

## مروری بر مطالعات فرسایش خاک و منشأیابی رسوب

کاظم نصرتی<sup>۱</sup>، مصطفی امینی<sup>۲\*</sup>

تاریخ پذیرش: ۹۵-۱۱-۱۳

تاریخ دریافت: ۹۵-۷-۱۷

### چکیده

رسوبات معلق در سیستم‌های رودخانه‌ای و حوضه‌ای از منابع غیرنقطه‌ای سرچشمه گرفته و از لحاظ مکانی و زمانی متفاوت‌اند. فرآیند منشأیابی رسوب بر روش‌هایی تأکید می‌کند که محققان از طریق نمونه‌های ترکیبی برداشت شده از رسوبات رودخانه و خاک سطحی و زیرسطحی حوضه قادر به تفکیک منابع رسوب از منابع غیرنقطه‌ای بوسیله ردیاب‌ها و مدل‌های ترکیبی باشند. استفاده از این روش به عنوان یکی از تکنیک‌های فرسایش و رسوب و نیز مکمل روش‌های سنتی فرسایش آبی، برای شناسایی منشأ و حرکت رسوبات در داخل رودخانه در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف و برآورد مقدار نسبی فرسایش خاک در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. این مقاله ضمن مرور جامع پیشینه پژوهشی در زمینه فرسایش خاک و رسوب تأکیدی بر تکنیک‌ها و روش‌های استفاده شده، مدل‌های ترکیبی و ردیاب‌های مختلف و شیوه‌های نمونه‌برداری در مطالعات گوناگون و معرفی آن‌ها با تأکید بر مطالعات منشأیابی در مقیاس جهان و ایران است. این پژوهش همچنین تکنولوژی‌های نوین (اختراعات) مرتبط با فرسایش خاک و رسوب در ایران را معرفی می‌کند. نتایج حاصل از مرور پیشینه پژوهش نشان داد که مطالعات منسجم در حوزه فرسایش و رسوب و با روش‌شناسی جدید از دهه ۶۰ میلادی شروع شده و در مقیاس حوضه‌های بزرگ، متوسط، کوچک، دامنه و پلات یا آزمایشگاه با تکنیک‌های مختلف واپاشی رادیونوکلوئید، عناصر کمیاب زمینی، خواص مغناطیسی خاک، ردیاب‌های دیگر و منشأیابی ادامه داشته‌اند. همچنین مدل‌های ترکیبی Slattery, Landwehr, Hughs, Collins, Motha, MixSIAR, Bayesian و Monte Carlo در بیشتر تحقیقات مربوط به منشأیابی استفاده شده‌اند که مدل Hughs به دلیل تکرار در داده‌ها و مدل اصلاح شده Collins به دلیل استفاده از فاکتورهای صحیح بهترین مدل‌های پیشگوی سهم منابع رسوب هستند.

کلمات کلیدی: منشأیابی رسوب، مدل‌های ترکیبی، ردیاب‌ها، فرسایش خاک

۱- دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، شماره تلفن: ۲۹۹۰۲۶۰۴، شماره فکس: ۲۲۴۳۱۶۹۰

ایمیل: [K\\_nosrati@sbu.ac.ir](mailto:K_nosrati@sbu.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ایران.

\*نویسنده مسئول ایمیل: [mo\\_amini@sbu.ac.ir](mailto:mo_amini@sbu.ac.ir)

## مقدمه

سنتی مثل پلات‌های فرسایشی و روش‌های پایش فرسایش آبی نیازمند اطلاعات لازم در مورد آن‌هاست اما بدست آوردن چنین داده‌هایی با محدودیت‌های اساسی روبرو بوده و امکان بدست آوردن چنین داده‌هایی در مقیاس‌های زمانی و مکانی بلند به دلیل هزینه‌های سنگین آن در روش‌های سنتی امکان‌پذیر نیست (۳۵)؛ پایش سنتی و تکنیک‌های مدل‌سازی نیازمند پارامترهای زیاد با سال‌ها اندازه‌گیری میدانی است. پرسش در مورد روش‌های جایگزین ارزیابی هدررفت خاک، توجه دانشمندان را به استفاده از نگرش‌های ردیابی برای مستندسازی مقدار و الگوی فضایی توزیع فرسایش خاک در داخل سیستم‌های رودخانه‌ای کرده است. در حوضه‌های آبخیز که تولید بیش از اندازه رسوب به عنوان یک مساله اصلی شناخته می‌شود، مدیریت و کاهش مقدار فرسایش نیازمند در نظر گرفتن چند سوال کلیدی است: ۱- منابع اصلی تولید رسوب چیست؟ ۲- این منابع رسوب در کجا واقع شده‌اند؟ ۳- مسیرها یا شبکه‌های ارتباطی مرتبط با حرکت و انتقال رسوب چیست؟ ۴- منشأ اصلی مساله رسوب از مناطق بالادست است یا از مسیر زهکشی؟ جواب به دو سوال اول مبنای علم منشأیابی رسوب را تشکیل می‌دهد. این رویکرد برای تعیین مقدار هدررفت خاک و تولید رسوب استفاده می‌شود. در حالت کلی دو رویکرد مستقیم و غیرمستقیم برای مطالعات فرسایش و رسوب وجود استفاده می‌شود (۲۴)، رویکرد غیرمستقیم شامل تکنیک‌های پایش سنتی هستند. این رویکرد

تغییر دینامیکی انتقال رسوب در داخل رودخانه می‌تواند بر روی رژیم هیدرولوژیکی در داخل حوضه آبخیز اثر گذاشته و ذرات ریز رسوبات علاوه بر اثرات تخریبی محیط‌های رودخانه‌ای (۸۴)، موجب افت کیفیت آب (۴۴)، کاهش ظرفیت مخازن و رسوب‌زایی در سدها (۴۷، ۵۴)، گرفتگی مسیر رودخانه و تغییر مورفولوژی کانال، اثرات و تخریب زیرساخت‌ها (۶۴، ۷۷) افزایش آشفستگی، کاهش نفوذ نور به داخل آب و در نتیجه کاهش تولید اولیه (۷۶)، خفه شدن جانداران آبی (۶۵) و انتقال مواد مغذی، فلزات سنگین و دیگر آلاینده‌های ارگانیک و غیرارگانیک شده و بر کیفیت و محیط اکولوژیکی آب در بازه‌های پایین رودخانه اثر می‌گذارد (۶، ۵۸، ۶۸). به دلیل غیرنقطه‌ای بودن آلاینده رسوب در سطح حوضه، تغییرپذیری متغیرها در مقیاس‌های فضایی و زمانی محیط‌های رسوبی و در نهایت دشواری پیش‌بینی انتقال رسوب (۱۷)، مطالعه این زمینه در گستره جهانی طرفداران زیادی پیدا کرده، رسوب، آلاینده‌های رسوبی و متعاقب آن تهدید سلامتی انسان در دهه‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (۸۰، ۲۰، ۲۱). با توجه به اثرات فرسایش تشدید شونده، نیاز به داده‌های قابل اعتماد در سطح جهان است (۴۱). کسب داده‌های قابل اعتماد به دلایل زیر نیاز است: ۱- بدست آوردن فهم درست از فرآیندها و فاکتورهای اصلی کنترل کننده فرسایش آبی؛ ۲- اعتبارسنجی مدل‌های پیشگوی فرسایش و رسوب خاک. تکنیک‌های

رسوب (با تأکید بر منشأیابی) صورت نگرفته است. دیویس<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۹) ردیاب های مورد استفاده برای تفکیک منابع رسوب در مناطق مختلف را که در مطالعات قبلی مورد استفاده قرار گرفته بودند مورد کنکاش قرار داده و در نهایت آنچه محققان در آینده باید برای توسعه مدل های منشأیابی رسوب مدنظر قرار دهند را پیشنهاد دادند. آن ها در این پژوهش به نقش کلیدی تکنولوژی در منشأیابی رسوب اشاره کردند. حدادچی و همکاران (۲۰۱۳) ضمن مرور پیشینه منشأیابی رسوب، مدل های موجود و ردیاب های مورد استفاده در این زمینه را مورد بررسی قرار داده و در نهایت براساس روش الگوریتم ژنتیک نکویی برازش این مدل ها را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که مدل های اصلاح شده کولینز و هاقس بهترین مدل های پیشگو در زمینه منشأیابی هستند. گازمان<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۳) ضمن مرور پیشینه پژوهش در منشأیابی پنج رویکرد ردیابی رسوبات را شناسایی کرده و مبانی نظری هر پنج رویکرد در برآورد فرسایش خاک و توزیع رسوب را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش ضمن ارائه مطالعات انجام شده در زمینه فرسایش خاک و منشأیابی رسوب، نقص های عمده و روندهای آتی مطالعات منشأیابی رسوب را تشریح کرده است. هدف این پژوهش جمع بندی مطالعات فرسایش خاک و منشأیابی رسوب در سطح جهان و ایران است تا ضمن ارائه مدل ها،

(۶۷) دارای مسائل و مشکلاتی در بحث فرسایش و رسوب است که عبارتند از: ۱- عدم تشخیص منشأ رسوبات. ۲- مشکل در ثبت مقدار فرسایش به دلیل تغییرات فضایی. ۳- عدم کاربرد روش های غیرمستقیم در برآورد انتقال رسوب به آبراهه ها (۷۴). در حالی که نگرش منشأیابی که یک روش مستقیم است بیشتر در جاهایی که رسوبات ریزدانه (کوچکتر از ۶۳ میکرون) غالب هستند کاربرد دارد و استفاده از این روش تنها به حوضه های آبخیز که ممکن است نیاز به طرح های حفاظت آب و خاک داشته باشند ختم نمی شود بلکه کمک بزرگی در جهت افزایش درک بنیادین ما از فرآیندها و مکانیسم هایی است که تولید و انتقال رسوب را در محیط های گوناگون و در مقیاس های مکانی و زمانی مختلف کنترل می کنند (۵۴). تکنیک منشأیابی به دنبال افزایش پیشرفت های علمی در ژئومورفولوژی به وقوع پیوسته و در کنار سایر رویکردهای فرسایش و رسوب به عنوان یک تکنیک، طرفداران زیادی را به خود جذب کرده و امروزه برای مطالعات کنترل فرسایش و رسوب از آن استفاده می شود. چهارچوب علم فرسایش و رسوب و تکنیک منشأیابی، پیشرفت های علمی در این زمینه و مدل های موجود، مسائل بنیادین این علم هستند و مطالعات پیشین در مقیاس ایران، مقادیر برآوردی فرسایش و رسوب حاصل از ردیاب ها و مدل های پیشگو یا رویکردهای سنتی اندازه گیری فرسایش و رسوب را مورد بررسی قرار داده اند ولی مطالعه جامعی در مورد ادبیات و مطالعات منتشر شده فرسایش و

3 - Davis

4 - Guzman

تکنیک‌ها و تکنولوژی‌های نوین مورد استفاده در این زمینه، ساختار روشن و منجمی از این علم نشان دهد.

### روش تحقیق

این پژوهش با تاکید بر مطالعات منشأیابی در فرسایش و رسوب انجام شده است. برای انجام این پژوهش تمامی کتب و مقالات منتشر شده در فضای اینترنتی و از پایگاه داده‌های معتبر و سایت‌های معتبر داخلی جمع‌آوری و مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش سعی گردیده است تا با گردآوری جامع منابع موجود و مرور مطالعات فرسایش خاک و رسوب، چهارچوب علم منشأیابی در قالب ارائه مفهوم نظری از منشأیابی، ارائه مدل‌های آن و تکنولوژی‌های نوین فرسایش و رسوب در جهان و ایران معرفی شود.

