

منشأیابی رسوبات معلق و برآورد عدم قطعیت آن (مطالعه موردی: حوضه زیدشت-فشندک طالقان)

- ❖ ابوالحسن فتح آبادی؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، ایران.
- ❖ علی سلاجقه*؛ استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
- ❖ حمید پزشکی؛ استاد دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشگاه تهران، ایران.
- ❖ علی اکبر نظری سامانی؛ دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
- ❖ حامد روحانی؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، ایران.

چکیده

به منظور اجرای عملیات حفاظتی و مدیریت در حوزه آبخیز نیاز است تا سهم منابع مختلف تولید رسوب تعیین شود. طی سال‌های گذشته روش‌های منشأیابی در تعیین سهم منابع مختلف رسوب بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به تعداد کم نمونه‌های برداشتی از مناطق منشأ و همچنین وجود جواب‌های مختلف در نتیجه بیش‌برازشی، سهم منابع به دست آمده، دارای عدم قطعیت‌هایی است که لازم است مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در این تحقیق با استفاده از روش‌های مونت کارلو و گلو (GLUE) اقدام به تعیین عدم قطعیت جواب‌های به دست آمده با استفاده از روش ترکیبی چند متغیره در زیرحوضه زیدشت-فشندک طالقان گردید. بدین ترتیب که پس از برداشت نمونه‌های رسوب و منابع، مقادیر ۵۴ عنصر ژئوشیمیایی و ۳ عنصر آلی تعیین گردید. سپس با استفاده از آماره H کروسکال والیس و تحلیل تشخیص چند متغیره، ترکیب بهینه متشکل از ۱۷ عنصر تعیین، و با استفاده از مدل ترکیبی چند متغیره، سهم منابع تعیین شد. نتایج به دست آمده در منطقه نشان داد که سهم منابع زیرسطحی نسبت به منابع سطحی (فرسایش سطحی و شیاری) بیشتر بوده و اختلاف بین حد بالا و پایین به دست آمده برای منابع مختلف، بالا بوده که نشان‌دهنده عدم قطعیت بالای این روش است.

واژگان کلیدی: رسوب معلق، عدم قطعیت، گلو، منشأیابی، مونت کارلو

۱. مقدمه

مورد بررسی، خصوصیات هر منبع تغییر معنی داری نداشته است، اشاره کرد) پایه گذاری شده است [۶]. البته در عمل ممکن است تمام فرضیات برآورده نشود. این مسأله موجب به وجود آمدن خطا و عدم قطعیت‌هایی در منشأیابی رسوب می‌گردد. تعداد نمونه‌ها و ردیاب‌ها که برای هر منبع برداشت و اندازه‌گیری می‌شود، محدود است و در محیط طبیعی، خصوصیات مکانی بسیار متغیر است. این در حالی است که در مدل ترکیبی چند متغیره، مقادیر میانگین هر خصوصیت مورد استفاده قرار می‌گیرد و به نوعی این عدم قطعیت، در مدل‌سازی وارد نمی‌شود. مدل ترکیبی چند متغیره نیز به دلیل بیش برآزشی دارای عدم قطعیت است [۷، ۱۳، ۴].

کروس و همکاران (۲۰۰۳) سهم منابع سطحی و زیرسطحی و میزان عدم قطعیت آن را در رسوب خروجی از یک حوضه ۱/۲ کیلومتر مربعی را در New south Wales استرالیا تعیین کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که سهم فرسایش خندقی در رسوب‌های برداشت شده از پنج نقطه (که در بالادست آنها منابع‌های مرتع و خندق در نظر گرفته شده بود) ۹۰ تا ۹۸ درصد بوده است [۹]. کولینز و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر اطلاعات پیشین (در قالب درصد فرسایش کناری) و همچنین استفاده از ویژگی‌هایی از قبیل وزن‌هایی که نشان دهنده تغییرات درونی گروهی و توان تفکیک هر ردیاب باشد، بر روی جواب‌های به دست آمده از روش ترکیبی چند متغیره تعیین و عدم قطعیت آن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل آنالیز حساسیت، نشان‌دهنده بهبود عملکرد مدل در کاهش باند عدم قطعیت و تغییرات جواب‌های به دست آمده برای منابع مختلف و زیر حوضه‌های مختلف بود [۴]. مارتینز کریبر و همکاران (۲۰۱۰) استفاده از خصوصیات انعکاس طیفی در منشأیابی را مورد بررسی قرار دادند. در نهایت نتایج تحقیق ایشان نشان داد که خصوصیات انعکاس طیفی، قابلیت تفکیک منابع را داشته‌اند و همچنین سهم‌های به دست آمده برای منابع مختلف دارای عدم قطعیت بالایی بودند [۳]. کولینز و همکاران (۲۰۱۰)،

آگاهی از منابع تولید رسوب برای تعیین دقیق بیلان رسوب، سهم اشکال مختلف فرسایش (سطحی، شیاری، خندقی و غیره)، بهبود عملکرد مدل‌های توزیعی فرسایش و رسوب و عملیات کنترل فرسایش و رسوب ضروری است [۴، ۷، ۱۳]. بنابراین لازم است تا با استفاده از روش مناسب سهم منابع مختلف را در تأمین رسوب حوضه تعیین کرد.

روش‌های تعیین منبع رسوب به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های غیرمستقیم با اندازه‌گیری و یا تخمین میزان فرسایش با استفاده از روش‌های مختلف سهم منابع مختلف تعیین می‌شود. اما این روش‌ها علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر هنوز نتوانسته‌اند ارتباط بین منبع و رسوب را به خوبی برقرار کنند و عدم قطعیت‌های زیادی در روندیابی رسوب وجود دارد [۳].

روش‌های مستقیم، ارتباط بین منبع و رسوب را به طور مستقیم بررسی می‌کنند و نیاز به اطلاعات جانبی کمتری دارد. از این روش‌ها، می‌توان به روش‌های رسوب‌نگار و حلقه هیسترتیس و روش انگشت‌نگاری اشاره نمود [۳]. که در این میان طی دهه گذشته، روش انگشت‌نگاری در تعیین سهم منابع مختلف رسوب کاربرد وسیعی داشته است.

