

## منشأیابی رسوب بر اساس برآورد عدم قطعیت

کاظم نصرتی<sup>\*۱</sup>

### چکیده

شناخت منبع تولید رسوب و تعیین سهم نسبی هر یک از منابع رسوب برای تعیین فعالیت‌های مدیریتی حوضه آبخیز در راستای راهکارهای کنترل فرسایش و رسوب و حفاظت خاک که بیشترین اثر را بر کمیت و کیفیت آب و خاک دارد، اهمیت به سزایی دارد. تعیین سطوح اطمینان عدم قطعیت در منشأیابی منابع رسوب با مدل‌های ترکیبی بسیار ضروری است اما هنوز این عدم قطعیت همگام با تعیین سهم منابع رسوب در مدل‌های ترکیبی لحاظ نگردیده است. هدف از این مطالعه تهیه مدل منشأیابی رسوب بر اساس برآورد عدم قطعیت در حوضه آبخیز زیدشت است. به این منظور ۲۸ ردیاب ژئوشیمیایی در ۴۲ نمونه منابع رسوب و ۱۴ نمونه رسوب اندازه‌گیری گردید. روش پس‌رونده آماره تحلیل توابع تشخیص ۷ ردیاب بر (B)، کربن آلی (C)، پتاسیم (K)، مولیبدن (Mo)، فسفر (P)، سرب (Pb) و تالیوم (Tl) را با تأیید بیش از ۹۷ درصد تفکیک منابع رسوب به عنوان ترکیب بهینه از ردیاب‌ها و قادر به جداسازی منابع رسوب در منطقه مطالعه، انتخاب شد. مدل منشأیابی منابع رسوب بر اساس عدم قطعیت Bayesian تهیه و درصد سهم هر یک از منابع رسوب تعیین شد. برای چهار منبع رسوب حوضه زیدشت یعنی مرتع فرسایش سطحی، اراضی کشاورزی-فرسایش سطحی، فرسایش آبراه‌ای و اراضی دیم-فرسایش سطحی به ترتیب مقادیر ۱۳ (۸-۲۰)، ۷/۵ (۰-۱۰)، ۵۹ (۴۵-۷۵) و ۲۰/۵ (۱۰-۳۰) درصد برآورد شد. نتایج این مطالعه می‌تواند برای انتخاب روش‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب و مدیریت جامع حوضه آبخیز استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبخیز زیدشت، عدم قطعیت در مدل‌سازی، مدل ترکیبی Bayesian و منشأیابی رسوب.

ارجاع: نصرتی ک. ۱۳۹۰. منشأیابی رسوب بر اساس برآورد عدم قطعیت. مجله پژوهش آب ایران. ۵۱(۹): ۶۰-۵۱.

۱- استادیار دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی

\* نویسنده مسئول: [k\\_nosrati@sbu.ac.ir](mailto:k_nosrati@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۱۶

## مقدمه

بر اساس گزارش اتحادیه جهانی مبارزه با بیابانزایی<sup>۱</sup> (UNCCD)، فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین عوامل بیابانزایی است که تولید محصولات کشاورزی را کاهش می‌دهد و بر معیشت بیش از ۲۵ درصد مردم دنیا اثر می‌گذارد (Millennium Ecosystem Assessment, ۲۰۰۵). تأکید اتحادیه جهانی مبارزه با بیابانزایی بر مناطق خشک و نیمه خشک است که مشکلات فرسایش خاک به دلیل کمبود منابع آب بسیار چشمگیر است. حدود ۱۹۶۰ میلیون هکتار از اراضی دنیا (حدود ۱۵ درصد کل اراضی) مستعد فرسایش‌اند و ۵۰ درصد از آن‌ها به طور شدید فرسایش یافته است (لل و همکاران، ۲۰۰۱).

مهمترین اثرات برون محلی فرسایش ناشی از تولید رسوب است که در برخی موارد هزینه‌های آن بیش از اثرات محلی است. لذا کاهش اثرات برون محلی مستلزم کاهش تولید رسوب حوضه است، که خود موجب کاهش اثرات محلی خواهد شد. کاهش تولید رسوب نیازمند اجرای روش‌های مناسب کنترل رسوب و حفاظت خاک در مناطق بحرانی منبع رسوب در حوضه آبخیز است و لازمه شناخت روش مناسب و اجرای صحیح برنامه‌های حفاظت خاک شناخت و شناسایی اهمیت نسبی منابع رسوب و میزان سهم هر یک از منابع رسوب در تولید و بیلان رسوب است. بنابراین توسعه و ارتقا روش‌های مدل‌سازی منشأیابی رسوب در مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز ضروری است.

روش‌های متعددی در تعیین و شناسایی منابع رسوب و سهم آن‌ها وجود دارد. روش منشأیابی یا ردیابی رسوب<sup>۲</sup> به عنوان روشی با دقت مناسب و کارایی بالا مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است (کولینز و والینگ، ۲۰۰۴). در این روش از ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی، ژئوشیمیایی و آلی رسوب و منابع آن و همچنین تکنیک‌های آماری چند متغیره و مدل‌های ترکیبی و یا غیر ترکیبی در تعیین سهم نسبی هر منبع استفاده می‌شود.

