



## منشأیابی سهم واحدهای فرسایش‌پذیر خاک در تولید رسوب و ارتباط آن با ذخیره‌ی کربن آلی خاک در حوضه‌ی آبخیز کوه‌دشت، استان لرستان

فروزان احمدی<sup>۱</sup>، کاظم نصرتی<sup>۲\*</sup>، محمدمهدی حسین‌زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ژئومورفولوژی، دانشکده‌ی علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده‌ی علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده‌ی علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۵

وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۵

### چکیده

فرسایش تسریع شده خاک یک مشکل جدی در ایران است که منجر به تخریب منابع آب و خاک، کاهش حاصلخیزی خاک، از بین رفتن دامنه‌ها و اراضی کشاورزی، بیابان‌زایی، سیل‌های مخرب، رسوب‌گذاری مخازن و آلودگی زیستگاه‌های آبزیان می‌شود. بنابراین مقابله با فرسایش از ضروری‌ترین اقدامات زیست محیطی می‌باشد. بدین ترتیب شناخت مناطق حساس به فرسایش که سهم زیادی در تولید رسوب حوضه‌ها دارند جزء اقدامات لازم و ضروری می‌باشد. به این منظور منشأیابی رسوب، به عنوان بهترین تکنیک برای تعیین سهم نسبی رسوب شناخته شده، چرا که در این تکنیک با انجام مقایسه‌ی خصوصیات ویژگی‌ها بین منابع رسوب و رسوبات تولیدی در خروجی حوضه‌ی مناطق پر خطر از نظر تولید رسوب شناسایی می‌شود. پژوهشگران در استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب، تقسیم‌بندی‌های مختلفی از منابع رسوب داشته‌اند از جمله می‌توان به کاربری اراضی، زمین‌شناسی، زیرحوضه‌ها، فرسایش سطحی و زیرسطحی اشاره کرد، اما مطالعات اندکی وجود دارد که منابع رسوب را براساس واحدهای فرسایش‌پذیر بررسی کند. بنابراین هدف از پژوهش حاضر تقسیم‌بندی حوضه‌ی آبخیز کوه‌دشت به واحدهای مختلف براساس میزان فرسایش‌پذیری خاک و تعیین سهم نسبی هر کدام از واحدها در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب بر اساس عدم قطعیت می‌باشد. در اینجا میزان ذخیره‌ی کربن آلی منطقه نیز بر اساس واحدهای فرسایش‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد اهمیت نسبی واحدهای فرسایش‌پذیر اول، دوم و سوم در تولید رسوب به ترتیب برابر با ۰/۰۸، ۰/۲۸ و ۱/۵۷ است.

**کلمات کلیدی:** واحدهای فرسایش‌پذیر، منشأیابی رسوب، عدم قطعیت، میزان ذخیره‌ی کربن آلی، حوضه کوه‌دشت.

## ۱- مقدمه

فرسایش خاک از مهم‌ترین معضلات زیست محیطی، کشاورزی و تولید غذا در جهان است که تأثیرات مخربی بر تمام اکوسیستم‌های طبیعی و تحت مدیریت انسان دارد. هرچند فرسایش خاک در طول تاریخ وجود داشته، ولی در سال‌های اخیر به دلیل مدیریت و کاربری نامناسب اراضی، شدت بیشتری پیدا کرده است. اثرات فرسایش خاک به دو صورت محلی و برون محلی در قالب کشاورزی، بوم‌شناسی، زیست‌محیطی و اقتصادی می‌باشد. از اثرات محلی فرسایش، از بین رفتن مواد آلی خاک و شستشوی عناصر حاصلخیزکننده‌ی خاک است که باعث کم شدن توان تولید خاک‌های کشاورزی می‌شود (فکس<sup>۱</sup> و پاپانیکلو<sup>۲</sup>، ۲۰۰۸: ۴۸) و از اثرات برون محلی فرسایش، کاهش ظرفیت ذخیره‌ی منابع آب به ویژه سدها است به طوری که در اثر فرسایش خاک، سالانه بین نیم تا یک درصد ظرفیت مخازن دنیا (WCD<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰) و یک تا دو درصد ظرفیت مخازن کشور از رسوبات پر می‌شود (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۱: ۸۰).

مطالعات، آمار و شواهد نشان می‌دهد که بیشتر خاک‌های کشور با شدت زیادی در حال فرسایش بوده و این امر خسارات جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت (مختاری و همکاران، ۱۳۹۴؛ مختاری و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به اینکه خاک منبع اصلی و بنیادی زندگی انسان در امنیت غذایی محسوب می‌گردد (بلانکو<sup>۴</sup> و لال<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸: ۳) و با توجه به خسارات جبران‌ناپذیر ناشی از فرسایش خاک، حفاظت خاک و کنترل فرسایش امری ضروری است. برنامه‌های حفاظت از خاک تحقق نمی‌یابد مگر اینکه روش‌های مناسب مبارزه با فرسایش و راه‌های کاهش رسوب‌دهی خاک را بیابیم و این امر نیز مستلزم دانستن و شناسایی مکان‌های در معرض خطر می‌باشد. به منظور شناخت مناطق پرخطر فرسایشی و به کار بردن روش‌های مناسب مبارزه با فرسایش خاک، شناخت و درک

1- Fox  
2- Papanicolaou  
3- World Commission on Dams  
4- Blanco  
5- Lal

درستی از منابع رسوبات حوضه ضروری است (کالینز<sup>۱</sup> و والینگ<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴: ۱۶۱).

باتوجه به اینکه تعیین نوع رسوبات و تشخیص منشأ مکانی آنها با استفاده از روش‌های سنتی غیرمستقیم مشکل است (پلنارد<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۹: ۲۸۱۰)، نیاز است از روش‌های دیگر برای ردیابی رسوبات استفاده شود. تکنیک‌های اندازه‌گیری متفاوتی برای تشخیص منابع رسوب و تعیین سهم نسبی آن وجود دارد (اسمیت<sup>۴</sup> و دراگوویچ<sup>۵</sup>، ۲۰۰۸: ۶۴۶). با توجه به مطالعات انجام شده، منشأیابی رسوب، بهترین تکنیک برای تعیین سهم نسبی رسوب می‌باشد (کالینز و والینگ، ۲۰۰۴: ۱۶۱). چرا که در این تکنیک با انجام مقایسه‌ی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بین منابع رسوب و رسوبات تولیدی در خروجی حوضه می‌توان مناطق پر خطر از نظر تولید رسوب را شناسایی کرد.