### نتایج و بحث

#### مطالعات فرسایش خاک

از نظر تاریخی، فرآیندهای آبی و بادی در مناطق خشک به عنوان دو واژه ناسازگار و مقابل هم دیده شده‌اند (۹). پیشکسوتان ژئومورفولوژی مناطق خشک در حالت کلی می‌توانند به دو گروه تقسیم شوند: طرفداران فرآیندهای بادی<sup>۵</sup> و طرفداران فرآیندهای روخانه‌ای<sup>۶</sup> (۱۰). طرفداران فرآیندهای بادی شامل محققانی مثل پنک<sup>۷</sup> (۱۹۰۵)، کیس<sup>۸</sup> (۱۹۱۲) و بگنولد<sup>۹</sup> (۱۹۴۱) هستند که باد را

به عنوان یک فرآیند غالب در مناطق خشک می‌دانند. در مقابل طرفداران فرآیندهای رودخانه‌ای معتقدند که فرآیند غالب در مناطق خشک آب است؛ افرادی مثل دیویس<sup>۱۰</sup> (۱۹۰۵)، براین<sup>۱۱</sup> (۱۹۲۵)، کاتون<sup>۱۲</sup> (۱۹۴۷). هر دو گروه در مورد فرآیندهای غالب فرسایشی به بحث و جدل پرداخته‌اند و هر دو مکتب در دوره‌ای به عنوان مکتب غالب بوده‌اند و در جدال این دو گروه، نقطه نظرهای متفاوتی مطرح شده است و در ادامه مبحث، مطالعات فرآیندهای ترکیبی (بادی و آبی) آورده می‌شود. از سال ۱۹۳۰ تا ۱۹۳۴، بعد از مشاهده حرکت تپه‌های شنی در محیط دریاچه لبا<sup>۱۳</sup> ژئومورفولوژیست آلمانی به نام وون بولو<sup>۱۴</sup> (۱۹۳۴-۱۹۳۰) عنوان کرد که فرآیندهای بادی و آبی به صورت همزمان در توسعه لندفرم‌ها نقش بازی می‌کنند. پس از این اتفاق، بسیاری از محققان سعی در ترکیب نقش این دو فرآیند در توسعه لندفرم‌های مناطق خشک داشتند و مطالعات زیر نمایانگر نقش ترکیبی فرآیندهای بادی و آبی در توسعه لندفرم‌ها است. در سال ۱۹۴۷ جغرافیدانی روسی نشان داد که بیابان قره قوم در شرق دریای مازندران بوسیله فرآیندهای آبی و بادی ایجاد شده است و فرآیند بادی غالب است (۳۷). بلسینباش<sup>۱۵</sup> (۱۹۵۴) زمین‌شناسی مخروط‌های واریزه‌ای در بیابان مجاو را بررسی

10 - Davis

11 - Bryan

12 - Cotton

13 - دریاچه‌ای در شرق نبراسکا-

14 - Von Bülow

15 - Blissenbach

5 - aeolianists

6 - fluvialists

7 - penk

8 - keyes

9 - Bahnold

و مشکلات مورد نزاع در مطالعات فرسایش و رسوب در حالت کلی عبارتند از مقیاس بندی و روش شناسی پژوهشی. ۱- مسائل مقیاس بندی: فرسایش خاک با تغییرات فضایی و زمانی پدیده هایی که دارای فرآیندهای با مقیاس چندگانه هستند سر و کار دارد (۳۸). در مقیاس منطقه ای، تحقیقات در مورد روابط متقابل بیابان و رودخانه در دره هایی هنوز به نتیجه مطلوبی نرسیده است. در مقیاس محلی و لندفرم های ویژه، برخی از سوالات مثل تکامل کانال های رودخانه ای که بوسیله فعالیت باد و فرسایش شیاری در شیب های تپه ای تحت تاثیر قرار می گیرند نیاز به بررسی های بیشتری دارد. در مقیاس زمانی، تحقیقات بر روی فرآیندهای قدیمی بر روی تغییرات آب و هوایی و تکامل بیابان ها در محیط های قدیمی تمرکز یافته اند و فرآیندهای زمین شناسی را در ساکنس های چینه شناسی بازسازی می کنند. تحقیقات جدید بر روی تغییرات فصلی و توزیع لندفرم ها در سیستم جدید تأکید دارند و ایجاد رابطه بین فرآیندهای قدیمی و جدید سخت است. بنابراین مسأله مقیاس های زمانی و مکانی مسأله فرسایش به عنوان یکی از مسائل قابل تامل در این زمینه است. ۲- روش شناسی پژوهش: این مسأله در ارتباط نزدیک با مسأله مقیاس بندی است. روش شناسی تحقیقات جدید شامل رویکرد چینه شناسی، رویکرد بیابان رسوب، رویکرد سن سنجی، رویکرد سیستم اطلاعات جغرافیایی و تحلیل های آماری و مدل های آب و باد است (۳۳، ۲۴، ۲۵، ۹) که می توانند در فرآیند جداگانه فرسایش آبی و بادی در مقیاس های

و دریافت که رسوبات کواترنری درون لایه ها و مرتبط با تغییرات آب و هوایی خشک و مرطوب دیرینه می باشند. در سال ۱۹۶۵، کار تریکارت اثر توامان فرآیندهای بادی و آبی حاصل از تغییرات آب و هوایی در توسعه رودخانه و دلتای نیجر را مستندسازی کرد و به عنوان یکی از آشکارترین فعالیت های مشترک آب و باد در منطقه حاره در نظر گرفته شد (۴۵). والکر<sup>۱۶</sup> (۱۹۶۷) پشته های حاشیه کانالی در دلتای کولویل در آلاسکا را مورد بررسی قرار داد. او روابط متقابل بین رودخانه و پشته های شنی رودخانه ای را به عنوان فعالیت مشترک باد و آب مورد بحث قرار داد. استریت و گرو (۱۹۷۶) نوسانات سطح دریاچه ای اواخر کواترنر در آفریقا را مطالعه کرده و تشریح کردند که مقادیر عظیم رسوبات دریاچه ای کواترنری در بیابان صحرا در اثر تغییرات آب و هوایی خشک و مرطوب بوجود آمده است و رسوبات حاصل فرآیندهای آبی و بادی است. از سال ۱۹۸۰ به بعد، اکثر محققان رسوب شناسی، وجود رسوبات بادی و آبی موجود در لایه های مناطق خشک را تأیید کردند (۴۲، ۴۳، ۶۹). حل مسأله فرآیند شناسی فرسایش، تنها مسأله موجود در این زمینه نبوده و همگام با آن، شناسایی منابع رسوبات آبی و بادی نیز مطرح شد؛ در این پژوهش، ضمن اشاره به مهمترین کاستی های پژوهشی در زمینه فرسایش و رسوب، مطالعات انجام شده در این زمینه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مهم ترین مسائل

که در رویکرد اول، هیدرودینامیک مبنای نظری تحقیقات فرسایش بادی و آبی است. در جدول زیر مطالعات و تحقیقات فرسایش و رسوب که در مقیاس‌های مکانی مختلف و با استفاده از تکنیک‌های مختلف انجام شده‌اند جمع‌آوری و ارائه شده است (جدول ۱).

زمانی و مکانی خاصی مورد استفاده قرار گیرند. تلفیق روش‌های پژوهشی مختلف هنوز به مرحله بلوغ نرسیده و تکنیک‌های اندازه‌گیری در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت مورد نیاز هست. جهت‌گیری‌های پژوهشی شامل مکانیسم‌های کنترل فرسایش و فرسایش‌پذیری خاک بوسیله آب و باد است

جدول ۱ - مطالعات انجام شده فرسایش خاک و منشأیابی رسوب (۲۷)

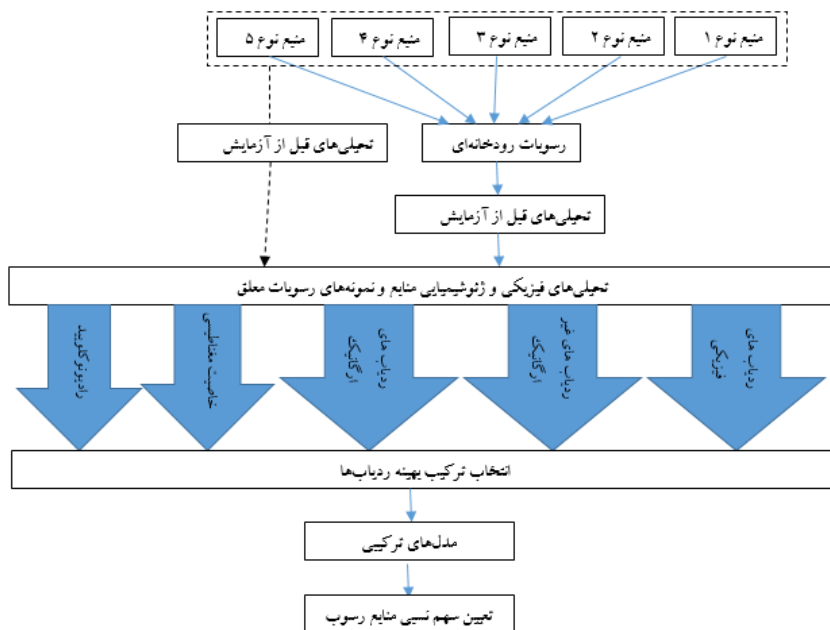
| واپاشی رادیونوکلئید       |                               |                               |                         |                         |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Benninger et al (1998)    | Dai et al(2011)               | de Roo (1991)                 | Kronvang (1997)         | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Li et al (2010)           | Martz and jong (1987)         | Olley et al (1993)            | Porto et al (2011)      | مقیاس حوضه بزرگ         |
|                           |                               |                               | Alwell et al (2016)     | مقیاس حوضه متوسط        |
| Walling et al (2000)      | Zhang and Walling (2005)      |                               | Zhou et al (2016)       | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Busacca et al (1993)      | Brown et al (1981)            | Chiu et al (2008)             | di stefano et al (1999) | مقیاس حوضه کوچک         |
| Estrany et al (2010)      | Lance et al (1986)            | Logharn et al (1988)          | Lu and Huggitt (2000)   | مقیاس حوضه کوچک         |
| Mabit et al (2009)        | Ming-yi et al (2006)          | Martz and jong (1991)         | Mizugaki et al (2008)   | مقیاس حوضه کوچک         |
| Belyaev et al (2010)      | Cuesta and Delgado (1997)     | montgomery et al (1997)       |                         | مقیاس حوضه کوچک         |
| Walling ang He (1999b)    | Walling et al (1999)          | Wilson et al (2008)           | Yin and Li (2008)       | مقیاس حوضه کوچک         |
| Bajracharaya et al (1998) | fifield et al (2010)          | Hassouni and Bouhlassa (2006) | Huggit and et al (2000) | مقیاس دامنه             |
| Kachanoskt (1988)         | Kachanoski and de jong (1984) | Li et al (2009)               | Mabit et al (2008)      | مقیاس دامنه             |
| Olson et al (2008)        | Quin et al (1999a)            | Schuller et al (2000)         | Sutherland (1992)       | مقیاس دامنه             |
| Wallbrink et al (2002)    | Walling et al (2009)          | Xinbao et al (1990)           | Zhang et al (1998)      | مقیاس دامنه             |
| Woolridge (1965)          | Bernard et al (1992)          | Quin et al (1999b)            |                         | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| عناصر کمیاب زمینی         |                               |                               |                         |                         |
| Mahler et l (1998)        |                               |                               | Zhou et al (2016)       | مقیاس حوضه بزرگ         |
|                           |                               |                               | Chen et al (2016)       | مقیاس متوسط             |
|                           | Polyakow et al (2004, 2009)   | Zhang and Liu (2016)          |                         | مقیاس حوضه کوچک         |

