نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
تابستان ۱۳۸۷، جلداول، شماره ۲، صفحه ۶۳ تا ۷۴

استفاده از روش منشأیابی در تعیین سهم واحدهای سنگ‌شناسی حوضه پلدشت در تولید رسوب

شاهرخ حکیم خانی*[۱]، حسن احمدی[۲]، جعفر غیومیان[۳]

دریافت مقاله : ۸۴/۱۰/۱۸ پذیرش مقاله : ۸۵/۱۲/۶

چکیده:

به دلیل وجود مشکلات زیاد در کاربرد روشهای سنتی، روش انگشت‌نگاری، ردیابی یا بعبارتی منشأیابی به عنوان روشی جایگزین و مناسب مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. در این روش، خصوصیات فیزیکی، ژئوشیمیایی و آلی رسوب و منابع رسوب برای تعیین منابع اصلی رسوب و اهمیت نسبی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش یاد شده با استفاده از ترکیبی مناسب از خصوصیات جدا کننده منابع رسوب، سهم منابع رسوب در تولید رسوب تعیین می‌شود. در این تحقیق، سعی شده است با بهره‌گیری از ترکیبی مناسب از عناصر ژئوشیمیایی که قادر به جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی در یکی از زیر حوضه‌های حوضه ایستگاه پخش سیلاب پلدشت واقع در شهرستان ماکو از استان آذربایجان غربی است سهم واحدهای یاد شده تعیین شود. بعد از برداشت ۱۰۶ نمونه معرف از واحدهای سنگ شناسی و ۶ نمونه رسوب از انتهای حوضه نسبت به تجزیه ۱۸ عنصر ژئوشیمیایی اقدام شد. با بهره‌گیری از روش تحلیل تشخیص، حدود ۱۲ عنصر از ۱۸ عنصر به عنوان ترکیب مناسب انتخاب شدند. در آخر با استفاده از ترکیب یاد شده و مدل‌های چند متغیره ترکیبی سهم واحدهای مارن، کنگلومرا، آهک و دولومیت، شیل و اسلیت و رسوبات کواترنری به ترتیب برابر با ۵۳/۹، ۲۹/۷۵، ۸/۸۵، ۷/۵ و ۰ درصد بدست آمد. میانگین خطای نسبی تقریبا برابر با ۱۷/۵ درصد و متوسط ضریب کارایی مدل حدود ۰/۹۹ است. روش منشأیابی رسوب به عنوان روشی با ارزش برای کسب اطلاعات از منابع رسوب تشخیص داده شد.

کلید واژه ها: *عناصر ژئوشیمیایی، منابع رسوب، واحدهای سنگ شناسی، پلدشت، تحلیل تشخیص، منشأیابی*

۱- استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه Hakimkhani@yahoo.com
۲- استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۳- استادیار پژوهشی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری
*مسئول مکاتبات

مقدمه

لازمه اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب، بدست آوردن اطلاعات از اهمیت نسبی منابع رسوب و سهم آنها در تولید رسوب و در نتیجه شناسایی مناطق بحرانی در داخل حوزه آبخیز است. اطلاعات متفاوتی از منابع رسوب متناسب با هدف مورد نیاز است. در بعضی از موارد ممکن است هدف تنها تعیین موقعیت مکانی منابع اصلی رسوب باشد. مثلا کدام واحد سنگ‌شناسی بیشترین رسوب را تولید می‌کنند یا زیر حوضه‌های فرسایش پذیر کدامند؟ در موارد دیگر ممکن است اهمیت نسبی و سهم نوع منبع رسوب مهم باشد. برای مثال آیا قسمت عمده رسوب از فرسایش ورقه‌ای و شیاری ناشی می‌شوند یا از فرسایش رودخانه‌ای، آبراهه‌ای و خندقی؟ و آیا منبع اصلی رسوب اراضی کشاورزی است یا سایر کاربری‌ها؟

از روشهای سنتی جمع‌آوری اطلاعات یاد شده در زمینه منابع رسوب می‌توان به پینها و پلاتهای فرسایشی، بررسیهای چشمی منابع رسوب از طریق عکسها و مشاهدات صحرایی (Collins & Walling, 2002)، اندازه‌گیری بار رسوبی در انتهای زیر حوزه‌های آبخیز اصلی برای تعیین اهمیت نسبی آنها در تولید رسوب (Walling & Woodward, 1995) اشاره کرد. اما کاربرد این روشها معمولا با مشکلات نمونه‌گیری مکانی و زمانی و تنگناهای اجرایی مواجه بوده و بعضی از آنها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارند (Collins & Walling, 2004 و Loughran & Campbell, 1995).

به دلیل وجود مشکلات زیاد در کاربرد روشهای سنتی، روش انگشت‌نگاری، ردیابی یا بعبارتی منشأیابی (Fingerprinting techniques) به عنوان روشی جایگزین و مناسب مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این روش، خصوصیات فیزیکی، ژئوشیمیایی و آلی رسوب و منابع رسوب برای تعیین منابع اصلی رسوب و اهمیت نسبی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Peart & Walling, 1988 و Collins & Walling, 2004 و Walling, 2005). در طول بیش از دو دهه گذشته و از زمان کارهای اولیه نظیر تحقیقات (Oldfield et al,. 1979)، (Walling et al., 1979) و (Wilding, 1976) کارآیی روش منشأیابی به عنوان روشی موفق و مؤثر برای تعیین منابع رسوب به اثبات رسیده‌است. مهمترین اصل این روش این است که منابع مختلف رسوب با استفاده از تعدادی از خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و آلی قابل شناسایی بوده و با مقایسه این خصوصیات با همان خصوصیات در نمونه‌های رسوب می‌توان سهم و اهمیت نسبی منابع رسوب را در تولید رسوب به‌دست آورد. این روش فاقد بسیاری از مشکلات روش‌های سنتی است. از مهمترین این مزایا می‌توان به سرعت زیاد و اقتصادی بودن آن اشاره کرد. یعنی این روش تنها نیاز به جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل نمونه‌های رسوب و خاک منابع مختلف به جای پایش درازمدت و گرانقیمت فرسایش و حمل رسوب دارد. روش یاد شده در تعیین سهم و اهمیت نسبی نوع منابع رسوب از جمله انواع کاربریها، فرسایشهای سطحی و زیر سطحی (رودخانه‌ای و خندقی) (Walden et al., 1997)، منابع مکانی از جمله واحدهای سنگ‌شناسی (Walling et al., 1999) یا زیرحوضه‌ها (Bottrill et al., 2000 و عطاپور و حکیم خانی، ۱۳۸۲) و ترکیبی از تمام منابع (Walling et al., 1999) موفقیت‌های زیادی داشته‌است.

