

## برآورد سهم واحدهای زمین‌شناسی به عنوان منابع تولید رسوب معلق رودخانه با استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تول‌بنه، استان گلستان)

میثم صمدی<sup>۱</sup>، عبدالرضا بهره‌مند\*<sup>۲</sup>، علی سلاجقه<sup>۳</sup>، مجید اونق<sup>۴</sup>، محسن حسینعلی‌زاده<sup>۵</sup>،  
ابوالحسن فتح‌آبادی<sup>۶</sup>

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- دانشیار، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۴- استاد، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۵- استادیار، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۶- استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۸/۲۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۲/۱۲

### چکیده

شناخت منابع تولید رسوب و تعیین سهم نسبی هریک از این منابع در حوزه‌های آبخیز، به منظور تدوین برنامه‌های مدیریتی حفاظت آب و خاک و کنترل فرسایش امری ضروری می‌باشد. هدف از تحقیق حاضر تعیین سهم نسبی واحدهای زمین‌شناسی مختلف در تولید رسوب در حوزه آبخیز تول‌بنه در استان گلستان می‌باشد. بدین منظور از واحدهای مختلف نمونه‌برداری انجام شد. هم‌چنین با استفاده از نمونه‌بردار ممتد بار معلق فیلپس، طی یک دوره یک-ساله نمونه‌های رسوب برداشت شد و سپس غلظت ۳۴ خصوصیت ژئوشیمیایی در ۴۱ نمونه‌ی منابع رسوب و ۸ نمونه رسوب معلق در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه ICP تعیین شد. سپس با استفاده از آزمون‌های آماری تست غلظت جرمی، کراسکال-والیس و آنالیز تابع تشخیص گام به گام اقدام به تعیین ترکیب بهینه ردیاب‌ها جهت تفکیک منابع رسوب شد. در نهایت ۱۵ ردیاب به عنوان ترکیب بهینه انتخاب شدند که با استفاده از داده‌های این ردیاب‌ها و مدل ترکیبی چند متغیره سهم منابع مختلف در تولید رسوب تعیین شد. براساس نتایج به دست آمده، واحدهای Qal و Jsl s.sh به ترتیب با ۶۸/۲۲ و ۲۸/۷۵ درصد منبع اصلی در تولید رسوب بوده‌اند. واحد Qal شامل نهشته‌های رودخانه‌ای کواترنر می‌باشد و واحد Jsl s.sh متشکل از ماسه سنگ و شیل سازند شمشک است که هر دو واحد حساسیت بالایی به فرسایش دارند. بنابراین جهت کاهش رسوب ورودی به رودخانه، ضروری است اقدامات کنترل فرسایش و رسوب بر روی این واحدهای حساس به فرسایش انجام گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** ردیاب، ژئوشیمیایی، کراسکال-والیس، کواترنر، ماسه‌سنگ.

## مقدمه

فرسایش خاک تشدید شونده امروزه یکی از مشکلات و موانع عمده در مسیر توسعه پایدار در بسیاری از کشورها می‌باشد. درک پیامدهای فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز رودخانه‌ها، نیازمند شناخت کافی از فرآیندهای فرسایش و رسوبگذاری می‌باشد (نصرتی، ۲۰۱۸). برنامه-ریزی‌ها و سیاستگذاری‌های مدیریت حوزه‌های آبخیز، نیازمند آگاهی از چگونگی کنترل فرسایش و رسوب می‌باشد (والینگ و کالینز، ۲۰۰۸). به منظور شناخت فرآیندهای فرسایش و تولید رسوب و هدف‌گذاری جهت کاهش اثرات آن، شناسایی منابع تولید رسوب امری ضروری می‌باشد (ژائو و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به تغییر پذیری زمانی و مکانی فرسایش و رسوب، تعیین منابع تولید رسوب در حوزه آبخیز، پیچیده می‌باشد. به طوری که در یک حوضه معمولاً انواع کاربری‌ها، فرسایش و خصوصیات ژئومورفولوژیک وجود دارد، که باعث می‌شود مقدار فرسایش در نقاط مختلف حوضه متغیر باشد. از سوی دیگر از نظر زمانی نیز در طول یک سال انواع مدیریت کاربری و نوع بارش که باعث ایجاد فرسایش می‌شود، متغیر است. حتی در طول بارش نیز تغییراتی در نرخ فرسایش ایجاد می‌شود (فاکس و پاپانیکلو، ۲۰۰۸). بنابراین لازم است تا با استفاده از یک روش مناسب سهم منابع مختلف در تولید رسوب حوضه تعیین شود. در طی سه دهه گذشته روش انگشت‌نگاری کاربرد گسترده‌ای در تعیین سهم منابع مختلف رسوب داشته است (فوستر و لیز، ۲۰۰۰؛ کالینز و والینگ، ۲۰۰۴؛ والینگ، ۲۰۰۵؛ دیوریکس و همکاران، ۲۰۱۰؛ نصرتی و همکاران، ۲۰۱۱؛ دی‌هائن و همکاران، ۲۰۱۲؛

والینگ، ۲۰۱۳؛ کویتز و همکاران، ۲۰۱۳؛ حدادچی و همکاران، ۲۰۱۳؛ استون و همکاران، ۲۰۱۴؛ حدادچی و همکاران، ۲۰۱۴؛ میلر و همکاران، ۲۰۱۵؛ پولی و همکاران، ۲۰۱۵؛ پالازون و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ پولی و کالینز، ۲۰۱۸؛ نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب علاوه بر رسوبات آبی، اخیراً در تعیین منشأ رسوبات بادی (ریزگردها و ماسه بادی) نیز در حال گسترش می‌باشد که از جمله آن می‌توان به تحقیقات غلامی و همکاران (۱۳۹۴)، دولت کردستانی و همکاران (۱۳۹۶ و ۱۳۹۷)، لیو و همکاران (۲۰۱۶)، غلامی و همکاران (۲۰۱۸) و ده‌مرده و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. روش‌های مختلف انگشت‌نگاری رسوب شامل انگشت‌نگاری با گرانولومتری و ترکیب کانی‌شناسی (صمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ براون و مکائرو، ۲۰۱۲)، انگشت‌نگاری با استفاده از رنگ خاک و رسوب (لیندزی و همکاران، ۲۰۰۷؛ کریراس و همکاران، ۲۰۱۰؛ بودرالت و همکاران، ۲۰۱۸) انگشت‌نگاری با استفاده کانی‌های رسی و پراش پرتو X (شاو و همکاران، ۲۰۰۲)، انگشت‌نگاری از طریق خواص مغناطیسی (صمدی و همکاران، ۱۳۹۳؛ بلیک و همکاران، ۲۰۱۲؛ پولی و کالینز، ۲۰۱۸)، انگشت‌نگاری با مواد آلی (والینگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ کراشار و همکاران، ۲۰۱۵)، انگشت‌نگاری از طریق رادیونوکلوئیدهای محیطی (کراشار و همکاران، ۲۰۱۵؛ غلامی و همکاران، ۲۰۱۷؛ نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بودرالت و همکاران، ۲۰۱۸) و انگشت‌نگاری به روش ژئوشیمیایی (حکیم‌خانی و همکاران، ۱۳۸۹؛ فتح‌آبادی، ۱۳۹۲؛ صمدی، ۱۳۹۲؛ تیموریان و همکاران، ۱۳۹۴؛ والینگ و

ردياب‌های طبیعی جهت انگشت‌نگاری رسوبات و تعیین سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف در تولید رسوب، استفاده شده است. حوزه آبخیز تول‌بنه یکی از زیرحوزه‌های آبخیز زیارت در استان گلستان است که با وجود سازند سنگی شمشک و فرسایش‌پذیری بالای آن، سالانه رسوب معلق زیادی (۱۴۷۰۹/۹۷ تن در هکتار) را وارد رودخانه زیارت می‌کند. با توجه به اینکه ۲۰ تا ۳۰ درصد آب شرب گرگان از رودخانه زیارت تأمین می‌شود، بار رسوبی بالای آن سالانه هزینه زیادی به تصفیه‌خانه‌های شهر وارد می‌کند. لذا لزوم شناسایی منابع اصلی و عمده تولید رسوب آن احساس می‌شود. در نتیجه هدف از تحقیق حاضر شناسایی منابع تولید رسوب در منطقه مورد مطالعه و تعیین سهم هریک از واحدهای زمین‌شناسی در تولید رسوب می‌باشد. پس از شناسایی منابع تولید کننده رسوب و تعیین سهم و اهمیت هریک از این واحدها در رسوب‌زایی، می‌توان اقدامات مدیریتی حفاظت خاک و کنترل فرسایش و رسوب را در بر روی منابع حساس متمرکز نمود.

