

استفاده از مدل‌های ترکیبی و ردیاب‌ها جهت تعیین سهم واحدهای کاربری اراضی در میزان فرسایش و رسوب

(مطالعه موردی: حوزه آبخیز تنگ‌بستانک، استان فارس)

احمد نوحه‌گر - استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمد کاظمی^۱ - دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، ایران

سیدجواد احمدی - دانشیار شیمی، پژوهشکده چرخه سوخت، سازمان انرژی اتمی، ایران

حمید غلامی - استادیار بیابان‌زدایی، دانشگاه هرمزگان، ایران

رسول مهدوی - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه هرمزگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷

چکیده

فرسایش خاک و تولید رسوب یکی از مخرب‌ترین پدیده‌هایی است که موجب خسارت‌های فراوان در مناطق مختلف شده است. از طرفی جهت مبارزه با این پدیده و اجرای پروژه‌های حفاظت خاک، نیاز به آگاهی از اطلاعات مکانی منابع رسوبات تولیدی در یک منطقه است. روش انگشت‌نگاری رسوب بر پایه ردیاب‌های ژئوشیمیایی، آلی، نسبت‌های ایزوتوپی و نیز استفاده از مدل‌های ترکیبی مختلف باعث شناخت سهم منابع مختلف رسوب در یک ناحیه می‌شود. در تحقیق حاضر با استفاده از ترکیب بهینه ردیاب‌های آلی، ژئوشیمیایی و نسبت‌های ایزوتوپی اقدام به تفکیک منابع مختلف فرسایش و تولید رسوب و سپس تعیین سهم این منابع با استفاده از مدل‌های کالینز (Collins)، کالینز اصلاح‌شده (M Collins)، موتا (Motha)، لاندور (Landwehr) و اسلاتری (Slattery) شد. جهت تعیین بهترین مدل در این‌باره از شاخص‌های RMSE، GOF و تطبیق نتایج با اندازه‌گیری واقعی مقادیر رسوب بر پایه مدل BLM و واحدهای شدت فرسایش استفاده شد. عناصر کربن، مس، تیتانیوم و سیلیکون به‌عنوان ردیاب‌های تفکیک‌کننده واحدهای کاربری اراضی شناخته شدند و مدل ترکیبی کالینز اصلاح‌شده (M Collins) با شاخص‌های GOF، ۹۹٪/۹ و RMSE، ۲٪/۰۷ به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. نتایج اندازه‌گیری صحرائی میزان رسوب تولیدی از کاربری‌های مختلف اراضی نشان داد مراتع با پوشش‌های گیاهی ضعیف و متوسط و با اهمیت نسبی ۳/۸۷ در اولویت مدیریت حفاظت خاک قرار دارند. مدل‌های ترکیبی نشان دادند بیشترین سهم در فرسایش و رسوب حوزه مربوط به مراتع ضعیف و تخریب یافته منطقه با درصد مساحت ۱۶/۷۵ و سهم ۵۷/۰۴ درصد می‌باشد و اراضی زراعی کمترین نقش را تولید رسوب منطقه دارند. همچنین نتایج مدل موتا با ضریب همبستگی ۰/۹۲۴ کمترین اختلاف را با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت.

کلیدواژه‌ها: انگشت‌نگاری، ردیاب‌ها، رسوب، مدل‌های ترکیبی، تنگ بستانک.

۱. مقدمه

لازمه اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب، کسب اطلاع از اهمیت نسبی منابع رسوب و سهم آن‌ها در تولید رسوب و در نتیجه مناطق بحرانی حوزه آبخیز است (کالینز و همکاران، ۲۰۱۰؛ ۲۴۹؛ پالازون و همکاران، ۲۰۱۵؛ ۲۰۶۸). کاهش تولید رسوب نیازمند اجرای روش‌های مناسب کنترل رسوب و حفاظت خاک در مناطق بحرانی منبع رسوب در حوزه آبخیز است (پاتریک و همکاران، ۲۰۱۵؛ ۲۱۱۸) و لازمه شناخت روش مناسب و اجرای صحیح برنامه‌های حفاظت خاک شناخت و شناسایی اهمیت نسبی منابع رسوب و میزان سهم هر یک از منابع رسوب (چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ ۱۲۴) در تولید رسوب است. بنابراین توسعه و ارتقاء روش‌های مدل‌سازی منشأیابی رسوب در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز ضروری است (نجفی و صادقی، ۱۳۹۲؛ ۱۶۶). در روش‌های سنتی با مشکلات نمونه‌برداری مکانی و زمانی و تنگنای اجرای مواجه بودند و بعضی از آن‌ها به زمان و هزینه زیادی نیاز داشتند (کالینز و والینگ، ۲۰۰۴؛ ۱۶۱). به دلیل وجود مشکلات یاد شده در مورد روش‌های سنتی، روش‌های جدید با عنوان ردیابی، منشأیابی و انگشت‌نگاری به عنوان روشی جایگزین و مناسب مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است (کویر و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۲۵) و باعث شناخت و درک بهتری از فرسایش شده است (فرنز و همکاران، ۲۰۱۴؛ ۵۱۴). انگشت‌نگاری رسوب براساس ارتباط بین میزان ردیاب‌های موجود در رسوبات و منابع متناظر رسوب در سطح حوزه استوار است که امکان تشخیص منابع بالقوه تولید رسوب و میزان سهم هر منبع در رسوب خروجی از حوزه براساس خصوصیات انگشت‌نگاری را فراهم می‌کند. در این روش ویژگی‌های فیزیکی، ژئوشیمیایی و آلی رسوب و منابع رسوب برای تعیین منابع اصلی رسوب و اهمیت نسبی آنها مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (والینگ، ۲۰۰۵؛ ۱۶۰). از جمله تحقیقات داخلی می‌توان به تحقیق نصرتی و همکاران (۱۳۹۴) اشاره کرد. نامبردگان از یازده عنصر به عنوان ردیاب‌های اولیه استفاده کردند که چهار عنصر منگنز، کربن، منیزیم و کلسیم به عنوان ترکیب بهینه جهت تفکیک سهم کاربری‌های مختلف اراضی در مدل ترکیبی استفاده شدند. نامبردگان سهم اراضی کشاورزی، مرتع و جنگل در تولید رسوب معلق و بارکف را به ترتیب ۵۳/۴، ۳۰/۴ و ۱۶/۲ درصد اعلام کردند. غلامی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل ترکیبی به بررسی سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب تپه‌های ماسه‌ای در منطقه ارگ‌نگار بردسیر استان کرمان پرداختند.

