



## Investigating the contribution of geomorphic landforms in sediment yield by using sediment fingerprinting method

Saeede Jalali<sup>1</sup> | Kazem Nosrati<sup>2</sup> | Shahram Bahrami<sup>3</sup>

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

E-mail: [sa\\_jalali@sbu.ac.ir](mailto:sa_jalali@sbu.ac.ir)

2. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Earth science Science, University of Shaheed Beheshti, Tehran, Iran. E-mail: [k.nosrati@sbu.ac.ir](mailto:k.nosrati@sbu.ac.ir)

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

E-mail: [bahrami.gh@gaail.com](mailto:bahrami.gh@gaail.com)

---

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Nov. 12, 2022

**Revised:** Apr. 19, 2023

**Accepted:** Apr. 24, 2023

**Published online:** June. 22, 2023

**Keywords:**

Catchment,  
Chehel-Chay,  
Geochemical Tracers,  
Geomorphic Landforms.

An important and significant issue in applied research for the management of watersheds is to know integrated drainage sediment yield process to recognize hill slopes and fluvial system. In erosion and sediment study, investigation of form and land form evolution was the earth science study core in the long time. So determination of landform contribution in sediment and erosion yield can utilize for erosion and sediment process in watershed. In recently two decades, sediment fingerprinting method was proven as a key method for contribution of sediment proportion. The purpose of this study was to determine the geomorphic landforms in sediment yield in Chehel-Chaye catchment in Golestan province. By using Topography Position Index, four landforms including concave and convex slope, narrow valleys and slope between concave and convex slope were recognized. In eight flood events suspended sediment sampling was done in March to April 2020. By using XRF instrument, 23 geochemical traces was analysis. After bracket, kruskal-wallis and discernment function analysis, Ba ·Ni·Pb ·V ·Mgo ·Mno and Cao had the most discernment percentage in all of tracers. Based of Bayesian mixing model, in first concave slopes 60/9 and in second 28/5 percentage of sediment yield. Result of virtual sediment modeling show that root mean squared error are in 0.6 and 8/4 and mean absolute error 1/7 and 23 evaluated.

---

Cite this article: Jalali, S., Nosrati, K., & Bahrami, Sh. (2023). Investigating the contribution of geomorphic landforms in sediment yield by using sediment fingerprinting method, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (4), 829-842. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351090.669393>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351090.669393>

---

## بررسی سهم انواع لندفرم‌های ژئومورفولوژیک در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشایابی رسوب

سعیده جلالی<sup>۱</sup> | کاظم نصرتی<sup>۲</sup> | شهرام بهرامی<sup>۳</sup>۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: [sa\\_jalali@sbu.ac.ir](mailto:sa_jalali@sbu.ac.ir)۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: [k.nosrati@sbu.ac.ir](mailto:k.nosrati@sbu.ac.ir)۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: [bahrami\\_g@e.gil.com](mailto:bahrami_g@e.gil.com)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۸/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۴/۱

## واژه‌های کلیدی:

اشکال ارضی.

حوزه آبخیز چهل‌چای،

ردیاب‌های ژئوشیمیایی،

مسالهی مهم و قابل توجه در پژوهش‌های کاربردی برای مدیریت حوزه‌های آبخیز، آگاهی از چگونگی فرآیند تولید رسوب شبکه زهکشی است که بتواند به‌طور مشترک و یکپارچه، عملکرد دامنه‌ها و سیستم رودخانه‌های را در مقیاس مکانی و زمانی مشخص دربر گیرد. در مطالعات مربوط به فرسایش و رسوب، بررسی شکل و تحولات فرسایشی لندفرم‌های ژئومورفولوژی، محور مطالعات علوم زمین برای یک مدت طولانی بوده است. در دو دهه‌ی اخیر، تکنیک منشایابی رسوب به‌عنوان یک روش کلیدی تعیین منابع رسوب برای بررسی فرآیند فرسایش و رسوب حوزه‌های آبخیز می‌تواند به کار گرفته شود. هدف از این پژوهش بررسی سهم انواع لندفرم‌های ژئومورفولوژی در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشایابی رسوب در حوزه آبخیز چهل‌چای استان گلستان است. لذا با استفاده از شاخص توپوگرافی، ۴ لندفرم شامل دامنه‌های محدب، مقعر، دره‌های باز و شیب بین دامنه‌های محدب و مقعر مشخص شد. نمونه‌برداری از منابع رسوب و رسوب معلق طی ۸ رخداد سیلاب در بازه‌ی زمانی اسفند ۱۳۹۸ تا اردیبهشت ۱۳۹۹ صورت گرفت. با استفاده از دستگاه XRF غلظت ۲۳ ردیاب ژئوشیمیایی اندازه‌گیری شد. پس از آزمون‌های دامنه، کروسکال-والیس و تحلیل تشخیص، در نهایت ردیاب‌های Ba, Pb, Ni, V, Mgo, Mnو Cao بالاترین درصد توان تفکیک‌پذیری را داشتند. بر اساس نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از اجرای مدل ترکیبی بیزین، دامنه‌های محدب ۶۰/۹ سهم تولیدی رسوب را به خود اختصاص داده است و در مرتبه‌ی دوم، سهم دره‌های کم‌عمق ۲۸/۵ درصد برآورد شده است. همچنین با استفاده از مدل‌سازی رسوب مجازی، خطای میانگین در محدوده‌ی ۰/۶ و ۸/۴ درصد و خطای جزر میانگین مربعات در دامنه‌ی ۱/۷ و ۲۳ برآورد شد.

استناد: جلالی، سعیده، نصرتی، کاظم، بهرامی، شهرام، (۱۴۰۲) بررسی سهم انواع لندفرم‌های ژئومورفولوژیک در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشایابی رسوب، مجله

تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۴)، ۸۲۹-۸۴۲. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351090.669393>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351090.669393>

## مقدمه

امروزه هدر رفت خاک و تولید رسوب یک چالش مهم جهانی محسوب می‌شود. اثرات آن بر خدمات اکوسیستم، بهره‌وری جنگل و کشاورزی، چرخه و کیفیت آب هزینه‌های قابل توجهی را در پی دارد (Xiao et al., 2020; Eekhout et al. 2022). مساله‌ی مهم و قابل توجه در پژوهش‌های کاربردی برای مدیریت حوزه‌های آبخیز، آگاهی از چگونگی فرآیند تولید رسوب شبکه زهکشی است که بتواند به‌طور مشترک عملکرد دامنه‌ها و سیستم رودخانه‌ای را در مقیاس مکانی و زمانی مشخص در برگیرد (Millares-Valenzuela et al., 2020). فرآیند فرسایش، تولید و انتقال رسوب معلق یک حرکت پیچیده بوده که آگاهی از منابع رسوب از نیازهای ضروری محسوب می‌شود (Kemper et al., 2019). رسوب معلق از منابع متنوع تولید می‌شود و سهم نسبی هر منبع تابع تعاملات فرآیندی اجزای حوزه زهکشی است (Haddadchi et al., 2013). در راستای مطالعات مربوط به فرسایش و رسوب، مطالعه شکل و تحولات فرسایشی دامنه‌ها، محور مطالعات ژئومورفیکی برای یک مدت طولانی بوده است. دامنه‌ها نه تنها بخش اعظم مناظر طبیعی را شامل می‌شوند، بلکه قسمت کاملی از سیستم زهکشی، آب و رسوبات را برای رودخانه‌ها تأمین می‌کنند. بنابراین، شیب‌های دامنه‌ای بخش با اهمیتی از این شکل‌های پیچیده هستند که یک حوزه زهکشی را تشکیل می‌دهند (چورلی و همکاران، ۱۳۷۵).