در مطالعات امروزی از روش منشأیابی مرکب و کمی استفاده می‌شود. به این نحو که ابتدا ترکیبی از خصوصیات منشأیاب انتخاب شده و سپس با استفاده از روشهای آماری، ترکیبی بهینه از ترکیب اولیه که قادر به جداسازی دقیق منابع رسوب باشند استخراج می‌شود. در نهایت این خصوصیات برای تعیین سهم نسبی هر یک از منابع رسوب با استفاده از مدلهای ترکیبی چند متغیره بکار برده می‌شوند.

تاکنون خصوصیاتی نظیر کانی شناسی (Garrad & Hey, 1989 و Wall & Wilding, 1976 و عطاپور و حکیم خانی، ۱۳۸۲)، رنگ خاک و رسوب (Grimshaw & Lewin, 1980)، خصوصیات مغناطیسی (Oldfield et al., 1979 ; Yu & Oldfield, 1993 و Walden et al., 1997)، عناصر ژئوشیمیایی (Wall & Wilding, 1976 ; Foster & Walling, 1994 ; 2002، Collins & Walling و امیری و همکاران، ۱۳۸۱)، موادآلی (Peart & Walling, 1988)، عناصر

رادیواکتیو (Wallbrink et al., 1998 ; Walling & Woodward, 1995) و اندازه ذرات (Stone & Sanderson, 1992) در منشأیابی رسوبات بکار رفته‌اند. از میان خصوصیات یاد شده، عناصر ژئوشیمیایی منعکس کننده و شاخص منابع مکانی از جمله واحدهای سنگ‌شناسی می‌باشند (Walling & Collins, 2000) و در بسیاری از مطالعات (Wall & Wilding, 1976 ; Foster & Walling, 1994 و Collins & Walling, 2002) برای تفکیک و جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی به کار رفته‌اند. بنابراین از عناصر یاد شده می‌توان برای منشأیابی و تعیین سهم و اهمیت نسبی واحدهای سنگ‌شناسی در رسوبدهی استفاده نمود. در ایران تحقیقی در خصوص روش مرکب و کمی انجام نشده و کارایی آن در تعیین سهم منابع رسوب در تولید رسوب بررسی نشده‌است. در این تحقیق با استفاده از ترکیبی مناسب ازعناصر ژئوشیمیایی که توسط (حکیم خانی و همکاران، ۱۳۸۵) انتخاب شده‌است و به کارگیری مدلهای ترکیبی چند متغیره، سهم و اهمیت نسبی هر یک از واحدهای سنگ‌شناسی در تولید رسوب در یکی از زیرحوضه‌های حوضه ایستگاه پخش سیلاب پلدشت واقع در شهرستان ماکو از استان آذربایجان غربی تعیین شده‌است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و سنگ‌شناسی آن

منطقه مورد مطالعه از حوزه های آبخیز مشرف به سد ارس و در جنوب بخش پلدشت از توابع شهرستان ماکو در استان آذربایجان غربی قرار دارد. این حوضه یکی از دو زیر حوضه ایستگاه پخش سیلاب پلدشت و در محدوده ″۲۴′۴۷°۴۴ تا ″۵۱′۵۹°۴۴ طول شرقی و ″۲۱′۰۰°۳۹ تا ″۲۷′۱۱°۳۹ عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه حدود ۹۷ کیلومتر مربع است. کاربریهای موجود در منطقه شامل مرتع، زراعت دیم و آبی و باغ می باشند. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۲۲۳ میلیمتر گزارش شده‌است. مشخصات سنگ شناسی در جدول ۱ ارایه شده است. واحدهای سنگ شناسی حوضه در پنج گروه به نام های آهک و دولومیت (گروه یک)، شیل و اسلیت (گروه دو)، کنگلومرا (گروه سه)، مارن (گروه چهار) و رسوبات کواترنری (گروه پنج) طبقه‌بندی شدند. درصد مساحت تحت پوشش آنها به ترتیب یاد شده شامل ۱۰/۶۴، ۴/۶۹، ۳۲/۵، ۱۹/۳ و ۳۲/۸۶ درصد است. شکل ۱ نقشه سنگ‌شناسی حوضه براساس طبقه‌بندی یاد شده را نشان می‌دهد. نقشه زمین‌شناسی حوضه‌های مشرف به سد ارس (مقیاس ۱:۵۰۰۰۰) پس از تدقیق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ETM^+، عکس‌های هوایی و بازدیدهای صحرایی جهت تهیه نقشه سنگ‌شناسی مورد استفاده قرار گرفت.

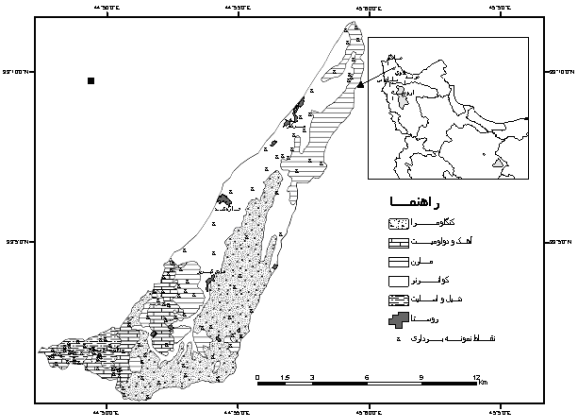
جدول ۱- سنگ شناسی منطقه مورد مطالعه

دوره	واحد چینه‌شناسی	سنگ شناسی	درصدنسبت به سطح حوضه
کواترنر	Q_{al}	رسوبات رودخانه‌ای جدید	۰/۵۱
	Q_f	مخروط افکنه‌های جدید	۴/۱۴
	Q_t	تراسهای آبرفتی قدیم	۲۸/۲۱
	t	تراورتن	۰/۱۳
	QPL	کنگلومرا	۳۲/۵
ترشیری (اولیگو-میوسن)	OMs	مارن	۱۹/۳
	OMq^2	آهک	۲/۴
تریاس	UT	آهک و دولومیت	۸/۱۱
	LT	شیل و اسلیت	۴/۶۹

نمونه برداری و تجزیه آزمایشگاهی

نمونه‌های معرف خاک از تغییرات هر یک از گروه‌های سنگ‌شناسی شامل تغییرات کاربری، فرسایش‌های زیرسطحی (آبراهه، خندق و رودخانه) و شیب برداشته شده‌است. از هر یک از گروه‌ها حدود ۲۱ عدد (از واحد شیل و اسلیت ۲۲ نمونه) و در مجموع ۱۰۶ نمونه جمع‌آوری گردید. پراکنش نقاط نمونه‌برداری در (شکل ۱) مشاهده می-شود. نمونه‌های خاک سطحی از عمق ۵-۰ سانتیمتری و در صورت وجود فرسایش خندقی، آبراهه‌ای و رودخانه‌ای، از کناره‌های در حال فرسایش به مقدار کافی (تقریبا دو کیلوگرم) و بوسیله یک بیلچه استیل برداشت شده‌است. عمق نمونه‌برداری برای