#### محدوده مورد مطالعه

حوزه آبخیز تول بنه با وسعت ۲۹۹۶/۹۱ هکتار در محدوده جغرافیایی  $36^{\circ} 36'$  تا  $36^{\circ} 59'$  عرض شمالی و  $54^{\circ} 23'$  تا  $54^{\circ} 27'$  طول شرقی واقع شده است. این حوضه در جنوب شهرستان گرگان قرار گرفته و یکی از زیرحوضه‌های قره سو به شمار می‌رود. آبراهه اصلی حوزه آبخیز تول بنه در جهت کلی جنوبی- شمالی می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه برابر ۵۳۸ میلی‌متر بوده که ماه آذر با ۴۹/۷ میلی‌متر بارندگی، بیش‌ترین میزان و ماه مرداد با ۱۸/۸ میلی‌متر بارندگی، کم‌ترین

وودوارد، ۱۹۹۲؛ کالینز و همکاران، ۲۰۰۱؛ وودوارد و همکاران، ۲۰۰۱؛ جنز و همکاران، ۲۰۰۲؛ کالینز و والینگ، ۲۰۰۲؛ والینگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ کالینز و همکاران، ۲۰۱۲؛ حدادچی و همکاران، ۲۰۱۴؛ نصرتی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مانجرو و همکاران، ۲۰۱۶؛ دوو و والینگ، ۲۰۱۶؛ چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ غلامی و همکاران، ۲۰۱۷؛ نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بلیک و همکاران، ۲۰۱۸) می‌باشد. فیض‌نیا و حسامی (۱۳۹۵) اقدام به تعیین سهم سازندهای زمین‌شناسی در تولید رسوب با استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب در حوزه آبخیز دریاچه زریوار نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که واحد زمین‌شناسی متشکل از اسکارن و کمی هورنفلس بیش‌ترین پتانسیل رسوب‌زایی را در منطقه دارا می‌باشد و واحد نهشته‌های کواترنری کم‌ترین پتانسیل رسوب‌زایی را دارد. نصرتی و جلالی (۱۳۹۶) اقدام به بررسی تولید رسوب معلق حوزه آبخیز زیارت گرگان در فصول مختلف با تکنیک انگشت‌نگاری نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد بیش‌ترین سهم مربوط به فرسایش سطحی (کشاورزی و مراتع) در دو فصل زمستان و بهار است. هم‌چنین فرسایش زیرسطحی (جاده و آبراهه) در فصل بهار با ۶۰/۴ درصد، میزان قابل توجهی از تولید رسوب را به خود اختصاص داده است. نصرتی و همکاران (۲۰۱۸) اقدام به انگشت‌نگاری منابع رسوب در حوزه آبخیز زیارت نمودند. بدین منظور از ۱۲ ردياب ژئوشیمیایی به همراه سزیم ۱۳۷ برای تعیین سهم سه منبع دامنه، فرسایش کنار رودخانه‌ای و جاده استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده فرسایش کنار رودخانه‌ای و هم‌چنین جاده سهم عمده‌ای را در تولید رسوب دارند. در تحقیق حاضر از خصوصیات ژئوشیمیایی به عنوان

میزان بارندگی را در حوضه شامل می‌شوند. حوزه آبخیز تول‌بند از پنج واحد زمین‌شناسی متوسط دما ۱۰ درجه سانتی‌گراد است. مختلف تشکیل شده است. جدول ۱ خصوصیات واحدهای مختلف زمین‌شناسی را نشان می‌دهد.

### مواد و روش‌ها

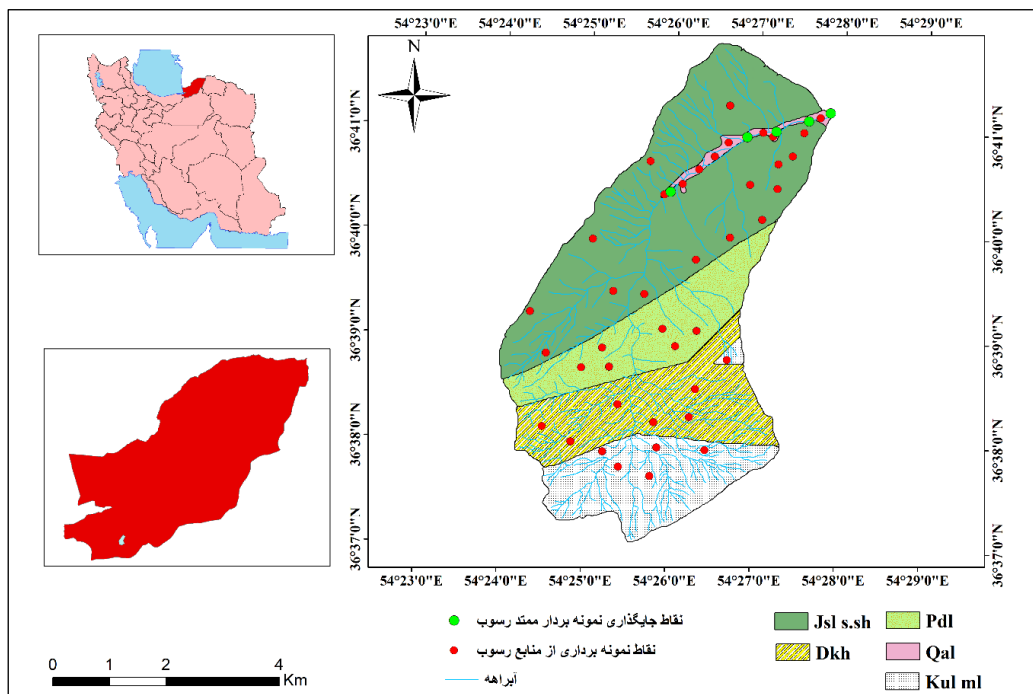
#### نمونه‌برداری از منابع رسوب

جدول ۱: خصوصیات واحدهای مختلف سنگی

درصد مساحت	مساحت (هکتار)	جنس واحدهای زمین‌شناسی	سن زمین‌شناسی	سازند	نماد زمین‌شناسی
۱/۶۷	۴۹/۹۳	نهشته‌های رودخانه ای عهد حاضر	کواترن		Qal
۱۶	۴۷۹/۴۸	سنگ آهک مارنی سفید	کرتاسه فوقانی	کرتاسه فوقانی	Kul ml
۴۷/۴۶	۱۴۲۲/۲۴	ماسه سنگ خاکستری و شیل	ژوراسیک زیرین	زیر واحد سازند شمشک	Jsl s.sh
۱۵/۶۳	۴۶۸/۳۲	سنگ آهک انکولیتی متوسط لایه تا توده ای	پرمین زیرین	درود	Pdl
۱۹/۲۵	۵۷۷/۰۲	شیل خاکستری تیره	دونین	خوش بیلاق	Dkh
۱۰۰	۲۹۹۶/۹۹	جمع کل			

به آزمایشگاه انتقال داده شده و سپس نمونه‌ها را کاملاً کوبیده تا خرد شود و سپس از الک ۶۲ میکرون عبور داده شد (فیض نیا، ۱۳۸۷).

در تحقیق حاضر با مراجعات مکرر به منطقه و مشاهده قسمت‌های مختلف اقدام به نمونه‌برداری از واحدهای زمین‌شناسی مختلف شد (شکل ۱). در مجموع نمونه‌های برداشت شده ۴۱ عدد بود که

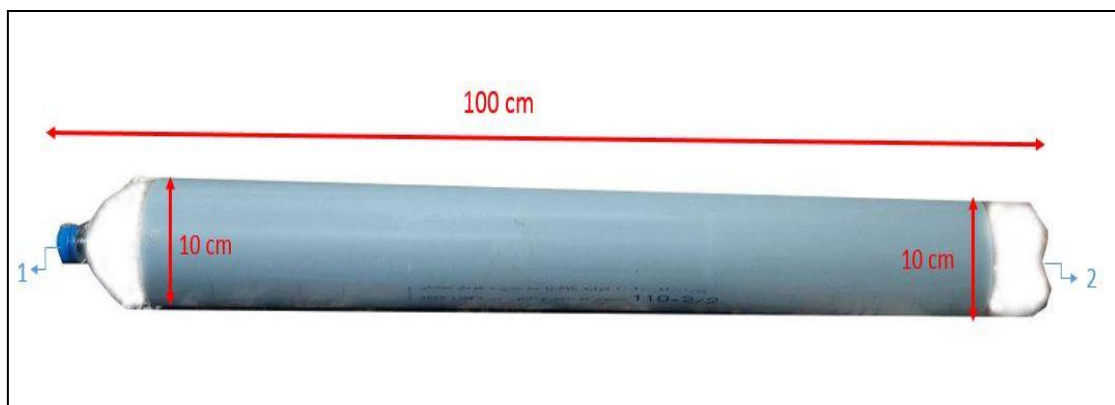


شکل ۱: موقعیت استان گلستان، موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری بر روی نقشه زمین‌شناسی

### نمونه برداری از رسوبات معلق

نمونه برداری از رسوبات به مدت یک سال (سال ۱۳۹۶) و در فصول مختلف انجام شد. به منظور نمونه برداری از رسوبات معلق، از نمونه بردار ممتد برداشت رسوب معلق که توسط فلیپس و همکاران (۲۰۰۰) طراحی شده استفاده گردید. فلیپس و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند نمونه برداشت شده توسط این نمونه بردار معرف خوبی از تمام رسوب حمل شده از مقطع رودخانه می باشد. پس از ساخت نمونه بردارها به تعداد کافی (شکل ۲)، این نمونه بردارها در محل های مناسب در مقطع رودخانه و در پنج نقطه قرار داده شدند.

