مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۹، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵
ص ۶۶۰-۶۴۷

تاریخ دریافت ۱۳۹۱/۶/۵
تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۱۰/۱۱

بهینه‌سازی سهم مشارکت منابع مختلف در تولید رسوب در مناطق لسی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کچیک)

❖ **علی فضل الهی؛** استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، ایران.

❖ **علی سلاجقه*؛** استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

❖ **سادات فیض‌نیا؛** استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

❖ **حسن احمدی؛** استاد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

چکیده

انگشت‌نگاری رسوبات روشی جهت شناسایی منابع رسوب و تعیین سهم مشارکت هر یک از منابع در تولید رسوب است. در این روش از یک یا چندین خصوصیت بیوژئوشیمیایی (ردیاب‌های طبیعی) استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش انگشت‌نگاری رسوبات جهت تعیین سهم منابع مختلف رسوب در اراضی لسی بهره گرفته شد. ۲۷ ردیاب در تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. داده‌ها از لحاظ پرت بودن بررسی شدند. سپس با استفاده از آزمون کراسکال والیس توانایی ردیاب‌ها در جدایش منابع مختلف رسوب بررسی شد. تمامی ردیاب‌ها توانایی جدایش منابع مختلف رسوب را دارا بودند. سپس با استفاده از تحلیل تشخیص، بهترین ترکیب ردیاب‌ها که قادر به تمایز بین منابع مختلف رسوب باشند، شناسایی شدند که شامل ۹ ردیاب کربن کل، سدیم، کربن آلی، سرب، کبالت، استرانسیوم، آلومینیوم، نسبت کربن به نیتروژن و روبیدیوم می‌باشند. سپس سهم هریک از منابع به دو روش معمول و بهینه شده با الگوریتم ژنتیک تعیین شد؛ که در میان شش منبع رسوب، خندق با میزان سهم متوسط ۳۷/۶ درصد بیشترین و جنگل طبیعی با میزان سهم متوسط ۴/۸ درصد کمترین مشارکت را در تولید رسوب در حوضه دارند. بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک سبب افزایش دقت برآورد سهم منابع مختلف (نسبت به روش معمول) گردید.

واژگان کلیدی: انگشت‌نگاری رسوبات، نمونه‌گیر بار معلق، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، حوزه آبخیز کچیک.

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۹۸۹۱۲۳۸۴۲۴۶۴+
Email: salajegh@ut.ac.ir

۱. مقدمه

حمل رسوبات در حوزه آبخیز یکی از منابع اصلی آلودگی‌های غیر نقطه‌ای آب‌های سطحی است. ذرات با قطر کمتر از ۶۳ میکرون قسمت اعظم این آلودگی‌های غیر نقطه‌ای را تشکیل می‌دهند [۲۵]. ذرات ریز رسوبات حمل شده به‌صورت معلق و محلول نقش مهمی در محیط‌زیست بازی می‌کنند، به این خاطر که این ذرات ریز سبب انتقال کربن و مواد مغذی می‌شوند [۸، ۲۱]. افزایش رسوبات معلق سبب ایجاد مشکلاتی در نواحی پایین‌دست می‌شود، برای مثال این مسئله سبب کاهش کیفیت آب [۱۴]، کاهش تنوع اکولوژیکی [۲۰]، افزایش گل‌آلودگی آب و کاهش حجم مفید مخازن و کاهش زیبایی آبراهه‌ها و رودخانه‌ها [۱۸] می‌گردد. همچنین رسوبات با انواع آلودگی‌ها مثل فلزات و ترکیبات آلی مرتبط هستند. این مواد شیمیایی این پتانسیل را دارند که در بافت موجودات زنده مثل ماهیان جذب و تجمع یابند و سبب ایجاد مشکلاتی در سلامت عمومی در اثر مصرفشان گردند [۱۷]. منبع آلودگی‌های غیر نقطه‌ای شامل فعالیت‌های کشاورزی، معدن‌کاوی، قطع درختان در مناطق جنگلی و ... است [۲۵].

هدف از مطالعات مربوط به حمل رسوبات در مقیاس حوزه آبخیز، شناسایی منابع، چگونگی حمل رسوبات متحرک و سرانجام آن‌ها در داخل یک حوضه است. با این وجود متغیرهای متعدد و پیچیده در سطح حوزه آبخیز نظیر اقلیم، پوشش گیاهی، توپوگرافی، نوع خاک و اختلالات ایجاد شده توسط انسان می‌تواند بر روی منابع، سرانجام و فرآیند حمل رسوبات تأثیرگذار باشد.

به‌واسطه تغییرات زیاد متغیرهای محیطی در مقیاس‌های مکانی و زمانی، شناسایی منابع و پیش‌بینی فرآیند حمل رسوبات و سرانجام آن‌ها مشکل است. محققین و مهندسین محیط، روش‌های جدیدی را جهت مطالعه این فرآیندهای پیچیده و درون وابسته[1] پیشنهاد دادند که مبتنی بر داده بوده و دارای قطعیت بیشتری می‌باشند. یکی از این رویکردها، روش انگشت‌نگاری رسوبات[2] است که توسط محققین طی سال‌های اخیر ارائه شده و گسترش یافته است [۱۰، ۱۶]. انگشت‌نگاری رسوبات روشی جهت شناسایی منابع رسوب و تعیین سهم مشارکت هر یک از منابع در تولید رسوب می‌باشد. در این روش از فن‌آوری ردیاب‌های طبیعی که ترکیبی از جمع‌آوری نمونه‌ها، آنالیزهای آزمایشگاهی رسوبات و تکنیک‌های مدل‌سازی آماری می‌باشد، بهره گرفته می‌شود. در این روش از یک و یا چندین خصوصیت بیوژئوشیمیایی (ردیاب‌های طبیعی) استفاده می‌شود. این ردیاب‌های طبیعی هم در منابع رسوبات و هم در نمونه‌های بار معلق جمع‌آوری شده در خروجی حوضه اندازه‌گیری می‌شوند تا سهم هر یک از منابع در رسوب تولیدی مشخص گردد [۶].

در برزیل، با استفاده از ۱۶ ردیاب سهم اراضی کشاورزی و جاده‌ها در تولید رسوب به ترتیب ۶۴ و ۳۶ درصد تعیین شد [۱۶]. استفاده از روش انگشت‌نگاری در حوضه هالزواتر نشان داد که اراضی کشاورزی بیشترین سهم در تولید رسوب را داشتند [۹]. در حوضه مرگن با کمک چهار ردیاب سهم فرسایش سطحی و زیر سطحی را به ترتیب ۳۰/۶۵ و ۶۹/۳۵ درصد اعلام نمودند [۱۲] .

