

## تعیین سهم ویژه منابع رسوب معلق در آبخیز واز با استفاده از ویژگی های ژئوشیمیایی

نبیه کریمی<sup>۱</sup>، لیلا غلامی<sup>۲\*</sup>، عطاءاله کاویان<sup>۳</sup>، عبدالواحد خالدی درویشان<sup>۴</sup>

۱. دانش آموخته دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۳. استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۴. دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۴/۲۰؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۵/۲۸ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۹/۲۸)

### چکیده

اطلاعات دقیق در مورد منابع رسوب معلق در سامانه های رودخانه ای ضروری است، زیرا افزایش عرضه رسوبات ریزدانه به یک سامانه رودخانه ای از طریق فعالیت های انسانی منجر به بارگذاری بیش از حد رسوب معلق در رودخانه ها می شود که بر کیفیت آب و سلامت بوم سازگان تأثیر منفی می گذارد. همچنین، کمی سازی سهم نسبی منابع مختلف رسوبات معلق به منظور تعیین بهترین شیوه های مدیریت کنترل رسوب معلق اهمیت زیادی دارد. بنابراین، نیاز فزاینده ای به اطلاعات قابل اعتماد در مورد منشأ رسوبات ریزدانه حمل شده توسط رودخانه ها وجود دارد. هدف از این مطالعه، منشأیابی رسوبات معلق با استفاده از ویژگی های ژئوشیمیایی با استفاده از بسته Fingerpro نرم افزار R در کاربری/ پوشش های مختلف اراضی حوضه آبخیز واز در استان مازندران است. در پژوهش حاضر ۳۰ نمونه خاک از کاربری های مختلف اراضی شامل جنگل، مرتع، اراضی کشاورزی و همچنین، اراضی کناره های آبراهه به عنوان منابع تولید رسوب و یک نمونه رسوب معلق در خروجی حوضه برداشت شده و ویژگی های ژئوشیمیایی نمونه های خاک و رسوب شامل ۵۹ عنصر با استفاده از دستگاه ICP-OES GBC Integra اندازه گیری شد. سپس، ردیاب های پایا و مناسب از بین ۵۹ عنصر، برای منشأیابی رسوبات معلق با استفاده از آزمون های آماری دامنه، کرومیکال والیس و تحلیل تابع تفکیک، در بسته Fingerpro نرم افزار R شامل P, V, Cr, Fe, Cu, Ga, Ge, Rb, Sb, Ba, Nd, Ta و W انتخاب شد. همچنین، نتایج تفکیک سهم کاربری ها/ پوشش های اراضی در تولید رسوب معلق با شاخص نکویی برازش ۸۰/۶۸ نشان داد سهم اراضی کشاورزی، مرتع، جنگل و کناره های آبراهه به ترتیب ۰/۱۸، ۷/۹۰، ۵/۶۹ و ۸۶/۲۱ درصد است. در نهایت، سهم ویژه هر منبع در تولید رسوب معلق به ازای هر هکتار نیز محاسبه شد و نتایج نشان داد کناره های آبراهه و جنگل با سهم ویژه ۰/۵۱۳ و ۰/۰۰۷ درصد به ازای هر هکتار به ترتیب بیشترین و کمترین مشارکت را در تولید رسوب معلق در هر هکتار دارند. نتایج همچنین نشان داد سهم ویژه اراضی کنار آبراهه به ترتیب ۳۲۰/۶۲، ۳۹۴/۶۱ و ۷۳۲/۸۵ برابر سهم ویژه کاربری های کشاورزی، مرتع و جنگل است. نتایج منشأیابی با روش ژئوشیمیایی در این بررسی، اطلاعات ارزشمندی درباره سهم منابع تولید رسوب معلق به منظور اجرای برنامه های مدیریتی برای حفاظت خاک و آب در اختیار مدیران و برنامه ریزان قرار می دهد.

**کلمات کلیدی:** انتقال رسوب، ردیاب بهینه، فرسایش خاک، منشأیابی رسوب، FingerPro

## مقدمه

امروزه، جهان با چالش‌های زیست‌محیطی رو به افزایشی، مانند فرسایش خاک، به‌ویژه در مناطق شهری که بیشتر جمعیت جهان در آن ساکن هستند، مواجه است. فرسایش خاک یکی از تهدیدهای جدی و منبع اصلی رسوبات معلق در آب‌های سطحی است. مواد آلی و غیرآلی فرسایش‌یافته از سطح خاک منجر به انتقال آلاینده‌ها به زیستگاه‌های آبی می‌شود و ساختار اکولوژیکی و مورفولوژی رودخانه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱ و ۲]. تغییرات در کمیت و کیفیت رسوب ناشی از فعالیت‌های انسانی اثرات منفی بر ظرفیت زهکشی رودخانه‌ها و زیرساخت‌های هیدرولیکی دارد و خطر سیل را افزایش می‌دهد [۱، ۳ و ۴]. افزایش بار رسوبی معلق در سامانه‌های رودخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، تهدیدی جدی برای مدیریت پایدار حوضه‌های آبخیز در سراسر جهان است. انتقال آلاینده‌ها توسط رسوب معلق به عنوان فراگیرترین مشکل کیفیت آب در سطح جهانی شناخته شده است [۵-۷]، چراکه رسوبات معلق منبع اصلی آلودگی غیرنقطه‌ای هستند و منجر به انتقال مواد مغذی از جمله نیتروژن و فسفر [۸] و آلاینده‌ها مانند فلزات سنگین می‌شوند [۹ و ۱۰]. از سویی دیگر، بار و پویایی رسوبات معلق با ترکیبی از ویژگی‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، توپوگرافی، آب و هوا و پوشش زمین حوضه‌های آبخیز و همچنین، فعالیت‌های انسانی مانند شهرنشینی و کشاورزی تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۱، ۷ و ۱۲]. ماهیت مکانی و زمانی پیچیده این متغیرها حرکت و مسیر رسوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و درک و پیش‌بینی غلظت و بار رسوب را دشوار می‌سازد. بنابراین، درک دینامیک رسوب معلق به منظور ارائه راه‌کارهای مدیریتی مورد نیاز برای کاهش اثرات زیان‌بار بر وضعیت اکولوژیکی رودخانه‌ها ضروری است [۱۳ و ۱۴]. به همین دلیل، اجرای بهترین شیوه‌های مدیریتی مانند روش‌های حفاظت آب و خاک و مهندسی رودخانه منجر به کاهش این اثرات زیان‌بار خواهد شد.

از سویی دیگر، اطلاعات کمی در مورد منابع رسوب معلق تحویل داده‌شده به رودخانه‌ها می‌تواند به اجرای راه‌کارهای مدیریتی هدفمند منابع رسوب معلق در یک حوضه آبخیز کمک کند [۱۵]. اطلاعات در مورد منابع رسوب را می‌توان به طور غیرمستقیم با استفاده از

روش‌های معمول اندازه‌گیری فرسایش و یا به طور مستقیم با استفاده از روش منشأیابی منابع رسوب به دست آورد [۱۶]. تکنیک‌های منشأیابی رسوب به طور گسترده‌ای برای ارائه اطلاعات در مورد منابع رسوب معلق در یک حوضه آبخیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۵]. این روش براساس دو فرض اصلی استوار منابع بالقوه رسوب معلق براساس ویژگی‌های منشأیابی انتخابی (به عنوان مثال، خواص فیزیکی یا ژئوشیمیایی) قابل تشخیص و سهم منابع مختلف در رسوب معلق را با مقایسه ویژگی‌های منشأیابی در رسوب معلق و نمونه‌های منبع هستند [۱۶].

با مقایسه ویژگی‌های ردیاب در رسوب معلق و منابع بالقوه رسوب با استفاده از آزمون‌های آماری، امکان به دست آوردن اطلاعات کمی در مورد سهم نسبی از منابع مختلف به رسوب معلق وجود دارد. انواع مختلف ویژگی‌های منشأیابی، مانند رادیونوکلوئیدها [۱۷ و ۱۸]، ترکیب عناصر اصلی و کمیاب [۱۹]، خواص مغناطیسی مواد معدنی [۲۰]، رنگ [۲۱] و ایزوتوپ‌های پایدار [۲۲] در گذشته به طور موفقیت‌آمیزی برای شناسایی منابع رسوب معلق مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این در حالی است که در مطالعات منشأیابی رسوب، زمین‌شناسی معمولاً به عنوان یک متغیر اصلی و در ترکیب با سایر عوامل مانند کاربری اراضی و دخالت‌های انسانی به منظور شناسایی منابع رسوب مورد استفاده قرار گیرد [۱۵]. انواع مختلف سنگ‌ها، از طریق فرایندهای هوازدگی و تشکیل خاک، تأثیر عمیقی بر ویژگی‌های ژئوشیمیایی خاک و رسوبات فرسایش‌یافته دارند [۲۳]. در نتیجه، ردیاب‌های ژئوشیمیایی می‌توانند به عنوان ابزاری مفید برای ردیابی منابع رسوب در حوضه آبخیز مورد استفاده قرار گیرند [۲۴ و ۲۵]. با این حال، در سال‌های اخیر منشأیابی با روش ژئوشیمیایی، به دلیل توانایی آن‌ها در تفکیک عالی بین منابع مختلف و تعیین منابع رسوب با عدم قطعیت کمتر، رایج‌ترین روش منشأیابی رسوب هستند [۳، ۲۶-۲۹].