نمونه‌های خاک سطحی به این دلیل انتخاب شده است که غلظت ردیاب‌های مختلف در عمق یاد شده می‌تواند نشان دهنده فرسایش‌های ورقه‌ای و شیاری باشد. برای جلوگیری از مخلوط شدن نمونه‌ها، بیلچه استیل بعد از هر بار نمونه‌برداری تمیز شده است. تعداد ۶ نمونه نیز از رسوبات نهشته شده در بستر و کناره‌های رودخانه در خروجی حوضه برداشت جمع آوری گردید. نمونه‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه در هوای آزاد و دمای اتاق خشک شده (برای جلوگیری از تغییرات شیمیایی احتمالی که ممکن است در دمای بالاتر اتفاق بیفتد) و سپس برای شکستن خاکدانه‌های احتمالی از یک هاون استفاده شد. در خاتمه برای جدا کردن بخش زیر ۶۳ میکرون از الک مربوطه استفاده شده و از این بخش برای اندازه‌گیری ردیاب-های انتخابی در مرحله بعد استفاده به عمل آمد. علت استفاده از این بخش، اهمیت زیاد رسوبات ریزدانه در جذب و حمل قسمت اعظم عناصر ردیاب است.



شکل ۱- نقشه سنگ‌شناسی حوضه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری

در این تحقیق ۱۸ عنصر ژئوشیمیایی شامل As، Cd، Co، Cr، Cu، Ni، Pb، Sb، Sn، Sr، Zn، Fe، Al، Mn، K، Na، Ca و Mg که در مطالعات گذشته به عنوان ردیاب مورد استفاده قرار گرفته اند انتخاب شده اند. تجزیه آزمایشگاهی و تعیین غلظت عناصر یاد شده با استفاده ار ترکیبی از دو روش ICP- MS (Inductively coupled plasma mass spectrometry) و ICP- AES (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry) و هضم توسط چهار اسید (HF، HNO_3، $HCLO_3$ و HCL) انجام شده‌است.

روش منشأیابی مرکب و کمی

این روش در دو مرحله به شرح زیر انجام می شود:

۱- تعیین ترکیب بهینه از ردیابها که قادر به تفکیک منابع رسوب باشد:

یک روش آماری دو مرحله‌ای برای انتخاب ترکیب بهینه از ردیابها به کار می‌رود. در مرحله اول به منظور بررسی بیشتر و نیز تائید مرحله دوم از آزمونهای مقایسه میانگین‌ها، برای بررسی توان و قدرت هر یک از ردیابها (عناصر ژئو شیمیایی) در تفکیک منابع رسوب استفاده می‌شود. در صورت نرمال بودن خصوصیات منشأیاب می‌توان از آزمونهای پارامتری نظیر آزمون تجزیه واریانس یک طرفه و در صورت عدم تبعیت از توزیع نرمال از آزمونهای غیرپارامتری از جمله آزمون Kruskal-Wallis H استفاده کرد (Collins et al., 2001). اگر مقادیر هر یک از آماره‌ها (مثلا آماره F برای آزمون تجزیه واریانس یک طرفه، H برایآزمون Kruskal-Wallis) برای هر کدام از خصوصیات بیشتر از مقادیر بحرانی آماره‌ها یا آماره جدول باشد، توانایی خصوصیات مربوطه در جداسازی منابع رسوب تأیید می‌شود. در منشأیابی مرکب و کمی، بهتر است برای کاهش تعداد متغیرهایی که در مرحله بعد (یعنی تعیین سهم منابع رسوب با استفاده از مدلهای ترکیبی چند متغیر) تعیین می‌شوند تعداد خصوصیات ترکیب انتخابی کاهش یابد (Rowan et al., 2000 و Foster & Lees, 2000). لذا این کار در مرحله دوم، با استفاده از تحلیل تشخیص (Discriminant analysis) گام به گام و با بکارگیری تمام ردیاب‌ها انجام می‌شود و ترکیبی مناسب از ردیابها که به طور جمعی قادر به تفکیک منابع رسوب باشند. انتخاب می‌شوند. این مرحله توسط حکیم‌خانی و همکاران (۱۳۸۵) انجام شده‌است.

۲- استفاده از مدلهای چند متغیره ترکیبی برای تعیین سهم نسبی هر یک از منابع رسوب

روش مدل های ترکیبی چند متغیره بیش از سایر روشها برای تعیین سهم منابع رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرد (Walling et al., 1999 ; Walling & Collins, 1995 ; Woodward, 2000 ; Owens et al., 2001 ; Walling, 2005 ; Bottrill et al., 2000 و Walden et al, 1997). در مدلهای یاد شده از برنامه‌نویسی خطی برای حل تعدادی از معادلات استفاده می‌شود (Yu & Oldfield, 1993 ; Rowan et al., 2000 و Foster & Lees, 2000). در این مدلها فرض بر این است که ترکیب و مخطوط شدن خصوصیات منشأیاب از منابع (منشأهای) مختلف به صورت خطی است (Foster & Lees, 2000) از این رو می‌توان مدل یا معادله ترکیبی را برای هر یک از خصوصیات منشأیاب به صورت زیر نوشت:

$$\hat{X}_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} b_j \qquad (۱)$$

در این معادله $\hat{X}_i$؛ برابر با مقدار برآوردی ردیاب i ام (m و ... و ۲ و ۱= i)، a_{ij} ؛ مقدار میانگین ردیاب i ام در منبع رسوب j ام (n و ... و ۲ و ۱= J)، b_j ؛ سهم منبع رسوب j ام، n؛ تعداد منابع رسوب (واحدهای کاری) و m؛ تعداد خصوصیات ردیاب است.

برای هر یک از خصوصیات منشأیاب، معادله(۱) تکرار می‌شود و بنابراین به تعداد خصوصیات، معادله وجود خواهد داشت و مدل چند متغیره ترکیبی با تعدادی معادله مشخص خواهد شد. با حل این معادلات می‌توان سهم هر یک از منابع مختلف رسوب را بدست آورد.