در روش انگشت‌نگاری فرض بر این است که خصوصیات رسوب انتقال یافته (ژئوشیمیایی، مغناطیسی و غیره) از نقاط مختلف حوضه با تیپ خاک متفاوت یا از عمق‌های مختلف پروفیل خاک در طول انتقال و در نتیجه رسوب‌گذاری تغییر نکرده و با مقایسه این خصوصیات در رسوب و منبع، می‌توان سهم منابع مختلف رسوب را تعیین کرد [۳، ۹]. در روش انگشت‌نگاری، مقدار ردیاب‌های مختلف در منابع و در نمونه‌های رسوب اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت با استفاده از مدل ترکیبی چند متغیره، سهم هر یک از منابع تعیین می‌گردد. روش انگشت‌نگاری بر اساس یک سری فرضیات (از قبیل: ۱- فرسایش انتخابی باعث تغییر خصوصیات ردیاب نمی‌شود ۲- در طول دوره

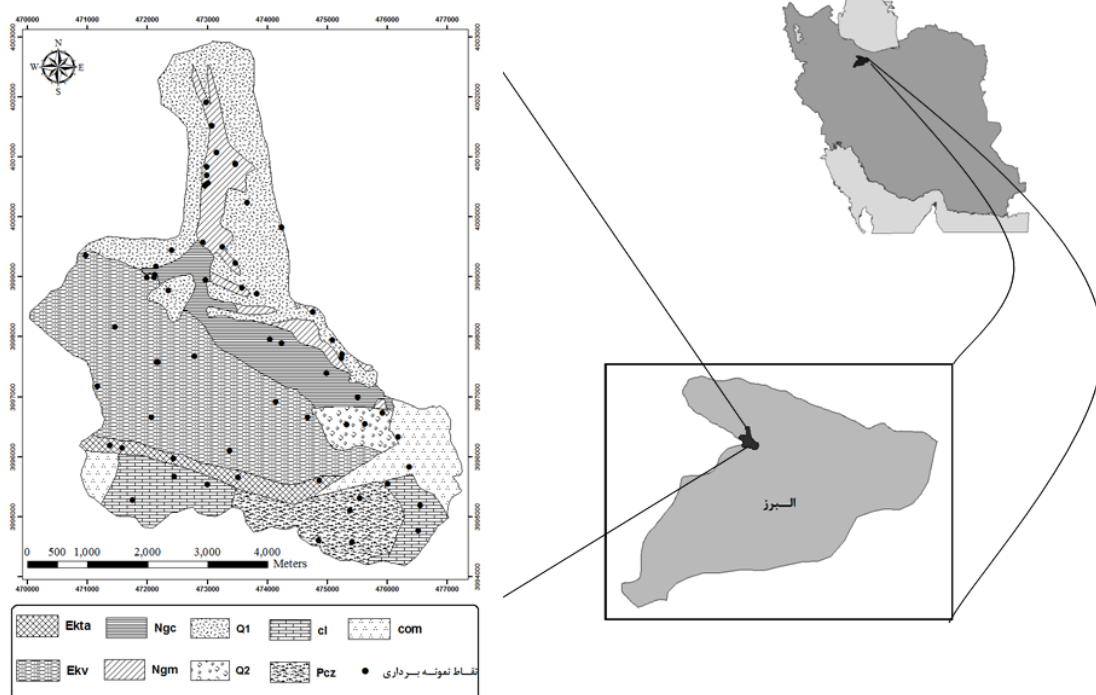
۲. روش شناسی

۱.۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، زیرحوضه زیدشت-فشندک در حوزه آبخیز طالقان است. این حوضه با ۲۶۷۳۷ هکتار، در مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 5' 40''$ تا $36^{\circ} 9' 50''$ عرض شمالی و $50^{\circ} 40' 00''$ تا $50^{\circ} 44' 50''$ طول شرقی قرار گرفته است. متوسط بارش این حوضه، ۴۷۰ میلی‌متر است. این حوضه، دارای توپوگرافی کوهستانی است و کاربری غالب آن، مرتع است. و فقط در قسمتی از این حوضه اطراف روستای فشندک، باغ است. در گذشته، در قسمت‌هایی از این حوضه، زراعت دیم بوده که به مرور زمان کشت و کار متوقف و تبدیل به زمین‌های مرتعی شده است. سازندهای زمین‌شناسی به همراه موقعیت حوضه در جدول (۱) و شکل (۱) آورده شده‌اند. (شکل ۱).

قابلیت الگوریتم ژنتیک در انتخاب ردیاب‌های مناسب و همچنین برآورد عدم قطعیت مقادیر میانه سهم‌ها با استفاده از نمونه‌برداری مربع لاتین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که براساس معیار نیکویی برازش، ترکیب بهینه به دست آمده با استفاده از تلفیق تحلیل تشخیص چند متغیره و الگوریتم ژنتیک عملکرد خوبی داشته است [۱۰].

بنابراین با توجه به نکات فوق واضح است که عدم قطعیت فراوانی در روش انگشت‌نگاری وجود دارد و لذا شایسته است این عدم قطعیت در مدل‌سازی وارد گردد و فقط با استفاده از یک مدل آماری قوی، روش اثر انگشت‌نگاری می‌تواند به اهداف خود برسد. بنابراین در تحقیق حاضر، تأثیر عوامل مختلف در میزان عدم قطعیت نتایج به دست آمده از روش منشأیابی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور خلاصه، اهداف این تحقیق عبارتند از: تعیین کمی سهم منابع مختلف در تولید رسوب همراه با مقدار عدم قطعیت آنها و تعیین ترکیب بهینه ردیاب‌ها که قادر به تفکیک منابع مختلف رسوب باشند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

جدول ۱. مشخصات منابع و تعداد نمونه‌های برداشت شده

شماره منبع	نوع منشأ	تعداد	شماره منبع	نوع منشأ	تعداد	شماره منبع	نوع منشأ	تعداد
۱	سازند QI	۶	۵	سطحی Ngm	۷	۹	سازند Pcz	۵
۲	سازند Ekv	۷	۶	سطحی Ngc	۵	۱۰	سازند Ekta	۵
۳	زیرسطحی Ngm	۶	۷	سازند Com	۵	۱۱	زیر سطحی Ngc	۶
۴	راه‌های شوسه	۶	۸	سازند CI	۵			