1 Collins et. al.

2 Palazón et al.

3 Patrick et al.

4 Chen et. al.

5 Collins and Walling

6 Koiter et. al.

7 Franz et. al.

8 Walling

نامبردگان از دو عنصر کلسیم و منیزیم به‌عنوان ردیاب استفاده کردند. نامبردگان سهم کاربری‌های کشاورزی، مرتع و اراضی‌بایر را به‌ترتیب ۵۲/۵۰٪، ۳۴/۲۶٪ و ۱۴/۲۳٪ اعلام کردند. نجفی و صادقی (۱۳۹۲) با استفاده از تهیه نقشه سیمای فرسایش، انگشت‌نگاری و اندازه‌گیری میدانی سهم منابع مختلف تولید رسوب را در حوزه آبخیز ایده‌لو محاسبه کردند. نامبردگان نتایج اندازه‌گیری میدانی منطبق بر نتایج روش انگشت‌نگاری رسوب دانستند. قابل ذکر است که کلیه تحقیقات داخلی از مدل ترکیبی کالینز^۱ (۱۹۹۷) و یا کالینز اصلاح شده^۲ (۲۰۱۰) استفاده کردند و تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده از سایر مدل‌های ترکیبی همچون موتا (۲۰۰۴)، لاندور (۲۰۱۰) و اسلاتری (۲۰۰۰) گزارش نشده است. در زمینه تحقیقات خارجی می‌توان به تحقیقات چن و همکاران (۲۰۱۶) بروی واحدهای کاربری اراضی چراگاه، مراتع با پوشش گیاهی متراکم، جنگل و خندق‌ها با استفاده از روش منشاء‌یابی رسوبات اشاره کرد. نامبردگان بیان کردند که جنگل‌های جوان (پوشش ضعیف) و چراگاه‌ها با سهم‌های ۵/۵۰٪ و ۶/۲۵٪ بیشترین سهم را در تولید رسوب در محدوده مورد مطالعه داشته‌اند. ونگ و همکاران^۳ (۲۰۱۴) با استفاده از رسوبات به دام افتاده از پشت سد در فلات لس‌چین توانستند تغییرات سهم منابع مختلف رسوب را با استفاده از رصد تغییرات کاربری اراضی پایش کنند. مرور منابع مختلف نشان می‌دهد که برای تعیین اهمیت و سهم نسبی منابع رسوب از لایه‌های اطلاعاتی مختلفی مانند کاربری اراضی، فرسایش‌های سطحی و زیرسطحی (راسل و همکاران،^۴ ۲۰۰۱) و واحدهای سنگ‌شناسی (کالینز و والینگ،^۵ ۲۰۰۲) استفاده شده است. همچنین جمع‌بندی سوابق پژوهش مستند موجود دلالت بر عدم توجه کافی (بجز مطالعه صادقی و نجفی (۱۳۹۲)) سوابق یادشده به ارزیابی مقایسه‌ای نتایج حاصل از هر یک از شیوه‌های به‌کار گرفته‌شده و مقادیر اندازه‌گیری‌های صحرائی در سطوح حوزه آبخیز بوده که ضرورت انجام تحقیقات در این زمینه را تأیید می‌نماید. در تحقیق حاضر جهت مشخص کردن سهم و اهمیت نسبی کاربری‌های اراضی موجود در منطقه تنگ‌بستانک استان فارس از مدل‌های ترکیبی کالینز، کالینز اصلاح‌شده، لاندور و اسلاتری و نیز اندازه‌گیری‌های صحرائی به‌همراه دو شاخص ارزیابی GOF^6 و $RMSE^6$ استفاده شد تا با تعیین ترکیب مناسبی از ردیاب‌های قادر به تفکیک منابع رسوب، کارایی روش انگشت‌نگاری ترکیبی، در واحدهای کاربری اراضی مدنظر قرار گیرد.

1 Collins

2 Modified Collins

3 Wang et. al.

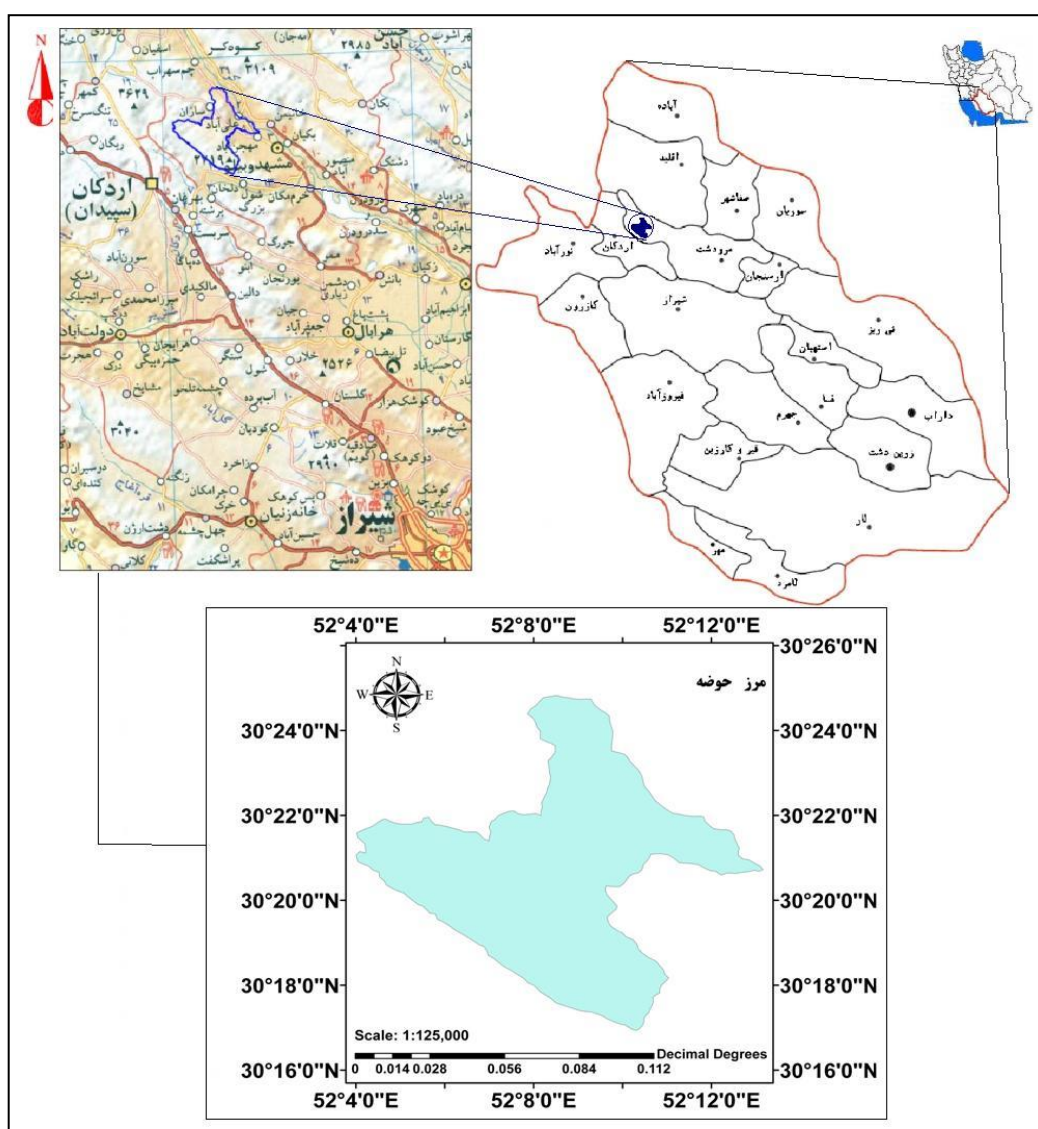
4 Russell et. al.

5 Goodness Of Fit

6 Root Mean Square Error

۲. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق با مساحت $81/7 \text{ km}^2$ ، تحت عنوان حوزه آبخیز بهشت گمشده (تنگ بستانک) در حدود ۸۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان شیراز و در موقعیت جغرافیایی $33^{\circ} 43' 52''$ تا $36^{\circ} 13' 52''$ شرقی و $30^{\circ} 16' 33''$ تا $30^{\circ} 25' 18''$ شمالی واقع شده است. میانگین بارش سالانه این حوزه ۶۰۹ میلی متر می باشد. اقلیم این منطقه مدیترانه ای سرد (بر اساس اقلیم‌نمای دومارتن) و سازندهای این حوزه آسماری، کشکان، بختیاری، کوترنر، رازک و پابده گورپی می باشند. شکل ۱ موقعیت و راه‌های دسترسی به این منطقه را نشان می دهد.