|                              |                            |                                 |                             |                         |
|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Deasytand Quinton (2010)     | Matisoff et al (2001)      | Stevens and Quinton (2008)      | Wude et al (2008)           | مقیاس دامنه             |
| Yang and et al (2008)        |                            |                                 |                             | مقیاس دامنه             |
| Kimoto et al (2006b)         | Li et al (2006)            | Michaelides et al (2010)        | Polyakow and nearing (2004) | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| Pu-litg et al (2004)         | Tian et al (1994)          | Wei et al (2003)                | Xue et al (2004)            | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| Zhang et al (2003)           |                            |                                 |                             | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| مغناطیس خاک و مواد مغناطیسی  |                            |                                 |                             |                         |
| Caitcheon (1993)             | Dearing et al (2001)       | Maher et al (2009)              | Slattery et al (2000)       | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Walling et al (1979)         | Yu and Oldfield (1993)     |                                 |                             | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Hardy et al (2000)           | Royall (2001)              |                                 |                             | مقیاس حوضه کوچک         |
| Armstrong et al (2010)       | Guzman et al (2010)        | Parsons et al (1993)            | Ventura et al (2002)        | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| ردیاب های دیگر               |                            |                                 |                             |                         |
| Swertmann and Schmidt (1980) |                            |                                 |                             | مقیاس دامنه             |
| Ventuar et al (2002)         | Bennett et al (2010)       |                                 | Olmez and Pink (1994)       | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| Plant et al (1999)           | Reibe (1995)               | Sharma et al (2009)             | Spencer et al (2011)        | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| Wheatcroff et al (1994)      | Yang and Holt (1968)       | yu et al (2011)                 |                             | مقیاس پلات یا آزمایشگاه |
| مطالعات منشأیابی در جهان     |                            |                                 |                             |                         |
| Barcellos et al (1997)       | Collins and Walling (2002) | Collins et al (1998)            | Cunha et al (2006)          | مقیاس حوضه بزرگ         |
| de junet et al (2009)        | Devereux et al (2010)      | Fox and Papanicolaou (2008a, b) | Martinotti et al (1997)     | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Miller et al (2005)          | Minella et al (2008)       | Motha et al (2003)              | Nosrati et al (2011)        | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Poulenard et al (2009)       |                            | Rowan et al (2000)              | Russell et al (2001)        | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Kouhpeima et al (2011)       | Sawhney and Frink (1978)   | Schoonover et al (2007)         | Walling et al (2007)        | مقیاس حوضه بزرگ         |
| Fox and Papanicolaou (2007)  |                            |                                 |                             | مقیاس حوضه کوچک         |
| Bellanger et al (2004)       |                            |                                 |                             | مقیاس دامنه             |
| مطالعات منشأیابی در ایران    |                            |                                 |                             |                         |
| حیدری و همکاران (۲۰۱۳)       | کوهیما و همکاران (۲۰۱۱)    | نصرتی و همکاران (۲۰۱۱)          | نصرتی (۲۰۱۱)                | مقیاس حوضه بزرگ         |
| نصرتی و همکاران (۲۰۱۳)       | حکیم خانی و همکاران (۲۰۰۷) | حکیم خانی (۲۰۱۰)                | عباسی و همکاران (۲۰۱۰)      | مقیاس حوضه بزرگ         |
| نصرتی و همکاران (۲۰۱۶)       | عطاپورفرد (۲۰۰۵)           | قدیمی و همکاران (۲۰۱۵)          | فیض نیا و همکاران (۲۰۰۹)    | مقیاس حوضه بزرگ         |

## رویکرد منشأیابی

رویکرد منشأیابی یکی از تکنیک‌های فرسایش خاک برای برآورد بیلان فرسایش خاک در مقیاس مکانی و زمانی بزرگ و توزیع زمانی و فضایی آن است که برای حل مساله مقیاس (فضایی و زمانی) مطرح شده است. روش‌های سنتی یا غیرمستقیم قابلیت حل مساله مقیاس فرسایش و رسوب را نداشتند به همین دلیل تکنیک منشأیابی مطرح شد. روش‌های برآورد فرسایش و رسوب به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند؛ در روش‌های غیرمستقیم (اندازه‌گیری‌های سنتی اندازه‌گیری فرسایش و رسوب) که شامل نقشه‌برداری، مساحی، اندازه‌گیری پروفیل، پین فرسایشی، نیمرخ متقاطع، فتوگرامتری، پلات‌های فرسایشی، پایش جریان رسوبات معلّق، سنجش از دور و غیره است اندازه‌گیری سخت بوده و برآورد دقیق فرسایش و رسوب

در مقیاس حوضه‌ای و بزرگ غیرممکن می‌باشد (۶۳) و از سوی دیگر روش‌های غیرمستقیم به دلیل تغییرپذیری فرسایش در مقیاس زمانی و مکانی در آن برای منشأیابی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (۷۴) و در چند دهه اخیر، استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات معلّق به عنوان منشأیاب به جای روش‌های پرهزینه و وقت‌گیر سنتی برای ردیابی ارتباط مابین فرسایش خاک و رسوبات وارده به خروجی حوضه مورد تایید قرار گرفته است (۵۷). تکنیک منشأیابی بر پایه ارتباط مابین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات و ذرات خاک منابع رسوب است (۳۹)؛ در این تکنیک، خاک فرسایش یافته از منابع براساس ردیاب‌های اندازه‌گیری شده و مدل‌های ترکیبی موجود سهم‌بندی و از هم تفکیک می‌شوند (۵۰) (شکل ۱).

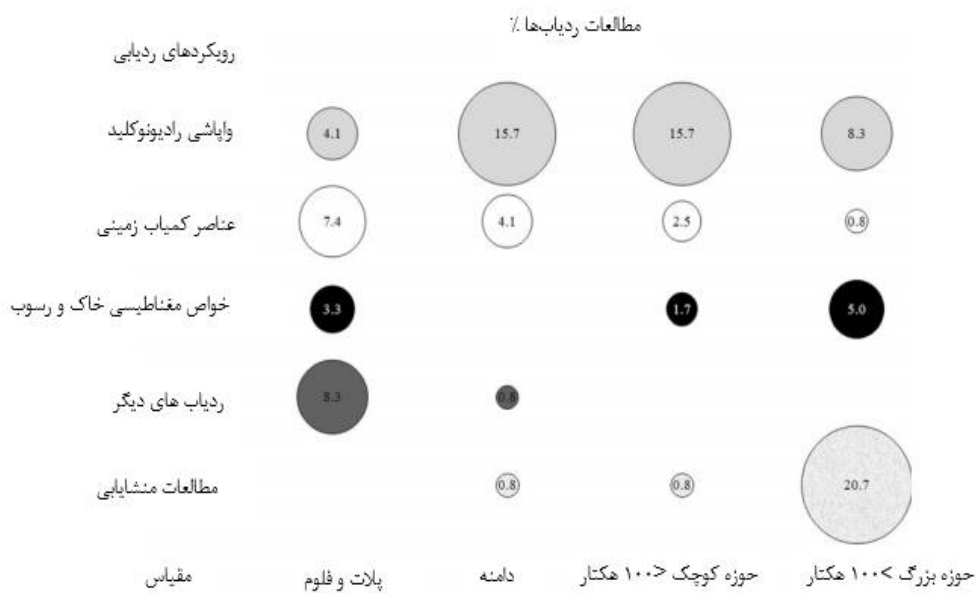


شکل ۱- مدل مفهومی منشأیابی رسوب (۲۹)

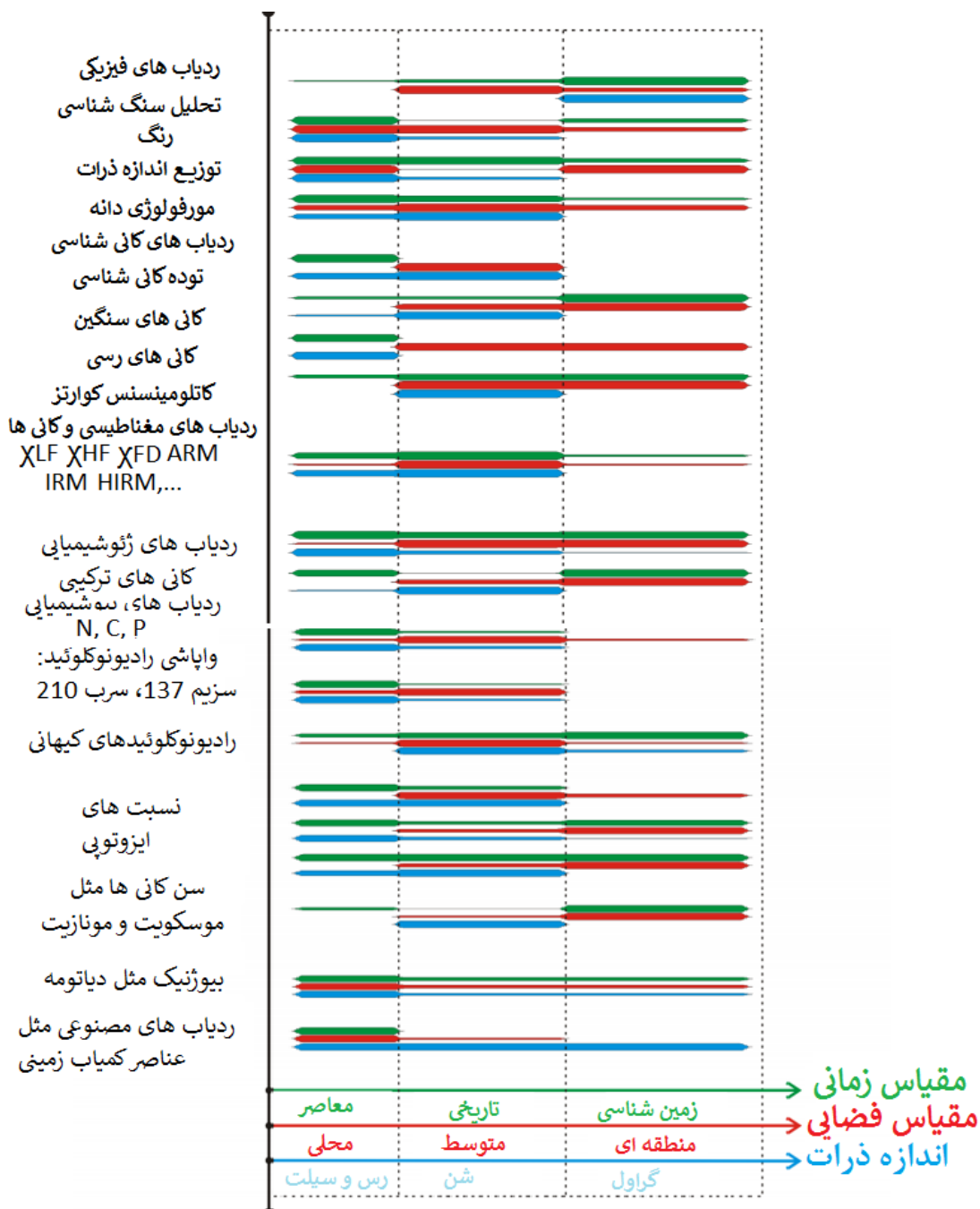


ولی براساس روش‌شناسی پژوهشی نوین نبوده است. مطالعات منشأیابی به طور اخص از دهه هفتاد یا هشتاد میلادی شروع شده است. شکل ۳ گراف ارائه شده توسط دهن<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۱۲) است که در آن مطالعات صورت گرفته در زمینه فرسایش و رسوب با استفاده از ردیاب‌های مختلف را براساس مقیاس (فضایی و زمانی) و اندازه ذرات تا سال ۲۰۱۲ ارائه داده است. شکل بالا جامع‌ترین آرشیو در مورد استفاده از ردیاب‌های مختلف در مقیاس‌های فضایی و زمانی و اندازه ذرات مختلف است و راهنمای خوبی برای پژوهشگران در استفاده از ردیاب‌های مختلف است.