مسئله مهم در نمونه های رسوب این است که نمونه های برداشت شده لازم است شاخص مناسبی از کل رسوبات حمل شده توسط رودخانه باشند. بدین معنا که ممکن است نمونه های رسوبی برداشت شده از رسوبات ته نشین شده قبلی معرف خوبی از منابع تولید رسوب نباشد. در یک حوضه معمولاً انواع کاربری ها، فرسایش و خصوصیات ژئومورفولوژیک وجود دارد، که باعث می شود مقدار فرسایش در نقاط مختلف حوضه متغیر باشد. از سوی دیگر از نظر زمانی نیز در طول یک سال انواع کاربری و نوع بارش که باعث ایجاد فرسایش می شود، متغیر است. بنابراین



شکل ۲: نمونه بردار ممتد رسوب معلق که با الگوبرداری از نمونه بردار فلیپس و همکاران (۲۰۰۰) ساخته شده است (در نقاط ۱ و ۲ روزنه هایی به قطر ۰/۵ سانتی متر تعبیه شده است).

شکل ۳ تصاویری از نقاط مختلف حوضه و مراحل کار را نشان می دهد.

### اندازه گیری خصوصیات ژئوشیمیایی در آزمایشگاه

در روش منشأیابی مرکب و کمی از ترکیبی از خصوصیات منشأیاب برای تفکیک منابع رسوب استفاده می شود. انتخاب این خصوصیات در دو مرحله انجام می گیرد در مرحله اول تعداد نسبتاً زیادی از خصوصیات منشأیاب تعیین و در مرحله دوم با استفاده از روش های آماری، ترکیبی بهینه

برداشت نمونه های رسوب به این صورت بود که بعد از هر واقعه بارش و فروکش کردن سیلاب، با مراجعه به منطقه اقدام به تخلیه رسوب جمع شده در داخل نمونه بردار می شد. نمونه برداری از رسوبات به مدت یک سال (سال ۱۳۹۶) و در فصول مختلف انجام شد. در مجموع یکسال ۲۵ نمونه رسوب برداشت شد که با ترکیب و همچنین حذف برخی نمونه های رسوب در نهایت ۸ نمونه رسوب برای انجام آنالیزهای مورد نظر تهیه گردید.

(V)، ایتريم (Y)، ايترييم (Yb)، تيتانيوم (Ti)، استرانسیم (Sr)، نقره (Ag)، آرسنیک (As)، کادمیوم (Cd)، لانتان (La)، مولیبدن (Mo)، گوگرد (S)، آنتیموان (Sb)، اورانیوم (U)، زیرکنیم (Zr) و توریم (Th) می‌باشد. برای تعیین غلظت عناصر از دستگاه ICP-OES استفاده شد. اندازه-گیری خصوصیات ژئوشیمیایی در آزمایشگاه ICP مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی در شهر کرج انجام شد.

از خصوصیات اولیه که قابلیت تفکیک منابع رسوب را داشته باشند، انتخاب می‌گردند. منشأیاب‌های ژئوشیمیایی اولیه مورد استفاده در این مطالعه ۳۴ ردیاب شامل پتاسیم (k)، کلسیم (Ca)، فسفر (P)، منیزیم (Mg)، سدیم (Na)، کروم (Cr)، کبالت (Co)، سرب (Pb)، منگنز (Mn)، مس (Cu)، آهن (Fe)، نیکل (Ni)، روی (Zn)، آلومینیوم (Al)، باریم (Ba)، بریلیم (Be)، سربیم (Ce)، لیتیم (Li)، اسکاندیم (Sc)، وانادیم



شکل ۳: مراحل نمونه‌برداری؛ الف) چگونگی قرارگیری نمونه‌بردار ممتد رسوب در آبراهه، ب) فرسایش شدید کناری رودخانه نزدیک خروجی حوضه، ج) رسوب جمع شده در داخل نمونه‌بردار، د) نمونه‌ای از تخریب انسانی در حوضه، ه) نمونه‌ای از نقاط فرسایش یافته در حوضه.

آزمون تابع توزیع آزاد برای تمایز بین منابع رسوب گوناگون است. در گام بعد با استفاده از آنالیز تابع تشخیص گام به گام، ترکیب بهینه ردیابها که قادر به تفکیک منابع مختلف رسوب هستند، تعیین شد. در نهایت سهم هر یک از منابع رسوب به صورت کمی با استفاده از مدل ترکیبی چند متغیره (رابطه ۱) تعیین می‌شود (والینگ، ۲۰۱۳؛ اونز و همکاران، ۲۰۱۷؛ کالینز و همکاران، ۲۰۱۷). این رابطه دارای محدودیت‌های رابطه ۲ و ۳ است (کالینز و همکاران، ۲۰۰۱):

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j &= y_i & \text{رابطه (۱)} \\ 0 &\leq x_j \leq 1 & \text{رابطه (۲)} \\ \sum_{j=1}^m x_j &= 1 & \text{رابطه (۳)} \end{aligned}$$

در این رابطه‌ها هر کدام از پارامترها عبارتند از:  $y_i$  مقادیر خصوصیت  $i$  ( $i=1$  تا  $n$ ) در نمونه رسوب معلق،  $a_{ij}$  مقادیر خصوصیت ردیاب  $i$  در منبع  $j$  (۱) =  $m$  تا  $n$ )،  $x_j$  سهم نسبی منبع  $j$  در نمونه رسوب،  $m$  تعداد منابع رسوب و  $n$  تعداد خصوصیات ردیاب مورد بررسی می‌باشد. چون مجموعه معادلات یادشده دارای مجهولات زیادی بوده و راه‌حل‌های متنوعی می‌تواند داشته باشد از این‌رو برای به دست آوردن نتایج بهینه در تعیین سهم منابع رسوب و به جای حل مستقیم باید از روش‌های بهینه‌سازی استفاده شود (حکیم خانی ۱۳۸۵؛ روان و همکاران، ۲۰۰۰). در مطالعات منشأیابی، از روش حداقل کردن مجموع مربعات باقیمانده (راسل و همکاران، ۲۰۰۱؛ والینگ و همکاران، ۱۹۹۹) (رابطه ۴) برای حل مدل ترکیبی چند متغیره و به دست آوردن سهم بهینه منابع رسوب استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از الحاقیه سولور در نرم‌افزار اکسل، سهم بهینه منابع محاسبه شد.

## تعیین ترکیب بهینه ردیابها و تعیین سهم منابع مختلف

پس از تعیین مقادیر ردیاب‌های مختلف در منابع و رسوب در گام بعد، اقدام به تجزیه و تحلیل آماری و تعیین سهم هریک از منابع می‌شود. براساس تحقیق ویلکینسون و همکاران (۲۰۱۳) غلظت ردیاب‌های مورد استفاده در نمونه‌های رسوب ضروری است در دامنه غلظت این ردیاب‌ها در نمونه‌های منابع رسوب باشد که به این آزمون، آزمون غلظت جرمی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. ردیاب‌هایی که در این آزمون پذیرفته می‌شوند وارد مرحله بعد می‌شوند و ردیاب‌هایی که رد می‌شوند کنار گذاشته می‌شوند. براساس تست غلظت جرمی، لازم است غلظت نمونه‌های رسوب برای ردیاب‌های مختلف در دامنه غلظت ردیاب‌های مختلف در نمونه‌های منابع رسوب قرار داشته باشد که در این حالت ردیاب در آزمون برآکت پذیرفته می‌شود و در غیر اینصورت رد شده و در مراحل بعدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. به بیان دیگر چنان‌چه غلظت ردیابی در نمونه‌های رسوب، بالاتر و یا پایین‌تر از غلظت آن ردیاب در همه نمونه‌های منابع رسوب باشد، آن ردیاب در آزمون برآکت رد می‌شود و کنار گذاشته می‌شود (ماکاندان و همکاران، ۲۰۱۰؛ ناوراتیل و همکاران، ۲۰۱۲؛ شولر و همکاران، ۲۰۱۳؛ اسمیت و بلیک، ۲۰۱۴؛ حدادچی و همکاران، ۲۰۱۵). در مرحله بعد، از دو آزمون آماری به منظور تعیین ترکیب بهینه ردیاب‌ها استفاده می‌شود (کالینز، ۱۹۹۷). از آزمون ناپارامتری کراسکال-والیس به منظور بررسی اینکه کدام یک از خصوصیات منشأیاب، تفاوت معنی دار بین انواع منابع رسوب را نشان می‌دهد استفاده شد (پولی و همکاران، ۲۰۱۵). این روش یک تابع ناپارامتری آنالیز واریانس و یک

