

تعیین سهم فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی در تولید رسوب با استفاده از روش منشأیابی در حوزه آبخیز مرگن - ماکو

شاهرخ حکیم‌خانی^{۱*}، حسن احمدی^۲ و جعفر غیومیان^۳

تاریخ پذیرش: 87/3/5

1- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

2- گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

3- پژوهشی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

*مسئول مکاتبه E-mail: Hakimkhani@yahoo.com

چکیده

به دلیل وجود مشکلات زیاد در کاربرد روش‌های سنتی (نظیر میخ‌ها و کرت‌های فرسایشی)، روش منشأیابی به عنوان روشی جایگزین و مناسب برای تعیین سهم منابع رسوب در تولید رسوب 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 مقایسه قرار می‌گیرند. در روش یاد شده با استفاده از ترکیبی مناسب از خصوصیات جدا کننده منابع رسوب، سهم هر کدام منابع رسوب در تولید رسوب تعیین می‌شود. در این تحقیق، سعی شده است با بهره‌گیری از ترکیبی مناسب از عناصر ژئوشیمیایی، رادیواکتیو، کربن آلی، نیتروژن و فسفر در حوضه مرگن پلدشت واقع در شهرستان ماکو در استان آذربایجان غربی، سهم فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی در تولید رسوب تعیین شود. بعد از برداشت 106 نمونه معرف از خاک‌های سطحی و زیرسطحی و شش نمونه رسوب از انتهای حوضه نسبت به اندازه گیری ردیاب‌های یاد شده اقدام شد. با بهره‌گیری از روش تجزیه تابع تشخیص، چهار ردیاب کربن آلی (OC)، کروم (Cr)، سزیم ^{137}Cs و فسفر (P) به عنوان ترکیب مناسب انتخاب شدند. در آخر با استفاده از ترکیب یاد شده و مدل‌های چند متغیره ترکیبی سهم فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی در تولید رسوب به ترتیب برابر با 30/65 و 69/35 درصد بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه تابع تشخیص، ردیاب، فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی، مرگن، منابع رسوب، منشأیابی

Determining Erosion Types Contributions to the Sediment Yield Using Sediment Fingerprinting Method (Case study: Margan watershed, Makoo)

Sh Hakimkhani^{1*}, H Ahmadi² and J Ghayoumian³

¹Department of Range and Watershed Management, Natural Resources Faculty, Urmia University

²Department of Range and Watershed Management, Natural Resources Faculty, Tehran University

³Soil and Water Conservation Research Center, Tehran, Iran

*Corresponding author: E-mail: Hakimkhani@yahoo.com

Abstract

Because of many problems associated with traditional procedures for identifying sediment sources, fingerprinting techniques, based on physical, chemical and organic properties of sediment and source materials, are increasingly being used as a valuable and effective alternative approach to assembling such information. In this method, a suitable composite (set) of diagnostic properties and a multivariate mixing model are employed to estimate the relative contribution of sediment sources to the sediments transported to basin outlet. In this study, using suitable composites of geochemical elements, radionuclides, organic carbon, nitrogen and phosphorous, capable of discriminating surface and subsurface erosions of the study basin, and a multivariate mixing model were used to determine contributions of those erosion types to the sediment yield. The suitable composite fingerprints (elements) were obtained using discriminant analysis. The study basin is Margan watershed of Pouldasht, located in Makoo township, West Azarbaijan province. The suitable composite fingerprints having capability to distinguish the above mentioned erosion types include OC, Cr, ¹³⁷Cs and P. Mean contributions from the two main erosion types, namely surface erosions (sheet and rill erosions) and subsurface erosions (gully, channel and river bank erosions) were estimated as 30.65% and 69.35% respectively. Low mean absolute errors (less than 13%) show high degree of correspondence between measured and predicted properties. High model efficiencies (greater than 0.99) confirm the goodness of fit of the mixing models. Also it is argued that fingerprinting estimates for sediment sources are consistent with field observations. Although a number of limitations must be recognized, the fingerprinting approach to source ascription has high efficiency to determine relative importance of sediment sources (surface and subsurface erosions) in the study basin.

Key words: Discriminant function analysis, Fingerprinting, Margan, Sediment sources, Topsoil and subsoil erosions, Tracers

مقدمه

رسوب، به طور مستقیم سهم منابع رسوب را تعیین می‌کند. در طول بیش از دو دهه گذشته و از زمان کارهای اولیه نظیر تحقیقات وال و ویلدینگ (1976)، اولدفیلد و همکاران (1979) و والینگ و همکاران (1979) کارآیی روش منشأیابی به عنوان روشی موفق و مؤثر برای تعیین منابع رسوب به اثبات رسیده است. مهمترین اصل این روش این است که منابع مختلف رسوب با استفاده از تعدادی از خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و آلی (کربن، نیتروژن و فسفر آلی) قابل تشخیص بوده و با مقایسه این خصوصیات با همان خصوصیات در نمونه‌های رسوب می‌توان سهم و اهمیت منابع رسوب را در تولید رسوب به دست آورد. این روش فاقد بسیاری از مشکلات روش‌های سنتی می‌باشد. 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.

مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برای تعیین سهم نوع منابع رسوب از جمله انواع کاربری (والدن و همکاران 1997 و راسل و همکاران 2001)، فرسایش‌های سطحی و زیر سطحی (والدن و همکاران 1997 و راسل و همکاران 2001)، منابع مکانی از جمله واحدهای سنگ‌شناسی (کولینز و همکاران 1998؛ والینگ و همکاران 1999 و 2007 و امیری 1381) یا زیرحوضه-ها (بوتریل و همکاران 2000؛ والینگ و همکاران، 1999 و عطاپور و حکیم‌خانی 1382) و ترکیبی از تمام منابع (والینگ و همکاران 1999؛ کولینز و والینگ 2007 و کولینز و همکاران 1997) به کار رفته است. در این تحقیق فرسایش‌های ورقه‌ای و شیاری به عنوان فرسایش‌های سطحی و فرسایش‌های رودخانه‌ای، آبراهه‌ای و خندقی به عنوان فرسایش‌های زیرسطحی (والینگ و وودوارد 1995) در نظر گرفته شده‌اند