چون مجموعه معادلات یاد شده دارای مجهولات زیادی بوده و راه حلهای متنوعی می‌تواند داشته باشد از اینرو برای بدست آوردن نتایج بهینه در تعیین سهم منابع رسوب و به جای حل مستقیم از روشهای بهینه سازی استفاده می‌شود. در مطالعات منشأیابی، روشهایی از جمله حداقل کردن مجموع مربعات باقیمانده و حداقل کردن مجموع خطاهای نسبی برای بدست آوردن نتایج یا سهم بهینه منابع رسوب استفاده می‌شود (Walling & Collins, 2000). در این تحقیق از روش حداقل کردن مجموع مربعات باقیمانده بصورت زیر استفاده شد:

$$R = \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{X_i - \left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij} b_j z_j \right)}{X_i} \right)^2 w_i \qquad (۲)$$

R؛ مجموع مربعات باقیمانده و X_i؛ مقدار اندازه‌گیری شده ردیاب i ام در نمونه رسوب، w_i؛ ضریب وزنی ویژه ردیاب i ام، z_j؛ ضریب اصلاحی اندازه ذرات برای منبع رسوب j ام می‌باشند.

جوابهای منایب برای سهم منابع رسوب به روش بهینه‌سازی خطی و با حداقل کردن معادله(۲) با استفاده از عملیات تکرار و با در نظر گرفتن دو شرط زیر بدست آمد. با به حداقل رسیدن R معادلات حل شده و سهم هرکدام از منابع رسوب برای نمونه رسوب مورد نظر بدست می‌آید. این کار را برای تمام نمونه‌های رسوب انجام داده و از مقادیر سهم هریک از منابع رسوب برای بدست آوردن سهم متوسط میانگین‌گیری شد. با تعیین سهم منابع رسوب، سهم واحدهای سنگ شناسی در تولید رسوب مشخص شد.

الف- مقادیر ضریب سهم هر یک از منابع رسوب باید بین صفر و یک باشد

$$۰ \le b_j \le ۱ \qquad (۳)$$

ب- مجموع ضرائب سهم هر یک از منابع رسوب باید برابر با یک باشد:

$$\sum_{j=۱}^{n} b_j = ۱ \qquad (۴)$$

معادله (۲) با در گرفتن دو شرط فوق (معادله های ۳ و ۴) به روش بهینه سازی خطی و با استفاده از ابزارSolver در محیط EXCEL حل شد.

تعیین ضریب تصحیح اندازه ذرات (z_j)

طبیعت انتخابی فرآیندهای فرسایش و انتقال رسوب باعث غنی شدن یا تهی شدن رسوب از نظر بعضی از اندازه ها می‌شود. در اثر این فرآیند توزیع اندازه ذرات نمونه‌های رسوب و خاک منشأ متفاوت خواهد بود. تحقیقات ثابت کرده است که اندازه ذرات نقش زیادی در میزان خصوصیات

منشأیاب از جمله خصوصیات کانی‌شناسی (Wall & Wilding, 1976)، خصوصیات مغناطیسی (Yu & Oldfield, 1993 و Foster & Lees, 2000)، عناصر رادیواکتیو (He & Wallbrink et al., ; He & Owens, 1995 ; Walling, 1996 1998) و عناصر ژئوشیمیایی (Horowitz & Elrick, 1987) موجود در رسوب و خاک دارد، بنابراین مقایسه بین خصوصیات خاک منابع رسوب و نمونه‌های رسوب که از نظر اندازه ذرات اختلاف دارند صحیح نخواهد بود. جهت رفع این عیب و فراهم آوردن امکان مقایسه مستقیم بین نمونه های رسوب و نمونه های خاک باید از روشهای اصلاحی استفاده شود. بعضی از محققان (مانند Collins et al., 1997 & 2001 ; Walling et al., 1999 و Owens et al., 2000) با این استدلال که خصوصیات منشأیاب به یک اندازه تحت تاثیر فرآیند غنی شدن یا تهی شدن قرار می‌گیرند و به دلیل نقش زیاد پارامتر سطح ویژه در میزان خصوصیات منشأیاب و انعکاس ترکیب اندازه ذرات از نسبت سطح ویژه هر یک از نمونه‌های رسوب به متوسط سطح ویژه نمونه‌های خاک هر یک از منابع رسوب برای اصلاح خصوصیات منشأیاب منابع رسوب بهره گرفته‌اند:

$$z_j = \frac{S_s}{S_j} \qquad (۵)$$

S_s؛ سطح ویژه متوسط نمونه رسوب و S_j؛ سطح ویژه متوسط نمونه‌های خاک منبع رسوب jام می باشند.

سطح ویژه متوسط نمونه‌های خاک و رسوب از روی ترکیب اندازه ذرات برآورد شد. برای ذرات سیلت با فرض کروی بودن دانه‌ها و برای رس با فرض صفحه‌ای و پولکی بودن دانه‌ها، سطح ویژه به ترتیب از نسبت‌های $\frac{۶}{\rho_p d}$ و $\frac{(۴ + ۲d / h)}{\rho_p d}$ تعیین شد (Skopp, 2000). پارامترهای ρ_p، d و h به ترتیب برابر با وزن مخصوص حقیقی(۲/۶۵ سانتیمتر مربع برگرم)، قطر ذرات و ضخامت ذره رس می‌باشند. از آنجا که ضخامت رس نسبت به طول آن بسیار کوچک است، لذا در اینجا نسبت d/h برابر با ده در نظر گرفته شد.

اندازه گیری ضریب وزنی ویژه هر یک از ردیابها (w_i)

ردیاب‌هایی که دقت اندازه‌گیری آنها بالا است باید تأثیر بیشتری در برآورد مدل‌های ترکیبی چند متغیره داشته باشند. برای وزن دادن به ردیاب‌ها بر اساس دقت اندازه‌گیری آنها، از یک ضریب وزنی ویژه (w_i) استفاده می‌شود (Collins et al., 2001 و Walling, 2005). برای محاسبه آن، ابتدا هر یک از ردیابها با چند تکرار در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و مقادیر حاصل با تقسیم شدن بر میانگین خود استاندارد می‌شوند. سپس ضریب وزنی ویژه (w_i) هریک از ردیاب‌ها با محاسبه عکس ریشه دوم واریانس داده‌های استاندارد شده همان ردیاب‌ها بدست می‌آید. با اعمال این ضریب در مدل‌های چند متغیره ترکیبی، تأثیر هر یک از ردیاب‌ها در نتایج این مدل بر اساس دقت اندازه‌گیری آنها خواهد بود. عمل استاندارد کردن جهت فراهم آوردن امکان مقایسه مستقیم ضریب وزنی هر یک از ردیاب‌ها انجام می‌گیرد. برای محاسبه آن، اندازه‌گیری هر یک از ردیاب‌ها پنج بار تکرار شده‌است. با تعیین سهم منابع رسوب، سهم واحدهای سنگ‌شناسی در تولید رسوب مشخص شد.