۲.۲. روش تحقیق

در این تحقیق، در ابتدا با استفاده از نمونه‌برداری‌های طراحی شده (Phillips *et al.*, 2000) [۱۲]، نمونه‌های رسوب معلق برداشت شد. بدین ترتیب که طی بهار و پاییز ۱۳۹۱، نمونه‌برداری در نقاط مختلف حوضه و در محل‌های مناسبی قرار داده شدند. نمونه‌برداری از رسوب معلق بدین ترتیب بود که برای چند بارش، فقط رسوب مربوط به رگبار برداشت شد و برای ماباقی، به صورت مقطع زمانی برداشت شد. همچنین تعداد ۴ نمونه رسوب نیز از رسوبات بستر و کناره رودخانه پس از آخرین سیل که سیل نسبتاً بزرگی بود، برداشت شدند (جدول ۲). نمونه‌ها پس از برداشت در هوای آزاد خشک و توسط الک ۶۳ میکرون الک گردیدند.

همچنین در تابستان ۱۳۹۱، نمونه‌برداری از منابع رسوب صورت گرفت. در این تحقیق، انواع مختلف منابع رسوب با توجه به نوع سازند تعیین گردید، البته نوع فرسایش و جاده‌های ارتباطی (خاکی) نیز به نوعی در تفکیک منابع مختلف رسوب در نظر گرفته شد که پس از

تهیه نقشه‌های پایه (توپوگرافی و زمین‌شناسی) و بازدید از عرصه، نمونه‌برداری صورت گرفت. نمونه‌برداری با استفاده از بیلچه دستی که در هر نمونه‌برداری به دقت تمیز می‌گردید، صورت گرفت. برای هر نمونه از چند نقطه اطراف آن تا عمق دو سانتی‌متری از خاک سطحی نمونه‌برداری می‌شد، پس از نمونه‌برداری، نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال یافت و در مجاورت هوای آزاد، خشک شدند و در نهایت با الک ۶۳ میکرون الک گردیدند. به طور کلی، ۱۱ منبع مختلف برای حوضه در نظر گرفته شد و ۶۳ نمونه از این منابع برداشت شد که تعداد نمونه‌ها برای هر منبع در جدول (۱) و موقعیت آنها در شکل (۱) نشان داده شده است. در نهایت تمام نمونه‌های برداشت شده از منابع و رسوب که ۷۶ نمونه بود، به آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی انتقال پیدا کردند تا عناصر ژئوشیمیایی آنها تعیین گردند. ۳ عنصر آلی نیز در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده منابع طبیعی اندازه‌گیری شدند.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های رسوب برداشت شده

شماره نمونه	نوع رسوب و تاریخ کارگذاری نمونه‌بردار	شماره نمونه	نوع رسوب و تاریخ کارگذاری نمونه‌بردار
۸	۱۳۹۱/۲/۲۷-۱۳۹۱/۳/۵	۱	رسوبات انباشته شده در کنار و بستر رودخانه
۹	۱۳۹۱/۴/۱-۱۳۹۱/۴/۲۶	۲	رسوبات انباشته شده در کنار و بستر رودخانه
۱۰	(سیل) ۱۳۹۱/۸/۱۲	۳	رسوبات انباشته شده در کنار و بستر رودخانه
۱۱	(سیل) ۱۳۹۱/۸/۱۱	۴	رسوبات انباشته شده در کنار و بستر رودخانه
۱۲	(سیل) ۱۳۹۱/۸/۱۳	۵	(سیل) ۱۳۹۱/۲/۱۰
۱۳	(سیل) ۱۳۹۱/۸/۲۶	۶	۱۳۹۱/۲/۱۲-۱۳۹۱/۲/۱۰
		۷	۱۳۹۱/۲/۲۷-۱۳۹۱/۲/۱۲

که این رابطه دارای محدودیت‌های زیر است.

$$\sum_{j=1}^m x_j = 1 \quad (۳)$$

$$x_j \geq 0 \quad (۴)$$

که در این رابطه‌ها، هر کدام از پارامترها عبارتند از: y_i ، مقادیر خصوصیت i ($i=1$ تا n) در نمونه رسوب معلق، $a_{i,j}$ مقادیر خصوصیت ردیاب i در منبع j ($j=1$ تا m)، x_j سهم نسبی منبع j در نمونه رسوب، m تعداد منابع رسوب و n تعداد خصوصیت ردیاب مورد بررسی است.

برای حل رابطه ترکیبی چند متغیره از روش‌های بهینه‌سازی حداقل کردن مربعات خطا (رابطه ۵) استفاده می‌شود:

$$R = \sum_{i=1}^n \left\{ \left((y_i - \sum_{j=1}^m a_{i,j} x_j) / y_i \right) \right\}^2 \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، پارامترهای دیگری از قبیل توزیع اندازه ذرات و میزان مواد آلی نیز توسط سایر محققان استفاده شده‌اند [۴، ۱۰، ۱۱]. اما با توجه به روابط پیچیده بین آنها، در تحقیق حاضر، این پارامترها در بهینه‌سازی رابطه بالا مورد استفاده قرار نگرفت.