در سال‌های اخیر، روش‌های آماری جدیدی به منظور منشأیابی رسوبات به روش ژئوشیمیایی ارائه شده است. یکی از این روش‌های جدید بسته FingerPro در نرم‌افزار R است. این بسته شامل یک آزمون بقای جرم اولیه است

رس سنگ، سیلت سنگ، ماسه‌سنگ، آهک‌های شیلی، کنگلومرا، رسوب‌های آبرفتی است که به تریاس، ژوراسیک، کرتاسه، میوسن، پلیوسن و کواترنر مربوط است [۳۳]. موقعیت حوضه آبخیز وازرود در ایران، استان و شهرستان در شکل ۱ نشان داده شده است.

#### نمونه‌برداری خاک و رسوب معلق

نقاط نمونه‌برداری خاک و رسوب معلق با توجه به مواردی شامل مرز کاربری‌های طبیعی، موقعیت مناطق مسکونی و راه‌های ارتباطی، موقعیت اراضی کشاورزی، محل اتصال شاخه‌های فرعی مهم به رودخانه، تغییرات مشخص در شرایط فرسایشی کناره‌های رودخانه تعیین شد (شکل ۲). کاربری‌های اصلی حوضه آبخیز مورد بررسی شامل جنگل، مرتع، کشاورزی و مناطق مسکونی است. غیر از این کاربری‌ها، از کنار آبراهه نیز در مقاطع خاصی نمونه‌برداری شد، چراکه می‌تواند به عنوان منبع رسوب معلق برای مقاطع پایین‌دست خود مطرح شوند [۳۴].

با توجه به نقشه نقاط نمونه‌برداری و بازدید میدانی، تعداد ۳۰ نمونه خاک از کاربری‌های جنگل، مرتع، کشاورزی و کناره‌های آبراهه از یک کرت یک مترمربعی با پنج تکرار و پس از ترکیب آن‌ها، مقدار ۵۰۰ گرم از عمق ۰-۵ سانتی‌متری سطح خاک پس از حذف لاشبرگ سطحی [۲۸ و ۳۵] در مهرماه ۱۴۰۰ برداشت شد. نمونه‌برداری از رسوب معلق نیز در خروجی آبخیز صورت گرفت. از آنجا که برای اندازه‌گیری غلظت عناصر با دستگاه ICP-MS<sup>۴</sup> مقدار بیشتری از رسوبات معلق مورد نیاز است، یک ابزار رسوب‌گیر ساده شامل یک حلقه فلزی به قطر ۴۰ سانتی‌متر و پارچه کتان ریزبافت (اندازه مش حدود ۲۰ میکرون)، برای فیلتر کردن حجم بیشتری از آب و جمع‌آوری مقدار مورد نیاز رسوبات معلق اقدام شد [۲۸] (شکل ۳). بعد از نمونه‌برداری رسوب معلق برای جلوگیری از تماس و ورود هوا، نمونه رسوب معلق داخل ظروف پلاستیکی بسته‌بندی شد و به آزمایشگاه انتقال داده شدند

که معمولاً به عنوان آزمون دامنه<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و پس از آن از آزمون‌های کروסקال والیس<sup>۲</sup> و آنالیز تابع تفکیک<sup>۳</sup> است. این روش توانایی ردیاب‌های فردی به منظور تفکیک بین منابع را مورد آزمون قرار می‌دهد و بهترین ترکیب ردیاب‌ها را شناسایی می‌کند که حداکثر اختلاف را بین منابع مختلف فراهم می‌کند [۱۹]. پژوهش‌های اندکی به منظور تعیین سهم منابع رسوب با استفاده از بسته FingerPro انجام شده است [۳۰ و ۳۱]. همچنین، مطالعه‌ای که به تحلیل سهم نسبی و سهم ویژه کاربری‌های اراضی در تولید رسوب معلق با لحاظ مساحت هر یک از کاربری‌ها پرداخته باشد، تا کنون گزارش نشده است. بنابراین، با توجه به اهمیت شناسایی و تعیین سهم منابع تولید رسوب برای ارائه راه‌کارهای حفاظت آب و خاک، پژوهش حاضر با هدف شناسایی منابع رسوب معلق و تعیین سهم نسبی و سهم ویژه هر یک از آن‌ها در حوضه آبخیز واز انجام شد.