مجموع مربعات باقیمانده را می‌توان به صورت زیر (رابطه ۴)

$$R = \sum_{i=1}^n \left\{ (y_i - (\sum_{j=1}^m a_{i,j} x_j)) / y_j \right\}^2$$

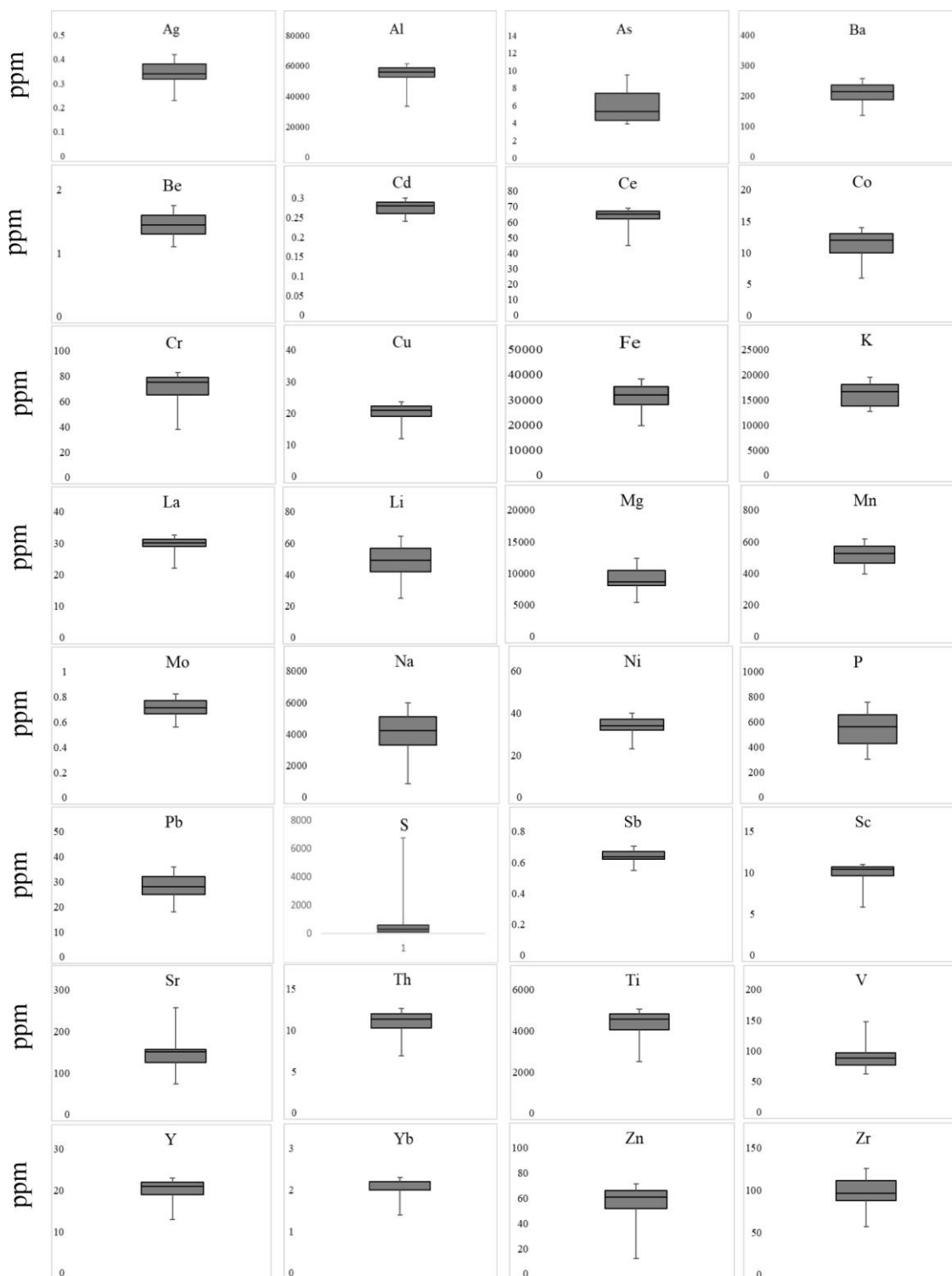
نوشت:

R، مجموع مربعات باقیمانده.