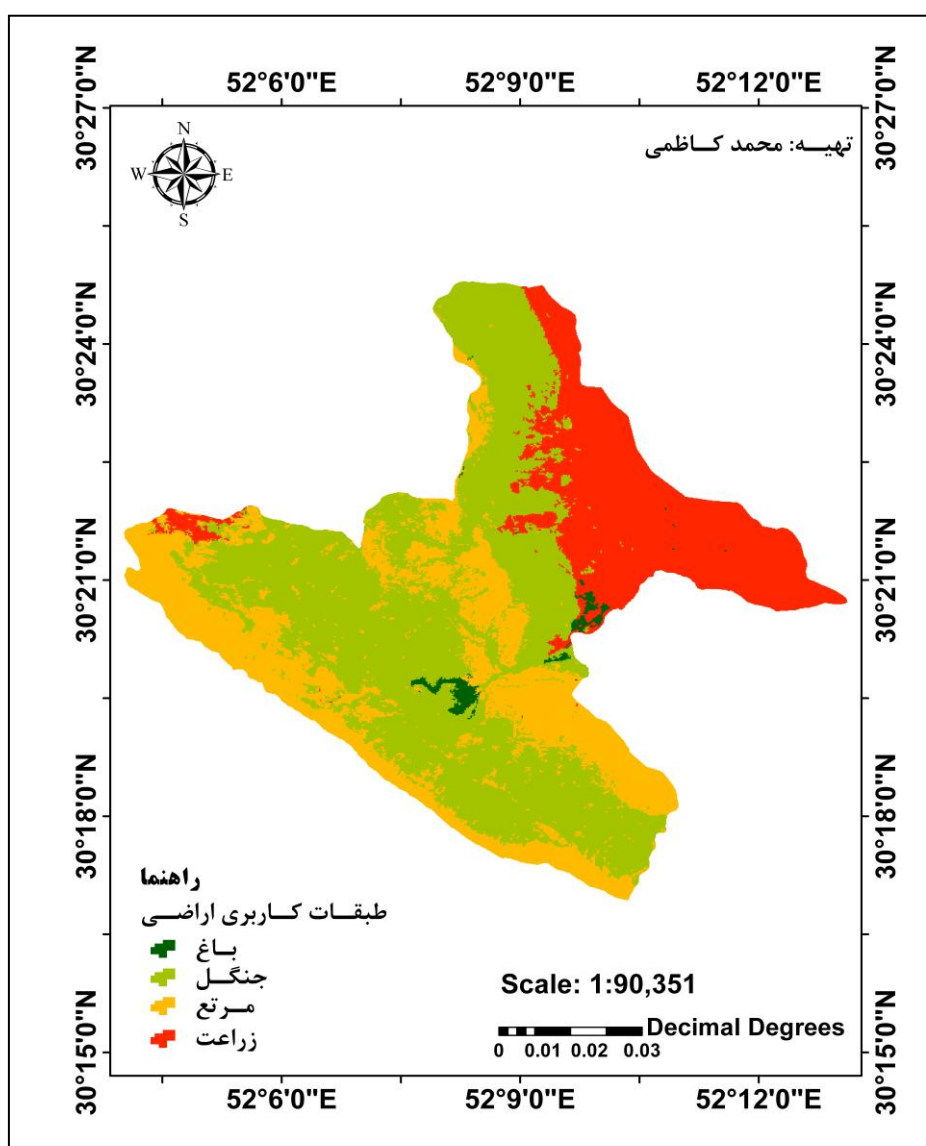


شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه و راه‌های دسترسی به آن

۳. مواد و روش‌ها

۳.۱. نمونه‌برداری

در این مطالعه نقشه کاربری اراضی تحت کاربری‌های اراضی زراعی، جنگل، باغات و مراتع به ترتیب با مساحت‌های ۱۸۳۲/۶۱، ۴۶۷۶/۷۵، ۲۸۹/۹۵ و ۱۳۷۰/۶۸ هکتار به‌عنوان واحدهای مولد رسوب و مطابق با روش الگوریتم حداکثر تشابه (ML) با تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI (تیرماه ۹۴) تهیه شد.



شکل ۲ نقشه واحدهای کاربری اراضی به‌عنوان منابع مختلف تولید کننده رسوب

در این مطالعه تعداد ۱۹ عنصر شامل ۱۵ عنصر ژئوشیمیایی و ۲ عنصر آلی و ۲ نسبت ایزوتوپی استفاده شد. عناصر ژئوشیمیایی شامل باریوم، کادمیوم، کروم، مس، لیتیم، منگنز، نئودیوم، نیکل، فسفر، سیلیکون، استرانسیوم، تیتانیوم، وانادیوم، زینک و دو نسبت ایزوتوپی شامل استرانسیوم ۸۷/ استرانسیوم ۸۶، نئودیوم ۱۴۴/ نئودیوم ۱۴۳ و ۲ ماده آلی نیتروژن و کربن بودند.

انتخاب ترکیب بهینه ردیاب‌ها

برای تعیین ترکیب ردیاب‌های منشأیاب از یک روش آماری دو مرحله‌ای استفاده شد. در مرحله اول در صورت عدم تبعیت از توزیع نرمال، از آزمون غیر پارامتری آزمون H یا آزمون کروسکال_والیس استفاده گردید (پلازان و همکاران، ۲۰۱۵؛ ۲۰۷۳). در مرحله دوم تعیین تابع تحلیل تشخیص و ضرائب آن برای کاهش خصوصیات انتخابی اولیه ردیاب‌ها به طوری که دارای حداقل همبستگی و حداکثر توان تفکیک منابع رسوب باشند به کار گرفته شده است. بعد از محاسبه توابع تشخیص سطح معنی‌داری آماری آن‌ها با معیارهای Wilk'S Lambda و مربع فاصله ماهالانویس صورت گرفت. برای نشان دادن توان جداسازی یا طبقه‌بندی تحلیل تشخیص، معنی‌داری توابع، اختلاف گروه‌ها و ماتریس طبقه‌بندی بررسی شده است. درصد طبقه‌بندی صحیح مهم‌ترین معیار بررسی توان طبقه‌بندی تحلیل تشخیص می‌باشد که برای تعیین آن از ماتریس طبقه‌بندی استفاده شده است. در ضمن به منظور ارزیابی نتایج تحلیل تشخیص از روش ارزیابی متقابل استفاده به عمل آمده است. ترکیب مناسب به دست آمده از ردیاب‌ها در این مرحله برای تعیین سهم منابع رسوب در مرحله بعد استفاده می‌شود (والینگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ ۲۷۹). یکی از پیش‌فرض‌های روش تحلیل تشخیص، نبود هم‌خطی چندگانه قوی بین متغیرها می‌باشد. برای تشخیص هم‌خطی چندگانه از عدد تحمل و عکس آن (عامل تورم واریانس) استفاده شده است (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ۳۷). عدد تحمل برابر یا کوچکتر از ۰/۱ و عامل تورم واریانس برابر یا بزرگتر از ۱۰ بیانگر هم‌خطی قوی بین متغیرهاست و برای مقابله با مشکلات هم‌خطی چندگانه قوی، ترکیب‌هایی از عناصر طوری انتخاب شدند که کمترین هم‌خطی در بین آن‌ها (عامل تورم واریانس حداکثر ۱۰) وجود داشته باشد.

۲.۳. مدل‌های ترکیبی و کمی

تعیین سهم منابع رسوب بر اساس مقایسه خصوصیات نمونه‌های رسوب و منابع رسوب با استفاده از روش‌های کمی با به عبارتی مدل‌های چندمتغیره ترکیبی صورت گرفت. برای حل این مدل‌ها برنامه‌نویسی خطی برای حل و بهینه کردن مقادیر سهم‌نسبی استفاده می‌شود (حدادچی و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۵۶۹، والینگ و

همکاران، ۲۰۰۸؛ ۲۸۰). بر همین اساس، رابطه ترکیبی برای هر یک از ردیاب‌ها به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$C_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} P_j \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن C_i برابر با مقدار برآوردی ردیاب i ام برای نمونه‌های رسوب ($i=1, 2, \dots, m$)، a_{ij} مقدار میانگین ردیاب i ام در واحد کاربری اراضی j ام ($j=1, 2, \dots, n$)، P_j میانگین مشارکت نسبی واحد کاربری - اراضی j ام (که نامعلوم بوده و به وسیله مدل برآورد می‌شود)، n تعداد واحدهای کاربری اراضی و m تعداد ردیاب‌های انتخاب شده (ترکیب بهینه) می‌باشد. از آن جایی که فرض می‌شود ردیاب‌ها و ویژگی‌های آنان در نمونه‌های رسوب کاملاً وابسته به مواد منبع واحدها می‌باشند و این ردیاب‌ها تنها از این واحدها ناشی می‌شوند، بنابراین نتایج حاصل، مشروط به دو محدودیت (P_j) زیر می‌باشند:

$$0 \leq P_j \leq 1 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\sum_{j=1}^n P_j = 1 \quad \text{رابطه (۳)}$$