علی‌رغم توسعه مطلوب روش منشأیابی رسوب در طول بیش از دو دهه گذشته و پتانسیل‌های بالای آن در

لازمه اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب، کسب اطلاعات از اهمیت نسبی منابع رسوب و سهم آنها در تولید رسوب و در نتیجه شناسایی مناطق بحرانی در داخل آبخیز است. از روش‌های سنتی جمع‌آوری اطلاعات یاد شده در زمینه منابع رسوب می‌توان به میخ‌ها و کرت‌های فرسایشی، بررسی‌های چشمی منابع رسوب از طریق عکس‌ها و مشاهدات صحرایی (کولینز و والینگ 2002)، اندازه‌گیری بار رسوبی در انتهای زیر حوضه‌های آبخیز اصلی برای تعیین اهمیت نسبی آنها در تولید رسوب (والینگ و وودوارد 1995) اشاره کرد. اما کاربرد این روش‌ها معمولاً با مشکلات نمونه‌گیری چه از بعد مکانی و چه از بعد زمانی و نیز تنگناهای اجرایی مواجه بوده و بعضی از آنها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارند (کولینز و والینگ 2004 و لاگران و کمپبل 1995). از طرفی این روشها عمدتاً برای اندازه‌گیری فرسایش ارائه شده‌اند و قادر نیستند تولید رسوب (بخشی از فرسایش خام که به انتهای حوضه می‌رسد) را برآورد کنند و اگر هم بتوانند تولید رسوب را برآورد کنند نمی‌توانند آن را به مناطق اصلی تولید کننده آن ربط دهند. لذا روش‌های سنتی امکان مرتبط کردن منابع رسوب به رودخانه و تولید رسوب انتهای حوضه را فراهم نمی‌کنند (کولینز و والینگ 2004).

به دلیل وجود مشکلات یاد شده در کاربرد روش‌های سنتی، روش منشأیابی¹ که بر استفاده از خصوصیات رسوب متکی است به عنوان روشی جایگزین برای تعیین منابع اصلی رسوب و اهمیت نسبی آنها مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است (پیرت و والینگ 1988؛ کولینز و والینگ 2004 و 2007؛ والینگ، 2005 و والینگ و همکاران 2007). این روش برخلاف روش‌های سنتی با مرتبط کردن منابع رسوب به رودخانه و تولید

¹Fingerprinting technique

نمونه‌برداری به طور تصادفی از خاک تحت هر یک از فرسایش‌ها صورت گرفت و نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال و مقادیر عناصر ردیاب انتخابی اندازه‌گیری شدند (والینگ و همکاران ۱۹۹۹). در ادامه ترکیبی بهینه از ردیاب‌های یاد شده که قادر به تشخیص یا جداسازی منابع رسوب (فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی) باشند مشخص و با استفاده از این ترکیب و با بهره‌گیری از مدل‌های چند متغیره ترکیبی، نسبت به برآورد سهم منابع رسوب اقدام گردید. در آخر نتایج ارزیابی نیز شده است. در ضمن ضرایب تصحیح اندازه ذرات و وزنی ویژه نیز محاسبه شده است. جزئیات اقدامات یاد شده به همراه مشخصات حوضه به شرح زیر است.

مشخصات حوضه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از حوزه‌های آبخیز سد ارس و در جنوب بخش پلدشت از توابع شهرستان ماکو در استان آذربایجان غربی قرار دارد. این حوضه به مرگن معروف بوده و در محدوده $44^{\circ}47'24''$ تا $44^{\circ}59'51''$ طول شرقی $39^{\circ}00'21''$ تا $39^{\circ}11'27''$ عرض شمالی واقع شده است. چینه‌شناسی حوضه از دوره تریاس تا عهد حاضر را دربر می‌گیرد و شامل واحدهای سنگ‌شناسی رسوبات کواترنری (مخروط افکنه‌ها، رسوبات رودخانه‌ای و تراس‌های آبرفتی قدیم)، کنگلومرا، مارن الیگومیوسن (سازند قرمز فوقانی)، آهک الیگومیوسن، آهک و دولومیت و شیل و اسلیت تریاس است. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۳۳۵ میلیمتر است. ارتفاع حداقل، حداکثر و متوسط وزنی حوضه به ترتیب برابر با ۸۹۹، ۲۲۹۲/۵ و ۱۲۸۹/۶۵ متر محاسبه کردیم. موقعیت حوضه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