در دو دهه‌ی اخیر، تکنیک منشایابی رسوب به‌عنوان یک روش کلیدی تعیین منابع رسوب در مدیریت حوزه‌های آبخیز به اثبات رسیده است (Collins et al., 2014). مهم‌ترین اصل این روش این است که منابع مختلف رسوب با استفاده از تعدادی از خصوصیات شیمیایی، فیزیکی و آلی قابل شناسایی و تشخیص بوده و با مقایسه این خصوصیات با همان خصوصیات در نمونه‌های رسوب، می‌توان سهم و اهمیت نسبی منابع رسوب را در تولید رسوب به دست آورد. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به سرعت زیاد و اقتصادی بودن آن اشاره کرد. از بین منابع رسوب در نظر گرفته‌شده، طبقه‌بندی بر اساس واحدهای زمین‌شناسی (Rowntree et al., 2017) و کاربری اراضی (Collins et al., 2017) تعداد بالای پژوهش را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین در بین ردیاب‌های انتخابی، ردیاب‌های ژئوشیمیایی (Nosrati et al., 2021) با توجه به در دسترس بودن ابزار اندازه‌گیری، بیشترین استفاده را داشته‌اند.

Collins et al., (2012) در تحقیقی در حوضه بالادست رودخانه کنت در جنوب انگلستان با استفاده از تکنیک منشایابی رسوب به این نتیجه رسیدند که سهم خاک‌های سطحی کشاورزی ۴ درصد، سطوح جاده‌های کشاورزی سنگ‌ریزی نشده ۵۵ درصد، کنار راه‌های آسپت دیده ۶ درصد، کناره آبراهه‌ها و منابع زیرزمینی ۳۱ درصد و گردو خاک خیابان‌های شهری ۴ درصد در تولید رسوبات است.

Lamba et al., (2015) تکنیک منشایابی رسوب را به‌منظور تعیین سهم منابع رسوب در فصول مختلف و دوره ذوب برف مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد که هر دو منبع رسوب یعنی شبکه آبراهه و زمین‌های کشاورزی سهم مهمی در تولید رسوب معلق حوضه دارد. (Habibi et al., 2019). در بررسی منبع رسوب سد لاور در هرمزگان، با استفاده از عناصر نادر خاکی، به این نتیجه رسیدند نقاط جنوبی زیرحوضه‌ها منبع رسوب است. صمدی و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی، سهم نسبی واحد زمین‌شناسی را در رسوب معلق در حوزه آبخیز تول‌بنه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند، واحدهای Qal و Jsl s.sh به ترتیب با ۶۸/۲۲ و ۲۸/۷۵ درصد منبع اصلی در تولید رسوب بوده‌اند.

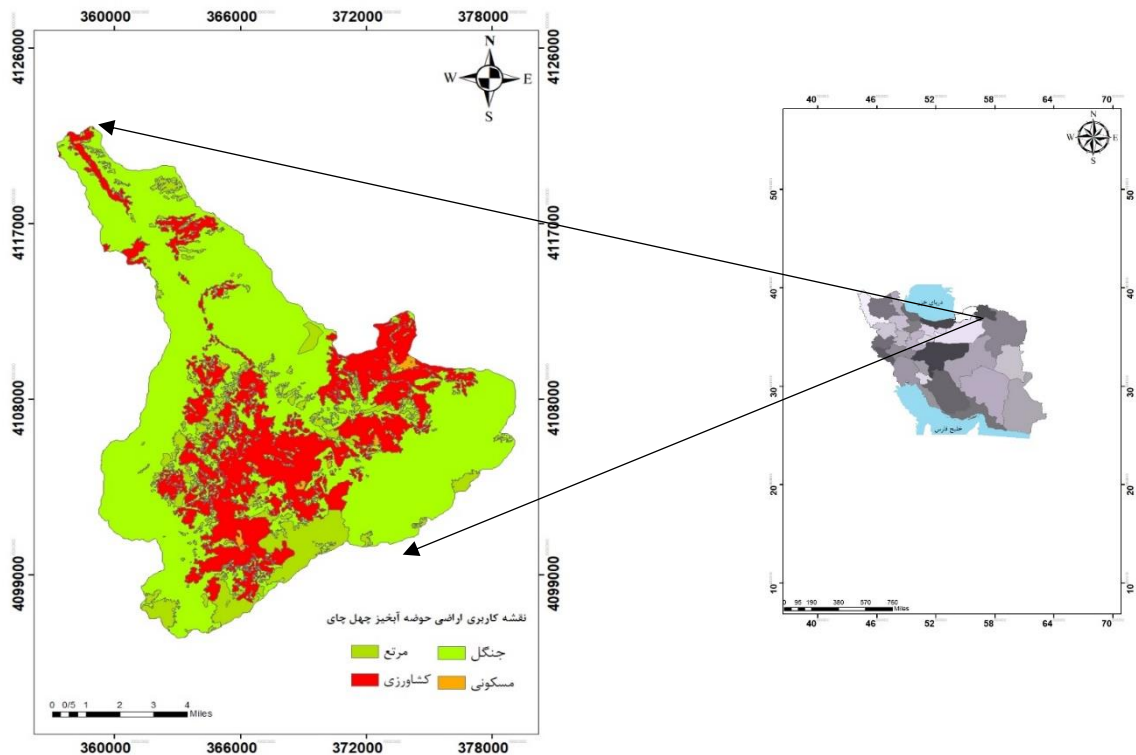
با توجه به مرور پژوهش انجام‌گرفته در زمینه منشایابی رسوب، نوآوری‌های متنوع و متعددی در زمینه‌ی انواع ردیاب‌ها (Lake et al., 2020)، انواع مدل‌های ترکیبی (Nosrati, 2014)، صورت گرفته است. برای نمونه‌گیری از منابع سطحی، محل‌هایی انتخاب می‌شود که آثار فرسایش در آن‌ها مشهود باشد و تا عمقی نمونه‌برداری می‌شود که مواد در آن در صورت فرسایش به‌راحتی جدا شده و وارد چرخه‌ی فرسایش شود. آنچه که در تحقیقات منشایابی رسوبات آبی انجام شده، سازندهای زمین‌شناسی، انواع کاربری اراضی به تعداد زیاد به‌عنوان منابع رسوب در نظر گرفته شده است. اما تاکنون انواع لندفرم‌های ژئومورفیک یا انواع اشکال یا فرم سطحی زمین به‌عنوان منابع تولید رسوب مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش با توجه به اهمیت بررسی و شناخت سهم انواع اشکال زمین در فرآیند فرسایش و رسوب، در حوزه آبخیز چهل چای در شرق گلستان، برای اولین بار با استفاده از تکنیک منشایابی رسوب، انواع اشکال ارضی، به‌عنوان منبع در نظر گرفته شد.