به این علت که در چنین مدل‌هایی، رابطه (۱) برای تمام ردیاب‌ها تکرار می‌شود، بنابراین تعداد معادلات بیشتری نسبت به متغیرهای مجهول وجود خواهد داشت. برای حل این معادلات از روش بهینه‌سازی تابع هدف و تکرار عملیات استفاده می‌شود که در این پژوهش نیز از کمینه‌سازی مجموع مربعات باقی‌مانده با روش لوکال (Local) به عنوان تابع هدف استفاده شد. قبل از تعیین سهم باید اصلاحاتی از جمله ضریب وزنی ویژه هر یک از ردیاب‌ها (w_i) که هر یک از خصوصیات منشأیاب را با چند تکرار در آزمایشگاه اندازه‌گیری کرده و با محاسبه عکس ریشه دوم واریانس داده‌های استاندارد شده به دست می‌آید، را محاسبه کرد و نیز ضریب کربن آلی (O_j) (برای برطرف کردن مسئله غنی شدن یا تهی شدن رسوب) که با تقسیم میزان کربن آلی رسوب به متوسط میزان کربن آلی هر یک از منابع رسوب بدست می‌آید را محاسبه کرد و سپس اصلاحات را به مدل چندمتغیره ترکیبی وارد کرد. همچنین برای تعیین ضریب تصحیح اندازه ذرات (Z_j) با توجه به طبیعت انتخابی فرآیندهای فرسایش و انتقال رسوب باعث غنی شدن یا تهی شدن رسوب از نظر بعضی از اندازه‌ها می‌شود. در اثر این فرآیند، توزیع اندازه ذرات نمونه‌های رسوب و خاک منشأ متفاوت خواهد بود؛ بنابراین مقایسه بین خصوصیات خاک منابع رسوب و نمونه‌های رسوب که از نظر اندازه ذرات اختلاف دارند، صحیح نخواهد بود. جهت رفع این عیب و فراهم آوردن امکان مقایسه مستقیم بین نمونه‌های رسوب و نمونه‌های خاک باید از روش‌های اصلاحی استفاده شود. در این تحقیق با این فرض که خصوصیات منشأیاب به یک اندازه تحت تأثیر فرآیند غنی شدن یا تهی شدن قرار می‌گیرند و به دلیل نقش زیاد پارامتر سطح ویژه در میزان خصوصیات منشأیاب (ردیاب‌ها) و انعکاس ترکیب اندازه ذرات، از نسبت

سطح ویژه هر یک از نمونه‌های رسوب به متوسط سطح ویژه نمونه‌های خاک هر یک از منابع رسوب برای اصلاح خصوصیات منشأیاب منابع رسوب استفاده شد. با حل مدل‌های زیر سهم تمام واحدهای کاربری-اراضی برای هر نمونه رسوب به صورت جداگانه به دست آمد که در نهایت با میانگین‌گیری از سهم واحدها، مقدار متوسط سهم هر واحد کاربری اراضی در تولید رسوب تعیین شد.

$$R = \sum_{i=1}^n [\sum_{j=1}^m S_{ij} X_j - C_i]^2 \quad \text{رابطه (۴): (حدادچی و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۵۷۰)}$$

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \sum_{j=1}^m X_j S_{ij})^2}{n}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$R = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_i - \sum_{j=1}^m X_j S_{ij}| \right) / \sqrt{\sum_{j=1}^m X_j^2 VAR_{ij}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$R = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[C_i - (\sum_{j=1}^m X_j S_{ij} Z_j O_j)]^2}{C_i} \right\} W_i \quad \text{رابطه (۷): (پاتریک، ۲۰۱۵؛ ۲۱۲۱)}$$

$$R = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{[C_i - (\sum_{j=1}^m X_j S_{ij} Z_j O_j SV_{ji})]^2}{C_i} \right\} W_i \quad \text{رابطه (۸): (کالینز و همکاران، ۲۰۱۰؛ ۲۵۵)}$$

در روابط بالا VAR_{ij} واریانس ویژگی ردیاب i ام منبع رسوب i ام، R مجموع مربعات باقیمانده، C_i میزان اندازه‌گیری شده ویژگی (ردیاب) i ام در نمونه رسوب، W_i ضریب وزنی ویژه ردیاب i ام، Z_j ضریب اصلاحی اندازه ذرات برای فرسایش (منبع) j ام، O_j ضریب تصحیح ماده آلی برای فرسایش (منبع) j ام، S_{ij} میزان ویژگی (ردیاب) i ام در منبع j ام، m تعداد منابع، n تعداد ردیاب‌ها، m_j تعداد نمونه‌ها در هر منبع، X_j سهم منبع در فرسایش و تولید رسوب، SV_{ji} وزن درون منبع j برای مقادیر مختلف ردیاب‌های منشأیاب i . برای تست دقت بهینه‌سازی مقدار R (مجموع مربعات باقیمانده) از روش پیشنهادی کالینز و همکاران (۲۰۱۲) مطابق با رابطه ۹ و برآورد خطای نسبی مدل مطابق با رابطه ۱۰ استفاده شد.

$$GOF = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - \sum_{j=1}^m S_{ij} X_j)}{C_i} \quad \text{رابطه (۹)}$$

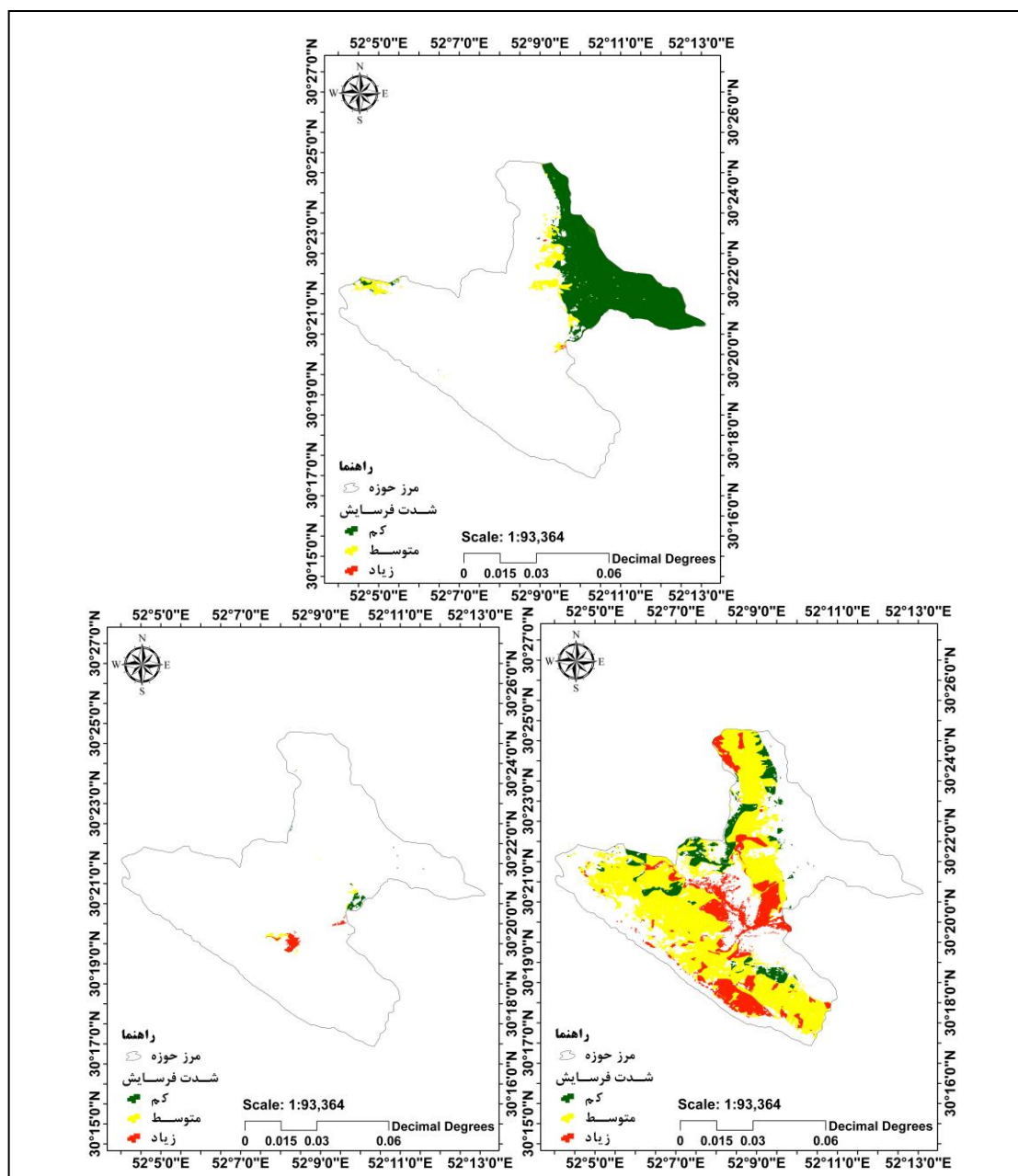
$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})^2} \quad \text{رابطه (۱۰): (درپیش، ۱۳۹۴؛ ۵۲)}$$

