

## Determining the Relative Contribution of Land Use in Sediment Yield by Using Weathering Indices in Chehl Chay Watershed

**S. Jalali , K. Nosrati\*, and S. Bahrami**

Department of Physical Geography, Faculty of Earth Science, University of Shaheed Beheshti, Tehran, Iran

E-mail: sa\_jalali@ gmail.com

Department of Physical Geography, Earth Science, University of Shaheed Beheshti, Tehran, Iran.

E-mail: knosrati@ gmail.com

Department of Physical Geography, Earth Science, University of Shaheed Beheshti, Tehran, Iran.

E-mail: bahrami.gh@gmail.com

«Research Article»

« Received: July 8, 2024 and Accepted: December 28, 2024 »

### Abstract

A significant issue in applied research for the management of watersheds is to know the integrated sediment yield process in watershed. In the recent decades, sediment fingerprinting method was proven as one of the key methods for determining contribution of sediment proportion. This study's purpose was to determine the relative source contribution of surface (forest, pasture, agriculture and gardening) and sub-surface (bank erosion) in sediment yield by using weathering indices in Chehel-Chaye Catchment, Golestan Province, Iran. In eight flood events, suspended sediment sampling was done in March to April 2021. Thirty-six weathering indices were calculated. After Bracket, Kruskal-Wallis, and Discernment Function Analysis, CPA, ALK, MgIndex, ba1, CALMAG Index had the highest discernment percentage in all of the tracers. Based on Bayesian mixing model, the highest proportion of suspended sediment was produced by agricultural land (88/6%), followed by pasture (4/1%), forest (2/3%), and bank erosion (5%) of the suspended sediment. Thus, knowing the high contribution of agriculture in sediment yield, it is necessary to design and implement soil conservation operations according to the location of the watershed.

**Keywords:** Sediment tracing, Soil conservation, Soil erosion, Geo-chemical tracers

---

\* - Corresponding author, email address: [knosrati@sbu.ac.ir](mailto:knosrati@sbu.ac.ir)



## تعیین سهم نسبی کاربری اراضی در تولید رسوب با استفاده از شاخص‌های هوازدگی

### در حوضه آبخیز چهل چای

سعیده جلالی، کاظم نصرتی\* و شهرام بهرامی

گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: sa\_jalali@sbu.ac.ir

نویسنده مسئول\*، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: knosrati@sbu.ac.ir

گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: bahrami.gh@gmail.com

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱۸ و پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۸

### چکیده

مسأله‌ی مهم و قابل توجه در پژوهش‌های کاربردی برای مدیریت حوزه‌های آبخیز، آگاهی از چگونگی فرآیند تولید رسوب حوضه‌های آبخیز است. در دو دهه‌ی اخیر، منشأیابی رسوب به عنوان یک روش مناسب برای تعیین منابع رسوب استفاده می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی سهم انواع منابع سطحی (جنگل، مرتع، کشاورزی و باغ) و زیرسطحی (کناره آبراهه) در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب با کاربرد شاخص‌های هوازدگی در حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان بود. برای این منظور، در مرحله‌ی اول، نمونه رسوب معلق طی هشت رخداد سیلاب در بازه‌ی زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا فروردین ۱۴۰۰ برداشته شد. شاخص‌های هوازدگی بر اساس غلظت ردیاب‌های ژئوشیمیایی محاسبه شد. پس از آزمون‌های دامنه، کروسکال-والیس و تحلیل تشخیص، شاخص تغییر شیمیایی (CPA)، نسبت آل کال (ALK)، شاخص منیزیم (MgIndex)، شاخص بی ای ۱ (ba1) و شاخص کالمگ (CALMAG Index) که بالاترین درصد توان تفکیک‌پذیری را داشتند برای تعیین سهم منابع تولید رسوب انتخاب شدند. نتایج اجرای مدل منشأیابی در حوضه آبخیز چهل چای نشان داد که در بین منابع سطحی و زیرسطحی، کاربری کشاورزی، ۸۸/۶٪ کل رسوب را تولید می‌کند. سهم سایر کاربری‌ها به ترتیب مرتع (۴/۱٪)، باغ (۲/۳٪) و آبراهه ۵٪ بود. با آگاهی از سهم بالای زمین‌های کشاورزی در تولید رسوب، طراحی و اجرای عملیات حفاظت خاک متناسب با موقعیت منطقه، امری ضروری به شمار می‌آید.

واژه‌های کلیدی: منشأیابی رسوب، حفاظت خاک، فرسایش خاک، ردیاب‌های ژئوشیمیایی

## مقدمه

امروزه فرسایش شدید خاک یک بحران جدی برای حفظ و پایداری منابع محیطی به شمار می‌آید (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). چرا که کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب و خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (مالهوترا و همکاران، ۲۰۱۸). تولید رسوب بیش از حد که یکی از اثرات منفی فرسایش خاک می‌باشد، تهدید جدی برای تعادل سیستم رودخانه محسوب می‌شود (گلیس و سانیکا، ۲۰۱۸). پرشدن مخازن و سدها (اونز و همکاران، ۲۰۱۶)، تغییر مورفولوژی کانال‌ها (کشان، ۲۰۲۲) و نابودی زیست‌گاه‌های جانوران آبی (جونز، ۲۰۱۴، کیپ و همکاران، ۲۰۱۱، ویلکز و همکاران، ۲۰۱۹) از نتایج فرسایش شدید خاک و تولید رسوب بیش از اندازه می‌باشد. بر همین اساس امروزه برای حل معطل فرسایش و رسوب مدل‌ها و روش‌های متفاوتی طراحی شده که شامل روش‌های میدانی و آزمایشگاهی و همچنین استفاده از نرم افزارهای متفاوت مرتبط با علوم محیطی می‌باشد. در طول بیش از دو دهه گذشته کارایی روش منشأیابی به عنوان روشی موفق و موثر برای تعیین منابع رسوب به اثبات رسیده است. روش مذکور بر پایه‌ی مطالعات و نمونه برداری میدانی و استفاده از تجزیه‌های آزمایشگاهی در دوره‌ی اخیر در سراسر دنیا به عنوان تکنیک مفید و مؤثر جهت شناخت و مدیریت عوامل مؤثر در تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز به شمار می‌آید. منشأیابی رسوب شامل شناسایی منابع رسوب بر اساس ویژگی‌های ردیاب‌ها و تعیین سهم نسبی هر کدام از منابع در تولید رسوب می‌باشد (کالینز و والینگ، ۱۹۹۸، ۲۰۰۷، بلیک و همکاران، ۲۰۰۳، کارتر. همکاران، ۲۰۰۳). منظور از منشأ رسوب، واحد یا پدیده‌ی فیزیکی یا فرسایشی است که مد نظر قرار گرفته و فرآیند فرسایش در این واحد رخ داده و در نهایت بخشی از آن فرسایش به واسطه‌ی حمل و انتقال به عنوان رسوب مطرح می‌شود. این روش بر این فرض استوار است که منابع مختلف رسوب با بهره‌گیری از شماری از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و آلی قابل

شناسایی بوده و با مقایسه این ویژگی‌ها با همان ویژگی‌ها در نمونه‌های رسوب می‌توان سهم و اهمیت نسبی منابع رسوب در تولید رسوب را به دست آورد. (نصرتی و همکاران، ۱۳۹۸) از مهم‌ترین برتری‌های این روش می‌توان به سرعت زیاد و اقتصادی بودن آن اشاره کرد. (حکیم‌خانی، ۱۳۸۹). بررسی منابع سطحی و زیر سطحی یکی از رویکردهایی است که در این تکنیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرسایش سطحی معمولاً بر اساس کاربری موجود از جمله جنگل، مرتع، کشاورزی انتخاب می‌شود. برای نمونه گیری از منابع سطحی معمولاً محل‌هایی انتخاب می‌شود که آثار فرسایش در آنها مشهود باشد و تا عمقی نمونه برداری می‌شود که مواد آن در صورت فرسایش به راحتی جدا شده و وارد چرخه‌ی فرسایش شود که از عمق یک تا ۱۰ سانتی‌متری را در بر می‌گیرد. (صادقی و همکاران ۲۰۱۰). برای نمونه برداری از منابع زیرسطحی که شامل کناره‌ی آبراهه، خندق (گالی) و جاده می‌باشد، حداکثر عمق ۲۰ سانتی‌متر است. (نجفی و صادقی، ۱۳۹۲) انواع مختلف ردیاب برای شناسایی منابع رسوب مورد آزمایش قرار گرفته‌اند (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸، پالازون و ناواز، ۲۰۱۷، والینگ، ۱۹۹۹، حدادچی، ۲۰۱۳). در این میان ردیاب‌های ژئوشیمیایی بیشترین تعداد مطالعات را به خود اختصاص داده و به طور گسترده در پژوهش‌های انجام شده مورد استفاده قرار گرفته است. (کویترو و همکاران، ۲۰۱۳، هوگ و همکاران، ۲۰۱۳، نصرتی و جلالی، ۱۳۹۴) چرا که این ردیاب‌ها قدرت بالایی در تشخیص و تفکیک هر کدام از عناصر در تعیین سهم نسبی منابع در تولید رسوب دارند (مالهوترا و همکاران، ۲۰۲۰) امروزه در مطالعات منشأیابی رسوب با استفاده از غلظت ردیاب‌های ژئوشیمیایی محاسبه شده می‌توان شاخص‌های هوازدگی را محاسبه کرد و به عنوان ترکیب جدید از ردیاب‌ها به کار برد (حدادچی، ۲۰۱۳). از شاخص‌های هوازدگی برای بررسی و تفسیر فرآیندهای ژئوشیمیایی سطح پوسته‌ی زمین استفاده می‌شود. نصرتی و همکاران، (۲۰۱۹). از هوازدگی می‌توان یک عامل