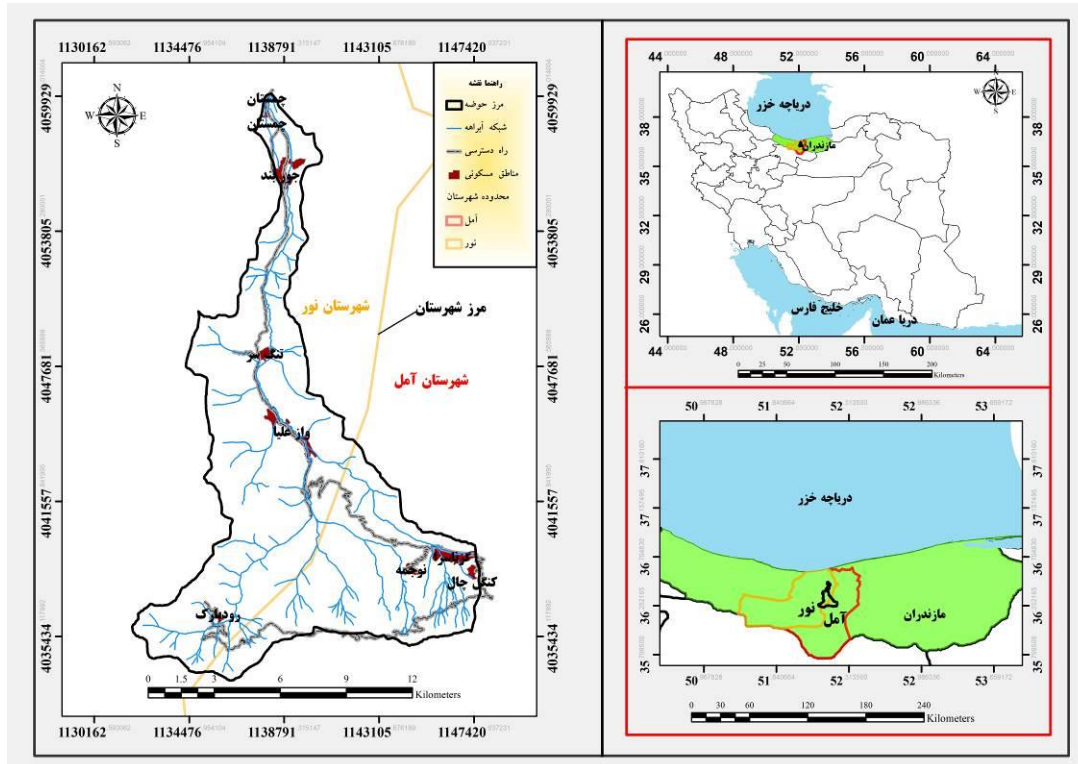
#### مواد و روش

##### منطقه مطالعه شده

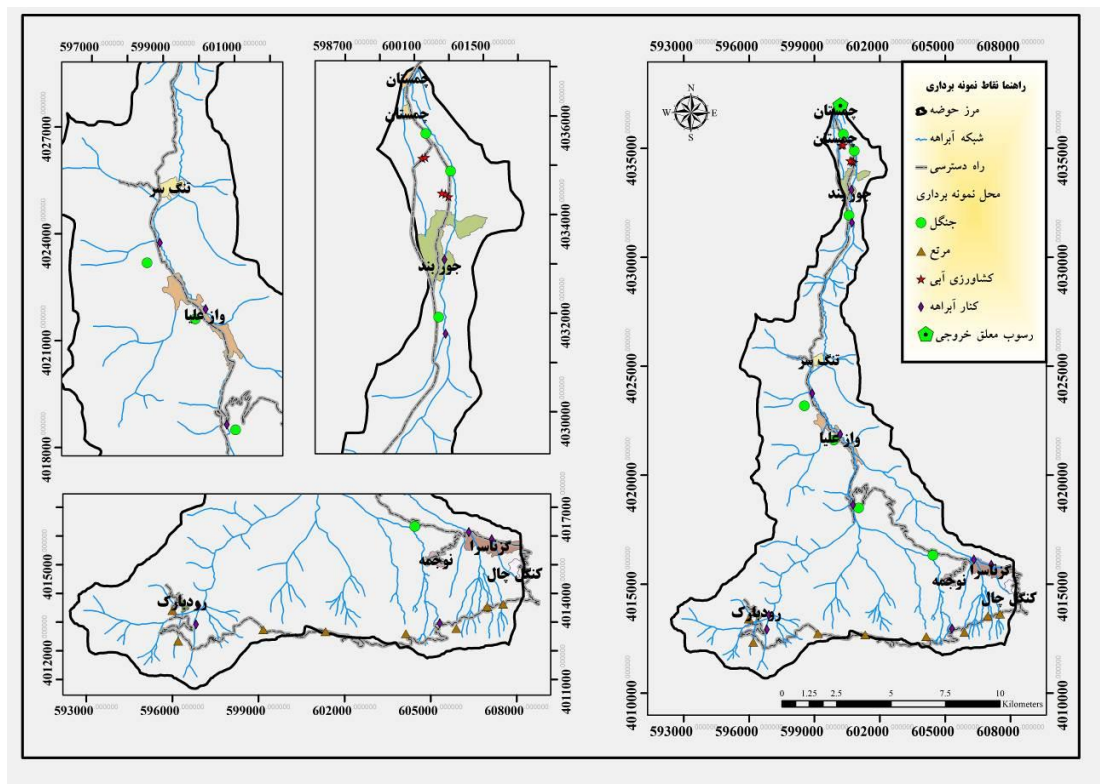
این حوضه در دامنه<sup>۱</sup> ۵۱° ۵۵' ۱۵" تا ۵۲° ۱۲' ۱۵" طول شرقی و ۳۰° ۳۶' ۱۲" الی ۳۰° ۳۶' ۱۳" عرض شمالی قرار گرفته و با کاهش تدریجی ارتفاع به سمت شمال به منطقه جلگه‌ای دریای خزر متصل می‌شود. مساحت این حوضه آبخیز ۱۴۷۹۱ هکتار است. این حوضه دارای کاربری جنگل، مرتع، کشاورزی، مسکونی و کنار آبراهه بوده که مساحت هر یک از آن‌ها به ترتیب ۶۷/۲۷، ۲۸/۳۴، ۰/۷۲، ۲/۴۲ و ۱/۱۳ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود. حوضه آبخیز واز از لحاظ موقعیت مکانی، در قسمت میانی بخش استحقاظی استان مازندران جای می‌گیرد با دو خط‌الرأس اصلی در طرفین شرق و غرب که در امتداد جنوب به شمال کشیده شده و خط‌الرأس هلالی‌شکل آن در ارتفاعات جنوبی بیشتر به شکل مخروطی شباهت دارد و از نظر ژئومورفولوژی دارای شکل بادبزی است. حداکثر ارتفاع حوضه به ترتیب ۲۷۰ و ۳۳۵۰ متر بالاتر از سطح دریا است [۳۲]. مهم‌ترین سنگ‌های تشکیل‌دهنده آن دولومیت، سنگ آهک، شیل،

1. Range Test  
2. Kruskal-Wallis Test  
3. DFA Test

4. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز واز در ایران، استان مازندران و شهرستان نور



شکل ۲. موقعیت نقاط نمونه برداری خاک و رسوب معلق در حوضه آبخیز واز



شکل ۳. شیوه نمونه‌برداری از رسوب معلق رودخانه واز

شده و از الک ۶۳ میکرون عبور داده شدند و نمونه نهایی درون ظروف فالکون ریخته شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ژئوشیمیایی ابتدا نمونه‌ها هضم اسیدی می‌شوند، به طوری که سه گرم نمونه خشک کوچک‌تر از ۶۳ میکرون توسط محلول Regia Aqua (ترکیب سه به یک اسیدکلریدریک غلیظ و اسید نیتریک) به مدت دو ساعت روی حمام آبی قرار داده شد. پس از سرد شدن، نمونه‌ها از کاغذ صافی با قطر منافذ ۰/۲ میکرون عبور داده شد و در نهایت، با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر نشر نوری<sup>۱</sup>، نمونه استاندارد مرکب<sup>۲</sup> و رسم منحنی واسنجی، عناصر اندازه‌گیری و به واحد میکروگرم بر گرم نمونه‌های خاک گزارش شد. در نهایت، ویژگی‌های ژئوشیمیایی ۵۹ عنصری (V, Ti, Sc, P, Al, B, Be, Li, Mg, Ca, K, Na), Sr, Rb, Se, As, Ge, Ga, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Pr, Ce, La, Ba, Cs, Te, Sb, Sn, In, Cd, Mo, Nb, Zr, Y, Ta, Hf, Lu, Yb, Tm, Er, Ho, Dy, Tb, Gd, Eu, Sm, Nd, W, Hg, Tl, Pb, Bi, U, Th) بر حسب میکروگرم بر گرم نمونه خاک اندازه‌گیری شد.

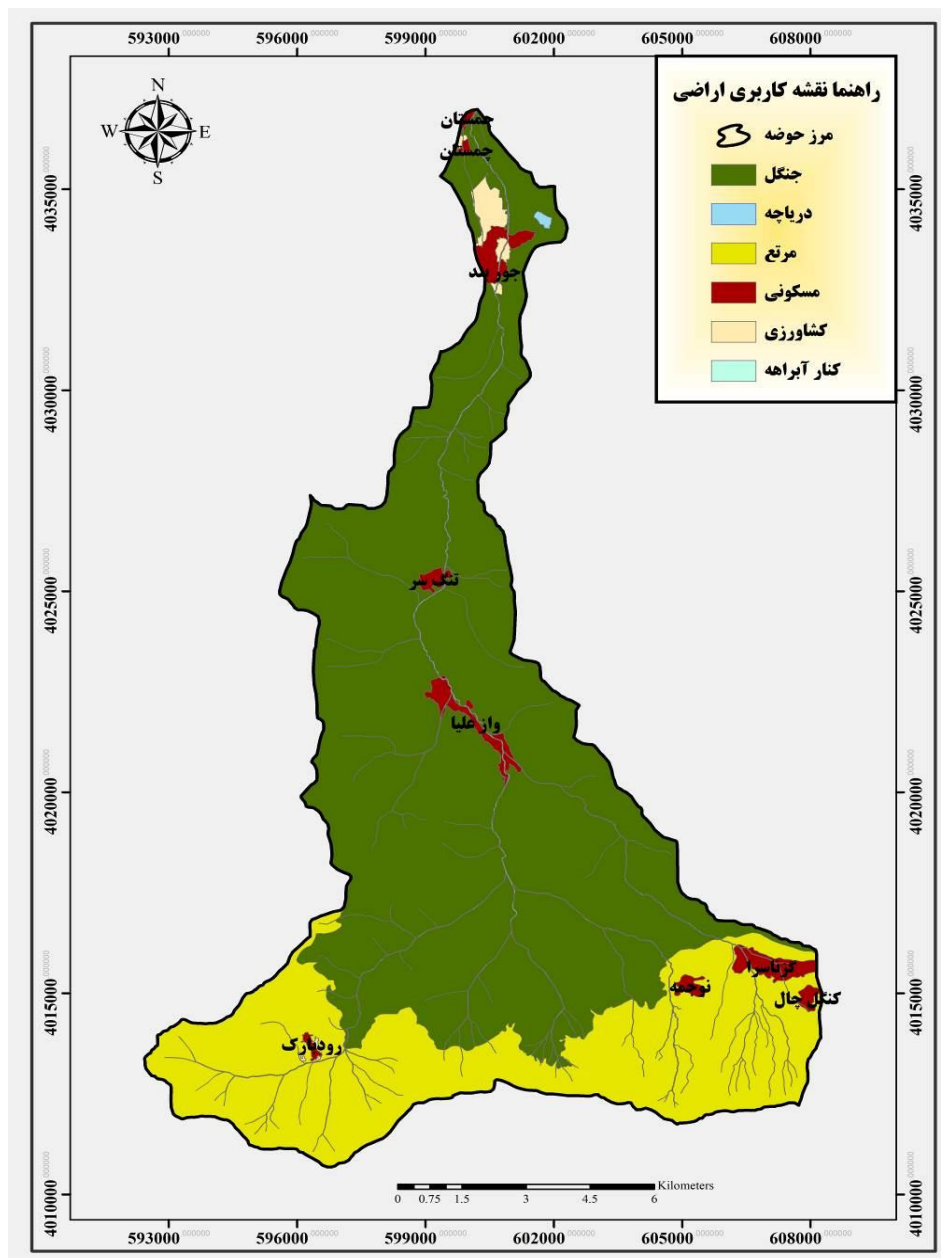
تهیه نقشه کاربری اراضی و محدوده کناره‌های آبراهه همان‌طور که گفته شد، به منظور شناخت منشأهای احتمالی برای رسوبات، در بخشی از کناره‌های رودخانه واز که دارای رخساره‌های مشخص فرسایش کناره‌ای بودند نیز نمونه‌برداری خاک انجام شد. به این منظور، نقشه محدوده کنار آبراهه‌ها تهیه شد. سپس، نقشه کاربری اراضی با نقشه محدوده کنار آبراهه‌ها تلفیق شد و در نهایت، نقشه نهایی کاربری اراضی / پوشش اراضی به منظور تعیین مساحت هر کاربری به دست آمد (شکل ۴). در منطقه مورد مطالعه پنج کاربری / پوشش اراضی جنگل، مرتع، کشاورزی، کناره‌های آبراهه و مسکونی به ترتیب با مساحت‌های ۹۹۵۰، ۴۱۹۲، ۱۰۷، ۱۶۸ و ۳۵۹ هکتار وجود دارد.

#### اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک و رسوب معلق پس از نمونه‌برداری به آزمایشگاه انتقال داده شدند. ابتدا سنگ‌ریزه و ریشه گیاهان از نمونه‌های خاک جدا شده و از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند و سپس، مقدار مناسبی از خاک در ظروف ریخته شد. نمونه‌های رسوب معلق نیز پس از ته‌نشین شدن؛ آب اضافی آن‌ها خارج شد و در داخل بشر پلاستیکی ریخته شد. سپس، نمونه‌های خاک به مدت ۲۴ ساعت و نمونه‌های رسوب معلق به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند [۲۸ و ۳۶]. پس از آن، نمونه‌ها در هاون کوبیده

1. ICP-OES (GBC Integra)  
2. Merck





شکل ۴. نقشه کاربری / پوشش اراضی حوضه آبخیز واز

هدف آن برای حذف ردیاب‌هایی بود که تفاوت معناداری در منابع رسوبی انتخاب‌شده ندارند. در گام سوم انتخاب ردیاب از آزمون تحلیل تابع تفکیک استفاده شد. تحلیل تابع تفکیک با انتخاب حداقل ردیاب بیشترین تفکیک را بین منابع رسوبی ایجاد می‌کند [۲۹]. نمودارهای جعبه‌ای<sup>۱</sup>، نمودارهای تحلیل تابع تفکیک<sup>۲</sup> و نمودارهای همبستگی<sup>۳</sup> در بسته FingerPro نیز برای کمک به

انتخاب ردیاب‌های بهینه و منشأیابی رسوب با استفاده از بسته FingerPro

به منظور انتخاب ردیاب و تعیین سهم نسبی کاربری‌های مختلف در تولید رسوب معلق از بسته نرم‌افزار FingerPro استفاده شد. در مرحله اول بسته FingerPro از آزمون R دامنه استفاده شد. این آزمون نشان می‌دهد ویژگی‌های ژئوشیمیایی ردیاب باید پایا بوده و دارای ثبات نسبی باشد و از منبع تا نقطه نمونه‌برداری تغییر نکند. در مرحله دوم انتخاب ردیاب از آزمون کروسکال والیس استفاده شد که

1. Box Plot
2. LDA Plot
3. PCA Plot

شکل ۵ نتایج نمودار جعبه‌ای برای ۱۵ ردیاب برای پژوهش حاضر در هر کاربری را نشان می‌دهد. نتایج شکل ۵ بیانگر این است که برای هر عنصر ردیاب یک نمودار جعبه‌ای وجود دارد که در آن غلظت هر ردیاب در تمام کاربری‌ها و علاوه بر آن، بیشترین و کمترین غلظت ردیاب در هر کاربری نشان داده شده است. در بین ردیاب‌های بهینه، عنصر K بیشترین غلظت را در کاربری مرتع و کمترین را در کاربری جنگل، عنصر Li بیشترین غلظت را در کاربری کشاورزی و کمترین غلظت را در کناره‌های آبراهه، عنصر Fe بیشترین غلظت را در کاربری مرتع و کمترین غلظت را در کاربری جنگل، دو عنصر P و Sb بیشترین غلظت را در کاربری جنگل و کمترین غلظت را در کاربری کشاورزی، عناصر V, Cr, Ge, Ga, Cu, Rb, Ba, Nd, Ta و W بیشترین غلظت را در کاربری کشاورزی و کمترین غلظت را در کاربری مرتع داشتند. با توجه به اینکه بخش زیادی از اراضی کشاورزی آبی در خروجی حوضه در مجاورت رودخانه واز و مناطق مسکونی قرار گرفته است. بنابراین، استفاده از آفت‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی مجاور رودخانه و همچنین، ورود فاضلاب شهری منجر به افزایش غلظت این عناصر در کاربری کشاورزی نسبت به سایر عناصر شده است. این نتایج توسط مطالعات Lizaga و همکاران [۲۹]— [۳۱] که نمودار جعبه‌ای غلظت‌های مختلف هر ردیاب را برای قبل و بعد از یک دوره بارندگی شدید به دست آورده بودند، تأیید شد.

شکل ۶ نمودار پوشش واریانس محورهای اول و دوم تحلیل مؤلفه اصلی برای ردیاب‌های بهینه در منابع مختلف تولید رسوب معلق را قبل و بعد از انتخاب ردیاب‌های بهینه نشان می‌دهد. این نمودار یک بار قبل از آزمون تابع تفکیک و شامل تمام ردیاب‌ها و یک بار پس از آزمون تابع تفکیک و انتخاب ردیاب‌های بهینه نمایش داده شده است. نتایج نمودار تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد پس از انجام آزمون تابع تفکیک، ردیاب‌های بهینه قادر به تفکیک چهار منبع اصلی تولید رسوب معلق هستند و در مجموع، دو محور اول و دوم بیش از ۸۰ درصد واریانس داده‌ها پوشش داده شده است. Lizaga و همکاران [۲۹] و Vale و همکاران [۳۸] نیز نشان دادند همبستگی معناداری بین عناصر ردیاب در این نمودار وجود دارد.

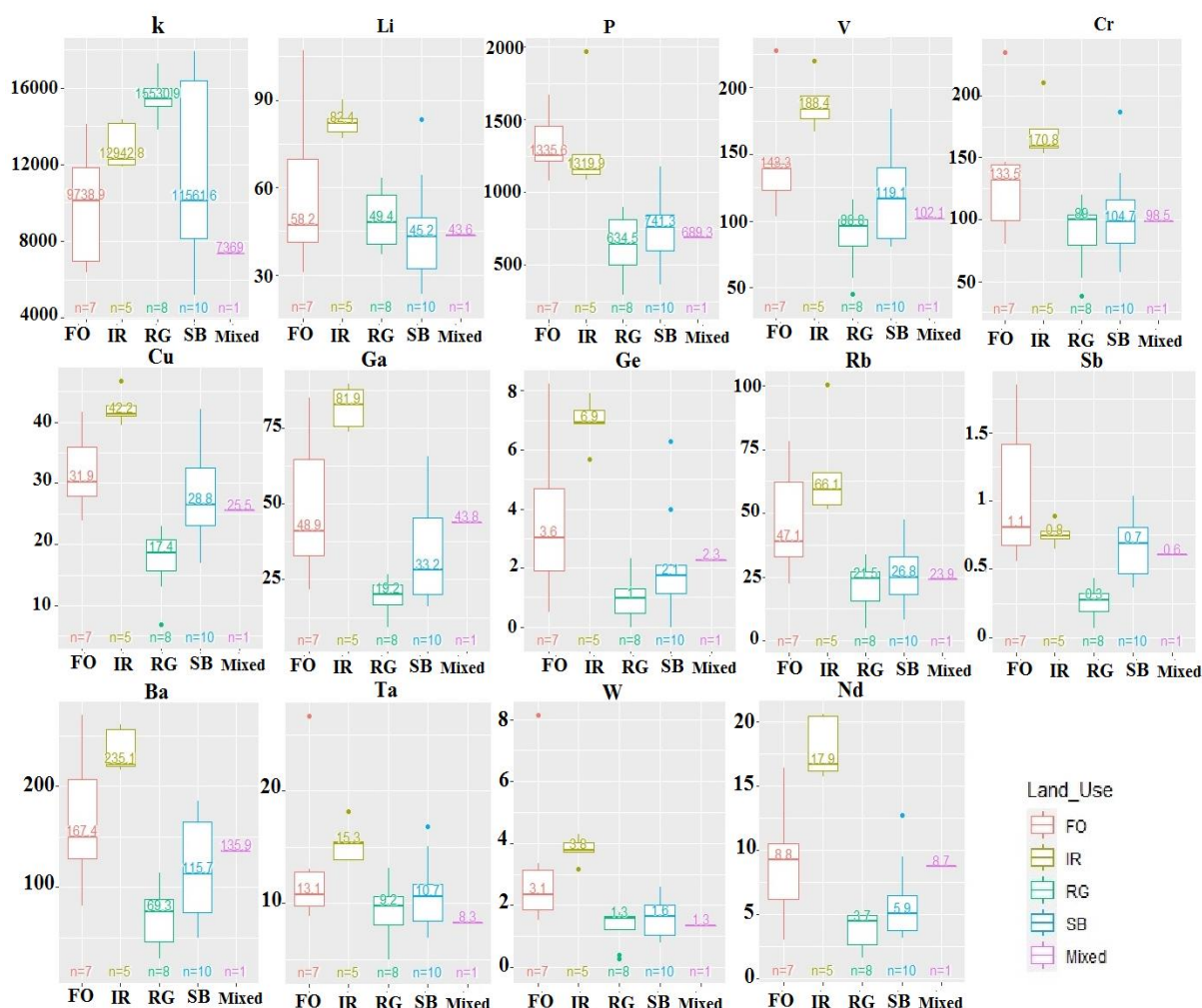
تصمیم‌گیری بهتر در انتخاب مجموعه ردیاب‌های مناسب استفاده شده است. در نهایت، سهم ویژه که عبارت است از: سهم نسبی هر منبع در تولید رسوب به ازای هر هکتار برای هر کاربری نیز به دست آمد.