در این روابط، n تعداد خصوصیات ردیاب، C_i مقدار اندازه‌گیری شده ردیاب i ام در نمونه رسوب، S_{ij} مقدار میانگین ردیاب i ام در کاربری j ام، X_j سهم کاربری j ام، O_{mean} میانگین مقادیر مشاهده شده، O_i مقادیر

مشاهده‌شده و P_i مقدار برآوردی حاصل از مدل‌هاست. هرچه میزان شاخص GOF بیشتر باشد و مقدار $RMSE$ کمتر باشد، دقت مدل بیشتر است.

اندازه‌گیری‌های صحرائی

به منظور ارزیابی نتایج به دست آمده از کاربرد مدل چندمتغیره ترکیبی لازم بود تا مشاهدات صحرائی و اندازه‌گیری‌های مستقیم صحرائی نیز صورت پذیرد. بر همین اساس، با استفاده از روش دفتر مدیریت اراضی (BLM) اقدام به تهیه واحدهای کاری نیمه‌همگن شد. با بررسی‌های صحرائی و اصلاح و به‌روز رسانی کاربری‌ها و واحدهای نیمه‌همگن، واحدهای همگن به دست آمدند. در راستای افزایش دقت نقشه ایجاد شده از روش ارائه شده توسط صادقی (۲۰۰۵) استفاده شد به طوری که طبق امتیازات حاصل از روش BLM طبقه فرسایشی برای هر واحد از مقاوم به فرسایش (امتیاز ۰ تا ۲۰)، فرسایش خیلی شدید (امتیاز ۸۰ تا ۱۰۰) طبقه بندی شد و به ترتیب بر اساس شدت فرسایش موجود در واحد کاری حروف A تا E اختصاص داده شد که این حروف شدت فرسایش در حالت کلی را برای واحد مربوطه بیان می‌کند. برای دقیق‌تر شدن نتایج، سه پدیده فرسایشی سطحی (S)، شیار (R) و آبکندی (G) مد نظر قرار گرفتند. زیرنویس اول یکی از طبقات ۱ تا ۵ را شامل می‌شود و بیان‌گر شدت فرسایش واقع بر این پدیده‌ها می‌باشد. زیرنویس دوم حاصل سطح پوشش هر پدیده بوده و یکی از کدهای ۱ تا ۴ را به خود اختصاص داده و به ترتیب برای ۰ تا ۲۵، ۲۵ تا ۵۰، ۵۰ تا ۷۵ و سطوح پوششی ۷۵ تا ۱۰۰ درصد استفاده شد. به طور کلی یک واحد کاری با کدی مثل BS23R21G42 نشان داده می‌شود. از سویی، برای اندازه‌گیری‌های صحرائی نیز با توجه به واحدهای کاری به دست آمده اقدام به نصب پلات‌های سطحی در هر واحدکاری با سه تکرار و به ابعاد یک متر و مساحت یک مترمربع شد. در مورد شیارها و آبکندها از روش صادقی (۱۳۸۸) استفاده شد. در مورد شیارها نیز در هر واحدکاری با سه تکرار شیارهایی با طول بیش از ۱۰ متر انتخاب و مقطع عرضی آن‌ها در سه مقطع ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد از طول آن‌ها، اندازه‌گیری شد. در مورد آبکندها از پیکه‌های چوبی استفاده شد تا دقت مورد نظر تأمین گردد. در طول دوره یک‌ساله، دوبار اقدام به اندازه‌گیری رسوب شیارها، آبکندها شد. همچنین در مورد پلات‌های سطحی نیز رواناب و رسوب حاصل از بارندگی‌ها به صورت تجمعی در چند نوبت مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (شکل ۳ نقشه شدت فرسایش در واحدهای کاربری اراضی را نشان می‌دهد).



شکل ۳ شدت فرسایش با استفاده از مدل BLM روی کاربری‌های (از راست به چپ و از بالا به پایین) زراعت، مرتع، باغ و جنگل

۴. بحث و نتایج

نتایج آزمون آماری کروسکال والیس در بررسی توان ردیاب‌ها در جداسازی واحدهای کاری شامل اراضی مرتعی، اراضی جنگلی، اراضی زراعی و باغات در منطقه تنگ بستانک در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ نتایج آزمون کراسکال-والیس جهت تعیین خصوصیت منشأیاب مناسب برای تفکیک منابع رسوب

منشأیاب	آماره H	سطح معنی‌داری
باریم	۶/۳۸۸	۰/۳۸۱
کادمیوم	۴/۶۸۳	۰/۵۳۳
کبالت	۷/۲۵۹	۰/۲۹۸
کروم	۸/۹۷۴	۰/۱۷۵
مس	۱۳/۸۷۳	۰/۰۳۴
لیتیم	۵/۴۴۲	۰/۴۸۸
منگنز	۵/۸۵۵	۰/۴۴۰
نئودیمیوم	۹/۹۴۵	۰/۱۲۷
نیکل	۱۱/۷۳۶	۰/۰۶۸
فسفر	۱/۵۹۳	۰/۹۴۳
سیلیکون	۱۴/۶۱۷	۰/۰۲۸
استرانسیوم	۱۲/۴۴۵	۰/۰۴۴
تیتانیوم	۱۵/۱۰۹	۰/۰۲۲
وانادیوم	۷/۱۴۴	۰/۳۰۸
زینک	۴/۰۷۴	۰/۶۶۷
نیترژن	۱۵/۷۸۲	۰/۰۱۵
کربن	۱۶/۱۷۸	۰/۰۱۳
استرانسیوم ۸۷ / استرانسیوم ۸۶	۳/۱	۰/۷۹۶
نئودیمیوم ۱۴۴ / نئودیمیوم ۱۴۳	۵/۹۲۵	۰/۴۳۲

از نظر این آزمون اختلاف میانگین‌های هریک از عناصر در واحدهای کاربری‌اراضی به غیر از شش عنصر کربن، نیترژن، مس، استرانسیوم، تیتانیوم و سیلیکون در سطح کمتر از ۵ درصد معنی‌دار نیست، در واقع تمام عناصر به غیر از شش عنصر یاد شده، دارای قدرت تفکیک و جداسازی واحدهای مذکور نیستند. نتایج تحلیل تشخیص (DFA) و معنی‌داری آماری نشان داد، ترکیب بهینه خصوصیات منشأیاب باید طوری انتخاب شود که علاوه بر داشتن کمترین هم‌خطی چندگانه، بیشترین توان تفکیک منابع را داشته باشد تا باعث مشکلاتی در تفسیر اهمیت هر یک از متغیرها و ناپایداری نتایج طبقه‌بندی تحلیل نشود. معیار کمترین هم‌خطی برای عناصر ترکیب‌ها، داشتن عامل تورم واریانس حداقل ۱۰ است. ضرایب همبستگی بیشتر از ۹۵٪ با حذف یکی از دو ماتریس همبستگی اصلاح می‌شود. جدول (۲) مراحل مختلف اضافه شدن عناصر ردیاب در توابع تشخیص برای واحدهای کاربری اراضی به روش گام به گام و تأثیر آن‌ها بر توان جداسازی تحلیل تشخیص را نشان می‌دهد. با اضافه شدن هر عنصر مقدار مربع فاصله ماهالانویس افزایش و میزان Wilk's lambda کاهش می‌یابد. چهار تابع بر اساس عناصر یاد شده در واحدهای کاربری اراضی استخراج شده‌اند و جدول (۳) معنی‌داری توابع را به وسیله آماره مربع‌کای نشان می‌دهند که توابع اول در واحدهای تفکیک منابع رسوب ۶۵/۳٪ را به خود اختصاص داده‌اند. توابع

اول با بیشترین همبستگی کانونی، بیشترین تغییرات و اختلافها را در گروهها توصیف می‌کنند. درصد طبقه‌بندی صحیح در تفکیک منابع رسوب برای واحدهای کاربری اراضی ۷۵٪ بود.