حاصل فرسایش یخچال‌های طبیعی گذشته است که طی شرایط اقلیمی و تکنیکی ایجاد شده است. نصرتی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی و هوازدهی، سهم منابع رسوب زیرحوضه‌های آبخیز کن را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که زیرحوضه سنگان بیشترین سهم را در تولید رسوب دارد. حوضه آبخیز چهل‌چای در استان گلستان، در سال‌های اخیر به دلیل افزایش جمعیت و تأمین امنیت غذایی، مورد کاربری گسترده از جنگل به کشاورزی و جنگل و باغ قرار گرفته، هدف از این مطالعه بررسی سهم نسبی منابع رسوب فرسایش سطحی (کشاورزی، جنگل، مرتع و باغ) و فرسایش زیرسطحی (کناره آبراهه)، با استفاده از شاخص‌های هوازدهی برای اولین بار در حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

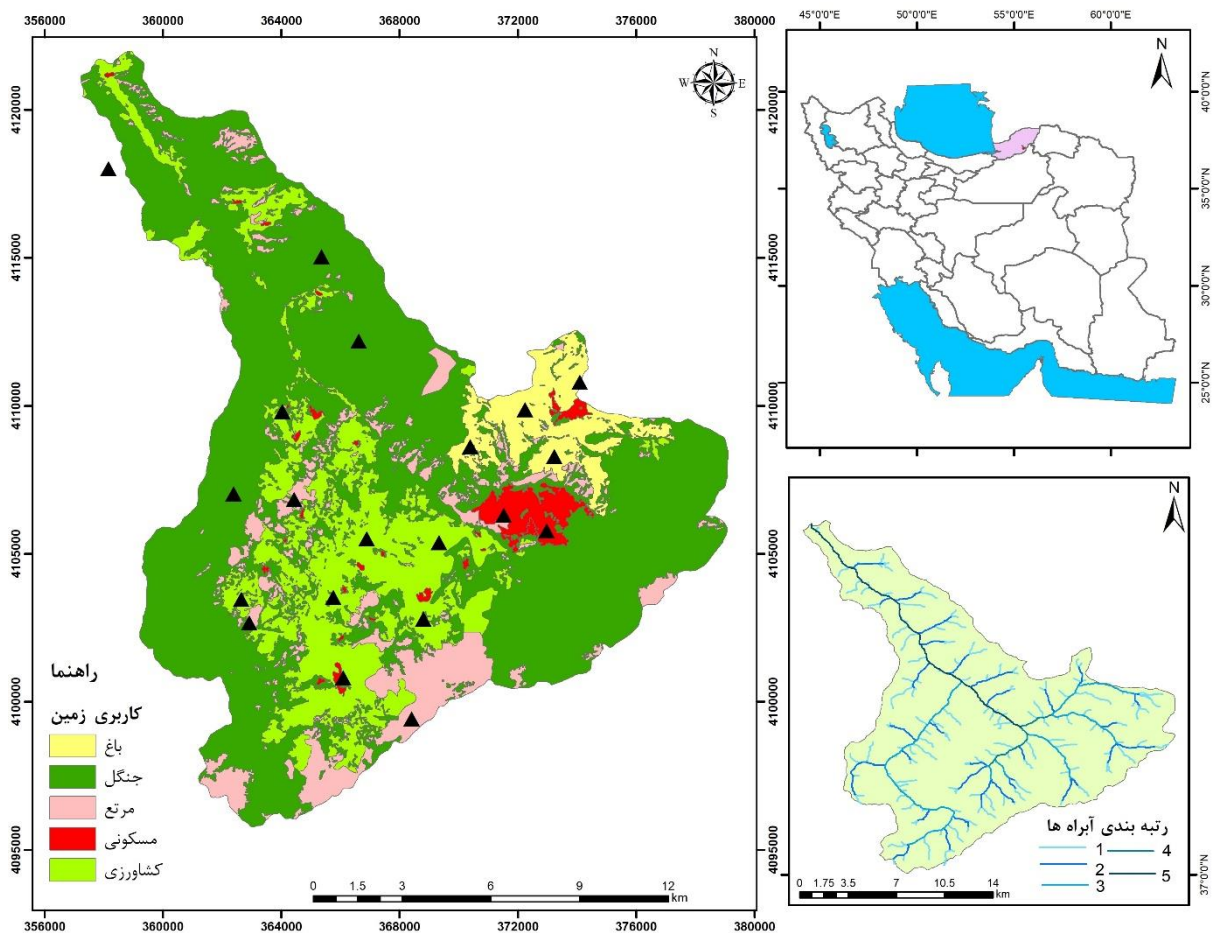
منطقه‌ی مورد مطالعه، حوضه آبخیز چهل‌چای مساحتی حدود ۲۵۶۸۰ هکتار در دامنه‌های شرق البرز قرار دارد. از لحاظ طول و عرض جغرافیایی، این حوضه در موقعیت ۳۰°، ۲۲'، ۵۵° الی ۲۰"، ۳۷'، ۵۵° طول شرقی ۳۰"، ۵۷'، ۳۶° الی ۰۰"، ۳۷°۱۵' عرض شمالی واقع شده است. جریان هیدرولوژیکی حوضه به نام رودخانه چهل‌چای تأثیر بسزایی در اقتصاد حوضه و خارج از حوضه و دشت‌های حاصل‌خیز و مرغوب حاشیه گرگان‌رود دارد. پوشش گیاهی غالب حوضه در بخش شمالی، جنگل و در جنوب به تیپ مرتعی و خشک تغییر می‌یابد. کمترین و بیشترین ارتفاع حوضه به ترتیب ۱۹۰ تا ۲۵۷۰ متر است. میانگین شیب منطقه بین ۳۵-۴۰ درصد است. میانگین ۳۰ ساله بارش در دوره‌ی زمانی ۶۸-۹۸، ۷۵۰ میلی‌متر است. متوسط دمای سالانه از ۱۵/۳ تا ۲۴/۱ درجه متغیر است. ماه بهمن به‌عنوان سردترین ماه سال و ماه مرداد به‌عنوان گرم‌ترین ماه سال در منطقه مورد مطالعه است. اقلیم منطقه به دو بخش کلی تقسیم می‌شود، بخش

کلیدی که اشکال سطح زمین را تحت تأثیر قرار داده و در تنظیم فرآیندهای ژئوشیمیایی موثر است، نام برد. با شناخت و اندازه‌گیری شدت هوازدهی می‌توان درک و تفسیر دقیق‌تری نسبت به فرآیندهای ژئومورفولوژی از جمله انباشت، حمل و رسوب‌گذاری داشت. هوازدهی شیمیایی در حوضه‌های آبریز رودخانه نقش مهمی در چرخه‌های ژئوشیمیایی دارد. ذرات منتقل شده توسط رودخانه‌ها حاوی اطلاعات ارزشمندی در مورد هوازدهی زمین، فرسایش و تغییرات آب و هوایی است. (شائو، ۲۰۱۲). چنین عملیاتی بر این فرض ضمنی استوار است که ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه توسط تعامل پیچیده عوامل، از جمله منشأ زمین‌شناسی، فرسایش و فرآیندهای هوازدهی تعیین می‌شود (جوار، ۲۰۱۸). از آنجا که شاخص‌های هواشناسی منعکس‌کننده تعاملات پیچیده بین رژیم آب و هوایی، لیتولوژی، توسعه خاک، تکتونیک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی است استفاده از آنها به عنوان ردیاب، ابزاری مناسب برای تعیین سهم نسبی هر کدام از منابع در تولید رسوب است (لی و یی جی، ۲۰۱۰، شائو و همکاران، ۲۰۱۲). گارزون گارسیا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از ردیاب‌های ایزوتوپ پایدار، کربن آلی و نیتروژن منشأ رسوبات یکی از حوضه‌های آبخیز استرالیا را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ۶۰ درصد رسوبات مربوط به منابع زیرسطحی است. نصرتی و همکاران (۲۰۱۸) اقدام به منشأ یابی منابع رسوب در حوزه آبخیز زیارت‌گرگان نمودند. بدین منظور از ۱۲ ردیاب ژئوشیمیایی به همراه سزیم ۱۳۷ برای تعیین سهم سه منبع دامنه، فرسایش کنار رودخانه‌ای و جاده استفاده شد. براساس نتایج به دست آمده فرسایش کنار رودخانه‌ای و هم‌چنین جاده سهم عمده‌ای را در تولید رسوب دارند. ویگینی و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از شاخص‌های هوازدهی، منشأ رسوبات رودخانه زرد را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بخش زیاد رسوبات موجود،

