



تعیین سهم واحدهای کاری در تولید رسوب معلق با استفاده از روش منشأیابی رسوب (مطالعه موردی: آبخیز تول‌بنه، استان گلستان)

کهزاد حیدری^{۱*}، علی نجفی‌نژاد^۲، فرهاد خرمالی^۳، منوچهر بابانژاد^۴

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، kohzad93@gmail.com

۲- دانشیار گروه آبخیزداری و مدیریت بیابان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۴- استادیار گروه آمار و ریاضی، دانشگاه گلستان

چکیده

روش منشأیابی امروزه در سرتاسر دنیا به منظور تعیین سهم واحدهای کاری از رسوب معلق استفاده می‌شود. در روش‌های رایج با استفاده از ترکیب مناسب خصوصیات جداکننده منابع رسوب، سهم منابع رسوب در تولید رسوب تعیین می‌شود. این تحقیق در آبخیزی به مساحت ۳۲۷۸/۹۱ هکتار در جنوب شهرستان گرگان به نام تول‌بنه انجام شد. این حوزه با متوسط تولید رسوب معلق سالانه ۱۴۷۰۹/۹۷ تن در هکتار از آبخیزهای بحرانی از نظر تولید رسوب است. در این تحقیق از آزمایش XRF استفاده شده و از ۱۷ ترکیب به عنوان ردیاب استفاده شد. بدین منظور این حوضه به پنج واحدکاری و سه مقطع از رودخانه اصلی تقسیم شد. از هر واحدکاری سه نمونه برداشت شد. نمونه‌های منطقه منشأ با رسوبات حاصل از دو نوبت نمونه‌برداری از رسوب خروجی حوضه در زمان‌های مختلف و همچنین ترکیب دو نمونه رسوب مقایسه شدند. نتایج با آزمون تحلیل عاملی و تحلیل تشخیص مورد آنالیز قرار گرفت. ترکیبات CaO ، SiO_2 ، Rb_2O و X_2 به عنوان منشأیاب در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن است که مقطع شماره پنج در آبراهه اصلی با متوسط ۱۹/۵۴ درصد بیشترین سهم را در تولید رسوب معلق دارد. همخوانی خوب نتایج با مشاهده‌های میدانی نشان می‌دهد که روش منشأیابی استفاده شده در این بررسی، روشی ارزشمند برای تعیین سهم منابع تولید رسوب معلق در حوزه آبخیز است.

واژه‌های کلیدی:

ردیاب‌ها، منابع رسوب، تحلیل تشخیص، منشأیابی، آبخیز تول‌بنه



Quarterly Journal of
Environmental Erosion Researches
No. 11, Autumn 2013, pp: 27-38
www.magazine.hormozgan.ac.ir

Determining Land Units Contributions to Suspended Sediment Yield Using Sediment Fingerprinting Method (Case Study: Tull Bane Basin, Golestan Province)

Kohzad heidary¹, Ali Najafi Nejad², Farhad khormali³, Manochehr Baba Nejad⁴

- 1- Ph.D. candidate of Watershed Management Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan
- 2- Associate professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
- 3- Associate professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources
- 4- Assistant professor, Golestan University

Abstract

Fingerprint method is one of the new methods to determine the contribution of suspended sediment in the land units. 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 sediments transported to watershed outlet. This research carried out in the Tull Bane watershed with 3278.91ha area, located in the south of Gorgan, Golestan province. This watershed with 14709.97 ton/year sediment yield is one of the most critical watersheds in the province. XRF experiments were used in this study and the 17 compounds were used as tracer. The watershed divided into five land units as well as the main river was divided into three sections. Three samples were taken from each land unit. Samples with two samples of the sediment samples at various watershed outlets as well as a combination of two sediment samples were compared. Test results were analyzed by factor analysis and discriminant analysis. Compounds CaO, SiO₂, Rb₂O and X₂ were considered as tracer. Results showed bank river No. 5 has maximum share in suspended sediment with 19.54 percent. The fingerprinting approach to source ascription is appeared as providing valuable information regarding suspended sediment sources in the study catchments.

Keywords:

Tracers, Sediment Sources, Discriminant Analysis, Fingerprinting, Tull Bane Watershed

۱. مقدمه

لازمه اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب، کسب اطلاعات از اهمیت نسبی منابع رسوب و سهم آنها در تولید رسوب معلق و در نتیجه شناسایی مناطق بحرانی آبخیز است. از روش‌های معمول جمع‌آوری اطلاعات یاد شده در زمینه منابع رسوب می‌توان به پین‌ها و پلات‌های فرسایشی، بررسی‌های چشمی منابع رسوب از طریق عکس‌ها و مشاهدات میدانی (Collins & Walling, 2002)، اندازه‌گیری بار رسوبی در انتهای زیرحوزه‌های آبخیز اصلی برای تعیین سهم نسبی آنها در تولید رسوب (Walling & Woodward, 1995) اشاره نمود، اما کاربرد این روش‌ها معمولاً با مشکلات نمونه‌گیری مکانی و زمانی و تنگنای اجرای مواجه است و بعضی از آنها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارند (Collins & Walling, 2004)، از آنجا که این روش‌ها بیشتر برای اندازه‌گیری فرسایش ارائه شده‌اند، در نتیجه امکان مرتبط کردن منابع رسوب به رودخانه و تولید رسوب انتهای حوضه را فراهم نمی‌کنند.