براساس مطالعات گازمان و همکاران (۲۰۱۳) (جدول ۱ و شکل ۲) بیشترین مطالعات فرسایش خاک و رسوب به واپاشی رادیونوکلید در مقیاس دامنه و حوضه کوچکتر از ۱۰۰ هکتار و نیز مطالعات منشأیابی در مقیاس بالای ۱۰۰ هکتار اختصاص یافته است. خواص مغناطیسی خاک و رسوب در بین رویکردهای ردیابی تنها رویکردی است که دارای درصد مطالعه کم‌تر در سطح جهان است. شکل ۲ و جدول ۱ توزیع مطالعات در مقیاس‌های مکانی و براساس رویکردهای مورد استفاده را نشان می‌دهد. براساس جدول ۱ مطالعات فرسایش و رسوب به صورت منسجم از دهه شصت میلادی شروع شده است؛ هرچند قبل از آن نیز تحقیقات فرسایش و رسوب انجام گرفته



شکل ۲ - توزیع مطالعات فرسایش خاک با ردیاب‌های گوناگون در مقیاس‌های مختلف (۲۸)



شکل ۳- توزیع مطالعات فرسایش خاک با ردیاب‌های مختلف از بعد مقیاس (فضایی و زمانی)، اندازه ذرات و نوع ردیاب (۱۶)

### مدل‌های فرسایش خاک و منشأیابی

#### رسوب

مدل‌های مختلفی در سطح جهان برای پیش‌بینی فرسایش خاک استفاده می‌شوند که در حالت کلی به سه نوع تجربی، نظری و

فیزیکی تقسیم می‌شوند (۲). ۷۰ مدل شناخته شده در حوضه فرسایش و رسوب وجود دارند که ۲۹ مورد تجربی، ۳۲ مورد نظری و ۱۶ مورد فیزیکی هستند. در این میان ۷ مورد به صورت مشترک تجربی- نظری بوده و یک

فیزیکی از لحاظ اندازه، ساختار، پیوستگی، بعد، قطعیت و توزیع را نمایش می دهد. جدول زیر می تواند راهنمای خوبی برای محققان در انتخاب مدل باشد.

مورد نظری فیزیکی است. مدل های فیزیکی در میان مدل های دیگر دارای تعداد بیشتری هستند؛ به همین دلیل ضرورت بررسی بیشتر این مدل ها احساس می شود. بر این اساس، جدول زیر ویژگی های اساسی مدل های

جدول ۲- مدل های فیزیکی و مشخصات آن ها (۲)

| مدل        | توده های | توزیع شده | تصادفی | قطعی | یک بعدی | دو بعدی | یکپارچه | غیر یکپارچه | رخدایی | پیوسته | ساختار شیبی | ساختار غیر شیبی | دارای اندازه مجزا | دارای چندین اندازه |
|------------|----------|-----------|--------|------|---------|---------|---------|-------------|--------|--------|-------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| LASCAM     |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       |             | ✓      |        |             | ✓               |                   | ✓                  |
| LISEM      |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       |             | ✓      |        | ✓           |                 | ✓                 |                    |
| CREAMS     |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       |             | ✓      |        | ✓           |                 | ✓                 |                    |
| WEPP       |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       |             |        | ✓      |             |                 | ✓                 |                    |
| EUROSEM    |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       | ✓           | ✓      |        | ✓           |                 | ✓                 |                    |
| KINEROS    |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       | ✓           | ✓      |        |             | ✓               | ✓                 |                    |
| KINEROS2   |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       | ✓           | ✓      |        |             | ✓               | ✓                 |                    |
| RUNOFF     |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       | ✓           | ✓      |        |             | ✓               | ✓                 |                    |
| WESP       |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       | ✓           | ✓      |        |             | ✓               | ✓                 |                    |
| CASC2D-SED |          | ✓         |        | ✓    |         | ✓       |         | ✓           | ✓      |        |             | ✓               | ✓                 |                    |
| SEM        |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       | ✓           |        | ✓      |             | ✓               | ✓                 |                    |
| SHESED     |          | ✓         |        | ✓    | ✓       |         | ✓       | ✓           |        | ✓      |             | ✓               | ✓                 |                    |

بیسین و مونت کارلو از طریق تولید داده های تصادفی بوسیله آماره های میانگین و انحراف معیار سهم منابع تولید رسوب را مشخص می کنند. تکنیک منشأیابی با توجه به مزیت هایی که نسبت که به تکنیک های دیگر در برآورد نسبی رسوب از منابع مختلف دارد دارای یک سری پیش فرض ها می باشد که کاربرد این تکنیک را با سوالات جدی روبرو می کند: ۱- همه منابع بالقوه تولید رسوب، دارای تولید رسوب هستند. ۲- در هنگام

رسوبات معلق با سهم های مختلف از هر منبع که با توجه به فرآیندهای فرسایشی مختلف در طول فضا و زمان متفاوت اند از منابع مختلفی سرچشمه می گیرند. در زمینه منشأیابی رسوب، مطابق مرور پیشینه پژوهش، ده مدل برای تعیین سهم نسبی رسوب از منابع مختلف وجود دارد که دو مورد از این مدل ها (کولینز<sup>۱۸</sup> و لندور<sup>۱۹</sup>) اصلاح شده اند و مدل های

مرحله انتقال، در نظر نگرفتن ردیاب‌های مناسب و تخصیص منشأ‌های درست ممکن است روی صحت پیش‌بینی منابع اثر بگذارند؛ به همین دلیل از باند عدم قطعیت مونت کارلو (-۹۰ تا +۱۵۰٪) یا بیسین ( $0 < p < 1$ ) استفاده می‌شود تا گزینه‌های مختلف مدیریت فرسایش و رسوب مورد ارزیابی قرار گیرند (۵۴). این مدل‌ها به دلیل وجود عدم قطعیت‌هایی که دارند دچار نقص هستند و پژوهشگران در جدیدترین مقالات سعی در کاهش عدم قطعیت و نزدیک کردن برآوردها به واقعیت دارند. مدل بیس (Bayes) به شرح زیر می‌باشد (رابطه ۱):

$$P(f_q | \text{data}) = \frac{L(\text{data} | f_q) \times P(f_q)}{\sum L(\text{data} | f_q) \times P(f_q)}$$

آن و تقسیم آن بر مجموع کل بدست آمد. به این ترتیب  $L(\text{data} | f_q)$  درست‌نمایی داده‌ها، و  $f_q$  توزیع سهم منابع رسوب،  $P(f_q)$  احتمال اولیه براساس اطلاعات اولیه و  $L(\text{data} | f_q) \times P(f_q)$  احتمال پسین غیرنرمال است (۱).

مدل عدم قطعیت بعدی، مدل مونت کارلو است که بر پایه رابطه ۲ استوار است:

$$p(x, y, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

تعداد تکرارها اجرا می‌شود. بعد از اجرای مدل، صدک‌های مربوط به نتایج حاصل از مدل مونت کارلو محاسبه شده و به این ترتیب باندهای عدم قطعیت موجود در مدل‌های

تحویل رسوب، همه منابع به صورت برابر در دسترس هستند ۳- در این تکنیک شاید منابع بالقوه رسوب غیر از آن چیزی باشد که محقق در نظر گرفته است. ۴- ردیاب‌های به کار گرفته شده در هنگام انتقال از منابع به آبراهه‌ها دچار تغییر نمی‌شوند؛ یعنی عنصر تغییر پیدا نمی‌کند با این وجود دچار تهی شدگی و غنی شدگی می‌شود. عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های ترکیبی از موارد بالا ناشی شده و محققان اصلاحات فراوانی در مدل‌های موجود به منظور برآورد درست منشأیابی انجام داده‌اند. یکی از این اصلاحات، استفاده از عدم قطعیت در مدل‌های ترکیبی است. رفتارهای تغییرپذیر ردیاب‌ها در

رابطه ۱

در این مدل، توابع احتمال سهم نسبی برای هر منبع رسوب  $f_i$  در منابع رسوب  $I$  در تمام نمونه‌های رسوب برداشت شده از خروجی زیرحوضه‌ها محاسبه شد. همچنین تابع احتمال سهم نسبی منابع رسوب ( $f_q$ ) با تولید داده‌های تصادفی از روی داده‌های اولیه محاسبه شد. مطابق آنچه که ذکر شد احتمال پسین با ضرب احتمال اولیه در درست‌نمایی

رابطه ۲

برای اجرای مدل مونت کارلو، مقادیر عددی منتسب به ردیاب‌ها در هر دو گروه رسوب و منابع رسوب با استفاده از رابطه ۲ با تکرارهای دلخواه تولید شده و مدل ترکیبی مورد نظر به

کردن تحلیل در طول فهم اولیه مسأله و بدست آوردن بسیطترین راه اندازه‌گیری ردیاب ممکن است.

۳- فرض ردیاب؛ فرض مسأله، ترتیب بزرگی تغییرات در ردیابها است و راه حل مسأله نرمال‌سازی روندها در مدل‌های غیرترکیبی است.

۴- شناسایی تغییرپذیری منابع رسوب؛ فرض مسأله تشخیص منابع براساس واریانس نسبی درون گروهی نسبت به واریانس برون گروهی است و راه حل، برداشت نمونه به تعداد کافی است.

۵- اندازه‌گیری عدم قطعیت موجود در ردیابها؛ فرض مسأله برای اندازه‌گیری رادیومتریک سزیم ۱۳۷ مرتبط با عدم قطعیت ذاتی به میزان پنج درصد در کانی رس است که اکثراً در روش نیمه کمی دیده می‌شود. راه حل این مسأله انجام خوب روند آزمایشگاهی و کنترل کیفیت مربوط به آن است.

۶- تغییر ردیاب؛ در طول انتقال و به ویژه در طول ته‌نشست رسوب، تغییراتی ممکن است در ترکیب زیستی رسوبات دریاچه‌ای اتفاق افتد و راه حل مسأله مبنی بر این است که باید تنها از ردیاب‌هایی استفاده شود که تغییر پیدا نمی‌کنند؛ در این رابطه، تحقیقات جدید از آزمون‌های آماری جدید برای تشخیص این تغییرات استفاده کرده‌اند. یکی از این آزمون‌ها استفاده از آزمون ضریب تغییرات و دیگری آزمون براکت است. فرض این آزمون‌ها این است که میانگین غلظت عناصر و یا غلظت عناصر در نمونه‌های رسوبات باید کم‌تر یا مساوی منابع رسوب باشد و اینکه

ترکیبی مشخص می‌شوند. در برخی از موارد دانشمندان برای کم کردن باند عدم قطعیت از میانه و انحراف معیار به جای میانگین و انحراف معیار و نیز نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده به جای تصادفی مثل مربع لاتین استفاده کرده‌اند (۱۵).

عدم قطعیت‌های موجود در این مدل‌ها را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱- مسأله فرموله کردن؛ به این معنی که چند گروه منشأ می‌تواند تشخیص داده شود، فرضیات حاکم بر این مسأله این است که با توجه به این که تعداد زیادی از گروه‌های منبع رسوب، مفید است به همان میزان می‌تواند مسأله تشخیص منشأ رسوب را با مشکل مواجه سازد و موجب راه‌حل‌های عددی فرعی گردد. از سوی دیگر منابع رسوبی که توسط پژوهشگر مشخص شده است معلوم نیست منابع رسوب واقعی باشند. یکی از فرض‌های اولیه در رابطه با نسبت ردیاب‌ها این است که تعداد ردیاب‌ها باید از تابع  $n-1$  تبعیت کند؛ به عبارت دیگر تعداد ردیاب‌ها باید یک مورد از تعداد منابع کم باشد تا بتوان منشأیابی را به درستی انجام داد در غیر این صورت باید از بهینه‌سازی استفاده کرد تا بتوان سهم نسبی منابع رسوب را به درستی تشخیص داد.