۲.۲.۲. تعیین عدم قطعیت ناشی از محدود بودن

تعداد نمونه‌ها

برای تعیین عدم قطعیت، مراحل کار به شرح زیر است:

در ابتدا برای هر ردیاب در هر منبع با استفاده از روش خودگردان ساز^۱ مقدار میانگین برآورد گردید. در این مرحله با استفاده از نمونه‌برداری همراه با جایگزینی، اقدام به نمونه‌گیری به تعداد زیاد

۱.۲.۲. تعیین ترکیب بهینه ردیاب‌ها و تعیین سهم آنها

پس از تعیین مقادیر ردیاب‌های مختلف در منابع و رسوب در گام بعد، اقدام به تجزیه و تحلیل آماری و تعیین سهم هر یک از منابع می‌شود. یک روش دو مرحله‌ای برای تعیین ترکیب بهینه ردیاب‌ها که قادر به تفکیک منابع مختلف رسوب هستند، توسط محققین ارائه شده است [۲]. در این روش در اولین گام از آزمون H کروسکال والیس استفاده می‌شود. آزمون H کروسکال والیس، یک آزمون ناپارامتریک است که برای تعیین روابط موجود بین دو متغیر در حالتی که یکی از آنها اسمی و دیگری عددی باشد، استفاده می‌شود. در واقع این تست، برای تعیین امکان وجود اختلاف بین میان‌های دو یا تعداد بیشتری گروه استفاده می‌شود. لذا با استفاده از این آزمون مشخص می‌گردد که آیا مقادیر ردیاب‌ها در منابع مختلف، تفاوت معنی‌داری با هم دارند یا خیر. در مرحله بعد با استفاده از تحلیل تشخیص چند متغیره، ترکیب بهینه ردیاب‌ها که قادر به تفکیک منابع مختلف رسوب هستند، تعیین می‌گردند. در این تحقیق از روش تحلیل تشخیص گام به گام مبتنی بر فاصله ماهالابونیس استفاده گردید. چنانچه دو جامعه با میانگین‌های به ترتیب μ_1 و μ_2 با ماتریس واریانس مشترک Σ باشند فاصله ماهالابونیس بصورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$\Delta^2 = (\mu_1 - \mu_2)' \Sigma^{-1} (\mu_1 - \mu_2) \quad (۱)$$

در نرم افزار SPSS با توجه به مقادیر فاصله ماهالابونیس در هر گام ردیاب‌هایی که قادر بوده حداکثر تمایز را بین گروه‌های مختلف ایجاد کنند در ترکیب بهینه قرار می‌گیرند. در نهایت سهم هر یک از منابع رسوب به صورت کمی با استفاده از مدل ترکیبی چند متغیره (رابطه ۲) تعیین می‌شود.

$$\sum_{j=1}^m a_{i,j} \cdot x_j = y_i \quad (۲)$$

^۱ Bootstrapping

پارامترهای رفتاری^۲ (پارامترهایی که جواب قابل قبولی ارائه می‌دهند) و غیر رفتاری^۳ تقسیم می‌شوند. برای هر پارامتر رفتاری یک وزن احتمالاتی^۴ با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌گردد.

$$w_i = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)} \quad (5)$$

که در این رابطه، N تعداد مجموعه پارامترهای رفتاری و $L(\theta_i)$ تابع احتمال برای پارامتر θ_i است. در نهایت با استفاده از وزن‌های احتمالاتی پارامترهای رفتاری، تابع توزیع تجمعی تعیین و چارک‌ها و فواصل اطمینان مشخص می‌گردد. در گام دوم از معیار متوسط نیکویی برازش^۵ (رابطه ۶) به عنوان تابع احتمال استفاده می‌گردد.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6)$$

۳. نتایج

از بین تمام عناصر اندازه‌گیری شده در این تحقیق، مقادیر دو عنصر، در نمونه‌ها کمتر از حد آشکارسازی دستگاه بود. بنابراین در ادامه تحقیق مورد استفاده قرار نگرفت. همچنین دو عنصر دارای داده‌های پرت بودند که آنها هم در ادامه در تجزیه و تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار نگرفتند.

در نهایت بر اساس الگوی دو مرحله‌ای (Collins et al., 1997) [۲]، ابتدا آزمون H کروسکال وایس انجام شد. نتایج نشان داد که براساس سطح احتمال

(۱۰۰۰۰ هزار) شد و میانگین محاسبه گردید. در گام دوم با استفاده از مقادیر میانگین و واریانس به دست آمده در مرحله قبل، منحنی توزیع نرمال تجمعی تعیین و با استفاده از آن، اقدام به تولید داده تصادفی به تعداد ۱۰۰۰۰ بار برای هر ردیاب در هر منبع گردید. در این مرحله، چنانچه مقادیر منفی برای ردیاب‌ها به دست می‌آمد، آن داده حذف و دوباره نمونه‌برداری صورت می‌گرفت. سپس با استفاده از مقادیر ردیاب به دست آمده در گام قبل، مدل ترکیبی برای هر نمونه رسوب به تعداد ۱۰۰۰۰ بار حل و در نهایت، فواصل اطمینان برای هر منبع تعیین گردید. در این حالت، فاصله اطمینان ۹۵ درصد که مربوط به صدک‌های ۲/۵ و ۹۷/۵ در تابع توزیع تجمعی است، تعیین گردید [۴، ۱۰].

۳.۲.۲. آنالیز عدم قطعیت پارامترها با استفاده از

روش GLUE

پس از تعیین عدم قطعیت ناشی از خطا در داده‌های مورد استفاده، در گام بعدی سایر منابع عدم قطعیت با استفاده از روش گلو^۱ مورد بررسی قرار گرفت. در روش گلو، فرض بر این است که به جای داشتن یک جواب بهینه، تعداد زیادی جواب بهینه وجود دارند که قادرند تمام محدودیت‌ها را برآورد کنند که به نوعی یک هم‌ارزی بودن در بین جواب‌ها وجود دارد [۱].

در روش گلو مراحل کار به شرح زیر است:

در ابتدا برای هر یک از پارامترها (که در اینجا سهم منابع است)، یک توزیع پیشین که معمولاً توزیع یکنواخت است، در نظر گرفته و به تعداد زیاد از توزیع در نظر گرفته، اقدام به نمونه‌برداری مجموعه پارامترها می‌شود.