مطالعات اندکی وجود دارد که برآورد سطح عدم قطعیت را در رویکرد منشأیابی رسوب در تعیین سهم نسبی هر یک از منابع رسوب لحاظ نموده باشد. در این مطالعات تنها آنالیز عدم قطعیت را با استفاده از مدل‌های ترکیبی و با منظور نمودن تغییرات مکانی ویژگی‌های ردیاب برای تعیین میزان اطمینان تخمین‌های مدل بر اساس رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو (کولینز و والینگ، ۲۰۰۷؛ مارتینز-کارراس و همکاران، ۲۰۰۸؛ اسمیت و دراگوویچ، ۲۰۰۸) و فقط یک مطالعه کلی با روش Bayesian (اسمال و همکاران، ۲۰۰۲) صورت گرفته است. بدین ترتیب به دلیل گرایش مطالعات به ارایه ویژگی‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی، ژئوشیمیایی و بیوژئوشیمیایی خاک به عنوان ردیاب، برآورد سطوح عدم قطعیت همگام با منشأیابی رسوب کمتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. بنابراین با توجه به عدم توسعه مدل‌های آماری مورد استفاده در منشأیابی رسوب (لیز، ۱۹۹۷) و به ویژه در زمینه برآورد عدم قطعیت<sup>۳</sup> (کولینز و والینگ، ۲۰۰۲)، ضرورت تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود.

با توجه به کمبود مطالعات منشأیابی با ردیاب‌های متعدد و مدل‌های ترکیبی به ویژه در زمینه برآورد عدم قطعیت در ایران و همچنین استفاده از یک ردیاب رادیواکتیو (سزیم ۱۳۷) که از لحاظ نیمه عمر و هزینه‌های بالا مورد سوال است، هدف از این مطالعه مدل‌سازی منشأیابی رسوب بر اساس مدل عدم قطعیت Bayesian و تعیین منابع رسوب و سهم آن‌ها در تولید رسوب در حوضه آبخیز زیدشت است.

## مواد و روش‌ها

## ویژگی‌های منطقه مطالعاتی

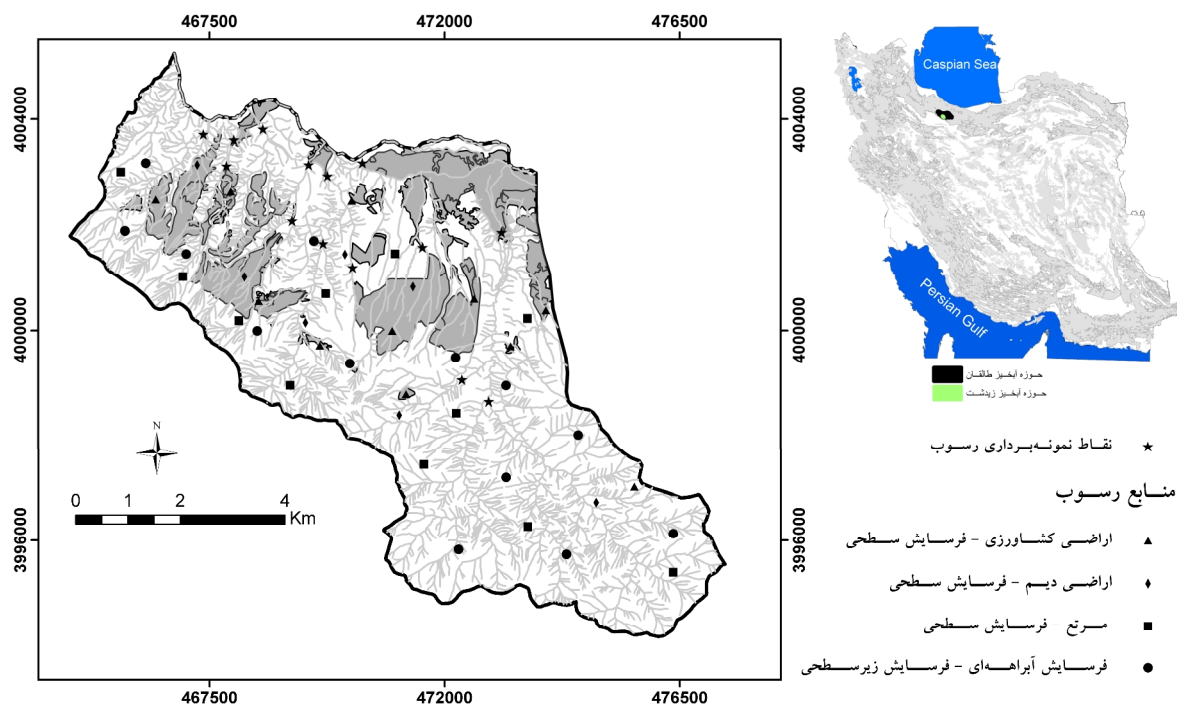
منطقه مورد مطالعه زیدشت از زیرحوضه‌های آبخیز طالقان با مساحت تقریبی ۶۵ کیلومتر مربع در ۳۷' ۴۶" و ۵۰° و ۵۶' ۴۴" ۵۰° طول شرقی و ۳۶° ۵' ۳۵" و ۱۱' ۳۶° عرض شمالی در ارتفاعات جنوبی البرز مرکزی و در ۶۰ کیلومتری شمال غرب کرج در استان البرز واقع شده است (شکل ۱). طولانی‌ترین آبراهه آن به طول تقریبی ۲۱ کیلومتر و میانگین شیب حوضه ۱۹/۳ درصد و تراکم آبره‌ها ۲ است. ارتفاع حداقل، حداکثر و ارتفاع

1 - United nations convention to combat desertification

2 - Sediment fingerprinting

منطقه ۴۶۰ میلی متر می باشد.