۲- تشخیص قدرت ردیاب‌ها برای تشخیص مابین منابع رسوب: فرض مسأله این است که قدرت تفکیک‌کنندگی تا حدی وابسته به تعداد، موقعیت و انواع منابع برای تشخیص و منابع آزمایشگاهی در دسترس برای تیم پژوهش است. راه حل مسأله بهینه

تکرار شود و نمونه‌های زیادی گرفته شده و تصحیحات اندازه ذرات نیز اعمال شود. برای تصحیح عامل اندازه ذرات در مبانی نظری، سه روش وجود دارد که اولی شامل اندازه‌گیری ذرات ریزتر از ۶۳ میکرون هم در منابع رسوب و هم در رسوبات، دومی محاسبه سطح ویژه ذرات در رسوب و منابع رسوب و کشف رابطه دقیق اندازه ذرات و غلظت هر ردیاب و استفاده از این رابطه در تصحیح و سومی تصحیح اندازه ذرات از نسبت مواد ارگانیکی رسوبات به منابع رسوب است.

۱۰- وجود منشأهای بالقوه و عدم شناسایی آن از سوی پژوهشگر: شناسایی منطقه و داشتن اطلاعات مکانی قابل قبول از منطقه از پیش‌فرض‌های انجام پژوهش است؛ به همین دلیل در صورت شناخت از مکان، امکان تعیین راهبردهای قابل قبول در مورد نمونه‌برداری وجود خواهد داشت. در حوضه آبخیز آشان بعد از مراجعه به منطقه و شناسایی دقیق تمام قسمت‌های آن، ابعاد جدیدی از آن مکشوف شد و آن شناسایی منابع بالقوه تولید رسوب بود. موقعیت‌های بهمن تا اواخر تابستان حفظ شده و از بین نمی‌روند و نمونه‌برداری از موقعیت این بهمن‌ها و مقایسه آن‌ها با مکان‌های بدون بهمن می‌تواند به عنوان یک دستاورد پژوهشی جدید باشد. چون در صورتی که نمونه رسوبات معلق برای مدت زمان مشخص و طولانی به صورت پیوسته از داخل رودخانه برداشت شده باشند (رسوبات ناشی از بهمن‌ها) با نمونه رسوبات مقطعی و رویدادی (رسوبات ناشی از رخداد بارش) متفاوت خواهند بود و امکان تعیین

ضریب تغییرات عناصر در رسوبات باید کم‌تر از منابع رسوب باشد در غیر این صورت نمونه‌ها یا عناصر خاص باید حذف گردند.

۷- جمع خطی؛ برخی از ردیاب‌ها مثل خاصیت مغناطیسی کانی‌ها دارای مسائل جمع غیرخطی هستند و راه حل مساله این است که از ترکیبی از ردیاب‌ها مثل رادیومتریک، ژئوشیمیایی و مغناطیسی (نگرش چندپارامتری) استفاده شود.

۸- استفاده از نقشه‌های قدیمی و با مقیاس نامناسب: در صورتی که نقشه کوچک مقیاس (برای مثال ۱:۲۵۰۰۰) وجود داشته باشد امکان تعیین مناسب تعداد و تراکم نمونه در منطقه فراهم می‌شود. با فرض داشتن نقشه کاربری اراضی ۱:۵۰۰۰۰ مربوط به ۱۰ سال قبل، اولاً در داخل این کاربری‌ها، کاربری‌های ریز دیگر قطعاً وجود خواهند داشت که نمایش داده نمی‌شود و از سوی دیگر تغییر کاربری که در طول زمان اتفاق می‌افتد باعث می‌شود پژوهشگر در انتخاب تعداد، تراکم و نیز موقعیت نمونه‌ها در سطح منطقه با مشکلاتی جدی مواجه شود و همین امر روی نتایج اثر می‌گذارد و یکی از فاکتورهایی که در تکنیک منشأیابی در نظر می‌گیرند این است که منطقه باید از لحاظ زمین‌شناسی، کاربری اراضی یا هر منشأ بالقوه دیگر دارای ناهمگنی باشد.

۹- غنی شدگی؛ فرض مسأله بر این است که غنی شدگی و تهی شدگی متمایزی در رسوبات ریز و درشت و مواد ارگانیکی رخ می‌دهد و راه حل مسأله این است که اندازه‌گیری در رسوبات با اندازه‌های مختلف

بیش تصحیحی مربوط به اندازه ذرات و نیز مواد آلی موجود در نمونه رسوبات است؛ به عبارت دیگر، با توجه به تغییر اندازه ذرات و نیز مقدار ماده آلی از منبع تا منطقه هدف، محققان ضریب تصحیحی متفاوتی برای این دو در نظر می گیرند و با توجه به اینکه اندازه ذرات ممکن است در مقدار ماده آلی موجود در نمونه اثر داشته باشند اعمال ضریب تصحیح مربوط به هر دو فاکتور تحت عنوان بیش تصحیحی نامیده می شود. از آزمون هایی که برای تعیین اعتبار مدل استفاده شده به کار گرفته می شوند می توان به نکویی برازش و یا نکویی میانگین مطلق اشاره کرد. در این حالت، به میزانی که عدد به صفر نزدیک تر باشد اعتبار مدل کم تر است و مطابق مبانی نظری، عدد نکویی برازش باید بیش تر از ۰/۸ باشد.

سهم نسبی رسوب از هر کدام از این دو منبع فراهم می شود. از جمله منابع بالقوه تولید رسوب که تا بحال شاید استفاده نشده است شناسایی گالی ها و ترانشه و جاده ها در حوضه و برداشت نمونه خاک از افق های مختلف خاک به عنوان منابع رسوب و تعیین سهم نسبی رسوب از هر کدام از افق ها است.

۱۱- مدل های ترکیبی؛ فرض مسأله بر این است که محدودیت برنامه نویسی خطی (بهینه مبنا) موجب خطا در پیش بینی سهم منابع رسوب می شود و راه حل مسأله این است که نگرش های احتمالی بیشتر توسعه داده شوند.

۱۲- بیش تخمینی و بیش تصحیحی از جمله مشکلات موجود در منشأیابی رسوب است که تحقیقات کمی در این زمینه انجام شده است. بیش تخمینی مربوط به هم بستگی ردیاب ها با همدیگر و اعمال هر دو ردیاب با هم بستگی بالا در مدل های ترکیبی و نیز

جدول ۳- رایج ترین مدل های ترکیبی استفاده شده در جهان (۲۹)

| منبع  | مدل  | اسم مدل          |
|---|--|------------------|
| (Slattery et al. 2000; Gruszowski et al. 2003)                    | $\sum_{i=1}^n [\sum_{j=1}^m s_{ij} x_j - c_i]^2$   | اسلتری           |
| (Collins et al. 1997a; Mukundan et al. 2010; Nosrati et al. 2011) | $\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{c_i - (\sum_{j=1}^m x_j s_{ij} o_j)}{c_i} \right\}^2 / w_i$                        | کولینز           |
| (Motha et al. 2003; Motha et al. 2004)                            | $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \sum_{j=1}^m x_j s_{ij})^2}{n}}$  | موتا             |
| (Hughes et al. 2009)  | $\sum_{i=1}^n \left( \frac{\sum_{j=1}^{1000} \sum_{k=1}^m x_j s_{ijk} / 1000 - c_i}{c_i} \right)^2$            | هاقس             |
| (Collins et al. 2010a; Collins et al. 2010b)                      | $\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{c_i - (\sum_{j=1}^m x_j s_{ij} o_j s_{vj})}{c_i} \right\}^2 w_i$                   | اصلاح شده کولینز |
| (Devereux et al. 2010)  | $\left( \frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n  c_i - \sum_{j=1}^m x_j s_{ji}  / \sqrt{\sum_{j=1}^m x_j^2 VAR_{ji}}$ | لندور            |

|                       |   |                    |
|-----------------------|---|--------------------|
| (Gellis et al. 2011)  | $\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n  c_i - \sum_{j=1}^m x_j s_{ij}  / \sqrt{\sum_{j=1}^m x_j^2 (VAR_{jij}/m_j)}$ | اصلاح شده<br>لندور |
| (Parnell et al, 2010) | $X_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K p_k s_{jk}}{\sum_{k=1}^K p_k} + e_{ij}$  | میکس سیار          |
| (نصرتی، ۲۰۱۱)         | $P(f_q   data) = \frac{L(data f_q) \times P(f_q)}{\sum L(data f_q) \times P(f_q)}$                                  | بیسین              |
| (Collins, 2012)       | $p(x, y, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$                     | مونت کارلو         |

همان صدک‌های مربوط به سهم نسبی رسوبات است که از ۵٪ تا ۹۵٪ متغیر است. به میزانی که باند عدم قطعیت مدل کم‌تر باشد؛ یعنی اگر به میانگین یا میانه نزدیک باشند مدل از اعتبار بیش‌تری برخوردار است. معیار نکویی برازش برای اعتبارسنجی مدل با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود. در این مدل، اگر عدد حاصل شده به ۱ نزدیک باشد مدل از اعتبار بیشتر و اگر به ۰ نزدیک باشد مدل از اعتبار کم‌تری برخوردار است.

$$\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{\left\{ \frac{[c_i - (\sum_{j=1}^m x_j s_{ij} z_j o_j)]^2}{c_i} \right\}}{w_i} \right) / n$$

رابطه ۳

studio که در قالب Cran اجرا می‌شود و نیز اکسل (ابزار Solver) اشاره کرد.

حدادچی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش نکویی برازش<sup>۲۰</sup> در دو حالت محلی و الگوریتم ژنتیک در دو حوضه به این نتیجه رسیده‌اند که مدل‌های اصلاح شده کولینز (به دلیل استفاده از فاکتورهای تصحیح) و مدل هاقس (به دلیل استفاده از تکرار داده‌ها در مدل) بهترین پیشگوه‌های سهم نسبی رسوب از منابع مختلف هستند (جدول ۴). برای ارزیابی نتایج مدل‌ها به غیر نکویی برازش از باند عدم قطعیت نیز استفاده می‌کنند. باند عدم قطعیت

برای حل این مدل‌ها با ردیاب‌های زیاد، نرم‌افزارهای مختلفی پیشنهاد شده است که می‌توان به نرم‌افزار Matlab و R (MIXSIAR)

<sup>20</sup> Goodness Of Fit (GOF)