<sup>1</sup> Garzon- Garcia

دارای ۵ رتبه است. میزان دبی متوسط روزانه (۲/۸) و حداکثر دبی روزانه ثبت‌شده در دوره آماری نمونه‌برداری یعنی بهمن ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰، ۸٫۶۹ متر مکعب در ساعت است. بر اساس آمار موجود بار معلق بین ۴۷۲۷ و ۰۰۱/۰ تن در هکتار در نوسان بوده است. در سال‌های اخیر در اثر افزایش جمعیت حوضه آبخیز دچار تغییرات شدید کاربری از جنگل به مرتع شده که باعث تخریب خاک و افزایش بار رسوب حوضه شده است. در شکل ۱، نقشه کاربری اراضی و آبراهه ارائه شده است.

شمال حوضه که دارای اراضی پست و هموار است، مرطوب و نیمه مرطوب بوده و بخش جنوب حوضه که ارتفاعات کوهستانی (البرز شرقی) است دارای اقلیم نیمه‌خشک است. در حال حاضر ۶۰ درصد حوزه را جنگل، ۲۶/۵ درصد کشاورزی، ۹/۸ درصد مرتع و ۴ درصد مسکونی تشکیل می‌دهد. تیپ غالب جنگل‌های منطقه در بخش بالادست ممرز، بلوط و در بخش پایین‌دست انجیلی است. اراضی کشاورزی تحت کاشت گندم، جو و سویا است. فرسایش به شکل حرکات توده‌ای، زمین‌لغزش و فرسایش سطحی خاک در اراضی کشاورزی است. بر اساس رتبه‌بندی آبراهه، چهل چای



شکل ۱- نقشه کاربری اراضی و شبکه آبراهه حوضه آبخیز چهل چای

## نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی

### نمونه‌برداری از رسوبات معلق

در بیشتر تحقیقاتی که تاکنون در رابطه با منشأیابی صورت گرفته است نمونه‌های رسوب از رسوبات انباشته شده در بستر و کناره‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی منتهی به رودخانه و رسوب معلق رودخانه برداشت شده‌اند (هوغ و همکاران، ۲۰۰۹، حدادچی و همکاران، ۲۰۱۴). مسئله مهم در نمونه‌های رسوب این است که نمونه‌ها بایستی یک شاخصی از کل رسوبات حمل شده توسط رودخانه باشند لذا در بازه‌ی زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا فروردین ۱۴۰۰ بعد از هر رخداد بارش در محل خروجی حوضه با استفاده از بطری پلاستیکی اقدام به نمونه‌برداری از رسوبات معلق شد. بعد از ته‌نشست از کاغذ صافی رد شدند. در مرحله‌ی آخر هر کدام از نمونه‌ها که خشک شدند به طور مجزا با دستگاه ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری شدند. تاریخ و میزان رسوب معلق پس از خشک شدن (گرم در لیتر) در جدول ۲ ارائه شده است.

### نمونه‌برداری از منابع رسوب

با توجه به تغییر کاربری انجام شده، نمونه‌ها شامل دو گروه منابع سطحی (جنگل، مرتع، باغ و کشاورزی) و منابع زیر سطحی (کناره رودخانه) انتخاب شدند. بعد از تعیین نقاط نمونه‌برداری، عملیات میدانی آغاز شد. جهت نمونه‌برداری از منابع رسوب، با استفاده از بیلچه فلزی و پاکت مخصوص نمونه برداری، از عمق ۵-۰ سانتی‌متری از نقاط مشخص شده نمونه برداری منابع سطحی صورت گرفت. همچنین از کناره‌ی رودخانه به عنوان منابع زیرسطحی بودند از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی متری، نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده، به آزمایشگاه ژئومورفولوژی دانشکده علوم زمین انتقال داده شدند. ابتدا در هوای آزاد خشک شدند سپس درون آون قرار گرفتند و با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به طور کامل رطوبت خود را از دست دادند.

جهت آماده‌سازی برای اندازه‌گیری غلظت عناصر ژئوشیمیایی، هضم اسیدی انجام شد. ابتدا اندازه غالب که کمتر از ۶۳ میکرون بود تعیین گردید. (پالی و همکاران، ۲۰۱۰؛ پالازون و نواز، ۲۰۱۷؛ تیچر و همکاران، ۲۰۱۸) از هر کدام از نمونه‌ها، یک گرم وزن و در بالن ریخته شد و با محلول اسید روییک ترکیب و تبدیل به قرص شدند. قرص‌های آماده شده جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر ژئوشیمیایی در دستگاه XRF (X-ray fluorescence) واقع در آزمایشگاه کانساران بینالود قرار داده شده و آنالیز انجام شد. ۲۳ غلظت عنصر ژئوشیمیایی شامل آرسنیک (As)، باریم (Ba)، کلسیم (Ca)، کلر (Cl)، مس (Cu)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، گوگرد (S)، سرب (Pb)، استرانسیوم (Sr)، وانادیم (V)، روی (Zn)، در واحد (ppm) و درصد اکسید شامل: آلومینیوم اکسید ( $Al_2O_3$ )، اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ )، اکسید پتاسیم ( $K_2O$ )، اکسید منگنز ( $MnO$ )، اکسید منیزیم ( $MgO$ )، سدیم اکسید ( $Na_2O$ )، پنتا اکسید فسفر ( $P_2O_5$ )، سیلیسیم دی اکسید ( $SiO_2$ )، تیتانیوم اکسید ( $TiO_2$ ) اندازه‌گیری شد. ۳۶ شاخص‌های هوازگی بر اساس نسبت مولکولی عناصر به کار رفته در هر فرمول به طور جداگانه محاسبه شد. نام تمامی شاخص‌ها و مشخصات هر کدام از آنها به همراه منبع مورد استفاده در جدول ۱، ارائه شده است. غلظت هر عنصر بر حسب پی پی ام (ppm)، بر اساس نسبت ترکیب عنصر به اکسیدهای عنصر محاسبه شد (اولی و کایشون، ۲۰۰۰، موتا و همکاران، ۲۰۰۳).

### شاخص‌های هوازگی

شاخص‌های هوازگی شیمیایی بر اساس ترکیب عناصر اصلی سنگ و خاک بنا شده‌اند. بیشتر این شاخص‌ها نسبت‌های مولکولی و درصد وزنی بین گروه‌های متفاوت اکسیدهای اصلی است. (ریگانی و همکاران، ۲۰۱۹). فرض اصلی در فرمول کردن ان شاخص‌ها رفتار عنصرهای شیمیایی است که به تنهایی به وسیله درجه هوازگی کنترل می‌شود. انتظار می‌رود که با افزایش شدت هوازگی، اکسیدهای اصلی شامل: اکسید

آهن ( $Fe_2O_3$ )، تیتانیوم اکسید ( $TiO_2$ ) و آلومینیوم اکسید ( $Al_2O_3$ ) که به عنوان اکسیدهای غیر متحرک هستند در خاک مانده و اکسیدهای کلسیم، منیزیوم، سدیم، پتاسیم و سیلیس که متحرک هستند کاهش یافته و مقدار آب ساختاری افزایش یابد.

