



Geochemical Sediment Fingerprinting Using a Multivariate Composite Model in the Baghan Watershed

Somaye Dehghani^{1✉} | Mehdi Naderi Khorasgani² | Ahmad Karimi³ | Zeinab Naderizadeh⁴

1. Soil and water Research Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran: somayehdehghany@yahoo.com

2. Soil Science Department, Faculty of Agriculture University of Shahrekord, Iran. khnaderi@yahoo.com

3. Soil Science Department, Faculty of Agriculture University of Shahrekord, Iran. karimiahamd1342@yahoo.com

4. Soil and water Research Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran
naderizadeh_zeinab86@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 30, 2025

Revised: Aug. 26, 2025

Accepted: Aug. 31, 2025

Published online: Nov. 2025

Keywords:

*Sediment sources,
Sediment fingerprinting,
Chemical tracers,
Baghan watershed,
Bushehr Province*

ABSTRACT

Mismanagement of soil and land resources for meeting food demands has led to increased sediment load and exacerbated environmental issues in watershed areas. The Baghan Watershed, covering an area of 929 km², is located in the arid and warm climate of Bushehr Province, Iran. In recent years, agricultural expansion, the establishment of the Fajr Jam gas refinery, population growth, and industrial development have exerted growing pressure on the region's soil and water resources. This study aimed to identify sediment sources in the watershed using the sediment fingerprinting method. For this purpose, 120 potential sediment source sites were selected using the Latin hypercube sampling method, and 30 sediment samples were collected from stream confluences and sub-watershed outlets. Source samples included 63 from rangelands, 33 from agricultural lands (rainfed and irrigated), and 24 from orchards, taken from 0–20 cm soil depth. Geochemical data analysis revealed that only five tracers met the criteria for discriminant function analysis, with lead (Pb) being the most effective tracer. The first discriminant function accounted for 71.84% of the total variance. Results of the multivariate composite model showed that rangelands were the dominant sediment source (34%), followed by orchards, rainfed, and irrigated agricultural lands. This was attributed to steep slopes, highly erodible geological formations, and overgrazing. The model yielded an average relative error of 10.5% and an efficiency coefficient of 0.88, indicating a high level of accuracy and reliability in estimating the relative contributions of sediment sources in the Baghan watershed.

Cite this article: Dehghani, S., Naderi khorasgani, M., Karimi, A & Naderizadeh., Z (2025). Geochemical Sediment Fingerprinting Using a Multivariate Composite Model in the Baghan Watershed, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (9), 2503-2519. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.399458.669989>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.399458.669989>



EXTENDED ABSTRACT

Background and Aim:

Human mismanagement in the exploitation of land and soil resources to meet growing food demands has led to increased sediment loads and numerous on- and off-site issues in watershed areas. The Baghan watershed, covering an area of 929 km² and located in the coastal region of Bushehr Province, Iran, has a hot and arid climate. Agricultural development, the establishment of the Fajr Jam gas refinery, population growth due to migration, and industrial expansion have intensified the exploitation of the watershed's soil and water resources. This study aimed to identify the sources of sediments transported within the Baghan watershed using the sediment fingerprinting technique.

Methodology:

To achieve this objective, 120 potential sediment source points were selected using Latin Hypercube Sampling, and 30 sediment samples were collected from the confluences of channels and the main stream during field surveys. Composite sampling included 63 samples from rangelands, 33 from agricultural lands (rainfed and irrigated), and 24 from orchards, taken from 0–20 cm soil depth. Chemical analyses were conducted using standard laboratory methods. Sediment source differentiation was performed using chemical tracers, including organic carbon (OC), total nitrogen (TN), available phosphorus (P), and total concentrations of Fe, Zn, Cu, Mn, Pb, Ni, and Cd, along with element ratios such as Fe/Mn, Fe/P, and Pb/Ni. A multivariate composite model was employed to quantify the relative contributions of each sediment source.

Findings:

Results from the composite multivariate model based on geochemical tracers indicated that, among the land use types, rangelands were the dominant source of sediment, followed by orchards, rainfed, and irrigated agriculture. Rangelands contributed the highest proportion (34%) of sediment sources in the watershed.

Conclusion:

The high sediment contribution from rangelands is attributed to their extensive area, steep slopes, fragile geological formations, and overgrazing. These findings highlight the importance of managing rangeland use to reduce sediment production and support sustainable watershed management in arid regions.

Author Contributions.

Conceptualization, S. D and M. N.; methodology, A. K and S. D.; software, S. D and validation, S. D and M.D; formal analysis, S. D and investigation, S. D and M. N.; resources, S. D and; data curation, S. D and; writing—original draft preparation, S. D and Z. N writing—review and editing, S. D, M. N, A. K and Z. N visualization, S. D, M. N and A. K.; supervision, M. D.; project administration, S. D. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study for their valuable contributions. Special thanks are extended to the technical staff at the University of Shahroor for their support during data collection and analysis.

Ethical Considerations

This study was approved by the Ethics Committee of the University of Shahroor. The authors adhered to ethical research standards and avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and other forms of research misconduct.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

انگشت‌نگاری ژئوشیمیایی رسوبات با استفاده از مدل ترکیبی چندمتغیره در حوضه آبخیز باغان

سمیه دهقانی[✉]، مهدی نادری خوراسگانی^۲، احمد کریمی^۳ و زینب نادری زاده^۴

۱. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

بوشهر، ایران somayehdehghany@yahoo.com۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد. رایانامه: khnaderi@yhoo.com۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد. رایانامه: Karimiahmad1342@yahoo.com