در مطالعاتی که تاکنون در کشور انجام شده نمونه‌برداری در خروجی حوضه از رسوبات به‌جا مانده از سیلاب‌های قبل صورت گرفته است که می‌تواند سبب ایجاد خطا در نتایج شود. نمونه‌برداری بار معلق هم‌زمان با بارش و با کمک نمونه‌گیر مخصوص، تاکنون در کشور انجام نشده است. در این تحقیق برای اولین بار این نمونه‌گیر ساخته و به کار گرفته شد. در تحقیقاتی که تاکنون در زمینه انگشت‌نگاری انجام شده نتایج محلی

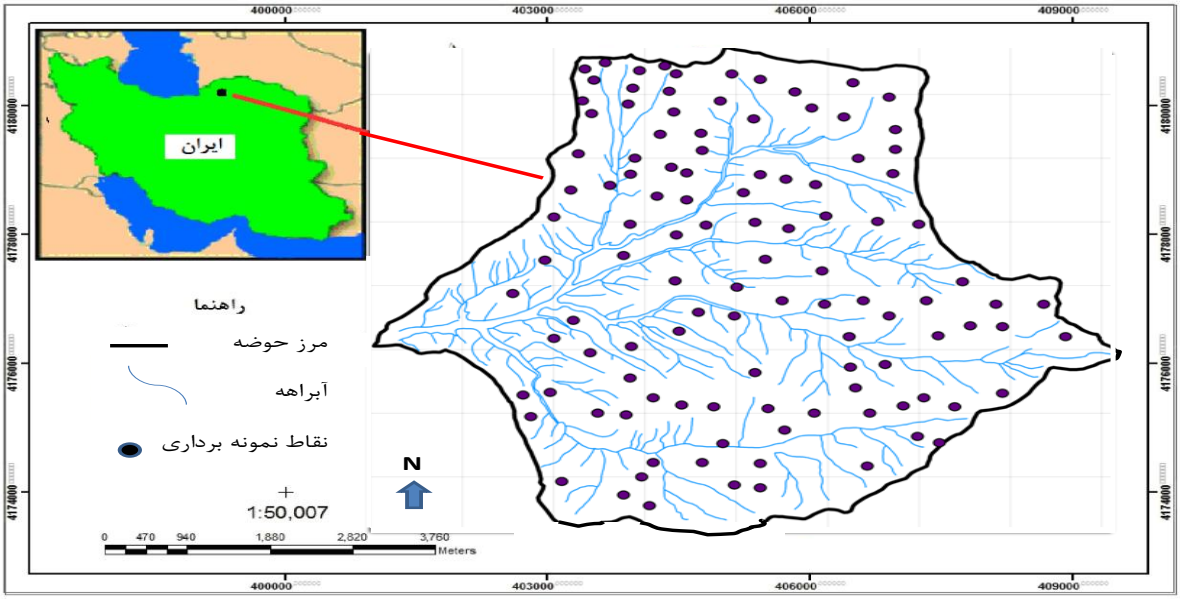
[1]. Interdependent
[2]. Sediment Fingerprinting

بوده است. در این تحقیق با کمک بهینه‌سازی و بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک نتایج بهینه شدند.

۲. روش‌شناسی تحقیق

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کچیک به مساحت ۳۶۰۰ هکتار، زیرحوضه کوچکی از آبخیز قرناوه بوده و آبخیز قرناوه نیز یکی از زیرحوضه‌های چندگانه حوزه آبخیز گرگانرود محسوب می‌شود. این حوضه در محدوده ۱۰ً ۵۲َ ۵۵° تا ۵۲ً ۵۷َ ۵۵° طول شرقی و ۱۵ً ۴۲َ ۳۷° تا ۲۵ً ۴۶َ ۳۷° عرض شمالی واقع می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوضه مورد مطالعه را در سطح کشور نشان می‌دهد. سطح منطقه از نهشته‌های لسی پوشیده شده و از چهار کاربری جنگل طبیعی، جنگل دست کاشت، مرتع و اراضی کشاورزی تشکیل شده است. اقلیم منطقه به روش دومارتن-گاتمن نیمه خشک و بر اساس روش آمبرژه دارای اقلیم نیمه خشک سرد است. بافت خاک حوضه سیلتی لوم و سیلتی کلی‌لوم می‌باشد. از نظر ژئومورفولوژی منطقه از تپه‌ماهور تشکیل شده است.

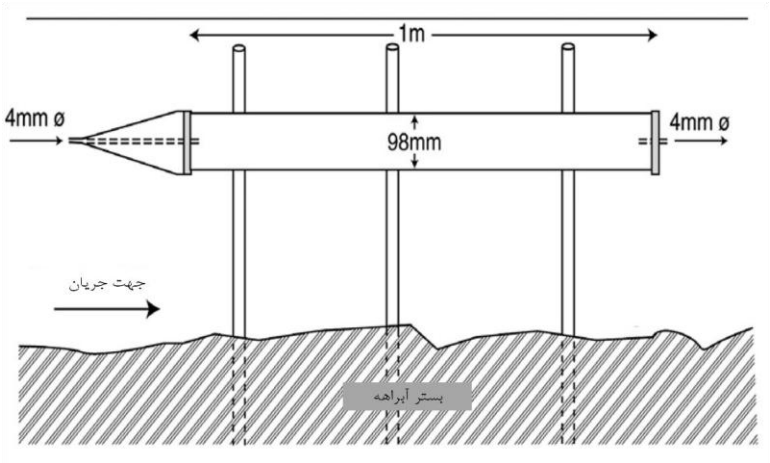


شکل ۱. موقعیت حوضه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

۲.۲. شاخص‌های اندازه‌گیری شده

در ابتدا نقشه‌های زمین‌شناسی و کاربری اراضی منطقه تهیه گردید. با بررسی نقشه زمین‌شناسی مشخص شد که کل منطقه تنها از نهشته‌های لسی تشکیل شده است. نقشه کاربری اراضی از تفسیر عکس‌های هوایی و پردازش تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد. این نقشه با پیمایش‌ها و کنترل‌های زمینی تصحیح گردید. در مجموع چهار کاربری طبیعی، جنگل دست کاشت، مرتع و اراضی کشاورزی تفکیک گردید. در بازدیدهای صحرایی خندق‌هایی در سطح حوضه مشاهده گردید. چهار کاربری فوق‌الذکر و خندق و راه‌های زراعی، شش منابع رسوب را در این تحقیق تشکیل دادند. همان‌طور که ذکر شد در محدود تحقیقات انجام شده در گذشته در زمینه انگشت‌نگاری رسوبات در کشورمان، جهت نمونه‌برداری در خروجی حوضه، از رسوبات به‌جا مانده در دشت‌های