به دلیل وجود مشکلات یاد شده در کاربرد روش‌های سنتی، روش انگشت‌نگاری^۱ یا ردیابی یا به‌طور ساده‌تر منشأیابی 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 (Walling, 2005). این روش برخلاف روش‌های سنتی با مرتبط کردن منابع رسوب به رودخانه و تولید رسوب، به‌طور مستقیم سهم منابع رسوب را تعیین می‌کند. نتایج تحقیقات Walling, Krause et al., 2003 و Blake et al., 2012 و et al., 2008 بیانگر کارایی روش منشأیابی یا انگشت‌نگاری به عنوان روشی موفق و مؤثر برای تعیین منابع رسوب بوده است. مهمترین اصل این روش این است که منابع مختلف رسوب با استفاده از تعدادی از خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و آلی قابل شناسایی و تشخیص است و با مقایسه این خصوصیات با همان خصوصیات در نمونه‌های رسوب می‌توان سهم و اهمیت نسبی منابع رسوب را در تولید رسوب به دست آورد. از مهمترین مزایای آن می‌توان به سرعت زیاد و اقتصادی بودن آن اشاره کرد، یعنی این روش تنها به جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل نمونه‌های رسوب و خاک منابع مختلف به جای پایش دراز مدت و گران قیمت فرسایش و حمل رسوب نیاز دارد (حکیم‌خانی و همکاران، ۱۳۸۷). مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که برای تعیین سهم و اهمیت نسبی منابع رسوب از لایه‌های اطلاعاتی مختلفی مانند کاربری اراضی، فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی (Russell, 2001) و واحدهای سنگ‌شناسی، (Collins & Walling, 2002) استفاده شده است.

به رغم توسعه مطلوب روش منشأیابی رسوب در طول بیش از دو دهه گذشته و پتانسیل‌های بالای آن در تعیین منابع رسوب، هنوز عدم قطعیت‌هایی نیز در روش تحقیق آن وجود دارد. از این عدم قطعیت‌ها می‌توان به نبود یک دستورالعمل مناسب برای انتخاب مناسب‌ترین ترکیب از ردیاب‌ها برای تفکیک منابع رسوب در حوضه‌ها و مناطق مختلف اشاره کرد (Collins & Walling, 2002). با اینکه مطالعاتی وجود دارد که نشان می‌دهد عناصر ژئوشیمیایی برای جداسازی منابع مکانی نظیر واحدهای سنگ‌شناسی برای جداسازی نوع منابع رسوب مانند انواع فرسایش‌ها و کاربری‌های اراضی مناسب هستند، ولی با این حال تا به امروز اطلاعات کافی در مورد خصوصیتی منفرد یا ترکیبی از خصوصیات ردیاب که به عنوان منشأیاب قابلیت کاربری جهانی داشته باشد به دست نیامده است و این مسئله یکی از چالش‌های اصلی تحقیقات جدید در منشأیابی رسوب است.

دانشمندان هر ساله از روش‌های جدیدتری برای منشأیابی رسوبات معلق استفاده می‌کنند. Carter et al., 2003 روش‌های منشأیابی را برای آبخیز رودخانه آبری در کالیفرنیا انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که حاشیه آبراهه اصلی حوضه بیشترین سهم را در تولید رسوب معلق دارد. Walling et al., 2008 در تحقیقی در یکی از آبخیزهای انگلستان با استفاده از عنصر فسفر و عناصر شیمیایی رسوبات معلق را منشأیابی کردند. نتایج نشان داد که دیواره جانبی و بستر کانال آبراهه منبع اصلی تولید رسوب معلق است.

^۱ Fingerprinting techniques

در ایران نیز تحقیقاتی هر چند اندک در سال‌های اخیر انجام شده است که از آن جمله می‌توان به عطاپورفرد و همکاران (۱۳۸۴)، فیض‌نیا و همکاران (۱۳۸۹) و حکیم‌خانی و همکاران (۱۳۸۸) اشاره کرد. جدیدترین این تحقیقات مربوط به دهقانی و همکاران (۱۳۹۰) است که از روش‌های XRF^1 و XRD^2 برای منشأیابی رسوبات معلق در آبخیز نرماب در استان گلستان استفاده کردند و نتایج قابل قبولی بدست آوردند.

آبخیز تول‌بند یکی از زیرحوضه‌های آبخیز زیارت در استان گلستان است که با وجود سازند سنگ‌شناسی شمشک و فرسایش‌پذیری بالای آن، سالانه رسوب معلق زیادی (۱۴۷۰۹/۹۷ تن در هکتار در سال) را وارد رودخانه زیارت می‌کند. با توجه به اینکه ۲۰ تا ۳۰ درصد آب شرب شهر گرگان از این رودخانه تأمین می‌شود، بار رسوبی بالای آن سالانه هزینه زیادی به تصفیه‌خانه‌های شهر وارد می‌کند. لذا لزوم شناسایی منابع اصلی و عمده تولید رسوب معلق آن احساس می‌شود. در این مطالعه با توجه به اهمیت نقش واحدهای کاری در تولید رسوب معلق، با استفاده از روش XRF سهم انواع واحدهای کاری حوزه آبخیز تول‌بند در تولید رسوب معلق تعیین شد.

۲. مواد و روش‌ها

مشخصات حوضه مورد مطالعه

حوزه آبخیز تول‌بند از حوضه‌های کوهستانی کشور با وسعت ۳۲۷۸/۹۱ هکتار که در بین $36^{\circ} 36'$ تا $36^{\circ} 59'$ عرض شمالی و $54^{\circ} 23'$ تا $54^{\circ} 27'$ طول شرقی واقع شده و یکی از زیر حوضه‌های قره‌سو استان گلستان است. حداقل ارتفاع این حوزه ۱۱۱۵ متر و حداکثر آن ۳۰۲۰ متر است. آبراهه اصلی این حوزه با جهت کلی جنوب به شمال شرق نزولات جوی را جمع‌آوری می‌کند. در این حوضه، میانگین بارندگی سالانه برابر ۵۳۸ میلی‌متر است که بیشترین میزان بارندگی در آذرماه با ۴۹/۷ میلی‌متر و کمترین میزان بارندگی ۱۸/۸ میلی‌متر در مرداد ماه است. بیشترین سطح آن، حدود ۱۸۳۹/۷ هکتار (۵۶/۱ درصد سطح حوضه) پوشیده از جنگل و درختچه‌زار متراکم است و اراضی مرتعی بقیه حوزه را در بر می‌گیرند. ۹۲ درصد مساحت حوضه از بافت رسی و رسی‌لومی تشکیل شده که نشان از ریزدانه بودن بافت خاک منطقه مطالعاتی دارد. منطقه از نظر پتانسیل تولید رواناب دارای دبی پیک ۲۴/۹ مترمکعب بر ثانیه با دوره بازگشت ۲۵ ساله است. اهمیت حوزه از آن نظر است که این حوزه در ۱۳ کیلومتری بالادست شهر گرگان قرار داشته و ۳۰-۲۰ درصد آب شرب شهر گرگان از آن تأمین می‌شود و همچنین از مناطق مهم اکوتوریسم محسوب می‌شود.