پس از اجرا کردن مدل با استفاده از آستانه تعریف شده (در این تحقیق ۰/۹۷ در نظر گرفته شد) و با توجه به تابع احتمال به دست آمده برای هر اجرا، مجموعه پارامترها به

¹ Generalized Likelihood Uncertainty Estimation

² Behavioral

³ Non-behavioral

⁵ Likelihood weight

⁶ Goodness of fit

نمونه‌های رسوب گردید. نتایج مربوط به سهم هر یک از نمونه‌های رسوب، در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۴) ملاحظه می‌شود که برای نمونه‌های برداشت شده از رسوبات کنار رودخانه (نمونه‌های ۱ تا ۴)، بیشترین سهم مربوط به منبع ۳ یعنی نمونه‌های کنار رودخانه (زیرسطحی Ngm) بوده و بعد از آن، بیشترین سهم مربوط به منابع ۴ و ۱۱ که به ترتیب راه‌های شوسه حفاظت نشده و فرسایش آبراه‌های (زیرسطحی Ngc) هستند، است. برای نمونه‌های رسوب ۵ تا ۹ که نمونه‌های رسوب برداشت شده توسط نمونه‌بردار در بازه‌های زمانی هستند، بیشترین سهم مربوط به منبع ۳ است. در این نمونه‌ها، منبع‌های ۵ و ۱۰ یعنی سطحی Ngm و سازند Ekta نیز سهم داشته‌اند. در نمونه‌های رسوب که فقط از سیل برداشت شده‌اند (یعنی نمونه‌های ۱۰ تا ۱۳)، بیشترین سهم مربوط به منبع ۳ است و در بعضی نمونه‌ها، منبع‌های ۴، ۱۰ و ۱۱ نیز سهم داشته‌اند. سهم سایر منابع در این نمونه‌ها صفر است.

۵ درصد، ۱۱ عنصر توانایی تفکیک منابع مختلف را نداشتند که در ادامه مراحل کار، مورد استفاده قرار نگرفتند. در گام بعدی با استفاده از روش تحلیل تشخیص چند متغیره، ترکیب بهینه ردیاب‌ها از بین ۴۲ ردیاب باقیمانده از مرحله قبل تعیین گردید. بدین منظور از روش گام به گام مبتنی بر فاصله ماهالانوبیس که سطح معنی‌داری آماره F برای ورود و حذف متغیر به ترتیب برابر ۰/۵۰ و ۰/۱ بود، استفاده گردید. بر این اساس، در نهایت ۱۷ عنصر به عنوان ترکیب بهینه (که قادر بودند منابع مختلف را از هم جدا کنند) به دست آمد که به صورت جدول (۳) است. این ترکیب قادر بوده است که ۹۸/۴ درصد نمونه‌ها را در حالتی که همه داده‌ها به عنوان آموزش استفاده شوند، به درستی تفکیک کنند. همچنین در حالت ارزیابی متقابل هم، توانست ۷۳ درصد نمونه‌ها را به درستی تفکیک کند. پس از آن که ترکیب بهینه ردیاب‌ها به دست آمد، اقدام به حل رابطه ترکیبی چند متغیره برای هر یک از

جدول ۳. ترکیب بهینه عناصر جهت تفکیک منابع مختلف

گام	عنصر	عدد تحمل	درصد طبقه‌بندی درست نمونه‌ها	حداقل مربع فاصله Mahalanobis
۱	فسفر قابل جذب	۰/۶۱۴	۳۶/۵	۱۷/۸۹
۲	Gd(گادولینیم)	۰/۵۳۲	۳۰/۲	۱۴/۷۶
۳	Zr (زیرکونیم)	۰/۵۹۳	۲۷	۱۸/۹۶
۴	Ho (هولمیم)	۰/۶۱	۲۰/۶	۱۶/۹۶
۵	P (فسفر)	۰/۱۵	۳۰/۲	۲۰/۷۴
۶	V (وانادیم)	۰/۱۳	۲۵/۴	۱۴/۸۵
۷	Nb (نیوبیم)	۰/۳۲	۲۲/۲	۲۰/۷۸
۸	Sn (قلع)	۰/۱۴	۳۱/۷	۱۵/۰۰
۹	S (گوگرد)	۰/۵۴	۲۵/۴	۲۱/۵۴
۱۰	Sr (استرانسیم)	۰/۵	۳۶/۵	۲۰/۸۳
۱۱	Cr (کروم)	۰/۲۶	۳۰/۲	۲۰/۹۸
۱۲	نیتروژن کل	۰/۶۳	۳۶/۵	۱۸/۵۳
۱۳	Be (برلییم)	۰/۴۰	۲۵/۴	۲۰/۸۹
۱۴	Ge (ژرمانیوم)	۰/۴۵	۲۲/۲	۱۹/۰۳
۱۵	Tm (تولیم)	۰/۲۰	۲۲/۲	۱۹/۰۹
۱۶	Cd (کادمیم)	۰/۱۲	۱۹	۱۹/۷۷
۱۷	Eu (اوروپیم)	۰/۴۵	۲۵/۴	۲۰/۳۳

قطعیت برای نمونه ۱، برابر با فاصله ۰/۲۳ تا ۱ یعنی ۷۷ درصد است. مشابه همین مسأله در نمونه‌های ۲، ۳ و ۴ قابل مشاهده است که برای تمام آنها، این دامنه مشابه است. در سایر منابع نیز در حالتی که مقدار میانه صفر نبوده، اختلاف بین حد بالا و پایین و در نتیجه، دامنه عدم قطعیت بالا است. در نمونه‌های رسوب ۱ و ۴ نیز اگر چه مقادیر میانه به ترتیب برای منبع ۴ و ۱۱ برابر با صفر نبوده است، اما مقدار سهم به دست آمده با استفاده از روش مرسوم (جدول ۴) برای این منابع برابر با صفر است. برای نمونه‌های ۵ تا ۹ (که نمونه به دست آمده از نمونه‌بردار برای حالتی است که نمونه‌بردار برای یک بازه زمانی قرار داده شده)، مقادیر میانه و حدهای بالا برای منبع ۳ کاهش پیدا کرده، به طوری که در این حالت، حد بالا برای هیچ یک از نمونه‌ها برابر یک به دست نیامده است.

برای بررسی عدم قطعیت نیز در ابتدا عدم قطعیت ناشی از تعداد کم نمونه و تغییرات مکانی آنها با استفاده از روش مونت کارلو بررسی گردید. که نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده در جدول (۵) نشان‌دهنده این است که برای تمام نمونه‌های رسوب غیر از منبع ۳، در سایر منابع حد پایین صفر است. در چهار نمونه رسوب برداشت شده از رسوبات کنار رودخانه نیز مقدار میانه و حد بالا نیز برای منبع‌های ۱، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰، صفر است. در این چهار نمونه، مقدار میانه برای منبع ۵ صفر اما حد بالای آن صفر نیست.