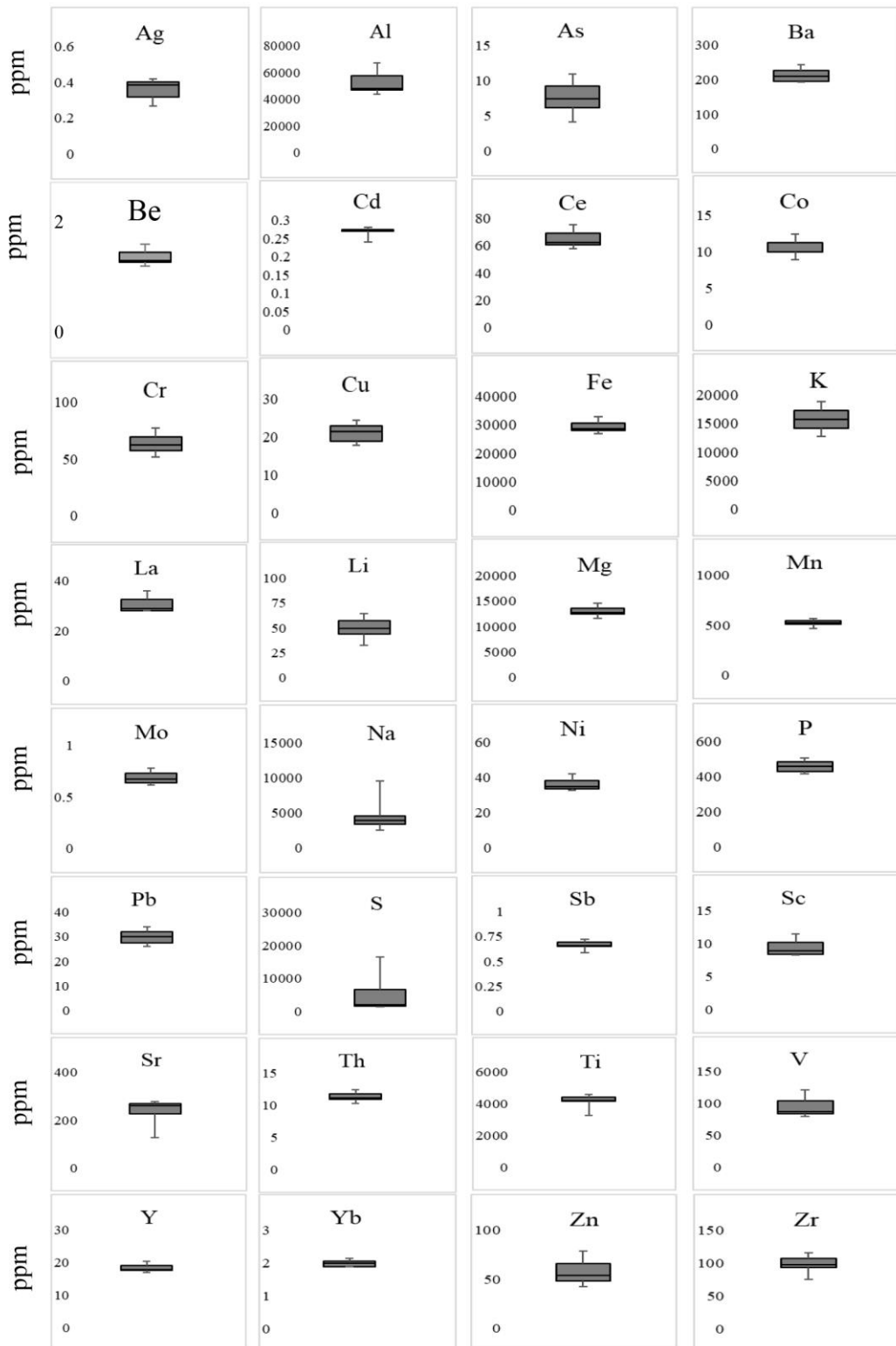
### نتایج

همانگونه که بیان شد در تحقیق حاضر تعداد ۳۴ خصوصیت ژئوشیمیایی اندازه‌گیری شد. از این خصوصیات مقادیر غلظت کلسیم (Ca) بیش‌تر از حد آشکارسازی دستگاه اندازه‌گیری و غلظت اورانیوم (U) کم‌تر از حد آشکارسازی دستگاه اندازه‌گیری یعنی ICP بوده و در همان ابتدای کار کنار گذاشته شدند و داده‌های آن‌ها برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار نگرفت. بنابراین ۳۲ خصوصیت ژئوشیمیایی برای تجزیه و تحلیل‌های آماری جهت انگشت‌نگاری باقی ماند. مقادیر آماره‌های توصیفی برای خصوصیات اندازه‌گیری شده، در نمونه‌های منابع رسوب و هم‌چنین در نمونه‌های رسوب به ترتیب در اشکال ۴ و ۵ آورده شده است. جهت انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری ابتدا آزمون براکت یا تست غلظت جرمی انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. براساس تست غلظت جرمی، لازم است غلظت نمونه‌های رسوب برای ردیاب‌های مختلف در دامنه غلظت ردیاب‌های مختلف در نمونه‌های منابع رسوب قرار داشته باشد که در این حالت ردیاب در آزمون براکت پذیرفته می‌شود و در غیر این‌صورت در مراحل بعدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و کنار گذاشته می‌شود. با توجه به جدول ۲، براساس نتیجه آزمون براکت تنها ردیاب کادمیوم (Cd) در این آزمون رد شد و حذف گردید. در ادامه آزمون ناپارامتری کراسکال-والیس انجام شده که نتایج این آزمون در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج آزمون کراسکال-والیس نشان می‌دهد که براساس سطح احتمال ۰/۰۵، دو ردیاب آنتیموان (Sb) و توریم (Th) توانایی تفکیک منابع مختلف را نداشتند و در مراحل بعدی کار استفاده نشدند و کنار گذاشته شدند. بنابراین با حذف سه ردیاب در آزمون‌های براکت و کراسکال-والیس ۲۹ ردیاب باقی مانده و وارد مرحله بعدی تجزیه و تحلیل‌های آماری شدند.





شکل ۴: آماره‌های توصیفی خصوصیات ژئوشیمیایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های منابع رسوب



شکل ۵: آماره‌های توصیفی خصوصیات ژئوشیمیایی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های رسوب

جدول ۲: نتایج آزمون‌های برکت و کراسکال-والیس

P value	H value	تست برکت	ردیاب	P value	H value	تست برکت	ردیاب
۰/۰۰۳*	۱۶/۱۲	P	Mo	۰/۰۲۲*	۱۱/۴۲	P	Ag
۰/۰۰۰*	۲۳/۰۲	P	Na	۰/۰۰۳*	۱۶/۳۴	P	Al
۰/۰۰۰*	۲۴/۵۷	P	Ni	۰/۰۰۰*	۲۷/۰۶	P	As
۰/۰۰۰*	۲۰/۶۳	P	P	۰/۰۰۱*	۱۹/۸۳	P	Ba
۰/۰۰۰*	۲۰/۷۵	P	Pb	۰/۰۰۰*	۲۶/۰۰	P	Be
۰/۰۰۰*	۳۳/۵۴	P	S	-	-	R	Cd
۰/۱۳۱	۷/۱۰	P	Sb	۰/۰۰۳*	۱۶/۲۴	P	Ce
۰/۰۰۸*	۱۳/۸۴	P	Sc	۰/۰۰۰*	۲۷/۰۸	P	Co
۰/۰۴۳*	۹/۸۷	P	Sr	۰/۰۰۱*	۱۸/۵۸	P	Cr
۰/۰۹۱	۸/۰۱	P	Th	۰/۰۰۰*	۲۵/۸۶	P	Cu
۰/۰۰۱*	۱۹/۹۵	P	Ti	۰/۰۰۰*	۲۸/۵۱	P	Fe
۰/۰۰۰*	۲۶/۰۲	P	V	۰/۰۰۰*	۲۷/۴۷	P	K
۰/۰۰۰*	۲۳/۹۸	P	Y	۰/۰۰۲*	۱۷/۳۲	P	La
۰/۰۰۳*	۱۶/۳۰	P	Yb	۰/۰۰۱*	۱۹/۷۹	P	Li
۰/۰۱۹*	۱۱/۷۸	P	Zn	۰/۰۰۰*	۳۰/۱۶	P	Mg
۰/۰۰۱*	۱۹/۵۰	P	Zr	۰/۰۰۰*	۲۷/۰۴	P	Mn

\* ردیاب‌هایی که دارای سطح معنی‌داری بالاتر از ۰/۰۵ بوده و در آزمون کراسکال والیس تایید شدند.

P: ردیاب‌هایی که در آزمون برکت تایید شدند.

R: ردیاب‌هایی که در آزمون برکت رد شدند.

ترکیب بهینه انتخاب شدند که قادر هستند به خوبی منابع (واحدهای زمین‌شناسی) مختلف را از هم تفکیک کنند. نتایج آزمون تحلیل تشخیص چند متغیره و ردیاب‌هایی که به عنوان ترکیب بهینه انتخاب شدند، در جدول ۳ نشان داده شده است.

در گام بعدی با استفاده از تحلیل تشخیص چند متغیره گام به گام، اقدام به تعیین ترکیب بهینه ردیاب‌ها از بین ۲۹ ردیاب باقیمانده شد. بدین منظور از روش گام به گام مبتنی بر ویلکس لامبدا که سطح معنی‌داری آماره F برای ورود و حذف متغیر به ترتیب برابر ۰/۵۰ و ۰/۱ بود، استفاده شد. بر این اساس در نهایت ۱۵ ردیاب به عنوان

جدول ۳: نتایج آزمون آنالیز تابع تشخیص (DFA)

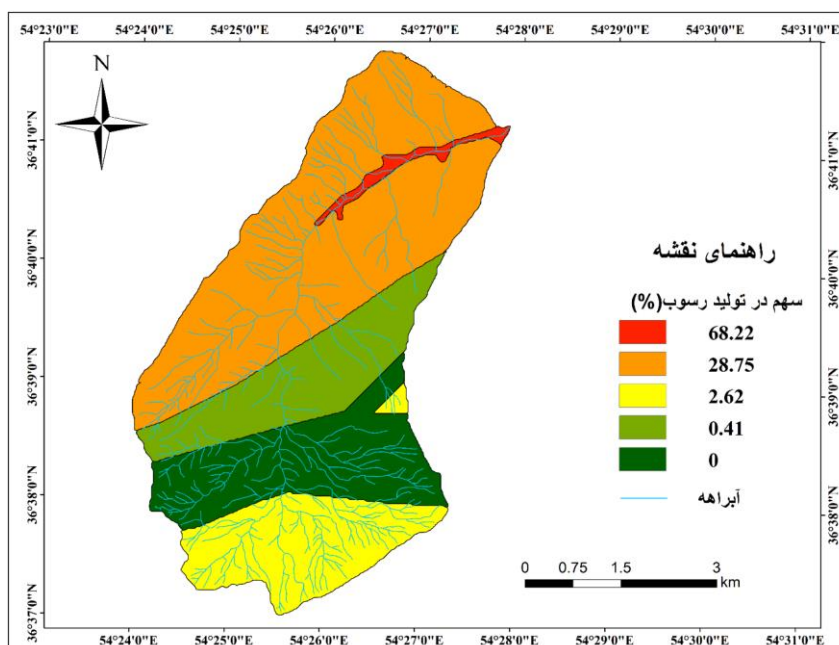
Sig	Wilks lambda	عنصر	گام	Sig	Wilks lambda	عنصر	گام
۰/۰۰۰	۰/۰۴۰	La	۹	۰/۰۰۰	۰/۰۸۴	Mg	۱
۰/۰۰۰	۰/۰۰۷	Sc	۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۷۴	Be	۲
۰/۰۰۰	۰/۰۴۵	Y	۱۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	V	۳
۰/۰۰۰	۰/۰۸۳	P	۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۲۱	Li	۴
۰/۰۰۰	۰/۰۵۹	Co	۱۳	۰/۰۰۰	۰/۰۳۳	Sr	۵
۰/۰۰۰	۰/۰۱۷	Zr	۱۴	۰/۰۰۰	۰/۰۵۸	Zn	۶
۰/۰۰۰	۰/۰۵۵	Ba	۱۵	۰/۰۰۰	۰/۰۸۵	Na	۷
				۰/۰۰۰	۰/۰۲۱	Ti	۸