جدول ۴- مقادیر نکویی برآزش در هفت مدل ترکیبی در دو روش بهینه‌سازی (۲۹)

| نکویی برآزش %    |         |       |            |         |       | روش بهینه‌سازی | مدل های ترکیبی   |
|------------------|---------|-------|------------|---------|-------|----------------|------------------|
| حوضه ان اف بی آر |         |       | حوضه بلتون |         |       |                |                  |
| بیشینه           | میانگین | کمینه | بیشینه     | میانگین | کمینه |                |                  |
| ۱۶/۸             | ۱۵/۴    | ۱۳/۳  | ۹۰         | ۷۵/۵    | ۵۳    | الگوریتم ژنتیک | کولینز           |
| ۷۹               | ۵۴      | ۳۰/۳  | ۸۹/۲       | ۷۶/۸    | ۶۲/۲  | محلی           |                  |
| ۷۳/۷             | ۶۱      | ۲۲/۳  | ۷۰         | ۶۰/۵    | ۴۳/۴  | الگوریتم ژنتیک | اصلاح شده کولینز |
| ۷۵/۳             | ۵۵/۷    | ۱۸    | ۸۷/۸       | ۷۲/۵    | ۶۰/۸  | محلی           |                  |
| ۷۸               | ۲۱/۷    | ۱     | ۸۸/۵       | ۷۶/۷    | ۶۱/۶  | الگوریتم ژنتیک | هاقس             |
| ۷۵/۴             | ۶۰/۳    | ۳۵/۷  | ۸۸/۶       | ۷۷      | ۶۳    | محلی           |                  |
| <۰               | <۰      | <۰    | ۷۴/۷       | ۶۳/۷    | ۴۸    | الگوریتم ژنتیک | لندور            |
| ۶۷/۳             | ۴۸      | ۲۵/۵  | ۸۸         | ۷۵/۶    | ۵۹/۷  | محلی           |                  |
| <۰               | <۰      | <۰    | ۸۵         | ۷۰/۴    | ۵۶    | الگوریتم ژنتیک | اصلاح شده لندور  |
| ۷۳/۲             | ۵۰/۶    | ۲۲/۶  | ۸۷/۳       | ۷۵/۵    | ۵۹/۷  | محلی           |                  |
| ۷۳/۸             | ۳۱      | ۶۸/۴  | ۸۸         | ۷۶/۴    | ۶۴/۴  | الگوریتم ژنتیک | موثا             |
| ۷۷               | ۲۳/۳    | ۴۸/۷  | ۸۸/۸       | ۷۶/۳    | ۶۴/۴  | محلی           |                  |
| ۷۵               | ۳۰/۶    | ۶۹/۳  | ۸۹         | ۷۶/۱    | ۶۴/۷  | الگوریتم ژنتیک | اسلاتری          |
| ۷۷               | ۲۸/۲    | ۶۷/۵  | ۸۸/۸       | ۷۶/۳    | ۶۲/۸  | محلی           |                  |

همکاران (۲۰۰۲)، میزوگاکي<sup>۲۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸) از پلات نیز به عنوان منبع رسوب برای شبیه‌سازی فرآیندهای فرسایشی استفاده کرده‌اند. سه روش اساسی برای جمع‌آوری نمونه رسوبات معلق در حوضه آبخیز وجود دارد که شامل نمونه‌های نقطه‌ای، نمونه‌های تلفیق شده زمانی و جمع‌آوری خودکار نمونه‌های آبی است. براساس نوع وسیله استفاده شده، نمونه‌برداری نقطه‌ای شامل دو رویکرد است: ۱- جمع‌آوری صدها لیتر از آب رودخانه و استخراج رسوب از داخل آن بوسیله سانتریفیوژ جریان‌ی پیوسته (۴۹، ۱۹) و ۲- تکنیک آبیگری بر جای با استفاده از سانتریفیوژ

### رویکردهای نمونه‌برداری در منشأیابی

#### رسوب

مطالعات منشأیابی رسوب، متکی به جمع‌آوری انواع مختلف نمونه رسوبات رودخانه‌ای بوده و ممکن است شامل رسوبات کف رودخانه، نمونه‌های مخزن سد، سطح دشت‌های سیلابی و نمونه رسوبات معلق باشد (۲۹). در برخی از مطالعات، نمونه‌های خاک از منابع حوضه‌ای به صورت فضایی (زمین‌شناسی و کاربری اراضی) برداشته شده که شامل برداشت خاک از ۰/۵، ۲ و یا ۵ سانتی‌متری سطح زمین است. با وجود نمونه‌برداری از منابع فضایی، موثا<sup>۲۰</sup> و

قابل حمل یا سیستم‌های صافی‌سازی (۳۶).  
 مزیت تکنیک دومی این است که از آلودگی بوسیله نمونه‌برداری مکرر جلوگیری می‌کند. نمونه‌بردارهای تلفیق شده زمانی براساس کاهش سرعت جریان موجب ته‌نشینی رسوب در داخل تله‌انداز رسوبی می‌شوند (۶۱، ۵۳) که به صورت گسترده با پژوهش‌های ردیابی رسوبات سازگار هستند. این نمونه‌بردارها در طول رخدادهای سیل، ذرات زیر ۶۳ میکرون را که نماینده خوبی از حوضه آبخیز باشند جمع‌آوری می‌کنند (۶۱، ۵۶). نمونه‌بردارهای خودکار آب هزینه‌بر هستند اما امکان جمع‌آوری نمونه‌های آبی را فراهم می‌کنند؛ بنابراین دارای دقت زمانی بهتر برای شناسایی جریان رسوبات معلق هستند. مقایسه مابین تکنیک‌های نمونه‌برداری در جدول (۵) آمده و

در آن امکان شناسایی دو روش که در آن‌ها داده‌های لازم برای محاسبه اثرات هیستریک در دو نمونه‌بردار خودکار و تلفیق شده زمانی فراهم شده وجود دارد. تأخیر در رسیدن رسوبات بر تغییر بارگذاری رسوبات معلق در بازوهای پایین و بالارونده هیدروگراف اثر می‌گذارد (۷۵) نمونه‌های برداشت شده از نمونه‌بردارهای اتوماتیک و تلفیق شده زمانی می‌توانند نماینده واقعی از کل حوضه آبخیز باشند به این دلیل که انتقال پیوسته رسوبات در طول یک رخداد وجود دارد اما نیازمند یک دوره زمانی تقریباً بالای ده روز است که تمام رسوبات جمع شوند. نمونه‌بردارهای نقطه‌ای نیز دارای مزیت کمی‌سازی اثر دبی بر روی سهم رسوبات از منابع مختلف هستند (۲۹).

جدول ۵ - مقایسه انواع مختلف تکنیک‌های نمونه‌برداری (۲۹)

| نوع نمونه‌برداری                | تعیین اثر تاخیری | نمونه نماینده از کل حوضه | مقدار کافی نمونه | نمونه‌برداری دراز مدت | اثرات آبی رخدادهای سیل |
|---------------------------------|------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|------------------------|
| نمونه‌های نقطه‌ای               | x                | x                        | x*               | x                     | ✓                      |
| نمونه‌های تلفیق شده زمانی       | ✓**              | ✓                        | ✓                | ✓                     | x                      |
| نمونه‌های خودکار آب             | ✓**              | ✓                        | ✓                | x                     | x                      |
| نمونه‌های دشت سیلابی و بار بستر | x                | ✓                        | ✓                | x                     | x                      |
| نمونه‌های مخازن                 | x                | x                        | ✓                | x                     | x                      |

\*در تکنیک‌های آبیگری برجا، نمونه با مقدار کافی می‌تواند جمع‌آوری شود.

\*\*این نمونه‌بردارها به صورت جزئی مساله اثر تاخیری را کم می‌کنند اما به دام انداختن موثر رسوب بوسیله نمونه‌بردارها ممکن است در طول هیدروگراف تغییر یابد و اثر آن نمی‌تواند کمی شود.

### ردیاب‌ها در منشأیابی رسوب

مطابق مطالعات انجام شده در زمینه منشأیابی، ردیاب‌های استفاده شده، در حالت کلی به سه گروه شیمیایی (بیوشیمیایی و

ژئوشیمیایی)، فیزیکی و بیولوژیکی تقسیم می‌شوند. در تحقیقات اولیه منشأیابی، محققان بیشتر از ردیاب‌های مجزا و منفرد استفاده می‌کردند ولی با گذشت زمان از ردیاب‌های

دو مرحله‌ای کروسکال والیس و تابع تحلیل تشخیص استفاده می‌شود. هرچند در منابع جدید برای شناسایی خطاهای موجود در داده‌ها از ضریب تغییرات (۱۱) و آزمون براکت (۸۱) قبل از آزمون دو مرحله‌ای استفاده شده است.

چندگانه استفاده کردند تا ضمن آزمون قدرت تفکیک‌کنندگی منابع رسوب بوسیله این ردیاب‌ها، خطی بودن ردیاب‌ها را کاهش دهند (۱۲). ردیاب‌های شیمیایی (بیوشیمیایی و ژئوشیمیایی) در سطح جهان بیشتر از ردیاب‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و جدول زیر خلاصه‌ای از ردیاب‌هایی که در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته و ردیاب‌های بهینه را ارائه کرده است (جدول ۶). برای انتخاب ترکیب بهینه ردیاب‌ها از آزمون

جدول ۶- خلاصه‌ای از ردیاب‌های اندازه‌گیری شده در مطالعات منشأیابی. \* ردیاب‌هایی که در سطح جهان مورد آزمون قرار گرفته و در مطالعات مختلف در ترکیب بهینه قرار گرفته‌اند (برگرفته از منابع مختلف)

| نوع ردیاب   | ردیاب رسوب یا خاک  |
|---|--|
| ژئوشیمیایی و بیوژئوشیمیایی (ارگانیک و غیرارگانیک) | Organic C, Inorganic C, Total C, C/N, pH, Ca, e Mg, K, Na, Al, Fe, $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ , Total C, C <sub>tot</sub> , $\delta^{13}\text{C}$ , N, $\delta^{15}\text{N}$ , S, S <sub>tot</sub> , Si, Ag, Bi, Cd, Cr, Hg, Mn, Mn <sub>pyr</sub> , Mn <sub>oxa</sub> , Ti, Tm, P, Zn, Ni, Cu, As, Au, Mo, Sn, U, Pb, Co, Sr, Sn, Pd, Pr, As, Ba, Cd, Ce, Cs, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Ge, Hf, Ho, Hg, La, Lu, Rb, Na, Mg, Ca, K, Al, Al <sub>oxa</sub> , Al <sub>dit</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(100-sio <sub>2</sub> ), Fe, Fe <sub>oxa</sub> , Nd, Sm, Sc, Sb, Sn, U, Nd, Rb, Zn, Zr, Y, Yb, V, Tl, Tb, Th, XRF, Inorganic P, Organic P <sub>tot</sub> , C/N, <sup>204</sup> Pb, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb, <sup>208</sup> Pb, OSL, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Na <sub>2</sub> O, MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O CaO, TiO <sub>2</sub> , Mn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CIAi, IP <sup>k</sup> , TOC, TON, TP, Be, <sup>7</sup> Be, CIA, urease, alkaline phosphatase, $\beta$ -glucosidase, dehydrogenase. |
| فیزیکی  | Particle-size analysis (Sand, clay and silt fraction, Water dispersible magnetic susceptibility clay, Aggregation index) Frequency dependent (0.47 y 4.7 KHz), <sup>137</sup> Cs, <sup>40</sup> K, <sup>226</sup> Ra, Unsupported <sup>210</sup> Pb, Anhysteretic remanent magnetization (ARM), Isothermal remanent magnetization (SIRM and IRM at -0.1 T), Infrared spectroscopy, sediment or soil color, clay mineral: Smaktite, Colorite, Illite, Kaolinite   |
| بیولوژیکی   | Sterol rations, E. coli, Enterococci bacterial signatures  |
| ردیاب‌های بهینه*                                  | Co, Ca, Na, Fe <sub>dit</sub> , Mn <sub>oxa</sub> , Ni, C, K, P <sub>tot</sub> , N, Cu, <sup>137</sup> Cs, <sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub> , P <sub>Total</sub> , Sr, Zn, <sup>226</sup> Ra, Fe, Al, Cr, Al <sub>p</sub> , Mg, Mn, $\chi_{if}$ , ARM, SIRM, Pb, As, Al <sub>pyrophosphate</sub> , Al <sub>dit</sub> , Mn <sub>dit</sub> , Al <sub>dit</sub> , IRM <sub>880</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(100-SiO <sub>2</sub> ), CIA, Mn <sub>tot</sub> , Fe <sub>oxa</sub> , Al <sub>oxa</sub> , $\delta^{13}\text{C}$ , C <sub>total</sub> , $\delta^{13}\text{C}$ , $\delta^{15}\text{N}$ , C/N, U, Tb, P, Ge, Tl, Ga, Eu, Ba, Sm, Bi, Pd, Y, FeGa, Ti, Hf, Li, B, $\chi_{td}$ , Ho, W, Sb, Sn, V, In, Zn, Rb   |

ذره شامل رس و سیلت (کوچکتر از ۶۳ میکرون)، شن (بین ۶۳ میکرون و ۲ میلی‌متر) و گراول (بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر) وجود دارند.