ارزیابی نتایج مدل چند متغیره ترکیبی

نتایج به روشهای زیر ارزیابی خواهد شد:

- خطای نسبی

معیارهای خطای نسبی را می‌توان برای هر ردیاب، ترکیب ردیابها برای هر یک از نمونه‌های رسوب و کل نمونه‌ها با استفاده از مقادیر برآورد ردیابهای یاد شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده آنها در نمونه‌های رسوب محاسبه کرد.

- ضریب کارایی مدل

ضریب کارایی مدل (Model Efficiency) را نیز می‌توان با استفاده از معادله (۶) که توسط (Nash & Sutcliffe, 1970) ارایه شده محاسبه کرد:

$$ME = ۱ - \frac{\sum_{i=۱}^{m}(X_i - \hat{X}_i)^۲}{\sum_{i=۱}^{m}(X_i - \overline{X}_i)^۲} \quad (۶)$$

ME؛ ضریب کارایی مدل و $\overline{X}_i$؛ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده ردیاب i ام برای تمام نمونه‌های رسوب است. سایر پارامترها قبلاً توضیح داده شده‌اند. مقادیر نزدیک به یک بیانگر کارایی خوب مدل خواهد بود. عدد صفر برای ضریب یاد شده به این معنی است که مدل بدست آمده، برآوردی بهتر از میانگین مشاهدات ردیاب‌ها ندارد.

– بررسی‌ها و مشاهدات صحرایی. به این روش نیز می‌توان تا حدودی به صورت کیفی در مورد کارایی مدل‌های یاد شده اظهار نظر کرد (Collins et al., 2001).

نتایج

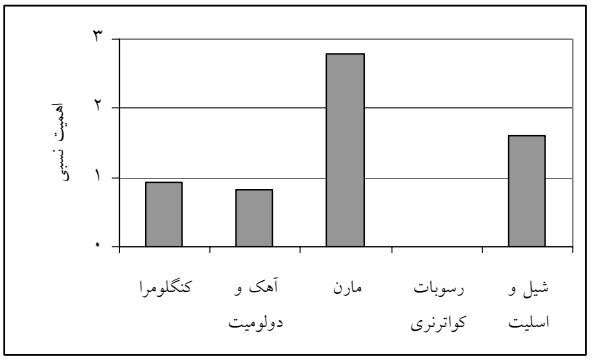
همان‌طور که بیان شد مرحله اول روش منشأیابی مرکب و کمی در حوضه مورد مطالعه بررسی و ترکیب مناسبی از ردیاب‌ها انتخاب شد. در مرحله یاد شده امکان وجود داده‌های نامربوط و فرضهای تحلیل تشخیص (نرمال چند متغیره، برابری ماتریس‌های کواریانس و عدم وجود هم خطی چندگانه قوی بین متغیرها) نیز بررسی شده است. برای بررسی توان جداسازی هر یک از ردیاب‌ها، به علت عدم تبعیت بیشتر عناصر از توزیع نرمال، آزمون Kruskal – Wallis مناسب‌تر از آزمون تجزیه واریانس یک طرفه است. ولی برای بررسی بیشتر از هر دو آزمون استفاده شده است. همان طورکه جدول۲ نشان می‌دهد از نظر آزمون Kruskal – Wallis اختلاف میانگین‌های هریک از عناصر در واحدهای سنگ‌شناسی در سطح کمتر از دو درصد معنی‌دار است که بیانگر این مطلب است که تمام عناصر انتخابی دارای قدرت تفکیک و جداسازی واحدهای یاد شده می‌باشند. به عبارت دیگر، میانگین غلظت هر یک از عناصر حداقل در یکی از واحدها (گروه‌ها) متفاوت از واحدهای دیگر است. آزمون تجزیه واریانس یک طرفه نیز نتایج آزمون Kruskal – Wallis را به غیر از دو مورد (*As* و *Sr*) تایید می‌کند. کاربرد آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه برای دو عنصر یاد شده نیز بعلت عدم تبعیت آنها از توزیع نرمال، صحیح نیست.

جدول ۳ مراحل مختلف اضافه شدن عناصر ردیاب در توابع تشخیص به روش گام به گام و تأثیر آنها بر توان جداسازی تحلیل تشخیص را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول یاد شده ملاحظه می‌شود با اضافه شدن هر عنصر مقدار مربع فاصله ماهالانوبیس افزایش، Wilks' Lambda کاهش و درصد تجمعی طبقه‌بندی درست نمونه‌ها افزایش یافته و سطح معنی‌داری بهتر شده است و در نتیجه توان جداسازی تحلیل و میزان تفکیک بین گروه‌ها افزایش یافته است. عنصر Al اولین و Pb آخرین متغیرهای ورودی هستند. در نتیجه ترکیب مناسبی از عناصر که قادر به جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی باشند متشکل از ۱۲ عنصر موجود در جدول۳ هستند. سه عنصر As، Cd و Sr به ترتیب با داشتن سطح معنی‌داری آماره F برای ورود ۰/۳۶۳، ۰/۰۷۷ و ۰/۸۴۴ و به علت نداشتن توان جداسازی کافی حذف شدند.

جدول ۴ ضرایب تصحیح اندازه ذرات (z_j) را برای هر یک از نمونه‌های رسوب نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود ضرایب یاد شده برای همه نمونه‌های رسوب و برای تمام واحدهای سنگ‌شناسی کوچکتر از یک می‌باشند که بیانگر غنی شدن ذرات رسوب از نظر ذرات درشت‌تر و تهی شدن از نظر ذرات ریزتر است. مقادیر ضرایب از ۰/۴۶ تا ۰/۹۹ متغیر است. از آنجا که ترکیب اندازه ذرات خاک و رسوب و به خصوص ذرات ریزتر نقش زیادی در غلظت عناصر دارند (Horowitz & Elrick, 1987)، عدم اصلاح اختلاف‌های موجود بین ترکیب اندازه ذرات نمونه‌های رسوب و نمونه‌های منابع رسوب مقایسه مستقیم نمونه‌های یاد شده را با مشکل مواجه خواهد ساخت.

ضرایب وزنی ویژه عناصر انتخابی در جدول ۵ مشاهده می‌شود. همان‌طور که گفته شد، ضریب وزنی ویژه (w_i) جهت لحاظ دقت اندازه‌گیری‌های هر یک از ردیاب‌ها در برآورد سهم منابع رسوب محاسبه می‌شود. برای تعیین ضرایب یاد شده، اندازه‌گیری‌ها پنج بار تکرار شده‌اند. این

ضرایب نشان دهنده دقت اندازه‌گیری هر یک از ردیاب‌ها بوده و مقادیر بزرگتر بیانگر دقت بیشتری است. مقادیر ضرایب در جدول یاد شده از ۰/۱۲ (Co و Sb) تا ۰/۳۵(Na) متغیر هستند.