متوسط وزنی به ترتیب برابر با ۱۶۹۰، ۳۰۳۸ و ۱۸۷۵ متر است. میانگین بارش سالانه طولانی مدت (۱۹۷۵-۲۰۰۳)



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز زیدشت و سایت‌های نمونه برداری در واحدهای کاری.

شد. در نمونه برداری سعی شد تا تغییرات مکانی نمونه برداری به گونه‌ای باشد که تغییرات واحد کاری مانند شیب و جهت منظور شود. در این حوضه تعداد ۱۴ نمونه رسوب از نهشته‌های جدید محل تلاقی آبراهه‌ها و انتهای زیرحوضه‌ها جمع‌آوری شد. تمامی نمونه‌های رسوب مخلوطی از ۷ زیرنمونه در مجاورت نقطه نمونه برداری بود تا نماینده همگنی از نمونه‌ها باشد.

به منظور هضم نمونه‌های خاک و رسوب از روش هضم اسیدی با محلول Aqua Regia (ترکیب اسید کلریدریک غلیظ و اسید نیتریک با نسبت ۳ به ۱) استفاده شد. غلظت عناصر ژئوشیمیایی با استفاده از دستگاه ICP-OES (GBC Integra) تعیین و به واحد میکروگرم بر گرم نمونه خاک گزارش شد. بر اساس مطالعات صورت گرفته در زمینه کاربرد عناصر ژئوشیمیایی در منشأیابی رسوب و قابلیت عناصر در جداسازی و تفکیک منابع رسوب (والینگ، ۲۰۰۵) در مجموع ۲۶ عنصر ژئوشیمیایی شامل آلومینیوم (Al)، بر (B)، باریم (Ba)، برلیوم (Be)، بیسموت (Bi)، کلسیم (Ca)، کادمیم (Cd)، کبالت (Co)، کروم

#### نمونه برداری و تجزیه ژئوشیمیایی نمونه‌ها

در حوضه آبخیز زیدشت با توجه به هدف مطالعه انواع فرسایش در دو گروه فرسایش‌های سطحی (سطحی و شیاری) و فرسایش زیرسطحی (آبراهه‌ای) تقسیم‌بندی و بر اساس کاربری اراضی واحدهای کاری تعریف (کولینز و والینگ، ۱۹۹۷) و نمونه برداری صورت گرفت. برای نمونه برداری از منابع رسوب تعداد ۱۱ نمونه از خاک سطحی فرسایش یافته (۵-۰ سانتی متر) واحد کاری کشاورزی- فرسایش سطحی، تعداد ۱۱ نمونه از واحد مرتع- فرسایش سطحی و ۷ نمونه از واحد کاری دیم- فرسایش سطحی جمع‌آوری شد (شکل ۱). به منظور اطمینان از اینکه نمونه‌های جمع‌آوری شده نماینده نمونه همگن از مواد فرسایش یافته منابع رسوب باشد، نمونه‌های تهیه شده به صورت مخلوطی از ۵ نمونه برداشت شده از مساحت ۱۰۰ مترمربع تهیه گردید. همچنین تعداد ۱۳ نمونه مرکب از کناره‌های در حال فرسایش از واحد کاری مرتع- فرسایش آبراهه‌ای برداشت شد. این نمونه نیز از مخلوط ۵ زیرنمونه در مجاورت نقطه نمونه برداری تهیه

منبع رسوب ( $f_i$ ) برای هر یک از منابع رسوب  $i$  و حاصل از مخلوطی از خاک فرسایش یافته منابع مختلف محاسبه شد. همچنین تابع احتمال سهم نسبی منابع رسوب ( $f_q$ ) با تولید داده‌های تصادفی از روی داده‌های اولیه (داده‌های اصلی منابع رسوب) محاسبه شد. بر اساس قانون تئوری بیس، احتمال هر یک از  $f_q$  بر اساس داده‌ها و اطلاعات اولیه<sup>۵</sup> محاسبه شد. بدین ترتیب تابع احتمال پسین<sup>۶</sup> برای تمام  $f_i$  از طریق ضرب توزیع احتمال اولیه در درست نمایی آن و تقسیم حاصل آن بر مجموع کل آن و به صورت معادله زیر به دست آمد.

$$P(f_q | data) = \frac{L(data | f_q) \times p(f_q)}{\sum L(data | f_q) \times p(f_q)} \quad (1)$$

که در آن  $L(data | f_q)$  درست نمایی داده  $f_q$ ،  $p(f_q)$  احتمال اولیه بر اساس اطلاعات اولیه و  $f_q$  توزیع سهم منابع رسوب  $q$  می‌باشد. همچنین منظور از  $L(data | f_q) \times p(f_q)$  احتمالات پسین غیر نرمال است. برای مثال فرض شود که برآورد توزیع  $i$  منابع رسوب با مخلوطی از رسوب با  $j$  ردیاب مد نظر است. در این مدل ردیاب‌ها از ترکیب داده‌های رسوب به دست آمده و فرض می‌شود که توزیع آنها نرمال است. عدم قطعیت در مقادیر ردیاب منابع با تعریف میانگین و واریانس پارامترهای هر یک از منابع رسوب  $i$  و مقادیر غلظت ردیاب  $j$  تعریف می‌گردد. توابع توزیع پیشنهادی برای مخلوط رسوب توسط میانگین و انحراف معیار مخلوط رسوب بر اساس مقادیر تصادفی  $f_i$  تعیین می‌شود.

$$\hat{\mu}_j = \sum_{i=1}^n (f_i \times m_{j_{Source_i}}) \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i^2 \times S_{j_{Source_i}}^2)} \quad (3)$$

که  $m_{j_{Source_i}}$  میانگین ردیاب  $j$  از منبع رسوب  $i$  ام،  $S_{j_{Source_i}}^2$  واریانس ویژگی ردیاب  $j$  از منبع رسوب  $i$  ام است. بر اساس انحراف معیار و میانگین، درست‌نمایی داده‌های نمونه‌های رسوب به صورت زیر محاسبه می‌شود.