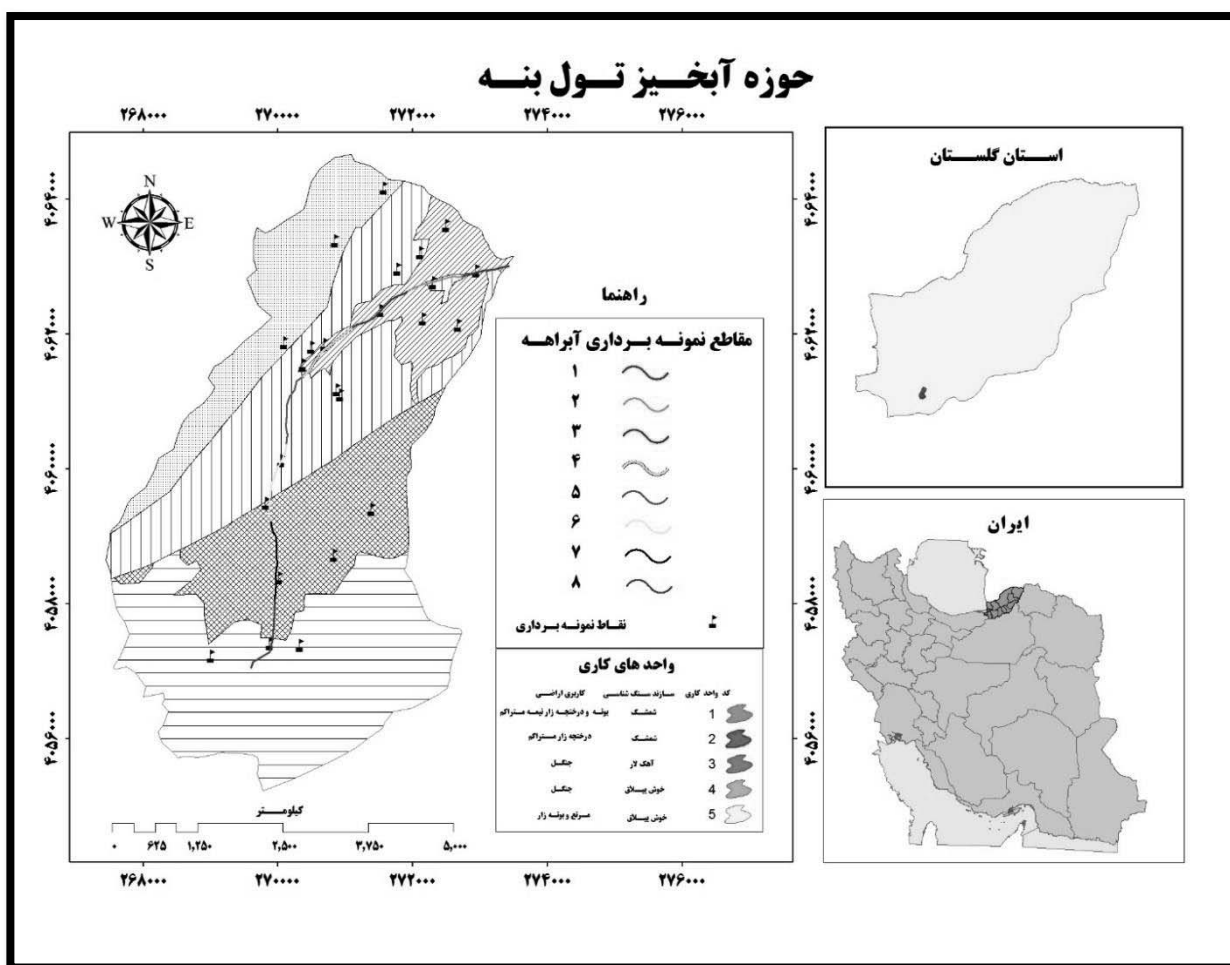
تهیه نقشه واحد کاری

از آنجاییکه جریان‌های واریزه‌ای نوعی شکست دامنه محسوب می‌شوند (Varnes, 1978) و همچنین جریان واریزه‌ای از تغییر شکل جریانات کوچک ابتدایی از طریق وارد شدن مقدار زیادی رسوب از بستر و کناره‌های رودخانه به درون جریان نیز ایجاد می‌شود (Fannin, 1993)، لذا نیاز به بررسی خصوصیات رسوب‌شناسی، هیدرولیکی و مکانیکی دامنه‌ها و همچنین بستر و کناره‌های آبراهه است. برای تهیه واحدهای کاری با توجه به مرور منابع و تحقیقات صورت گرفته در منطقه، لایه‌های اطلاعاتی واحد سنگ‌شناسی و کاربری اراضی بعنوان نقشه‌های تلفیقی انتخاب شدند. قبل از استفاده از نقشه کاربری اراضی، با استفاده از بازدیدهای میدانی اصلاحات لازم در زمینه تغییرات نوع کاربری و مرز واحدها انجام شد. سپس نقشه‌های سنگ‌شناسی با نقشه کاربری اراضی اصلاح شده در محیط GIS^3 تلفیق شدند. از تلفیق این لایه‌ها همانطور که در شکل یک دیده می‌شود، پنج واحد کاری به دست آمد. بستر رودخانه و کناره‌های آن به طور جداگانه در نظر گرفته شدند. اطلاعات کاربری اراضی و سنگ‌شناسی هر واحد کاری و همچنین مکان دقیق محل‌های نمونه‌برداری و مرزبندی‌های واحدهای کاری در شکل ۱ مشخص شده است.