## داده‌ها و روش‌های انجام تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه، حوزه آبخیز چهل چای مساحتی حدود ۲۵۶۸۰ هکتار در دامنه‌های شمالی البرز شرقی قرار دارد. شکل (۱، الف)،

موقعیت "۳۰'، ۲۲" الی "۲۰'، ۳۷" طول شرقی و "۳۰"، "۵۷'، ۳۶" الی "۰۰'، ۱۵'، ۳۷" عرض شمالی واقع شده است. جریان هیدرولوژیکی حوزه به نام رودخانه چهل چای تأثیر بسزایی در اقتصاد حوزه و خارج از حوزه و دشت‌های حاصل خیز و مرغوب حاشیه گرگان‌رود دارد. پوشش گیاهی غالب حوزه در بخش شمالی، جنگل و در جنوب به تیپ مرتعی و خشک تغییر می‌یابد. کمترین و بیشترین ارتفاع بین ۱۹۰ تا ۲۵۷۰ متر است. میانگین شیب منطقه بین ۳۵-۴۰ درصد است. جمعیت ساکن در روستاهای حوزه آبخیز ۱۴۰۶۸ بوده که بیشترین جمعیت متعلق به روستای دوزین (۵۷۰۰ نفر) است. میانگین ۳۰ ساله بارش در دوره‌ی زمانی ۶۸-۹۸، ۷۵۰ میلی‌متر است. در سال‌های اخیر در اثر افزایش جمعیت حوزه آبخیز دچار تغییرات شدید کاربری از جنگل به مرتع شده که باعث تخریب خاک و افزایش بار رسوب حوزه شده است (چمنی و همکاران، ۱۳۹۹). شکل (۱، ب)، نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز چهل چایی، دریافت شده از سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه موقعیت ایران (الف) و کاربری اراضی (ب) حوضه آبخیز چهل چای

### تهیه نقشه شاخص موقعیت توپوگرافی جهت نمونه‌برداری

در این پژوهش برای تعیین انواع اشکال ارضی از شاخص موقعیت توپوگرافی<sup>۱</sup> استفاده شد که به‌عنوان ابزاری مفید برای طبقه‌بندی موقعیت شیب و اشکال است (Weise, 2001). برای جداسازی اشکال منطقه از مدل رقومی ارتفاع با وضوح مکانی ۳۰ متر در نرم‌افزار GIS 10.3<sup>۲</sup> استفاده شد. تعداد ۴ نوع شکل زمین، بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی شناسایی شد. به‌منظور محاسبه طبق معادله زیر ارتفاع هر سلول در یک مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه بررسی می‌شود. در نهایت ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود. طبق معادله زیر ارتفاع هر سلول در یک مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه بررسی می‌شود رابطه (۱)، در نهایت ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود. (نگهبان و مکرّم، ۱۳۹۶)

$$TPI = Z_0 - \sum_{n=1}^n \frac{Z_n}{n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$Z_0$  ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی

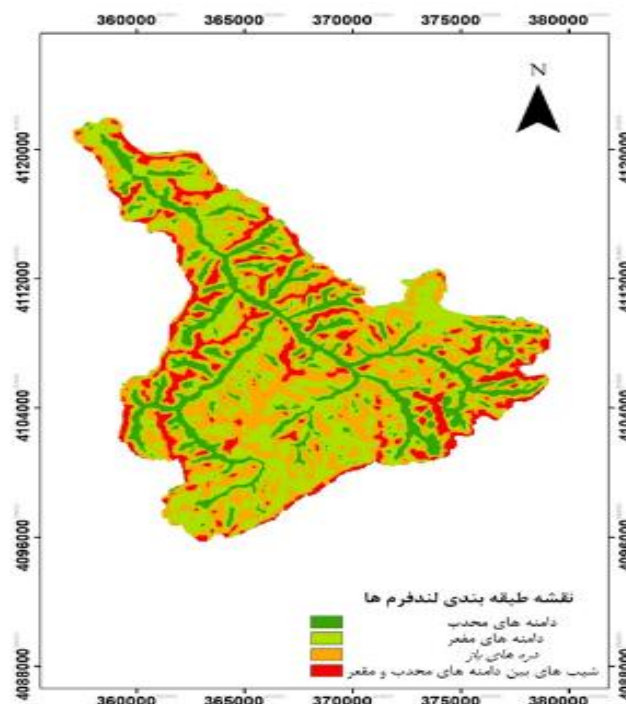
1 Topography Position Index

2 Geography Information System

$Z_n =$  ارتفاع از شبکه

 $n =$  تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی

طبقه‌بندی صورت گرفته بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی، چهار شکل جهت نمونه‌برداری مشخص گردید. دامنه‌های محدب، دامنه‌های مقعر، شیب بین دامنه‌های محدب و مقعر و دره‌های کم‌عمق می‌شوند. نقشه‌ی خروجی در شکل (۲)، نمایش داده شده است.



شکل ۲. نقشه طبقات لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی

### نمونه‌برداری از رسوبات معلق

در بیشتر تحقیقاتی که تاکنون در رابطه با منشأیابی صورت گرفته است نمونه‌های رسوب یا از رسوبات انباشته‌شده در بستر و کناره‌های رودخانه یا دشت‌های سیلابی منتهی به رودخانه برداشت شده‌اند. مسئله مهم در نمونه‌های رسوب این است که نمونه‌ها بایستی یک شاخصی از کل رسوبات حمل شده توسط رودخانه باشند لذا در بازه‌ی زمانی اسفند ۹۸ تا اردیبهشت ۹۹ بعد از هر رخداد بارش در محل خروجی حوزه با استفاده از بطری پلاستیکی اقدام به نمونه‌برداری از رسوبات معلق شد. جدول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات نمونه‌های رسوب، میزان بارش و دبی را در محدوده‌ی زمانی نمونه‌برداری نشان می‌دهد.