همه ردیاب‌ها برحسب زمینه کاربریشان و با توجه به مقیاس‌های زمانی، مکانی و اندازه ذرات، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. سه اندازه

## تکنولوژی‌های نوین (اختراعات) در مطالعات فرسایش خاک و منشأیابی رسوب

با وجود سرمایه‌گذاری‌های ۳۶ درصدی معاونت ریاست جمهوری در توسعه فناوری، نقش این تکنولوژی‌ها در پژوهش‌های داخلی فرسایش و منشأیابی رسوب کم‌رنگ است و باید توجه جدی به این بخش گردد تا امکان استفاده از این تکنولوژی‌ها به عنوان تولید داخل میسر گردد. جدول زیر اختراعات ثبت شده در زمینه فرسایش و رسوب را نشان می‌دهد.

مقیاس‌های مکانی از محلی (۱۰ کیلومتر مربع)، متوسط (۱۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع) تا منطقه‌ای (بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع) متغیر هستند و در مقیاس زمانی سه دوره معاصر (۵۰ سال اخیر)، تاریخی (۵۰ تا ۱۰۰۰۰ سال اخیر) و زمین‌شناسی (بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰ سال) مد نظر است (۱۷). هر سه مورد فوق (مقیاس زمانی: به دلیل تغییر خاصیت ردیاب‌ها در طول زمان، مقیاس فضایی: به دلیل همگنی و یا ناهمگنی منطقه از نظر وجود منابع رسوب در دسترس و اندازه ذرات: به دلیل وجود محیط‌های رسوبی و فرآیندهای عملگر روی رسوبات) در استفاده از ردیاب‌ها محدودیت ایجاد می‌کنند و پژوهشگر باید با علم به این مسائل ردیاب‌های مناسب را انتخاب کند.

جدول ۷ - تکنولوژی‌های نوین اختراع شده در ایران (۷۸)

| شماره ثبت | سال ثبت | مخترع یا مخترعین   | اسم دستگاه   |
|-----------|---------|--|--|
| ۸۴۷۸۶     | ۲۰۱۴    | کاظم نصرتی و مصطفی امینی   | دستگاه نمونه‌بردار رسوبات معلق   |
| ۸۵۱۷۰     | ۲۰۱۴    | غلامرضا خسروی، میلاد خسروی و علیرضا نفرزادگان  | بند اصلاحی بشکه‌های رسوب گیر انعطاف پذیر و سازگار شونده جهت حفاظت آب و خاک در حوضه‌های آبخیز |
| ۳۰۴۷۳     | ۲۰۰۴    | داود نیک نامی  | نمونه‌بردار استوانه‌ای رواناب و رسوب   |
| ۷۸۸۹۵     | ۲۰۱۲    | محمد رضا اختصاصی و حمیدرضا عظیم‌زاده   | تله رسوب‌گیر فرسایش بادی -مدل سیفونی   |
| ۸۵۰۰۵     | ۲۰۱۳    | آیدا علی‌نیا و امیرحسین علوی و مرتضی سعادت‌ی و سیدعلی ضیائی و دانیال محمدزاده شادمهری و علی متین نظر | دستگاه نمونه‌گیر خاک با روش الکترومغناطیسی   |
| ۸۱۵۷۶     | ۲۰۱۳    | کاظم بهرامی و سیدمحمد فاطمی عقدها و شهرام بهرامی   | دستگاه تعیین کمی فرسایش‌پذیری خاک در محیط‌های رودخانه‌ای                                     |
| ۸۸۸۷۹     | ۲۰۱۴    | علی محمد قائمی‌نیا   | دستگاه اندازه‌گیری نسبی حساسیت خاک به فرسایش بادی  |
| ۳۲۵۸۹     | ۳۰۰۵    | احمد شریفی مالواجردی   | حسگر فشردگی پروفیل خاک   |
| ۶۹۰۹۴     | ۲۰۱۰    | بهروز ابول‌پور   | دستگاه اندازه‌گیری مکش خاک (تانسیومتر) خودکار  |

|       |      |  |   |
|-------|------|--|---|
| ۶۶۱۳۰ | ۲۰۱۰ | جعفر نصرالهی آذر و غلام حسین شاهقلی                                | دستگاه اندازه گیری پارامترهای مکانیکی خاک   |
| ۵۲۵۲۳ | ۲۰۰۸ | عبدالامیر بستانی   | دستگاه کنترل EH و PH سوسپانسیون خاک   |
| ۵۱۰۹۴ | ۲۰۰۸ | وحید خرمشاهی و رضا مرید سادات و پگاه مرید سادات                    | دستگاه هوشمند اندازه گیری رنگ خاک به روش مانسل  |
| ۵۱۴۸۱ | ۲۰۰۸ | علیرضا شفیع زاده   | دستگاه نمونه گیر خاک دست نخورده استوانه مارپیچی ۲جداره  |
| ۸۱۷۳۲ | ۲۰۱۲ | علیرضا شفیع زاده و حامد پورآزاد و سید احسان حسینی و اصغر بسالت پور | دستگاه هوشمند اندازه گیری و ثبت مقاومت خاک در برابر نیروهای تنش برشی در شرایط خارج آزمایشگاهی |

### نتیجه گیری

دهه شصت میلادی شروع مطالعات منسجم فرسایش خاک و رسوب بوده و مطالعات منشأیابی به طور اخص از دهه هفتاد یا هشتاد پا به عرصه ظهور گذاشته‌اند. ۷۰ مدل شناخته شده در حوضه فرسایش و رسوب وجود دارند که ۲۹ مورد تجربی، ۳۲ مورد نظری و ۱۶ مورد فیزیکی هستند و ده مدل منشأیابی شامل مدل‌های کولینز، اصلاح شده کولینز، هاقس، موثا، اسلتری، لندور و اصلاح شده لندور، میکس سیار، بیسین و مونت کارلو در سطح جهان وجود دارند که براساس مطالعات، دو مدل اصلاح شده کولینز<sup>۲۲</sup> و هاقس<sup>۲۳</sup> دارای اعتبار بیشتری در منشأیابی رسوب هستند. پنج تکنیک نمونه برداری رسوب (نمونه برداری نقطه‌ای، نمونه برداری تلفیق شده زمانی، نمونه برداری خودکار آبی، نمونه برداری دشت‌های سیلابی و بار بستر و نمونه برداری از مخازن) و سه نوع ردیاب ۱- شیمیایی (بیوشیمیایی و ژئوشیمیایی)؛ ۲- فیزیکی و ۳- بیولوژیکی در مطالعات منشأیابی وجود دارد که براساس پیشینه پژوهشی ردیاب‌های بهینه معرفی شده‌اند. در ایران مطالعات اندکی در

مورد منشأیابی رسوب صورت گرفته و توسعه مدل در زمینه منشأیابی توسط هیچ محققى صورت نگرفته است. ردیاب‌هایی که در این پژوهش‌ها استفاده شده‌اند بیشتر ردیاب‌های ژئوشیمیایی هستند. مدل کولینز یا اصلاح شده آن در بیشتر تحقیقات ایرانی برای تعیین سهم نسبی رسوب استفاده شده و مطابق پیشینه پژوهشی، استفاده کمی از بقیه مدل‌ها شده است. مطالعات داخلی فقط در چهارچوب‌های پژوهشی تعیین شده توسط محققان خارجی صورت گرفته و هیچ توسعه علمی در مطالعات داخلی دیده نمی‌شود. همچنین در بین پژوهشگران داخلی، نصرتی (۲۰۱۱، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶) و حدادچی (۲۰۱۳ و ۲۰۱۶) در سطح بین‌المللی فعالیت گسترده‌ای در زمینه منشأیابی داشته‌اند. پژوهش‌های صنعتی (اختراعات) در زمینه فرسایش و رسوب و منشأیابی در ایران توسط طیف وسیعی از محققین صورت گرفته و مطالعات این بخش در توسعه صنعت و مطالعات فرسایش و رسوب مورد توجه محققان قرار نگرفته‌اند.

## References

1. Abbasi, Marzieh., Feiznia, Sadat., Ahmadi, Hassan, & Kazemi, Younes, 2009. Fingerprinting of windy sediment of Niatak using geochemistry elements tracing. *Dry ecology* 1: 35-43.
2. Aksoy, Hafzullah and Kavvas, M. Levent, 2005. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models, *catena* 64: 247-271.
3. Alewell, C. Birkholz, A. Meusburger, K. Schindler Wildhaber, Y & Mabit, L, 2016. Quantitative sediment source attribution with compound-specific isotope analysis in a C3 plant-dominated catchment (central Switzerland). *Biogeosciences* 13(5): 1587-1596.
4. Atarpourfard, Abbas., Khodami, Mahdi., Hossainy, Majid, Golbabayi, Hossain, 2005. Investigation of application of clay mineral possibility as a fingerprint in calculating of sediment yielding of Lat Shor catchment, 2th national conference of catchment and water resouces management of water and soil, Kerman.
5. Bagnold, R A., 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen, 11-65.
6. Bird, G. Brewer, P. A. Macklin, M. G. Nikolova, M. Kotsev, T. Mollov, M & Swain, C, 2010. Quantifying sediment-associated metal dispersal using Pb isotopes: Application of binary and multivariate mixing models at the catchment-scale. *Environmental pollution* 158(6): 2158-2169.
7. Blissenbach E, 1954. Geology of alluvial fans in semi arid regions. *Geological Society of America Bulletin* 55: 175-190.
8. Bryan, K., 1925. *The Papago country, Arizona*. United Stated Geological Survey (USGA) Water-Supply Paper, p 499.
9. Bullard, J E and Livingstone, I, 2002. Interactions between aeolian and fluvial systems in dryland environments. *Area* 34: 8-16.
10. Bullard, J E. McTainsh, G H, 2003. Aeolian-fluvial interactions in dryland environments: examples, concepts and Australia case study. *Progress in Physical Geography* 27: 471-501.
11. Chen, F. Zhang, F. Fang, N & Shi, Z, 2016. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 1-15.
12. Collins, AL. Walling, DE and Leeks, GJL, 1997a. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *Catena* 29: 1-27.
13. Collins, A.L., Walling, D.E, 2002. Selecting fingerprinting properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *J. Hydrol* 261: 218-244.
14. Collins, A. L., Zhang, Y., Walling, D. E., Grenfell, S. E., Smith, P., Grischeff, J., & Brogden, D, 2012. Quantifying fine- grained sediment sources in the River Axe catchment, southwest England: application of a Monte Carlo numerical modelling framework incorporating local and genetic algorithm optimisation. *Hydrological Processes*, 26(13), 1962-1983.
15. Cotton, C A., 1947. *Climatic Accidents in Landscape-making*. Christchurch, New Zealand: Whitcombe and Tombs, 126-174.
16. D'Haen, K. Verstraeten, G. & Degryse, P, 2012. Fingerprinting historical fluvial sediment fluxes. *Progress in Physical Geography* 36(2): 154-186.