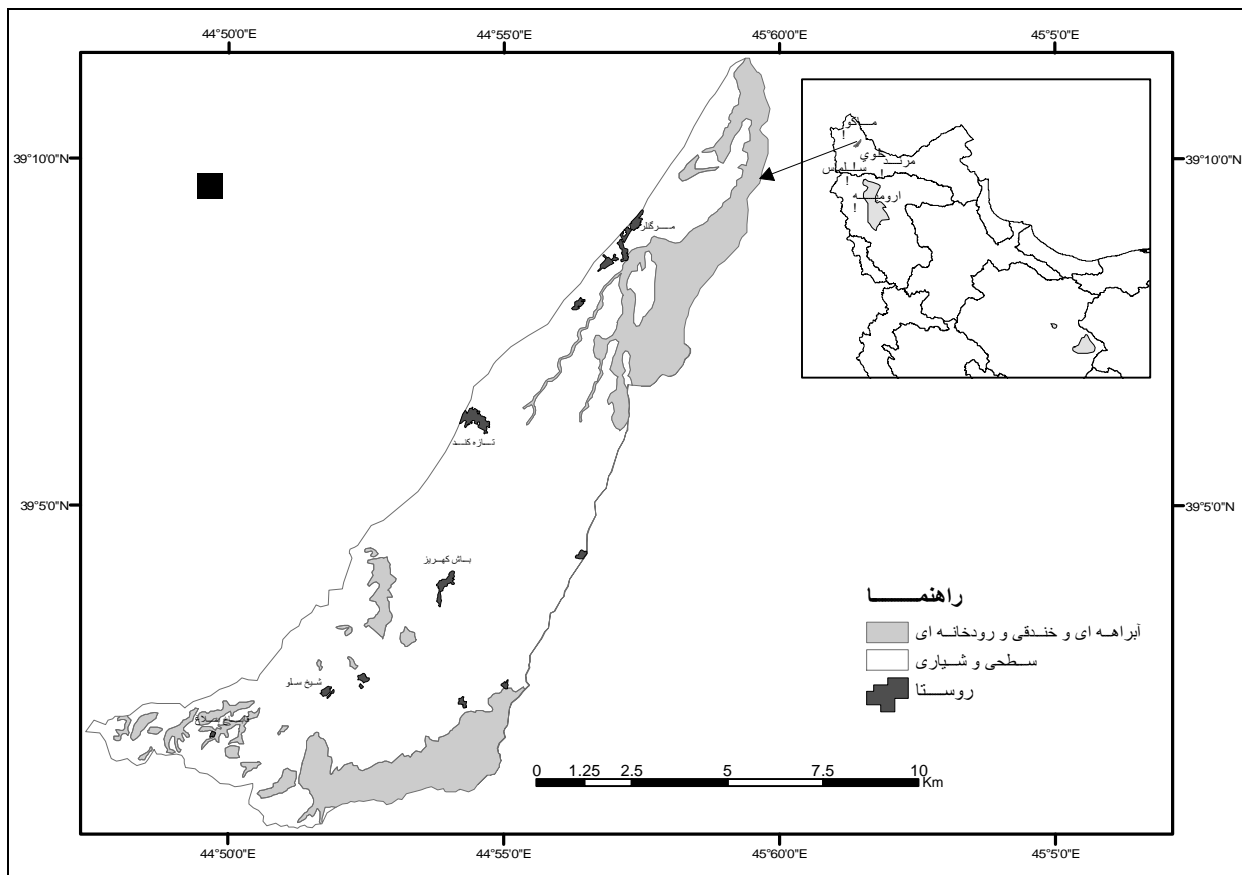
تهیه نقشه انواع فرسایش در حوضه

برای تهیه نقشه انواع فرسایش، از تصاویر ماهواره‌ای ETM^+ ، عکس‌های هوایی ($\frac{1}{40000}$) و بازدیدهای

تعیین منابع رسوب، هنوز عدم قطعیت‌هایی نیز در روش تحقیق آن وجود دارد. از این عدم قطعیت‌ها می‌توان به عدم وجود یک دستورالعمل مناسب برای انتخاب مناسبترین ترکیب از ردیابها جهت تفکیک منابع رسوب در حوضه‌ها و مناطق مختلف اشاره کرد (فوستر و لیز ۲۰۰۰ و کولینز و والینگ ۲۰۰۲). با اینکه مطالعاتی نظیر والینگ و همکاران (۱۹۹۹)، راسل و همکاران (۲۰۰۱) و کولینز و همکاران (۱۹۹۸) نشان می‌دهند که عناصر ژئوشیمیایی و خواص مغناطیسی برای جداسازی منابع مکانی نظیر واحدهای سنگ‌شناسی و عناصر آلی (کربن، نیتروژن و فسفر آلی) و رادیواکتیو ریزشی (بخصوص سزیم ^{137}Cs)، سرب ۲۱۰ حمایت نشده ($^{210}Pb_{ex}$) و بریلیم ۷ (7Be) برای جداسازی نوع منابع رسوب مانند انواع فرسایش و کاربری‌های اراضی مناسب هستند، ولی با این حال تا به امروز اطلاعات کافی در مورد خصوصیتی منفرد یا ترکیبی از خصوصیات ردیاب به عنوان منشأیاب با قابلیت کاربرد جهانی بدست نیامده است (فوستر و لیز ۲۰۰۰ و کولینز و والینگ ۲۰۰۲) و این مسئله یکی از چالش‌های اصلی تحقیقات جدید در مورد منشأیابی رسوب می‌باشد. با توجه به موارد فوق ضرورت انجام تحقیقات بیشتر چه در زمینه کارایی روش و چه در زمینه مناسبترین ردیاب‌ها احساس می‌شود. بخصوص اینکه در ایران تحقیقی در خصوص روش جدید انجام نشده و کارایی آن در تعیین سهم منابع رسوب در تولید رسوب بررسی نشده است. در این مطالعه به منظور تعیین سهم فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی در حوضه مرگن واقع در شهرستان ماکو در استان آذربایجان غربی در تولید رسوب، از روش منشأیابی و انتخاب ترکیب مناسبی از ردیاب‌ها استفاده شده و کارایی این روش نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا نقشه انواع فرسایش (فرسایش‌های سطحی و زیر سطحی) در حوضه تهیه شده، سپس



شکل 1- نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه مرگن و انواع فرسایش در آن

گیرد، انواع فرسایش در دو گروه فرسایش‌های سطحی (ورقه ای و شیاری) و زیر سطحی (آبراه‌ای، خندقی و رودخانه‌ای) تقسیم بندی شدند. مساحت رخساره های حرکت‌های توده‌ای (نظیر زمین‌لغزش و واریزه) در حوضه بسیار کوچک و قابل اغماض است. از اینرو این دو گروه (فرسایش‌های سطحی و زیر سطحی) به عنوان منابع رسوب در نظر گرفته شدند.

نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی

از خاک تحت طبقه فرسایش سطحی (ورقه ای و شیاری)، نمونه‌های خاک از عمق 0 - 5 سانتیمتری و از خاک تحت طبقه فرسایش‌های زیرسطحی (خندقی، رودخانه‌ای و آبراه‌ای)، از دیواره‌ها به مقدار کافی (تقریباً دو کیلوگرم) و بوسیله یک بیلچه استیل (والینگ و همکاران 1999) برداشت شد. نمونه‌ها طوری انتخاب

صحرائی استفاده شد (کولینز و والینگ 2004). برای تشخیص این نوع عارضه‌ها به طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای از روش‌های بارزسازی نظیر ترکیب رنگ‌ها، ادغام¹ سایر باندها با باند 8 و تجزیه به مولفه‌های اصلی (اولسن 2007) استفاده شد. روش منشأیابی قادر به جداسازی فرسایش‌های سطحی (ورقه ای و شیاری) و فرسایش‌های زیرسطحی (فرسایش‌های خندقی، آبراهه-ای و رودخانه‌ای) از یکدیگر است ولی توان تفکیک فرسایش‌های ورقه‌ای و شیاری از یکدیگر و فرسایش‌های آبراهه‌ای، خندقی و رودخانه‌ای از همدیگر را ندارد (والینگ و وودوارد 1995). لذا با توجه به این مسئله و با عنایت به اینکه رسوبات انتقالی به انتهای حوضه یا هر نقطه‌ای روی آبراهه اصلی معمولاً با فرسایش‌های ورقه ای، شیاری، خندقی، آبراهه‌ای و رودخانه‌ای صورت می