پژوهش‌های متعددی در مورد استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب برای تعیین سهم نسبی منابع رسوب در تولید رسوب در دنیا انجام شده است. نصرتی (۱۳۹۰) مدل منشأیابی رسوب را بر اساس عدم قطعیت بیس<sup>۶</sup> به منظور شناسایی منابع رسوب در حوضه‌ی آبخیز زیدشت به کار گرفتند نتایج مطالعات ایشان نشان داد فرسایش آبراهه‌ای بیش‌ترین سهم را در تولید رسوب منطقه دارد. لیو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۶) مدل منشأیابی رسوب را به منظور تعیین سهم منابع رسوب در دو طرف راه‌آهن نزدیک دریاچه‌ی کیونا واقع در شهر تبت چین مورد استفاده قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، ماسه سواحل بیشترین سهم را در تولید رسوب منطقه دارد. چن<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۶) مدل منشأیابی رسوب را با استفاده از ردیاب‌های زیستی در منطقه‌ی هوزیان، فلات لس در چین به کار بردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد اراضی جنگلی جوان، بیشترین سهم را در تولید

- 
- 1- Collins
  - 2- Walling
  - 3- Poulenard
  - 4- Smith
  - 5- Dragovich
  - 6- Bayesian
  - 7- Liu
  - 8- Chen

رسوب منطقه دارند. تیچر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) مدل منشأیابی رسوب را با استفاده از عناصر ژئوشیمیایی به منظور تعیین سهم منابع رسوب در حوضه‌ای در جنوب برزیل مورد استفاده قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد، کناره‌ی آبراهه با ۴۹ درصد بیشترین سهم را در تولید رسوب منطقه دارد. ژانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹) منشأیابی رسوب را با استفاده از عناصر ژئوشیمیایی جهت شناسایی منابع رسوبات بادی - آبی منطقه‌ی لوس پلاتو چین بکار گرفتند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که بیش‌تر رسوبات منطقه از زمین‌های ماسه‌ای و تپه‌های لسی آمده است. نصرتی و کالینز (۲۰۱۹) تکنیک منشأیابی رسوب را با استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره به منظور تعیین سهم منابع رسوب در تولید رسوب در حوضه‌ی کوهسار واقع در شمال تهران به کار گرفتند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد جاده‌های تفریحی سهم قابل‌توجهی در تولید رسوب منطقه دارد. لیم<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹) منشأیابی رسوب را با استفاده از عناصر ژئوشیمیایی و رادیونوکلئیدی به کار گرفتند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد کناره‌ی آبراهه بیشترین سهم را در تولید رسوب منطقه دارد.

پژوهشگران در استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب، تقسیم‌بندی‌های مختلفی از منابع رسوب داشته‌اند از جمله می‌توان به کاربری اراضی (والبرینک<sup>۴</sup>، ۲۰۰۴؛ فکس<sup>۵</sup> و پاپانیکلو<sup>۶</sup>، ۲۰۰۸) زمین‌شناسی (بالانتین<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۹)، زیرحوضه‌ها (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸)، رسوب‌دهی سطحی و زیرسطحی (کالینز<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۰۹؛ گروزوسکی<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۳)، کاربری و فرسایشی (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۱) و یا ترکیبی از این موارد اشاره کرد. اما مطالعات اندکی وجود دارد که منابع رسوب را بر اساس واحدهای فرسایش‌پذیر بررسی کند. بنابراین هدف از پژوهش حاضر تقسیم‌بندی حوضه‌ی آبخیز کوهدشت به

1- Tiecher

2- Zhang

3- Lim

4- Wallbrink

5- Fox

6- Papanicolaou

7- Ballantine

8- Collins

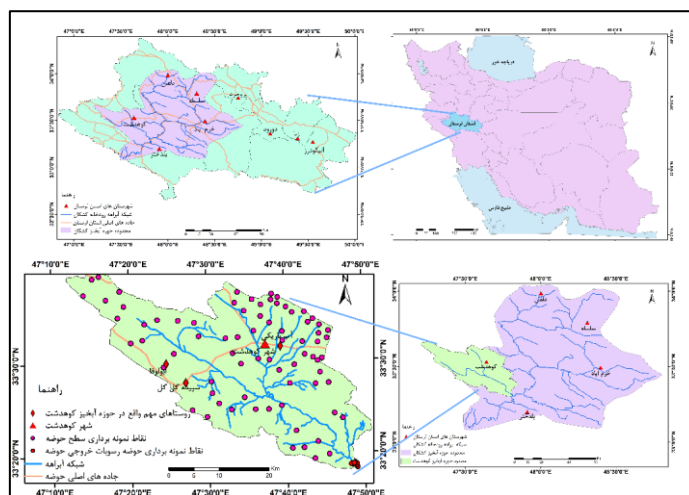
9- Gruszowski

واحدهای مختلف بر اساس میزان فرسایش‌پذیری خاک و تعیین سهم نسبی هر کدام از واحدها در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب بر اساس عدم قطعیت است. خصوصیات خاک از عوامل مهم در میزان فرسایش‌پذیری خاک‌ها به شمار می‌رود و باید در برآورد فرسایش خاک، مدنظر قرار گیرد (فکس<sup>۱</sup> و پاپانیولو<sup>۲</sup>، ۲۰۰۸: ۴۷). همچنین با توجه به اینکه ذخیره‌ی کربن آلی در میزان مقاومت خاک موثر است و تهی شدن ذخیره‌ی کربن آلی خاک خطر فرسایش خاک را شدیدتر می‌کند (نصرتی، ۱۳۹۰: ۱۳۴)، در اینجا میزان ذخیره کربن آلی منطقه نیز بر اساس واحدهای فرسایش‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش

### - معرفی منطقه

حوضه‌ی کوه‌دشت با ۱۱۳۸ کیلومترمربع با مختصات ۱۷° ۳۳' تا ۴۱° ۳۳' عرض شمالی و ۲۰° ۴۷' تا ۵۰° ۴۷' طول شرقی در غرب استان لرستان واقع شده است (شکل (۱)).