جدول ۱- شاخص های هوازدگی، معادلات و منابع مورد استفاده در پژوهش

منبع	معادله	شاخص هوازدگی ( $mg\ Kg^{-1}$ )
(پارکر، ۱۹۷۰)	$[2Na_2O/0.35+MgO/0.9+2K_2O/0.25+CaO/0.7] \times 100$	شاخص هوازدگی پارکر <sup>۲</sup>
(کالرس، ۲۰۰۰) (بوگلت و همکاران، ۲۰۱۱)	$[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O)] \times 100$	شاخص پراکسی تغییر شیمیایی <sup>۳</sup>
(راکستون، ۱۹۶۸)	$[(SiO_2 \times 100) / (SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3)]$	شاخص تولید <sup>۴</sup>
(هارنویز و مور، ۱۹۸۸)	$[(K_2O / (K_2O + Na_2O))] \times 100$	نسبت آل کال <sup>۵</sup>
(ان جی، (لی و همکاران، ۱۹۹۵) (۲۰۰۱)	$[SiO_2 / (K_2O + Na_2O + CaO + MgO)]$	شاخص غنی شدگی <sup>۶</sup>
(نیت و یانگ، ۱۹۸۲)	$[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$	شاخص تغییر شیمیایی <sup>۷</sup>
(مویجین، ۱۹۶۶)	$[SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)]$	نسبت سزکوئی اکسید <sup>۸</sup>
(هارنویز و مور، ۱۹۸۸)	$[Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O)]$	شاخص آلومینیوم به سدیم و پتاسیم <sup>۹</sup>
(گرازانتی و همکاران، ۲۰۱۴)	CIA/WIP	شاخص آی آر <sup>۱۰</sup>
(وگت، ۱۹۲۷)	$[(Al_2O_3 + K_2O) / (MgO + CaO + Na_2O)]$	شاخص باقی مانده وگت <sup>۱۱</sup>
(راکستون، ۱۹۶۸)	$SiO_2 / Al_2O_3$	شاخص آر <sup>۱۲</sup>
(هارنویز و مور، ۱۹۸۸)	$[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \times 100$	شاخص هوازدگی شیمیایی <sup>۱۳</sup>
(فدو و همکاران، ۱۹۹۵)	$[Al_2O_3 - K_2O] / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O) \times 100$	شاخص تغییر پلاژیوکلاس <sup>۱۴</sup>
(اوداجرا و همکاران، ۲۰۱۶) نوردت و ودریس، ۲۰۱۰)	$[Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + MgO)]$	شاخص کالماگ <sup>۱۵</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸) (ریچه، ۱۹۴۳) (ایفران، ۱۹۹۶)	$[(K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O) / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + TiO_2 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O)] \times 100$	شاخص پتانسیل هوازدگی <sup>۱۶</sup>
(برون و همکاران، ۲۰۰۳) (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	Ln (FeAs)	شاخص برون <sup>۱۷</sup>

WIP (Weathering Index of Parker)<sup>2</sup>

CPA (Chemical Proxy of Alteration)<sup>3</sup>

PI (Product Index)<sup>4</sup>

ALK Ratio<sup>5</sup>

LC (Leaching coefficient)<sup>6</sup>

CIA (Chemical Index of alteration)<sup>7</sup>

Kr (Silica- Sesquioxide Ratio)<sup>8</sup>

AKN (Alumina to potassium-sodium oxide Ratio)<sup>9</sup>

IR<sup>10</sup>

V (Vogt's Residual Index)<sup>11</sup>

R<sup>12</sup>

CIW (Chemical Index of Weathering)<sup>13</sup>

Index of PIA (Plagioclase Alteration)<sup>14</sup>

CALMAG Index<sup>15</sup>

CIA (Chemical Index of alteration)<sup>16</sup>

Brown<sup>17</sup>

	$Ln / ((CaO+Na_2O) Al_2O_3)$	شاخص برون <sup>۱۸</sup>
دارمودی (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸) (و همکاران، ۲۰۰۵)	$[(SiO_2+CaO) (Fe_2O_3+ TiO_2)]$	شاخص دلبلیو آی <sup>۱۹</sup>
دارمودی (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸) (و همکاران، ۲۰۰۵)	$[(SiO_2+CaO) (Al_2O_3+ Fe_2O_3+TiO_2)]$	شاخص دلبلیو آی <sup>۲۰</sup>
مک لمور و (می نارد، ۱۹۹۲) (همکاران، ۲۰۰۸)	$100 \times (Al_2O_3 (Al_2O_3+ MgO))$	شاخص منیزیوم <sup>۲۱</sup>
لی و (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸) (همکاران، ۱۹۹۵)	$[(Al_2O_3+Fe_2O_3).(K_2O+Na_2O+CaO+MgO)]$	شاخص آر سی <sup>۲۲</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[(K_2O+Na_2O)/ Al_2O_3]$	شاخص بی آی <sup>۲۳</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[(CaO+MgO) / Al_2O_3]$	شاخص بی آی <sup>۲۴</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[(K_2O+Na_2O+MgO) Al_2O_3]$	شاخص بی آی <sup>۲۵</sup>
(پیچه و جبراک، ۲۰۰۴) (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[(K_2O+Na_2O)/ (K_2O+MgO+Na_2O+CaO)]$	شاخص آی آی <sup>۲۶</sup>
(چیت بوروگ، ۱۹۹۱) (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[(CaO+MgO+Na_2O)/ TiO_2]$	شاخص چیتل بروف <sup>۲۷</sup>
(کلن، ۱۹۸۲) (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[(K_2O+Na_2O+CaO+MgO) / (Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2)]$	شاخص کالمن <sup>۲۸</sup>
(بیرکلند، ۲۰۰۳) (مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[SiO_2 / (Al_2O_3+Fe_2O_3+TiO_2)]$	شاخص بریکلند <sup>۲۹</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$[(K_2O+Na_2O+CaO) Al_2O_3]$	شاخص بی آی <sup>۳۰</sup>
(جایاواردنا و ایزاوا، ۱۹۹۴)	$[(SiO_2/TiO_2) [(SiO_2TiO_2)+(SiO_2..Al_2O_3)+(Al_2O_3TiO_2)]] \times 100$	شاخص سیلی کات آلومینیوم <sup>۳۱</sup>
(بالومن و همکاران، ۲۰۱۴)	$[Al_2O_3+Fe_2O_3)/ (Na_2O+K_2O+MgO+P_2O_5)]$	شاخص اف ای آن جی <sup>۳۲</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$SiO_2/Fe_2O_3$	شاخص اس اف <sup>۳۳</sup>
	$SiO_2/Al_2O_3$	شاخص اس آی <sup>۳۴</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$Al_2O_3+Fe_2O_3$	میزان سزکوئی اکسید <sup>۳۵</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$Al_2O_3/Fe_2O_3$	شاخص آ اف <sup>۳۶</sup>
(مک لمور و همکاران، ۲۰۰۸)	$Al_2O_3/ SiO_2$	شاخص آ اس <sup>۳۷</sup>

Brown2	18
WI-1	19
WI-2	20
Mg Index	21
Rc (Residual coefficient)	22
ba1	23
ba2	24
ba3	25
AI	26
Chittleborough	27
Colman	28
Birkeland	29
Ba (Bases to Alumina)	30
STI (Silica-titania Index)	31
FENG	32
SF	33
SA	34
SOC (Sesquioxide content)	35
AF	36
AS	37



رسوب معلق (جمع‌آوری شده از رخدادهای بارندگی در خروجی حوضه اصلی) با محدوده حداقل و حداکثر مربوط به نمونه‌های منابع رسوب مقایسه شدند و ردیاب تمام نمونه‌های رسوبی که غلظت‌ها بالاتر یا پایین‌تر از همه نمونه‌های منبع را نشان می‌دادند، در مرحله اول حذف شده‌اند. در مرحله دوم، ردیاب‌ها با استفاده از یک آزمایش دقیق‌تر بررسی شدند که به موجب آن میانگین غلظت نمونه رسوب برای هر ردیاب باید در محدوده میانگین غلظت متوسط نمونه منبع مربوط باشد. زمانی که بیشتر از ده درصد نمونه‌های رسوب در رخدادهای بارندگی خارج از مقدار متوسط منابع قرار بگیرند، این فرض را نشان می‌دهد که ردیاب نماینده منابع رسوب نیست و از تجزیه و تحلیل‌های بعدی حذف می‌شود، در مرحله سوم بی‌پلات‌ها از ردیاب‌های انتخاب شده در منشأیابی ترکیبی آماری تأیید شده نهایی، برای مقایسه نمونه‌های منابع و رسوب استفاده شدند (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۸).