شکل ۲- اهمیت نسبی واحدهای سنگ‌شناسی

جدول ۲- آزمون های بررسی توان عناصر در جداسازی واحدهای سنگ شناسی

عنصر	تجزیه واریانس یک طرفه		*Kruskal - Wallis*		عنصر	تجزیه واریانس یک طرفه		*Kruskal - Wallis*	
	آماره *F*	سطح معنی داری	آماره *H*	سطح معنی داری		آماره *F*	سطح معنی داری	آماره *H*	سطح معنی داری
Al	۵/۵۷	۰/۰۰۰	۱۸/۹۷	۰/۰۰۱	Mg	۳۷/۴۸	۰/۰۰۰	۵۵/۴۷	۰/۰۰۰
As	۱/۴۷	۰/۲۱۷	۳۵/۰۳	۰/۰۰۰	Mn	۹/۴۱	۰/۰۰۰	۲۵/۶۹	۰/۰۰۰
Ca	۴/۸۵	۰/۰۰۱	۱۱/۵۰	۰/۰۲۱	Na	۱۴/۲۷	۰/۰۰۰	۴۱/۹۸	۰/۰۰۰
Cd	۵/۷۲	۰/۰۰۰	۱۸/۲۷	۰/۰۰۱	Ni	۵۲/۷۷	۰/۰۰۰	۸۲/۹۱	۰/۰۰۰
Co	۱۹/۱۳	۰/۰۰۰	۵۷/۵۵	۰/۰۰۰	Pb	۶/۱۰	۰/۰۰۰	۱۹/۷۳	۰/۰۰۱
Cr	۲۵/۲۲	۰/۰۰۰	۵۸/۳۱	۰/۰۰۰	Sb	۲۵/۰۹	۰/۰۰۰	۵۱/۹۸	۰/۰۰۰
Cu	۱۶/۹۰	۰/۰۰۰	۴۹/۳۳	۰/۰۰۰	Sn	۲۴/۵۸	۰/۰۰۰	۴۶/۸۷	۰/۰۰۰
Fe	۸/۴۳	۰/۰۰۰	۲۷/۱۹	۰/۰۰۰	Sr	۱/۴۶	۰/۲۲۰	۱۲/۰۵	۰/۰۱۷
K	۹/۲۸	۰/۰۰۰	۲۹/۱۸	۰/۰۰۰	Zn	۳/۵۳	۰/۰۱۰	۱۵/۷۸	۰/۰۰۳

جدول ۳- گام های مختلف ورود عناصر به مدل و تأثیر آنها بر توان جداسازی تحلیل تشخیص

گام	اضافه شدن عنصر ردیاب	حداقل مربع فاصله ماهالانوبیس	*Wilks' Lambda*	سطح معنی داری *F*	درصد تجمعی طبقه‌بندی درست نمونه‌ها
۱	Al	۰/۰۵	۰/۸۱۹	۰/۴۶۰	۳۵/۸
۲	Sb	۰/۳۵	۰/۲۸۰	۰/۱۶۴	۵۶/۶
۳	Zn	۱/۰۹	۰/۱۹۶	۰/۰۱۴	۶۴/۲
۴	K	۲/۲۴	۰/۱۳۹	۰/۰۰۰	۷۲/۶
۵	Ni	۳/۶۴	۰/۰۸۵	۰/۰۰۰	۷۷/۱
۶	Mn	۴/۱۹	۰/۰۷۴	۰/۰۰۰	۷۹/۲
۷	Cu	۴/۷۲	۰/۰۶۱	۰/۰۰۰	۸۱/۱
۸	Co	۵/۲۸	۰/۰۵۳	۰/۰۰۰	۸۲/۱
۹	Cr	۵/۷۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰	۸۳
۱۰	Na	۶/۰۶	۰/۰۳۰	۰/۰۰۰	۸۴/۹
۱۱	Mg	۶/۷۶	۰/۰۲۰	۰/۰۰۰	۸۶/۸
۱۲	Pb	۷/۳۹	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰	۸۷/۷

جدول ۴- ضرایب تصحیح اندازه ذرات

واحدهای سنگ شناسی / شماره نمونه‌های رسوب	کنگلومرا	آهک و دولومیت	مارن	رسوبات کواترنری	شیل و اسلیت
۹۸	۰/۹۹	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۹
۱۰۲	۰/۸۰	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۸۰
۱۰۳	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۷۷
۱۲۸	۰/۴۶	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۴۸
۱۲۹	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۵۳
۱۳۰	۰/۷۱	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۷۴	۰/۷۵

جدول ۵- ضرایب وزنی ویژه عناصر

عنصر	Al	Co	Cr	Cu	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Sb	Zn
ضریب وزنی ویژه (w_i)	۰/۳۱	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۲۸	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۲۸

با به حداقل رساندن معادله(۳) برای هریک از نمونه‌های رسوب و متوسط‌گیری از مقادیر حاصل، سهم واحدهای سنگ‌شناسی کنگلومرا، آهک و دولومیت، مارن، رسوبات کواترنری و اسیت و شیل بدست آمد. مارن بیشترین سهم (۵۳/۹ درصد) و رسوبات کواترنری (صفر درصد) کمترین سهم را در تولید رسوب حوضه مرگن دارند و واحدهای کنگلومرا (۲۹/۷۵ درصد)، آهک و دولومیت (۸/۸۵ درصد) و شیل و اسلیت (۷/۵ درصد) بعد از مارن به ترتیب در رده‌های بعدی قرار دارند. رتبه‌بندی یاد شده براساس سهم کل بوده و در آن مساحت تحت پوشش هر یک از واحدها منظور نشده-است. بر اساس سهم کل، نمی‌توان در مورد فرسایش‌پذیری یا اهمیت نسبی واحدهای سنگ‌شناسی موجود در تولید رسوب اظهار نظر کرده و آنها را با هم مقایسه کرد. برای این کار، سهم کل واحدها بر مساحت تحت پوشش آنها (برحسب درصد) تقسیم شد که نتایج در (شکل ۲) مشاهده می‌شود. براساس شکل یاد شده رسوبات کواترنری(۰)، آهک و دولومیت(۰/۸۳)، کنگلومرا(۰/۹۲)، شیل و اسلیت(۱/۶۰) و مارن(۲/۷۹) به ترتیب بیشترین اهمیت نسبی را در تولید رسوب حوضه دارند. مارن و رسوبات کواترنری به ترتیب بیشترین و کمترین اهمیت نسبی را از نظر تولید رسوب دارند. نتایج اهمیت نسبی با حساسیت واحدهای یاد شده (فیض‌نیا، ۱۳۷۴) تقریبا مطابقت دارند. مورد استثناء رسوبات کواترنری می‌باشد و علت آن به شیب واحد یاد شده برمی‌گردد، به طوری که شیب واحد رسوبات کواترنری بسیار کم است. بیش از ۸۵ و ۹۶ درصد از مناطق تحت پوشش این رسوبات به ترتیب دارای شیبی کمتر از ۵ و ۱۲ درصد است. بنابراین شیب کم عامل اصلی کاهش رسوبدهی و اهمیت نسبی رسوبات کواترنری است. در ضمن آثار فرسایش در آن بسیار کم بوده و بیشتر زمین‌های کشاورزی و باغات خوب بر روی آن قرار دارند.