(Cr)، مس (Cu)، آهن (Fe)، گالیم (Ga)، پتاسیم (K)، لیتیم (Li)، منیزیم (Mg)، منگنز (Mn)، مولیبدن (Mo)، سدیم (Na)، نیکل (Ni)، فسفر (P)، سرب (Pb)، سلنیم (Se)، استرونیسم (Sr)، تلوریم (Te)، تالیوم (Tl)، و روی (Zn) اندازه‌گیری شد. کربن آلی به روش والکی بلاک<sup>۱</sup> و نیتروژن کل به روش کجلدال<sup>۲</sup> تعیین شدند. همچنین نسبت‌های برخی از عناصر شامل Fe/Mn، Fe/P، و Pb/Ni (رووان و همکاران، ۲۰۰۰) نیز محاسبه شد.

#### تفکیک منابع رسوب

لازمه اجرای منشأیابی رسوب تعیین ترکیب بهینه از ردیاب‌ها یا مجموعه‌ای از خصوصیات مواد منابع رسوب است که توانایی و قدرت تشخیص و تفکیک منابع بالقوه رسوب را داشته باشد. در این مطالعه، ردیاب‌های ژئوشیمیایی در قالب یک روش آماری دو مرحله‌ای (کولینز و همکاران، ۱۹۹۷؛ مینلا و همکاران، ۲۰۰۸b) برای انتخاب ترکیب بهینه ردیاب‌های قادر به جداسازی و تفکیک منابع رسوب استفاده شد. در مرحله اول، آماره H یا کروسکال-والیس<sup>۳</sup> در آزمون ناپارامتری برای تعیین ردیاب‌هایی که قادر به جداسازی و تفکیک منابع رسوب بودند، استفاده شد.

در مرحله دوم، به منظور انتخاب ترکیب بهینه از زیرمجموعه ردیاب‌ها که به عنوان ویژگی بالقوه در مرحله اول انتخاب شدند، از تحلیل توابع تشخیص چند متغیره گام به گام<sup>۴</sup> استفاده شد. هدف این تحلیل به حداکثر رساندن تفکیک بین منابع با به حداقل رساندن مجموعه بهینه ردیاب‌ها بوده است. به منظور تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار STATISTICA 6.0 (۲۰۰۱) استفاده شد.

#### مدل سازی منشأیابی بر اساس عدم قطعیت با استفاده از روش Bayesian

در این مطالعه آنالیز عدم قطعیت در تعیین سهم نسبی منابع رسوب بر اساس مدل ترکیبی Bayesian (بوستولد، ۲۰۰۷) مورد استفاده و در قالب یک مدل ترکیبی منشأیابی رسوب مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا بر اساس روش آماری Bayesian، توابع احتمال برای سهم نسبی هر

1 - Walkley-Black method

2 - Kjeldahl method

3 - Kruskal-Wallis test

4 - Stepwise multivariate discriminant function analysis

5 - Prior

6 - Posterior

مرتج-فرسایش آبراه‌های (فرسایش زیرسطحی) و اراضی دیم-فرسایش سطحی در حوضه آبخیز زیدشت در جدول ۱ ارایه شده است. با توجه به نتایج این آزمون اختلاف میانگین‌های هر یک از ردیاب‌ها به جز کلسیم، کروم، مس، گالیم، سدیم، نیکل، سلنیم و همچنین نسبت‌های عناصر شامل Fe/P, Fe/Mn, Fe/Ni و Pb/Ni در سطح احتمال کمتر از ۰/۰۵ معنی‌دار است (جدول ۱).

این یافته بیانگر این است که سایر ردیاب‌های ژئوشیمیایی دارای قدرت تفکیک و جداسازی واحدهای کاری در این حوضه می‌باشند. بدین ترتیب ردیاب‌هایی که قادر به تفکیک منابع رسوب هستند، از مجموعه داده حذف شده و مراحل بعدی تجزیه و تحلیل بدون این ردیاب‌ها صورت گرفت.

برای انتخاب ترکیب بهینه‌ای از مجموعه ردیاب‌های ژئوشیمیایی که قادر به جداسازی منابع بالقوه رسوب هستند، ۲۱ ردیاب باقیمانده از مرحله اول وارد آزمون تحلیل تشخیص شد. این آزمون با سه روش استاندارد، پیش‌رونده و پس‌رونده اجرا شد. بدین ترتیب ترکیب بهینه ردیاب‌ها با بیشترین تأثیر در تفکیک گروه‌ها، انتخاب شدند. نتایج توابع تفکیک حاصل از تحلیل توابع تشخیص با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی بر اساس سه روش مذکور در جداول ۲ و ۳ ارایه شده است.