شکل (۱) موقعیت منطقه در استان و کشور و موقعیت نقاط نمونه‌برداری شده در سطح حوضه

Fig (1) Location of the region in the province and country and location of sampled points in the basin

1- Fox

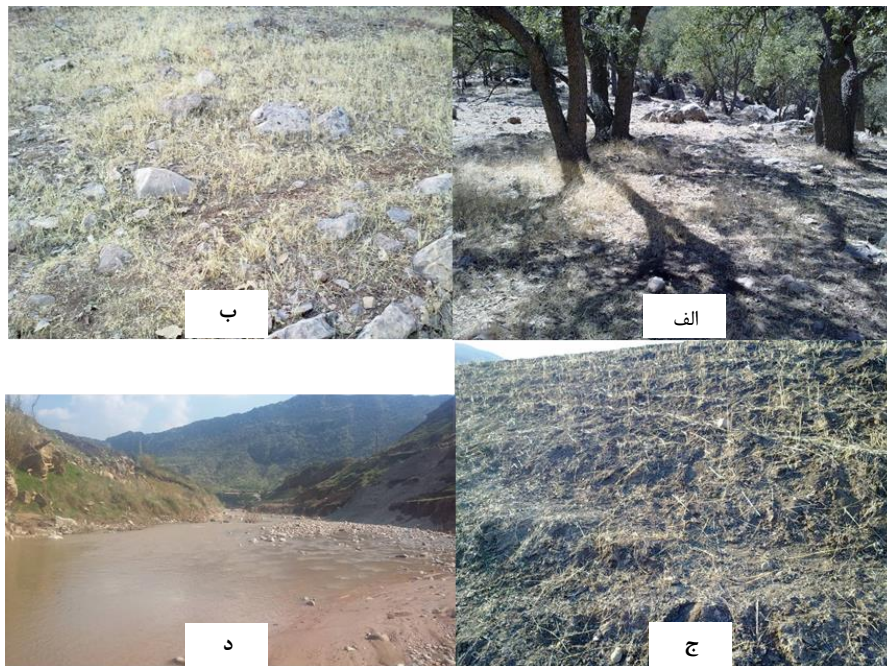
2- Papanicolaou

- جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌های خاک

- نمونه‌برداری به منظور تعیین فرسایش‌پذیری خاک

به منظور برآورد میزان فرسایش‌پذیری منطقه، تعداد ۸۱ نمونه خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر از سطح حوضه کوهدشت برداشت شد و بافت آنها بر اساس روش هیدرومتری تعیین گردید.

- جمع‌آوری نمونه‌های رسوب و منابع رسوب



شکل (۲) الف) نمونه‌ای از مناطق واقع در واحد فرسایش‌پذیر اول. ب) نمونه‌ای از مناطق واقع در واحد فرسایش‌پذیر دوم. ج) نمونه‌ای از مناطق واقع در واحد فرسایش‌پذیر سوم. د) رسوبات خروجی حوضه‌ی آبخیز  
Fig(2) A) An instance of areas located in the first erodible unit B) An instance of areas located in the second erodible unit C) An instance of areas located in the third erodible unit D) Watershed outflow sediments.

تعداد ۷۰ نمونه از واحدهای فرسایش‌پذیر مختلف: اول (۱۵ نمونه)، دوم (۲۰ نمونه) و سوم (۳۵ نمونه) به عنوان نمونه‌های منابع رسوب جمع‌آوری شد و همچنین تعداد ۱۲ نمونه از رسوبات خروجی حوضه برداشت گردید. در این مرحله سعی شد نمونه‌ها از رسوبات تازه ته‌نشین شده جمع‌آوری گردد شکل (۲). پس از خشک کردن، ذرات کمتر از ۶۳ میکرون برای مراحل بعدی انتخاب شدند.

#### - فرسایش‌پذیری خاک

فرسایش‌پذیری خاک به معنی جدا شدن ذرات از لایه‌ی نازک خاک سطحی در اثر ضربه‌ی قطرات باران یا جریان سطحی کم‌عمق اطلاق می‌شود. در این مطالعه از داده‌های ۸۱ نمونه‌ی خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر به منظور برآورد فرسایش‌پذیری با توجه به بافت خاک استفاده گردید. به منظور محاسبه‌ی میزان فرسایش‌پذیری خاک از رابطه‌ی ۱ و ۲ (رنارد<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۷: ۷۶) استفاده شد.

$$k = 7.594 \left\{ 0.0034 + 0.0405 \exp \left[ -0.5 \times \left( \frac{\log Dg + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

$$Dg = \exp \left( 0.01 \sum f_i \ln m_i \right) \quad (2)$$

که در آن  $f_i$  درصد فراوانی هر یک از اجزای بافت خاک (رس، سیلت و شن) و  $m_i$  میانگین عددی قطر هر جزء است که این مقدار برای شن برابر با ۱/۰۲۵ میلی‌متر، برای سیلت برابر با ۰/۰۲۶ میلی‌متر و برای رس برابر با ۰/۰۰۱ میلی‌متر می‌باشد.

#### - تعیین واحدهای منابع رسوب بر اساس میزان فرسایش‌پذیری خاک

پس از محاسبه‌ی میزان فرسایش‌پذیری خاک، نتایج بدست آمده به صورت صعودی مرتب شده و به منظور ارزیابی، مقایسه و واحدبندی، چارک اعداد با استفاده از نرم‌افزار SPSS بدست آمد. بر این اساس نمونه‌هایی که در واحد اول قرار گرفتند میزان فرسایش‌پذیری

کمتر و نمونه‌هایی که در واحد چهارم قرار گرفتند میزان فرسایش‌پذیری بیشتری دارند. سپس منطقه مورد مطالعه با توجه به میزان فرسایش‌پذیری پهنه‌بندی شد.

#### - منشأیابی رسوب

#### - اندازه‌گیری ردیاب‌ها

عناصر ژئوشیمیایی شامل آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu)، استرنسیوم (Sr)، سرب (Pb)، نیکل (Ni)، کبالت (Co)، منیزیم (Mg)، سدیم (Na)، کلسیم (Ca)، پتاسیم (K) و منگنز (Mn) و همچنین کربن آلی (C) به‌عنوان ردیاب در این مطالعه انتخاب شدند.

برای اندازه‌گیری عناصر ژئوشیمیایی ابتدا نمونه‌ها هضم اسیدی شدند. و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر نشر نوری<sup>۱</sup> و با استفاده از نمونه استاندارد مرکب<sup>۲</sup> و رسم منحنی واسنجی، ردیاب‌ها اندازه‌گیری و به واحد میکروگرم بر گرم نمونه خاک گزارش شدند.

#### - انتخاب ترکیب بهینه‌ی ردیاب‌ها

به منظور انتخاب ترکیب بهینه ردیاب‌ها دو مرحله‌ی آماری صورت گرفت. ابتدا آزمون کروسکال والیس که قدرت تفکیک هر عنصر در منابع رسوب در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ را مشخص کرد سپس با استفاده از تحلیل تابع تشخیص، ضریب توان تفکیک‌پذیری ردیاب‌ها برآورد شد. برای مشخص کردن ترکیب بهینه از الگوریتم گام به گام و کمینه نمودن آماره‌ی ویلک لامدا<sup>۳</sup> استفاده شد. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد.