در مورد منبع ۳ نیز، حد بالا برابر با یک و میانه بیشتر از ۰/۷ به دست آمده که این موضوع، نشان‌دهنده سهم بالای این منبع در رسوب خروجی حوضه است. نکته قابل توجه، اختلاف زیاد حد بالا و پایین و در نتیجه، دامنه عدم قطعیت بالا است. به طور مثال، دامنه عدم

جدول ۴. سهم منابع مختلف برای هر نمونه رسوب

منبع	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	نمونه رسوب
۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۴۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۶۰	۱
۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۲
۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۷۴	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۳
۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۸۹۹	۰/۱۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۴
۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۸۰۶	۰/۱۵۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰	۵
۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۷۸	۰/۲۸۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۳۸	۶
۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۷۸	۰/۰۰۰	۷
۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۶۸۸	۰/۰۰۰	۰/۲۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۰۰	۸
۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۰۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۹۹	۰/۰۰۰	۹
۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۲۷	۰/۰۷۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۰
۱۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۱۷	۰/۰۵۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۲۴۰	۰/۰۰۰	۱۱
۱۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۹۶۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۰۰	۱۲
۱۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۸۱۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۸۴	۱۳

قرار گرفت. در این حالت مشاهده شد برای بیشتر مجموعه پارامترها، معیار نیکویی برازش (N-S) کمتر از ۰/۹۷ بدست آمد در این حالت، تعداد کمی از مجموعه پارامترها به عنوان پارامترهای رفتاری در نظر گرفته شدند. بنابراین به منظور حل این مسأله، مجموعه پارامترها از مجموعه پارامترهای به دست آمده در مرحله قبل (حالتی که عدم قطعیت ناشی از تغییرات مکانی ردیاب‌ها باشد) مورد بررسی قرار گرفت.

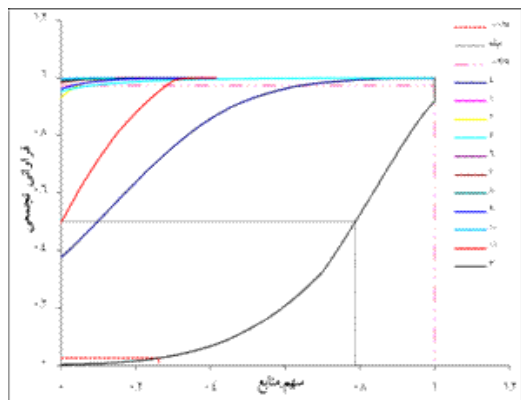
تعداد مجموعه پارامترهای در نظر گرفته شده با توجه به سرعت اجرا، ۵۰۰۰۰ در نظر گرفته شد. در شکل (۳) تابع توزیع تجمعی و مقادیر چارک‌های ۲/۵ و ۹۷/۵ و میانه برای بعضی از نمونه‌های رسوب نشان داده شده‌اند. با توجه به نمودارهای الف و ب مشاهده می‌شود که فقط برای منبع ۳ حد پایین صفر نیست. برای سایر منابع، حد پایین برابر با صفر شده است. همچنین برای حالتی که نمونه‌های رسوب از رسوبات کناره رودخانه برداشت شده است (نمودارهای الف و ب)، رفتار کلی نمودارها تقریباً شبیه هم بوده و فقط منابع ۳ و ۴ و در بعضی موارد منبع ۱۱، مقدار میانه غیرصفر داشته و برای سایر منابع، مقادیر میانه و حتی حد پایین نیز برابر با صفر است. در همه نمودارها، اختلاف بین حد پایین و بالا و در نتیجه، میزان عدم قطعیت بالاست. همچنین برای حالتی که نمونه‌ها به صورت یک بازه زمانی توسط نمونه‌بردار برداشت شده‌اند (نمودارهای ج و چ)، سهم منبع ۱۱ بیشتر شده و به غیر از نمونه ۷، مقدار میانه آنها بیشتر از صفر شده است. رفتار نمودارهای عدم قطعیت سایر منابع نیز شبیه هم است.

برای نمونه‌های ۱۰ تا ۱۳ (شکل‌های د و ذ) که فقط از سیل نمونه‌برداری شده‌اند، رفتار آنها مثل نمونه‌هایی برداشت شده در بازه‌های زمانی (۵ تا ۹) است. در این نمونه‌ها نیز، سهم منبع ۱۱ نسبت به رسوبات کنار و بستر رودخانه بیشتر شده و فاصله عدم قطعیت نیز بالا است.

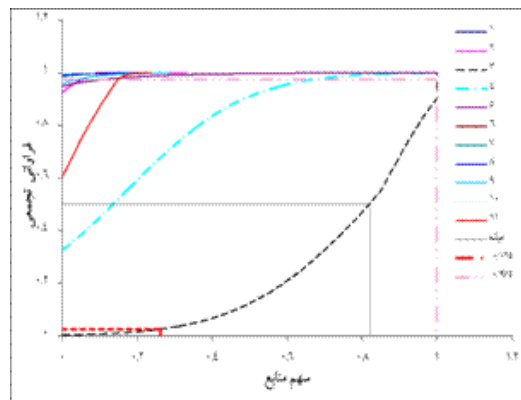
از سوی دیگر، سهم منابع دیگر بیشتر شده است، به طوری که بعضی منابع دارای حد بالا و میانه غیر از صفر هستند. همچنین فاصله حد پایین و بالا و در نتیجه، میزان عدم قطعیت در این نمونه‌ها برای منبع ۳ نسبت به ۴ نمونه قبلی کاهش پیدا کرده است. مشابه همین مسأله را می‌توان برای منبع‌های ۴ و ۱۱ مشاهده نمود که در آنها نیز، دامنه عدم قطعیت کاهش یافته است. با مقایسه این جدول با جدول (۵) ملاحظه می‌شود که سهم به دست آمده برای منبع ۳ در نمونه ۶ کمتر از میانه بوده، البته اختلاف آن با میانه نسبتاً کم است. در نمونه ۷ با وجود این که مقادیر میانه برای منابع ۴ و ۱۱ بزرگ‌تر از صفر است، اما سهم آنها با استفاده از روش مرسوم برابر با صفر به دست آمد.