سیلابی استفاده شده است. در این تحقیق برای اولین بار از نمونه‌گیر رسوب ثابت بار معلق استفاده گردید. از مزایای اصلی این نمونه‌گیر این است که بدون نیاز به اپراتور نمونه‌گیری انجام می‌شود. درنتیجه هزینه نمونه‌برداری را در مواقع وقوع رخداد بارش کاهش می‌دهد. جهت ساخت و نصب این نمونه‌گیر از مصالح ارزان قیمت شامل لوله‌های پلی‌اتیلن و لوله‌های گالوانیزه استفاده گردید. تعداد سه عدد از این نمونه‌گیرها با همکاری پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ساخته و بعد از حمل در خروجی حوضه (قبل از فلوم) نصب شد (شکل‌های ۲ و ۳). در مرحله بعد، در هر یک از این منابع (با توجه به سطح هر یک از منابع) به‌جز خندق‌ها تعدادی نمونه از خاک سطحی (۰-۵ سانتیمتر) جمع‌آوری شد. جهت بالا بردن دقت و اینکه هر نمونه معرف بهتری از محیط پیرامونی باشد، هر نمونه در واقع شامل ۵ نمونه در سطح حدودی ۴۰۰ مترمربع می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر هر نمونه خاک از ترکیب ۵ نمونه جمع‌آوری شده در سطح حدودی ۴۰۰ مترمربع به دست آمد.



شکل ۲. طرح و نمایی از ابعاد اجزای مختلف نمونه‌گیر بار معلق

ب الف

شکل۳. نمونه‌گیر بار معلق الف: قبل از نصب ب: بعد از نصب

در خندق‌ها از دیواره و کف هر خندق نمونه‌ها جمع‌آوری گردید. نمونه‌گیری با استفاده از بیلچه انجام شد. در مجموع ۱۱۸ نمونه از منابع رسوب جمع‌آوری شد.

در انتهای ۶ بازه زمانی با مراجعه به نمونه‌گیرهای بار معلق، محتویات درون آن، داخل ظروف نگهدارنده خالی شده و بعد از شستشو، مجدداً در محل نصب گردید. این فرآیند برای تمام بازه‌های زمانی تکرار گردید. تاریخ‌ها و تعداد نمونه‌های جمع‌آوری بار معلق در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. تاریخ‌های نمونه‌برداری از نمونه‌گیرهای بار معلق

تاریخ‌های نمونه‌برداری	تعداد نمونه
۱ بهمن تا ۳۰ بهمن ۸۹	۳
۱ اسفند تا ۲۵ اسفند ۸۹	۳
۲۶ اسفند تا ۳۱ فروردین ۹۰	۳
۱ اردیبهشت تا ۳۰ خرداد ۹۰	۳
۱ مهر تا ۳۰ آبان ۹۰	۳
۱ آذر تا ۳۰ آذر ۹۰	۳

تمامی نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند. در ابتدا نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده از سطح حوضه در هوای آزاد خشک شده سپس با استفاده از هاون کوبیده و با استفاده از الک ۶۳ میکرومتری، الک شدند. نمونه‌های بار معلق طبق روش‌های معمول می‌بایست در آون خشک می‌شدند ولی ازآنجاکه حرارت آون ممکن بود سبب ایجاد تغییرات فیزیکی و شیمیایی شود، از این روش صرف‌نظر کرده و به‌عنوان یک روش جایگزین ابتدا نمونه‌ها سانتریفیوژ شده و سپس با استفاده از فریزدرایر[1] خشک گردیدند [۹]. نمونه‌های خشک شده با استفاده از الک ۶۳ میکرومتری، الک شدند. تمامی نمونه‌های آماده شده در مرحله قبل در ابتدا در تیزاب سلطانی[2] (ترکیبی از اسید هیدروکلریک و اسید نیتریک با نسبت ۳ به ۱) هضم شده و سپس غلظت جرمی عناصر Fe، Ge، K، Li، Mg، Mn، Mo، Na، Ni، Pb، Rb، Sr،Zn، Zr Al، As، Ba، Cd، Ce، Co، Cr، Cs، Cu با استفاده از دستگاه ICP-MS تعیین گردید [۹]. کربن آلی از روش والکلی-بلک[3] تعیین گردید. جهت تعیین نیتروژن و کربن کل از دستگاه واریومکس[4] استفاده گردید. دانه‌بندی و تعیین ترکیب اندازه ذرات نمونه‌های منابع رسوب و بار معلق به کمک دستگاه دانه‌بندی لیزری[5] و با حذف مواد آلی به‌وسیله آب اکسیژنه انجام شد. سطح ویژه متوسط نمونه‌ها از روی ترکیب اندازه ذرات و فرض کرویت ذرات برآورد شد [۹]. کلیه آزمایش‌های فوق در آزمایشگاه آب‌وخاک انستیتو اکولوژی پیرنه[6] از زیر مجموعه‌های انجمن تحقیقات ملی کشور اسپانیا[7] انجام شد. سپس داده‌ها از لحاظ وجود داده‌های پرت مورد بررسی قرار گرفتند. از سه روش جهت بررسی داده‌های پرت استفاده شد. در روش اول از میانگین به اضافه یا منهای ۳ برابر انحراف معیار استفاده شد [۵]. داده‌های بزرگ‌تر از میانگین به اضافه ۳ برابر انحراف معیار و کوچک‌تر از

[1] Freeze-dryer
[2] Aqua regia
[3] Walkley-Black
[4] VarioMax
[5] Micromeritics laser diffraction
[6] Pyrenean Institute of Ecology (IPE)
[7] Spanish National Research Council