جدول ۲ مراحل اضافه شدن عناصر ردیاب در تابع تشخیص (کاربری اراضی)

گام	خصوصیات منشأیاب وارد شده	حداقل مربع فاصله ماهالانویس	Wilks' Lambda	عدد تحمل (Tolerance)	عامل تورم واریانس (VIF)	وزن ردیاب منشأیاب در منبع
۱	کربن	۰/۰۰۴	۰/۶۴۴	۱ (کربن)	۱	۱/۸
۲	مس	۰/۳۹۱	۰/۳۵۱	۰/۷۸۸ (کربن) ۰/۷۸۸ (مس)	۱/۲۶ ۱/۲۶	۱/۵
۳	سیلیکون	۰/۷۲۴	۰/۲۴۴	۰/۷۶۶ (کربن) ۰/۷۸۸ (مس) ۰/۹۶۷ (سیلیکون)	۱/۳ ۱/۲۶ ۱/۰۳	۱/۳
۴	تیتانیوم	۱/۲۳	۰/۱۶۹	۰/۸۳۴ (کربن) ۰/۶۷۷ (مس) ۰/۸۸۸ (سیلیکون) ۰/۶۶۶ (تیتانیوم)	۱/۳۶ ۱/۴۷ ۱/۱۲ ۱/۵	۱/۵

جدول ۳ مشخصات توابع تشخیص حاصل برای تفکیک منابع رسوب (کاربری اراضی)

تابع	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد تجمعی واریانس	همبستگی کانونی	Wilks' Lambda	آماره مربع کای	معنی داری
۱	۱/۵۷۷	۶۵/۳	۶۵/۳	۰/۸۸۲	۰/۱۶۹	۶۴/۸۲۶	۰/۰۰۰
۲	۰/۷۰۷	۲۲	۸۷/۳	۰/۶۴۴	۰/۴۳۶	۳۰/۲۸	۰/۰۱۱
۳	۰/۲۹۵	۱۱/۳	۹۸/۶	۰/۴۷۷	۰/۷۴۵	۱۰/۷۵۸	۰/۰۲۱۶
۴	۰/۰۳۷	۱/۴	۱۰۰	۰/۱۸۸	۰/۹۶۵	۱/۳۱۴	۰/۰۷۲۶

همان‌گونه که مشاهده شد تعدادی از عناصر در مرحله اول (۶ عنصر) توان تفکیک منابع را نشان دادند، از آن‌جمله نیتروژن و استرانسیوم بودند که این عناصر در مرحله دوم و در تابع تشخیص حذف شدند و در جمع ترکیب بهینه قرار نگرفتند. از مجموع ۱۹ عنصر و نسبت ایزوتوپی، تنها ۴ عنصر مس، کربن، سیلیکون و تیتانیوم (عناصر نادر) قادر به جداسازی منابع رسوب بودند. بدین ترتیب نتایج تحلیل تشخیص نشان داد ۴ ردیاب آلی و ژئوشیمیایی قادر به تفکیک منابع رسوب در حوزه آبخیز تنگ بستانک بودند. ضرائب تصحیح مواد آلی در منابع رسوب و ضرائب وزنی-ویژه عناصر انتخابی و ضریب تصحیح سطح‌ویژه ذرات در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است. با به حداقل رساندن معادلات ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ برای هر یک از نمونه‌های رسوب و متوسط‌گیری از مقادیر حاصل سهم هر یک از منابع جدول ۶ به دست آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی این جداول سهم کل بر حسب درصد در واحدهای کاربری اراضی زراعت کمترین و مراتع بیشترین سهم را در تولید رسوب دارند.

جدول ۴ ضریب تصحیح کربن آلی (O_j) و ضریب تصحیح سطح ویژه ذرات (Z_j)

منابع تولید رسوب	ضریب تصحیح کربن آلی	ضریب تصحیح سطح ویژه ذرات
باغات	۰/۱۰۹	۰/۹۲۵
کشاورزی	۰/۶۸	۰/۹۵۵
جنگل ضعیف	۰/۱۱۶	۰/۱۱
مرتع	۰/۴۶	۰/۸۱۸

جدول ۵ ضرائب وزنی ویژه عناصر (W_i) کاربری اراضی

ترکیب بهینه خصوصیات منشأیاب	ضریب وزنی ویژه
کربن	۰/۳۵۷
مس	۰/۲۰۸
سیلیکون	۰/۱۸۲
تیتانیوم	۰/۱۷۷

جدول ۶ سهم نسبی کاربری اراضی در تولید رسوب بر حسب درصد

مدل کالینز (Collins)	نوع کاربری اراضی
۶/۷۷	زراعت آبی
۲۰/۹۲	اراضی جنگلی
۲۴/۳۸	اراضی باغی
۴۷/۹۳	اراضی مرتعی
مدل کالینز اصلاح شده (Modified Collins)	نوع کاربری اراضی
۶/۳۲	زراعت آبی
۹/۳۱	اراضی جنگلی
۲۷/۳۳	اراضی باغی
۵۷/۰۴	اراضی مرتعی
مدل لاندور (Landwehr)	نوع کاربری اراضی
۰/۹۲	زراعت آبی
۱۸/۵۹	اراضی جنگلی
۱۹/۵۲	اراضی باغی
۶۰/۹۶	اراضی مرتعی
مدل موتا (Motha)	نوع کاربری اراضی
۹/۵۸۲	زراعت آبی
۲۲/۹۷۵	اراضی جنگلی
۱۷/۸۰۵	اراضی باغی
۴۹/۶۳۶	اراضی مرتعی
مدل اسلاتری (Slattery)	نوع کاربری اراضی
۵/۶۸	زراعت آبی
۲۳/۸۲	اراضی جنگلی
۱۹/۶۴	اراضی باغی
۵۰/۸۷	اراضی مرتعی

همچنین جدول ۷ نتایج حاصل از تست دقت بهینه‌سازی را با شاخص GOF و $RMSE$ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول مشخص هست مدل کالینز اصلاح شده بیشترین مقدار GOF و کمترین مقدار $RMSE$ را به خود اختصاص داده است. بسیاری از محققان از جمله حدادچی و همکاران (۲۰۱۵)، کالینز و همکاران (۲۰۱۰ و ۲۰۱۲) وجود عامل SV_{zj} را عامل بهتر شدن این مدل نسبت به مدل کلاسیک و قبلی آن عنوان کرده‌اند و همان‌گونه که مشاهده می‌شود شاخص GOF و $RMSE$ نیز این مهم را نشان می‌دهد. مطابق با این روش بهترین مدل‌ها برای بیان سهم منابع رسوب مدل‌های کالینز اصلاح‌شده و بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده مدل موتا (Motha) هستند. جدول ۶ نتایج سهم منابع مختلف رسوب را برای واحدهای کاربری اراضی نشان می‌دهد. در تحقیقات داخلی بیشتر مدل کالینز کلاسیک و کمتر مدل کالینز اصلاح‌شده جهت محاسبه سهم منابع مختلف رسوب استفاده شده و به ندرت به کاربرد مدل‌های دیگر پرداخته شده است. در حالی که نتایج نشان داد مدلی همچون موتا (Motha) نتایج نزدیک و قابل قبولی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده و نسبت به مدل پذیرفته شده کالینز اصلاح‌شده نشان می‌دهد. مدل کلاسیک کالینز که در بسیاری از تحقیقات داخلی از آن استفاده شده است دقت کمتری در مقایسه با نسخه اصلاح‌شده آن از خود نشان داده است. در تمامی مدل‌های ترکیبی بالا اتفاق نظر بر کمترین سهم تولید رسوب و فرسایش در کاربری اراضی کشاورزی و بیشترین سهم فرسایش و رسوب توسط مراتع می‌باشد.

