments and suspended sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 34 (10): 1359-1373.
12. Krein, A., E. Petticrew and T. Udelhoven. 2003. The use of fine sediment fractal dimensions and color to determine sediment sources in a small watershed. *Catena* 53(2): 165-179.
13. Khaledi Darvishan, A., S. H. R. Sadeghi and L. Gholami. 2009. Effects of Erosion Sensitivity and Different Land Uses on Morphometric Characteristics of Bed Sediments (Case Study: Vazrood River). *Water and Soil Science* 21(4): 139-151 (In Farsi).
14. Laceby, J. P., J. Olley, T. J. Pietsch, F. Sheldon and S. E. Bunn. 2015. Identifying subsoil sediment sources with carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Hydrological Processes* 29: 1956-1971.
15. Lamba, J., K. G. Karthikeyan and A. M. Thompson. 2015. Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting. *Geoderma* 239: 25-33.
16. Lizaga, I., L. Gaspar, W. H. Blake, B. Latorre and A. Navas. 2019. Fingerprinting changes of source apportionments from mixed land uses in stream sediments before and after an exceptional rainstorm event. *Geomorphology* 341: 216-229.
17. Lizaga, I., B. Latorre, L. Gaspar and A. Navas. 2020. FingerPro: An R Package for Tracking the Provenance of Sediment. *Water Resources Management* 34: 3879-3894.
18. Nosrati, K. and F. Ahmadi. 2016. Investigating of seasonal change effects on suspended sediment yield using geochemical tracers. *Iranian Journal of Geology* 46: 65-73 (In Farsi).
19. McKay, M.D., R. J. Beckman and W. J. Conover. 2000. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics* 42: 55-61.
20. Metternicht, G. and S. Gonzalez. 2005. FUERO: foundations of a fuzzy exploratory model for soil erosion hazard prediction. *Environmental Modelling and Software* 20(6): 715-728.
21. Mohammadi, M., A. Khaledi Darvishan, E. Dinelli, N. Bahramifar and S. J. Alavi. 2021. How does land use configuration influence on sediment heavy metal pollution? Comparison between riparian zone and sub-watersheds. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 36(3): 719-734.
22. Mosfaei, J., M. R. Ekhtis, A. Salehpour Jam and M. R. Rajabi. 2017. Sediment Source Ascription in Vartavan Catchment using Composite Fingerprint Technique. *Watershed Management Research Journal* 8(16): 123-131 (In Farsi).
23. Motha, J. A., P. J. Wallbrink, P. B. Hairsine and R. B. Grayson. 2002. Tracer properties of eroded sediment and source material. *Hydrological Processes* 16: 1983-2000.

24. Peart, M. R. 1993. Using sediment properties as natural tracers for sediment source: two case studies from Hong Kong. *In: Tracers in Hydrology, Proceedings of the International Symposium, Yokohama, Japan.*
25. Pulley, S., I. Foster and A. L. Collins. 2016. The impact of catchment source group classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs. *Journal of Environmental Management* 194: 16-26.
26. Roshan, H., Q. Vahabzadeh, K. Soleimani and A. Khaledi Darvishan. 2010. Importance of lithological units in erosion and sedimentation studies (Case study: Zaram Rood watershed). *In: 15th Conference of the Geological Society of Iran, Tarbiat Moalem University, Tehran (In Farsi).*
27. Samadi Arqini, H., S. Faiznia and A. A. Nazarisamani. 2013. Investigation of lithological units portion in sediment yield using mineralogical and lithological method, case study: Hassan Abdal watershed basin, Zanjan. *Watershed Engineering and Management* 6(3): 247-257 (In Farsi).
28. Sharifi, P., S. Faiznia, H. Ahmadi and K. Chapi. 2021. Determining the origin of eroded material in the watershed of Qeshlaq dam in Sanandaj by geological method and based on two-stage statistical analysis. *Watershed Research* 34(4): 87-74.
29. Smith, H. G., G. J. Sheridan, P. Nyman, D. P. Child and P. N. J. Lane and M. A. C. Hotchkis. 2012. Quantifying sources of fine sediment supplied to post-fire debris flow using fallout radionuclide tracers. *Geomorphology* 139: 403-415.
30. Tabarestan Faza Consulting Engineers Company. 2007. Vazroud Watershed Detailed-Executive Study Plan. General Directorate of Natural Resources of Mazandaran Province (In Farsi) .
31. Walling, D. E., P. N. Owens and G. J. L. Leeks. 1999. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the river Ouse Yorkshire UK. *Hydrological Processes* 13: 955-975.
32. Zhang, Q., T. Lei and J. Zhao. 2008. Estimation of the detachment rate in eroding rills in flume experiments using an REE tracing method. *Geoderma* 147: 8-15.

Evaluation of Erosion Sensitivity of Lithological Units in Vaz Watershed, Mazandaran Province Using Fingerprinting

D. Khatibi Roudbarsara¹, A. V. Khaledi Darvishan^{2*} and S. J. Alavi²

(Received: October 23-2022 ; Accepted: March 13-2023)

Abstract

Soil erosion followed by sediment production is the most important phenomenon that causes soil and environment degradation in many areas and is increasing. Sediment fingerprinting is a method to identify sediment sources and determine the contribution of each source to sediment production. The present research was carried out to evaluate the relative erosion sensitivity of lithological units and to determine the contribution of each unit in bed sediment production using geochemical properties in the Vaz River located in Mazandaran province. The 33 soil samples were taken from the whole watershed and one sediment sample at the outlet of the watershed. Then, five tracers of B, Al, Sc, Mo, and Sn were selected as the optimal combination using three statistical tests range tests, Kruskal-Wallis, and discriminant function analysis. Finally, using optimal tracers and a combined multivariate model, the contribution of lithological units with very high (A), high (B), medium to high (C), and medium (D) sensitivity in bed sediment production were obtained using FingerPro statistical package and R software. The results showed that the contribution of lithological units with very high (A), high (B), medium to high (C), and medium (D) sensitivity in bed sediment production were 24.23, 50.77, 15.62, and 9.36%, respectively. Then, the specific contribution of each sensitivity class was also calculated to remove the effect of area on the results. The Qal lithological unit including the Quaternary sediments in the river bed and banks with very high sensitivity to erosion (A) and a specific contribution of 0.0807 % per hectare had the maximum contribution in bed sediment production in Vaz River.

Keywords: Tracer, Sediment yield, Soil erosion, Sediment sources, Geochemical properties

1. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.

2. Department of forestry, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Mazandaran, Iran.

*: Corresponding author, Email: a.khaledi@modares.ac.ir