جدول ۱. تاریخ و میزان رسوب معلق پس از خشک شدن (گرم)

تاریخ بارش	وزن (گرم)	تاریخ بارش	وزن (گرم)	تاریخ بارش	وزن (گرم)	تاریخ بارش	وزن (گرم)
۹۸/۱۲/۱۹	۱۰	۹۸/۱۲/۲۵	۱۹	۹۸/۱۲/۲۷	۱۳	۹۹/۱/۵	۴۵
۹۹/۲/۱۱	۱۹	۹۹/۱/۲۱	۴۰	۹۹/۱/۱۷	۱۲	۹۹/۱/۲۰	۱۴

جدول ۲. میزان بارش و دبی حوزه آبخیز چهل‌چای در سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ برگرفته از سازمان هواشناسی

سال آبی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
بارش (میلی‌گرم)	۲۶/۵	۷۵/۲	۳۸/۵	۳۰	۱۴۰	۱۲۶	۱۹۹/۲	۱۱۴/۵	۱۴/۵	۱۹۰/۵	۴۷	۱۱/۵
دبی (مترمکعب بر ثانیه)	۰/۵۱۴	۰/۴۱۱	۰/۵۷۳	۰/۱۸۶۴	۱/۹۲۳	۲/۱۷۵	۲/۲۳۴	۱/۳۹۱	۰/۸۱۶	۰/۲۲۴	۰/۰۸۱	۰/۳۲۲

### نمونه‌برداری از منابع رسوب

بعد از تعیین نقاط نمونه‌برداری، عملیات میدانی آغاز شد. جهت نمونه‌برداری از منابع رسوب، با استفاده از بیلچه فلزی و پاکت مخصوص نمونه‌برداری، از عمق ۵-۰ سانتی‌متری (Devereux et al., 2010 & Minella et al., 2004)، از نقاط مشخص شده نمونه‌برداری صورت گرفت. هر نقطه تا شعاع ۱۰۰ متری برداشته شد و با هم ترکیب شدند تا معرف خوبی برای شناسایی باشند. نمونه‌های جمع‌آوری شده، به آزمایشگاه ژئومورفولوژی دانشکده علوم زمین انتقال داده شدند. در هوای آزاد خشک شدند سپس در درون اون قرار گرفتند و با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل رطوبت خود را از دست دادند (Nosrati et al., 2021).

جهت آماده‌سازی برای اندازه‌گیری غلظت عناصر ژئوشیمیایی، هضم اسیدی انجام شد. ابتدا اندازه غالب که کمتر از ۶۳ میکرون بود تعیین گردید (Nosrati et al., 2018)، از هر کدام از نمونه‌ها، یک گرم وزن و در بالن ریخته شد و با محلول اسید کوبیک ترکیب و تبدیل به قرص شدند. قرص‌های آماده‌شده 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 As (آرسنیک)، Ba (باریم)، Cao (کلسیم)، Cu، CI (مس)، Cr (کروم)، Ni (نیکل)، S (گوگرد)، Pb (سرب)، Sr (استرانسیوم)، V (وانادیوم)، Zn (روی)، در واحد (ppm) و درصد اکسید  $TiO_2$ ،  $SiO_2$ ،  $P_2O_5$ ،  $Na_2O$ ،  $MgO$ ،  $MnO$ ،  $K_2O$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $Al_2O_3$  اندازه‌گیری شد.

### آزمون‌های آماری جهت انتخاب ردیاب‌های بهینه

در تکنیک منشایابی رسوب، از آنجا که خصوصیات ردیاب‌ها در حین انتقال ممکن است دچار تغییر شود، انتخاب ردیاب‌های محافظت‌شده گام اصلی و مهم در انتخاب ردیاب‌های بهینه است (Nosrati et al., 2018). بر اساس آزمون دامنه یا براکت، لازم است غلظت نمونه‌های رسوب ردیاب‌های اندازه‌گیری شده، در دامنه غلظت ردیاب‌ها در نمونه‌های منابع رسوب قرار داشته باشد که در این حالت ردیاب در آزمون براکت پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت رد شده و در مراحل بعدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (Foster and Less., 2000). مرحله‌ی بعد از آزمون براکت یا دامنه، در قالب یک روش آماری دو مرحله‌ای برای انتخاب ترکیب بهینه از ردیاب‌هایی که قادر به جدا سازی 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 لندفرم‌های ژئومورفیک است بررسی شد. در نتیجه ردیاب‌هایی که سطح معناداری آن‌ها کمتر از ۰/۰۵ باشد، منابع رسوب را از هم تفکیک می‌کنند و وارد مرحله‌ی دوم می‌شوند. و سایر ردیاب‌هایی که سطح معناداری‌شان بیشتر از ۰/۰۵ باشد، حذف می‌گردند. در این روش در ابتدا تمام داده‌ها به‌صورت صعودی مرتب می‌شوند و رتبه‌ی آن‌ها تعیین می‌گردند. سپس برای هر گروه رتبه  $R_i$  از جمع رتبه داده‌های آن به‌دست می‌آید.

در گام بعدی با استفاده از رابطه (۲) آماره کروسکال والیس محاسبه می‌شود. (Nosrati et al., 2018)

$$H = \left( \frac{12}{N * (N + 1)} \right) * \frac{\sum R_i^2}{n_i} - 3(N + 1) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه  $N$  کل تعداد نمونه‌های منابع رسوب است. پس از محاسبه این آماره مقادیر آن با توجه به سطح در نظر گرفته با مقادیر جدول مقایسه می‌شود. سپس در مرحله‌ی بعد آنالیز تابع تشخیص گام به گام، برای کاهش خصوصیات انتخابی اولیه به‌طوری 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 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.

### تعیین سهم نسبی لندفرم‌های ژئومورفیک در تولید رسوب

جهت تعیین سهم نسبی هر کدام از لندفرم‌های ژئومورفیک در تولید رسوب، از روش اصلاح‌شده (Nosrati et al., 2014) استفاده شده است که نسبت توزیع رسوبات حاصله از منابع مختلف را اندازه‌گیری می‌نماید. مقدار نسبی رسوبات موجود، با محاسبه میانگین و واریانس پارامترهای هر منبع رسوبی  $i$  و مجموعه نهایی، ترکیبی بهینه از ردیاب‌ها است. 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. (Nosrati et al., 2018)

$$\mu_j = \sum_{i=1}^n (f_i \times m_j) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sigma_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^2 \times s_j^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه (۳) مقدار  $m_j$  مقدار میانگین بوده و  $s_j^2$  در رابطه (۴) نیز ز 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 ترکیب رسوبات پیشنهاد شده، رابطه (۵) احتمال داده‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود.  $K$  امین مشخصات ردیاب نمونه رسوبی شماره  $Z$  نشان‌دهنده  $X_{kj}$  در معادله بالا است. (Nosrati et al., 2018)

$$L(x|\hat{\mu}_i, \hat{\sigma}_j) = \prod_{k=1}^n \prod_{j=1}^n \left[ \frac{1}{\hat{\sigma}_j \times \sqrt{2} \times \pi} \times \exp - \frac{(x_{ij} - \hat{\mu}_i)^2}{2 \times \hat{\sigma}_j^2} \right] \quad \text{رابطه ۵}$$