جدول ۷ نتایج حاصل از GOF و $RMSE$ برای مقادیر بهینه‌سازی شده (Local)

نام مدل	GOF	RMSE
موتا (Motha)	<۰	۵/۳۹
اسلاتری (Slattery)	<۰	۵/۶۸
لاندور (Landwehr)	۲۳/۷	۴/۵۵
کالینز (Collins)	۹۹/۶	۵/۵۳
کالینز اصلاح‌شده (MCollins)	۹۹/۹	۲/۰۷

نتایج داده‌های صحرایی و اندازه‌گیری میدانی برای انواع کاربری و در کدواحدهای مختلف و برای تکرارها و فرسایش‌های سطحی، شیاری و خندقی در جدول ۹ آورده شده است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری میدانی و سطح هر کاربری میزان و سهم مشارکت هر یک محاسبه و با توجه به درصد مساحت هر کاربری اراضی از سطح کل حوزه آبخیز اهمیت نسبی آن‌ها محاسبه شده است. جدول ۸ بیانگر این مهم می‌باشد.

جدول ۸ سهم و اهمیت نسبی واحدهای کاربری اراضی حاصل از اندازه‌گیری صحرایی

نام کاربری اراضی	درصد مساحت	درصد مشارکت در تولید رسوب و فرسایش	اهمیت نسبی
زراعت	۲۲/۴	۰/۷۱	۰/۰۳۱
باغات	۳/۵۴	۲/۸۳	۰/۷۹۹
جنگل	۵۷/۱۸	۳۱/۵۵	۰/۵۵۱
مرتع	۱۶/۷۵	۶۴/۹	۳/۸۷

جدول ۹ نتایج نسبی تولید رسوب حاصل از انواع فرسایش (تن در هکتار)

کاربری اراضی	میانگین فرسایش سطحی	میانگین فرسایش شیبی	میانگین فرسایش خندقی	کد واحدکاری	مجموع میانگین‌ها
زراعت	۰/۰۷۵	۰/۰۹	۰/۰۷	B S ₂₃ R ₁₁ G ₂₁	۰/۳۱۷
	۰/۰۹۷۵	۰/۲۰۲۵	۰/۱	C S ₂₂ R ₂₂ G ₂₁	
جنگل	۲/۱۵	۲/۰۹	۰/۲۶۵	B S ₂₂ R ₂₁ G ₂₂	۵/۵۱۹
	۲/۷۸	۲/۵۲	۰/۲۸۲	C S ₂₃ R ₂₂ G ₃₁	
	۲/۷۸	۳/۵	۰/۲۹۲	D S ₂₂ R ₂₂ G ₃₁	
باغ	۱/۹۶	۳/۳۵	-	B S ₂₃ R ₂₁ G ₁₁	۷/۹۹۳
	۳/۲۴	۴/۸۵	۰/۳۷۶	C S ₂₃ R ₃₂ G ₃₂	
	۳/۳۲	۵/۷۵	۰/۶۳	D S ₂₂ R ₃₂ G ₄₂	
مرتع	۱۰/۰۸	۱۲/۰۳	۰/۶۵	B S ₃₃ R ₄₂ G ₂₁	۳۸/۷۳
	۱۸/۶۷	۲۶/۱۷	۰/۹۲۵	C S ₃₄ R ₄₃ G ₃₂	
	۱۹/۱۲	۲۷/۶۶	۰/۹۵۵	D S ₃₄ R ₄₃ G ₃₂	

همچنین مقدار اهمیت نسبی کاربری‌های زراعت، جنگل، باغ و مراتع بر اساس مدل کالینز اصلاح شده به- ترتیب ۰/۲۸۲، ۰/۱۶۲، ۷/۷۲ و ۳/۴ بود. با توجه به نتایج اهمیت نسبی حاصل از اندازه‌گیری میدانی سهم منابع تولید رسوب و نتایج حاصل از گزینش بهترین مدل ترکیبی نتیجه‌گیری کرد که اراضی مرتعی و باغی بیشترین اولویت را نسبت به دیگر کاربری‌ها به خود اختصاص داده‌اند. مخصوصاً اراضی باغی که وسعت بسیار کمتری در مقایسه با اراضی مرتعی دارند و سهم بیشتری از فرسایش و رسوب را در مقایسه با کاربری مرتع روانه خروجی حوزه می‌کنند.

۵. نتیجه‌گیری

حضور عنصر کربن (C) به‌عنوان ردیاب در تفکیک منابع رسوب (کاربری‌های اراضی) دیده شد، که با نتایج والینگ و همکاران (۲۰۰۸)، کالینز و همکاران (۲۰۱۰)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۳)، حدادچی و همکاران (۲۰۱۳)، ونگ و همکاران (۲۰۱۴) و نصرتی و همکاران (۱۳۹۴) مبنی بر حضور کربن به‌عنوان یک ردیاب ثابت در تفکیک کاربری‌های اراضی مطابقت می‌کند. حضور عنصر کربن آلی در تمایز بین کاربری‌های مختلف می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر حاصل‌خیزکننده‌ها باشد. نتایج حکیم‌خانی و همکاران (۱۳۸۷) مبین نقش متمایزکننده عناصر نادرخاکی از جمله سیلیکون، تیتانیوم و مس در تفکیک منابع رسوب می‌باشد. عدم حضور عنصر نیتروژن در مرحله دوم انتخاب بهترین ترکیب بهینه ردیاب‌ها با استفاده از تابع تحلیل تشخیص گام به گام می‌تواند ناشی از هم‌خطی بین ردیاب‌ها باشد که نتایج تحقیقات والینگ (۲۰۰۵) و نوحه‌گر و همکاران (۱۳۹۵) به این مهم اذعان دارند. بیشترین اهمیت نسبی مربوط به کاربری مراتع و سپس باغات می‌باشد. کاربری زراعت به دلیل قرار گرفتن در دشت بسیار مسطح (شیب بسیار کم)، کشت متناوب (برنج و گندم) و بدون آیش در منطقه دارای کمترین اهمیت نسبی از لحاظ تولید رسوب در محدوده مطالعاتی می‌باشند. شاخص اهمیت نسبی سهم‌های فرسایشی اولویت‌بندی مدیریت کاربری اراضی را نشان می‌دهد، چنان‌که مراتع بالاترین اولویت را در بحث کنترل تولید رسوب و لزوم مدیریت صحیح دارند. همچنین نتایج حاصل از تحقیق حاضر حکایت از بیشترین دقت در تبیین سهم‌های فرسایش توسط مدل کالینز اصلاح‌شده داشت که با نتایج حدادچی و همکاران (۲۰۱۵) مبنی بر انتخاب این مدل به‌عنوان یکی از قوی‌ترین مدل‌های ترکیبی در تعیین سهم منابع مختلف رسوب مطابقت دارد. تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی مدل‌های ترکیبی (روش انگشت‌نگاری) ناشی از تله‌اندازی رسوب و نسبت تحویل آن می‌باشد که سبب تفاوت در مقادیر این دو روش می‌شود. هرچند هر دو روش از حیث روند هم‌دیگر را تأیید می‌کنند. تفاوت‌های مقداری حاصل از دو روش را می‌توان به مباحثی چون نسبت تحویل رسوب کلی و به تفکیک منابع رسوب، ذخیره، جابجایی و انتقال رسوب نسبت داد. همچنین تفاوت بین سهم‌های مشاهداتی و محاسباتی با مدل‌های کمی را می‌توان به ضعف روش بهینه‌سازی لوکال نسبت داد که فقط با در نظر گرفتن جواب‌های محلی اقدام به بهینه‌سازی تابع هدف می‌کند و مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی از جمله الگوریتم ژنتیک (GA) کلیه جواب‌های عمومی و انتخاب بهترین جواب را مدنظر قرار نمی‌دهد؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات منشأیابی و بهینه‌سازی مدل‌های ترکیبی از دیگر روش‌های بهینه‌سازی که دقت بیشتری دارند استفاده شود. اگرچه در این تحقیق کارایی مدل‌های ترکیبی با روند اندازه‌گیری صحرائی مطابقت داشت (مدل موتا با ضریب همبستگی ۰/۹۲۴، مدل اسلاتری با ضریب همبستگی ۰/۸۹۲، مدل کالینز با ضریب همبستگی ۰/۷۶، مدل لاندور با ضریب همبستگی ۰/۸۳۴، مدل کالینز اصلاح‌شده با ضریب همبستگی