^۱ X- Ray Fluorescence

^۲ X-ray Diffraction

^۳ Geographic Information System



شکل ۱. موقعیت مکانی واحدهای کاری و محل‌های نمونه‌برداری در آبخیز تول‌بنه

مراحل نمونه‌برداری

عملیات نمونه‌برداری در دو محدوده صورت گرفته است. محدوده اول، نمونه‌برداری از سه تا پنج سانتیمتری خاک سطحی واحدهای کاری (Rhoton, 2011؛ Martínez, 2010) است. در این مرحله در هر واحد کاری، سه منطقه برای استقرار ترانسکت ۲۰ متری تعیین شد. برای استقرار ترانسکت از روش تصادفی - سیستماتیک استفاده شد (Martínez, 2010). سپس بر روی ترانسکت به فواصل یک متری نمونه‌برداری صورت گرفت. در آخر همه نمونه‌های گرفته شده در طول ترانسکت با هم مخلوط، کوبیده و یک کیلو نمونه همگن (Walling et al., 2008) تهیه شد. مشخصات واحدهای کاری در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱. مشخصات واحدهای کاری، آبخیز تول‌بنه، زیارت

کد واحد کاری	سنگ‌شناسی	کاربری اراضی	بافت خاک	شیب متوسط (درصد)
واحد شماره ۱	شمشک	بوته و درختچه‌زار نیمه‌متراکم	شنی - لومی	۲۳
واحد شماره ۲	شمشک	درختچه‌زار متراکم	رسی و رسی - لومی	۲۱
واحد شماره ۳	آهک لار	جنگل	رسی - لومی	۴۸
واحد شماره ۴	خوش‌بیلاق	جنگل	رسی	۵۳
واحد شماره ۵	خوش‌بیلاق	مرتع و بوته‌زار	رسی - لومی	۶۷

در محدوده دوم نمونه برداری، ابتدا آبراهه اصلی حوضه به بازه‌های یک کیلومتری تقسیم و در هر بازه از رودخانه از دیواره کناری رودخانه نمونه‌گیری انجام شد (Martínez et al., 2010). نمونه‌گیری در این مرحله بدین صورت انجام شد که ابتدا منطقه نمونه‌گیری بر روی دیواره آبراهه، مشخص و سپس نمونه‌برداری از خاک سطحی در جهت شیب و از بالا به پایین و به فواصل یکسان با توجه به طول دیواره (از ۰/۵ تا ۴ متری) انجام شد (Martínez et al., 2010). جدول ۲ مشخصات مقاطع نمونه‌برداری آبراهه را نشان می‌دهد. نمونه‌های جمع‌شده در پایین دیواره با هم مخلوط شده سپس این نمونه‌ها با هم مخلوط شده و یک نمونه همگن یک کیلویی تهیه شد. تعداد کل نمونه‌هایی که برای آزمایش XRF استفاده شد در هر واحدکاری با تلفیق سه نمونه، یک نمونه همگن به‌دست آمد همچنین سه مقطع از آبراهه که با توجه به بازدیدهای میدانی احتمال ایجاد منبع برای رسوب معلق بود نیز بررسی شد. بعد از انجام آزمون تفاوت‌ها در نرم‌افزار اکسل، تنها بین سه مقطع از آبراهه‌ها از نظر عناصر منشأیاب تفاوت معنی‌دار وجود داشت که تنها نتایج این سه مقطع در جداول نتایج ذکر شده است. نمونه‌های بخش منبع رسوب معلق را ابتدا با دو نمونه رسوب معلق که نمونه رسوب اول در فصل بهار و نمونه رسوب دوم در فصل تابستان از خروجی حوضه گرفته شده است به‌صورت مجزا مقایسه و در نهایت با میانگین نتایج به دست آمده از ترکیبات دو رسوب نیز مقایسه شد.

جدول ۲. مشخصات مقاطع نمونه‌برداری از آبراهه اصلی

شماره مقطع آبراهه اصلی	واحد سنگ‌شناسی	کاربری اراضی
مقطع شماره ۱	شمشک	بوته و درختچه‌زار نیمه‌متراکم
مقطع شماره ۲	شمشک	بوته و درختچه‌زار نیمه‌متراکم
مقطع شماره ۳	شمشک	بوته و درختچه‌زار نیمه‌متراکم
مقطع شماره ۴	شمشک	درختچه‌زار متراکم
مقطع شماره ۵	شمشک	جنگل
مقطع شماره ۶	شمشک	جنگل
مقطع شماره ۷	خوش بیلاق	جنگل
مقطع شماره ۸	خوش بیلاق	مرتع و بوته‌زار

در این مطالعه ۱۸ ردیاب شامل ترکیبات Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، K_2O ، TiO_2 ، P_2O_5 ، Na_2O ، MnO ، ZrO_2 ، Cl ، SrO ، MgO ، SO_3 ، CaO ، SiO_2 ، Rb_2O ، Ti/Zr و $Al/Na+Mg+Ca$ L.O. I استفاده شد. تجزیه آزمایشگاهی و تعیین غلظت عناصر با استفاده از روش XRF با استفاده از دستگاه Bruker – S4 EXPLORER (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۰) انجام شده است.

روش منشأیابی رسوبات آبی

این روش دارای دو مرحله به شرح زیر است.