### نتایج و بحث

با استفاده از بسته FingerPro نرم‌افزار R در حوضه آبخیز واز تجزیه و تحلیل و مقایسه ویژگی‌های ردیاب‌های مختلف انجام شد نمودارهای جعبه‌ای، همبستگی و تابع تفکیک و ردیاب‌های بهینه انتخاب شدند [۲۹ و ۳۷]. نتایج نشان داد پس از اجرای آزمون دامنه هیچ‌یک از عناصر ردیاب حذف نشدند و ۵۹ عنصر ردیاب باقی ماندند. در مرحله دوم آزمون کروسکال والیس ردیاب‌هایی را از مجموعه داده اصلی که تفاوت قابل توجهی بین منابع نشان ندادند، حذف کرد. نتایج نشان داد پس از اجرای آزمون کروسکال والیس هفت عنصر Mg, Na, Al, Mn, Sn, Te و Hg از مجموعه عناصر ردیاب حذف شدند. در مرحله سوم نتایج آزمون تابع تفکیک نشان داد پس از اجرای آزمون تابع تفکیک که ۳۷ عنصر شامل عناصر Ca, Be, B, Sc, Ti, Co, Ni, Zn, As, Se, Sr, Y, Zr, Mo, Nb, Cd, In, Cs, La, Ce, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Ho, Tm, Yb, Lu, Hf و Tl از U و Th ۵۲ عنصر ردیاب باقی‌مانده حذف شدند. نتایج این آزمون نیز نشان داد در نهایت ۱۵ عنصر K, Li, P, V, Cr, Fe, Cu, Ga, Ge, Rb, Sb, Ba, Nd, Ta و W به عنوان ردیاب بهینه انتخاب شدند. با توجه به آزمون‌های اجراشده و تعداد ردیاب‌های باقی‌مانده می‌توان گفت که بین عناصر ردیاب کاربری‌های مختلف اختلاف معناداری وجود دارد و این عناصر می‌توانند به عنوان ردیاب‌های بهینه به منظور تعیین سهم مشارکت هر یک از کاربری‌های اراضی در حوضه آبخیز واز مورد استفاده قرار گیرند. در پژوهش Lizaga و همکاران [۲۹] نیز سه عنصر ردیاب در مرحله آزمون دامنه و ۱۳ عنصر در مرحله آزمون کروسکال والیس حذف شدند و در نهایت، سه عنصر Pb, Bi و Si به عنوان ردیاب بهینه انتخاب شدند. همچنین، Lizaga و همکاران [۳۰ و ۳۱] نقش کاربری‌های مختلف اراضی در معنادار شدن ردیاب‌های بهینه را تأیید کردند.

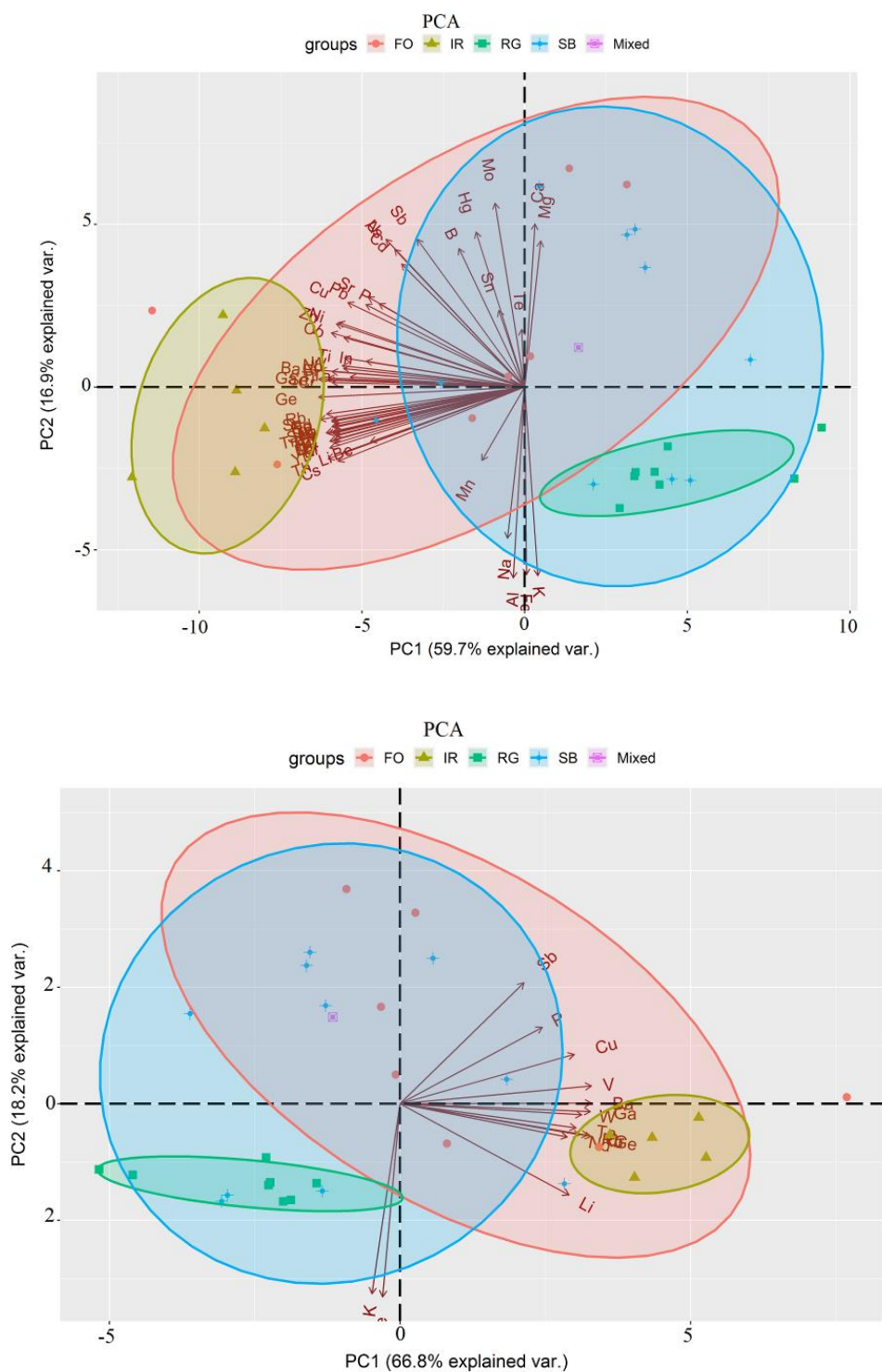
ندارد. در حالی که نتایج پژوهش Vale و همکاران [۳۸] با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی، رادیوکلوئیدها و ایزوتوپ‌های پایدار نشان داد ردیاب‌های ژئوشیمیایی تفکیک خوبی بین منابع کنار آبراهه، خاک سطحی و خاک شخم‌خورده نشان می‌دهد، در حالی که ردیاب‌های رادیوکلوئیدها و ایزوتوپ‌های پایدار نشان دادند بین منابع رسوب همپوشانی وجود داشت و تفکیک خوبی بین منابع وجود نداشت. همچنین، نتایج آن‌ها با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی و رادیوکلوئیدها و ایزوتوپ‌های پایدار نیز نشان داد بین منابع رسوب جنگل‌های کاج، جنگل‌های طبیعی، چراگاه‌ها و خاک‌های سطحی و شخم‌خورده همپوشانی وجود دارد.