پس از آن که ترکیب بهینه ردیاب‌ها جهت تفکیک منابع رسوب به دست آمد، اقدام به حل معادله ترکیبی چند متغیره (رابطه ۳) برای هر یک از نمونه‌های رسوب شد. نتایج مربوط به سهم هر یک از واحدهای زمین‌شناسی در نمونه‌های مختلف رسوب در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف در تولید رسوب حوزه به تفکیک نمونه‌های رسوب مختلف

واحد سنگی	رسوب ۱	رسوب ۲	رسوب ۳	رسوب ۴	رسوب ۵	رسوب ۶	رسوب ۷	رسوب ۸	سهم کلی
Qal	۶۶/۰۲	۴۸/۳۹	۶۶/۸۸	۶۱/۰۸	۷۴/۲۲	۷۴/۸۱	۷۸/۲۵	۷۶/۱۳	۶۸/۲۲
Jsl s.sh	۳۳/۹۸	۳۲/۳۲	۳۳/۱۲	۳۳/۹۸	۲۵/۷۸	۲۵/۱۹	۲۱/۷۵	۲۳/۸۷	۲۸/۷۵
Pdl	۰/۰۰	۳/۳۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۱
Dkh	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
Kul ml	۰/۰۰	۱۶/۰۴	۰/۰۰	۴/۹۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۶۲
جمع	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

با توجه به جدول ۴ واحد Qal که نهشته‌های رودخانه عهد حاضر می‌باشند، بیش‌ترین سهم را در تولید رسوب داشته‌اند. هم‌چنین واحد Dkh که متشکل از شیل خاکستری سازند خوش ییلاق است، با صفر درصد کم‌ترین نقش را در تولید رسوب داشته است. شکل ۶ سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف را در تولید رسوب در قالب نقشه نشان می‌دهد.



شکل ۶: سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف در تولید رسوب

روش انگشت‌نگاری در حوزه آبخیز تول‌بنه در استان گلستان شد. بدین منظور پس از نمونه‌برداری از منابع رسوب و هم‌چنین رسوبات معلق،

### نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اقدام به برآورد سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف در تولید رسوب با استفاده از

(۱۳۸۰)، حیدری و همکاران (۱۳۹۲)، نصرتی و جلالی (۱۳۹۶) و نصرتی (۲۰۱۸) مطابقت دارد اما با نتایج فیض‌نیا و حسامی (۱۳۹۵) مطابقت ندارد. سازند شمشک از سازندهای شیلی و حساس به فرسایش بوده و از سوی دیگر بخش وسیعی از این سازند شامل اراضی بوته و درختچه‌های نیمه مترکم بوده که نسبت به جنگل حساسیت بالاتری نسبت به فرسایش و تولید رسوب دارند. با توجه به نقشه زمین‌شناسی حوضه، نهشته‌های کواترنری کاملاً در حاشیه آبراهه اصلی حوضه قرار گرفته‌اند که با توجه به مستعد بودن حاشیه آبراهه‌ها به حرکات توده‌ای کناری و سوابق متعدد وقوع لغزش‌های کم عمق حاشیه رودخانه‌ای که ناشی از زیرکنش رودخانه‌ای می‌باشد، این سازند مقدار قابل توجهی رسوب را وارد رودخانه اصلی حوضه می‌کند. در مورد واحد ماسه سنگ و شیل شمشک نیز این موارد بیان شده کاملاً صدق می‌کند. در بازدیدهای متعدد میدانی وقوع حرکات دامنه‌ای متعدد در این سازند در اثر وجود درون لایه‌های زغالی موازی با سطح جدایش لغزش، ملاحظه گردید که سهم قابل توجهی در تولید رسوب دارد. هم‌چنین وقوع فرسایش‌های کنار آبراهه‌های در سازندهای کواترنری (شکل ۳ قسمت ب) و شمشک (شکل ۳ قسمت ه) دلیل دیگری در تایید صحت نتایج تحقیق می‌باشد. یکی از دلایل دیگری که باعث فرسایش پذیر بودن و تولید رسوب در سازند شمشک می‌شود، تخریب‌های انسانی است که در داخل این سازند صورت گرفته است (شکل ۳ قسمت د)، به گونه‌ای که با جنگل-تراشی و از بین بردن پوشش گیاهی زمینه را برای وقوع فرسایش شدید و تولید رسوب فراهم کرده‌اند. در نهایت از نتایج تحقیق حاضر می‌توان در تدوین برنامه‌های مدیریتی حوزه آبخیز جهت

غلظت ۳۴ خصوصیت ژئوشیمیایی در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در ادامه اقدام به تجزیه و تحلیل-های آماری انگشت‌نگاری گردید و آزمون‌های تست غلظت جرمی، کراسکال - والیس و آنالیز تابع تشخیص به منظور تعیین ترکیب بهینه ردیاب‌ها استفاده شد. در نهایت ۱۵ ردیاب شامل منیزیم (Mg)، برلییم (Be)، وانادیم (V)، لیتیم (Li)، استرانسیم (Sc)، روی (Zn)، سدیم (Na)، تیتانیوم (Ti)، لاتان (La)، اسکاندیم (Sc)، ایتیم (Y)، فسفر (P)، کبالت (Co)، زیرکنیم (Zr) و باریم (Ba) به عنوان ترکیب بهینه جهت تفکیک منابع بالقوه تولید رسوب انتخاب شد. در نهایت با استفاده از این ۱۵ ردیاب نهایی و مدل ترکیبی چندمتغیره سهم واحدهای زمین‌شناسی مختلف در نمونه‌های مختلف رسوب به دست آمد. براساس نتایج به دست آمده (جدول ۴) در همه نمونه‌های رسوب واحد Qal یعنی نهشته‌های کواترنری بیش-ترین سهم را در تولید رسوب داشته است. پس از نهشته‌های کواترنری واحد زمین‌شناسی Jsl s.sh یعنی ماسه سنگ خاکستری و شیل بیش‌ترین سهم را در تولید رسوب داشته است. با توجه به نتایج ملاحظه می‌شود در کل، واحدهای نهشته-های رودخانه‌ای کواترنری و سازند شمشک به ترتیب با ۶۸/۲۲ و ۲۸/۷۵ درصد سهم عمده را در تولید رسوب داشته‌اند و واحد Dkh یعنی شیل خاکستری و تیره سازند خوش‌یلاق با صفر درصد سهمی در تولید رسوب در حوضه نداشته است. واحدهای Kul یعنی سنگ آهک مارنی سفید سازند کرتاسه و Pdl متشکل از سنگ آهک انکولیتی متوسط لایه تا توده ای سازند درود به ترتیب ۲/۶۲ و ۰/۴۱ درصد در تولید رسوب سهم داشته‌اند. با توجه به بازدیدهای گسترده میدانی نتایج قابل قبول می‌باشد و با نتایج جهانسیر

انجام اقدامات کنترل فرسایش و رسوب، واحدهای مذکور مورد توجه و اولویت قرار گیرند.

### سپاس‌گزاری

این تحقیق در قالب طرح پژوهشی مصوب (شماره ۹۷۰۱۸۰۶۸) و با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب سپاسگزاری خود را از آن صندوق محترم، اعلام نمایند.

حفاظت خاک و کنترل فرسایش و رسوب در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد. با توجه به اینکه منابع اصلی تولید رسوب در حوضه شناسایی شده‌اند، اقدامات کنترلی نظیر احداث سازه‌های رسوب‌گیر را می‌توان معطوف به نقاط فرسایش - پذیر حوضه نمود. به عبارت دیگر با توجه به اینکه واحدهای نهشته‌های کواترنری و هم‌چنین ماسه - سنگ سازند شمشک منابع اصلی تولید رسوب در حوزه آبخیز تول‌بنه می‌باشند، ضروری است جهت

### پانویس

#### 1-Mass Conservation Test

#### 2-Solver

### منابع

-حکیم خانی، ش. و احمدی، ح.، ۱۳۸۸. تعیین سهم زیر حوضه‌ها در تولید رسوب با استفاده از روش انگشت‌نگاری (مطالعه موردی حوضه مرگن پلدشت، ماکو)، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، سال ۱۵، شماره ۱، ص ۱۸۱-۱۹۱.

-حکیم خانی، ش.، ۱۳۸۹. ارزیابی اهمیت نسبی انواع فرسایش در تولید رسوب (بررسی موردی: حوزه قره آقاج، ماکو)، نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۱، ص ۱۳-۲۷.

-حیدری، ک.، نجفی نژاد، ع.، خرمالی، ف. و بابانژاد، م.، ۱۳۹۲. تعیین سهم واحدهای کاری در تولید رسوب معلق با استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب (مطالعه موردی: آبخیز تول‌بنه، استان گلستان)، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۱۰، ص ۶۵-۷۶.