میانگین منهای ۳ برابر انحراف معیار پرت محسوب می‌شوند. روش دوم میانه به اضافه یا منفی میانه انحراف‌های تمام داده‌ها از میانه می‌باشد [۲۳]. روش سوم استفاده از نمودار جعبه‌ای می‌باشد [۲۳]. جهت بررسی توان جداسازی منابع رسوب توسط هر یک از ردیاب‌ها، از آزمون کراسکال‌والیس[1] استفاده گردید. جهت به دست آوردن ترکیب بهینه ردیاب‌ها که بهترین کارایی را در جدایش منابع دارا باشند از تحلیل تشخیص[2] استفاده شد [۹]. جهت تعیین سهم هریک از منابع در تولید رسوب از یک مدل ترکیبی استفاده شده است. در این تحقیق از معادله (۱) استفاده شد [۹].

$$\sum_{i=1}^{n}\{(C_i - (\sum_{s=1}^{m} P_s S_{si} Z_s O_s SV_{si}))/C_i\}^2 W_i \qquad (۱)$$

در معادله فوق Ci غلظت ردیاب (i) در نمونه بار معلق، Ps درصد مشارکت منبع رسوب (s)، Ssi میانگین غلظت ردیاب (i) در منبع رسوب (s)، Zs عامل تصحیح اندازه ذرات برای منبع رسوب (s)، Os عامل تصحیح میزان ماده آلی برای منبع رسوب (s)، SVsi وزنی است که معرف تغییرپذیری بین منابع ردیاب (i) در منبع رسوب (s) می‌باشد، Wi وزن قدرت تمایز، n تعداد ردیاب‌ها و m تعداد منابع رسوب می باشد. قطر ذرات نقش مهمی در تمرکز عناصر در نمونه‌های خاک و رسوب دارد. درنتیجه مقادیر عناصر ردیاب در منابع رسوب و خروجی حوزه، به طور مستقیم قابل مقایسه نیستند. لذا از عامل تصحیح اندازه ذرات استفاده گردید. عامل تصحیح اندازه ذرات با استفاده از نسبت سطح ویژه نمونه‌های رسوبات خروجی به سطح ویژه نمونه‌های هر منبع رسوب محاسبه شد. چنین مشکلی در مورد مواد آلی نیز وجود دارد. لذا از عامل تصحیح میزان ماده آلی استفاده گردید. عامل تصحیح میزان ماده آلی مبتنی بر نسبت میزان کربن آلی نمونه های رسوبات خروجی به میزان کربن آلی نمونه های هر منبع رسوب به دست آمد [۷،۹،۲۰]. وزن تغییرپذیری بین منابع ردیاب (SVsi) یکی از عوامل مهمی است که در مدل فوق به آن توجه شده است. این عامل بدان جهت اضافه شد که اطمینان حاصل شود که مقادیر ردیاب برای یک منبع خاص با حداقل انحراف معیار، بیشترین تأثیر را بر راه حل‌های بهینه اعمال می‌کنند. این عامل با استفاده از معکوس انحراف معیار هر ردیاب در هر یک از منابع رسوب به دست آمد [۹]. وزن قدرت تمایز (Wi) یکی دیگر از عوامل مهمی است که در مدل اصلاح شده به آن توجه شده است. این عامل مبتنی بر اطلاعات مربوط به کارایی تشخیص (تمایز) نسبی هر ردیاب می‌باشد و با توجه به نتایج تحلیل تابع تشخیص چند متغیره به دست آمد. برای تعیین این عامل برای هر ردیاب به‌تنهایی تحلیل تشخیص انجام شد و درصد میانگین طبقه‌بندی صحیح (منابع مختلف رسوب) هر یک از ردیاب‌ها به دست آمد [۹]. ردیابی که حداقل قدرت تفکیک را داشت دارای قدرت تمایز ۱ بوده و برای سایر ردیاب‌ها از تقسیم قدرت تفکیک آن ردیاب به قدرت تفکیک کمترین ردیاب به دست آمد. دو شرط مرزی (محدودیت) در مدل در نظر گرفته شد. سهم نسبی هر منبع رسوب نبایستی منفی گردد (رابطه ۲) و مجموع سهم نسبی منابع مختلف موجود بایستی یک گردد (رابطه ۰).

$$P_s \geq 0 \qquad (۲)$$

$$\sum_{s=1}^{n} P_s = 1 \qquad (۳)$$

S و n در رابطه ۱ توضیح داده شدند.

معادله (۱) در واقع تابع هدف ما می‌باشد. جواب‌های این معادله (P_s) به روش بهینه‌سازی خطی و با استفاده از الحاقِ Solver در نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۰ به دست آمد. همچنین از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی جهت بهینه کردن نتایج و تعیین دقیق‌تر نتایج استفاده گردید. هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل‌قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است به‌گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه

[1] Kruskal-wallis
[2] Discriminate analysis

شود. برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. در بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک، رابطه ۱ به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. محدودیت‌ها هم روابط ۲ و ۳ می‌باشند. فرآیند بهینه‌سازی در جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار MATLAB7 انجام شد. جهت ارزیابی مدل توسط معیار خطای نسبی از رابطه (۴) استفاده شد [۹].

(۴)

$$RME = 1 - \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{\left(C_i - \left(\sum_{s=1}^{m} P_s S_{si} Z_s O_s SV_{si}\right)\right)/C_i\right\}^2 W_i\right]$$

اجزای این رابطه همانند رابطه ۱ هستند.

۳. نتایج

تمامی نمونه‌ها در سه تکرار اندازه‌گیری شدند. بررسی یک متغیره و چند متغیره داده‌های پرت به روش‌های یاد شده بیانگر این است که باوجوداینکه برخی نمونه در برخی موارد پرت می‌باشند، ولی پرت بودن آن‌ها در تمام روش‌ها تأیید نشده است. در کل با توجه به اینکه هیچ یک از نمونه‌ها در تعداد قابل‌توجهی از متغیرها و از نظر تمام روش‌ها پرت نیستند، لذا شواهدی مبنی بر پرت بودن آن‌ها وجود نداشته و نمی‌توان نسبت به حذف آن‌ها اقدام کرد. داده‌هایی با شرایط یاد شده نباید حذف شوند [۱۱]. با توجه به نتایج آزمون کراسکال‌والیس (جدول ۲)، اختلاف میانگین‌های تمامی ردیاب‌ها در منابع رسوب مختلف در سطح اعتماد بیشتر از ۹۵ درصد معنی‌دار بود که بیانگر این مطلب است که تمام ردیاب‌ها دارای قدرت تفکیک و جداسازی منابع رسوب مختلف هستند. به‌عبارت‌دیگر میانگین غلظت هر یک از آن‌ها حداقل در یکی از منابع رسوب متفاوت از دیگر منابع است. با استفاده از تحلیل تشخیص، مجموعه ۹ ردیاب در ۹ گام، بهترین ترکیب را جهت تمایز میان منابع مختلف تشکیل دادند. کربن کل به‌عنوان اولین ردیاب و روبیدیوم به‌عنوان آخرین ردیاب وارد تابع شدند. مقادیر متوسط غلظت عناصر ترکیب انتخابی به همراه ماده آلی برای منابع رسوب و بار معلق خروجی در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آزمون کراسکال والیس در بررسی توان ردیاب‌ها در جداسازی منابع رسوب