انتخاب ترکیبی بهینه از ردیاب‌هایی که قادر به تفکیک منابع رسوب (واحدهای کاری) باشد: در این تحقیق برای انتخاب ترکیبی مناسب از ردیاب‌ها که به‌طور جمعی قادر به تفکیک منابع رسوب باشند از روش تحلیل عاملی و تحلیل تشخیص گام به گام استفاده شد (Hair et al., 1998). سطح معناداری آماره F برای ورود و حذف متغیر نیز به ترتیب برابر ۰/۰۵ و ۰/۱ در نظر گرفته شد. برای نشان دادن توان جداسازی یا طبقه‌بندی تحلیل تشخیص، معناداری توابع، اختلاف گروه‌ها و ماتریس طبقه‌بندی بررسی شده است. درصد طبقه‌بندی صحیح مهم‌ترین معیار بررسی توان طبقه‌بندی صحیح تحلیل تشخیص است که برای تعیین آن از ماتریس طبقه‌بندی استفاده شد. در ضمن به منظور ارزیابی نتایج تحلیل تشخیص از روش ارزیابی متقابل استفاده شد. ترکیب مناسب به‌دست آمده از ردیاب‌ها در این مرحله برای تعیین سهم منابع رسوب معلق (در اینجا واحدهای کاری) در مرحله بعد استفاده می‌شود.

تعیین سهم واحدهای کاری (منابع رسوب) در تولید رسوب معلق: روش مدل‌های ترکیبی چند متغیره بیش از سایر روش‌ها برای تعیین سهم منابع رسوب استفاده می‌شود (برای مثال Walling, 2005). در مدل یاد شده از برنامه نویسی خطی

برای حل تعدادی از معادلات استفاده می‌شود (Rowan et al., 2000، Foster & Lees, 2000). در این مدل فرض بر این است که ترکیب و مخلوط شدن ردیاب‌ها از منابع (منشأهای) مختلف به صورت خطی است. از این رو مدل یا معادله ترکیبی برای هر یک از ردیاب‌ها به صورت زیر در نظر گرفته شد (حکیم‌خانی و همکاران، ۱۳۸۸):

$$\widehat{X}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} b_j \quad \text{رابطه (۱)}$$

\widehat{X}_i برابر با مقدار برآوردی ردیاب i (۱= i و ۲ و ... و m)، a_{ij} مقدار میانگین ردیاب i در واحدکاری j (۱= j و ۲ و ... و n)، b_j سهم واحدکاری j ، n تعداد واحدهای کاری و m تعداد خصوصیات ردیاب است. برای هر یک از ردیاب‌ها، معادله یک 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 می‌توان سهم هر یک از واحدهای کاری را به دست آورد، چون مجموعه معادلات یاد شده دارای مجهولات زیادی بوده و راه‌حل‌های متنوعی می‌تواند داشته باشد از این رو برای بدست آوردن نتایج بهینه در تعیین سهم منابع رسوب معلق و به جای حل مستقیم از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود (Walling & Collins, 2000). در این تحقیق از مدل زیر استفاده شده است (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۰):

$$E = \sum_{t=1}^T \left\{ \left[\left| B_t - \left(\sum_{s=1}^S V_{st} P_s \right) \right| \right] / B_t \right\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه B_t مقادیر حاصل از تحلیل عاملی در هر واحد کاری، V_{st} مقدار متوسط همان مقادیر حاصل شده از تحلیل عاملی در رسوب معلق خروجی، P_s سهم هر واحد کاری در تولید رسوب، S نام واحد، T تعداد ترکیبات حاصل شده از آنالیز فاکتور و E مقدار خطای نسبی است.

برای حل این معادله فرضیاتی وجود دارد که به شرح زیر است:

مجموع ضرایب سهم هر یک از زیرحوضه‌ها باید برابر یک باشد:

$$\sum_{s=1}^S P_s = 1 \quad \text{رابطه (۳)}$$

مقادیر ضریب سهم هر یک از زیرحوضه‌ها باید بین صفر و یک باشد:

$$0 \leq P_s \leq 1 \quad \text{رابطه (۴)}$$

با در نظر گرفتن شرایط گفته شده (معادله سه و چهار)، باید به هر واحد یک P_s اختصاص داده و معادله (آخر) را حل نمود و با انجام عمل سعی و خطا آنقدر P_s ها را تغییر داد تا به حداقل خطای نسبی رسید. در نهایت سهم هر کدام از واحدهای کاری برای نمونه رسوب معلق مورد نظر بدست آمد. این کار را برای تمام نمونه‌های رسوب انجام داده و از مقادیر سهم هر یک از واحدها برای به دست آوردن سهم متوسط میانگین‌گیری شد. ردیاب‌های مورد استفاده در این مرحله ترکیب به دست آمده در مرحله یک می‌باشند.

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

ارزیابی نتایج مدل چند متغیره ترکیبی: از معیارهای خطای نسبی (Walling & Woodward, 1995)، و روش‌های مستقیم و مشاهدات میدانی (Collins et al., 1998) می‌توان برای ارزیابی نتایج مدل‌های چندمتغیره ترکیبی استفاده کرد. در این تحقیق نتایج به روش‌های بالا ارزیابی شد. معیارهای خطای نسبی را می‌توان برای هر ردیاب، ترکیب ردیاب‌ها برای هر یک از نمونه‌های رسوب و کل نمونه‌ها با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده آنها در نمونه‌های رسوب محاسبه کرد. به منظور بررسی تغییرات زمانی بر روی سهم واحدهای کاری در تولید رسوب معلق از آزمون t دو نمونه‌ای مستقل استفاده شد.

۳. نتایج

بعد از انجام مراحل ذکر شده و آنالیزهای آماری نتایج به صورت خلاصه در قالب جداول زیر ذکر شده است. خطای نسبی مدل چند متغیره مورد استفاده برای تمام واحدهای کاری کمتر از پنج درصد بود و میانگین خطای نسبی برای تمام نمونه‌ها و تمام واحدهای کاری تقریباً چهار درصد به دست آمد. خطای نسبی کم بیانگر صحت و کارایی مناسب آن در برآورد سهم واحدهای کاری در تولید رسوب معلق است. مشاهدات میدانی نیز نتایج به دست آمده را بجز نتایج حاصل شده از واحد کاری شماره یک که انتظار بر این بود که سهم بالایی از رسوب را به خود اختصاص دهد، عملکرد مناسب مدل را تأیید می‌کند. در این تحقیق به منظور به دست آوردن عناصر منشأیاب از تحلیل عاملی و تحلیل تشخیص استفاده شد و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. ماتریس عامل دوران یافته حاصل از نتایج داده‌های آزمایش XRF