برای نمونه‌های ۱۰ تا ۱۳ که در هنگام سیلاب برداشت شده‌اند، سهم منبع ۳ کمی افزایش پیدا کرده، به طوری که برای نمونه ۱۰، حد بالای یک به دست آمده است. در مقایسه با جدول (۴) نیز برای منبع ۴ در نمونه‌های ۱۲ و ۱۳ در حالی که میانه غیر صفر به دست آمده، مقدار برآوردی توسط روش مرسوم برابر صفر است. مشابه همین مسأله برای منبع ۱۱ در نمونه رسوب ۱۰ قابل مشاهده است.

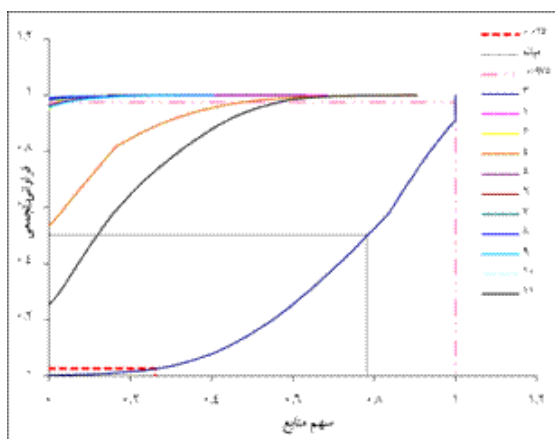
در روش گلو، مقادیر ورودی ثابت در نظر گرفته، یعنی همان مقادیر متوسط ردیاب‌ها در منابع در نظر گرفته شده است و رفتار پارامترها در فضای پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق در ابتدا همانند روان و همکاران (۲۰۰۰) حالتی که پارامترها به مقدار ۰/۰۲ تغییر داده می‌شدند، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با توجه به ۱۱ منبع در نظر گرفته شده در این تحقیق، ۵۲^{۱۱} حالت به دست آمد که اجرا کردن این تعداد حالت با توجه به سرعت حل مسأله عملاً غیرممکن بود. در گام بعدی حالتی که مجموعه پارامترها از فضای پارامترها به طور تصادفی نمونه‌برداری شوند، مورد بررسی



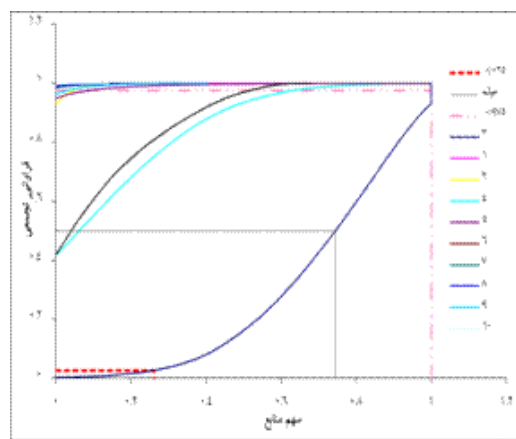
ب- نمونه ۳



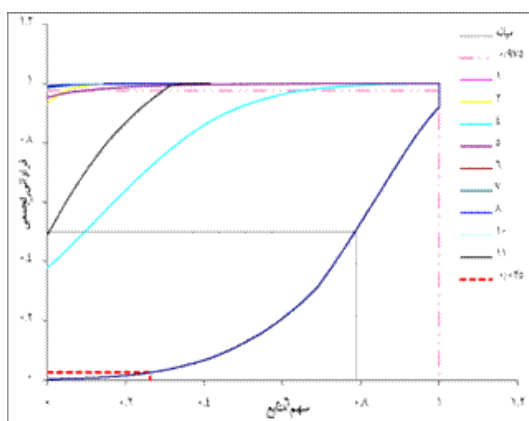
الف- نمونه ۱



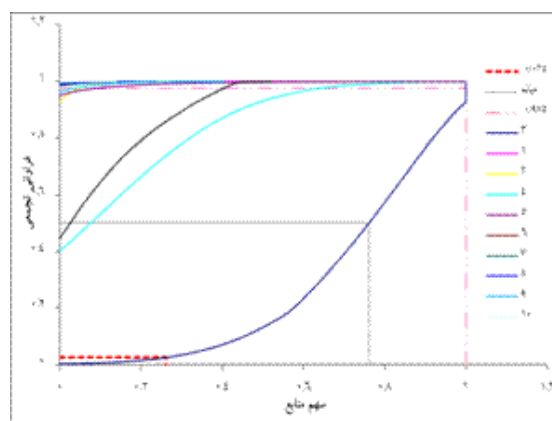
چ- نمونه ۷



ج- نمونه ۵



د- نمونه ۱۰



ذ- نمونه ۱۳

شکل ۳. نمودار فراوانی سهم منابع مختلف برای نمونه یک

۴. بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق اقدام به تعیین سهم منابع مختلف در تولید رسوب حوضه زیدشت- فشنکدک طالقان گردید. پس از برداشت نمونه‌های رسوب معلق و منبع، عناصر ژئوشیمی و سه عنصر آلی آنها تعیین گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که در تمام نمونه‌های رسوب به دست آمده، بیشترین سهم در رسوب خروجی مربوط به منبع سه (که سازند Ngm زیرسطحی است)، بود و بعد از آن کاربری راه و خاک، زیرسطحی Ngc داشتند که این موضوع، نشان‌دهنده این مسأله است که در این حوضه، بیشترین سهم در رسوب خروجی حوضه مربوط به فرسایش‌های زیرسطحی شامل فرسایش‌های آبراهه‌ای و رودخانه‌ای است. در این حوضه در کنار روستای فشنکدک، آبراهه‌ای که از بالادست روستا روان است، در سازند Ngm جریان پیدا کرده که بستر و کناره‌های آن تحت فرسایش شدید است و مشابه آن، چندین آبراهه دیگر وجود داشته که دیواره‌ها و کف آنها در معرض فرسایش قرار دارند و همچنین حرکت‌های توده‌ای که در سازند Ngm به داخل رودخانه اتفاق می‌افتد، باعث شده در بسیاری از نقاط دیواره رودخانه اصلی در حال فرسایش باشد. در تحقیقات انجام شده توسط بعضی محققین [۱۰، ۱۱] مشاهده گردیده است که راه‌های حفاظت نشده نسبت به منابع سطحی، سهم بیشتری در رسوب خروجی حوضه داشته‌اند. در تحقیق انجام شده توسط [۸]، در منشأیابی رسوبات حوزه آبخیز مرگن-ماکو، سهم منابع زیرسطحی شامل فرسایش‌های خندقی، کناری و آبراهه