نمودار تحلیل تابع تفکیک نیز تجزیه و تحلیل تفکیک خطی را به صورت سه‌بعدی نمایش داد (شکل ۷). نتایج پژوهش حاضر همانند نتایج پژوهش Lizaga و همکاران [۳۱] نشان داد قبل از انجام آزمون تابع تفکیک و با وجود تمام ردیاب‌ها همپوشانی بسیار جزئی بین رسوبات کنار آبراهه و مرتع وجود دارد. پس از انجام آزمون تابع تفکیک و انتخاب ردیاب‌های بهینه هیچ همپوشانی‌ای بین منابع وجود نداشته و نتایج به دست آمده تفکیک بسیار خوبی بین منابع را نشان داد. Lizaga و همکاران [۲۹ و ۳۰] نیز تأیید کردند که قبل از انجام آزمون‌ها نمودار تحلیل تابع تفکیک بین منابع همپوشانی وجود داشته، اما پس از انجام آزمون‌ها هیچ همپوشانی بین منابع مختلف رسوب وجود

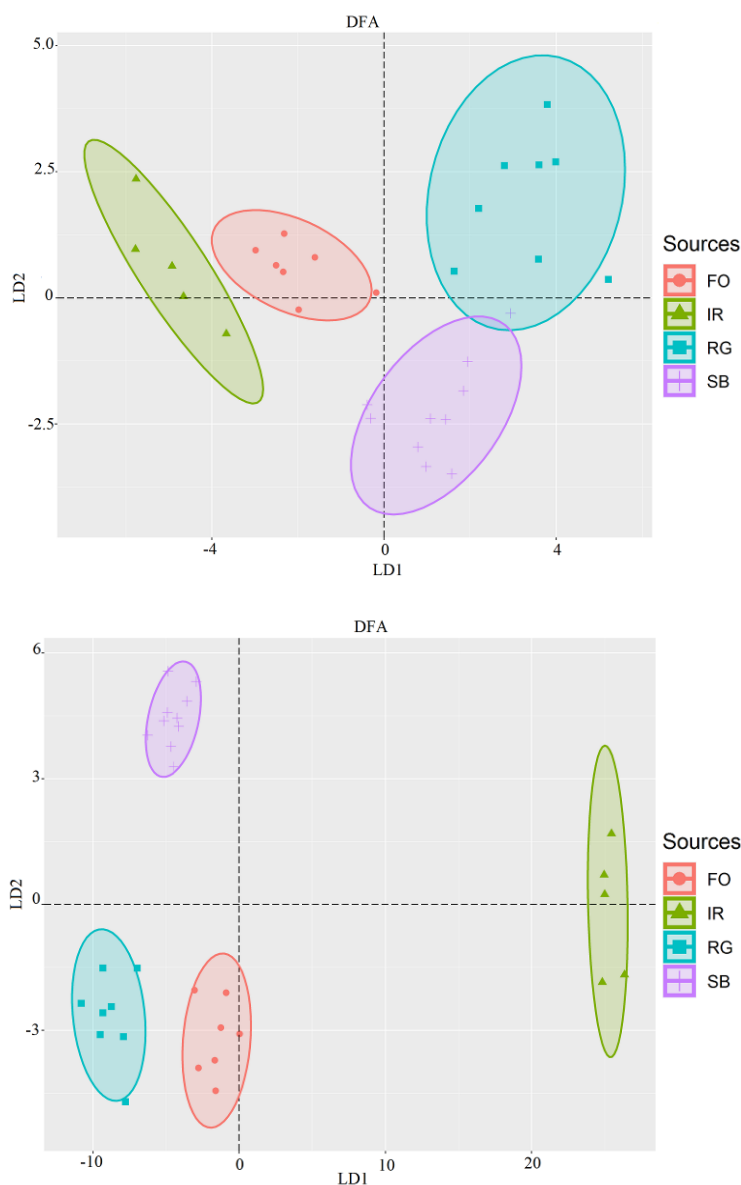


شکل ۵. نمودار جعبه‌ای تغییرات غلظت عناصر ردیاب بهینه (ppm) در منابع رسوب (کاربری‌های اراضی) مختلف (جنگل FO، مرتع RG، کشاورزی آبی IR، اراضی کنار آبراهه SB)





شکل ۶. نمودار پوشش واریانس محورهای اول و دوم در تحلیل مؤلفه اصلی قبل (بالا) و بعد از انتخاب ردیاب‌های بهینه (پایین) در کاربری/پوشش‌های اراضی جنگل (FO)، مرتع (RG)، کشاورزی (IR) و کناره‌های آبراهه (SB)



شکل ۷. نمودار تحلیل تابع تفکیک قبل (بالا) و بعد از انتخاب ردیاب‌های بهینه (پایین) در کاربری/پوشش‌های اراضی جنگل (FO)، مرتع (RG)، کشاورزی (IR) و کناره‌های آبراهه (SB)

سهم نسبی و سهم ویژه منابع رسوبی در تولید رسوب معلق تعیین شد. نتایج نشان داد میانگین و انحراف معیار شاخص نکوئی برازش به ترتیب ۸۰/۶۸ درصد و ۰/۰۲۸ بود. بنابراین، می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از بسته FingerPro قابل اطمینان است، چراکه سایر پژوهش‌های انجام شده توسط Lizaga و همکاران [۲۹]، Chen و همکاران [۳۹] و Gaspar و همکاران [۴۰] نشان داد همه مدل‌های با شاخص نکوئی برازش بالا نتایج قابل قبولی دارند.

نتایج همچنین نشان داد اراضی کنار آبراهه ۸۶/۲۱ درصد در تولید رسوبات معلق مشارکت دارند. همچنین،

سهم قابل توجهی از کل رسوبدهی سالانه یک حوضه آبخیز در چند واقعه سیلابی محدود تولید و از حوضه آبخیز خارج می‌شود. با این حال، بخش کمی از این حجم زیاد رسوبات در لابه‌لای رسوبات بستر در مقاطع مختلف رودخانه باقی می‌مانند و می‌توانند برای منشأیابی رسوبات بعد از رخداد سیل نیز استفاده شوند. بنابراین، از نظر منشأیابی رسوبات بستر مشکلی ایجاد نمی‌شود، اما وابستگی نتایج منشأیابی رسوبات معلق به زمان نمونه‌برداری به‌ویژه نسبت به وقوع آخرین واقعه سیلابی بیشتر است. بنابراین، پس از تعیین مجموعه ردیاب‌های مناسب با استفاده از بسته FingerPro

Astorga و همکاران [۴۷] نیز با استفاده از روش EDXRF غلظت ردیاب‌ها و سهم منابع رسوبی را تعیین کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد چراگاه‌ها و کناره‌های آبراهه به ترتیب اولین و دومین منبع رسوبات بودند. همچنین، نتایج منشأیابی با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی توسط Vale و همکاران [۳۸] نشان داد کناره‌های آبراهه بیشترین سهم رسوب را در میان جنگل‌های کاج، جنگل‌های طبیعی، درختچه‌ها و خاک‌های شخم‌خورده داشتند. به طور کلی، نتایج نشان داد بین سهم نسبی و سهم ویژه کاربری‌های مختلف اراضی اختلاف معناداری وجود دارد که این نتایج با یافته‌های پژوهش Lizaga و همکاران [۳۱] که با استفاده از آزمون تابع تفکیک بیان داشتند بین سهم منابع رسوب کاربری اراضی‌های مختلف اختلاف معنادار وجود دارد، هم‌خوانی دارد. بنابراین، می‌توان گفت که در حوضه آبخیز واز اراضی کشاورزی با توجه به وسعت کم، به دلیل اینکه در نزدیکی مناطق مسکونی و خروجی حوضه قرار دارد، سهم ویژه بیشتری نسبت به اراضی جنگلی و مرتعی دارند.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت کنترل فرسایش خاک، افزایش توجه به روش‌های منشأیابی رسوب و نیاز به انتخاب بهترین ترکیب ردیاب، با استفاده از یک ابزار قدرتمند که شامل تمام مراحل تفکیک منابع رسوب باشد، ضروری است. روش انتخاب ردیاب مناسب در پژوهش‌های منشأیابی رسوب می‌تواند نتیجه نهایی را تغییر دهد و علاوه بر این، استفاده از چند ردیاب مناسب به طور هم‌زمان و لحاظ میانگین وزنی سهم نهایی منابع بین ردیاب‌ها می‌تواند به طور قابل توجهی نتایج خروجی را به واقعیت نزدیک‌تر کند. از سویی دیگر کاربرد مدل‌های ترکیبی به‌تنهایی نمی‌تواند سهم قابل اعتمادی از منابع رسوب را تخمین بزند. بنابراین، در پژوهش حاضر از بسته تخصصی Fingerpro در نرم‌افزار R برای تعیین سهم دقیق منابع رسوبی استفاده شد که خطای کاربر در اجرای مراحل کار را کاهش و صحت نتایج را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، در پژوهش حاضر سهم نسبی هر یک از منابع (کاربری‌ها/پوشش‌های اراضی) به ازای هر هکتار محاسبه شد که معرف بسیار بهتری برای نشان دادن وضعیت حساسیت به فرسایش و تولید رسوب