۴. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

بوشهر، ایران naderizadeh_zeinab86@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۸	سوءمدیریت در بهره‌برداری از منابع خاک و اراضی به‌منظور تأمین نیازهای غذایی، موجب افزایش بار رسوبی و تشدید مشکلات زیست‌محیطی در حوضه‌های آبخیز شده است. حوضه آبخیز باغان با مساحت ۹۲۹ کیلومتر مربع در اقلیم گرم و خشک استان بوشهر قرار دارد و طی سال‌های اخیر به‌دلیل توسعه کشاورزی، احداث پالایشگاه گاز فجر جم، رشد جمعیت و گسترش صنایع، با فشار فزاینده‌ای بر منابع آب و خاک روبه‌رو شده است. هدف این پژوهش، منشأیابی رسوبات منتقل‌شده در این حوضه با استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب بوده است. برای این منظور، ۱۲۰ نقطه از منابع رسوبی با روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین تعیین و ۳۰ نمونه رسوب از مناطق تلاقی آبراهه‌ها و خروجی زیرحوضه‌ها جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری از منابع شامل ۶۳ نمونه مرتع، ۳۳ نمونه زراعی (دیم و آبی) و ۲۴ نمونه باغی از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر انجام گرفت. تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی نشان داد که از میان ردیاب‌های بررسی‌شده، پنج پارامتر شرایط ورود به تابع تشخیص را داشتند و عنصر سرب مؤثرترین ردیاب بود. تابع اول با ۸۴/۷۱ درصد، بیشترین واریانس را در تفکیک منابع رسوبی به خود اختصاص داد. نتایج مدل ترکیبی چندمتغیره نشان داد که مراتع با سهم ۳۴ درصدی، بیشترین منبع رسوب در حوضه هستند و پس از آن باغات، زراعت دیم و آبی قرار دارند. علت این وضعیت به شیب بالای اراضی، فرسایش‌پذیری سازندهای زمین‌شناسی و چرای بی‌رویه دام نسبت داده می‌شود. میانگین خطای نسبی کل ۱۰/۵ درصد و ضریب کارایی ۰/۸۸ برای مدل به‌دست آمد که نشان‌دهنده دقت و قابلیت اعتماد بالای مدل در برآورد سهم منابع رسوب در حوضه باغان است.
واژه‌های کلیدی: منابع رسوب، منشأیابی رسوب، ردیاب‌های شیمیایی، حوضه آبخیز باغان، استان بوشهر	

استناد: دهقانی، سمیه، نادری خوراسگانی، مهدی، کریمی احمد و نادری زاده، زینب (۱۴۰۴) انگشت‌نگاری ژئوشیمیایی رسوبات با استفاده از مدل ترکیبی چندمتغیره در حوضه آبخیز باغان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۹)، ۲۵۱۹-۲۵۰۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.399458.669989>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.399458.669989>

مقدمه

فرسایش سریع خاک و انتقال گسترده رسوبات به عنوان یکی از تهدیدهای فراگیر جهانی برای خدمات اکوسیستم، معیشت انسان و توسعه پایدار شناخته شده است (García-Ruiz et al., 2017; Zorratipour et al., 2021; Kuti & Ewemoje, 2021). فرسایش آبی به زمین‌های کشاورزی و منابع آبی آسیب می‌رساند و منجر به کاهش منابع آبی، مشکلات نابرابری خاک (Bekele & Gemi, 2021; Choukri et al., 2020; Chen et al., 2020; Bhattacharya et al., 2020) و رسوب‌گذاری در مخازن آب می‌شود (Choukri et al., 2020; al., 2020). از این رو، مدیریت هدفمند و بهینه منابع آب و خاک در جهان امروز از اولویت‌های اصلی به شمار می‌رود (Montanarella, 2015; Wu et al., 2020).

طراحی سیاست‌ها و استراتژی‌های حفاظتی مؤثر برای منابع آب و خاک مستلزم دسترسی به داده‌های دقیق و قابل اعتماد درباره منابع اصلی تولید رسوبات است؛ رسوباتی که پیامدهای خود را هم در محل تولید و هم در مناطق پایین‌دستی نشان می‌دهند (Collins et al., 2020). در این میان، حوضه رودخانه به عنوان واحدی کلیدی و بنیادی در مطالعات چشم‌انداز و چارچوب‌بندی پژوهش‌های علمی سیستم‌های رسوبی و توسعه استراتژی‌های مدیریت آبخیز به شمار می‌رود (Collins et al., 2020).

کاهش میزان تولید رسوب مستلزم اجرای طرح‌های جامع حفاظت خاک و مدیریت مؤثر رسوب در قالب مدیریت جامع آبخیزداری است. تحقق این هدف، مستلزم شناسایی دقیق منابع تولید رسوب، برآورد سهم نسبی هر منبع در رسوب‌زایی کل و تعیین نواحی حساس و بحرانی از نظر فرسایش در سطح حوضه آبخیز می‌باشد. در این زمینه، یکی از روش‌های پراستفاده در سطح جهانی برای تعیین سهم منابع مختلف در رسوب معلق، تکنیک منشأیابی رسوب است (Collins & Walling, 2013; Haddadchi et al., 2019; Miller et al., 2015).

منشأیابی رسوب به تکنیک‌هایی گفته می‌شود که با استفاده از برداشت‌های میدانی، ویژگی‌های ردیاب‌ها (tracers) و مدل‌های ریاضی ترکیبی، خاک فرسایش یافته از منابع متعدد را شناسایی و سهم‌بندی می‌کنند (Gruszowski et al., 2003). دو رویکرد سنتی و جدید برای تعیین منابع رسوب و سهم هر کدام وجود دارد؛ اما روش‌های سنتی به دلیل زمان‌بر بودن، هزینه زیاد و محدودیت‌های نمونه‌برداری مکانی و زمانی، کاربرد محدودی دارند (Collins et al., 2020; Walling, 2005; Collins & Walling, 2002). به همین دلیل، در چند دهه اخیر، استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب (sediment fingerprinting) به عنوان یک رویکرد مدرن و کارآمد برای شناسایی منابع غالب رسوبات ریزدانه در محیط‌های متنوع افزایش یافته است (Collins et al., 2020). این روش از ترکیب انتخاب‌شده‌ای از خواص فیزیکی و شیمیایی رسوبات بهره می‌گیرد که قابل اعتمادتر و جامع‌تر از استفاده از یک ویژگی منفرد هستند (Collins et al., 1998). به همین ترتیب، با ترکیب مناسب این خصوصیات جداکننده، سهم منابع مختلف رسوب در تولید کلی رسوب تعیین می‌شود (حیدری و همکاران، ۱۳۹۲).

استان بوشهر به عنوان یکی از مناطق خشک و محروم ایران، دارای اهمیت ویژه‌ای است. رودخانه مند به عنوان یکی از رودخانه‌های اصلی ناحیه مرکزی سواحل خلیج فارس، شامل چهار شاخه مهم است که رودخانه باغان یکی از شاخه‌های آب شیرین این رودخانه در حوضه آبخیز باغان واقع در ناحیه ساحلی استان بوشهر است. این رودخانه به منظور رفع کمبودهای آبی منطقه مورد توجه ویژه قرار گرفته است.