¹Fusion

انتخاب ترکیبی بهینه از ردیاب‌ها

در این تحقیق ابتدا از آزمون مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون غیرپارامتری^۳، برای بررسی توان و قدرت هر یک از ردیاب‌ها در تفکیک انواع فرسایش استفاده شد (کولینز و والینگ، ۲۰۰۷). برای انتخاب ترکیبی مناسب از ردیاب‌ها که به طور جمعی قادر به تفکیک منابع رسوب باشند از روش تجزیه تابع تشخیص گام به گام^۴ و برای انتخاب متغیرهای مستقل از روش مربع فاصله ماهالانوبیس^۵ (هایر و همکاران ۱۹۹۸) استفاده شد. سطح معنی‌داری آماره F برای ورود و حذف متغیر نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۵ و ۰/۱ (هایر و همکاران ۱۹۹۸) در نظر گرفته شد. برای نشان دادن توان جداسازی یا طبقه‌بندی تجزیه تابع تشخیص^۶، معنی‌داری توابع، اختلاف گروه‌ها و ماتریس طبقه‌بندی بررسی شده‌است. درصد طبقه‌بندی صحیح مهم‌ترین معیار بررسی توان طبقه‌بندی تجزیه تابع تشخیص می‌باشد که برای تعیین آن از ماتریس طبقه‌بندی استفاده گردید. در ضمن به منظور ارزیابی نتایج تحلیل تشخیص از روش ارزیابی متقابل (هایر و همکاران ۱۹۹۸) استفاده به عمل آمده‌است. ترکیب مناسب بدست آمده از ردیاب‌ها در این مرحله برای تعیین سهم انواع فرسایش در تولید رسوب استفاده شد.

یکی از پیش فرض‌های روش تجزیه تابع تشخیص، عدم وجود همخطی چندگانه قوی بین متغیرها می‌باشد (هایر و همکاران ۱۹۹۸). برای تشخیص هم‌خطی چندگانه از عدد تحمل^۷ و عکس آن (عامل تورم واریانس)^۸ استفاده شد (هایر و همکاران ۱۹۹۸). عدد تحمل برابر یا کوچکتر از ۰/۱ و عامل تورم واریانس برابر یا بزرگتر از ۱۰ بیانگر همخطی قوی بین متغیرها است (هایر و همکاران ۱۹۹۸). برای مقابله با مشکلات ناشی از همخطی چندگانه قوی، ترکیب‌هایی از عناصر

شدند که تغییرات کاربری‌های اراضی، واحدهای سنگ-شناسی، شیب و پوشش گیاهی را پوشش دهند. تعداد نمونه‌ها از خاک‌های تحت فرسایش‌های سطحی و فرسایش‌های زیرسطحی به ترتیب ۵۷ و ۴۹ و کل نمونه‌ها، ۱۰۶ عدد بود. تعداد ۶ نمونه نیز از رسوبات نهشته شده در بستر رودخانه در خروجی حوضه برداشت گردید. نمونه‌ها بعد از خشک شدن در هوای آزاد و دمای آزمایشگاه، توسط یک هاون کوبیده شده و برای جدا کردن بخش کوچکتر از ۶۳ میکرون از الک مذکور گذرانده شد. این بخش از ذرات برای اندازه‌گیری ردیاب‌های انتخابی در مرحله بعد استفاده شد (کولینز و همکاران ۱۹۹۸ و والینگ و همکاران ۱۹۹۹).

در این مطالعه ۳۶ ردیاب شامل عناصر رادیواکتیو ^{۱۳۷}Cs و ^{۲۳۲}Th، عناصر ژئوشیمیایی In, Cs, Ce, Bi, Be, Y, Mn, Al, Fe, Zn, Sn, Pb, Ni, Cu, Cr, Co, Cd, Nb, La, Ga, Ge, V, W, Ta, Te, Ti, Th, Hf, Zr, Se و کربن آلی (OC) و نیتروژن کل (N) و فسفر قابل جذب (P) با توجه به مطالعات گذشته (نظیر والینگ و همکاران ۱۹۹۹؛ کولینز و والینگ ۲۰۰۷ و کولینز و همکاران ۱۹۹۸) انتخاب شدند. تجزیه آزمایشگاهی و تعیین غلظت عناصر ژئوشیمیایی با استفاده از ترکیبی از دو روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS^۱) و طیف‌سنجی نشری اتمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-AES^۲) و هضم توسط چهار اسید HF, HNO₃, HClO₃ و HCl (هیل و همکاران ۲۰۰۴)، فسفر قابل جذب به روش اولسن و به طریق طیف‌سنجی UV/Visible، کربن آلی به روش والکی و بلاک و نیتروژن کل به روش کجدال انجام گردید (علی‌احیایی و بهبهانی زاده ۱۳۷۲). عناصر رادیواکتیو به روش گاما اسپکترومتری (والینگ و کولینز ۲۰۰۰) اندازه‌گیری شدند.

^۳Kruskal-Wallis H^۴Stepwise discriminant function analysis^۵Squared Mahalanobis Distance^۶Discriminant function analysis^۷Tolerance number^۸Variance inflation factor^۱Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry^۲Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry

اندازه ذرات و ضریب وزنی ویژه به ترتیب در زیر توضیح داده شده‌است.

جواب‌های بهینه برای سهم انواع فرسایش به روش بهینه‌سازی خطی و با حداقل کردن معادله 2 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 هر کدام از انواع فرسایش برای نمونه رسوب مورد نظر بدست می‌آید. این کار را برای تمام نمونه‌های رسوب انجام داده و از مقادیر سهم هر یک از انواع فرسایش برای بدست آوردن سهم متوسط میانگین گیری شد. ردیاب‌های مورد استفاده در این مرحله ترکیب بدست آمده در مرحله یک می‌باشند.