ردیاب	آماره H	سطح معنی‌داری	ردیاب	آماره H	سطح معنی‌داری
k	۷۲/۳۵	۰/۰۰۷	Fe	۸۸/۸۴	۰/۰۳۳
Li	۷۳/۰۰	۰/۰۱۲	Mn	۹۷/۱۱	۰/۰۴۸
Mg	۱۲۰/۹۶	۰/۰۱۸	Pb	۷۳/۷۶	۰/۰۱۱
Mo	۱۲۵/۵۶	۰/۰۲۳	Co	۳۹/۴۳	۰/۰۰۸
Na	۱۳۰/۵۰	۰/۰۳۷	Cs	۱۳۸/۹۴	۰/۰۱۵
Rb	۶۴/۷۱	۰/۰۱۱	Ge	۴۱/۴۹	۰/۰۱۹
Zn	۱۰۰/۱۵	۰/۰۲۴	Ni	۵۲/۴۰	۰/۰۳۰
Al	۳۹/۸۵	۰/۰۰۸	Sr	۱۵۲/۱۵	۰/۰۰۳
As	۷۸/۵۸	۰/۰۴۴	Zr	۸۱/۲۶	۰/۰۴۱
Ba	۵۴/۰۱	۰/۰۳۰	C org	۲۳۰/۸۱	۰/۰۰۲
Cd	۵۱/۸۱	۰/۰۱۷	N	۲۱۵/۸۴	۰/۰۳۴
Ce	۳۸/۸۹	۰/۰۱۸	C	۲۱۱/۱۲	۰/۰۱۹
Cr	۸۹/۲۱	۰/۰۳۵	C/N	۴۵/۸۳	۰/۰۰۴
Cu	۸۳/۶۰	۰/۰۲۵			

جدول ۳. متوسط غلظت عناصر ترکیب انتخابی به همراه ماده آلی و سطح ویژه ذرات برای منابع رسوب و بار معلق خروجی

ردیاب	منابع رسوب						بار معلق
	کشاورزی	جنگل	مرتع	جنگل دست کاشت	جاده	خندق	
C Total	۲/۳۰	۳/۹۶	۲/۶۵	۳/۰۲	۲/۷۴	۲/۴۶	۲/۵۱
Na	۳/۲۶	۳/۴۵	۳/۵۹	۳/۶۱	۳/۳۷	۸/۱۴	۵/۹۴
C org	۰/۷۷	۲/۷۰	۱/۱۴	۱/۲۱	۰/۸۱	۰/۳۸	۰/۲۵
Pb	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۶
Co	۰/۰۷۷	۰/۰۷۶	۰/۰۷۹	۰/۰۷۵	۰/۰۸۲	۰/۰۷۵	۰/۰۷۲
Sr	۰/۵۳	۰/۴۰	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۸۳	۰/۷۰
Al	۱۰۳/۵۷	۹۷/۶۲	۱۰۶/۱۲	۱۱۰/۲۹	۸۹/۹۵	۷۴/۵۶	۱۰۷/۹۱
C/N	۸/۱۲	۱۱/۲۳	۹/۳۶	۹/۷۳	۸/۴۷	۷/۸۶	۷/۱۲
Rb	۱/۴۹	۰/۹۳	۲/۰۳	۲/۴۷	۱/۶۸	۰/۴۵	۰/۳۷
OM	۱/۳۳	۴/۶۵	۱/۸۷	۲/۰۸	۱/۴۰	۰/۶۵	۰/۴۳
سطح ویژه $m^2 g^{-1}$	۱/۱۳	۱/۰۵	۱/۱۵	۱/۱۰	۱/۱۹	۱/۱۱	۱/۳۸

همانطور که قبلا بیان شد در این معادله چهار عامل تصحیح وجود دارد که در ادامه نتایج آنها ارائه می‌گردد.

در جدول (۴) نتایج مربوط به مقادیر عوامل تصحیح اندازه ذرات و میزان ماده آلی را ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر عوامل تصحیح اندازه ذرات و میزان ماده آلی

منابع رسوب	عامل تصحیح اندازه ذرات	عامل تصحیح میزان ماده آلی
کشاورزی	۱/۲۲	۰/۳۲
جنگل	۱/۳۱	۰/۰۹
مرتع	۱/۲۰	۰/۲۳
جنگل دست کاشت	۱/۲۶	۰/۲۱
جاده	۱/۱۶	۰/۳۱
خندق	۱/۲۴	۰/۶۶

جدول (۵) نتایج مربوط به مقادیر عامل وزن تغییرپذیری بین منابع ردیاب را نشان می‌دهد. ردیاب کبالت به علت کم بودن انحراف معیار مقادیر این عنصر، دارای بیشترین وزن تغییرپذیری بین منابع ردیاب در بین تمامی ردیاب‌های انتخابی می‌باشد و در مقابل ردیاب آلومینیوم به علت زیاد بودن انحراف معیار مقادیر این عنصر، دارای کمترین وزن تغییرپذیری بین منابع ردیاب در بین تمامی ردیاب‌های انتخابی می‌باشد.

در جدول (۶) نتایج مربوط به مقادیر وزن قدرت تمایز برای ردیاب‌های مختلف ارائه شده است. در تحلیل تشخیص هر یک از ردیاب‌ها توانایی متفاوتی در تفکیک صحیح منابع رسوب دارند. ردیابی که حداقل قدرت تفکیک را داشت (ردیاب کبالت) دارای قدرت تمایز ۱ بوده و برای سایر ردیاب‌ها از تقسیم قدرت تفکیک آن ردیاب، به کمترین قدرت تفکیک بین ردیاب‌ها (ردیاب کبالت) به دست آمد. در این تحقیق، به‌طور مثال ردیاب کبالت با درصد تفکیک صحیح منابع رسوب به میزان ۱۵/۵ درصد، کمترین مقدار را داشته درنتیجه وزن قدرت تمایز (Wi) آن ۱ می‌باشد و ردیاب کربن کل با درصد تفکیک صحیح منابع رسوب به میزان ۴۴/۷ درصد، وزن قدرت تمایز (Wi) آن ۲/۸۸ می‌باشد که از تقسیم ۴۴/۷ بر ۱۵/۵ به دست آمد. ردیاب کربن کل و کبالت به ترتیب

با وزن قدرت تمایز ۲/۸۸ و ۱ بالاترین و کمترین توانایی را در تفکیک صحیح منابع رسوب دارا می‌باشند.