#### آنالیزهای آماری برای تشخیص منابع

در مرحله‌ی بعد از آزمون براکت یا دامنه، در قالب یک روش آماری دومرحله‌ای برای انتخاب ترکیب بهینه از ردیاب‌هایی که قادر به جداسازی منابع رسوب هستند، استفاده شد. بدین منظور با استفاده از آماره H، یا کروسکال والیس در آزمون ناپارامتری، توانایی هر کدام از ردیاب‌ها در تفکیک منابع رسوب که شامل کاربری اراضی و کناره آبراهه است بررسی شد. در نتیجه ردیاب‌هایی که سطح معنی‌داری آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ باشد، منابع رسوب را از هم تفکیک می‌کنند و وارد مرحله‌ی دوم می‌شوند؛ و سایر ردیاب‌هایی که معنی‌دار نبودند، حذف می‌گردند. سپس در مرحله‌ی بعد آنالیز تابع تشخیص گام به گام، برای کاهش خصوصیات انتخابی اولیه به طوری که دارای حداقل همبستگی و حداکثر توان تفکیک را بین منابع رسوب دارا باشند، به کار گرفته شده است. آنالیز تشخیص، راهکاری است برای آنکه متغیرها را در قالب گروه‌های مجزا از هم تفکیک کنیم، به صورتی که هر گروه در عین

Alteration Chemical of Index (CIA)، شاخص شیمیایی تغییر (دگرگونی)، توسط نسبت و یانگ (۱۹۸۲) ابداع شده است در مطالعات گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است، پایه و مبنایی برای بررسی تغییرات شیمیایی بر اساس عناصر آلومینیوم-سیلیکات به شمار می‌آید (حدادچی، ۲۰۱۳، موتا، ۲۰۰۳) اگر مقدار شاخص شیمیایی تغییر بین ۵۰ تا ۶۰ باشد، نشان از مراحل ابتدایی بودن هوازگی است، اگر بین ۶۰ تا ۸۰ باشد، شدت متوسط هوازگی را نشان می‌دهد و در طبقه‌بندی سوم، اگر نرخ هوازگی به دست آمده بین ۸۰ تا ۱۰۰ باشد، هوازگی شدید رخ داده است (موتا، ۲۰۰۳)؛ و نشان می‌دهد بیشتر ساختار سیلیکات سنگ‌بستر از بین رفته است. شاخص هوازگی پارکر (WIP)، توسط پارکر (۱۹۷۰) ارائه شد، برخلاف میزان شاخص تغییر شیمیایی (CIA)، مقدار شاخص هوازگی پارکر (WIP) کمتر، نشان از نرخ هوازگی بالاتر را دارد. (شائو، ۲۰۱۲).

#### آزمون براکت یا دامنه

در فن منشأیابی رسوب، در حین جداسازی و انتقال رسوب، ردیاب‌ها در طی حرکت ممکن است دچار تغییر شوند، لذا در اولین قدم لازم است با استفاده از آزمون براکت، آن دسته از ردیاب‌هایی که دچار این تغییر شوند حذف شوند (لامبا، ۲۰۱۵). طیف وسیعی از عوامل در محیط‌های طبیعی از جمله اکسایش مجدد، دما، انتقال ذرات انتخابی، جذب و دفع یا بارش و انحلال می‌توانند در حفاظت از ردیاب‌ها اثر بگذارند؛ بنابراین ردیاب رسوب باید رفتار حفاظت شده در طول جداسازی و انتقال در طول حوضه آبخیز از خود نشان دهد (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۹).

بر این اساس، اولین قدم برای انتخاب ردیاب‌هایی که دچار تغییر نشوند، آزمون مناسب جهت شناسایی و حذف این ردیاب‌ها می‌باشد. در این پژوهش در مرحله اول یک براکت استاندارد یا تست دامنه برای شناسایی ردیاب‌های غیرمحافظت شده مورد استفاده قرار گرفت. به موجب این آزمون، غلظت ردیاب‌ها در نمونه‌های

مقدار نسبی رسوبات موجود، با محاسبه میانگین و واریانس پارامترهای هر منبعی رسوبی  $i$  و مجموعه نهایی ترکیبی بهینه از ردیاب‌ها است.  $j$  تعیین توزیع مناسب ردیاب‌های پیشنهادی ترکیب‌های رسوبی موردنظر که از محل تجمع رسوبات جمع‌آوری می‌شوند، با محاسبه مقادیر پیشنهادی برای میانگین  $\mu_j$  و انحراف معیار  $\sigma_j$  ترکیب رسوبات بر اساس مقادیر تصادفی  $f_i$  که شامل  $f_j$  می‌باشند، صورت می‌گیرد.

$$\mu_j = \sum_{i=1}^n (f_i \times m_j)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2 \times s_j^2}$$

ترکیب رسوبات پیشنهادشده، رابطه احتمال داده‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود.  $K$  امین مشخصات ردیاب نمونه رسوبی شماره  $j$  نشان‌دهنده  $X_{kj}$  در معادله بالا است.

$$L(x|\hat{\mu}_i, \hat{\sigma}_j) = \prod_{k=1}^n \prod_{j=1}^n \left[ \frac{1}{\hat{\sigma}_j \times \sqrt{2 \times \pi}} \times \exp - \frac{(x_{ij} - \hat{\mu}_i)^2}{2 \times \hat{\sigma}_j^2} \right]$$

متعلق به رخداد ۱۹ بهمن ۹۹ می‌باشد. در جدول ۲، اطلاعات مربوط به نمونه برداری رسوب معلق ارائه شده است.

اینکه با گروه دیگر شباهت و همبستگی دارد، از انسجام لازم نیز برای تفکیک برخوردار باشد. محاسبات مربوط به دو مرحله در نرم‌افزار SPSS انجام شد. (حدادچی و همکاران، ۲۰۱۳).

### تعیین سهم نسبی منابع سطحی و زیرسطحی در تولید رسوب

روش اصلاح‌شده Mix SIR Bayesian توسط نصرتی (۲۰۱۴) ابداع شده است، نسبت توزیع رسوبات حاصله از منابع مختلف را اندازه‌گیری می‌نماید.

(۱)

(۲)

در رابطه شماره (۱) مقدار  $m_j$  مقدار میانگین بوده و  $s_j^2$  در رابطه شماره (۲) نیز  $j$  امین واریانس ردیاب‌های رسوبات است. سرانجام بر اساس مقادیر  $\mu_j$  و  $\sigma_j$  برای هر یک از روش‌های انگشت‌نگاری‌های مرکب محاسبه و با توجه به

(۳)

### نتایج و بحث

نتایج نمونه برداری رسوب معلق در جدول ۱، ارائه شده است. بیشترین رسوب معلق در رخداد بارش ۵ فروردین ۱۴۰۰ جمع‌آوری شده است و کمترین نرخ

جدول ۲- تاریخ و میزان رسوب معلق پس از خشک شدن (گرم در لیتر)

وزن (گرم)	تاریخ بارش	وزن (گرم)	تاریخ بارش	وزن (گرم)	تاریخ بارش	وزن (گرم)	تاریخ بارش
۴۰	۱۴۰۰/۱/۵	۱۸	۹۸/۱۲/۲۷	۱۹	۹۹/۱۲/۵	۱۱	۹۹/۱۱/۱۹
۱۲	۱۴۰۰/۱/۲۰	۱۲	۱۴۰۰/۱/۱۷	۴۰	۱۴۰۰/۱/۲۱	۱۹	۱۴۰۰/۲/۱۱

### محاسبه‌ی شاخص‌های هوازگی

۳۶ شاخص هوازگی به‌عنوان ردیاب مورد استفاده قرار گرفتند. در جدول ۳، میانگین نرخ هوازگی در هر کدام از منابع ارائه شده است. بر اساس شاخص تغییر شیمیایی (CIA)، تمامی کاربری‌ها در مرحله‌ی ابتدایی یا اولیه فرسایش قرار دارند. شاخص هوازگی پارکر (WIP) نشان می‌دهد، شدت هوازگی در

اراضی کشاورزی نسبت به سایر کاربری‌ها مقداری بیشتر است. شاخص تولید (PI)، شاخص دبلیو آی ۲ (WI-2)، آ اس (AS)، میزان سزکوئی اکسید (SOC)، آر (R)، ba1، به دلیل عناصر پایه‌ی مشترک اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ )، اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ ) و اکسید سیلیس ( $SiO_2$ ) جهت محاسبه‌ی شاخص در یک محدوده‌ی یکسان هوازگی قرار دارند.