نتایج نشان داد در روش استاندارد تمام ۲۱ ردیاب مورد استفاده به عنوان متغیر با تأیید ۱۰۰ درصدی تفکیک منابع رسوب و در روش پیش‌رونده ۱۴ ردیاب با درصد صحت کلی طبقه‌بندی ۱۰۰ درصد وارد مدل شده‌اند. در حالی که روش پس‌رونده تنها ۷ ردیاب با تأیید بیش از ۹۷ درصد تفکیک منابع رسوب، ردیاب‌های بر (B)، کربن آلی (C)، پتاسیم (K)، مولیبدن (Mo)، فسفر (P)، سرب (Pb) و تالیوم (Tl) را به عنوان ترکیب بهینه از ردیاب‌ها انتخاب نموده (جدول ۲) که قادر به جداسازی منابع رسوب در حوضه آبخیز زیدشت هستند بوده است.

$$L(x|\hat{\mu}_j, \hat{\sigma}_j) = \quad (4)$$

$$= \prod_{k=1}^n \prod_{j=1}^n \left[ \frac{1}{\hat{\sigma}_j \times \sqrt{2 \times \pi}} \times \exp \left( -\frac{(X_{kj} - \hat{\mu}_j)^2}{2 \times \hat{\sigma}_j^2} \right) \right]$$

که در آن  $X_{kj}$  ویژگی ردیاب  $k$  ام نمونه رسوب است. درست‌نمایی سهم نسبی منابع رسوب  $f_q$  بر اساس اطلاعات اولیه (با استفاده از ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  برای هر منبع) بر اساس تابع توزیع بتا محاسبه می‌شود.

$$L(f_q|\alpha_i, \beta_i) = \prod_{i=1}^n \frac{f_i^{\alpha_i-1} \times (1-f_i)^{\beta_i-1}}{B(\alpha_i, \beta_i)} \quad (5)$$

بدین ترتیب در نهایت درست‌نمایی اطلاعات اولیه در درست‌نمایی نمونه‌های رسوب به منظور محاسبه احتمال پسین غیرنرمال، ضرب می‌شود. این مدل بر اساس دو شرط نتایج سهم منابع رسوب را با در نظر گرفتن عدم قطعیت ارایه می‌نماید. شرایط مذکور شامل تغییرپذیری درصد سهم منابع رسوب بین صفر و یک ( $0 \leq f_i \leq 1$ ) و برابری مجموع درصد سهم منابع رسوب با یک ( $\sum_{i=1}^n f_i = 1$ ) است.

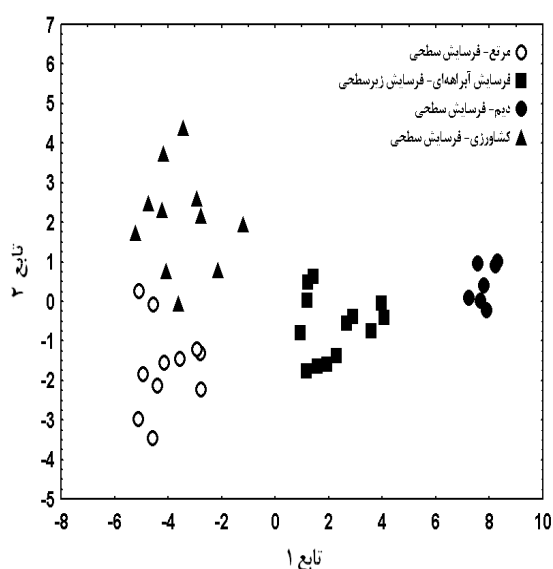
در این مطالعه، مدل عدم قطعیت در قالب یک برنامه با استفاده از برنامه‌نویسی در برنامه Matlab تهیه و اجرا شد. خروجی این برنامه شامل سهم نسبی هر یک از منابع رسوب بود در تولید رسوب بود که به صورت نمودارهایی برای هر یک از منابع رسوب به صورت جداگانه و به شکل سطوح اطمینان یا محدوده عدم قطعیت ارایه گردید. همچنین به منظور ارایه سطوح اطمینان در بازه‌های مختلف، صدک‌های ۵، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد هم از خروجی‌های اجرای این مدل است که صدک ۵۰ درصد بیانگر میانه سهم نسبی هر منبع در تولید رسوب است.

## نتایج و بحث

نتایج آزمون آماری کروسکال-والیس در بررسی توان ردیاب‌ها در جداسازی واحدهای کاری شامل مرتج-فرسایش سطحی، اراضی کشاورزی-فرسایش سطحی،

جدول ۱- نتایج آزمون کرومیکال-والیس در بررسی توان ردیاب‌های ژئوشیمیایی در جداسازی منابع رسوب در منطقه مطالعاتی

ردیاب	کای اسکوتر	سطح معنی داری	ردیاب	کای اسکوتر	سطح معنی داری
Al	۲۱/۱	۰/۰۰۰	Mn	۲۲/۹	۰/۰۰۰
B	۲۰/۶	۰/۰۰۰	Mo	۳۴/۹	۰/۰۰۰
Ba	۲۰/۰	۰/۰۰۰	N	۲۳/۱	۰/۰۰۰
Be	۲۱/۴	۰/۰۰۰	Na	۲/۳	۰/۰۱۵
Bi	۱۴/۵	۰/۰۰۲	Ni	۱/۳	۰/۷۲۸
C	۲۱/۹	۰/۰۰۰	P	۲۳/۲	۰/۰۰۰
Ca	۶/۸	۰/۰۷۷	Pb	۳۳/۱	۰/۰۰۰
Cd	۳۰/۰	۰/۰۰۰	Se	۷/۷	۰/۰۵۲
Co	۲۰/۳	۰/۰۰۰	Sr	۲۳/۲	۰/۰۰۰
Cr	۷/۲	۰/۰۶۷	Te	۱۳/۱	۰/۰۰۴
Cu	۵/۴	۰/۱۴۲	Tl	۳۲/۷	۰/۰۰۰
Fe	۲۶/۲	۰/۰۰۰	Zn	۲۷/۶	۰/۰۰۰
Ga	۳/۸	۰/۲۸۱	Fe/Mn	۲/۸	۰/۴۳۱
K	۲۱/۹	۰/۰۰۰	Fe/P	۲/۱	۰/۵۴۵
Li	۲۱/۵	۰/۰۰۰	Pb/Ni	۳/۳	۰/۳۴۳
Mg	۲۲/۳	۰/۰۰۰			