لذا حفاظت از حوضه آبخیز باغان جهت تأمین آب برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی ضروری است. در این راستا، تعیین منشأ رسوبات حوضه آبخیز باغان در استان بوشهر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین، با توجه به حساسیت موضوع منشأیابی رسوب، در این مطالعه از ردیاب‌های ژئوشیمیایی برای شناسایی منابع رسوب شامل مرتع، زراعت دیم، زراعت آبی و باغ استفاده شده است.

پیشینه پژوهش

روش انگشت‌نگاری رسوبات (Sediment Fingerprinting) طی سال‌های اخیر به عنوان رویکردی نوین و قابل اعتماد برای شناسایی منابع اصلی رسوب و ارزیابی سهم نسبی آن‌ها در فرآیند رسوب‌زایی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است (Uber et al., 2019; Fatahi, 2022; Upadhayay et al., 2020). al., می‌تواند منجر به نتایج نادرست و غیرواقعی در تعیین منبع رسوب شود. از این رو، ترکیب چند ردیاب یا حتی چند گروه ردیاب به طور هم‌زمان، به عنوان رویکردی دقیق‌تر در مطالعات انگشت‌نگاری توصیه شده است (Owens, 2022). در این زمینه، نصرتی (۱۳۹۰) با تمرکز بر عدم

قطعیّت در فرآیند منشأیابی، مدلی را در حوضه زیدشت ارائه داد. در این پژوهش، ۲۸ شاخص ژئوشیمیایی بر روی ۴۲ نمونه از منابع رسوب و ۱۴ نمونه از رسوبات موجود ارزیابی شد. تحلیل آماری توابع تشخیص به روش گام‌به‌گام، هفت ردیاب مؤثر را با دقت بیش از ۹۷ درصد در تفکیک منابع، شناسایی نمود. این ردیاب‌ها توانستند چهار منبع مختلف شامل: مرتع-فرسایش سطحی، زراعت-فرسایش سطحی، فرسایش آبراهه‌ای و دیمزار-فرسایش سطحی را از یکدیگر تفکیک کنند. به‌منظور برآورد سهم نسبی منابع، مدل بیزی بر پایه عدم قطعیت توسعه یافت. قدیمی و همکاران (۱۳۹۴) نیز با هدف تعیین منشأ رسوبات ورودی به سد قلجق در استان خراسان شمالی، از آنالیزهای شیمیایی بهره بردند. ارزیابی سهم زیرحوضه‌ها با مدل آماری چندمتغیره انجام شد که نشان داد تمامی زیرحوضه‌ها در رسوبدهی مشارکت داشته‌اند. یکی از زیرحوضه‌ها با سهم ۲۷/۳ درصد، بیشترین نقش را در تولید رسوب ایفا کرده که علت آن به وجود دیمزارها در دامنه‌های پرشیب و شرایط توپوگرافی خاص آن منطقه نسبت داده شد. در مطالعه‌ای دیگر، Sadeghi et al (2017) به بررسی نقش کاربری اراضی و ویژگی‌های زمین‌شناسی در یک آبخیز کوچک پرداختند. یافته‌ها نشان داد که سازندهای مارنی گچی قرمز با سهم ۸۵ درصد و کاربری مرتع با سهم ۸۸ درصد، به‌عنوان منابع اصلی رسوب‌زا شناخته شدند. در حوضه آبخیز تالاب چغاخور، محقق (۱۳۹۵) به‌منظور تحلیل سهم کاربری‌های مختلف در تولید رسوب، ۱۲ ویژگی فیزیکی و شیمیایی را به‌عنوان ردیاب بر ۴۵ نمونه رسوب سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متر) بررسی نمود. ترکیب بهینه شامل فلزات سنگین مانند مس، روی، کبالت، سرب، کادمیوم، کربن آلی، نیتروژن و نسبت آهن به فسفر به‌عنوان ردیاب‌های مؤثر شناخته شدند. سه رویکرد شامل مدل ترکیبی چندمتغیره، بهینه‌سازی سطح پاسخ و روش بیزی برای برآورد سهم نسبی کاربری‌ها به کار رفت که نتایج متناقضی را ارائه کردند؛ به‌طوری‌که در مدل بیزی و ترکیبی، کاربری مرتع، و در مدل سطح پاسخ، کشت دیم بیشترین سهم را داشتند. در مقیاسی متفاوت، Zhang et al. (2017) با بررسی رسوبات پس از یک بارش شدید در فلات لسی چین، از روش انگشت‌نگاری بهره گرفتند و اراضی بایر را به‌عنوان مهم‌ترین منبع رسوب شناسایی نمودند. همچنین، Nosrati et al. (2018) با استفاده از مدل اصلاح‌شده MixSIR و تحلیل آماری چندمتغیره، توانستند سهم هر زیرحوضه در تولید رسوب معلق را مشخص نمایند که نشان‌دهنده تنوع بالا در سهم منابع مختلف رسوبی بود. همچنین جلالی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی سهم انواع لندفرم‌های ژئومورفولوژیک در تولید رسوب با استفاده از تکنیک منشأیابی رسوب در حوزه آبخیز چهل چای استان گلستان پرداختند با استفاده از دستگاه XRF غلظت ۲۳ ردیاب ژئوشیمیایی اندازه‌گیری شد. پس از آزمون‌های دامنه، کروسکال-والیس و تحلیل تشخیص، در نهایت ردیاب‌های Ni, Ba, Pb, V, Mgo, Cao و بالاترین درصد توان تفکیک را داشتند.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