#### - تعیین سهم هر یک از منابع رسوب در تولید رسوب

به منظور تعیین سهم نسبی منابع رسوب آنالیز عدم قطعیت، بر اساس مدل ترکیبی بیس<sup>۴</sup> (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۴؛ نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸) به کار گرفته شد و در قالب یک مدل ترکیبی منشأیابی رسوب استفاده گردید. ابتدا بر اساس روش آماری بیس، توابع

1- ICP-OES (GBC Integra)

2- Merck

3- Wilk,s Lambda

4- Bayesian



احتمال برای سهم نسبی هر منبع رسوب ( $F_i$ ) و 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 محاسبه شد. بدین ترتیب تابع احتمال پسین برای تمام  $F_i$  از طریق ضرب توزیع احتمال اولیه در درست‌نمایی آن و تقسیم حاصل آن بر مجموع کل آن و به صورت رابطه‌ی زیر به دست آمد.

$$P(f_q | data) = \frac{L(data | f_q) \times P(f_q)}{\sum L(data | f_q) \times P(f_q)} \quad (3)$$

که در آن  $L(data | f_q)$  درست‌نمایی 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 غیرنرمال است. برای مثال فرض شود که برآورد توزیع  $i$  منابع رسوب با مخلوطی از رسوب با زردیاب مدنظر 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  $z$  تعریف می‌شود. توابع توزیع پیشنهادی برای مخلوط رسوب توسط میانگین و انحراف معیار مخلوط رسوب بر اساس مقادیر تصادفی  $f_i$  تعیین می‌شود.

$$\mu_j = \sum_{i=1}^n (f_i \times m_{sourcei}) \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i^2 \times s_{sourcei}^2)} \quad (5)$$

که میانگین ردیاب  $m_{sourcei}$  از  $m$  منبع رسوب  $i$ ،  $S_{sourcei}^2$  واریانس ویژگی ردیاب  $i$  از  $m$  منبع رسوب  $i$  است.

بر اساس انحراف معیار و میانگین، درست‌نمایی داده‌های نمونه‌های رسوب به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$L(x|\mu_j, \sigma_j) = \prod_{k=1}^n \prod_{j=1}^n \left[ \frac{1}{\sigma_j \times \sqrt{2 \times \pi}} \times \exp \left( -\frac{(X_{kj} - \mu_j)^2}{2 \times \sigma_j^2} \right) \right] \quad (6)$$

که در آن  $X_{kj}$  ویژگی ردیاب  $k$  ام نمونه رسوب است.

درست‌نمایی سهم نسبی منابع رسوب  $f_i$  بر اساس اطلاعات اولیه (با استفاده از ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  برای هر منبع) بر اساس تابع توزیع بتا محاسبه می‌شود.

$$L(f_i|\alpha_i, \beta_i) = \prod_{i=1}^n \frac{f_i^{\alpha_i-1} \times (1-f_i)^{\beta_i-1}}{B(\alpha_i, \beta_i)} \quad (7)$$

در نهایت به منظور محاسبه احتمال پسین غیرنرمال، درست‌نمایی اطلاعات اولیه در درست‌نمایی نمونه‌های رسوب ضرب می‌شود. سپس نتایج سهم منابع رسوب با در نظر گرفتن عدم قطعیت بر اساس دو شرط ارائه شده که 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 متلب<sup>۱</sup> تهیه و اجرا شد. خروجی این برنامه شامل سهم نسبی هر یک از منابع رسوب در تولید رسوب بود که به صورت نمودارهایی برای هر یک از منابع رسوب به طور جداگانه و به شکل سطوح اطمینان یا محدوده‌ی عدم قطعیت ارائه شد. همچنین به منظور ارائه

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. همچنین به منظور بررسی صحت این نتایج، وضعیت فرسایش در واحدهای مختلف با استفاده از روش BLM (رفاهی، ۱۳۷۵: ۲۶۸) مورد ارزیابی قرار گرفت. این روش هفت عامل حرکت خاک، وجود لاشبرگ در سطح خاک، وضعیت سنگ‌ها، قطعات سنگی تحکیم یافته، وجود فرسایش شیاری، فرم آبراهه‌ها و وجود فرسایش خندقی را به منظور نشان دادن وضعیت فرسایش در نظر می‌گیرد و سپس بر اساس این پارامترها امتیاز هر کدام از کاربری‌ها در میزان فرسایش مشخص می‌شود.

#### – اندازه‌گیری میزان ذخیره کربن آلی

به منظور محاسبه‌ی ذخیره‌ی کربن آلی، خصوصیات کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شد. مقدار کربن آلی با استفاده از روش واکلی بلاک تعیین شد. (اسکجیمستد<sup>۱</sup> و بالدوک<sup>۲</sup>، ۲۰۰۸: ۲۲۸). در نهایت در هر نقطه نمونه‌برداری شده میزان ذخیره‌ی کربن آلی با استفاده از رابطه‌ی (۸) محاسبه گردید (نصرتی، ۱۳۹۰: ۱۳۲).

$$SOCS = SOC \times BD \times D \quad (۸)$$

### ۳- بحث و نتایج

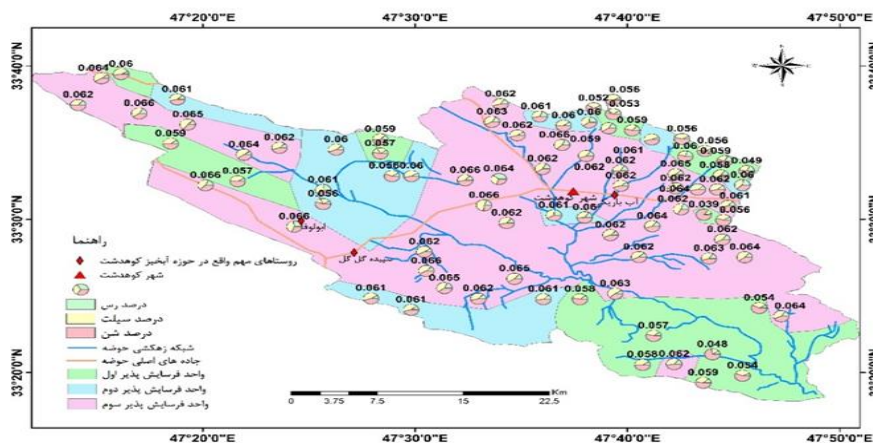
– میزان فرسایش‌پذیری خاک و تعیین واحدهای منابع رسوب

مقدار فرسایش‌پذیری منطقه‌ی مورد مطالعه از ۰/۰۳۸۶ تا ۰/۰۶۶۳ براساس  $mg\ ha\ h\ ha^{-1}$   $mm^{-1}$  متغیر بوده است. مقادیر بدست آمده در قسمت‌های مختلف حوضه در شکل (۳) نشان داده شده است. به منظور تعیین واحدهای فرسایشی و طبقه‌بندی مناطق مختلف حوضه، چارک مقادیر با استفاده از SPSS بدست آمد و مقادیر به چهار واحد مختلف تقسیم گردید. اما با توجه به نتایج قسمت انتخاب ترکیب بهینه ردیاب‌ها که نشان