شکل ۲- نمودار پراکنش توابع تحلیل تشخیص بر اساس ترکیب بهینه ردیاب‌های ژئوشیمیایی در حوضه آبخیز زیدشت

بدین ترتیب نتایج تحلیل تشخیص نشان داد که ۷ ردیاب نام برده شده معنی‌دارترین ردیاب‌ها در تفکیک و جداسازی چهار منبع رسوب بر اساس ردیاب‌های ژئوشیمیایی در حوضه آبخیز زیدشت بوده‌اند. برای ارزیابی الگوهای مختلف تغییرات مکانی چهار منبع رسوب، نمودار پراکنش توابع اول و دوم محاسبه شده توسط روش پس‌رونده تحلیل تشخیص و بر اساس ترکیب بهینه ۷ ردیاب ژئوشیمیایی ترسیم شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که هر چهار منبع رسوب بر اساس این ردیاب‌ها به خوبی تفکیک شده‌اند.

جدول ۲- صحت طبقه‌بندی منابع رسوب بر اساس ردیاب‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده در تحلیل توابع تشخیص در حوضه آبخیز زیدشت در روش استاندارد

منابع رسوب	درصد صحت طبقه‌بندی	نمونه‌های تأیید شده توسط تحلیل تشخیص در منابع رسوب
مرتع-فرسایش سطحی (۱)	۱۰۰	۱۱
مرتع-فرسایش آبراهه‌ای (۲)	۱۰۰	۰
اراضی دیم-فرسایش سطحی (۳)	۱۰۰	۰
اراضی کشاورزی-فرسایش سطحی (۴)	۱۰۰	۰
مجموع	۱۰۰	۱۱

جدول ۳- صحت طبقه‌بندی منابع رسوب بر اساس ردیاب‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده در تحلیل توابع تشخیص در حوضه آبخیز زیدشت در روش پیش‌رونده

منابع رسوب	درصد صحت طبقه‌بندی	نمونه‌های تأیید شده توسط تحلیل تشخیص در منابع رسوب
مرتع-فرسایش سطحی (۱)	۱۰۰	۱۱
مرتع-فرسایش آبراهه‌ای (۲)	۱۰۰	۰
اراضی دیم-فرسایش سطحی (۳)	۱۰۰	۰
اراضی کشاورزی-فرسایش سطحی (۴)	۱۰۰	۰
مجموع	۱۰۰	۱۱
روش پس‌رونده		
مرتع-فرسایش سطحی (۱)	۱۰۰	۱۱
مرتع-فرسایش آبراهه‌ای (۲)	۱۰۰	۰
اراضی دیم-فرسایش سطحی (۳)	۱۰۰	۰
اراضی کشاورزی-فرسایش سطحی (۴)	۹۰/۹	۱
مجموع	۹۷/۶	۱۲

نتایج حاصل از ترکیب ردیاب‌ها مشخص می‌کند که برای چهار منبع رسوب حوضه زیدشت یعنی مرتع-فرسایش سطحی، اراضی کشاورزی-فرسایش سطحی، فرسایش آبراهه‌ای و اراضی دیم-فرسایش سطحی به ترتیب مقادیر ۱۳ (۲۰-۸)، ۷/۵ (۱۰-۰)، ۵۹ (۴۵-۷۵) و ۲۰/۵ (۳۰-۱۰) درصد برآورد شده است. مقادیر داخل پرانتز بیانگر حدود اطمینان صدک ۵ و ۹۵ درصد می‌باشد. نتایج توزیع سهم هر یک از سه منبع رسوب بر اساس برآورد توزیع احتمال پسین در شکل ۴ نشان داده شده است.

محور X ها نشان دهنده میزان سهم نسبی هر یک از منابع رسوب در تولید رسوب و محور Y ها بیانگر

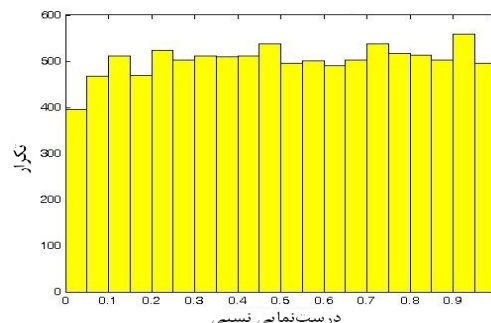
برای ارزیابی عدم قطعیت در سهم هر یک از منابع رسوب، مدل ترکیبی عدم قطعیت برای ترکیب کل نمونه‌های رسوب مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن  $10^6$  تکرار برای نمونه‌برداری مجدد برای برآورد احتمال پسین، این مدل توانست تابع تراکمی پسین صحیحی از داده‌ها ایجاد کند. همچنین توزیع احتمالات پسین نرمال نشده اثبات می‌نماید که مدل پیشنهادی وزن مناسبی بر هر دو طرف تابع توزیع قرار داده است (شکل ۳). با توجه به شکل ۳ با اجرای مدل عدم قطعیت هیستوگرام تشخیصی به دست آمده توزیع مناسبی بر اساس آماره درست‌نمایی نسبی دارد.