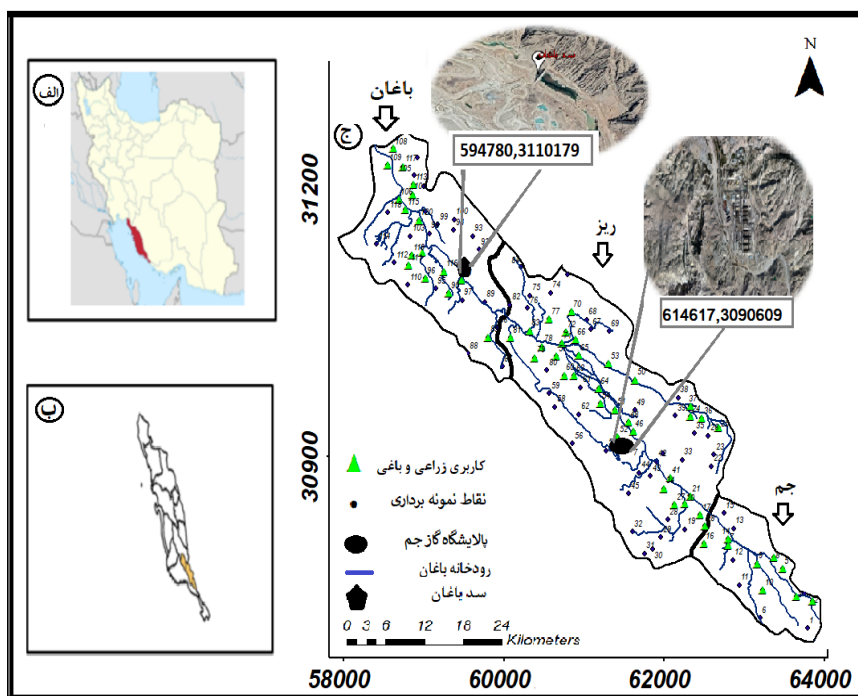
حوضه آبخیز باغان در جنوب شرقی استان بوشهر و در ۹۰ کیلومتری شرق شهرستان خورموج واقع شده است. این حوضه با وسعت ۹۲۹ کیلومتر مربع دارای مختصات ۵۸۰۰۰۰ تا ۶۴۰۰۰۰ متر طول شرقی و ۳۱۲۵۰۰۰ تا ۳۰۷۰۰۰۰ متر عرض شمالی می‌باشد (شکل ۱). رودخانه فصلی باغان رودخانه اصلی این حوضه می‌باشد. این منطقه از دیدگاه زمین‌شناسی دارای سنگ‌های مقاوم آهکی و دولومیت سازندهای آسماری-چهرم، سروک، فهلیان و کنگلومرای بختیاری می‌باشد. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۸۶۷ متر می‌باشد. بر اساس روش دومارتن گسترش یافته اقلیم خشک گرم، اقلیم غالب منطقه بوده و سایر اقلیم‌ها از جمله نیمه خشک گرم و نیمه خشک معتدل در ترازهای مختلف ارتفاعی حوزه یافت می‌شود. میانگین دمای سالیانه ۲۶ درجه سانتیگراد و متوسط بارندگی سالانه ۲۴۲ میلیمتر و رژیم رطوبتی خاک اریدیک^۱ ضعیف تا زیریک^۲ و رژیم حرارتی خاک هایپرترمیک^۳ می‌باشد (Banaei., 1998).

نمونه‌برداری و تجزیه فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک

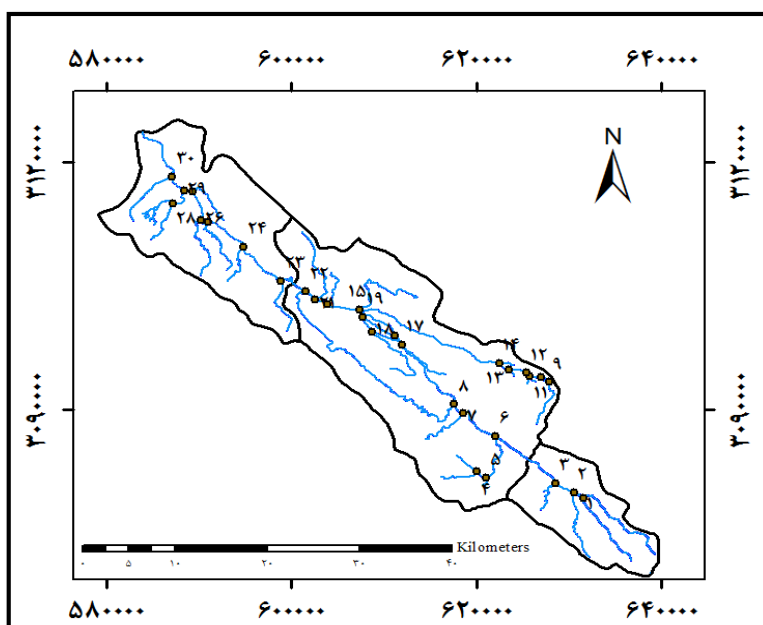
موقعیت ۱۲۰ نقطه نمونه‌برداری خاک به روش ابرمکعب لاتین^۴ و با استفاده از نقشه‌های کاربری، خاک، مدل رقومی ارتفاعی، زمین‌شناسی در محیط نرم‌افزار R، مشخص شد (Roudier et al., 2012). نمونه‌های خاک به صورت مرکب می‌باشند، به طوری که یک نمونه از مرکز و چهار نمونه به فاصله ۳۰ متر از مرکز در چهار جهت اصلی جغرافیایی از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر با یک بیلچه از جنس پلی اتیلن برداشته شد (Yang et al., 2016; Li et al., 2016). منابع رسوب شامل ۶۳ نمونه از مراتع، ۳۳ نمونه از اراضی زراعی (۲۶ نمونه زراعت دیم و ۷ نمونه زراعت آبی) و ۲۴ نمونه از باغات برداشته شد. به منظور انجام آزمایش‌های شیمیایی، نمونه‌های خاک هم وزن پنج نقطه،

1. Aridic
2. xeric
3. Hyper Thermic
4. Latin Hypercube

مخلوط شدند و به عنوان یک نمونه مرکب مورد تجزیه فیزیکی و شیمیایی قرار گرفتند. نمونه‌ها در سایه خشک شدند و پس از کوبیدن از الک ۲ و ۰/۰۶۳ میلی‌متر عبور داده شدند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز باغان (ج) در استان بوشهر (ب) و کشور ایران (الف)



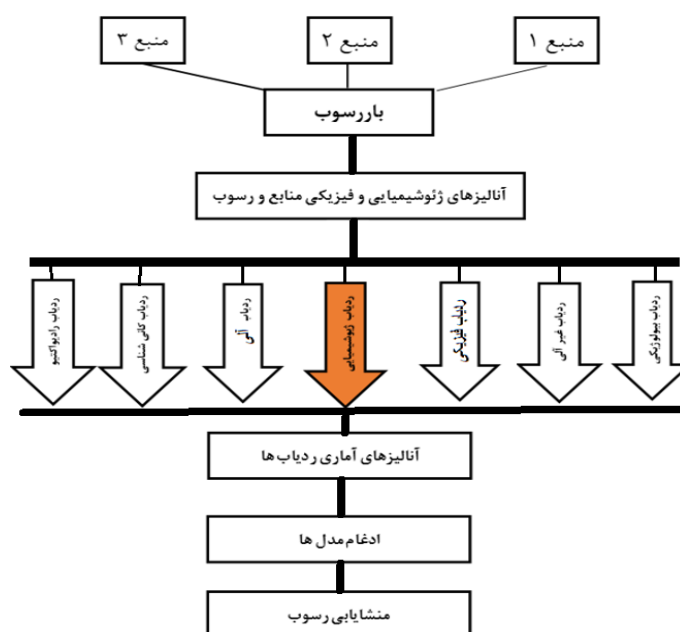
شکل ۲. موقعیت نمونه‌برداری رسوبات در حوزه آبخیز باغان

بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos., 1962) اسیدیته خاک گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر دارای الکتروود شیشه‌ای (McLean., 1983)، کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون کربن آلی توسط دی کرومات پتاسیم در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ و تیتراسیون توسط آمونیم فروسولفات نیم نرمال در مجاورت معرف فتل فتالین (Walkley & Black., 1934)، درصد کربنات

کلسیم معادل با روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال و تیتراسیون با هیدروکسید سدیم (Nelson, 1996) میزان فسفر با روش اولسن (Olsen, 1969)، نیتروژن با روش کج‌لدال (Page et al., 1982)، پتاسیم قابل استفاده به روش استات آمونیوم (Ali-Ahyai et al., 1993). برای تعیین غلظت کل فلزات سنگین نمونه‌های خاک (Fe & Cu, Zn, Pb, Ni, Mn, Cd)، یک گرم از نمونه‌های آماده‌سازی شده خاک توسط ترازوی دیجیتالی وزن شده و با استفاده از مخلوط اسید کلریدریک ۳۷ درصد (۳ cc) و اسید نیتریک ۶۵ درصد (۹cc) با نسبت ۱:۳ هضم شدند (Cao et al., 1984). سپس نمونه‌ها از کاغذ صافی واتمن ۴۶ میکرون عبور داده شده و در مرحله بعد نمونه‌ها با استفاده از آب مقطر به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده و برای آنالیز توسط دستگاه آماده شدند. غلظت عناصر در عصاره استخراج شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

پس از آماده‌سازی نمونه‌های خاک و رسوب، به منظور تفکیک منابع رسوب، از منشأیاب‌های شیمیایی شامل کربن آلی (OC)، نیتروژن کل (TN)، فسفر قابل جذب (P) و مقدار کل (Total) عناصر آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu)، منگنز (Mn)، سرب (Pb)، نیکل (Ni) و کادمیوم (Cd) استفاده شد (Nosrati et al., 2014). همچنین، نسبت‌های بین برخی عناصر از جمله Fe/P, Fe/Mn و Pb/Ni نیز به‌عنوان شاخص‌های ژئوشیمیایی کمکی مورد استفاده قرار گرفتند. یکی از مراحل کلیدی در فرآیند منشأیابی، انتخاب ترکیب بهینه‌ای از ردیاب‌ها است که قابلیت بالایی در تفکیک دقیق منابع مختلف رسوب داشته باشند (شکل ۳). این انتخاب با بهره‌گیری از روش آماری تحلیل تابع تشخیص گام‌به‌گام (Stepwise Discriminant Analysis) صورت گرفت (Collins & Walling, 2007).



شکل ۳. مراحل گام به گام منشأیابی رسوب

تشخیص داده‌های پرت

وجود داده‌های پرت یکی از عوامل کلیدی در کاهش دقت تحلیل‌های آماری، به‌ویژه در روش‌هایی مانند تجزیه تابع تشخیص (DFA) است. این داده‌ها می‌توانند فرآیند شناسایی مؤلفه‌های مهم را مختل کرده و موجب کاهش توان مدل در تفکیک منابع رسوب و افت صحت طبقه‌بندی شوند (Hair et al., 1998). به همین دلیل، شناسایی، تحلیل و در صورت لزوم اصلاح یا حذف این داده‌ها پیش از اجرای تحلیل‌های آماری از اهمیت زیادی برخوردار است (حکیم‌خانی و علیجان‌پور، ۱۳۸۹).

در این پژوهش، برای تشخیص داده‌های پرت، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و گرافیکی مورد استفاده قرار گرفت. روش‌های شناسایی داده‌های پرت به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: روش‌های یک‌متغیره، دومتغیره و چندمتغیره (Hair et al., 1998). با توجه به

اینکه روابط دومتغیره در این مطالعه مد نظر نبود، صرفاً از روش‌های یک‌متغیره و چندمتغیره استفاده شد.

دو رویکرد اصلی برای شناسایی داده‌های پرت یک‌متغیره به کار گرفته شد: ۱. روش دامنه‌ای، در این روش، داده‌هایی که خارج از بازه میانگین ± 3 برابر انحراف معیار قرار می‌گیرند، به‌عنوان داده پرت تلقی می‌شوند (Zhang et al., 1998) با این حال، این روش به دلیل استفاده از داده‌های پرت در محاسبه میانگین و انحراف معیار، خود می‌تواند به نتایج نادرستی منجر شود. ۲. روش میانه و فاصله بین چارکی (IQR) نمودار جعبه‌ای (Box Plot): نمودار جعبه‌ای (Box Plot) به‌عنوان ابزار بصری مؤثری برای بررسی تمرکز، پراکندگی و توزیع داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت (Tukey, 1977). این نمودار بر پایه چارک اول (Q1)، میانه، چارک سوم (Q3) و فاصله بین چارکی ($IQR = Q3 - Q1$) ترسیم شد. داده‌هایی که خارج از محدوده $Q1 - 1.5 \times IQR$ تا $Q3 + 1.5 \times IQR$ قرار گرفتند، به‌عنوان داده‌های پرت خفیف و داده‌هایی که فراتر از بازه $Q1 - 3 \times IQR$ یا $Q3 + 3 \times IQR$ بودند، به‌عنوان داده‌های پرت شدید در نظر گرفته شدند. در نمودار جعبه‌ای، این دو گروه به‌ترتیب با نماد دایره ($\circ$) و ستاره (*) نمایش داده شدند. این روش به‌دلیل عدم وابستگی به میانگین و انحراف معیار، کارایی بالاتری نسبت به روش‌های کلاسیک دارد. برای ارزیابی آماری ناهنجاری‌ها، آزمون مربع کای (Chi-Square) نیز اعمال گردید (Reimann et al., 2005).