الف- مقادیر ضریب سهم هر یک از انواع فرسایش باید بین صفر و یک باشد

$$0 \leq b_j \leq 1 \quad [3]$$

ب- مجموع ضرایب سهم هر یک از انواع فرسایش باید برابر با یک باشد:

$$\sum_{j=1}^n b_j = 1 \quad [4]$$

معادله 2 با در نظر گرفتن دو شرط فوق به روش بهینه‌سازی خطی و با استفاده از ابزار Solver در Excel حل شد.

تعیین ضریب تصحیح اندازه ذرات (z_j)

جهت رفع عیب غنی شدن یا تهی شدن رسوب از نظر بعضی از اندازه‌ها و فراهم آوردن امکان مقایسه مستقیم بین نمونه‌های رسوب و نمونه‌های خاک باید از روشهای اصلاحی استفاده شود. در این تحقیق با این فرض که ردیاب‌ها به یک اندازه تحت تاثیر فرآیند غنی شدن یا تهی شدن قرار می‌گیرند و به دلیل نقش زیاد پارامتر سطح ویژه در میزان ردیاب‌ها 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 ردیاب‌های انتخابی (انتخاب شده با

طوری انتخاب شدند که کمترین هم خطی در بین آنها وجود داشته باشد.

تعیین سهم فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی

مدل‌های ترکیبی چند متغیره بیش از سایر روشها برای تعیین سهم منابع رسوب مورد استفاده قرار می‌گیرد (برای مثال والینگ 2005؛ کولیز و همکاران 1998 و والدن و همکاران 1997). در این تحقیق نیز از مدل‌های یاد شده استفاده شد. مدل ترکیبی برای یک ردیاب به صورت زیر است:

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

در این معادله \hat{X}_i مقدار برآوردی ردیاب i ام (m و ... و 2 و $i=1$)، a_{ij} مقدار میانگین ردیاب i ام در فرسایش j ام (n و ... و 2 و $J=1$)، b_j سهم فرسایش j ام، n تعداد گروه‌های فرسایشی و m تعداد خصوصیات ردیاب است. برای هر یک از ردیاب‌ها، معادله 1 تکرار می‌شود و بنابراین به تعداد ردیاب، معادله وجود خواهد داشت و مدل چند متغیره ترکیبی با تعدادی معادله مشخص خواهد شد. با حل این معادلات سهم هر یک از انواع فرسایش بدست آمد. چون مجموعه معادلات یاد شده دارای مجهولات زیادی بوده و راه‌های متنوعی می‌تواند داشته باشد از این‌رو برای بدست آوردن نتایج بهینه در تعیین سهم منابع رسوب و به جای حل مستقیم از روشهای بهینه‌سازی استفاده می‌شود (والینگ و کولیز 2000). در این تحقیق از روش حداقل کردن مجموع مربعات باقیمانده برای بدست آوردن نتایج یا سهم بهینه انواع فرسایش به صورت زیر استفاده شد:

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

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 فرسایش j ام می‌باشند. طرز محاسبه ضریب اصلاحی

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 را نیز با استفاده از روش ناش و سوتکلیف (1970) محاسبه شد.

در این تحقیق کارهای آماری و پردازش تصاویر ماهواره ای به ترتیب با استفاده از نرم افزارهای SPSS 15 و ILWIS 3.1 انجام گرفته است.

نتایج و بحث

مساحت تحت پوشش دو گروه فرسایش یعنی فرسایش‌های سطحی (گروه 1) و فرسایش‌های زیر سطحی (گروه 2) به ترتیب برابر با 7371/07 (75/97 درصد) و 2237/42 (23/06 درصد) هکتار است. در نتیجه فرسایش‌های فرسایش‌های سطحی (ورقه‌ای و شیاری) گسترش بیشتری دارند. شکل 1 نقشه انواع فرسایش را نشان می‌دهد.

وجود هم‌خطی چندگانه قوی باعث مشکلاتی در تفسیر اهمیت هر یک از متغیرها و ناپایداری نتایج طبقه‌بندی تجزیه تابع تشخیص می‌شود (ناس و مویک 2001 و هایلر و همکاران 1998). در جدول 1 معیارهای عدد تحمل و عامل تورم واریانس برای ردیاب‌های مختلف ارائه شده‌است. با توجه به این جدول بیشتر عناصر با داشتن عامل تورم واریانس بیش از 10 دارای هم‌خطی قوی بین خود و سایر عناصر می‌باشند. عناصر Fe، Nb، Ga، Zr، Ta و Hf به ترتیب با داشتن عامل تورم واریانس برابر با 105/81، 133/17، 140/68، 156/03، 193/92 و 196/79 بیشترین هم‌خطی چندگانه را با یکدیگر و با عناصر دیگر دارند. برای مقابله با مسئله هم‌خطی چندگانه قوی بین ردیاب‌ها، ترکیب‌هایی از عناصر برای تجزیه تابع تشخیص طوری انتخاب شدند که دارای کمترین هم‌خطی و با عامل تورم واریانس برابر یا کوچکتر از 10 باشند.

استفاده از تجزیه تابع تشخیص) استفاده شد (کولینز و همکاران 1997 و 1998؛ والینگ 2005 و اونز و همکاران 2000).

سطح ویژه متوسط نمونه‌های خاک و رسوب از روی ترکیب اندازه ذرات محاسبه شد. برای ذرات سیلت با فرض کروی بودن دانه‌ها و برای رس با فرض صفحه‌ای و پولکی بودن آنها، سطح ویژه به ترتیب از نسبت‌های $\frac{6}{\rho_p d}$ و $\frac{4 + 2d/h}{r_p d}$ تعیین شد (اسکوپ 2000). پارامترهای d ، ρ_p و h به ترتیب برابر با وزن مخصوص حقیقی (2/65 گرم بر سانتی‌متر مکعب)، قطر ذرات و ضخامت ذره رس می‌باشند.