اگر میانگین سهم هر منبع برابر با میانه یا صدک ۵۰ باشد و صدک ۵ و ۹۵ بیانگر سطوح اطمینان عدم قطعیت باشد،

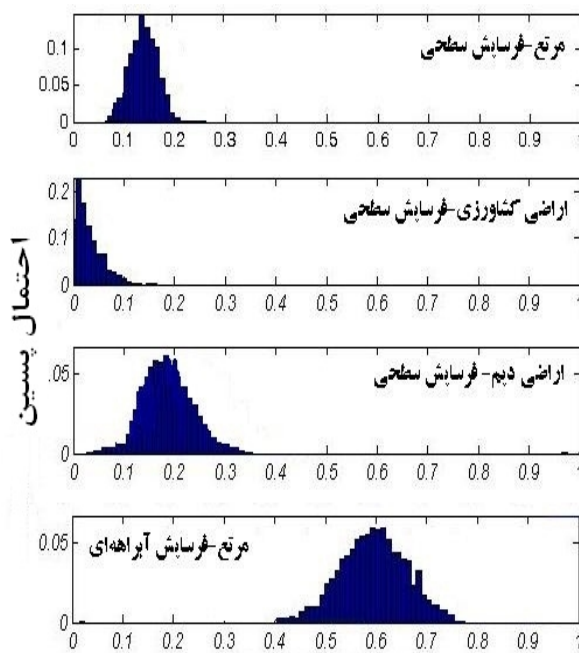
از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده نمودند. در این مطالعه از ۳۶ عنصر ژئوشیمیایی و دو عنصر رادیو اکتیو بر پایه آماره‌های مختلف و تحلیل تشخیص، ۲۳ ردیاب برای ورود به مرحله مدل ترکیبی انتخاب شد. نتایج نشان داد که متغیرهای مکانی و تعداد ردیاب در مدل عدم قطعیت اهمیت بیشتری نسبت به نوع ردیاب دارد. رووان و همکاران (۲۰۰۰) برآورد عدم قطعیت را در منشأیابی منابع رسوب مواد معلق بر اساس مدل برآورد عدم قطعیت درست‌نمایی تعمیم‌یافته<sup>۱</sup> به کار بردند. در این مطالعه ۶۰ نمونه از منابع رسوب مرتع، فرسایش آبراه‌های، چراگاه اصلاح‌شده و فرسایش گالی نمونه‌برداری و ۷ عنصر ژئوشیمیایی وارد مرحله مدل ترکیبی گردید. نتایج نشان داد که سطوح اطمینان عدم قطعیت دارای سطح معنی‌داری حدود ۲۵ درصد می‌باشد که نیاز به مطالعات آینده با توجه به اهمیت منشأیابی در فرسایش خاک را ایجاب می‌کند. مینلا و همکاران (۲۰۰۸) با اشاره به افزایش استفاده از مدل‌های ترکیبی چند متغیره در تعیین سهم نسبی منابع رسوب و عدم بررسی عدم قطعیت در مطالعات مختلف، عدم قطعیت را با استفاده از یک مدل آماری که همبستگی بین متغیرهای ردیاب را در بر می‌گیرد، محاسبه نمودند. نتایج نشان داده است که عدم قطعیت سهم نسبی منابع رسوب دارای اختلاف معنی‌داری است. توماس و همکاران (۲۰۰۸) عدم قطعیت منابع و پراکنش رسوبات در دشت سیلابی را با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره در قالب یک مدل ترکیبی شبیه‌سازی مونت کارلو در دشت بالون استرالیا ارایه نمودند. نتایج نشان داد عدم قطعیت سهم نسبی منابع رسوب متفاوت و به آبراه و جریان اصلی آب محدود می‌شود.

روش ترکیبی منشأیابی رسوب بر اساس مدل عدم قطعیت Bayesian از هر دو منبع اطلاعات شامل اطلاعات داده‌های اصلی و اطلاعاتی که در محتوای داده‌ها نهفته است، استفاده می‌نماید. همچنین احتمال پسین مربوط به داده‌هایی است که واقعا اتفاق افتاده نه داده‌های که احتمال وقوع دارند

احتمال پسین به دست آمده از تکرار نمونه‌برداری مجدد بر اساس داده‌های واقعی است.



شکل ۳- هیستوگرام تشخیصی برای اجرای مدل عدم قطعیت بر اساس درست‌نمایی نسبی برای چهار منبع رسوب حوضه آبخیز زیدشت



توزیع سهم منبع رسوب

شکل ۴- برآورد سهم چهار منبع رسوب حوضه آبخیز زیدشت با استفاده از مدل عدم قطعیت

عدم قطعیت در مدل‌سازی منشأیابی رسوب می‌تواند از منابع مختلف مانند داده‌های ورودی (تعداد و نوع ردیاب) و الگوریتم مورد استفاده ایجاد شود (مارتینز-کاربراس و همکاران، ۲۰۰۸). مارتینز-کاربراس و همکاران (۲۰۰۸) برای بررسی منابع عدم قطعیت (تعداد و نوع ردیاب‌ها در مدل ترکیبی و متغیرهای مکانی ردیاب‌ها در منابع رسوب) در مدل‌های ترکیبی منشأیابی