علاوه بر تحلیل تک‌متغیره، برای شناسایی دقیق‌تر داده‌های پرت، از تحلیل چندمتغیره نیز استفاده شد. در این روش، ترکیب هم‌زمان چند متغیر برای هر مشاهده در نظر گرفته شد تا داده‌های پرت در یک فضای چندبعدی شناسایی شوند. با توجه به ماهیت چندمتغیره بسیاری از روش‌های آماری، بررسی داده‌های پرت در این فضا امری ضروری تلقی می‌شود؛ چراکه داده‌ای ممکن است در تحلیل تک‌متغیره طبیعی به‌نظر برسد، اما در ترکیب چند متغیر به‌عنوان یک مشاهده پرت شناسایی شود. در این راستا، فاصله مالهالانوبیس (Mahalanobis Distance) به‌عنوان معیاری معتبر برای تشخیص داده‌های پرت چندمتغیره مورد استفاده قرار گرفت (Hair et al., 1998).

انتخاب بهترین ترکیب ردیاب

برای بررسی کیفیت ویژگی‌های ژئوشیمیایی ردیاب‌ها در جداسازی منابع رسوب (شامل مرتع، زراعت دیم، زراعت آبی و باغ)، از یک رویکرد آماری دومرحله‌ای استفاده شد. ابتدا، آزمون ناپارامتری H کروسکال-والیس (Kruskal-Wallis) جهت بررسی معنی‌داری اختلاف میانگین غلظت ردیاب‌ها در کاربری‌های مختلف به کار رفت. ردیاب‌هایی که در این آزمون تفاوت معنی‌داری نشان دادند (ردیاب‌هایی که سطح معناداری آنها کمتر از ۰/۰۵ باشد منابع رسوب را تفکیک می‌کنند)، وارد مرحله بعد شدند.

در گام دوم، برای انتخاب ترکیبی از ویژگی‌ها با حداقل همبستگی داخلی و حداکثر قدرت تفکیک، تحلیل تابع تشخیص (Discriminant Function Analysis - DFA) اجرا گردید (Collins et al.). با این حال، استفاده از DFA مستلزم برقراری چند پیش‌فرض آماری شامل نرمال بودن چندمتغیره، برابری ماتریس‌های واریانس-کوواریانس، و عدم وجود هم‌خطی چندگانه بین متغیرهاست. بررسی نرمال بودن از طریق ترسیم نمودار چندک-چندک (Q-Q plot) مربع مالهالانوبیس در برابر توزیع مربع کای انجام شد. برای بررسی فرض برابری واریانس-کوواریانس بین گروه‌ها نیز از آزمون Box's M استفاده گردید؛ به‌طوری‌که عدم معنی‌داری این آزمون، تأییدکننده فرض برابری است.

جهت سنجش هم‌خطی چندگانه، از شاخص عدد تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (Variance Inflation Factor - VIF) استفاده شد. در این شاخص‌ها، مقدار عدد تحمل کمتر از ۰/۱ یا VIF بیشتر از ۱۰ نشان‌دهنده وجود هم‌خطی شدید است. به‌منظور رفع این مشکل، ترکیب ردیاب‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که شاخص VIF کمتر یا مساوی ۱۰ باشد و هم‌خطی بین متغیرها به حداقل برسد. پس از تأیید مفروضات DFA، برای تعیین تابع تشخیص و انتخاب مؤثرترین متغیرهای مستقل، از آماره Wilks' Lambda استفاده شد. این آماره نسبت تنوع درون گروهی به تنوع بین گروهی را می‌سنجد و کاهش مقدار آن نشانه‌ای از افزایش توان تفکیک مدل در جداسازی منابع رسوب است (Collins et al., 2012).

برآورد سهم منابع رسوب

در مرحله نهایی پژوهش، به‌منظور تعیین سهم نسبی هر یک از منابع احتمالی رسوب (شامل مرتع، زراعت دیم، زراعت آبی و باغ)، از رویکرد منشأیابی بر پایه مدل ترکیبی چندمتغیره استفاده شد. این مدل فرض می‌کند که غلظت هر ردیاب در نمونه رسوب، تابعی از میانگین غلظت آن ردیاب در منابع مختلف و سهم نسبی این منابع در ترکیب نهایی رسوب است. در این روش، میانگین مقادیر ردیاب‌ها در نمونه‌های برداشت‌شده از هر منبع، به‌عنوان نماینده آماری آن منبع وارد مدل می‌شود (Walling, 2005 و کوه‌پیمای و همکاران، ۱۳۹۰).

مدل ترکیبی برای یک ردیاب به صورت رابطه ۱ می‌باشد:

$$\hat{X}_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} b_j \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن: $\hat{X}_i$ مقدار برآوردی ردیاب i ام ($i=1, 2, m$)، a_{ij} مقدار میانگین ردیاب i ام در کاربری j ام، b_j سهم کاربری j ام، n تعداد کاربری و m تعداد خصوصیات ردیاب است. برای هریک از ردیاب‌ها، این رابطه تکرار می‌شود.

برای هر ردیاب، معادله‌ای مستقل تدوین شده و در مجموع، مدل ترکیبی شامل m معادله خواهد بود. به منظور تعیین مقادیر بهینه برای سهم هر منبع، به جای حل مستقیم، از روش‌های بهینه‌سازی بهره گرفته شد. در این پژوهش، روش کمینه‌سازی مجموع مربعات خطای نسبی برای تخمین بهینه ضرایب منابع به کار رفت.

$$R = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(C_i - (\sum_{s=1}^m P_s S_{si}))^2}{C_i} \right\} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن: C_i غلظت ردیاب i ام در نمونه رسوب، P_s سهم منبع رسوب i ام می‌باشد. این ویژگی پس از حداقل نمودن این معادله و اعمال شروط در آن به وسیله نرم‌افزار منتخب به عنوان خروجی مدل به دست می‌آید. S_{si} میانگین غلظت ردیاب i ام در منبع رسوب m ام می‌باشد. i نوع ردیاب مورد بررسی، m منبع رسوب و n تعداد ردیاب مورد بررسی می‌باشد. در حل معادلات دو شرط ذیل در نظر گرفته شد: الف) مقادیر ضریب سهم هریک از منابع رسوب باید بین صفر و یک باشد و ب) مجموع ضرایب سهم منابع رسوب باید برابر یک باشد (Nosrati., 2011 & 2021). فرایند بهینه‌سازی از طریق تکرار و آزمون مقادیر مختلف برای ضرایب منابع انجام شد تا مقدار تابع هدف R به حداقل ممکن برسد. سپس، برای هر ردیاب این فرایند تکرار شد و میانگین سهم منابع مختلف برای ارائه سهم نهایی استفاده گردید. در این معادله برای یافتن پاسخ‌های بهینه از نرم‌افزار Excel و افزونه Solver استفاده شد و برای ارزیابی مدل از ضریب کارایی مدل مطابق رابطه ۳ استفاده شد (Nash & Sutcliffe., 1970).