جدول ۵. مقادیر عامل وزن تغییرپذیری بین منابع ردیاب

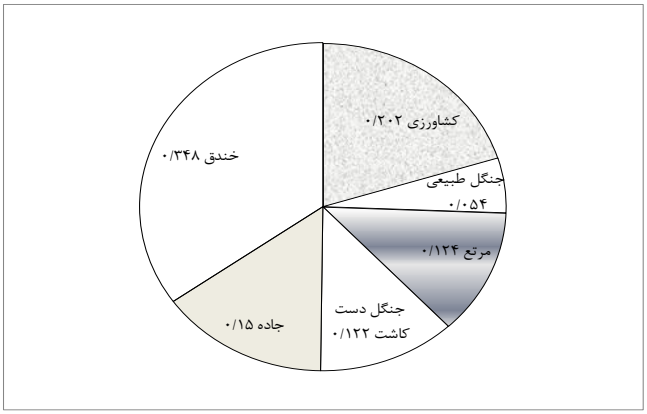
ردیاب	کشاورزی	جنگل	مرتع	جنگل دست کاشت	جاده	خندق
C Total	۳/۶۷	۱/۸۵	۳/۱۹	۳/۰۷	۲/۴۰	۴/۰۷
Na	۱/۳۸	۱/۲۵	۱/۲۸	۱/۶۹	۱/۳۰	۰/۲۳
C org	۴/۰۸	۱/۶۵	۱/۴۷	۱/۵۹	۲/۱۴	۳/۸۵
Pb	۲۷/۰۵	۱۴/۹۶	۲۳/۴۲	۱۵/۷۳	۱۰/۶۳	۱۱/۹۱
Co	۱۳۸/۴۷	۱۹۰/۵۵	۱۹۰/۰۴	۱۰۲/۸۸	۱۶۶/۰۹	۲۹۷/۹۷
Sr	۸/۴۰	۹/۲۹	۴/۵۳	۷/۳۵	۶/۹۴	۵/۳۲
Al	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۳
C/N	۱/۵۶	۱/۲۴	۰/۶۱	۱/۲۴	۰/۶۶	۰/۵۰
Rb	۰/۹۵	۰/۷۶	۰/۶۴	۰/۳۹	۰/۵۵	۱/۰۷

جدول ۶.مقادیر وزن قدرت تمایز برای ردیاب‌های مختلف

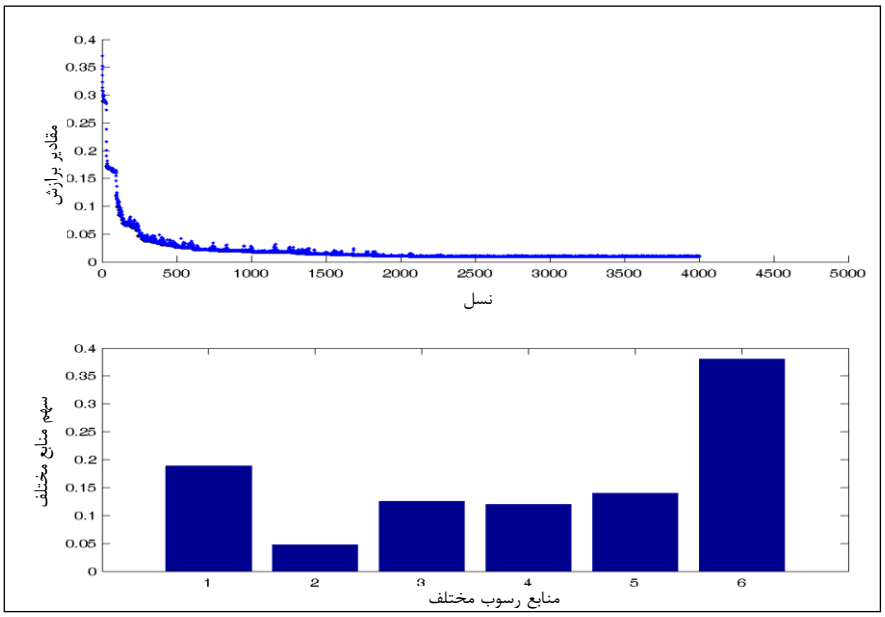
گام انتخاب	ردیاب	درصد تفکیک صحیح منابع رسوب	وزن قدرت تمایز
۱	C Total	۴۴/۷	۲/۸۸
۲	Na	۳۵/۳	۲/۲۸
۳	C org	۴۲/۴	۲/۷۴
۴	Pb	۲۴/۳	۱/۵۷
۵	Co	۱۵/۵	۱/۰۰
۶	Sr	۳۵/۹	۲/۳۲
۷	Al	۲۰/۶	۱/۳۳
۸	C/N	۲۵/۴	۱/۶۴
۹	Rb	۲۹/۴	۱/۹۰

با به حداقل رساندن معادله ۱ سهم هر یک از منابع در تولید رسوب به دست آمد. نتایج حاصل از سهم هر یک از منابع رسوب در شکل ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول بیشترین سهم رسوب تولیدی در حوضه، مربوط به منبع خندق به میزان ۳۴/۸ درصد و کمترین سهم رسوب تولیدی در حوضه مربوط به جنگل به میزان ۵/۴ درصد می‌باشد. خطای نسبی مدل چند متغیره مورد استفاده برای برآورد سهم منابع مختلف، ۸ درصد به دست آمد.

نتایج مربوط به بهینه‌سازی سهم مشارکت هر یک از منابع در تولید رسوب در شکل۴ و ۵ ارائه شده است. ستون‌های ۱ تا ۶ به ترتیب سهم اراضی کشاورزی، جنگل طبیعی، مرتع، جنگل دست کاشت، جاده و خندق را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج جدول بیشترین سهم رسوب تولیدی در حوضه، مربوط به منبع خندق به میزان ۳۷/۶ درصد و کمترین سهم رسوب تولیدی در حوضه مربوط به جنگل طبیعی به میزان ۴/۸ درصد می‌باشد. خطای نسبی مدل چند متغیره مورد استفاده برای برآورد سهم منابع مختلف، ۱ درصد به دست آمد.