جدول ۳- میانگین نرخ هوازگی در کاربری‌های منطقه مورد مطالعه

شماره آبراهه	باغ	کشاورزی	مرتع	جنگل	شاخص‌های هوازگی ( $mg\ Kg^{-1}$ )
53/66	50/18	48/58	50/02	50/42	شاخص هوازگی پارکر
82/52	83/84	84/90	83/18	85/86	شاخص پراکسی تغییر شیمیایی
87/50	87/40	87/57	87/43	87/18	شاخص تولید
53/95	55/70	58/72	54/24	61/53	نسبت آل ک
41/06	43/98	49/31	46/27	48/96	شاخص هوازگی شیمیایی
1125/85	1241/98	1062/37	1239/28	1042/38	شاخص سیلی کات آلومینیوم
7/48	7/37	7/58	7/40	7/33	نسبت سزکوئی اکسید
2/18	2/30	2/34	2/26	2/35	شاخص آلومینیوم به سدیم و پتاسیم
6/35	6/84	8/73	7/37	7/58	شاخص باقی مانده وگت
9/84	9/50	9/69	9/47	9/38	شاخص آر
0/77	0/88	1/04	0/93	0/98	شاخص آی آر
0/42	0/45	0/50	0/47	0/47	شاخص کالماگ
1/19	1/03	0/82	0/94	0/80	شاخص برون ۱
0/21	0/19	0/18	0/20	0/17	شاخص برون ۲
26/70	27/98	27/72	28/40	26/64	شاخص دبلیو آی ۱
7/70	7/55	7/52	7/50	7/28	شاخص دبلیو آی ۲
71/45	71/82	71/42	71/01	66/89	شاخص منیزیوم
0/72	0/77	0/92	0/82	0/83	شاخص آر سی
0/46	0/44	0/43	0/44	0/43	شاخص بی آی ۱
1/38	1/23	1/05	1/14	1/13	شاخص بی آی ۲
0/86	0/83	0/84	0/85	0/92	شاخص بی آی ۳
0/25	0/26	0/30	0/28	0/28	شاخص آی
17/71	17/55	12/93	16/56	13/38	شاخص چیتل بروف
1/69	1/54	1/35	1/47	1/42	شاخص کالمن
7/00	6/94	7/06	6/96	6/82	شاخص بریکلند
1/44	1/28	1/07	1/18	1/06	شاخص بی آی
1125/85	1241/98	1062/37	1239/28	1042/38	شاخص اس تی آی
1/51	1/54	1/54	1/49	1/38	شاخص اف ای ان ج
31/20	32/95	35/00	34/08	33/65	شاخص اس اف
9/84	9/50	9/69	9/47	9/38	شاخص اس آ
1/40	1/38	1/42	1/40	1/44	میزان سزکوئی اکسید
3/17	3/47	3/62	3/60	3/59	شاخص آ اف
0/10	0/11	0/10	0/11	0/11	شاخص آ اس

## آزمون آماری کروسکال والیس

همانطور که در جدول ۴ قابل مشاهده است، در اولین گام پس از محاسبه‌ی شاخص‌های هوزدگی، با استفاده از آزمون براکت، آن دسته از شاخص‌هایی که در دامنه قرار نگرفتند، حذف شدند. شاخص‌های تأیید شده شامل شاخص‌های: پراکسی تغییر شیمیایی، تغییر شیمیایی، کالمگ، برون ۱، شاخص برون ۲، منیزیوم، بی آی، ای آی،

کالمن، بی آی بودند که بعد از آزمون کروسکال والیس وارد مرحله‌ی تحلیل تشخیص شدند. به بیان روشن‌تر، در این مرحله، شاخص‌هایی که سطح معنی‌داری آنها کمتر از ۰/۰۵ درصد بود انتخاب شدند، یعنی این شاخص‌ها با احتمال ۹۵ درصد می‌توانند به عنوان ردیاب، جهت تفکیک واحدهای کاربری اراضی برای منشأیابی رسوب به کار گرفته شوند.

جدول ۴- نتایج آزمون کروسکال والیس و سطح معنی‌داری

سطح معنی‌داری	کروسکال- والیس	ردیاب
0/000	27/622	شاخص پراکسی تغییر شیمیایی
0/000	22/338	شاخص تغییر شیمیایی
0/000	29/772	نسبت آل کا
0/001	18/976	شاخص کالمگ
0/000	22/735	شاخص برون ۱
0/000	27/622	شاخص برون ۲
0/001	18/134	شاخص منیزیوم
0/001	18/976	شاخص بی آی ۱
0/015	12/402	شاخص ای آی ۲
0/000	20/154	شاخص کالمن
0/000	22/338	شاخص بی آی

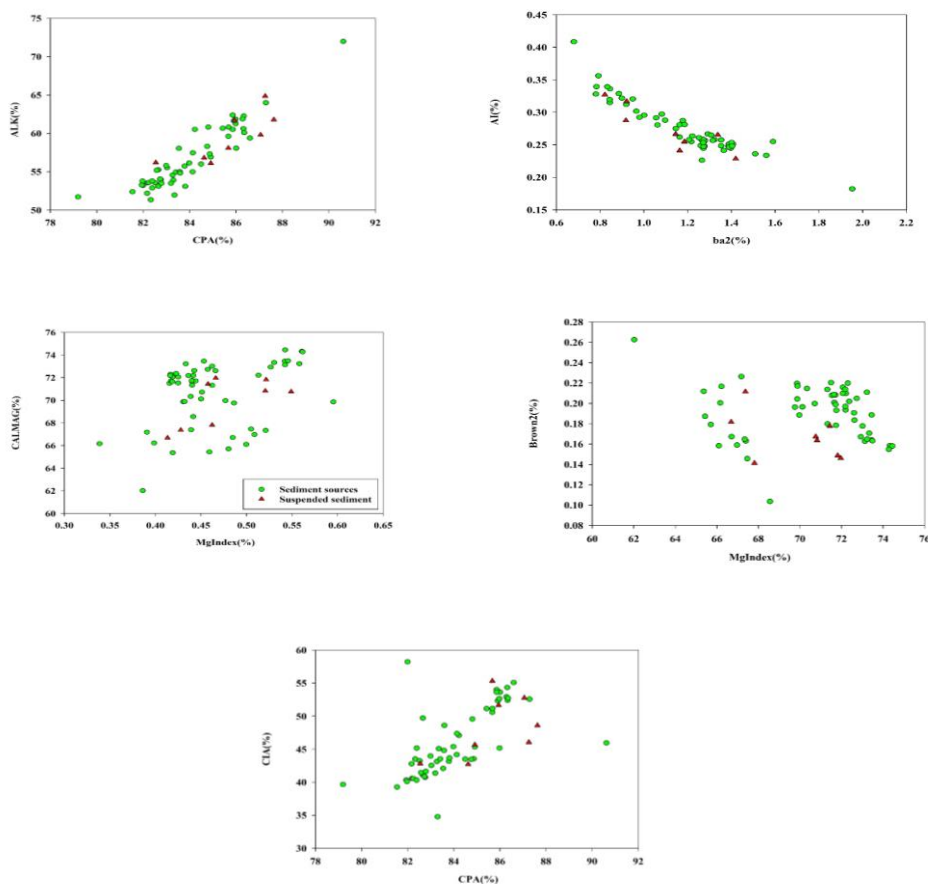
## آزمون آماری تحلیل تشخیص

جدول ۴، مراحل مختلف اضافه شدن خصوصیات ردیاب را در توابع تشخیص به روش گام‌به‌گام و تأثیر آن‌ها را بر توان جداسازی منابع رسوب برای کاربری اراضی نشان می‌دهد. در مرحله‌ی تحلیل تشخیص که آخرین مرحله قبل از اجرای مدل است، ردیاب‌های بالاترین درصد توان تفکیک‌پذیری را داشتند و به‌عنوان ترکیب بهینه وارد مرحله‌ی نهایی شدند. ویلکس لامبدا معیاری مناسب از نسبت اختلاف‌های درون‌گروهی به اختلاف‌های بین‌گروهی است. در هر مرحله متغیری وارد تابع شده که در سطح ۰/۰۵ یا کمتر معنی‌دار بوده است. همان‌طور که در جدول ۴، مشخص شده است با اضافه شدن هر ردیاب مقدار ویلکس لامبدا کاهش یافته و سطح معنی‌داری بهتر

شده است و در نتیجه توان جداسازی تحلیل و میزان تفکیک بین گروه‌ها افزایش یافته است. شکل ۳، نمودار پلات‌های جفتی را نشان می‌دهد، در هر نمودار غلظت یک جفت از ردیاب‌های رسوب و منابع رسوب به نمایش در می‌آید. در واقع به شکل گرافیکی خلاصه‌ی ۳ آزمون براکت یا دامنه، کروسکال والیس و تحلیل تشخیص را نشان می‌دهد. حاکی از آن است که ردیاب‌های ژئوشیمیایی در طول مسیر در حوزه‌ی آبخیز به خروجی یعنی محل نمونه برداری رسوب دچار تغییرات نشدند. (Nosrati et al., 2018). برای مثال، نسبت آل کا (ALK) با شاخص تغییر شیمیایی (CPA) پراکنش و توزیع یکسان و هم‌جهت دارند و می‌توانند در تفکیک منابع رسوب قوی‌تر عمل کنند.