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن: ME (Model efficiency) ضریب کارایی مدل ناش-ساتکلیف، $\bar{X}$ مقادیر شبیه‌سازی شده، X_i مقادیر اندازه‌گیری شده، $\bar{X}_i$ میانگین مقادیر نمونه‌های رسوب می‌باشد.

یافته‌های پژوهش

به منظور منشأیابی رسوب در حوضه آبخیز باغان، از ردیاب‌های ژئوشیمیایی در ذرات کوچک‌تر از $63 \mu m$ میکرون استفاده شد. این آستانه اندازه، به دلیل کاهش اثر رقیق‌سازی ناشی از ذرات شن درشت و همچنین قابلیت بالای ذرات سیلت و رس در انتقال آلودگی‌ها انتخاب شد (Michelaki & Hancock, 2013; Tiecher et al., 2017). در این پژوهش، ردیاب‌های Pb ، Ni ، Zn ، Cd ، Fe ، K ، Cu ، Mn ، P ، OM ، N ، pH و $CaCO_3$ و نسبت‌های Fe/Mn ، Fe/P ، Pb/Ni بررسی شدند. توصیف آماری داده‌ها در دو جدول جداگانه برای منابع سطحی و رسوبات آورده شده است (جدول ۱ و ۲).

تشخیص داده‌های پرت

یکی از مراحل اساسی در منشأیابی رسوب، انتخاب ترکیبی مناسب از ردیاب‌هاست که قدرت جداسازی منابع مختلف رسوب را داشته باشند. این انتخاب با استفاده از تجزیه تابع تشخیص انجام گرفت. از آنجا که داده‌های پرت می‌توانند باعث کاهش دقت طبقه‌بندی و اختلال در تحلیل‌های آماری شوند، در این پژوهش، ابتدا وجود این داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شواهد کافی برای پرت بودن هیچ‌یک از داده‌ها وجود نداشت (شکل ۴) و بنابراین همه داده‌ها در تحلیل‌ها حفظ شدند. همچنین، آزمون مربع کای نشان داد بین توزیع تجربی و تئوریک تفاوت معنی‌داری وجود ندارد، که تأییدکننده عدم وجود داده پرت و امکان استفاده از تمامی ردیاب‌ها در جداسازی بود. به گفته Collins & Walling (2002) نیز در چنین شرایطی نباید داده‌ها حذف شوند. جهت بررسی توان تمایز ردیاب‌ها در جداسازی منابع مختلف رسوب، آزمون کروسکال-والیس اجرا شد. نتایج این آزمون (جدول ۳) نشان داد که به جز نسبت Pb/Ni ، سایر ردیاب‌ها در سطح معنی‌داری کمتر از 0.01 ، قادر به تفکیک کاربری‌های مختلف (مرتج، زراعت دیم، زراعت آبی و باغ) در حوضه آبخیز باغان هستند.



این موضوع بیانگر اختلاف معنی‌دار میانگین غلظت ردیاب‌ها بین کاربری‌های مختلف است. مطالعات پیشین مانند تحقیق Haddadchi et al (2014) نیز مؤید اثربخشی ردیاب‌هایی نظیر مس، آهن، روی و فسفر در جداسازی منابع رسوب بوده‌اند. پس از این مرحله، به منظور کاهش تعداد متغیرها و انتخاب ترکیب بهینه برای مدل‌سازی منشأیابی، از تحلیل تابع تشخیص استفاده شد (Collins et al., 2010; Nosrati et al., 2014).

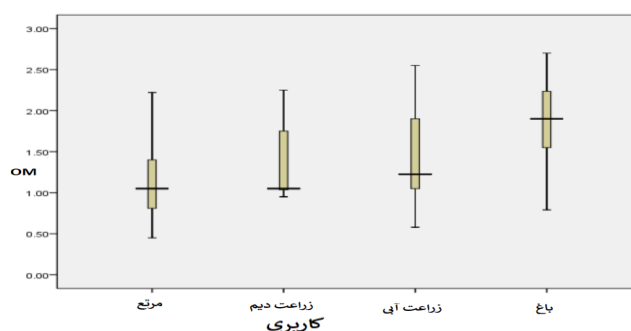
جدول ۱. توصیف آماری ردیاب‌های ژئوشیمیایی در نمونه‌های منابع رسوب (۱۲۰ نمونه)

متغیر	واحد	محدوده	کمترین	بیشترین	میانگین	ضریب تغییرات	واریانس	چولگی	افراستگی
pH*	-	۱/۵	۶/۷	۸/۲	۷/۵	۴/۱	۰/۱	-۰/۴	-۰/۴
OM	%	۲/۴	۰/۵	۲/۹	۱/۴	۴۴/۷	۰/۴	-۰/۶	-۰/۸
N	%	۰/۷	۰/۱	۰/۸	۰/۳	۴۱/۱	۰	۱/۲	۱/۵
P	mg.kg ⁻¹	۲۵/۲	۰/۵	۲۵/۷	۹/۱	۷۹/۹	۵۲/۳	-۰/۶	-۱/۱
K	mg.kg ⁻¹	۴۱۳/۴	۷۷/۶	۴۹۱	۲۵۱/۲	۳۹/۲	۹۷۰۱/۳	-۰/۴	-۰/۴
CaCO ₃	%	۶۳/۵	۳۳	۹۶/۵	۷۴/۲	۲۱/۱	۲۴۴/۴	-۱/۱	-۰/۶
Pb	mg.kg ⁻¹	۳۰	۵	۳۵	۲۲/۱	۷،۲۹	۴۳/۴	-۰/۱۸	-۰/۷۱
Zn	mg.kg ⁻¹	۴۴/۹	۲۲/۶	۶۷/۶	۴۷/۷	۱۶/۸	۶۴/۵	-۰/۲	-۰/۴
Ni	mg.kg ⁻¹	۵۴/۳	۱۴/۲	۶۸/۵	۳۴/۶	۳۵/۳	۱۴۹/۷	-۰/۹۳	-۰/۴۶
Mn	mg.kg ⁻¹	۳۳۱/۲	۱۴۷	۴۷۸/۲	۳۲۷/۸	۲۲/۸	۵۶۲۸	-۰/۷۲	-۰/۳
Cu	mg.kg ⁻¹	۱۸/۶	۱۴/۰۴	۳۲/۷	۲۲/۱۸	۱۴/۳۲	۱۰	-۰/۵۸	-۰/۹۸
Cd	mg.kg ⁻¹	۲/۶۳	۲/۷۷	۵/۴	۳/۹۴	۱۴/۶۱	-۰/۳۳	-۰/۱۰	-۰/۱۹
Fe	mg.kg ⁻¹	۱۱۶۰۵	۲۱۴۲	۱۳۷۴۷	۷۹۹۲	۳۲/۱	۶۶۱۱۰۰۰	-۰/۷۹	-۰/۴۹
Fe/Mn	-	۵۵/۵	۶/۳۲	۶۱/۹	۲۵/۷	۴۱/۵	۱۱۳/۹	-۰/۷۱	-۰/۹۶
Fe/P	-	۲۱۲۸۱	۸۴/۳	۲۱۳۶۶	۲۱۷۱/۳	۵۱/۸	۱۱۱۶۰۰۰۰	۱/۹۷	۱/۷
Pb/Ni	-	۰/۶	۰/۱	۰/۷	۰/۳	۴۲/۳	۰	-۰/۵	-۰/۵