1- Skjemstad

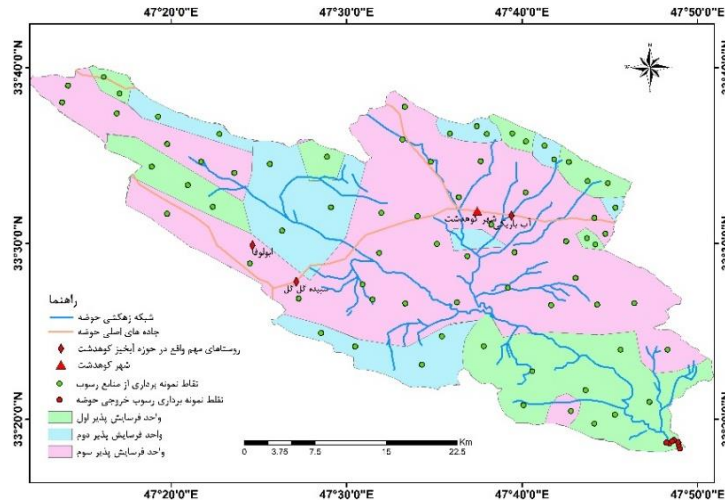
2- Baldock

داد از نظر غلظت عناصر بین واحد فرسایشی سوم و چهارم همپوشانی زیادی وجود دارد و برنامه تحلیل تشخیصی قادر به تفکیک این دو گروه نیست، واحدهای سوم و چهارم را با هم ادغام کرده و در مجموع تبدیل به ۳ واحد فرسایشی اول، دوم و سوم شدند. این سه واحد به عنوان منابع رسوب در نظر گرفته شدند و نمونه‌برداری به منظور تعیین سهم منابع رسوب در تولید رسوب با توجه به این سه واحد انجام گرفت شکل (۴). بر اساس شکل (۵) و (۶) نتایج تعیین میزان فرسایش‌پذیری خاک موید این موضوع است که در قسمت‌های مرکزی که تحت کاربری کشاورزی و رسوبات کواترنری می‌باشد از فرسایش‌پذیری بیشتری برخوردار است و قسمت‌هایی که تحت کاربری مرتع و جنگل و دیگر سازندهای زمین‌شناسی است میزان فرسایش‌پذیری کمتری دارد.

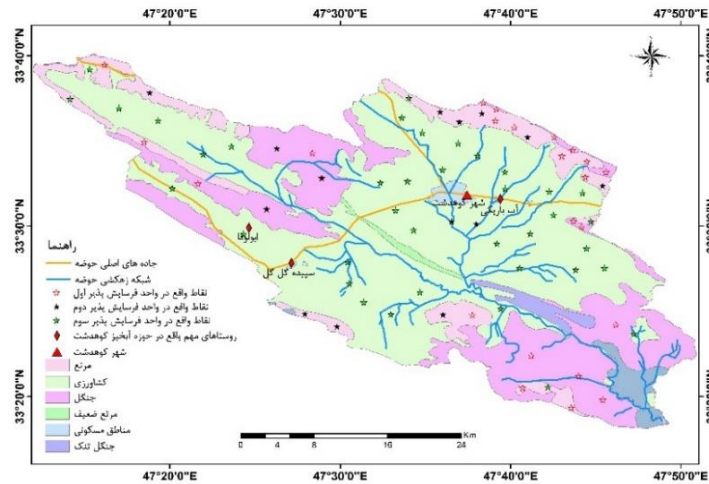


شکل (۳) میزان فرسایش پذیری خاک در نقاط مختلف حوضه را نشان می‌دهد

Fig (3) Indicates the amount of soil erodibility in different parts of the basin

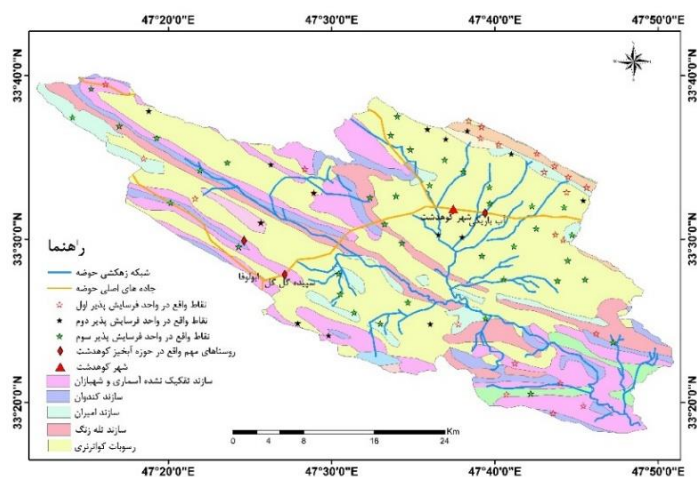


شکل (۴) نقشه‌ی واحدهای مختلف فرسایش پذیر به همراه موقعیت نقاط نمونه برداری منابع رسوب  
 Fig (4) Map of various erodible units and location of sampling points for sediment sources



شکل (۵) نقشه‌ی کاربری اراضی به همراه موقعیت نمونه‌های طبقه بندی شده در واحدهای مختلف

Fig (5) Land use map and the position of samples classified in different units



شکل (۶) نقشه‌ی زمین‌شناسی به همراه موقعیت نمونه‌های طبقه‌بندی شده در واحدهای مختلف  
 Fig (6) Geological map and position of samples classified in different units

– انتخاب ترکیب بهینه ردیاب‌ها

نتایج این قسمت در ۴ واحد فرسایشی مختلف نشان داد بین واحد فرسایشی سوم و چهارم همپوشانی زیادی وجود دارد و در نتیجه برنامه‌ی تحلیل تشخیص قادر به تفکیک این دو گروه نیست بنابراین واحدهای سوم و چهارم را با هم ادغام کرده و در مجموع تبدیل به ۳ واحد فرسایشی اول، دوم و سوم شدند. نتایج آزمون آماری کروסקال والیس در ۳ واحد مختلف نشان داد از ۱۳ عنصر به کار رفته ۸ عنصر کلسیم، منگنز، مس، استرنسیوم، روی، پتاسیم، کربن آلی و منیزیم سطح معنی‌داری آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ است که در جدول (۱) با ستاره مشخص شده‌اند. این ۸ عنصر قادر به تفکیک و جداسازی واحدهای فرسایش‌پذیر می‌باشند. یعنی میانگین غلظت هر یک از عناصر حداقل در یک منبع از منابع دیگر متفاوت است. در این جدول مقدار آماره‌ی H نیز در نظر گرفته شده است. هر چه مقدار H بالاتر باشد قدرت تفکیک عنصر هم بیشتر می‌شود. همان‌طور که در اینجا مشخص شده با افزایش مقدار آماره‌ی H سطح معنی‌داری نیز بهتر شده است.