شکل ۴. سهم و اهمیت نسبی منابع مختلف در تولید رسوب در روش معمول با استفاده از بار معلق



شکل ۵. سهم هر یک از منابع با کمک الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار مطلب

۴. بحث و نتیجه‌گیری

این تحقیق که در حوزه آبخیز کچیک به مساحت ۳۶۰۰ هکتار انجام شد، یکی از اولین تحقیق‌ها در جهت بهینه‌سازی نتایج روش انگشت‌نگاری رسوبات به‌منظور تعیین سهم مشارکت منابع مختلف در تولید رسوب می‌باشد. در این تحقیق برای اولین بار در سطح کشور، نمونه‌گیر بار معلق ساخته و به‌طور موفقیت‌آمیزی به کار گرفته شد.

به دو روش معمول و بهینه شده سهم منابع مختلف در تولید رسوب تعیین گردید. تقریباً هر دو روش نتایج مشابه‌ای از نظر رتبه سهم منابع مختلف رسوب ارائه دادند. خندق، اراضی کشاورزی، جاده در اراضی کشاورزی، جنگل دست کاشت، مرتع و جنگل طبیعی به ترتیب از بیشترین تا کمترین سهم را در بین منابع دارند. در این

تحقیق سهم اراضی خندقی در دو روش به‌طور متوسط ۳۶ درصد به دست آمد. با بررسی مقادیر عناصر مختلف، زیادتربودن عنصر سدیم (و در نتیجه تأثیر منفی آن در پایداری خاکدانه‌ها) در نمونه‌های جمع‌آوری شده در خندق‌ها نسبت به سایر منابع کاملاً مشخص می‌باشد. خندق و فرسایش کانال‌ها بیشترین نقش را در تولید رسوب دارند [۱۹،۲۶]. ۶۰ درصد رسوبات در فلات لسی چین از خندق منشأ می‌گیرند [۱۵]. نتایج مشابه در شمال غرب اتیوپی گزارش شد [۲]. در مطالعه‌ای دیگر نتایج نشان داد که میان دو منبع مرتع و خندق، ۸۰ درصد سهم رسوبات از خندق‌ها منشأ می‌گیرند[۱۳]. در تحقیقی دیگر سهم مشارکت اراضی کشاورزی در تولید رسوب ۲۰ درصد اعلام شد[۳]. در تحقیق دیگر میزان رسوب زایی در اراضی کشاورزی ۲/۴ برابر بیشتر از میزان رسوب زایی در اراضی جنگلی اعلام شد[۴].

تبدیل جنگل و مراتع، به اراضی کشاورزی در شیب‌های بسیار تند (و غیرقابل‌تصور) و شخم در جهت شیب در سطح حوضه بسیار شایع است. آثار فرسایش‌های سطحی به‌وضوح در این اراضی دیده می‌شود. کم بودن میزان ماده آلی خاک اراضی کشاورزی یکی از دلایل بالا بودن سهم این اراضی در تولید رسوب می‌باشد. میزان ماده آلی خاک‌های کشاورزی حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد کمتر از خاک‌های دارای پوشش طبیعی می‌باشد [۲۷]. تشدید معدنی شدن کربن آلی و هدرفت ماده آلی خاک و مواد مغذی متصل به آن، می‌تواند از طریق فروپاشی خاکدانه‌ها و در دسترس تجزیه و تخریب قرار دادن ذخیره ماده آلی خاک که تحت حفاظت خاکدانه‌های کوچک هستند، انجام شود [۴]. جاده‌ها در اراضی کشاورزی سومین رتبه را از لحاظ بیشترین سهم در تولید رسوب در حوضه دارند. این جاده‌ها بااینکه در اراضی کشاورزی واقع شده‌اند، نقش کمتری در تولید رسوب ایفا می‌کنند؛ که علت آن می‌تواند ناشی از کمتر بودن عملیات خاک‌ورزی در این بخش نسبت به زمین‌های زراعی باشد. سهم مشارکت مراتع و جنگل دست کاشت، در تولید رسوب در تولید رسوب نزدیک به هم و ۱۲/۴ و ۱۲/۲ درصد در روش معمول و ۱۲/۷ و ۱۲/۱ درصد در روش بهینه شده به دست آمد. در حوضه کچیک، جنگل دست کاشت در واقع مراتعی هستند که جهت جلوگیری از شخم زدن (توسط ساکنین حوضه) با گونه‌های سوزنی‌برگ، جنگل‌کاری شده‌اند. مشاهدات صحرایی از کم بودن پوشش علفی اشکوب زیرین این مناطق حکایت داشت. به نظر می‌رسد که هر چند کاشت گونه‌های سوزنی‌برگ توانسته از تبدیل کاربری (شخم خوردن توسط ساکنین) این مناطق جلوگیری نماید، ولی در کاهش سهم رسوب زایی این مناطق، تأثیر زیادی نداشته است. میزان تنوع زیستی گونه‌های علفی زیر اشکوب در سطح یک منطقه جنگل طبیعی با گونه‌های بلوط، منطقه جنگل‌کاری شده با گونه‌های سوزنی‌برگ و علفزارها در کوه‌های هیمالیا نشان داد که تنوع گونه‌ای در مناطق جنگل‌کاری شده با گونه‌های سوزنی‌برگ، کمترین میزان می‌باشد [۲۴]. لذا توجه به گونه انتخابی قبل از جنگل‌کاری مصنوعی (دست کاشت) ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق سهم مشارکت کاربری جنگل در دو روش معمول و بهینه شده، به ترتیب ۵/۴ و ۴/۸ درصد به دست آمد که کمترین میزان میان تمامی منابع رسوب می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر، سهم مشارکت مناطق جنگلی در تولید رسوب را ۲ درصد اعلام نمودند[۳]. از دلایل کم بودن سهم کاربری جنگل در تولید رسوب مناطق جنگلی (که به‌سرعت در حال تبدیل شدن به اراضی کشاورزی است) نقش تاج‌پوشش در جلوگیری از برخورد مستقیم (و با سرعت) قطرات باران بر سطح خاک، هوموس غنی و مواد آلی زیاد و قرارگیری آن‌ها در شیب‌های زیاد می‌باشد. پوشش جنگلی نقش مهمی در ایجاد حفاظ بر روی خاک و محافظت از ساختمان آن از طریق تأثیر سیستم ریشه خود و در نتیجه کاهش حساسیت به فرسایش، ایفا می‌نمایند [۲۲]. استفاده از الگوریتم ژنتیک سبب بهبود نتایج و کاهش خطای نسبی مدل از ۸ درصد در روش معمول به یک درصد در روش بهینه شده گردید. در رودخانه