جدول ۴- مراحل مختلف اضافه شدن خصوصیات ردیاب

گام	ردیاب	آماره
1	شاخص تغییر شیمیایی	0/125
2	نسبت آل ک	0/054
3	شاخص منیزیم	0/028
4	شاخص بی آی ۱	0/017
5	شاخص کالمگ	0/003



شکل ۲- نمودار پلات های جفتی غلظت چند ردیاب ژئوشیمیایی

### تعیین منابع رسوب

شدت و سرعت بیشتری صورت می‌گیرد. (سالمی و همکاران، ۲۰۱۳؛ رابینت و همکاران، ۲۰۱۸؛ و دی موراس و همکاران، ۲۰۰۶). لذا در منطقه‌ی مورد مطالعه بیشترین سهم در تولید رسوب معلق را به خود اختصاص دادند. نتیجه‌ی پژوهش با مطالعه‌ی آرناب و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد، آنان با استفاده از فن منشأیابی رسوب و مدل‌های فیزیکی سنجش رسوب، سهم نسبی کاربری‌ها و

نتایج حاصل از اجرای مدل منشأیابی در حوضه آبخیز چهل چای نشان داد در بین منابع سطحی و زیرسطحی، کاربری کشاورزی، ۸۸/۶ درصد کل رسوب را تولید می‌کند. سهم سایر کاربری‌ها به ترتیب مرتع (۴/۱)، باغ (۲/۳) و آبراهه (۵) درصد می‌باشد. در اراضی شیب دار، تحت تأثیر عملیات شخم، روان آب با سرعت بیشتری جریان پیدا می‌کند و فرسایش خاک و تولید رسوب با

فرسایش خاک و تولید رسوب مخصوصاً در کشور در حال توسعه ای که دغدغه ی امنیت غذا و تامین معیشت دارد، یک موضوع مهم است. کشاورزی، منبع در آمد اصلی اهالی شهرستان مینودشت و روستاهای اطراف را شامل می شود، با توجه به بازدیدهای میدانی صورت گرفته، متأسفانه توجه به حفاظت خاک همانند اکثر حوضه های آبخیز کشور کم می باشد. دغدغه اصلی کشاورزان نجیب حوضه علاوه بر تامین آب، تامین کود و سم با قیمت کمتر است چرا که محصول نهایی آنها را واسطه ها با نازل ترین قیمت خریداری میکنند، متأسفانه تامین حفظ و کیفیت خاک و جلوگیری از تولید رسوب بیشتر آنچنان که شایسته و ضروری است، اجرا نمی شود. لذا کاربرد اصلی این پژوهش این است که با استفاده از عناصر ژئوشیمیایی، سهم نسبی منابع سطحی و زیر سطحی را در تولید رسوب محاسبه کردند. و به طور مستند و علمی به متولین امر حفاظت خاک و آبخیز داری به اثبات برسانند که کشاورزی، عامل تخریب خاک حوضه است تا اقدامات موثر و اجرایی در جهت جلوگیری هر چه بیشتر از تخریب خاک صورت گیرد پیشنهاد می شود در مطالعات بعدی از ردیاب‌های نو کلئیدی از جمله سزیوم  $^{137}$  و سرب  $^{210}$  در بررسی اثر دامنه‌ها در فرسایش و رسوب استفاده شود؛ و همچنین از آنجاکه این پژوهش بر مبنای عملیات میدانی و تکنیک های آزمایشگاهی بوده، پیشنهاد می شود، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و محاسبه‌ی شاخص‌های فرسایش و رسوب در انواع کاربری ها، نتایج کار با نتایج به دست آمده مطابقت داده شود.

### سپاسگزاری

این پژوهش در راستای حمایت از رساله‌ی دکتری با همکاری بنیاد ملی علم ایران، با شماره قرار داد ۹۹۰۱۹۴۸۸ انجام شده است که نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

نرخ رسوب را برآورد کردند، بر این اساس، کاربری جنگل کمترین سهم و کمترین نرخ رسوب داشتند و در مقابل، کاربری کشاورزی بیشترین نرخ فرسایش و بالاترین سهم را در تولید رسوب داشتند. بر اساس بازدیدهای میدانی، علی‌رغم وجود کشت محصولاتی از جمله گندم، اراضی اورزی تحت تأثیر قدرت فرساینده‌ی باران قرار گرفته، انفصال مواد بیشتر شده و شست و شوی ورقه‌ای را ایجاد می‌کند به طوریکه رواناب سهم کمی در جداسازی مستقیم ذرات دارد و عمدتاً قطرات باران، هوازده‌گی و شخم زمین این نقش را بر عهده می‌گیرد.

### نتیجه گیری

در این پژوهش برای نخستین بار در استان گلستان و در حوضه آبخیز چهل چای از شاخص‌های هوازده‌گی به عنوان ردیاب برای تعیین سهم نسبی فرسایش سطحی (کشاورزی، جنگل، مرتع و باغ) و زیر سطحی (کناره آبراهه) استفاده شد. نتیجه‌ی اجرای مدل نشان داد، از میان منابع رسوب، زمین‌های کشاورزی بیشترین سهم نسبی را در تولید رسوب داشتند. در این پژوهش اکسید سدیم ( $Al_2O_3$ )، اکسید آلومنیوم ( $Na_2O$ ) و منیزیم  $Mg$  عناصر اصلی و سازنده‌ی شاخص‌های نهایی هستند، در واقع شدت و ضعف این عناصر گویایی وضعیت فرسایش حوضه و اساس تفکیک منابع رسوب هستند، وزن بالای این عناصر نشان می‌دهد، رسوبات منطقه تحت تأثیر هوازده‌گی شدید سیلی‌کاته قرار نگرفتند. براساس میزان شاخص تغییرشیمیایی CIA، تمام کاربری‌ها در مرحله‌ی هوازده‌گی ابتدایی هستند. پس می‌توان با اقدامات مدیریتی مناسب از شدت فرسایش کم کرد و اقدامات حفاظتی برای تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش انجام داد.

## فهرست منابع

۱. حکیم‌خانی، ش. ۱۳۸۹. ارزیابی اهمیت نسبی انواع فرسایش در تولید رسوب (بررسی موردی: حوزه قره آقاج، ماکو). نشریه مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۳ (۱)، صفحات ۱۳-۲۷.
۲. صادقی، س.ح.ر، نجفی.س، منشایابی رسوبات آبی در حوزه های آبخیز مفاهیم، روش‌ها و فناوری های نوین. ۱۳۹۳. دانشگاه تربیت مدرس، سازمان جهاد دانشگاهی.
3. Baumann, F. Schmidt, K., Dörfer, C., He, J.-S., Scholten, T., & Kühn, P. 2014. Pedogenesis, permafrost, substrate and topography: Plot and landscape scale interrelations of weathering processes on the central-eastern Tibetan Plateau. *Geoderma*, 226, 300-316.
4. Birkeland, P., Shroba, R., Burns, S., Price, A., & Tonkin, P. 2003. Integrating soils and geomorphology in mountains—an example from the Front Range of Colorado. *Geomorphology*, 55(1-4), 329-344.
5. Blake, W. H., Boeckx, P., Stock, B. C., Smith, H. G., Bodé, S., Upadhayay, H. R., . . . Lizaga, I. 2018. A deconvolutional Bayesian mixing model approach for river basin sediment source apportionment. *Scientific reports*, 8(1), 13073.
6. Brown, D. J., Helmke, P. A., & Clayton, M. K. 2003. Robust geochemical indices for redox and weathering on a granitic laterite landscape in Central Uganda. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(15), 2711-2723.
7. Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., & Marković, S. 2011. An evaluation of geochemical weathering indices in loess–paleosol studies. *Quaternary International*, 240(1-2), 12-21.
8. Carter, J., Owens, P. N., Walling, D. E., & Leeks, G. J. 2003. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system. *Science of the total environment*, 314, 513-534.
9. Cashman, M. J., Gellis, A., Sanisaca, L. G., Noe, G. B., Cogliandro, V., & Baker, A. 2018. Bank-derived material dominates fluvial sediment in a suburban Chesapeake Bay watershed. *River Research and Applications*, 34(8), 1032-1044.
10. Chittleborough, D. 1991. Indices of weathering for soils and palaeosols formed on silicate rocks. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38(1), 115-120.
11. Collins, A., & Walling, D. 2007. Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology*, 88(1-2), 120-138.
12. Collins, A. L., Walling, D. E., & Leeks, G. J. 1997. Fingerprinting the origin of fluvial suspended sediment in larger river basins: combining assessment of spatial provenance and source type. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 79(4), 239-254.
13. Colman, R. F. 1983 . Affinity labeling of purine nucleotide sites in proteins. *Annual review of biochemistry*, 52(1), 67-91.
14. Cullers, R. L. 2002 . Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical geology*, 191(4), 305-327.
15. Darmody, R., Thorn, C., & Allen, C. 2005 . Chemical weathering and boulder mantles, Kärkevagge, Swedish Lapland. *Geomorphology*, 67(1-2), 159-170.
16. De Moraes, J. M., Schuler, A. E., Dunne, T., Figueiredo, R. d. O., & Victoria, R. L. 2006 . Water storage and runoff processes in plinthic