خطای نسبی مدل چند متغیره مورد استفاده برای برآورد سهم منابع رسوب برای هر یک از نمونه‌های رسوب از ۲/۷ تا ۳۰ درصد و برای تمام نمونه‌ها ۱/۴۵ تا ۲۵/۵۶ درصد متغیر است. میانگین خطای نسبی برای تمام نمونه‌ها تقریبا برابر با ۱۵/۵ درصد بدست آمد. متوسط ضریب کارایی مدل حدود ۰/۹۹۹ است. خطای نسبی کم و ضریب کارایی بالای مدل بیانگر صحت و کارایی مناسب آن است. مشاهدات صحرایی نیز نتایج بدست آمده و صحت و عملکرد مناسب مدل را تایید می کند.

بحث

در این تحقیق بررسی‌ها نشان داد که توان همه ۱۸ عنصر مورد استفاده در جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی حوضه مورد مطالعه از نظر آزمون Kruskal – Wallis و در سطح کمتر از ۵ درصد معنی‌دار بوده و این عناصر به عنوان ردیاب قادر به جداسازی واحدهای یاد شده هستند. مناسب‌ترین ترکیب از ۱۸ عنصر مورد مطالعه نیز که بیشترین قدرت تفکیک را دارا بوده و با استفاده از تحلیل تشخیص به دست آمده است، شامل ۱۲ عنصر (Al، Sb، Zn، K، Ni، Mn، Cu، Co، Cr، Na، Mg و Pb) می‌باشند. سه عنصر As، Cd و Sr به ترتیب با داشتن سطح معنی‌داری آماره F برای ورود ۰/۳۶۳، ۰/۰۷۷ و ۰/۸۴۴ و به علت نداشتن توان جداسازی کافی حذف شدند.

مارن‌های موجود در حوضه از دوره نئوژن و از نوع الوان و معادل سازند قرمز فوقانی بوده و املاح نمک و گچ فراوانی دارند. این مارن‌ها بیشتر به صورت تپه ماهورهایی هستند که فاقد پوشش گیاهی بوده و آثار فرسایش‌های سطحی، شیاری و خندقی شدیدی در آنها دیده می‌شود. شیل و اسلیت که در بالادست حوضه گسترش دارد دارای فرسایش‌های شدید سطحی، شیاری و آبراهه‌ای بسیار فعال می باشد، به طوری که در روی آن آبراهه‌های بسیار عمیقی با دیواره‌های تقریبا عمودی دیده می‌شوند. واحد کنگلومرا دارای شدت فرسایش متوسط و مناطق کم شیب جهت رسوب‌گذاری است و بر روی آن انواع فرسایش‌های ورقه‌ای، شیاری و آبراهه‌ای کم و بیش فعال دیده می‌شود. واحد آهک و دولومیت شیب زیادی دارد و در ضمن آثار فرسایش‌های سطحی، شیاری و آبراهه‌ای و فرسایش انحلالی در آن دیده می‌شود. واحد رسوبات کواترنری (همان‌طور که قبلا ذکر شد) دارای شیب بسیار کم بوده و آثار فرسایش در آن بسیار کم دیده می‌شود و در ضمن بیشتر زمینهای کشاورزی و باغات بر روی آن قرار دارد.

در کل روش منشأیابی مرکب و کمی قادر به تعیین و تفکیک مناسب سهم واحدهای سنگ‌شناسی در زیرحوضه اصلی (مرگن) حوضه ایستگاه پخش سیلاب پلدشت است و نشان داده شد کارایی بالایی در این زمینه دارد. سهم واحدهای سنگ‌شناسی مارن، کنگلومرا، آهک و دولومیت، شیل و اسلیت و رسوبات کواترنری به ترتیب برابر با ۵۳/۹، ۲۹/۷۵، ۸/۸۵، ۷/۵ و ۰ درصد بدست آمد. بنابراین با هدایت طرح‌های حفاظت خاک به مناطق مارنی می‌توان بیش از ۵۰ درصد از تولید رسوب حوضه کاست. از مزایای روش یاد شده می‌توان به اقتصادی بودن آن (یعنی این روش تنها نیاز به جمع‌آوری و تجزیه وتحلیل نمونه‌های رسوب و خاک منابع مختلف به جای پایش درازمدت و گرانقیمت فرسایش و حمل رسوب دارد) و توانایی در بدست آوردن اطلاعات هم درباره نوع منابع رسوب و هم درباره موقعیت مکانی منابع رسوب اشاره کرد. برای دست‌یابی به سهم واحدهای سنگ‌شناسی در تولید رسوب از روشهای دیگر نیاز به سالها اندازه‌گیری و جمع-آوری داده با هزینه زیاد نیاز می‌باشد. ضمن آنکه ممکن است ارتباط فرسایش بالادست با فرآیندهای رسوبگذاری و حمل رسوب برقرار نشود. توصیه می‌شود از روش یاد شده در مطالعات حفاظت خاک و کنترل رسوب به عنوان ابزاری جهت شناسایی مناطق بحرانی و حساس به فرسایش استفاده شود. اطلاعات در زمینه منابع رسوب می‌تواند در تهیه بیلان رسوب آبخیز و در نتیجه شناسایی سیستم ایجاد رسوب، حمل و رسوبگذاری (Walling et al., 2002) و ارزیابی مدلهای فرسایش و تولید رسوب (Takken et al., 1999) نیز مورد استفاده قرار گیرد.

علی‌رغم توسعه مطلوب روش منشأیابی رسوب، هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری در زمینه‌هایی مانند انتخاب مناسبترین ترکیب از ردیابها جهت تفکیک منابع رسوب، تغییرات شیمیایی در ردیابها هنگام حمل و رسوبگذاری و روشن ساختن عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های چند متغیره ترکیبی وجود دارد.