نسبت‌های هر کدام از منابع، با استفاده از ردیاب‌های ترکیبی نهایی تأیید شده آماری مدل شده و با استفاده از ترکیب رسوب مجازی از سهم‌های منبع فضایی شناخته شده مورد بررسی قرار گرفت (Haddadchi et al. 2014). پیش‌بینی مدل از نسبت‌های منبع با استفاده از یک مجموعه ۹ تایی ترکیب رسوب معلق مجازی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها ترکیب‌های مجازی با استفاده از خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) مورد بررسی قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{Knowni} - Y_{Predictedi})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{Knowni} - Y_{Predictedi}|}{n} \quad \text{رابطه ۷}$$

( $Y_{Known}$ ) سهم منبع شناخته شده در ترکیب مجازی و ( $Y_{Predicted}$ ) درصد سهم منبع پیش‌بینی شده توسط مدل است و  $n$  تعداد منابع رسوب را نشان می‌دهد. (Haddadchi et al. 2014)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{Knowni} - Y_{Predictedi})^2}{n}} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{Knowni} - Y_{Predictedi}|}{n} \quad \text{رابطه ۷}$$

( $Y_{Known}$ ) سهم منبع شناخته شده در ترکیب مجازی و ( $Y_{Predicted}$ ) درصد سهم منبع پیش‌بینی شده توسط مدل است و  $n$  تعداد منابع رسوب را نشان می‌دهد. (Haddadchi et al. 2014)

## نتایج و بحث

### نتایج اندازه‌گیری غلظت ردیاب‌ها و آزمون‌های آماری

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت ردیاب‌های ژئوشیمیایی شامل میانگین و انحراف استاندارد آنها در جدول (۳) ارائه شده است. فرمول‌های انحراف استاندارد و میانگین به ترتیب در ذیل جدول درج گردیده است.

جدول ۳. میانگین و انحراف استاندارد ردیاب‌های اندازه‌گیری شده در منابع رسوب

ردیاب	میانگین	انحراف استاندارد	ردیاب	میانگین	انحراف استاندارد
As (ppm)	۱۱/۲۳	۹۳/۱	Sr (ppm)	۲۹۵/۲۹	۲۹/۴۶
Ba (ppm)	۴۴۴/۱	۶۱/۳۰	V (ppm)	۸۶/۷۰	۱۵/۸۸
Cao (ppm)	۴/۶۵	۱/۳۲	Zn (ppm)	۱۰۶/۵۵	۸/۶۵
Cl (ppm)	۴۹۰/۸۹	۳۶/۹۶	Al2o3(%)	۱۱/۱۴	۰/۸۴
Cu (ppm)	۲۴/۱۲	۲/۲۵	Fe2o3(%)	۵/۰۱	۰/۳۳
Cr (ppm)	۷۹/۲۱	۷۷/۱	(%) K2o	۲/۵۵	۰/۱۷
Ni (ppm)	۴۹/۰۵	۳۲/۱۰	(%) Mno	۰/۲۱	۰/۰۲
Pb (ppm)	۴۴/۹۴	۳۲/۷۶	(%) Mgo	۸۴/۱	۰/۲۵
S (ppm)	۶۹/۹۸	۵۲/۱۱	Na2o (%)	۱/۲۸	۰/۱۴
SiO2 (%)	۶۲/۸۴	۱۶/۳۲	P2O5 (%)	۰/۱۸۴	۰/۰۱

در اولین گام پس از تعیین غلظت ردیاب‌ها، داده‌ها وارد آزمون براکت یا دامنه شدند بر اساس آزمون دامنه، ردیاب‌های S و Sr و Fe2o5 در آزمون رد شدند، منظور از non conservative (n.c) همان ردیاب‌های حذف‌شده در آزمون براکت هستند. سپس ردیاب‌های تأییدشده وارد آزمون کروسکال والیس شدند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در سطح معناداری کمتر از ۰/۰۵ ردیاب‌های Cu و Cr با سطح معناداری به ترتیب ۰/۴۸۹ و ۰/۱۳۶ در آزمون رد شدند، یعنی توان تفکیک‌پذیری برای تعیین سهم هر کدام از منابع در تولید رسوب را نداشتند و به مرحله‌ی بعدی راه پیدا نکردند. مابقی ردیاب‌ها وارد مرحله‌ی تحلیل تشخیص شدند. در جدول (۴)، نتایج آزمون کروسکال-والیس را ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمون کروسکال-والیس در ردیاب‌ها

ردیاب	Chi-Square	P-value	ردیاب	Chi-Square	P-value
As(ppm)	۲۵/۵۰۹	۰/۰۰۰	Al2o3(%)	۱۸/۸۶۷	۰/۰۰۱
Ba(ppm)	۳۶/۶۵۴	۰/۰۰۰	Fe2o3(%)	n.c	n.c
Cao(ppm)	۲۱/۶۲۴	۰/۰۰۰	K2o(%)	۲۴/۴۵۳	۰/۰۰۰
Cl(ppm)	۲۰/۳۴۲	۰/۰۰۰	Mno(%)	۳۸/۸۸۳	۰/۰۰۰
Cu(ppm)	۳/۴۴۹	۰/۴۸۹	Mgo(%)	۲۱/۴۴۹	۰/۰۰۰
Cr(ppm)	۳/۰۱۸	۰/۱۳۶	Na2o(%)	۲۲/۲۹۹	۰/۰۰۰
Ni(ppm)	۴۰/۱۷۵	۰/۰۰۰	P205(%)	۱۰/۰۷۶	۰/۰۳۵
Pb(ppm)	۳۵/۵۹۳	۰/۰۰۰	SiO2(%)	۲۱/۹۶۹	۰/۰۰۰
S(ppm)	n.c	n.c	Tio2(%)	۴۳/۱۷۳	۰/۰۰۰
Sr(ppm)	n.c	n.c	Zn(ppm)	۳۴/۰۱۲	۰/۰۰۰

در مرحله‌ی تحلیل تشخیص که آخرین مرحله قبل از اجرای مدل است، ردیاب‌های Ba، Ni، Pb، V، Mgo و Cao بالاترین درصد توان تفکیک‌پذیری را داشتند و به‌عنوان ترکیب بهینه وارد مرحله‌ی نهایی یعنی اجرای مدل راه پیدا کردند. 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 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. فرمول مربوط به آزمون تحلیل تشخیص در ذیل جدول (۵)، درج گردیده است.

در مرحله‌ی تحلیل تشخیص که آخرین مرحله قبل از اجرای مدل است، ردیاب‌های Ba، Ni، Pb، V، Mgo و Cao بالاترین درصد توان تفکیک‌پذیری را داشتند و به‌عنوان ترکیب بهینه وارد مرحله‌ی نهایی یعنی اجرای مدل راه پیدا کردند. 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 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. فرمول مربوط به آزمون تحلیل تشخیص در ذیل جدول (۵)، درج گردیده است.