- soils under forest and pasture in Eastern Amazonia. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(12), 2509-2526.
17. Das, A., Remesan, R., Collins, A. L., & Gupta, A. K. 2023 . The spatio-temporal dynamics of suspended sediment sources based on a novel indexing approach combining Bayesian geochemical fingerprinting with physically-based modelling. *Journal of Environmental Management*, 345, 118649.
  18. Fedo, C. M., Wayne Nesbitt, H., & Young, G. M. 1995 . Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10), 921-924.
  19. Garzon-Garcia, A., Laceby, J.P., Olley, J.M. and Bunn, S.E., 2017. Differentiating the sources of fine sediment, organic matter and nitrogen in a subtropical Australian catchment. *Science of the total environment*, 575, pp.1384-1394.
  20. Garzanti, E., Padoan, M., Setti, M., López-Galindo, A., & Villa, I. M. 2014 . Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa). *Chemical geology*, 366, 61-74.
  21. Gellis, A., & Gorman Sanisaca, L. 2018 . Sediment fingerprinting to delineate sources of sediment in the agricultural and forested Smith Creek Watershed, Virginia, USA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(6), 1197-1221.
  22. Guo, Y., Yang, S., Su, N., Li, C., Yin, P., & Wang, Z. 2018 . Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 227, 48-63.
  23. Haddadchi, A., Ryder, D. S., Evrard, O., & Olley, J. 2013 . Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research*, 28(4), 560-578. doi:[https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60013-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60013-5)
  24. Harnois, L., & Moore, J. M. 1988 . Geochemistry and origin of the Ore Chimney Formation, a transported paleoregolith in the Grenville Province of southeastern Ontario, Canada. *Chemical geology*, 69(3-4), 267-289.
  25. Hencher, S. 2004 . Weathering and erosion processes in rock—implications for geotechnical engineering. Paper presented at the Proceedings symposium on Hong Kong soils and rocks.
  26. Hughes, A. O., Olley, J. M., Croke, J. C., & McKergow, L. A. 2009 . Sediment source changes over the last 250 years in a dry-tropical catchment, central Queensland, Australia. *Geomorphology*, 104(3-4), 262-275.
  27. Jayawardena, U. d. S., & Izawa, E. 1994 . A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: A study from Sri Lanka. *Engineering Geology*, 36(3-4), 303-310.
  28. Jones, J., Duerdoth, C., Collins, A., Naden, P., & Sear, D. 2014 . Interactions between diatoms and fine sediment. *Hydrological processes*, 28(3), 1226-1237.
  29. Koiter, A., Owens, P., Petticrew, E., & Lobb, D. 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.
  30. Lamba, J., Karthikeyan, K., Thompson, A. M., Malhotra, K., Huisman, N. L., Panuska, J., & Peaslee, G. 2019 . Using Atmospheric Fallout Radionuclides <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbxs to Identify Sources of Suspended



- Sediment in an Agricultural Watershed. Transactions of the ASABE, 62(2), 529-538.
31. Li, C., & Yang, S. 2010 . Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? American Journal of Science, 310(2), 111-127.
  32. Li, S.-L., Liu, C.-Q., Li, J., Lang, Y.-C., Ding, H., & Li, L. 2010 . Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of Southwest China: Isotopic and chemical constraints. Chemical geology, 277(3-4), 301-309.
  33. Li, W., Qian, H., Xu, P., Hou, K., Zhang, Q., Chen, Y., . . . Ren, W. 2023 . Tracing sediment provenance in the Yellow River, China: Insights from weathering, recycling, and rock compositions. Catena, 220, 106727.
  34. Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., & Pandey, R. 2018 . Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. Plant nutrients and abiotic stress tolerance, 171-190.
  35. Malhotra, K., Lamba, J., Srivastava, P., & Shepherd, S. 2018 . Fingerprinting suspended sediment sources in an urbanized watershed. Water, 10(11), 1573.
  36. Maynard, J. 1992 . Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. The Journal of Geology, 100(3), 279-289.
  37. McLemore, V. T., Dunbar, N., Tachie-Menson, S., & Donahue, K. (2010). The Effect of Weathering on the Acid-Producing Potential of the Goathill North Rock Pile, Questa mine, NM. CRC Press, Taylor and Francis Group, London, Tailings and Mine Waste, 10, 213-227.
  38. Motha, J., Wallbrink, P., Hairsine, P., & Grayson, R. (2003) . Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia. Water resources research, 39(3).
  39. Nesbitt, H., & Young, G. M. 1982 . Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. nature, 299(5885), 715-717.
  40. Ng, C. W. W., Guan, P., & Shang, Y. 2001 . Weathering mechanisms and indices of the igneous rocks of Hong Kong. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 34(2), 133-151.
  41. Nordt, L., & Driese, S. 2010 . New weathering index improves paleorainfall estimates from Vertisols. Geology, 38(5), 407-410.
  42. Nosrati, K., Haddadchi, A., Collins, A. L., Jalali, S., & Zare, M. R. 2018. Tracing sediment sources in a mountainous forest catchment under road construction in northern Iran: comparison of Bayesian and frequentist approaches. Environmental Science and Pollution Research, 25(31), 30979-30997.
  43. Nosrati, K., & Collins, A. L. 2019 . A soil quality index for evaluation of degradation under land use and soil erosion categories in a small mountainous catchment, Iran. Journal of Mountain Science, 16(11), 2577-2590.
  44. Nosrati, K., Collins, A. L., & Fiener, P. 2020 . Using catchment characteristics to model seasonality of dissolved organic carbon fluxes in semi-arid mountainous headwaters. Environmental Monitoring and Assessment, 192(11), 674.
  45. Nosrati, K., Collins, A. L., & Madankan, M. 2018 . Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model. Catena, 164, 32-43.
  46. Raigani ZM, Nosrati K, Collins AL. . ۲۰۱۹. Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources in a large Iranian catchment under dry-land

- cultivation and rangeland farming: Combining geochemical tracers and weathering indices. *Journal of Hydrology: Regional Studies*; ۲۴:۱۰۰۶۱۳
47. Owens, P. N. 2020 . Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 4115-4143.
  48. Palazón, L., & Navas, A. 2017 . Variability in source sediment contributions by applying different statistic test for a Pyrenean catchment. *Journal of Environmental Management*, 194, 42-53.
  49. Piché, M., & Jébrak, M. 2004 . Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 82(1-3), 59-77.
  50. Price, J. R., & Velbel, M. A. 2003 . Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical geology*, 202(3-4), 397-416.
  51. Pulley, S., Foster, I., & Antunes, P. 2015 . The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene river basin. *Geomorphology*, 228, 303-319.
  52. Robinet, J., von Hebel, C., Govers, G., van der Kruk, J., Minella, J. P., Schlesner, A., . . . Vanderborght, J. 2018 . Spatial variability of soil water content and soil electrical conductivity across scales derived from Electromagnetic Induction and Time Domain Reflectometry. *Geoderma*, 314, 160-174.
  53. Ruxton, B. P. 1968 . Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *The Journal of Geology*, 76(5), 518-527.
  54. Sandaruwan, C., Adikaram, M., Madugalla, N., Pitawala, A., Ishiga, H., & Udagedara, T. 2022 . Mineralogy and geochemistry of beach sediments associated with the Precambrian crystalline rocks (Vijayan Complex) of Sri Lanka; perspective for heavy minerals. *Regional Studies in Marine Science*, 55, 102579.
  55. Sadeghi SH, Singh JK. Derivation of Flood Hydrographs for Ungauged Upstream Subwatersheds Using a Main Outlet Hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*. ۲۰۱۰;۱۵(۱۲):۶۹-۱۰۵۹
  56. Shao, J., Yang, S., & Li, C. 2012 . Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: inferences from analysis of fluvial sediments. *Sedimentary Geology*, 265, 110-120.
  57. Salemi, L. F., Groppo, J. D., Trevisan, R., de Moraes, J. M., de Barros Ferraz, S. F., Villani, J. P., . . . Martinelli, L. A. 2013 . Land-use change in the Atlantic rainforest region: Consequences for the hydrology of small catchments. *Journal of Hydrology*, 499, 100-109.
  58. Tiecher, T., Minella, J. P. G., Evrard, O., Caner, L., Merten, G. H., Capoane, V., . . . dos Santos, D. R. (2018 . Fingerprinting sediment sources in a large agricultural catchment under no-tillage in Southern Brazil (Conceição River). *Land degradation & development*, 29(4), 939-951.
  59. von Eynatten, H. 2004 . Statistical modelling of compositional trends in sediments. *Sedimentary Geology*, 171(1-4), 79-89
  60. Walling, D. E. 2013 . The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 1658-1675.
  61. Wang, N., Jiao, J., Bai, L., Zhang, Y., Chen, Y., Tang, B., . . . Wang, H. 2020 . Magnitude of soil erosion in small catchments with different land

- use patterns under an extreme rainstorm event over the Northern Loess Plateau, China. *Catena*, 195, 104780.
62. Wilkes, M. A., Gittins, J. R., Mathers, K. L., Mason, R., Casas-Mulet, R., Vanzo, D., . . . Gurnell, A. 2019 . Physical and biological controls on fine sediment transport and storage in rivers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(2), e1331.
63. Rowell, DL.1994. *Soil science methods and Application*. part7. Measurement of the composition of soil solution. 146p