بیشترین سهم ویژه مربوط به اراضی کنار آبراهه بود که مقدار آن به ازای هر هکتار مساحت کنار آبراهه ۰/۵۱۳ درصد است. این موضوع اهمیت نقش کناره‌های آبراهه را در تولید رسوبات معلق نشان می‌دهد. Collins و همکاران [۴۱] و Malhotra و همکاران [۴۲] نیز تأیید کردند که اراضی کنار آبراهه نقش مهمی در تولید رسوب معلق دارند. همچنین، Olley و همکاران [۴۳] نیز بیان کردند که اراضی کنار آبراهه تا ۹۰ درصد در تولید رسوب مشارکت دارند. Lizaga و همکاران [۳۰] نیز نشان دادند کناره‌های آبراهه حدود ۴۴ تا ۷۱ درصد سهم منابع رسوب را در بین سایر منابع مانند کشاورزی، جنگل‌های کاج و جنگل‌های باز را به خود اختصاص داده‌اند. این در حالی است که برخی پژوهشگران از جمله Chapman و همکاران [۴۴] و Russell و همکاران [۴۵] بیان کردند که کناره‌های آبراهه نقش بسیار ناچیزی در تولید رسوب دارند. بنابراین، می‌توان بیان کرد که در حوضه آبخیز واز فعالیت‌های انسانی از جمله توسعه مناطق مسکونی در مجاورت آبراهه‌ها به‌ویژه در نزدیکی خروجی حوضه یکی از دلایل اصلی فرسایش کنار رودخانه‌ای و در نتیجه، افزایش مشارکت کنار آبراهه در تولید رسوب معلق است.

پس از کنار آبراهه، بیشترین سهم نسبی به‌ترتیب مربوط اراضی جنگلی، مرتعی و کشاورزی با مقادیر ۷/۹۰، ۵/۶۹ و ۰/۱۸ درصد بود. چراکه کاربری جنگل به دلیل مساحت بیشتر (۹۹۵۰ هکتار) نسبت به کاربری کشاورزی (۱۰۷ هکتار) مشارکت بیشتری در سهم نسبی رسوب دارد. این در حالی است که سهم ویژه (سهم نسبی به ازای هر هکتار) به‌ترتیب برای کاربری کشاورزی، مرتعی و جنگلی ۰/۰۰۱۶، ۰/۰۰۱۳ و ۰/۰۰۰۷ درصد بود و بیشترین سهم ویژه پس از اراضی کنار آبراهه مربوط به اراضی کشاورزی بود. نتایج پژوهش Lizaga و همکاران [۲۹] در آبخیز مدیرانه‌ای با استفاده از بسته FingerPro نیز نشان داد بین سهم منابع رسوب جنگل‌کاری قدیمی، جدید و کشاورزی اختلاف معناداری وجود داشت، اما در این میان اختلاف جنگل‌کاری قدیمی و جنگل‌کاری جدید بسیار کم بوده و بیشترین سهم تولید رسوب مربوط به کاربری کشاورزی بوده که به خروجی نزدیک‌تر است. هم Walling و همکاران [۴۶] به‌ترتیب بیان کردند که اراضی کنار آبراهه تا ۵۰ درصد در تولید رسوب مشارکت دارند.

## منابع

- [1]. Vercruyse K, Grabowski RC, Rickson RJ. Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Sci. Rev.* 2017; 166: 38–52.
- [2]. Gray AB. The impact of persistent dynamics on suspended sediment load estimation. *Geomorphology.* 2018 ; 322: 132–147.
- [3]. Fatahi A, Gholami H, Esmaeilpour Y, Fathabadi A. Fingerprinting the spatial sources of fine-grained sediment deposited in the bed of the Mehran River, southern Iran. *Scientific Reports*, 2022; 12(1): 1-17. [4]. Duan W, Takara K, He B, Luo P, Nover D, Yamashiki Y. Spatial and temporal trends in estimates of nutrient and suspended sediment loads in the Ishikari River, Japan, 1985 to 2010. *Sci. Total Environ.* 2013; 461–462: 499–508.
- [5]. Collins AL. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. *J. Soils Sediments.* 2020; 20(12): 4160–4193.
- [6]. Zeiger S, Hubbart JA. Quantifying suspended sediment flux in a mixed-land-use urbanizing watershed using a nested-scale study design. *Sci. Total Environ.* 2016; 542: 315–323.
- [7]. Ferreira CSS, Walsh RPD, Kalantari Z, Ferreira AJD. Impact of Land-Use Changes on Spatiotemporal Suspended Sediment Dynamics within a Peri-Urban Catchment. 2021; 12(3): 655-668.
- [8]. Shojaezadeh SA, Nikoo MR, McNamara JP, AghaKouchak A, Sadeghi M. Stochastic modeling of suspended sediment load in alluvial rivers. *Adv. Water Resour.* 2018; 119: 188–196.
- [9]. Wijesiri B, Liu A, Deilami K, He B, Hong N, Yang B, Zhao X, Ayoko G, Goonetilleke A. Nutrients and metals interactions between water and sediment phases: An urban river case study. *Environ. Pollut.* 2019; 251: 354–362
- [10]. Mukherjee DP, Dynamics of metal ions in suspended sediments in Hugli estuary, India and its importance towards sustainable monitoring program. *Jornal of Hydrology.* 2014; 517: 762–776.
- [11]. Russell KL, Vietz, GJ, Fletcher TD. Global sediment yields from urban and urbanizing watersheds. *Earth-Sci. Rev.* 2017; 168: 73–80.
- [12]. Mao L, Carrillo R. Temporal dynamics of suspended sediment transport in a glacierized Andean basin. *Geomorphology.* 2017; 287: 116–125.

هر کاربری/پوشش است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد کناره‌های آبراهه منشأ اصلی رسوبات در آبخیز واز بودند و هر هکتار از اراضی کنار آبراهه ۰/۵۱۳ درصد در تولید رسوب نقش داشت که به ترتیب ۳۲۰/۶۲، ۳۹۴/۶۱ و ۷۳۲/۸۵ برابر سهم نسبی به ازای هر هکتار در کاربری‌های کشاورزی، مرتع و جنگل است. فعالیت‌های انسانی شدید مانند توسعه مناطق مسکونی و افزایش سطح اراضی کشاورزی در اطراف رودخانه واز باعث افزایش فرسایش کناری رودخانه و انتقال رسوبات به آب‌های سطحی شده و در نتیجه، چرخه بیوزئوشیمیایی عناصر را تغییر داده است. همچنین، اراضی کشاورزی پس از کناره‌های آبراهه بیشترین سهم ویژه رسوب معلق را داشتند، در حالی که اراضی جنگلی کمترین مقدار سهم ویژه را در میان سایر کاربری‌های اراضی داشتند. می‌توان گفت که در آبخیز واز تغییر کاربری اراضی جنگلی به اراضی کشاورزی که در مجاورت مناطق مسکونی است، منجر به افزایش تولید رسوب معلق با منشأ کشاورزی شده است. این نتایج نقش مهم کاربری جنگلی و پوشش‌های طبیعی را در کنترل رواناب و انتقال رسوب معلق به رودخانه واز تأیید می‌کند. از این‌رو، استفاده از روش‌های حفاظت آب و خاک به‌ویژه روش‌های تثبیت کنار آبراهه متناسب با شرایط محلی رودخانه و به‌طور ویژه مهار لغزش‌های کناری رودخانه اصلی در حوضه آبخیز واز ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، از نتایج پژوهش حاضر می‌توان در اجرای اقدامات مدیریتی و حفاظت خاک به منظور کاهش فرسایش و تولید رسوب کاربری‌های مختلف اراضی در آبخیز واز استفاده کرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده روی به‌روز نگه داشتن بسته FingerPro با تکنیک‌های منشأیابی جدید انجام شود.