جدول ۵. نتایج آزمون تحلیل تشخیص و مراحل وارد شدن هر کدام از ردیاب‌ها

گام	ردیاب	ویلکس لامبدا	آماره F
۱	Ba	۰/۱۴۱	۷۶/۴۲
۲	Ni	۰/۰۳۰	۵۹/۰۶
۳	Pb	۰/۰۰۸	۵۴/۰۵
۴	V	۰/۰۰۴	۴۷/۸۳
۵	Mgo	۰/۰۰۱	۴۶/۸۸
۶	Mno	۰/۰۰۱	۴۲/۰۶
۷	Cao	۰/۰۰۱	۲۹/۴۱



### تعیین سهم لند فرم‌های ژئومورفولوژی در تولید رسوب

نتایج حاصل از اجرای مدل منشایابی روش اصلاح‌شده نشان داد در حوزه آبخیز چهل‌چای، در بین لندفرم‌های ژئومورفولوژی، دامنه محدب با میانگین ۶۰/۹ درصد بالاترین سهم را در تولید رسوب معلق داشته و در مرتبه‌ی دوم، سهم دره‌های کم‌عمق ۲۸/۵ درصد برآورد شده است. وجود شیب نسبتاً تند در دامنه‌های محدب محدوده مورد مطالعه از عوامل تشدیدکننده‌ی تولید فرسایش و رسوب است. حمل مواد و عمل شست‌وشو در دامنه‌های محدب با توجه به شکل ناهمواری که دارند با شدت و سرعت بیشتری صورت می‌گیرد، لذا در منطقه‌ی مورد مطالعه بیشترین سهم در تولید رسوب معلق را به خود اختصاص دادند. Sun et al., 2020 در مطالعه‌ی خود به این نتیجه رسیدند، دامنه‌های محدب در مقایسه با سایر اشکال دامنه، فرسایش بیشتری دارند. دامنه‌های مقعر و شیب بین دو دامنه سهم قابل‌توجهی در تولید رسوب نداشتند. نتایج به‌دست‌آمده با پژوهش (Shen, H., et al. (2016) مطابقت دارد. ایشان در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که در بین عوامل فرسایش، اصلی‌ترین عامل، وجود شیب دامنه‌های محدب است. همچنین، (De Lima, J. L., et al. (2018) با استفاده از کرت‌های آزمایشی در منطقه‌ی مورد مطالعه، نرخ فرسایش را اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند دامنه‌های محدب با کاربری کشاورزی بالاترین نرخ فرسایش را دارد. (Nosrati, 2017) با استفاده از ردیاب سزیوم ۱۳۷، اجزای مختلف یک دامنه شامل، قله، شانه و پنجه را در دو کاربری جنگل و کشاورزی مورد مطالعه و مقایسه قرارداد و به این نتیجه رسید، شانه‌ی دامنه در کاربری کشاورزی بیشترین سهم در تولید رسوب دارد.

### ارزیابی سهم منابع با استفاده از ترکیب‌های رسوب مجازی

نتایج حاصل از اجرای مدل رسوبات مجازی در جدول ۶، نشان داده شده است. بر این اساس، در ۹ سری مجموعه از مقدار تعیین شده و پیش‌بینی شده، میانگین خطای مطلق در محدوده‌ی ۰/۶ و ۸/۴ درصد قرار دارد که میزان آن کمتر از ۱۰ درصد بوده و تا حد زیادی صحت نتایج پژوهش را تأیید می‌کند. همچنین خطای جزر میانگین مربعات یا میانگین خطای مطلق در نتایج در دامنه‌ی ۱/۷ و ۲۳ قرار دارد؛ که نشان‌دهنده‌ی نزدیکی و شباهت میانگین به‌دست‌آمده حاصل از اجرای مدل ترکیبی و مجازی است و قابل اعتماد بودن نتایج را تأیید می‌کند.

جدول ۶. نتایج سهم رسوبات مجازی و میانگین خطای برآورد شده

درصد سهم تعیین شده				سهم منابع پیش‌بینی شده در رسوب مجازی			میانگین خطای برآورد شده			
۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴	RMSE	MAE	
۳۰	۱۵	۲۵	۱۰	۲۱/۱۹	۴۲/۳	-۰/۳۲	۱/۷	۲۳	۲/۱	
۱۵	۲۵	۱۰	۲۰	-۰/۳۵	۱۷/۶	-۰/۱۹	۶۶/۲	۱/۷	۶/۴	
۲۵	۱۰	۲۰	۳۰	-۰/۴۵	۲۵/۹	۲۱	۲۹/۷	۱۹/۴	۳/۲	
۱۰	۳۰	۱۵	۲۵	۳/۰۲	۷۰/۳۰	۷	۱۴	۵/۶	۲/۹	
۱۰	۴۰	۲۰	۰	-۰/۳۱	۸۵/۰۱	۱۲	-۰/۰۳	۱۲/۹	۷/۲	
۱۰۰	۰	۰	۰	-۰/۹۳	۲۵/۰۳	-۰/۴۴	-۰/۰۴	۱۰/۱۳	۸/۴	
۲۰	۰	۲۵	۲۵	۲۲	۶۴/۷	-۰/۷۴	-۰/۰۵	۴/۹	۶/۳	
۴۰	۲۰	۰	۲۰	-۰/۱۷	۵۹/۳	۱۰	-۰/۰۷	۱۳/۷	۱/۹	
۰	۵۰	۵۰	۰	۲۳	۲۴/۱	۲۷/۱۳	۴/۱۷	۱/۷	-۰/۰۶	

### نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به تجربه‌های موفق در مطالعات فرسایش و رسوب، فن منشایابی رسوب از روش‌های موفق و شناخته شده در سطح دنیا جهت مدیریت حوزه‌های آبخیز محسوب شده به طوری که از آن به‌عنوان راه‌های کلیدی تعیین منابع رسوب یاد می‌شود. ردیاب‌های ژئوشیمیایی از جمله معتبرترین ردیاب‌ها بوده و نتایج قابل قبول و روشنی به دست آورده است. به طوری که در پژوهش حاضر ردیاب‌های Ba، Ni، Pb، V، Mn، Mg، Ca بالاترین درصد توان تفکیک‌پذیری را داشتند و جهت تعیین سهم نسبی منابع رسوب که لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی است وارد مدل شدند. با توجه به اهمیت فرآیندهای ژئومورفولوژی و نقش پررنگ فعالیت‌های انسان در تغییر فرم و فرآیندهای ژئومورفیک، در این پژوهش به بررسی سهم انواع لندفرم‌های ژئومورفولوژی در تولید رسوب با استفاده از منشایابی رسوب برای اولین بار پرداخت شد. با استفاده از شاخص توپوگرافی چهار طبقه لندفرم شناسایی شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، دامنه محدب با میانگین