جدول (۱) سطح معنی‌داری ردیاب‌ها در واحدهای مختلف فرسایش‌پذیر

Table (1) Significant level of tracers in different erodible units

ردیاب	مقدار H	سطح معنی‌داری	ردیاب	مقدار H	سطح معنی‌داری
کربن آلی (OC)	۲۸/۴۳	* < ۰/۰۰۰۱	روی (Zn)	۱۰/۲۱	* ۰/۰۰۶
کبالت (Co)	۲/۰۸۴	۰/۳۵۳	آهن (Fe)	۰/۱۸۵	۰/۹۱۲
نیکل (Ni)	۳/۴۰۰	۰/۱۸۳	منگنز (Mn)	۷/۲۲۹	* ۰/۰۲۷
سدیم (Na)	۴/۹۴۵	۰/۰۸۴	کلسیم (Ca)	۶/۳۸۲	* ۰/۰۴۱
پتاسیم (K)	۲۲/۵۰	* < ۰/۰۰۰۱	منیزیم (Mg)	۶۸/۷۷	* < ۰/۰۰۰۱
مس (Cu)	۱۲/۵۴	* ۰/۰۰۲	استرنتیوم (Sr)	۲۱/۷۹	* < ۰/۰۰۰۱
سرب (Pb)	۱/۳۴	۰/۴۱۶			

\* سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵

جدول (۲) وضعیت گام‌های مختلف ورود عناصر به مدل در واحدهای فرسایش‌پذیر

Table(2) Status of different steps of insert elements into the model in erodible units

گام	خصوصیات ردیاب	Wilk,s Lambda	معنی‌داری
۱	Mg	۰/۰۴۴	< ۰/۰۰۰۱
۲	K	۰/۰۳۸	< ۰/۰۰۰۱
۳	OC	۰/۰۳۳	< ۰/۰۰۰۱
۴	Mn	۰/۰۳۰	< ۰/۰۰۰۱

مراحل مختلف اضافه شدن خصوصیات ردیاب در توابع تشخیص به روش گام به گام<sup>۱</sup> و تأثیر آن‌ها بر توان جداسازی منابع رسوب برای واحدهای فرسایش‌پذیر در جدول (۲) نشان داده شده است. ویلک لامدا<sup>۲</sup> معیاری مناسب از نسبت اختلاف‌های درون‌گروهی به اختلاف‌های بین‌گروهی است. در هر مرحله‌ی متغیری وارد تابع شده که در سطح ۰/۰۵ یا کمتر معنی‌دار بوده است. همان‌طور که در جدول مشخص شده است. با اضافه شدن هر

1- Stepwise

2- Wilk,s Lambda

ردیاب مقدار ویلک لامدا کاهش یافته و سطح معنی داری بهتر شده است و در نتیجه توان جداسازی تحلیل و میزان تفکیک بین گروه‌ها افزایش یافته است.

جدول (۳) درصد طبقه‌بندی صحیح نمونه‌ها در واحدهای فرسایش پذیر  
Table (3) Correct classification percentage of samples in erodible units

کل نمونه‌ها	پیش‌بینی عضویت در گروه‌ها			واحدهای فرسایش پذیر	
	واحد سوم	واحد دوم	واحد اول		
۲۸	۰	۰	۲۸	واحد اول	
۱۴	۱	۱۳	۰	واحد دوم	تعداد
۴۱	۴۱	۰	۰	واحد سوم	نتایج
۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	واحد اول	تحلیل
۱۰۰	۷/۱	۹۲/۹	۰	واحد دوم	درصد
۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	واحد سوم	
۲۸	۰	۰	۲۸	واحد اول	
۱۴	۲	۱۲	۰	واحد دوم	تعداد
۴۱	۴۱	۰	۰	واحد سوم	نتایج
۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	واحد اول	ارزیابی
۱۰۰	۱۴/۳	۸۵/۷	۰	واحد دوم	تحلیل
۱۰۰	۱۰۰	۰	۰	واحد سوم	

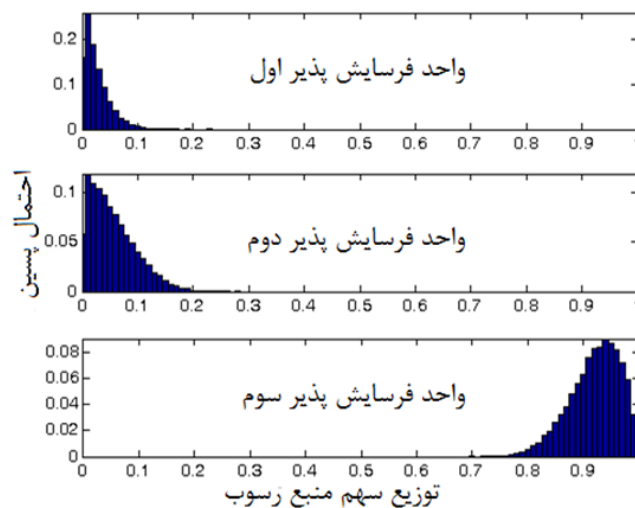
#### - تعیین سهم منابع رسوب

برای تعیین سهم نسبی منابع رسوب در تولید رسوب از تکنیک منشأیابی رسوب بر اساس برآورد عدم قطعیت استفاده شد. 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 ۱۰<sup>۶</sup> تکرار برای نمونه‌برداری مجدد برای برآورد احتمال پسین، این مدل توانست تابع تراکمی پسین صحیحی از داده‌ها ایجاد کند.

با در نظر گرفتن این که میانگین سهم هر منبع برابر با میانه یا صدک ۵۰ باشد، صدک ۵ و ۹۵ میانه سطوح اطمینان عدم قطعیت می‌باشد که نتایج حاصل از ترکیب ردیاب‌ها



مشخص می‌کند، برای سه منبع رسوب واحد فرسایش‌پذیر اول، دوم و سوم سهم نسبی تولید رسوب هر یک به ترتیب برابر با مقادیر ۲ (۰-۷)، ۵ (۰-۱۳) و ۹۳ (۹۸-۸۴) درصد است. مقادیر داخل پرانتز بیان‌کننده‌ی حدود اطمینان صدک ۵ و ۹۵ درصد است. توزیع سهم هر یک از منابع رسوب بر اساس برآورد توزیع احتمال پسین در شکل (۷) نشان داده شده است. محور Xها نشان‌دهنده‌ی میزان سهم نسبی هر یک از منابع رسوب در تولید رسوب و محور Yها بیانگر احتمال پسین به دست آمده از تکرار نمونه‌برداری مجدد بر اساس داده‌های واقعی است. روش منشأ‌یابی رسوب بر اساس مدل عدم قطعیت بیس<sup>۱</sup> 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 واقعاً اتفاق افتاده نه داده‌هایی که احتمال وقوع دارند (نصرتی، ۱۳۹۰: ۵۸). بنابراین آماره‌های بیس در مقایسه با سایر روش‌ها ابزار قدرتمندی را به منظور برآورد عدم قطعیت با توجه به استفاده از پارامترهای اندک ارائه نموده است.