اندازه‌گیری ضریب وزنی ویژه ردیاب‌ها (w_i)

ردیاب‌هایی که دقت اندازه‌گیری آنها بالاست باید تأثیر بیشتری در برآورد مدل‌های ترکیبی چند متغیره داشته باشند. برای وزن دادن به ردیاب‌ها براساس دقت اندازه‌گیری آنها، از یک ضریب وزنی ویژه (w_i) استفاده شد (کولینز و همکاران 2001 و والینگ 2005). به منظور محاسبه آن برای یک نمونه، ابتدا هر یک از ردیاب‌ها پنج مرتبه در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و مقادیر حاصل با تقسیم شدن بر میانگین خود استاندارد شدند. سپس ضریب وزنی ویژه (w_i) هر یک از ردیاب‌ها با محاسبه عکس ریشه دوم واریانس داده‌های استاندارد شده همان ردیاب‌ها بدست آمد.

ارزیابی نتایج مدل چند متغیره ترکیبی

از معیارهای خطای نسبی (والینگ و دوارد 1995 و کولینز و همکاران 2001)، ضریب کارایی مدل (والینگ و دوارد 1995 و روان و همکاران 2000) و روش‌های غیر مستقیم و مشاهدات صحرائی (کولینز و همکاران 1998 و روان و همکاران 2000) می‌توان برای ارزیابی نتایج مدل‌های چند متغیره ترکیبی استفاده کرد. در این تحقیق نتایج به روش‌های یاد شده ارزیابی شد. معیارهای

واریانس برای عناصر یاد شده، حداکثر 10 است. بقیه عناصر به دلیل داشتن آماره F برای ورود بیش از 5 درصد و نداشتن توان جداسازی کافی حذف شده‌اند. درصد طبقه‌بندی صحیح نمونه‌ها در گروه‌های مربوطه در مرحله تحلیل برابر با 94/3 درصد و در مرحله ارزیابی برابر با 92/5 درصد می‌باشند.

ضرایب وزنی ویژه عناصر انتخابی در جدول 1 مشاهده می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفته شد، ضریب وزنی ویژه (w_i) جهت لحاظ دقت اندازه‌گیری هر یک از ردیاب‌ها در برآورد سهم منابع رسوب محاسبه می‌شود و مقادیر بزرگتر بیانگر دقت بیشتری است. مقادیر ضرایب در جدول یاد شده از 0/038 (N) تا 1 (Te) متغیر هستند.

متوسط مقادیر ضرایب تصحیح اندازه ذرات (Z_{ij}) برای فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی به ترتیب برابر با 0/81 و 0/69 می‌باشند. این مقادیر نیز نشان دهنده غنی شدن ذرات رسوب از نظر ذرات درشت‌تر و تهی شدن از نظر ذرات ریزتر است.

جدول 3، سهم دو گروه فرسایش را در تولید رسوب نشان می‌دهد. طبق ستون سوم جدول یاد شده، فرسایش‌های آبراه‌ای، خندقی و رودخانه‌ای بیشترین (69/35 درصد) و فرسایش‌های ورقه‌ای و شیاری (30/65 درصد) کمترین سهم را در تولید رسوب حوضه دارند. برای بررسی اهمیت نسبی انواع فرسایش و فراهم آوردن امکان مقایسه آنها، در جدول یاد شده (جدول 3) سهم کل (ستون سوم) بر درصد مساحت تحت پوشش (ستون دوم) تقسیم شده‌است. براساس ستون یاد شده فرسایش‌های آبراه‌ای، خندقی و رودخانه‌ای با داشتن ضریب 3 در مقایسه با فرسایش‌های ورقه‌ای و شیاری با ضریب 0/4 به مراتب نقش بیشتری در تولید رسوب حوضه دارند. در کل می‌توان گفت که حدود 70 درصد تولید رسوب حوضه ناشی از فرسایش‌های زیر سطحی (آبراه‌ای، خندقی و رودخانه‌ای) است.

خطای نسبی مدل چند متغیره مورد استفاده در برآورد سهم انواع فرسایش برای هر یک از نمونه‌های رسوب از 2/1 تا 21 درصد و برای تمام نمونه‌ها 1/21 تا 16 درصد متغیر است و میانگین خطای نسبی برای تمام

همان‌طور که جدول 1 نشان می‌دهد از نظر آزمون Kruskal-Wallis، توان 13 عنصر (Al, Co, Cr, Cu, Pb, Zn, Fe, Mn, Ti, ^{137}Cs , OC, N و P) در جداسازی انواع فرسایش موجود در حوضه در سطح کمتر از 5 درصد معنی‌دار بوده و این عناصر به عنوان ردیاب قادر به جداسازی فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی هستند. پنج عنصر Ga, In, Nb, Ta و V نیز به ترتیب در سطح‌های 6/8, 5/7, 5/5, 6/6 و 5/4 درصد معنی‌دار هستند. عناصر ^{137}Cs , Ti, Mn, OC, Cr, N و P بسیار معنی‌دار هستند که حاکی از توان بالای آنها در تفکیک دو گروه فرسایش (سطحی و زیرسطحی) می‌باشد. ترکیب نهایی به روش تجزیه تابع تشخیص گام به گام از ترکیب یاد شده انتخاب شد. روش گام به گام مهمترین ردیاب‌ها را به صورت مرحله به مرحله انتخاب کرده و ردیاب‌های بدون اهمیت در تفکیک انواع فرسایش را حذف می‌کند. با انتخاب متوالی متغیرهای با بیشترین توان تفکیک در هر مرحله، متغیرهایی که در تمایز بین گروه‌ها مفید نیستند حذف می‌شوند.

جدول 2 مراحل مختلف اضافه شدن عناصر ردیاب در توابع تشخیص به روش گام به گام و تاثیر آنها بر توان تفکیک تجزیه تابع تشخیص برای انواع فرسایش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول یاد شده ملاحظه می‌شود با اضافه شدن هر عنصر مقدار مربع فاصله ماهالانوبیس افزایش و درصد تجمعی طبقه‌بندی درست نمونه‌ها افزایش یافته و سطح معنی‌داری بهتر شده‌است و در نتیجه توان جداسازی تحلیل و میزان تفکیک بین گروه‌ها افزایش یافته‌است. عنصر OC اولین و P آخرین متغیرهای ورودی هستند. عنصر OC بیشترین درصد طبقه‌بندی صحیح (81/1) را به خود اختصاص داده و عنصر ^{137}Cs با اینکه سهمی در افزایش درصد طبقه‌بندی صحیح ندارد ولی با زیاد کردن فاصله ماهالانوبیس (جدول 2)، موجب افزایش اختلاف گروه‌ها (انواع فرسایش) شده‌است. در نتیجه ترکیب مناسب از عناصر که قادر به جداسازی انواع فرسایش باشند شامل 4 عنصر موجود در جدول 2 هستند. در ضمن عامل تورم

نمونه‌ها تقریباً برابر با ۱۳ درصد به دست آمد. متوسط ضریب کارایی مدل نیز حدود ۰/۹۹ است.