1 - Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE)



- 1- Bolstad W.M. 2007. Introduction to Bayesian Statistics Second Edition. John Wiley & Sons Inc. 437 pp.
- 2- Collins A.L. and Walling D.E. 2007. Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology* 88(1-2): 120-138.
- 3- Collins A.L. and Walling D.E. 2004. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography* 28: 159-196.
- 4- Collins A.L. and Walling D.E. 2002. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of Hydrology*, 261(1-4): 218-244.
- 5- 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.
- 6- Martinez-Carreras N. Gallart F. Iffly J.F. Pfister L. Walling D.E. and Krein A. 2008. Uncertainty assessment in suspended sediment fingerprinting based on tracer mixing models: a case study from Luxembourg. In: Schmidt J. Cochrane T. Phillips C. Elliott S. Davies T. Basher L. (Ed.) *Sediment Dynamics in Changing Environments IAHS Publi. 325*, IAHS Press pp. 94-105.
- 7- Lal R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development* 12: 519-539.
- 8- Lee J.A. 1997. Mineral magnetic properties of mixtures of environmental and synthetic materials: linear additivity and interaction effects. *Geophysical Journal International* 131: 335-346.
- 9- Millennium Ecosystem Assessment 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Desertification Synthesis*, World Resources Institute, Washington DC.
- 10- Minella J.P.G. Clarke R.T. Merten G.H. and Walling D.E. 2008a. Sediment source fingerprinting: testing hypotheses about contribution from potential sediment sources. In: Schmidt J. Cochrane T. Phillips C. Elliott S. Davies T. Basher L. (Ed.) *Sediment Dynamics in Changing Environments IAHS Publi. 325*, IAHS Press pp 31-37.
- 11- Minella J.P.G. Walling D.E. and Merten G.H. 2008b. Combining sediment source tracing techniques with traditional

(بوستولد، ۲۰۰۷). بنابراین آماره‌های Bayesian در مقایسه با سایر روش‌ها ابزار قدرتمندی را به منظور برآورد عدم قطعیت با توجه به استفاده از پارامترهای اندک ارائه نموده است.

### نتیجه‌گیری

به منظور ارزیابی عدم قطعیت در سهم هر یک از منابع رسوب در حوضه زیدشت، مدل ترکیبی عدم قطعیت بر اساس مدل Bayesian برای نخستین بار تهیه و بررسی شد. نتایج نشان داد برای چهار منبع رسوب مرتع-فرسایش سطحی، اراضی کشاورزی-فرسایش سطحی، فرسایش آبراهه‌ای و اراضی دیم-فرسایش سطحی به ترتیب مقادیر ۱۳ (۲۰-۸)، ۷/۵ (۱۰-۰)، ۵۹ (۴۵-۷۵) و ۲۰/۵ (۳۰-۱۰) درصد سهم رسوب برآورد شده است. این الگوریتم با توجه به استفاده از پارامترهای اندک برای مدل‌سازی مناسب می‌باشد. همچنین سهم منابع رسوب به صورت اعداد صفر و یک نمایش داده می‌شوند و مجموع آن‌ها برابر یک می‌باشد و بدین ترتیب می‌تواند با نتیجه توزیع پسین هماهنگ باشد نتایج این مطالعه به خوبی نقش فرسایش آبراهه‌ای (زیرسطحی) را در تولید رسوب نشان داد. هرچند این نتیجه در همه مناطق نمی‌تواند یکسان باشد. بنابراین تعیین سهم نسبی منابع رسوب در هر منطقه می‌تواند جهت کسب اطلاعات در زمینه طراحی و اصلاح روش‌های کنترل فرسایش در مقیاس حوضه آبخیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مرتبط نمودن مدل‌های مختلف منشأیابی با روش‌های عدم قطعیت به تعیین سطوح اطمینان عدم قطعیت در تعیین سهم منابع رسوب کمک خواهد نمود که این نکته در برنامه‌های مدیریتی مفید خواهد بود. در مطالعه حاضر کارایی ردیاب‌های ژئوشیمیایی در قالب مدل منشأیابی رسوب با رویکرد عدم قطعیت مورد تأیید قرار گرفت. بنابراین بررسی کارایی کاربرد ردیاب‌های مختلف دیگر مانند رادیواکتیو و بیوژئوشیمیایی و همچنین لحاظ فاکتورهای تصحیح مانند اندازه ذرات و میزان مواد آلی در مدل یادشده در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

### منابع

- 15- Smith H.G. and Dragovich D. 2008. Improving precision in sediment source and erosion process distinction in an upland catchment south-eastern Australia. *CATENA* 72(1): 191-203.
- 16- StatSoft Inc. 2001. STATISTICA: [data analysis software system] Version 6.0 for Windows update. StatSoft Inc.
- 17- Thoms M.C. Brennan S. and Franks S.W. 2008. The sources and dispersal of sediment within a large flood plain complex. In: Schmidt J. Cochrane T. Phillips C. Elliott S. Davies T. Basher L. (Ed.) *Sediment Dynamics in Changing Environments IAHS Publi. 325*, IAHS Press pp.52-59.
- 18- Walling D.E. 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of The Total Environment* 344(1-3): 159-184.
- 12- monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. *Journal of Hydrology* 348(3-4): 546-563.
- 13- 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.
- 14- Small I.F. 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*. IAHS Publ. vol. 276. IAHS Press Wallingford pp. 443–450.