متغیرها	عامل‌ها		
	۱	۲	۳
SO ₃	-۰/۳۹۷	-۰/۰۵۶	-۰/۷۲۸
MgO	-۰/۱۷۴	-۰/۰۶۶	-۰/۹۳۴
SrO	-۰/۵۹۸	-۰/۶۷۰	-۰/۴۰۲
Cl	-۰/۵۴۳	-۰/۵۶۹	-۰/۳۷۸
ZrO ₂	-۰/۱۷۷	-۰/۰۵۷	-۰/۹۵۷
MnO	-۰/۳۵۴	-۰/۵۹۵	-۰/۵۲۷
Na ₂ O	-۰/۰۲۰	-۰/۷۴۸	-۰/۲۲۵
P ₂ O ₅	-۰/۴۵۰	-۰/۶۹۸	-۰/۴۰۳
TiO ₂	-۰/۳۸۶	-۰/۸۹۸	-۰/۰۲۷
K ₂ O	-۰/۸۷۴	-۰/۲۲۱	-۰/۱۴۷
Fe ₂ O ₃	-۰/۱۹۳	-۰/۸۲۹	-۰/۲۳۹
Al ₂ O ₃	-۰/۵۷۸	-۰/۶۶۴	-۰/۴۳۳
CaO	-۰/۹۸۳	-۰/۰۷۰	-۰/۰۳۶
SiO ₂	-۰/۷۸۱	-۰/۲۲۴	-۰/۱۱۷
Rb ₂ O	-۰/۴۶۷	-۰/۰۸۶	-۰/۱۱۸
X1*	-۰/۰۹۰	-۰/۳۶۰	-۰/۸۲۸
X2**	-۰/۹۴۷	-۰/۱۰۷	-۰/۲۱۹

راهنمای جدول: * : نسبت تیتانیوم به زرکانیوم است و ** : نسبت آلومینیوم به مجموع عناصر سدیم و منیزیم و کلسیم است. حال با استفاده از نتایج مراحل قبل می‌توان عناصری را که بیشترین سهم را در تفکیک واحدها دارد مشخص کرده و به عنوان منشأیاب برگزید. برای این منظور در آمار از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در این تحقیق با توجه به استفاده از آزمون تحلیل عاملی از نتایج نهایی این آزمون استفاده گردید. با توجه به اینکه عامل اول در آزمایش بیشترین همبستگی واریانس‌ها را دارد در نتیجه عناصری که در عامل اول قرار می‌گیرند، می‌توانند به عنوان منشأیاب مورد استفاده قرار گیرند. جدول ۴ به ترتیب اولویت استفاده، عناصر منشأیاب را نشان می‌دهند.

جدول ۴. اولویت استفاده از عناصر به عنوان منشأیاب با استفاده از آزمون تحلیل عاملی حاصل از آزمایش XRF

عامل اول	عامل دوم	عامل سوم
K ₂ O	MnO	SO ₃
CaO	SrO	MgO
SiO ₂	Cl	ZrO ₂
Rb ₂ O	Na ₂ O	X1
X ₂	P ₂ O ₅	-
-	TiO ₂	-
-	Fe ₂ O ₃	-
-	Al ₂ O ₃	-

مناسب‌ترین عناصر از ۱۸ ترکیب مورد مطالعه که بیشترین قدرت در تفکیک را دارا هستند حاوی K₂O، CaO، SiO₂، Rb₂O و X₂ می‌باشند. بنابراین می‌توان از ترکیب‌های یاد شده برای تعیین سهم موجود در واحدهای کاری حوضه مورد مطالعه در تولید رسوب معلق استفاده کرد. با توجه به اینکه هر حوضه ویژگی‌های خاص خود را دارد لذا نمی‌توان با اطمینان ترکیب عناصر فوق را به عنوان منشأیاب توصیه کرد. همچنین با وجود ترکیبات شیلی در دو سازند سنگی (خوش‌بیلاق و شمشک) و همچنین آهکی بودن سازند سنگی لار، اکسید عناصر ذکر شده در تفکیک سازند سنگی لار از خوش‌بیلاق و شمشک دقت بالایی دارد. ترکیب Rb₂O بجز در مقطع آبراهه شماره یک (۰/۴۱) در واحدهای دیگر مقدار مشابهی را نشان می‌دهد لذا احتمال خطا در محاسبات ایجاد می‌کند. بیش از ۹۰ درصد از سطح خشکی‌های کره زمین را اکسیژن و سیلیسیوم تشکیل داده است. علاوه بر معنی‌دار بودن نتایج ترکیب SiO₂ در بین واحدهای کاری، ولی این ترکیب در همه سازندهای سنگی وجود دارد و با قطعیت بالا نمی‌توان از این اکسید به عنوان ردیاب استفاده نمود. لذا برای صحت‌سنجی نتایج مدل، از مشاهدات میدانی و تحلیل خصوصیات سنگ‌شناسی، خاک‌شناسی و مرفولوژی منطقه استفاده شد.

به‌منظور بررسی مراحل قبلی و تعیین عناصر منشأیاب از تحلیل تشخیص استفاده شد. جدول ۵ درصد واریانسی که به‌وسیله هر یک از توابع ممیزی برآورد می‌شود را نشان می‌دهد. در جدول ویلکس لامبدا با توجه به ستون معناداری مشاهده می‌شود که تابع به شدت معنادار است. به‌علاوه این جداول بیانگر این نتیجه است که یک تابع به‌عنوان مدل برای داده‌ها تعیین شده است که اطلاعات مربوط به برازش تابع در این جداول بیان شده است.