## سپاسگزاری

مقاله حاضر از رساله دکتری مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری استخراج شده است. نویسندگان مقاله مراتب تشکر خود را از دانشگاه یادشده و همچنین، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری (ستاد توسعه فناوری‌های، آب، خشکسالی، فرسایش و محیط زیست) به دلیل حمایت مالی در انجام این رساله را دارند.

- [13]. Gray AB, Pasternack GB, Watson EB, Warrick JA, Goñi MA. Effects of antecedent hydrologic conditions, time dependence, and climate cycles on the suspended sediment load of the Salinas River, California. *J. Hydrol.* 2015; 525: 632–649
- [14]. Ehteram M, Ghotbi S, Kisi O, Ahmed AN, Salih GHA, Fai CM, Krishnan, M, EL-Shfie A. River Suspended Sediment Prediction Using Improved ANFIS and ANN Models: Comparative Evaluation of the Soft Computing Models. *Water.* 2019; 11: 1-12.
- [15]. Collins AL, Pulley S, Foster IDL, Gelli A, Porto P, Horowitz AJ. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users. *J. Environ. Manag.* 2017; 194: 86–108.
- [16]. Collins AL, Walling DE. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Prog. Phys. Geogr.* 2004; 28 (2): 159–196.
- [17]. Huisman NLH, Karthikeyan KG, Lamba J, Thompson AM, Peaslee G. Quantification of seasonal sediment and phosphorus transport dynamics in an agricultural watershed using radiometric fingerprinting techniques. *Journal Soils Sediments.* 2013; 13: 1724–1734.
- [18]. Wilson, CG, Kuhnle RA, Bosch DD, Steiner JL, Starks PJ, Tomer MD, Wilson GV. Quantifying relative contributions from sediment sources in Conservation Effects Assessment Project watersheds. *J. Soil Water Conserv.* 2008; 63: 523–532.
- [19]. Miller JR, Lord M, Yurkovich S, Mackin G, Kolenbrander L. Historical trends in sedimentation rates and sediment provenance, fairfield lake, western north carolina. *Journal of Water Resour. Assoc.* 2005; 41: 1053–1075.
- [20]. Mzuza MK, Weiguo Z, Chapola LS, Tembo M, Kapute F. Determining sources of sediments at Nkula Dam in the Middle Shire River, Malawi, using mineral magnetic approach. *Journal Earth Since.* 2017; 126: 23–32.
- [21]. Martínez-Carreras N, Krein A, Gallart F, Pfister L, Hoffmann L, Owens PN. Assessment of different colour parameters for discriminating potential suspended sediment sources and provenance: A multi-scale study in Luxembourg. *Geomorphology.* 2010; 118: 118–129.
- [22]. Rhoton FE, Emmerich WE.; DiCarlo, D.A.; McChesney, D.S.; Nearing, M.A.; Ritchie, J.C. Identification of Suspended Sediment Sources Using Soil Characteristics in a Semiarid Watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2008; 72: 1102-11023.
- [23]. Haddadchi A, Ryder DS, Evrard O, Olley J. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Resource.* 2013; 28 (4), 560–578.
- [24]. Bahadori M. A novel approach of combining isotopic and geochemical signatures to differentiate the sources of sediments and particulate nutrients from different land uses. *Sci. Total Environ.* 2019; 655: 129–140.
- [25]. Biddulph M, Collins A, Foster ID, Holmes N. The scale problem in tackling diffuse water pollution from agriculture: insights from the Avon Demonstration Test Catchment program in England. *River Res. Appl.* 2015; (10): 1527–1538
- [26]. Haddadchi A, Nosrati K, Ahmadi F. Differences between the source contribution of bed material and suspended sediments in a mountainous agricultural catchment of western Iran. *Catena.* 2014; 116: 105-113.
- [27]. Nosrati K, Haddadchi A, Collins AL, Jalali S, Zare MR. Tracing sediment sources in a mountainous forest catchment under road construction in northern Iran: comparison of Bayesian and frequentist approaches. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018b; 25 (31):30979–30997.
- [28]. Mohammadi M, Khaledi Darvishan AV, Dinelli E, Bahramifar N, Alavi S J. How does land use configuration influence on sediment heavy metal pollution? Comparison between riparian zone and sub-watersheds. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.* 2021; 1-16.
- [29]. Lizaga I, Latorre B, Gaspar L, Navas A. FingerPro: an R package for tracking the provenance of sediment. *Water Resour. Manag.* 2020; 272: 111020.
- [30]. Lizaga I, Gaspar L, Blake WH, Latorre B, Navas A. Fingerprinting changes of source apportionments from mixed land uses in stream sediments before and after an exceptional rainstorm event. *Geomorphology.* 2019a; 341: 216–229.
- [31]. Lizaga I, Bodé S, Gaspar L, Latorre B, Boeckx P, Navas A.. Legacy of historic land cover changes on sediment provenance tracked with isotopic tracers in a Mediterranean agroforestry catchment. *Journal of Environmental Management.* 2021; 288: 1-11.



- [32]. Khaledi Darvishan, A.A., S.H.R., Sadeghi., L., Gholami. Effect of Erosion Sensitivity and Land Use on Morphometric Characteristics of Bed Sediment (Case Study: Vazrood River). *Journal of Soil and Water Knowledge*. 2011; 21 (4): 139-151. (In Persian)
- [33]. Gholami, Sh.A., M., Habibnejad Roshan., M., Nouripour. Investigating the effect of population increase on land use change (Case study of Vaz River basin, Noor city). *Iranian Natural Ecosystems Quarterly*, 1 and 2: Spring and Summer: 2015; 56-37. (In Persian)
- [34]. Franz C, Makeschin F, Weiß H, Lorz C. 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*. 2014; 466: 513-523.
- [35]. Lizaga I, Quijano L, Gaspar L, Ramos MC, Navas A. Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. *Catena*. 2019b; 172: 516–527.
- [36]. Walling DE, Owens PN, Leeks GJL. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrol. Process*. 1999; 13: 955–975.
- [37]. Blake WH, Boeckx P, Stock BC, Smith HG, Bodé S, Upadhyay HR, Gaspar L, Goddard R, Lennard AT, Lizaga I, Lobb DA, Owens PN, Petticrew EL, Kuzyk ZZA, Gari BD, Munishi L, Mtei K, Nebiyu A, Mabit L, Navas A, Semmens BX. A deconvolutional Bayesian mixing model approach for river basin sediment source apportionment. *Scientific reports*. 2018; 8(1): 1-12.
- [38]. Vale, S., Swales, A., Smith, H. G., Olsen, G., & Woodward, B. (2022). Impacts of tracer type, tracer selection, and source dominance on source apportionment with sediment fingerprinting. *Science of The Total Environment*, 831, 154832.
- [39]. Chen J, Shi Z, Wen A, Yan D, Chen T. <sup>137</sup>Cs-based variation of soil erosion in vertical zones of a small catchment in Southwestern China. *International. Journal Environmental. Resource. Public Health*. 2019; 16: 71-85.
- [40]. Gaspar L, Blake WH, Smith HG, Lizaga I, Navas A. Testing the sensitivity of a multivariate Mixing model using geochemical fingerprints with artificial mixtures. *Geoderma*. 2019; 337:498–510.
- [41]. Collins AL, Walling DE, Webb L, King P. The application of fallout radionuclides to determine the dominant erosion process in water supply catchments of subtropical South-east Queensland, Australia, Joanne and Smolders, Kate. *Geoderma*. 2010; 155: 249–261.
- [42]. Malhotra K. Lamba J. Shepherd S. 2020. Sources of stream bed sediment in an urbanized watershed. *Catena*. 184:104-120.
- [43]. Olley J, Burton J, Smolders K, Pantus F, Pietsch T. The application of fallout radionuclides to determine the dominant erosion process in water supply catchments of subtropical South-east Queensland, Australia. *Hydrol. Process*. 2013; 27: 885–895.
- [44]. Chapman AS, Foster IDL, Lees JA, Hodgkinson RA, Jackson RH. Particulate phosphorus transport by sub-surface drainage from agricultural land in the UK. *Environmental significance at the catchment and national scale. Sci. Total Environ*. 2001; 266: 95–102.
- [45]. Russell MA, Walling DE, Hodgkinson RA. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *Jornal Hydrology*. 2001; 252, 1–24.
- [46]. Walling, D E, 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Sci. Total Environ*. 344, 159–184.
- [47]. Astorga R. Garcias T. Borgatello G. Velasco H. Padilla R. Dercon G. Mabit L. Use of geochemical fingerprints to trace sediment sources in an agricultural catchment of Argentina. *International Soil and Water Conservation Research*. 2020; 8(4): 410-417.