-دولت کردستانی، م.، غلامی، ح.، احمدی، س.ج.، والینگ، د. و فتح آبادی، ا.، ۱۳۹۶. سهم بندی

-تیموریان، ت.، فیض‌نیا، س.، سیدعلی خانی، س.د. و صمدی ارقینی، م.، ۱۳۹۴. ارزیابی حساسیت به فرسایش با استفاده از روش‌های کنایه شناسی و ژئوشیمیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز فشند)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۱۹، ص ۴۷-۶۰.

-جلالی، س.، ۱۳۹۳. تاثیر جاده سازی در تولید رسوب حوزه آبخیز زیارت استان گلستان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی - گرایش هیدروژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی، ۸۷ ص.

-جهانسیر، ر.، ۱۳۸۰. بررسی تأثیر عوامل خطر فرسایش خاک (عوامل مدل FAO) در میزان فرسایش با استفاده از GIS در حوزه آبخیز زیارت گرگان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ص ۱۰۳-۱۰۷.

شناسی و سنگ‌شناسی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز حسن ابدال زنجان، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۳، ص ۲۴۷-۲۵۷.

-غلامی، ح.، طاهری مقدم، ا.، نجفی، م. و مهدوی، ر.، ۱۳۹۴. تعیین سهم کاربری مختلف اراضی در تولید رسوب تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از روش انگشت‌نگاری (منطقه مورد مطالعه: نگار- بردسیر، استان کرمان)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، سال ۵، شماره ۲، ص ۴۶-۵۴.

-فتح‌آبادی، ا.، ۱۳۹۲. برآورد عدم قطعیت روش انگشت‌نگاری رسوب، رساله دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تهران، ۱۵۱ ص.

-فیض‌نیا، س. و حسامی، د.، ۱۳۹۵. تعیین سهم سازندهای زمین‌شناسی در تولید رسوب با استفاده از روش انگشت‌نگاری (مطالعه موردی: حوضه دریاچه زریوار کردستان)، محیط زیست و مهندسی آب، سال ۲، شماره ۳، ص ۲۳۶-۲۴۶.

-فیض‌نیا، س.، ۱۳۸۷. رسوب‌شناسی کاربردی با تاکید بر فرسایش خاک و تولید رسوب، چاپ اول انتشارات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۳۶۴ ص.

-نصرتی، ک. و جلالی، س.، ۱۳۹۶. بررسی میزان تولید رسوب معلق حوزه آبخیز زیارت، گرگان در فصل‌های مختلف با استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب، اکوهیدرولوژی، سال ۴، شماره ۳، ص ۸۸۷-۸۹۵.

-Blake, W.H., Boeckx, P., Stock, B.C., Smith, H.G., Bodé, S., Upadhyay, H.R., Gaspar, L., Goddard, R., Lennard, A.T., Lizaga, I. and Lobb, D.A., 2018. A deconvolutional Bayesian mixing model approach for river basin sediment source apportionment. *Scientific reports*, v. 8(1), p.13073.

منابع رسوبات تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از دو مدل ترکیبی مورد استفاده در روش انگشت‌نگاری رسوب (مطالعه موردی: منطقه‌ی جازموریان، جنوب استان کرمان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، ص ۱-۱۴.

-دولت‌کردستانی، م.، غلامی، ح.، احمدی، س.ج.، والینگ، د. و فتح‌آبادی، ا.، ۱۳۹۷. کمی‌سازی عدم قطعیت سهم منابع رسوب تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از روش انگشت‌نگاری مونت‌کارلو (مطالعه موردی: تپه‌های ماسه‌ای جازموریان، جنول استان کرمان)، پژوهش‌های دانش زمین، سال ۹، شماره ۳، ص ۱۴-۲۹.

-صمدی ارقینی، ح.، ۱۳۹۲. بررسی فرسایش پذیری حوزه آبخیز حسن ابدال زنجان به روش منشأیابی کمی رسوبات پشت سازه‌های آبخیزداری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه تهران. ۲۰۰ ص.

-صمدی ارقینی، ح.، فیض‌نیا، س. و نظری سامانی، ع.ا.، ۱۳۹۳. استفاده از ویژگی‌های مغناطیسی برای بررسی نقش واحدهای سنگ-شناسی در تولید رسوب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حسن ابدال زنجان)، نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۲۵، ص ۳۹-۴۶.

-صمدی ارقینی، ح.، فیض‌نیا، س. و نظری سامانی، ع.ا.، ۱۳۹۳. بررسی سهم واحدهای سنگی در تولید رسوب با استفاده از ویژگی‌های کانی-

-Blake, W.H., Ficken, K.J., Taylor, P., Russell, M.A., Walling, D.E., 2012. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments, *Geomorphology*, v. 139-140, p. 322-329.

-Boudreault, M., Koiter, A.J., Lobb, D.A., Liu, K., Benoy, G., Owens, P.N., Danielescu, S. and Li, S., 2018. Using

- colour, shape and radionuclide fingerprints to identify sources of sediment in an agricultural watershed in Atlantic Canada. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, v. 43(3), p. 347-365.
- Brown, L. and McEnroe, A., 2012. Paleomagnetism and magnetic mineralogy of Grenville metamorphic and igneous rocks Adirondak Highland, USA. *Journal of Precambrian research*, p. 57-74.
- Chen, F., Fang, N. and Shi, Zh., 2016. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment, *Science of the Total Environment*, p. 123-133.
- Collins, A.L., Foster, I.D.L., Gellis, A.C., Porto, P. and Horowitz, A.J., 2017. Sediment source fingerprinting for informing catchment management: Methodological approaches, problems and uncertainty, *Journal of environmental management*, v. 194, p. 1-3.
- Collins, A.L., Walling, D.E. and Leeks, G.J.L., 1997. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique, *Catena*, v. 29(1), p. 1-27.
- Collins, A.L. and Walling, D.E., 2002. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins, *Journal of Hydrology*, v. 261, p. 244-218.
- Collins, A.L. and Walling, D.E., 2004. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects, *Progress in Physical Geography*, v. 28, p. 159-196.
- Collins, A.L., Walling, D.E., Sickingabula, H.M. and Leeks, G.J.L., 2001. Suspended sediment fingerprinting in a small tropical catchment and some management implications, *Applied Geography*, v. 21, p. 387-412.
- Collins, A.L., Zhang, Y., McChesney, D., Walling, D.E., Haley, S.M. and Smith, P., 2012. Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modeling, *Science of Total Environment*, v. 414, p. 301-317.
- Collins, A.L., Zhang, Y., Walling, D.E., Grenfell, S.E. and Smith, P., 2010. Tracing sediment loss from eroding farm tracks using a geochemical fingerprinting procedure combining local and genetic algorithm optimization, *Science of Total Environment*, v. 408, p. 61-71.
- D'Haenm, K., Verstraetenm, G. and Degryse, P., 2012. Fingerprinting historical fluvial sediment fluxes, *Progress in Physical Geography*, v. 36, p. 154-186.
- Dahmardeh Behrooz, R., Gholami, H., Telfer, M.W., Jansen, J.D. and Fathabadi, A., 2019. Using GLUE to pull apart the provenance of atmospheric dust, *Aeolian Research*, v. 37, p. 1-13.
- Devereux, OH., Prestegard, K.L., Needelman, B.A. and Gellis, A.C., 2010. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland, *Hydrological Process*, v. 24, p. 1391-1403.
- Du, P. and Walling, D., 2017. Fingerprinting surficial sediment sources: Exploring some Potential problems associated with the spatial variability of source material properties, *Journal of Environmental Management*, v. 194, p. 4-15.