منابع

امیری، منوچهر.(۱۳۸۱) منشأیابی کلوئیدها (رسها) و سیلتهای ایستگاه پخش سیلاب کبودرآهنگ، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، ۱۰۱صفحه.

حکیم خانی، شاهرخ.، احمدی. حسن.، غیومیان. جعفر.، فیض نیا. سادات و قنادها. محمد رضا.(۱۳۸۵) تعیین ترکیب مناسبی از عناصر ژئوشیمیایی برای جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی حوضه پخش سیلاب پلدشت، مجله منابع طبیعی (در دست چاپ).

فیض‌نیا، سادات.(۱۳۷۴) مقاومت سنگها در مقابل فرسایش در اقالیم مختلف ایران، مجله منابع طبیعی، شماره ۴۷، صفحه ۱۱۶– ۹۵.

قدیمی عروس محله، فریدون.، پورمتین. افشین.(۱۳۸۱) تجزیه و تحلیل آماری منشاء رسوب در پایین دست حوزه آبخیز قره چای از استان مرکزی، مجموعه مقالات همایش ملی مدیریت اراضی – فرسایش خاک و توسعه پایدار، اراک، ۴ – ۲ بهمن ۱۳۸۰، صفحه ۳۴۱– ۳۲۸.

عطاپور، عباس.، حکیم خانی. شاهرخ.(۱۳۸۲) تعیین سهم زیرحوزه های حوزه آبخیز چنداب در تولید رسوب با بکارگیری کانی های رسی، مجموعه مقالات سومین همایش آبخواندارى، دستاوردها و چشم اندازهای آینده، ارومیه، ۴ و ۵ شهریور ۱۳۸۲، صفحه ۷۴ – ۸۲.

Bottrill LJ, Walling DE, Leeks GJL (2000) Using recent overbank deposits to investigate contemporary sediment sources in larger river basins. In: Foster, I. D. L. (Ed.). Tracers in Geomorphology. Wiley, Chichester, 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, 1–27.

Collins AL, Walling DE (2004) Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. Progress in Physical Geography, 28: 159–196.

Collins AL, Walling DE, Sichingabula HM, Leeks GJL (2001) Suspended sediment source fingerprinting in a small tropical catchment and some management implications. Applied Geography, 21: 387-412.

Collins AL, Walling DE (2002) Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. Journal of Hydrology, 261: 218-244.

Foster IDL, Lees JA (2000) Tracers in geomorphology. In: Foster, I.D.L. (Ed.). Tracers in Geomorphology. Wiley, Chichester, pp. 3-20.

Foster IDL, Lees JA, Owens PN, Walling DE (1998) Mineral magnetic characterisation of sediment sources from an analysis of lake and floodplain sediments in the catchments of the Old Mill reservoir and Slapton Ley, South Devon, UK. Earth Surface Processes and Landforms 23, 685–703.

Foster IDL, Walling DE (1994) Using reservoir deposits to reconstruct changing sediment yields and sources in the catchment of the Old Mill Reservoir, South Devon, UK, over the past 50 years. Hydrological Sciences Journal, 39:, 347-368.

Garrad PN, Hey RD)1989) Sources of suspended and deposited sediment in a Broadland river. Earth Surface Processes and Landforms, 14: 41-62.

Grimshaw DL, Lewin J (1980) Source identification for suspended sediment. Journal of Hydrology, 47: 151—162.

He Q, Walling DE (1996) Interpreting particle size effects in the absorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments. Journal of Environmental Radioactivity 30, 117-137.

He Q, Owens PN (1995) Determination of suspended sediment provenance using caesium-137, unsupported lead-210 and radium-226: a numerical mixing model approach. In: Foster IDL, Gumell AM, Webb BW (Eds.). Sediment and Water Quality in River Catchments. Wiley, Chichester, pp. 207-227.

Horowitz AJ, Elrick K (1987) The relation of stream sediment surface area, grain size, and composition to trace element chemistry. Appl. Geochem., 2, 437-451.

Loughran RJ, Campbell BL (1995) The identification of catchment sediment sources. In: Foster IDL, Gumell AM, Webb BW (Eds.). Sediment and Water Quality in River Catchments. Wiley, Chichester, pp. 189-205.

Nash JE, Sutcliffe JE (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. Journal of Hydrology 10: 282-290.

Oldfield F, Rummery TA, Thompson R, Walling DE (1979) Identification of suspended sediment sources by means of mineral magnetic measurements: some preliminary results. Water Resources Research, 15: 211-219.

Owens PN, Walling DE, Leeks GJL (2000) Tracing fluvial suspended sediment sources in the catchment of the River Tweed, Scotland, using composite fingerprints and a numerical mixing model. In: Foster IDL (Ed.). Tracers in geomorphology.Jon Wiley, Chichester, pp. 291-308.

Peart MR, Walling DE (1988) Techniques for establishing suspended sediment sources in two drainage basins in Devon, UK: a comparative assessment. In: Bordas MPD. E. Walling DE. Sediment budgets: IAHS Publication No. 174: 269–279 (Wallingford).

Rowan JS, Goodwill P, Franks SW (2000) Uncertainty estimation in fingerprinting suspended sediment sources. In: Foster IDL (Ed.). Tracers in Geomorphology. John Wiley, Chichester, 279-290.

Skopp JM (2000) Physical properties of primary particles. In: Samner ME (Ed.). Handbook of soil science, CRC press, B3-B24.

Stone M, Saunderson H (1992) Particle size characteristics of suspended sediment in southern Ontario rivers tributary to the Great Lakes. Geological Society Special Publication, 57: 31-45.

Takken I, Beuselinck L, Nachtergaele J, Govers G, Poesen, J, Degraer G (1999) Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). Catena, 37: 431-447.

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: 353–372.

Wall GJ, Wilding LP (1976) Mineralogy and related parameters of fluvial suspended sediments in Northwestern Ohio. Journal of Environmental Quality, 5: 168-173.

Wallbrink PJ, Olley JM, Murray AS, Olive LJ (1998) Determining sediment sources and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee River, NSW, Australia using fallout 137Cs and 210Pb. Water Resour. Res. 34 (4): 879–887.

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, 327–336.

Walling DE (2005) Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. Science of the Total Environment, 344: 159– 184.

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, Peart MR, Oldfield F, Thompson R (1979) Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. Nature, 281: 110–113.

Walling DE, Russell MA, Hodgkinson RA, Zhang Y (2002) Fine-grained sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK. Catena, 47: 323-353.

Walling DE, Collins AL (2000) Integrated assessment of catchment sediment budgets: A technical manual. University of Exeter, 168p.

Yu L, Oldfield F (1993) Quantitative sediment source ascription using magnetic measurements in a reservoir system near Nijar, S. E. Spain. Earth Surface Processes and Landforms, 18: 441-454.