نسبت به منابع سطحی در رسوب خروجی حوضه بیشتر بود. در تحقیق [۱۱]، سهم منابع سطحی نسبت به زیرسطحی بیشتر بود. در قسمتی دیگر از این تحقیق، تأثیر منابع مختلف عدم قطعیت بر روی سهم منابع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای برخی از منابع، مقادیر به دست آمده حتی برای حد بالا ۹۷/۵ درصد نیز برابر صفر بوده است که این موضوع، بیان‌گر این مطلب است که با احتمال بیش از ۹۷/۵، این منابع سهمی در رسوب خروجی حوضه ندارند. در نمونه‌های ۱ تا ۴ (نمونه‌های برداشت شده از رسوبات کف رودخانه)، میزان عدم قطعیت (فاصله بین حد بالا و پایین) نسبت به حالتی که نمونه‌ها توسط نمونه بردار برداشت شده‌اند، بیشتر بوده است. در اکثر نمونه‌ها مقادیر سهم به دست آمده با استفاده از روش مرسوم برای منبع سه بیشتر از مقادیر میانه و برخی موارد بسیار نزدیک به حد بالا بوده است که این مسأله، بیان‌گر یک نوع بیش برآوردی برای منبع سه است. از سوی دیگر، برای سایر منابع نیز مشاهده گردید که اگرچه مقدار میانه برابر با صفر نیست، اما سهم به دست آمده برای این منابع با استفاده از روش مرسوم برابر با صفر یعنی حد پایین آن است. در نمودارهای به دست آمده با استفاده از روش گلو فقط سه منبع ۳، ۴ و ۱۱، مقدار میانه غیرصفر داشته‌اند و برای سایر منابع با احتمال بیش از ۹۰ درصد، سهم آنها صفر است. همچنین باند عدم قطعیت به دست آمده با استفاده از روش گلو بالا است که این امر، نشان‌دهنده یک هم ارزی بالا بین جواب‌های به دست آمده است.

References

- [1]. Beven, K. and Binley, A.M. (1992). The future of distributed models, model calibration and uncertainty predictions. *Hydrological Processes*, 6(3), 279-298.
- [2]. Collins, A.L., Walling, D.E. and Leeks, G.J.L. (1997). Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *Catena*, 29(1), 1-27.

- [3]. Collins, A.L. and Walling, D.E. (2004). Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography*, 28(2), 159–196.
- [4]. Collins, A.L., Walling, D.E., Webb, L. and King, P. (2010). Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information. *Geoderma*, 155(3-4), pp. 249–261.
- [5]. Collins, A.L., Zhang, Y., McChesney, D., Walling, D.E., Haley, S.M. and Smith, P. (2012). Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modeling. *Science of the Total Environment*, 414, PP. 301 – 317.
- [6]. Foster, I.D.L. and Lees, J.A. (2000). Tracers in geomorphology: theory and applications in tracing fine particulate sediments. In: Foster, I.D.L. (Ed.), *Tracers in geomorphology*. Wiley, Chichester, UK, pp. 3–20.
- [7]. Franks, S.W. and Rowan, J.S. (2000). Multi-parameter fingerprinting of sediment sources: uncertainty estimation and tracer selection. In: Bentley, L.R., Brebbia, C.A., Gray, W. G., Pinder, G.F., Sykes, J.F. (Eds.), *Computational Methods in Water Resources*. alkema, Rotterdam, pp. 1067–1074.
- [8]. Hakimkhani, Sh., Ahmadi, H. and Ghayoumian, J. (2009). Determining Erosion Types Contributions to the Sediment Yield Using Sediment Fingerprinting Method (Case study: Margan watershed, Makoo). *Soil and Water knowledge journal*, 19(1), pp. 13–27. (In Persian).
- [9]. Krause, A.K., Franks, S.W., Kalma, J.D., Loughran, R.J. and Rowan, J.S. (2003). Multi-parameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia. *Catena*, 53(4), 327–348.
- [10]. Martinez-Carreras, N., Udelhoven, T., Krein, A., Gallart, F., Iffly, J.F., Ziebel, J., Hoffmann, L., Pfister, L. and Walling, D.E. (2010). The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg). *Journal of Hydrology*, 382(1-4), 49–63.
- [11]. Motha, J.A., Wallbrink, P.J., Hairsine, P.B. and Grayson, R.B. (2004). Unsealed roads as suspended sediment sources in an agricultural catchment in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 286 (1-4), 1–18.
- [12]. Phillips, J.M., Russell, M.A. and Walling, D.E. (2000). Time-integrating sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes*, 14(14), 2589–2602.
- [13]. Small, I.S., Rowan, J.S. and Franks, S.W. (2002). Quantitative sediment fingerprinting using a Bayesian uncertainty estimation framework. In: Dyer, F.J., Thoms, M.C., Olley, J.M. (Eds.), *The structure, function and management implications of fluvial sedimentary systems*. International Association of Hydrological Sciences Publication No. 276. IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 443–450.
- [14]. Rowan, J.S., Goodwill, P. and Franks, S.W. (2000). Uncertainty estimation in fingerprinting suspended sediment sources. In: Foster, I.D.L. (Ed.), *Tracers in Geomorphology*. Wiley, Chichester, UK, pp. 279–290.
- [15]. Walling, D.E., Woodward, J.C. and Nicholas, A.P. (1993). A multi-parameter approach to fingerprinting suspended sediment sources. In: Peters, N.E., Hoehn, E., Leibundgut, Ch., Tase, N., Walling, D.E. (Eds.), *Tracers in Hydrology*. International Association of Hydrological Sciences Publication No. 215. IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 329–337.