می‌سی‌سی‌پی مقدار رسوب تولید شده، با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک تخمین زده شد. با مقایسه خطای نسبی روش‌های معمول با روش بهینه شده با الگوریتم ژنتیک اعلام شد که بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک سبب بهبود نتایج شده است[۱]. کارایی روش انگشت‌نگاری رسوبات جهت تعیین سهم مشارکت منابع مختلف رسوب در تولید رسوب در این تحقیق تائید شد. هر چند که استفاده از روش انگشت‌نگاری، جهت برآورد سهم منابع مختلف کارا می‌باشد، بااین‌وجود، شناخت کامل و دقیق از حوضه جهت تفسیر نتایج ضروری است.

سپاسگزاری

در انتها بر خود واجب می‌دانیم از پرفسور گارسیا رویز[1] که تمامی امکانات لازم آزمایشگاهی را جهت انجام این تحقیق فراهم نمودند و همچنین از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری جهت همکاری در ساخت و نصب نمونه‌گیر بار معلق سپاس‌گزاری نماییم.

[1] Jose M. Garcia-Ruiz

References

[1] Altunkaynak, A. (2009). Sediment load prediction by genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40, 928-934.

[2] Bewket, W. and Sterk, G. (2003). Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the Chemoga watershed, Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 97, 81-93.

[3] Carter, J., Owens, P., Walling, D. and Leeks, G. (2003). Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system. *Science of the Total Environment*, 314, 513-534.

[4] Celik, I. (2005). Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83, 270-277.

[5] Chiang, L.H., Pell, R.J. and Seasholtz, M.B. (2003). Exploring process data with the use of robust outlier detection algorithms. *Journal of Process Control*, 13, 437-449.

[6] Collins, A.L., Walling, D.E. and Leeks, G.J.L. (1998). Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 31-52.

[7] Collins, A.L. and Walling, D.E. (2002). Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of Hydrology*, 261, 218-244.

[8] Collins, A.L. and Walling, D.E. (2004). Documenting catchment suspended sediment sources: Problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography*, 28, 159-196.

[9] Collins, A.L., Walling, D.E., Webb, L. and King, P. (2010). Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information. *Geoderma*, 155, 249-261.

[10] Evrard, O., Navratil, O., Ayrault, S., Ahmadi, M., Némery, J., Legout, C., Lefèvre, A., and Esteves, M. (2011). Combining suspended sediment monitoring and fingerprinting to determine the spatial origin of fine sediment in a mountainous river catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, 1072-1089.

[11] Hair, J.F. and Anderson, R.E., 2010. Multivariate Data Analysis, 7th Edition Prentice Hall, 785p.

[12] Hakimkani, S., Ahmadi, H., and Ghaymoian J. (2010). Determining Erosion Types Contributions to the Sediment Yield Using Sediment Fingerprinting Method (Case study: Margan watershed, Makoo). *Water and Soil Science*, 19, 83-96.

[13] Krause, A.K., Franks, S.W., Kalma, J.D., Loughran, R.J. and Rowan, J.S. (2003). Multi-parameter fingerprinting of sediment deposition in a small gullied catchment in SE Australia. *Catena*, 53,327-348.

[14] Lartiges, B.S., Deneux-Mustin, S., Villemin, G., Mustin, C., Barrès, O., Chamerois, M., Gerard, B. and Babut, M. (2001). Composition, structure and size distribution of suspended particulates from the Rhine River. *Water Research*, 35, 808-816.

[15] Li, Y., Poesen, J., Yang, J.C., Fu, B. and Zhang, J.H. (2003). Evaluating gully erosion using 137Cs and 210Pb/137Cs ratio in a reservoir catchment. *Soil and Tillage Research*, 69, 107-115.

[16] Minella, J.P.G., Merten, G.H. and Clarke, R.T. (2004). Identification of sediment sources in a small rural drainage basin, Sediment Transfer through the Fluvial System Wallingford, U.K.

[17] Moreirinha, C., Duarte, S., Pascoal, C. and Cássio, F. (2011). Effects of Cadmium and Phenanthrene Mixtures on Aquatic Fungi and Microbially Mediated Leaf Litter Decomposition. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 61, 211-219.

[18] Morris, G. and Fan, J. (2010). *Reservoir Sedimentation Handbook*, McGraw-Hill, 805p.

[19] Nagle, G.N. and Ritchie, J.C. (2004). Wheat field erosion rates and channel bottom sediment sources in an intensively cropped northeastern Oregon drainage basin. *Land Degradation & Development*, 15, 15-26.

[20] Papanicolaou, A.N., Fox, J.F. and Marshall, J. (2003). Soil Fingerprinting in the Palouse Basin, USA, Using Stable Carbon and Nitrogen Isotopes. *International Journal of Sediment Research*, 18, 278-284.

[21] Quinton, J.N., Govers, G., Van Oost, K. and Bardgett, R.D. (2010). The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geosciences*, 3, 311-314.

[22] Razafindrabe, B.H., He, B., Inoue, S., Ezaki, T. and Shaw, R. (2010). The role of forest stands density in controlling soil erosion: implications to sediment-related disasters in Japan. *Environment Monitoring Assessment*, 160, 337-354.

[23] Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346, 1-16.

[24] Sah, V.K. and Saxena, A.K. (1990). Variation in structure, biomass and species diversity of grazing lands in Garwhal Himalaya. *Range Management and Agroforestry*, 11, 115-121.

[25] United States Environmental Protection Agency (USEPA), O.o.W. (2007). *National water quality inventory*. EPA 841-R-07-001, Washington, D.C.

[26] Wasson, R.J., Caitcheon, G., Murray, A.S., McCulloch, M. and Quade, J. (2002). Sourcing sediment using multiple tracers in the catchment of Lake Argyle, Northwestern Australia. *Environmental Management*, 29, 634-646.

[27] Yang, H.S. and Janssen, B.H. (1997). Analysis of impact of farming practices on dynamics of soil organic matter in northern China. *Developments in Crop Science*, 25, 267-275.