جدول ۵. خلاصه متغیرهای وارد شده به تابع تشخیص

مرحله	Entered	Wilks' Lambda			Exact F			
		Statistic	df 1	df 2	df 3	Statistic	df 1	df 2
۱	عامل اول	۰/۵۶۷	۱	۱	۸	۶/۱۰۹	۱	۸
۲	عامل دوم	۰/۱۴۳	۲	۲	۸	۲۰/۹۰۴	۲	۷

پس از تعیین عناصر تعیین متغیرهای منشأیاب با استفاده از تحلیل عاملی و تأیید صحت نتایج با استفاده از آنالیز تشخیص، سهم هر واحدکاری در تولید رسوبات خروجی رودخانه با استفاده از رابطه ۲ که در واقع رابطه تعیین خطا است، محاسبه شد. بدین منظور ابتدا به هر واحدکاری PS تعیین داده شد و سپس با استفاده از روش سعی و خطا با نرم‌افزار اکسل برای به حداقل رساندن مقدار خطای نسبی (E در رابطه ۲) مقادیر مختلف PS استفاده شد تا نتیجه مطلوب حاصل گردد. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج با دو نمونه رسوب خروجی از حوضه و همچنین نتایج میانگین ترکیبات دو رسوب خروجی مقایسه شد.

جدول ۶. درصد سهم زیرحوضه‌ها با استفاده از آزمایش XRF در حوزه آبخیز تول‌بنه

شماره نمونه	نمونه خروجی ۱ (درصد)	نمونه خروجی ۲ (درصد)	میانگین (درصد)
واحد کاری ۱	۰/۰۰۰۰۱	۱/۲۳۳	۰/۶۷۸
واحد کاری ۲	۰/۱۳۰	۱۲/۷۱۵	۰/۸۲۶
واحد کاری ۳	۱/۹۷۷	۵/۳۸۰	۳/۱۴
واحد کاری ۴	۲۰/۶۴۱	۱۷/۹۹۰	۲۰
واحد کاری ۵	۲۱/۱۱۰	۱۸/۴۸۹	۲۰/۴۱
حاشیه آبراهه ۱	۱۹/۹۹۲	۱۳/۸۱۴	۱۹/۵۱
حاشیه آبراهه ۳	۱۴/۵۱۰	۱۴/۴۶۳	۱۴/۳۴
حاشیه آبراهه ۵	۲۱/۶۳۵	۱۵/۹۱۱	۲۱/۱

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، واحدکاری پنج که دارای کاربری مرتع و بوته‌زار و شیب بالای ۶۰ درصد است نسبت به واحد کاری چهار که دارای کاربری جنگل متراکم و شیب پایین‌تری است، تولید رسوب معلق بیشتری دارد ولی اختلاف معنی‌داری علارغم تفاوت شیب و پوشش گیاهی که بین این دو واحدکاری وجود داشت، در تولید رسوب معلق در سطح خطای ۵ درصد وجود نداشت. با توجه به جدول ۶، سهم واحدکاری شماره سه در تولید رسوب معلق با استفاده از روش‌های آزمایش XRF نسبتاً کم برآورد شده است. این سازند جزء سازندهای سنگی از نوع آهکی و مقاوم است و انتظار نیز بر این است که این سازند نقش کمتری در تولید رسوب معلق داشته باشد. همچنین صحت این نتایج با انجام بازدیدهای میدانی تأیید شد. با توجه به تفاوت زیادی که از نظر سنگ‌شناسی بین این سازند و دو سازند دیگر (شمشک و خوش‌بیلاق) وجود دارد، لذا می‌توان یکی از دلایل اصلی عملکرد خوب مدل را همین عامل دانست. مجموع سهم سه مقطع آبراهه به طور متوسط ۵۶ درصد از تولید رسوب معلق در خروجی حوضه را به خود اختصاص داده است که با توجه به بازدیدهای میدانی و عبور بخش وسیعی از آبراهه از روی سازند سنگ‌شناسی شمشک که از سازندهای شیلی و حساس به فرسایش است، این نتیجه مورد انتظار است که با نتایج جهانسیور و همکاران (۱۳۸۰) هم‌خوانی دارد. همچنین مستعد بودن حاشیه آبراهه به حرکات توده‌ای کناری و همچنین سوابق متعدد وقوع جریان‌های واریزه‌ای نیز خود دلیلی بر صحت این نتایج است.

نتایج مربوط به آنالیزهای آماری بررسی اثر زمان بر روی سهم زیرحوضه‌ها در تولید رسوب معلق نشان داد که با توجه به اینکه سطح معنی‌داری برای آزمون لیون ۰/۰۵۱ (بزرگتر از ۰/۰۵) است، بنابراین واریانس نتایج دو نمونه رسوب و میانگین دو نمونه رسوب در سطح اطمینان ۰/۹۵ اختلاف معنی‌داری بین آنها وجود ندارد. در نتیجه عامل زمان بر روی سهم واحدهای کاری در تولید رسوب معلق تأثیر چندانی ندارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش XRF به شناسایی منشأ رسوب معلق در آبخیز تول‌بنه پرداخته شد. طبق نتایج بدست آمده، آبراهه اصلی حوضه با متوسط تولید رسوب معلق ۵۶ درصد، بیشترین سهم تولید رسوب را در کل حوضه به خود اختصاص داده است. که این نتایج با Walling et al., 2008 و Carter et al., 2003 که در تحقیقات آنها حاشیه آبراهه اصلی منشأ اصلی تولید رسوب معلق شناخته شده است، هم‌خوانی دارد. در کل مشخص شد که منشأیابی رسوبات آبی به روش XRF، روشی مناسب است که قادر به تعیین و تفکیک مناسب سهم واحدهای کاری در آبخیز تول‌بنه است. البته با توجه به شباهت زیاد سنگ‌شناسی و خاک‌شناسی برخی از واحدکاری و مقاطع آبراهه اصلی، این روش جهت صحت‌سنجی نتایج بی‌نیاز از اطلاعات تفصیلی خاک‌شناسی، سنگ‌شناسی و مرفولوژی منطقه نبود. علارغم تمام نکات ذکر شده، این روش مزایای زیادی نسبت به سایر روش‌های مستقیم و غیرمستقیم دارد که از مهمترین این مزایا می‌توان به سرعت بالا و اقتصادی بودن آن اشاره کرد. یعنی این روش تنها نیاز به جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل نمونه‌های رسوب معلق و خاک منابع مختلف واحدهای کاری به‌جای