شکل (۷) سهم منابع رسوب حوضه‌ی آبخیز با استفاده از مدل عدم قطعیت

Fig (7) Contribution of watershed sediment sources using uncertainty model

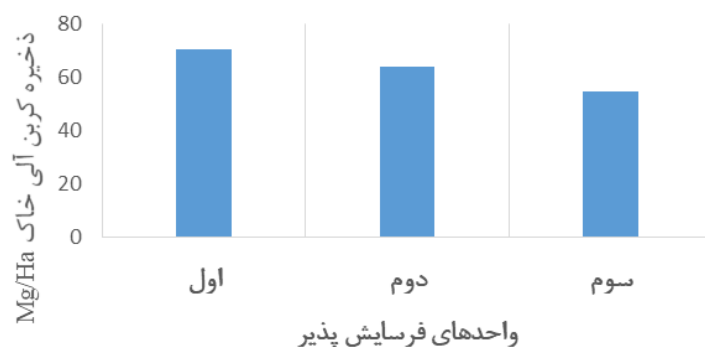
اهمیت نسبی واحدهای فرسایش‌پذیر در تولید رسوب با تقسیم سهم هر کدام از منابع در تولید رسوب به درصد تحت پوشش هر منبع بدست آمد. جدول (۴) اهمیت نسبی واحدهای فرسایش‌پذیر در تولید رسوب را نشان می‌دهد.

جدول (۴) اهمیت نسبی منابع رسوب در تولید رسوب

Table (4) The relative importance of sediment sources in sediment production

منابع	مساحت Km <sup>2</sup>	درصد مساحت	سهم تولید رسوب بر حسب درصد	اهمیت نسبی
واحد فرسایش‌پذیر اول	۲۶۴	۲۳/۱۷	۲	۰/۰۸
واحد فرسایش‌پذیر دوم	۲۰۳	۱۷/۸۲	۵	۰/۲۸
واحد فرسایش‌پذیر سوم	۶۷۲	۵۹	۹۳	۱/۵۷

با توجه به نقش کربن آلی در فرسایش‌پذیری خاک، میزان ذخیره‌ی کربن آلی در واحدهای مختلف فرسایش‌پذیر منطقه نیز مقایسه شد. نتایج ارزیابی ذخیره‌ی کربن آلی نشان داده که میزان ذخیره‌ی کربن آلی براساس واحدهای مختلف فرسایش‌پذیر برابر بوده است با: واحد فرسایش‌پذیر اول (۷۰/۵ مگاگرم بر هکتار)، واحد فرسایش‌پذیر دوم (۶۴/۳ مگاگرم بر هکتار) و واحد فرسایش‌پذیر سوم (۵۴/۶ مگاگرم بر هکتار) است. شکل (۸) میزان ذخیره‌ی کربن آلی بر اساس واحدهای مختلف فرسایش‌پذیر را با استفاده از یک نمودار نشان داده است. با توجه به این نتایج بیشترین میزان ذخیره‌ی کربن آلی در واحد فرسایش‌پذیر اول و کمترین میزان ذخیره‌ی کربن آلی در واحد فرسایش‌پذیر سوم یافت شد.



شکل (۸) میزان ذخیره بکربن آلی در واحدهای مختلف فرسایش‌پذیر  
Fig (8) Organic carbon storage in different erodible units

#### - بررسی روش BLM

جدول (۵) میانگین نتایج مشاهدات میدانی را بر اساس روش BLM در منابع مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج منبع فرسایش‌پذیر سوم نسبت به دیگر منابع شدت فرسایش بیشتری را نشان می‌دهد که این موضوع صحت نتایج به دست آمده از مدل را مورد تأیید قرار می‌دهد.

جدول (۵) نتایج روش BLM در واحدهای فرسایش‌پذیر مختلف

Table (5) Results of the BLM method in different erodible units

واحد فرسایش‌پذیر	امتیاز ۱ عامل	امتیاز ۲ عامل	امتیاز ۳ عامل	امتیاز ۴ عامل	امتیاز ۵ عامل	امتیاز ۶ عامل	امتیاز ۷ عامل	امتیاز شدت فرسایش
اول	۲	۲	۲	۳	۵	۵	۲	کم
دوم	۴	۵	۳	۲	۷	۶	۵	کم
سوم	۶	۶	۸	۸	۶	۶	۴۵	متوسط

این مطالعه نشان داد واحد فرسایش‌پذیر سوم بیشترین میزان تولید رسوب و کمترین میزان ذخیره‌ی کربن آلی را به خود اختصاص داده است. با توجه به اینکه واحد فرسایش‌پذیر سوم بیشتر تحت کاربری کشاورزی و رسوبات کواترنری است این مسأله نشان می‌دهد نقش عامل زمین‌شناسی و کاربری اراضی به عنوان عوامل مؤثر حوضه در وضعیت

فرسایش‌پذیری بسیار مهم است. اگرچه تاکنون مطالعه‌ای دقیق در مورد منشأیابی رسوب بر اساس واحدهای فرسایش‌پذیر به خصوص در ایران انجام نشده است و مطالعه حاضر نخستین مطالعه برای رسیدن به این هدف است اما مطالعات زیادی نشان داده‌اند که اراضی کشاورزی به دلیل بهره‌برداری غیر اصولی مهم‌ترین نقش را در تولید رسوب حوضه‌های آبخیز دارند. از جمله ژو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب در حوضه‌ای از جیانگسو نشان دادند اراضی کشاورزی نسبت به دیگر اراضی حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش دارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به منظور منشأیابی سهم واحدهای فرسایش‌پذیر در تولید رسوب در حوضه‌ی آبخیز کوه‌دشت انجام گرفت. اندازه‌گیری عامل فرسایش‌پذیری ۸۱ نمونه خاک در قسمت‌های مختلف حوضه با استفاده از بافت خاک و بر مبنای میانگین هندسی اندازه‌ی ذرات نشان داد که مقدار فرسایش‌پذیری منطقه از ۰/۰۳۸۶ تا ۰/۰۶۶۳ متغیر بوده است. پس از واحدبندی مقادیر بدست آمده سهم هر کدام از واحدهای اول، دوم و سوم در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب به ترتیب برابر با ۲، ۵ و ۹۳ درصد است که واحد سوم با ۹۳ درصد، بیشترین سهم را در تولید رسوب منطقه دارد. این نتایج نشان داد که قسمتهایی که تحت کاربری کشاورزی است هم میزان فرسایش‌پذیری بالایی و هم بیشترین سهم را در تولید رسوب منطقه دارد. نتایج اندازه‌گیری ذخیره‌ی کربن آلی در واحدهای مختلف نشان داد کمترین میزان ذخیره‌ی کربن آلی در واحد سوم که تحت اراضی کشاورزی است، وجود دارد و این مسأله نشان می‌دهد در واحد سوم تخریب ناشی از هدر رفت رسوبات ریزدانه مانند رس بیشتر است. با توجه به اینکه واحد سوم تحت کاربری کشاورزی است می‌توان این مسأله را به نوع استفاده و بهره‌برداری از اراضی ربط داده بنابراین توصیه می‌شود توجه بیشتری به نوع بهره‌برداری از اراضی و برنامه‌های مدیریت و حفاظت خاک در منطقه اجرا شود.