۰/۵۶۳). با در نظر گرفتن دو شاخص GOF و RMSE نتایج مدل کالینز اصلاح شده با وجود ضریب همبستگی کمتر مقبول می‌باشد و نتایج سهم‌بندی مدل موتا (Motha) و یا اسلاتری (Slattery) با وجود شاخص منفی GOF غیرقابل قبول هست (هر چه مقادیر شاخص GOF به یک نزدیک‌تر باشد نتایج مدل قوی‌تر و فابل اعتماد می‌باشد)، اگرچه این مدل توانسته ضریب همبستگی بالاتری با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان دهد. یکی از موارد ضعف مدل‌های ترکیبی در نشان دادن سهم منابع تولید رسوب عدم در نظر گرفتن مواردی همچون سطح منابع می‌باشد. برای رفع این مهم از شاخص اهمیت‌نسبی جهت مقایسه منابع مولد رسوب و مقایسه یکسان آن‌ها استفاده می‌شود. در بیشتر تحقیقات داخلی مقایسه‌ای بین مدل‌های کمی مختلف صورت نگرفته است و یا در تحقیقات خارجی بجز چند مورد مقایسه‌ای بین نتایج این مدل‌ها انجام نشده است. در این تحقیقات جهت گزینش بهترین مدل از شاخص GOF استفاده شده و کمتر به شاخص‌های دیگر از جمله RMSE توجه شده است؛ بنابراین استفاده از این شاخص‌ها جهت تأیید نتایج و نیز مقایسه این نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده ضروریست.

کتابنامه

- درپیش، م. (۱۳۹۴). منشأیابی رسوبات تپه‌های ماسه‌ای به روش انگشت‌نگاری در منطقه گچین بندرعباس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه زابل، دانشکده آب و خاک، گروه مرتع و آبخیزداری.
- صادقی، س.ح.ر. (۱۳۸۸). مطالعه و اندازه‌گیری فرسایش آبی، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
- حکیم‌خانی، ش. (۱۳۸۹). ارزیابی اهمیت نسبی انواع فرسایش در تولید رسوب (بررسی موردی حوزه قره‌آقاج ماکو)، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۳ (۱)، صفحات ۱۳ تا ۲۷.
- حیدری، ک.، نجفی‌نژاد، ع.، خرمالی، ف. و بابانژاد، م. (۱۳۹۲). تعیین سهم واحدهای کاری در تولید رسوب معلق با استفاده از روش منشأیابی رسوب (مطالعه موردی: آبخیز تول‌بنه، استان گلستان)، فصلنامه پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۳ (۱۱)، صفحات ۲۷ تا ۳۸.
- عباسی، م.، فیض‌نیا، س.، احمدی، ح. و کاظمی، ی. (۱۳۸۹). منشأیابی رسوبات بادی نیاتک با استفاده از ردیابی عناصر ژئوشیمیایی، فصلنامه علمی-پژوهشی خشک بوم، ۱ (۱)، صفحات ۳۴ تا ۴۴.
- غلامی، ح.، طاهری مقدم، ا.، قیری، م. و مهدوی نجف‌آبادی، ر. (۱۳۹۴). تعیین سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از روش انگشت‌نگاری (مطالعه موردی: ارگ نگار بردسیر کرمان)، مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۲ (۱۸)، صفحات ۴۶-۵۴.
- نجفی، س. و صادقی، س.ح.ر. (۱۳۹۲). تعیین سهم منابع تولید رسوب از طریق مقایسه نتایج روش‌های تهیه نقشه سیمای فرسایش، انگشت‌نگاری و اندازه‌گیری میدانی، مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، ۵ (۳)، صفحات ۱۶۵ تا ۱۷۸.

نصرتی، ک.، احمدی، ف.، نظری سامانی، ع.ا. و ثروتی، م.ر. (۱۳۹۴). تعیین نقش کاربری اراضی در تولید رسوب معلق و کف بر پایه منشأیابی رسوب در حوزه طالقانی، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۸ (۴)، صفحات ۷۵۱ تا ۷۶۵.

نصرتی، ک. (۱۳۹۰). منشأیابی رسوب بر اساس برآورد عدم قطعیت، مجله پژوهش آب ایران، ۵ (۹)، صفحات ۵۱ تا ۶۰.

- Collins, A., Walling, D., Webb, L. & King, P. (2010). *Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information. Geoderma, 155, 249-261.*
- Collins, A.L., & Walling, D.E. (2004). *Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. Progress in Physical Geography, 28 (2), 159-196.*
- Collins, A.L., & Walling, D.E. (2007). *Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. Geomorphology, 88 (1-2), 120-138.*
- Collins, A.L., & Walling, D.E. (2002). *Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. Journal of Hydrology, 261, 218-244.*
- Collins, A. L., Walling, D. E., & Leeks, G. J. L. (1997). *Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. Catena, 29 (1), 1-27.*
- 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, 557-558, 123-133.*
- Devereux, O. H., Prestegard, K. L., Needelman, B. A., & Gellis, A. C. (2010). *Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. Hydrological Processes, 24 (11), 1391-1403.*
- Franz, C., Makeschin, F., Weib, H., & Lorz, C., (2014). *Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasilia DF, Brazil – using the fingerprint approach. Science of the Total Environment, 466-467, 513-523.*
- Haddadghi, 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, 560-578.*
- Koiter, A.J., Owens, P.N., Petticrew, E.L., & Lobb, D.A., (2013). *The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins. Earth-Science Reviews, 125, 24-42.*
- Motha J. A., Wallbrink P. J., Hairsine P. B., & 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.*
- Nosrati, K., Govers, G., Semmens, B.X., & Ward, J.V. (2014). *A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting. Geoderma, 217-218, 173-180.*

- Sadeghi, S.H.R. (2005). *A semi-detailed technique for soil erosion mapping based on BLM and satellite image application. Journal of Agricultural Science Technology*, 7, 133-142.
- Slattery M., Walden J., & Burt T. P. (2000), *Fingerprinting suspended sediment sources using mineral magnetic measurements- A quantitative approach*. Tracers in geomorphology, John Wiley and Sons: 309–322.
- Patrick Laceby, J., McMahon, J., Evrard, O., & Olley, J. (2015). *A comparison of geological and statistical approaches to element selection for sediment fingerprinting. Journal of Soils Sediments*, 15, 2117–2131.
- Palazón, L., Gaspar, L., Latorre, B., Blake, W., & Navas, A., (2015). *Identifying sediment sources by applying a fingerprinting mixing model in a Pyrenean drainage catchment, Journal of Soils Sediments*, 15, 2067–2085.
- Russell, M.A., Walling, D.E., & Hodgkinson, R.A., (2001). *Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. Journal of Hydrology*, 252, 1-24.
- Walling, D., Collins, A. & Stroud, R. (2008). *Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments. Journal of Hydrology*, 350, 274-289.
- Walling, D.E. (2005). *Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. Science of the Total Environment*, 344, 159-184.
- Walling, D. E., Owens, P. N., & Leeks, G. J. L., (1999). Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, 13,955-975.
- Wang,Y., Chen,L., Fu, B., & Lu, Y. (2014). *Check dam sediments: an important indicator of the effects of environmental changes on soil erosion in the Loess Plateau in China. Environ Monit Assess*, 186, 4275–4287.
- Zhang, X., Li, Z.W., Tang, Z.H., Zeng, G.M., Huang, J.Q., Guo, W., Chen, X.L., & Hirsh, A. (2013). *Effects of water erosion on the redistribution of soil organic carbon in the hilly red soil region of southern China. Geomorphology*, 197, 137–144.