۶۰/۹ درصد بالاترین سهم را در تولید رسوب معلق داشته و منبع بعدی، دره‌های کم‌عمق ۲۸/۵ درصد را در بین منابع سطحی دارد. همچنین، نتایج حاصل از مدل‌سازی رسوب مجازی نشان داد، خطای میانگین در محدوده‌ی ۰/۶ و ۸/۴ درصد قرار دارد. هرچه میزان خطا به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی خطای کمتر است. همچنین خطای جزر میانگین مربعات در دامنه‌ی ۱/۷ و ۲۳ قرار دارد. بر اساس بازدیدهای میدانی، دامنه‌های محدب حوزه با کاربری کشاورزی بوده، علی‌رغم وجود کشت محصولات از جمله گندم، تحت تأثیر قدرت فرسایش باران قرار گرفته، انفصال مواد بیشتر شده و شست و شوی ورقه‌ای را ایجاد می‌کند به طوری که رواناب سهم کمی در جداسازی مستقیم ذرات دارد و عمدتاً قطرات باران، هوازدگی و شخم زمین این نقش را بر عهده می‌گیرد. فرآیندهای دامنه‌های از جمله فرسایش ورقه‌ای طرفین دره را پست و پهن می‌کنند. با توجه به حجم بالای بارش در حوزه آبخیز چهل چای، (۵۰۰-۷۰۰ میلی‌متر)، دره‌های کم‌عمق حوزه، رتبه‌ی دوم در تولید رسوب را دارد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی از ردیاب‌های نوکلئیدی از جمله سزیوم ۱۳۷ و سرب ۲۱۰ در بررسی اثر دامنه‌ها در فرسایش و رسوب استفاده شود. با توجه به غلظت ردیاب‌های ژئوشیمیایی که در اشکال مختلف اندازه‌گیری شد، می‌توان با مشورت و همکاری با متخصصین خاک‌شناسی، وضعیت عناصر مفید و مضر خاک را برای کنترل کشاورزی و فرسایش خاک بررسی کرد. کیفیت خاک را با استفاده از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری کرد تا بتوان با توجه به وضعیت رسوب و فرسایش در جهت حفظ و کنترل حوزه آبخیز چهل چای گام مثبت برداشت.

## سپاس‌گزاری

مقاله حاضر، حاصل پژوهش رساله دکتری و با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران در غالب کارگروه رساله مستقل دکتری با شماره ۹۹۰۱۹۴۸۸ است. نویسندگان کمال تشکر خود را جهت اعتلای مادی و معنوی این پژوهش اعلام می‌دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- چورلی؛ ریچارد جی، ای شوم؛ استنلی، سون؛ دیوید ای. (۱۳۷۵). ژئومورفولوژی، جلد اول، (دیدگاه‌ها). ترجمه احمد معتمد با همکاری ابراهیم مقیمی. انتشارات سمت، تهران.
- چمنی، رضا؛ آذری، محمود، کرایلیش؛ سون. (۲۰۲۰). پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز چهل چای گلستان به تغییر اقلیم آینده. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱۲(۱)، ۷۲-۸۵.
- صمدی؛ میثم، بهره‌مند؛ عبدالرضا، سلاجقه، علی، اونق؛ مجید، حسینعلی زاده؛ محسن. (۱۳۹۸). برآورد سهم واحدهای زمین‌شناسی به عنوان منابع تولید رسوب معلق رودخانه با استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز تول‌بنه، استان گلستان). پژوهش‌های دانش زمین، ۱۰(۳۸)، ۱-۲۰.
- نگهبان؛ سعید، مکرم؛ مرضیه. (۱۳۹۴). طبقه‌بندی لندفرم‌ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و ارتباط آن با ویژگی‌های زمین‌شناسی در حوضه آبخیز حکان (شهرستان جهرم). پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۵(۱)، ۷۵-۸۹.

## REFERENCES

- Chorley R.J, Stanley A., Schumm D.S. (2001). *Geomorphology, Vol.3*. Samt , Tehran. (In Persian)
- Collins AL, Stutter M, Kronvang B (2014) Mitigating diffuse pollution from agriculture: international approaches and experience. *Sci Total Environ* 468-469:1173-1177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.001>
- Collins AL, Zhang YS, Walling DE, Black K (2010) Apportioning sediment sources in a grassland dominated agricultural catchment in the UK using a new tracing framework. In: Banasik K, Horowitz AJ, Owens PN, Stone M, Walling DE (eds) *Sediment dynamics for a changing future. IAHS Publication 337, IAHS Press, Wallingford, p 68.*
- Collins, A.L., et al., (2017). 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. *Environ. Manage.* 194, 86-108. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075>
- Chamani, R., Azari, M., & Kralisch, S. (2020). Hydrological response to future climate changes in Chehelchay Watershed in Golestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 12(1), 72-85. doi: 10.22092/ijwmse.2019.122726.1522 (In persian)

- De Lima, J. L., et al. (2018). Longitudinal hillslope shape effects on runoff and sediment loss: laboratory flume experiments. *Environmental Engineering* 144(2): 41-52. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001302](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001302).
- Devereux O. H., Prestegard K. L., Needelman B. A., and Gellis A. C. (2010). Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. *Hydrological Processes*, Vol. 24, No. 11, pp. 1391–1403. <https://doi.org/10.1002/hyp.7604>
- Eekhout, J., Boix-Fayos, C., Pérez-Cutillas, P., Vente, J. D. (2020). The impact of reservoir construction and changes in land use and climate on ecosystem services in a large Mediterranean catchment, *EGU General Assembly 2020*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7177>
- Foster, I. D., Lees, J. A., (2000). Tracers in geomorphology: theory and applications in tracing fine particulate sediments. In: Foster, I. D. (Ed.), *Tracers in Geomorphology*. J. Wiley & Sons, Chichester, pp. 3–20.
- Habibi, S., Gholami, H., Fathabadi, A., & Jansen, J. D. (2019). Fingerprinting sources of reservoir sediment via two modelling approaches. *Science of The Total Environment*, 663, 78-96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.327>
- Haddadchi, A., Olley, J., Laceby, P., (2014). Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions. *Sci. Total Environ.* 497, 139–152. <https://doi-org.ezp3.ezlib.ml/10.1016/j.scitotenv.2014.07.105>
- Haddadchi, A., Ryder, D. S., Evrard, O., Olley, J., (2013). Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *Int. J. Sediment research*. 28 (4), 560–578. [https://doi-org.ezp3.ezlib.ml/10.1016/S1001-6279\(14\)60013-5](https://doi-org.ezp3.ezlib.ml/10.1016/S1001-6279(14)60013-5)
- Kemper, J. T., Miller, A. J., Welty, C., (2019). Spatial and temporal patterns of suspended sediment transport in nested urban watersheds. *Geomorphology*. 336, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.018>
- Millares, A., Eekhout, J., Cantalejo, M., Conesa, C., Moreno, R., (2022). Sediment Connectivity And Associated Shifts By Climate Change Projections In A Mediterranean High-Mountain Catchment (Southern Spain). *International Mountain Conference*.
- Negahban S, Mokarram M. Landform classification using Topography Position Index Case Study: Hakan Watershed, Jahrom City. *Environmental Erosion Research*.; 5 (1) :75-89 (In Persian)
- Nosrati, K., et al. (2014). A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting. *Geoderma* 217: 173-180. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.002>
- 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. Pollutant. Research*. 25 (31), 30979–30997. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3097-5>
- Nosrati, K., Mohammadi-Raigani, Z., Haddadchi, A., & Collins, A. L. (2021). Elucidating intra-storm variations in suspended sediment sources using a Bayesian fingerprinting approach. *Journal of Hydrology*, 596, 126115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126115>
- Rowntree, K. M., van der Waal, B. W., Pulley, S., (2017). Magnetic susceptibility as a simple tracer for fluvial sediment source ascription during storm events. *J. Environ. Manage.* 194, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.022>
- Seif A. (2014). Using Topography Position Index for Landform Classification, *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, v.
- Samadi, M., Bahremand, A. R., Salajeghe A., Onegh, M., Hosseinali zadeh M. Estimating of geologic units as one as suspended sediment source by using sediment tracing method. (Tool baneh, Ziarat) (2019). *Research in Earth Science*. 10(2)1-20. (In Persian)
- Sun, L., Guo, H., Liu, B., Wu, Sh., Weckler, P. R., Yang, J. (2021). Characterizing erosion processes on a convex slope based on 3D reconstruction method. *Geoderma*. 402. 115364. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115364>
- Shen, H., et al. (2016). Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research* 155: 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.011>
- Tagil, S. and Jenness, J., (2008). GIS - based automated landform classification and Topographic, Land cover and Geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey, *Applied Sciences*, 8(6), 910 - 921. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.09.011>
- Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, *ESRI user conference, San Diego, CA* (Vol. 200).
- Xiao S, Jianguo W, Huajun T, Peng Y, (2022). An urban hierarchy-based approach integrating ecosystem