**- تقدیر و تشکر**

این مقاله مستخرج از پایان نامه دکتری می باشد و کلیه حمایت مالی آن توسط دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم زمین صورت گرفته است.

## ۵- منابع

### Reference

- Ballantine, D., Walling, D., Collins, A., & Leeks, G. (2009). The content and storage of phosphorus in fine-grained channel bed sediment in contrasting lowland agricultural catchments in the UK., *Geoderma*, Vol.151, No.3-4, 141-149.
- Blanco, H., & Lal, R. (2008). Principles of soil conservation and management. New York, Springer.
- Chen, F., Fang, N., & Shi, Z. (2016). Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment. *Science of the Total Environment*, 557, 123–133.
- Collins, A., & Walling, D. (2004), Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography*, Vol.28, No.2, 159-196.
- Collins, A., Anthony, S., Hawley, J., & Turner, T. (2009). The potential impact of projected change in farming by 2015 on the importance of the agricultural sector as a sediment source in England and Wales, *Catena*. No.79, Vol.3, 243-250.
- Fox, J., & Papanicolaou, A. (2008). Application of the spatial distribution of nitrogen stable isotopes for sediment tracing at the watershed scale. *Hydrology*, Vol. 358, No.1-2, 46-55.
- Gruszowski, K., Foster, I.D.L., Lees, J., & Charlesworth, S. (2003). Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK. *Hydrological Processes*, Vol.17, No.13, 2665-2681.
- Lim, Y.S., Kim, J.W., & Kim J.W. (2019). Suspended sediment source tracing at the Juksan Weir in the Yeongsan River using composite fingerprints. *Quaternary International*. 519, 245-254.
- Liu, B., Niu, Q., Qu, J., & Zu, R. (2016). Quantifying the provenance of aeolian sediments using multiple composite fingerprints. *Aeolian Research*. 22, 117–122.

- Mokhtari, D., Mohamadzade, G.F., Nikju, M.R., & Asgari, Sh. (2015). Estimation of Erosion and Sediment of Gavi River Basin Using MPSIAC Method in GIS. *Hydrogeomorphology*. Vol.6, No.2, PP.1-16, (In Farsi).
- Mokhtari, L.G., Shafiee, N., & Rahmani, A. (2018). Estimation of Soil Erosion Using the RUSLE Model in Nourabad Mamasani Watershed. *Hydrogeomorphology*. Vol.16, No.5, 1-21.
- Nosrati, K., Feiznia, S., Van Den Eeckhaut, M., & Duiker, S.W. (2011), Assessment of soil erodibility in Taleghan Drainage Basin Iran, using multivariate statistics, *Physical Geography*, Vol.32, No.1, 78-96.
- Nosrati, K., Collins, L.A., & Madankan, M. (2018), Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model. *Catena*. 164, 32-43.
- Nosrati, K., & Collins, A.L. (2019). Investigating the importance of recreational roads as a sediment source in a mountainous catchment using a fingerprinting procedure with different multivariate statistical techniques and a Bayesian un-mixing model. *Journal of Hydrology*. 569, 506-518.
- Nosrati, K., Govers, G., Semmens, B.X., & Ward, E.J. (2014). A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting. *Geoderma*, 217-218, 173-180.
- Nosrati, K. (2012), Fingerprinting based on estimation of uncertainty. *Iranian water research*. 9, 51-60.
- Nosrati, K., Ahmadi, H., & Sharifi, F. (2013). Sediment Sources Fingerprinting: Relation between Enzyme Activities in Soil and Sediment, *Water and Soil Sci*.16, PP.227-237.
- Poulenard, J., Perrette, Y., Fanget, B., Quetin, P., Trevisan, D., & Dorioz, J.M. (2009). Infrared spectroscopy tracing of sediment sources in a small rural watershed (French Alps), *Science of The Total Environment*. Vol. 407m No.8, 2808-2819.
- Refahi, H. (1996). *Water erosion and its control*. Tehran, Tehran University.
- Renard, K.G. Foster, G.R. Weesies, G. McCool, D., & Yoder, D. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, US Department of Agriculture. Washington, Agricultural Research Service.

- Skjemstad, J.O., & Baldock, J.A. (2008). Total and organic carbon. In: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, CRC Press. Taylor and Francis Group. Boca Raton, 225-237.
- Smith, H.G., & Dragovich, D. (2008). Sediment budget analysis of slope-channel coupling and in-channel sediment storage in an upland catchment. southeastern Australia. *Geomorphology*, Vol.101, No.4, 643-654.
- Six, J., Elliott, E.T., & Paustian, K. (2000). Soil structure and soil organic matter: II. A Normalized stability index and the effect of mineralogy, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.64, No.3, 1042-1049.
- Tiecher, T., Caner, L., Minella, J.P., Pellegrini, A., Capoane, V., Rasche, J.W.R., Schaefer, J.L., & Rheinheimer, D.S. (2017). Tracing sediment sources in two paired agricultural catchments with different riparian forest and wetland proportion in southern Brazil, *Geoderma*. 285, 225–239.
- Veihe, A. (2002). The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana, *Geoderma*, Vol.1-106, No.2, 101-120.
- WCD, (2000). *Dams and Development, A new framework for decision making*. London, Earthscan publications Ltd.
- Zhang, J., Yang, M., Zhang, F., & Li, Y. (2019). Fingerprinting sediment sources in the water-wind erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau. *Geoderma*, 337, 649–663.
- Zhou, H., Chang, W., & Zhang, L. (2016). Sediment sources in a small agricultural catchment: A composite fingerprinting approach based on the selection of potential sources. *Geomorphology*. 266, 11-19.