جدول ۱- آزمون بررسی توان ردیاب‌ها در جداسازی انواع فرسایش، معیارهای تشخیص هم‌خطی و ضریب وزنی ویژه

ضریب وزنی ویژه (w_i)	معیارهای تشخیص هم‌خطی چندگانه		Kruskal - Wallis		ردیاب
	عامل تورم واریانس	عدد تحمل	سطح معنی‌داری	آماره H	
0/312	48/95	0/02	0/025	5/05	Al
0/094	56/78	0/02	0/512	0/43	Be
0/067	74/91	0/01	0/620	0/25	Bi
0/245	2/12	0/47	0/134	2/25	Cd
0/698	72/66	0/01	0/169	1/89	Ce
0/119	45/55	0/02	0/040	4/20	Co
0/130	12/86	0/08	0/001	10/55	Cr
0/575	4/69	0/21	0/914	0/01	Cs
0/196	6/19	0/16	0/039	4/27	Cu
0/361	105/81	0/01	0/031	4/64	Fe
0/206	140/68	0/01	0/068	3/34	Ga
0/078	4/63	0/22	0/042	4/14	Ge
0/093	196/79	0/01	0/618	0/25	Hf
0/210	48/20	0/02	0/057	3/64	In
0/553	95/02	0/01	0/199	1/65	La
0/260	13/20	0/08	0/000	18/71	Mn
0/221	133/17	0/01	0/055	3/69	Nb
0/305	38/47	0/03	0/399	0/71	Ni
0/175	8/71	0/11	0/004	8/08	Pb
0/040	5/48	0/18	0/646	0/21	Se
0/095	22/33	0/04	0/388	0/75	Sn
0/316	193/92	0/01	0/066	3/38	Ta
1	2/73	0/37	0/439	0/60	Te
0/162	19/07	0/05	0/771	0/09	Th
0/305	47/54	0/02	0/000	13/60	Ti
0/129	16/41	0/06	0/949	0/00	Tl
0/252	58/63	0/02	0/054	3/72	V
0/172	11/50	0/09	0/442	0/59	W
0/334	16/33	0/06	0/235	1/41	Y
0/276	4/87	0/21	0/023	5/14	Zn
0/151	156/03	0/01	0/952	0/00	Zr
0/079	2/66	0/38	0/000	73/35	¹³⁷ Cs
0/170	1/64	0/61	0/967	0/00	²³² Th
0/038	4/94	0/20	0/000	17/07	N
0/096	6/53	0/15	0/000	49/53	OC
0/040	1/95	0/51	0/000	21/34	P

جدول 2- گام‌های مختلف ورود عناصر به مدل و تاثیر آنها بر توان جداسازی تجزیه تابع تشخیص برای انواع فرسایش

گام	افزافه شدن عنصر ردیاب	حداقل مربع فاصله Mahalanobis	سطح معنی داری F	درصد تجمعی طبقه - بندی درست نمونه‌ها	عامل تورم واریانس
1	OC	2/60	0/0005	81/1	1/31
2	Cr	4/21	0/0003	89/6	1/21
3	¹³⁷ Cs	4/93	0/0001	89/6	1/15
4	P	5/43	0/000	94/3	1/04

در کل می‌توان گفت که فرسایش‌های زیرسطحی تقریباً 70 درصد رسوب حوضه را تولید می‌کنند. بنابراین برای اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب در این حوضه باید بیشتر روی فرسایش‌های خندقی، آبراهه‌ای و رودخانه‌ای متمرکز شد.

در کل روش منشأیابی رسوبات آبی قادر به تعیین و تفکیک مناسب سهم فرسایش‌های سطحی و زیر سطحی در حوضه مرگن بوده و کارایی بالایی در این زمینه نشان داد. این روش مزایای زیادی نسبت به سایر روش‌های مستقیم و غیر مستقیم دارد که از مهمترین این مزایا می‌توان به سرعت زیاد و اقتصادی بودن آن اشاره کرد. یعنی این روش تنها نیاز به جمع آوری و تجزیه و تحلیل نمونه‌های رسوب و خاک منابع مختلف به جای پایش دراز مدت و پرهزینه فرسایش و حمل رسوب دارد. برای دستیابی به سهم منابع یاد شده در تولید رسوب از روش‌های دیگر، نیاز به سال‌ها اندازه‌گیری و جمع آوری داده با هزینه زیاد می‌باشد. ضمن آنکه ممکن است ارتباط فرسایش بالادست با فرآیندهای رسوبگذاری و حمل رسوب نیز برقرار نشود. لذا توصیه می‌شود برای کسب اطلاعات از اهمیت نسبی منابع رسوب و در نتیجه شناسایی مناطق بحرانی و حساس به فرسایش در داخل آبخیز به منظور اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب، از این روش استفاده شود.

خطای نسبی کم و ضریب کارایی بالای مدل بیانگر صحت و کارایی مناسب آن در برآورد سهم انواع فرسایش در تولید رسوب است. مشاهدات صحرایی نیز نتایج بدست آمده و صحت و عملکرد مناسب مدل را تایید می‌کند. اشکال فرسایش خندقی، آبراهه‌ای و رودخانه‌ای موجود در حوضه بسیار فعال بوده و عمق زیاد آنها و آثار ریزش دیواره‌ها مبین فرسایش و تولید رسوب زیاد آنها است.