- Foster, ID. and Lees, J.A., 2000. Tracers in geomorphology: theory and applications in tracing fine particulate sediments. In: Foster IID (ed) Tracers in geomorphology, Wiley, Chichester, p. 3-20.
- Fox, J.F. and Papanicolaou, A.N., 2008. An un-mixing model to study watershed erosion processes, *Advances in Water Resources*, v. 31, p. 96-108.
- Franks, S.W. and Rowan, J.S., 2000. Multi-parameter fingerprinting of sediment sources: uncertainty estimation and tracer selection, *Computational methods in water resources*, v. 13, p. 1067-1074.
- Gholami, H., Telfer, M.W., Blake, W.H. and Fathabadi, A., 2017. Aeolian sediment fingerprinting using a Bayesian mixing model, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42(14), p. 2365-2376.
- Haddadchi, A., Olley, J. and Laceby, P., 2014. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions, *Science of Total Environment*, v. 497, p. 139-152.
- Haddadchi, A., Nosrati, K. and Ahmadi, F., 2014. Differences between the source contribution of bed material and suspended sediments in a mountainous agricultural catchment of western Iran. *Catena*, v. 116, p. 105-113.
- Haddadchi, A., Olley, J. and Pietsch, T., 2015. Quantifying sources of suspended sediment in three size fractions, *Journal of soils and sediments*, v. 15(10), p. 2086-2100.
- Haddadchi, A., Ryder, D.S., Evrard, O. and Olley, J., 2013. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models, *International Journal of Sediment Research*, v. 28, p. 560-578.
- Jenns, N., Heppell, C.M., Burt, T.P., Walden, J. and Foster, I.D., 2002. Investigating contemporary and historical sediment inputs to Slapton Higher Ley: an analysis of the robustness of source ascription methods when applied to lake sediment data, *Hydrological Processes*, v. 16(17), p. 3467-3486.
- Koiter, A.J., Owens, P.N., Peticrew, E.L. and Lobb, D.A., 2013. The behavioral characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins, *Earth-Science Reviews*, v. 125, p. 24-42.
- Krause, A.K., Franks, S.W., Kalma, J.D., Loughran, R.J. and Rowan, J.S., 2003. Multi-parameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia, *Catena*, v. 53, p. 327-348.
- Kraushaar, S., Schumann, T., Ollesch, G., Schubert, M., Vogel, H.J. and Siebert, C., 2015. Sediment fingerprinting in northern Jordan: element-specific correction factors in a carbonatic setting, *Journal of soils and sediments*, v. 15(10), p. 2155-2173.
- Lindsey, D., William, H. and Bradley, S., 2007. Using pebble lithology and roundness to interpret gravel provenance in piedmont fluvial system of the Rocky Mountains, USA, *Sediment Geology*, v. 199, p. 223-232.
- Liu, B., Niu, Q., Qu, J. and Zu, R., 2016. Quantifying the provenance of Aeolian sediments using multiple composite fingerprints, *Aeolian Research*, v. 22, p. 117-122.
- Manjoro, M., Rowntree, K., Kakembo, V., Foster, I. and Collins, A.L., 2017. Use of sediment source fingerprinting to assess the role of subsurface erosion in the supply of fine sediment in a degraded catchment in the Eastern Cape, South Africa. *Journal of*

- environmental management, v. 194, p. 27-41.
- Martinez-Carreras, N., Udelhoven, T., Krein, A., Gallart, F., Iffly, J.F., Ziebel, J., Hoffmann, L., Pfister, L. and Walling, D.E., 2010. The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg), *Journal of Hydrology*, v. 382, p. 49-63.
- Miller, J.R., Mackin, G. and Miller, S.M.O., 2015. Application of geochemical tracers to fluvial sediment, *Springer Briefs in Earth Sciences*, Springer, London, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13221-1>.
- Mukundan, R., Radcliffe, D.E., Ritchie, J.C., Risse, L.M. and McKinley, R.A., 2010. Sediment fingerprinting to determine the source of suspended sediment in a southern Piedmont stream. *Journal of environmental Quality*, v. 39(4), p. 1328-1337.
- Navratil, O., Evrard, O., Esteves, M., Legout, C., Ayrault, S., Némery, J., Mate-Marin, A., Ahmadi, M., Lefèvre, I., Poirel, A. and Bonté, P., 2012. Temporal variability of suspended sediment sources in an alpine catchment combining river/rainfall monitoring and sediment fingerprinting. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 37(8), p. 828-846.
- Nosrati, K., Govers, G., Ahmadi, H., Sharifi, F., Amoozegar, M.A., Merckx, R. and Vanmaercke, M., 2011. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: biochemical fingerprints? *International Journal of Sediment Research*, v. 28, p. 136-151.
- Nosrati, K., Collins, A.L. and Madankan, M., 2018. Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model, *Catena*, v.164, p. 32-43.
- Nosrati, K., Haddadchi, A., Collins, A.L., Jalali, S. and Zare, M.R., 2018. Tracing sediment sources in a mountainous forest catchment under road construction in northern Iran: comparison of Bayesian and frequentist approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25(31), p. 30979-30997.
- Owens, P.N., Blake, W.H., Gaspar, L., Gateuille, D., Koiter, A.J., Lobb, D.A., Petticrew, E.L., Reiffarth, D.G., Smith, H.G. and Woodward, J.C., 2016. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications. *Earth-Science Reviews*, v. 162, p. 1-23.
- Palazón, L., Latorre, B., Gaspar, L., Blake, W.H., Smith, H.G. and Navas, A., 2016. Combining catchment modelling and sediment fingerprinting to assess sediment dynamics in a Spanish Pyrenean river system, *Science of the Total Environment*, v. 569, p. 1136-1148.
- Peart, M.R. and Walling, D.E., 1988. Techniques for establishing suspended sediment sources in two drainage basin in Devon, UK: a comparative assessment, In *Boards, M. P., and Walling, D.E., Sediment budgets*, Walling ford, I Alts Publication, v. 174, p. 269 – 279.
- Phillips, J.M., Russell, M.A. and Walling, D.E., 2000. Time-integrating sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small

- catchments, *Hydrological Processes*, v. 14, p. 2589–2602.
- Pulley, S. and Collins, A.L., 2018. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (Sediment Fingerprinting Tool) open source software, *Science of The Total Environment*, v. 635, p. 838-858.
- Pulley, S., Foster, I. and Antunes, P., 2015. The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene river basin, *Geomorphology*, v. 228, p. 303–319.
- Rowan, J.S., Goodwill, P. and Franks, S.W., 2000. Uncertainty estimation in fingerprinting suspended sediment sources. In: Foster, I.D.L. (Ed.), *Tracers in Geomorphology*, Wiley, Chichester, UK, p. 279-290.
- Russell, M.A., Walling, D.E. and Hodgkinson, R.A., 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK, *Journal of Hydrology* v. 252, p. 1–24.
- Schuller, P., Walling, D.E., Iroumé, A., Quilodrán, C., Castillo, A. and Navas, A., 2013. Using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb and other sediment source fingerprints to document suspended sediment sources in small forested catchments in south-central Chile, *Journal of environmental radioactivity*, v. 124, p. 147-159.
- Shaw, J.N., Truman, C.C. and Reeves, D.W., 2002. Mineralogy of eroded sediments derived from highly weather land Ultisol of central Alabama, *Soil and Tillage Research*, v. 68, p. 59-69.
- Small, I.S., Rowan, J.S. and Franks, S.W., 2002. Quantitative sediment fingerprinting using a Bayesian uncertainty estimation framework, In: Dyer, F.J., Thoms, M.C., Olley, J.M.(Eds.), *The structure, function and management implications of fluvial sedimentary systems*, International Association of Hydrological Sciences Publication, v. 276, IAHS Press, Wallingford, UK, p. 443–450.
- Smith, H.G. and Blake, W.H., 2014. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: a critical re-examination of source discrimination and data corrections, *Geomorphology*, v. 204, p. 177-191.
- Stone, M., Collins, A.L., Silins, U., Emelko, M.B. and Zhang, Y.S., 2014. The use of composite fingerprints to quantify sediment sources in a wildfire impacted landscape, Alberta, Canada. *Science of the Total Environment*, v. 473, p. 642–650.
- Walling, D.E., Collins, A.L., Jones, P.A., Leeks, G.J.L. and Old, G., 2006. Establishing fine-grained sediment budgets for the Pang and Lambourn LOCAR catchments, UK. *Journal of Hydrology*, v. 330, p. 126-141.
- Walling, D., 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of Total Environment*, v. 344, p. 159–184.
- Walling, D., 2013. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems, *Journal of Soils and Sediments*, v.13, p.1658–1675.
- Walling, D.E., Collins, A.L. and Stroud, R., 2008. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments, *Journal of Hydrology*, v. 350, p. 274-289.
- Walling, D.E., Owens, P.N. and Leeks, G.J.L., 1999. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, v. 13, p. 955–975.
- Walling, D.E., Woodward, J.C. and Nicholas, A.P., 1993. A multi-parameter approach to fingerprinting suspended sediment sources, In: Peters, N.E., Hoehn, E., Leibundgut, Ch., N.

- Tase and D.E. Walling (Editors), Tracers in Hydrology, IAHS Publ, v. 215, IAHS Press, Wallingford, p. 329-337.
- Wilkinson, S.N., Hancock, G.J., Bartley, R., Hawdon, A.A. and Keen, R.J., 2013. Using sediment tracing to assess processes and spatial patterns of erosion in grazed rangelands, Burdekin River basin, Australia, Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 180, p. 90-102.
- Woodward, J.C., Hamlin, R.H.B., Macklin, M.G., Karkanias, P. and kotjaboboulou, E., 2001. Quantitative sourcing of slack water deposits at Boila Rock shelter: a record of late glacial flooding and Paleolithic settlement the Pindus Mountains, northwest Greece, Geoarchaeology, v. 16, p. 501-536.
- Zhao, G., Mu, X., Han, M., An, Z., Gao, P., Sun, W. and Xu, W., 2017. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau, Catena, v. 149, p. 110-119.