پایش دراز مدت و گرانقیمت فرسایش و حمل رسوب دارد. برای دستیابی به سهم منابع یاد شده در تولید رسوب از روش‌های دیگر، نیاز به سال‌ها اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده با هزینه زیاد است. ضمن آنکه ممکن است ارتباط فرسایش بالادست با فرآیندهای رسوبگذاری و حمل رسوب نیز برقرار نشود. با توجه به اینکه همه ساله در دنیا روش‌های منشأیابی جدیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این نشان از عدم وجود روش مشخصی و دقیقی در عملیات منشأیابی است لذا توصیه می‌شود برای مطالعات تحقیقاتی بیشتر، نتایج این روش‌های رایج در کشور از جمله عناصر ژئوشیمیایی و مواد رادیو کتیو، مقایسه شود.

۵. مراجع

۱. جهانسیور، ر.، ۱۳۸۰. بررسی تأثیر عوامل خطر فرسایش خاک (عوامل مدل FAO) در میزان فرسایش با استفاده از (GIS) در حوزه آبخیز زیارت گرگان. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مرتع و آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ص ۱۰۷-۱۰۳.
۲. حکیم خانی، ش.، ح. احمدی، و ج. غیوریان، ۱۳۸۸. تعیین سهم فرسایش سطحی و زیرسطحی در تولید رسوب با استفاده از روش منشأیابی در حوزه آبخیز مرگن-ماکو، مجله دانش آب و خاک، شماره ۱، ص ۸۳-۹۶.
۳. دهقانی، ا.، م. مفتاح، ع. ظهیری، و ف. خرمالی، ۱۳۹۰. عوامل تشدید کننده فرسایش و رسوبگذاری در رودخانهها. گزارش طرح تحقیقاتی دفتر مدیریت منابع آب وزارت نیرو.
۴. عطاپور فرد، ع.، م. خدای، م. حسینی، و ح. گلبابی، ۱۳۸۴. بررسی امکان بکارگیری کانیهای رسی به عنوان منشأیاب در محاسبه رسوبدهی حوزه آبخیز لات شور، دومین کنفرانس ملی آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان، ص ۳۴۰-۳۵۱.
۵. فیض نیا، س.، ح. احمدی، م. معظمی، و ه. فهمی، ۱۳۸۹. بررسی و تعیین سهم منابع تولید رسوب با بهره گیری از ردیاب های طبیعی خاک در حوزه آبخیز ابوالفارس استان خوزستان، نشریه مرتع و آبخیزداری، شماره ۴: ۵۱۴-۵۰۳.
6. Blake, W.H., K.J. Ficken., P. Taylor., M.A. Russell., and D.E. Walling., 2012. Tracing crop-specific sediment sources in agricultural catchments, *Geomorphology*, v.139, p.322-329.
7. Carter, J., P.N. Owens., D.E. Walling., and G.J.L. Leeks., 2003. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system, *The Science of the Total Environment*, v.314, p. 513-53.
8. Collins, A.L., Walling, D.E., & Leeks, G.J.L., 1998. Use of composite fingerprints to determine the spatial provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 23, p. 31-52.
9. Collins, A.L., and D.E. Walling., 2002. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins, *Journal of Hydrology*, v. 261, p. 218-244.
10. Collins, A.L., and D.E. Walling., 2004. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects, *Progress in Physical Geography*, v.28, p.159-196.
11. Fannin, R.J., and T.P. Rollerson., 1993. Debris flows: some physical characteristics and behavior, *Canadian Geotechnical Journal*, v.30, p. 71-81.
12. Foster, I.D.L., and J.A. Lees., 2000. Tracers in geomorphology. In: Foster, I.D.L. (Ed.). *Tracers in Geomorphology*, Wiley, Chichester, p. 3-20.
13. Hair, J.F., R.E. Andersen., R.L. Tatham., and W.C. Black., 1998. *Multivariate Data Analysis*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
14. Krause, A.K., S.W. Franks., J.D. Kalma., R.J. Loughranb., and J.S. Rowanc., 2003. Multi-parameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia, *Catena*, v. 53, p. 327-348.
15. Martínez-Carreras, N., T. Udelhoven., A. Krein., F. Gallart., J.F. Iffly., J. Ziebel., L. Hoffmann., L. Pfister., and D.E. Walling., 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.
16. Rhoton, F.E., W.E. Emmerich., M.A. Nearing., D.S. McChesney., and J.C. Ritchie., 2011. Sediment source identification in a semiarid watershed at soil mapping unit scales, *Catena*, v. 87, p. 172-181.
17. Rowan, J.S., Goodwill, P., & Franks, S.W., 2000. Uncertainty estimation in fingerprinting suspended sediment sources. In: Foster, I.D L (Ed.). *Tracers in Geomorphology*, John Wiley, Chichester, 279-290.
18. Russell, M.A., D.E. Walling., and R.A. Hodgkinson., 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK, *Journal of Hydrology*, v. 252, p. 1-24.
19. Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Eds.), *Landslides -Analysis and Control*, Transportation Research Board Special Rep, v. 176, p. 11-33.
20. Walling, D.E., 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems, *Science of the Total Environment*, v. 344, p. 159-184.
21. Walling, D.E., and J.C. Woodward., 1995. Tracing sources of suspended sediment in river basins: a case study of the River Culm, Devon, UK, *Marine and Freshwater Research*, v. 46, p. 327-336.
22. Walling, D.E., and A.L. Collins., 2000. *Integrated assessment of catchment sediment budgets: A technical manual*, University of Exeter, p. 168.
23. Walling, D.E., A.L Collins., and R.W. Stroud., 2008. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments, *Journal of Hydrology*, v. 350, p. 274-289.