بیش از 86 درصد طبقه‌بندی درست نمونه‌ها مربوط به سه عنصر OC، ¹³⁷Cs و P است که بیانگر توان بالای آنها در تفکیک انواع فرسایش است. سهم Cr، 8/5 درصد است. نتایج محققینی از جمله والبرینک و همکاران (1998)، کولینز و همکاران (1997)، زانگ و والینگ (2005) و والینگ و همکاران (1999) نیز نتایج یاد شده را تایید می‌کنند. عناصر رادیواکتیو ریزشی (مانند ¹³⁷Cs)، کربن آلی، نیتروژن (N) و فسفر (P) در خاک سطحی (فرسایش ورقه‌ای و شیاری) بیشتر از زیرسطحی (فرسایش‌های آبراهه‌ای، خندقی و رودخانه‌ای) و در نتیجه می‌توانند منابع رسوب مذکور را از هم تفکیک کنند.

جدول 3- سهم و اهمیت نسبی انواع فرسایش در تولید رسوب

انواع فرسایش	درصد مساحت تحت پوشش	سهم کل بر حسب درصد	ضریب اهمیت نسبی
سطحی (ورقه‌ای و شیاری)	76/95	30/65	0/4
زیرسطحی (آبراهه‌ای، خندقی و رودخانه‌ای)	23/05	69/35	3

منابع مورد استفاده

- امیری م، ۱۳۸۱. منشأیابی کلونیدها (رسها) و سیلتهای ایستگاه پخش سیلاب کبودرآهنگ، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، صفحه ۱۰۱.
- عطاپور ع و حکیم‌خانی ش، ۱۳۸۲. تعیین سهم زیرحوزه‌های حوزه آبخیز چناب در تولید رسوب با بکارگیری کانی‌های رسی. صفحه‌های ۷۴ تا ۸۲. مجموعه مقالات سومین همایش آبخیزداری، دستاوردها و چشم اندازهای آینده. ۴-۵ شهریور، ارومیه.
- علی‌احیایی م و بهبهانی‌زاده ع، ۱۳۷۲. شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک. موسسه تحقیقات خاک و آب، نشریه شماره ۸۹۳.
- Bottrill LJ, Walling DE and Leeks GJL 2000. Using recent overbank deposits to investigate contemporary sediment sources in larger river basins. Pp. 369-387. In: Foster IDL (ed). Tracers in Geomorphology. Wiley, Chichester.
- Collins AL, and Walling DE, 2002. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of Hydrology* 261: 218-244.
- Collins AL and Walling DE, 2004. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography* 28: 159-196.
- Collins AL and Walling DE, 2007. Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology* 88: 120-138.
- Collins AL, Walling DE and 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 and Leeks GJL, 1998. Use of composite fingerprints to determine the spatial provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 31-52.
- Collins AL, Walling DE, Sickingabula HM and Leeks GJL, 2001. Suspended sediment source fingerprinting in a small tropical catchment and some management implications. *Applied Geography* 21: 387-412.
- Foster IDL and Lees JA, 2000. Tracers in geomorphology. Pp. 3-20. In: Foster IDL (ed). Tracers in Geomorphology. Wiley, Chichester.
- Hair JF, Andersen RE, Tatham RL and Black WC, 1998. *Multivariate Data Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Hill SJ, Fisher A and Cave M, 2004. Inductively coupled plasma spectrometry. In: Smith KA and Cresser MS (eds). *Soil and environmental analysis*. Marcel Dekker, third edition, 53 - 110.
- Loughran RJ and Campbell BL, 1995. The identification of catchment sediment sources. Pp. 189-205. In: Foster IDL, Gumell AM and Webb BW (eds). *Sediment and Water Quality in River Catchments*. Wiley, Chichester.

- Nas T and Mevic BH, 2001. Understanding the collinearity problem in regression and discriminant analysis. *J Chemometrics* 15: 413–426.
- Nash JE and 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 and Walling DE, 1979. Identification of suspended sediment sources by means of mineral magnetic measurements: some preliminary results. *Water Resources Research* 15: 211-219.
- Olsen RC, 2007. Remote sensing from air and space. *SPIE Press Monograph Vol. PM162*, 255p.
- Owens PN, Walling DE and Leeks GJL 2000. Tracing fluvial suspended sediment sources in the catchment of the River Tweed, Scotland, using composite fingerprints and a numerical mixing model. Pp. 291-308. In: Foster IDL (ed). *Tracers in geomorphology*. Jon Wiley, Chichester.
- Peart MR and Walling DE, 1988. Techniques for establishing suspended sediment sources in two drainage basins in Devon, UK: a comparative assessment. Pp. 269–279. In: Bordas MP and Walling DE (eds). *Sediment budgets*. IAHS Publication No. 174, Wallingford.
- Rowan JS, Goodwill P and Franks SW, 2000. Uncertainty estimation in fingerprinting suspended sediment sources. Pp. 279-290. In: Foster IDL (ed). *Tracers in Geomorphology*. John Wiley, Chichester.
- Russell MA, Walling DE and Hodgkinson RA, 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *Journal of Hydrology* 252: 1-24.
- Skopp JM, 2000. Physical properties of primary particles. Pp. B3-B24. In: Samner ME (ed). *Handbook of Soil Science*. CRC press.
- Walden J, Slattery MC and Burt TP, 1997. Use of mineral magnetic measurements to fingerprint suspended sediment sources: approaches and techniques for data analysis. *J. of Hydrology* 202: 353–372.
- Wall GJ and 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 and Olive LJ, 1998. Determining sediment sources and transit times of suspended sediment in Murrumbidgee River, NSW, Australia using fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb. *Water Resour Res* 34: 879–887.
- Walling DE, 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment* 344: 159-184.
- Walling DE and Collins AL, 2000. Integrated assessment of catchment sediment budgets: A technical manual. University of Exeter 168p.
- Walling DE, Collins AL and Stroud R, 2007. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments. *Journal of Hydrology* In Press.

- Walling DE, Owens PN and 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 and Thompson R, 1979. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. *Nature* 281: 110–113.
- Walling DE, Russell MA, Hodgkinson RA and Zhang Y, 2002. Fine-grained sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK. *Catena* 47: 323-353.
- Zhang X and Walling DE, 2005. Characterizing land surface erosion from Cesium-137 profiles in lake and reservoir sediments. *J Environ Qual* 34:514-523.