17. Davis, C. M., & Fox, J. F, 2009. Sediment fingerprinting: review of the method and future improvements for allocating nonpoint source pollution. *Journal of Environmental Engineering* 135(7): 490-504.
18. Davis, W M, 1905. The geographical cycle in an arid climate. *Journal of Geology*, 13: 381-407.
19. Devereux, OH. Prestegard, KL. Needelman, BA and Gellis, AC, 2010. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. *Hydrol Process* 24: 1391– 1403.
20. Doody, D. G. Archbold, M. Foy, R. H & Flynn, R, 2012. Approaches to the implementation of the Water Framework Directive: targeting mitigation measures at critical source areas of diffuse phosphorus in Irish catchments. *Journal of environmental management* 93(1): 225-234.
21. Falbo, K., Schneider, R. L., Buckley, D. H., Walter, M. T., Bergholz, P. W., & Buchanan, B. P, 2013. Roadside ditches as conduits of fecal indicator organisms and sediment: Implications for water quality management. *Journal of environmental management* 128: 1050-1059.
22. Feiznia, Sadat., Ahmadi, Hassan., Moazzami, Mohammad, & Fahmi, Hedayat, 2009, Investigation and determination of sediment sources contribution using natural tracers of soil (Case study: Abolfars catchment, Khozestan province). *Journal of pasture and watershed-natural resources of Iran*, 4: 503-514.
23. Foster, G. R., 1988. Modeling soil erosion and sediment. *Soil erosion research methods*, Ankeny, Iowa, 97-117.
24. Gao, X T. Tang, K L, 1997. Study on alternate action of wind erosion and water erosion in Shenfu-Dongsheng Coal Mining area. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation* 3(4): 1-7. (in Chinese).
25. Gao, Z L. Mu, X M, 2004. Spatio-temporal change of land use/coverage in loess wind-water erosion crisscross region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(5): 146-150. (in Chinese).
26. Gellis, A. C & Walling, D. E, 2011. Sediment source fingerprinting (tracing) and sediment budgets as tools in targeting river and watershed restoration programs. *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems* 263-291.
27. Ghadimi, Ali Asghar., Khodashenas, Saeed Reza., Akbarzadeh, Mohammad Reza, & Ghram, Bijan, 2015. sediment fingerprinting of entered in lake of Sadha using geochemistry elements (Case study: river of Gholhagh in northern Khorasan province), *journal of lake and electricity and hydrology plant* 2(6): 20-31.
28. Guzmán, G., Quinton, J. N., Nearing, M. A., Mabit, L., & Gómez, J. A, 2013. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4): 816-833.
29. Haddadchi, A. Ryder, D. S. Evrard, O & Olley, J, 2013. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research* 28(4): 560-578.
30. Hakhimkhani, Shahrokh, 2010. Evaluation of relative contribution of erosion types in sediment yield (case study: Ghare Aghaj, Makou). *Journal of pasture and watershed* 1: 13-27.
31. Hakimkhani, Sh, 2006. Use investigation of tracers in tiny sediments of rivers using fingerprinting technique (case study: Poldasht watershed, Makou). PhD thesis. University of Tehran, 235.

32. Hakimkhani, S., Ahmadi, H, & Ghayoumian, J, 2009. Determination of surface and sub-surface erosion contribution in sediment yield using fingerprinting technique in the Mergen watershed-Makou. *Journal of water and soil sciences* 1: 83-96.
33. He Q, Walling D E, Owens P N, 1996. Interpreting the <sup>137</sup>Cs profiles observed in several small lakes and reservoirs in southern England. *Chemical Geology* 129: 115-131.
34. Heidari, K., Najafi Nejad, A., Khormali, F, & Baba nejad, M, 2013. Determination of land unit contributions in suspended sedimen yield using fingerprinting technique (Case study: Tol beneh catchment, Golestan province), *researches of environmental erosion* 11: 27-38.
35. Higgitt, DL, 199. Soil erosion and soil problems. *Prog Phys Geogr* 15: 91–100.
36. Horowitz, A. J. Elrick, K. A and Hooper, R. C, 1989. A comparison of instrumental dewatering methods for the separation and concentration of suspended sediment for subsequent trace element analysis. *Hydrological Processes* 3(2): 163-184.
37. Institute of Geographical Research, CAS, 1962. *The Origin of Desert Landforms and Research Method*. Beijing: Science Press 114-154. (in Chinese).
38. Keyes, C R, 1912. Deflative scheme of the geographic cycle in an arid climate. *Geological Society of America Bulletin*, 23: 537-562.
39. Kouhpeima, A., feiznia, S., Ahmadi, H, & Moazzami, M, 2011. Investigation of magnetic properties of soil in differentiation of sediment sources. *journal of physic of earth and space* 1: 11-19.
40. Krein, A. Petticrew, E.& Udelhoven, T, 2003. The use of fine sediment fractal dimensions and colour to determine sediment sources in a small watershed, *Catena*, 53 :165–179.
41. Lal R, 2001. Soil degradation by erosion, *Land Degrad Develop* 12: 519–539.
42. Langford, R P, 1989. Fluvial-aeolian interactions: Part I. modern systems, *Sedimentology* 36: 1023-1035.
43. Langford, R P. Chan, M A, 1989. Fluvial-aeolian interactions: Part II. ancient systems. *Sedimentology* 36: 1037-1051.
44. Lartiges, B. S., Deneux-Mustin, S., Villemin, G., Mustin, C., Barres, O., Chamerois, M & Babut, M, 2001. Composition, structure and size distribution of suspended particulates from the Rhine River. *Water Research* 35(3): 808-816.
45. McIntosh R, 1983. Floodplain geomorphology and human occupation of the upper inland delta of the Niger. *Geographical Journal* 149: 182-201.
46. Mizugaki, S. Onda, Y. Fukuyama, T. Koga, S. Asai, H and Hiramatsu, S, 2008. Estimation of suspended sediment sources using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbex in unmanaged Japanese cypress plantation watersheds in southern Japan. *Hydrological Processes*, 22(23): 4519-4531.
47. Morris, G. L and Fan, J., 1997. *Reservoir sedimentation handbook*. McGraw-Hill, New York.
48. Motha, J. A. Wallbrink, P. J. Hairsine, P. B and Grayson, R. B, 2002. Tracer properties of eroded sediment and source material. *Hydrological Processes* 16: 1983-2000.
49. 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.



50. Nosrati, Kazem, 2011. Sediment sourcing based on uncertainty estimation. *Journal of water research of Iran* 9: 51-60.
51. Nosrati, K., Ahmadi, H & sharifi, f, 2011. Fingerprinting of sediment sources: relation between Anzim activities of soil nd sediment. *Journal of sciences and techniques of agriculture and natural resources, sciences of water and soil* 60: 227-237.
52. Nosrati, K. Govers, G. Ahmadi, H. Sharifi, F. Amoozegar, MA. Merckx, R and Vanmaercke, M, 2011. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: biochemical fingerprints?, *Int J Sediment Res* 26: 136–151.
53. Nosrati, K Amini, M, 2014. Suspended sediment sampler, [www.ip.ssaa.ir](http://www.ip.ssaa.ir).
54. Nosrati, K. Govers, G. Semmens, B. X & Ward, E. J, 2014. A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting. *Geoderma* 217: 173-180.
55. Nosrati, K., Ahmadi, F., Nazari Samani, A.A, & Servati, M.R, 2015. determination of land use role in suspended and bedload sediment yield based on fingerprinting in Taleghani basin, Khoram Abad, pasture and catchment 68: 751-765.
56. Nosrati, K., Amini, M., Haddadchi, A, & Zare, M.R, 2016. Determination of contribution in sediment generation using magnetization properties and uncertainty mixing model (case study: Ashan drainage basin, Maragheh county), *Journal of sciences and techniques of agriculture and natural resources, sciences of water and soil*, in press.
57. Olfield, F. Rumnerly, T.A. Thompson, R & Walling, D.E, 1979. Identification of suspended sediment sources by means of magnetic measurements: some preliminary results, *Water resource* 15: 211-218.
58. Owens, P. N. Walling, D. E and Leeks, G. J. L, 2000. Tracing fluvial suspended sediment sources in the catchment of the River Tweed, Scotland, using composite fingerprints and a numerical mixing model. *Tracers in Geomorphology*. Chichester, Wiley, 291-307.
59. Papanicolaou, A. N. Fox, J. F & Marshall, J, 2003. Soil fingerprinting in the Palouse Basin, USA, using stable carbon and nitrogen isotopes. *International Journal of Sediment Research* 18(2): 278-284.
60. Penck, W (1905): Climatic features of the land surface, *American Journal of Science*, 19, pp 165-167.
61. Phillips, J. M., Russell, M. A. and Walling, D. E, 2000. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes* 14(14): 2589-2602.
62. Qiu, Y. Fu, B J. Wang, Y, 2002. Spatio-temporal variation in soil erosion and its relation to environment factors. *Journal of Soil and Water Conservation*, 16(1): 108-111. (in Chinese).
63. Regan, John T. Fenton, Oven & Healy. Mark G, 2012. A review of phosphorus and sediment release from Irish tillage soils, the methods used to quantify losses and the current state of mitigation practice, *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 157-183.
64. Reid, Leslie M and Dunne, Thomas., 1996. Rapid evaluation of sediment budgets. Reiskirchen, Germany: Catena.
65. Richards, Carl and Bacon, Kermit. L, 1994. Influence of fine sediment on macroinvertebrate colonization of surface and hyporheic stream substrates. *Great Basin Naturalis*, 54: 106-113.

66. Russell, M. A., Walling, D. E. and Hodgkinson, R. A, 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *Journal of Hydrology*, 252(1-4): 1-24.
67. Slattery, MC. Walden, J and Burt, TP., 2000. Use of mineral magnetic measurements to fingerprinting suspended sediment sources: results from a linear mixing model. In: Foster IDL (ed) *Tracers in Geomorphology*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, UK.
68. Street, F A and Grove, A T, 1976. Environmental and climatic implications of late Quaternary lake-level fluctuations in Africa. *Nature* 261: 385-390.
69. Thomas, D S G, 1990. Arid geomorphology. *Progress in Physical Geography*, 14: 221-231.
70. Von Bülow, K, 1930. General-geological observations in the moving dune area of the Leba lake Nehrung in East Pomerania. *Jahrbuch der Preussischen Geologischen Landesanstalt* 50(2): 592-606. (in German).
71. Von Bülow, K, 1934. Four years of observations at the wandering dunes on the Nehrung of Leba lake. Provisional report. *Jahrbuch der Preussischen Geologischen Landesanstalt*, 54(1): 151-159. (in German).
72. Walden, J. Slattery, MC. Burt, TP., 2000. Use of mineral magnetic measurements to fingerprinting suspended sediment sources: results from a linear mixing model. In: Foster IDL (ed) *Tracers in Geomorphology*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, UK.
73. Walker, H J, 1967. Riverbank dunes in the Colville Delta, Alaska. *Coastal Studies Bulletin* 1: 7-14.
74. Walling, Desmond, 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems, *Science of the Total Environment* 344: 159-184.
75. Williams, Garnett P, 1989. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology* 111(1-4): 89-106.
76. Wood, Paul J and Armitage, Patrick D, 1997. Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment. *Environmental Management* 21(2): 203-217.
77. Wright, J. F & Berrie, A. D, 1987, Ecological effects of groundwater pumping and a natural drought on the upper reaches of a chalk stream. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1(2): 145-160.
78. [www.ip.ssaa.ir](http://www.ip.ssaa.ir).
79. [www.isti.ir](http://www.isti.ir).
80. Yi, Yujun., Yang, Zhifeng & Zhang, Shanghong, 2011. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin. *Environmental Pollution*, 159(10): 2575-2585.
81. Young, RA and Holt, RF, 1968. Tracing soil movement with fluorescent glass particles. *Soil*
82. Zhang, XC John & Liu, B. L, 2016. Using multiple composite fingerprints to quantify fine sediment source contributions: A new direction. *Geoderma* 268: 108-118.
83. Zhou, Huiping., Chang, Weina., & Zhang, Longjiang, 2016. Sediment sources in a small agricultural catchment: A composite fingerprinting approach based on the selection of potential sources. *Geomorphology* 266: 11-19.