- services into multiscale sustainable land use planning: The case of China. *Resources, Conservation and Recycling*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106097>
- Gruszowski K. E., Foster I. D. L., Lees J. A., and Charlesworth S. M. 2003, Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK. *Hydrological Processes*, Vol. 17, No. 13, pp. 2665–2681. <https://doi.org/10.1002/hyp.1296>
- Lake, N. F., Martínez-Carreras, N., Shaw, P. J., & Collins, A. L. (2022). Using particle size distributions to fingerprint suspended sediment sources—Evaluation at laboratory and catchment scales. *Hydrological Processes*, 36(10), e14726. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.14726>
- Lamba, J., Karthikeyan, K. G., & Thompson, A. M. (2015). Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting. *Geoderma*, 239-240, 25-33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024>
- Su, Y., Zhang, Y., Wang, H., & Zhang, T. (2022). Effects of vegetation spatial pattern on erosion and sediment particle sorting in the loess convex hillslope. *Scientific Reports*, 12(1), 14187. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17975-6>

## Investigating the contribution of geomorphic landforms in sediment yield by using sediment fingerprinting method

### EXTENDED ABSTRACT

#### Introduction

An important and significant issue in applied research for the management of watersheds is to know integrated drainage sediment yield process to recognize hill slopes and fluvial system. In erosion and sediment study, investigation of form and landform evolution was the earth science study core in the long time. In recently two decades, sediment fingerprinting method was proven as a key method for contribution of sediment proportion. The goal of this paper was to investigate sediment fingerprinting by use of geomorphic landforms in Chehel-chay catchment.

#### Data and research methods

Chehel-Chay catchment is located in the northern mountain of eastern Alborz ( $55^{\circ} 22' E$  to  $55^{\circ} 37' E$  longitude and  $36^{\circ} 57'$  to  $37^{\circ} 15' N$  latitude), covers an area of  $256 \text{ km}^2$ . It is a forest mountainous catchment with elevations ranging from 190 m in outlet catchment to 2570 m, and average catchment elevation is 951 m. Mean slope percent is between 35-40%. The study region has population of 14068 with the majority located in Dozain rural (5700). The long-term (30 years) mean annual precipitation data collected at the nearest climate station indicates an average total of precipitation  $750 \text{ mm yr}^{-1}$  with most precipitation falling between October and March. Precipitation in the upper parts of the catchment is mostly snow.

The Topographic Position Index (TPI) compares the elevation of each cell in a DEM to the mean elevation of a specified neighborhood around that cell. Four classes were defined using the criteria; concave and convex slope, valleys and ridges and slope between concave and convex slope.

After sampling all sediments, soil samples were transported to the geomorphology lab and they were air-dried for determining main particular fraction. All samples mixed with boric acid and grinded. Then, they were altered to solid pile and maintained in a special container and measured by XRF (X-ray fluorescence) method. Concentration of geochemical element: As, Ba, Cao, CI, Cu, Cr, Ni, S, Pb, Sr, V, Zn (in ppm) and oxidation percent of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Tio}_2$  were calculated.

For investigating the proportion of each source of sediment in tributary, three main steps were used. First, the non-conservative behavior of tracers and a mass conservation test was performed. Second, a two-stage statistical procedure identified the optimum set of source material properties to use as composite fingerprints. The abilities of individual properties to discriminate among sources were tested via the Kruskal-Wallis rank sum test, and those properties that return a P value  $>0.05$  were excluded. Then, a stepwise discriminant function analysis (DFA) was performed to determine the proportion of samples that were accurately classified into the correct source groups. Third the mixture sampling-Importance-Resampling (*Mix SIR*) Bayesian model was used to estimate source proportion. The model predictions were evaluated using 9 to 11 sets of virtual sediment mixture for the tributary land forms/use and anomaly drainage network and the stream ordering drainage source proportion was multiplied by the values of the tracers selected as constituent properties in the composite signature and the resultant concentrations used as input to the un-mixing model. The predicted source proportions were then compared with the known proportions to assess the accuracy of the un-mixing model predictions. The outcomes of the virtual mixtures tests were assessed using the root mean squared error (*RMSE*) and mean absolute error (*MAE*)

#### Results

Using tributary landform as sediment source, S, Sr and  $\text{Fe}_2\text{O}_5$  were non-conservative and excluded from further tests. According to Kruskal-Wallis H-Test, Cu and Cr were not significant for next test, so 17 tracers selected to discriminant function analysis and then in the final step in this section Ba, Ni, Pb, MgO, MnO, V and Cao was selected to enter mixing model.

The results of mixture sampling-Importance-Resampling (*MixSIR*) Bayesian model shows that among chosen morphologic classes as well as surface source sediment in chehel-chay catchment, the Upper slope 60.9 % which located in the end of slope convex form and Ridge (narrow valleys) 28.5% have most proportion in sediment yield. According to comparisons of the predicted and known relative contributions from



landform and stream ordering, using the virtual mixtures showed that the RMSE ranged between 1.7% and 19.4% and MAE between 0.6% and 8.4 % in land forms.

#### **Discussion and suggestions**

Sediment tracing is successful methods to catchment management and maintaining soil and water. According to the results, concave slope is most contribution in sediment yield in Chehel-Chay catchment. Farm lands are located in this landforms and accelerated erosion process. Utilizing protective measures such as stabilizing plant roots and plotting on convex slopes is one of the effective methods to prevent soil erosion.

**Keywords:** Catchment, Chehel-Chay, Geochemical Tracers, Geomorphic Landforms.