* pH، OM، N، P، K، CaCO₃، Zn، Ni، Mn، Cu، Cd، Fe، Fe/Mn، Fe/P و Pb/Ni: به ترتیب برابر است با اسیدیته، ماده آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کربنات کلسیم معادل، غلظت کل سرب، غلظت کل روی، غلظت کل نیکل، غلظت کل منگنز، غلظت کل مس، غلظت کل کادمیوم و غلظت کل آهن، نسبت آهن به منگنز، نسبت آهن به فسفر و نسبت سرب به نیکل.

جدول ۲. توصیف آماری ردیاب‌های ژئوشیمیایی در نمونه‌های رسوب (۳۰ نمونه).

متغیر	واحد	محدوده	کمترین	بیشترین	میانگین	ضریب تغییرات	واریانس	چولگی	افراستگی
pH*	-	۱	۷	۸	۷/۵۷	۴/۶۶	۰/۱۲	-۰/۱۸	۱/۳۳-
OM	%	۰/۲۳	۰/۵	۰/۷۳	۰/۶	۱۰/۷	۰/۰۴	-۰/۲۳	-۰/۵۹
N	%	۰/۵۶	۰/۲۳	۰/۷۹	۰/۴۷	۴۱/۷	۰/۰۴	۲/۱	-۱/۶
P	mg.kg ⁻¹	۱۳/۳	۲/۵	۱۵/۸	۷/۲	۴۹/۵	۱۲/۸	-۰/۶۴	-۲/۵
K	mg.kg ⁻¹	۳۸	۱۰۰	۱۳۸	۱۱۶/۲	۸/۷	۱۰۲/۶	-۰/۴	-۰/۳
CaCO ₃	%	۵۰	۳۹	۸۹	۶۴/۷۵	۲۲/۴۹	۲۱۲	-۰/۷	۱/۰۶-
Pb	mg.kg ⁻¹	۲۶/۳	۵/۲	۳۱/۵	۱۲/۱۴	۴۳/۹۵	۲۸/۴۵	۲	۵/۵۱
Zn	mg.kg ⁻¹	۴۰/۴۰	۲۱/۸۰	۶۲/۲۰	۳۷/۹۹	۳۳/۱۴	۱۵۸/۴	-۰/۵۹	-۱/۱۸
Ni	mg.kg ⁻¹	۱۴/۴	۱۴/۹	۲۹/۳	۲۲/۶	۱۷/۲	۱۵/۲	-۰/۲۹	-۰/۶۱
Mn	mg.kg ⁻¹	۲۸۴/۲	۱۲۱/۹	۴۰۶/۲	۲۱۵/۷	۲۷/۹	۳۶۳۴	-۰/۲۸	۱/۱۲
Cu	mg.kg ⁻¹	۱۱/۷	۴/۵۰	۱۶/۲	۷/۹۶	۳۰/۷	۶	۱/۲	۳
Cd	mg.kg ⁻¹	۱/۴	۱/۱۵	۲/۵۵	۱/۸۳	۲۰	-۰/۱۴	-۰/۳۴	-۰/۴۷
Fe	mg.kg ⁻¹	۷۷۰	۴۳۸	۱۲۰۸	۷۵۴	۲۴/۹	۳۵۵۶۰	-۰/۲۹	-۰/۳۰
Mn/Fe	-	۱۶،۵	۱/۳۱	۶/۴۷	۳/۷۱	۳۳/۵۱	۱/۵۵	-۰/۵۸	-۰/۱۱
P/Fe	-	۲۶۴/۶	۱۵	۲۷۹/۶	۱۲۹/۶	۵۵	۵۰۸۹	-۰/۲۵	-۱
Ni/Pb	-	۱/۳۵	۰/۲	۱/۵	۰/۵۵	۲۶/۸	-۰/۰۷	۲/۳۱	۷/۴



شکل ۴. نمودار جعبه‌ای ماده آلی در نمونه منابع رسوب به منظور تشخیص داده پرت

جدول ۳. آزمون‌های بررسی توان ردیاب‌های ژئوشیمیایی در جداسازی انواع کاربری و معیارهای تشخیص هم‌خطی چندگانه.

ویژگی	واحد	مقادیر H (کروسکال-والیس)	پارامتر تحمل اولیه	عامل واریانس	پارامتر تحمل ثانویه	عامل واریانس
pH	-	۱۰/۹۸**	۰/۷۵	۱/۳۲	۰/۸۴	۱/۲۵
OM	%	۲۵/۲۵**	۰/۶۷	۱/۴۷	۰/۷۹	۱/۴۲
N	%	۱۵/۷۷**	۰/۷۷	۱/۲۸	۰/۷۸	۱/۲۸
P	mg.kg ⁻¹	۴۱/۴۴**	۰/۱۵	۱۶/۵	-	-
K	mg.kg ⁻¹	۱۳/۴۰**	۰/۷۹	۱/۲۵	۰/۸۱	۱/۲۵
CacO ₃	%	۹/۲۵**	۰/۸۲	۱/۲۱	۰/۹	۱/۲۱
Pb	-	۳۰/۱۰**	۰/۰۹	۱۲	-	-
Zn	mg.kg ⁻¹	۲۳/۱۹**	۰/۷۲	۱/۳۶	۰/۷۹	۱/۲
Ni	mg.kg ⁻¹	۳۴/۸۵**	۰/۰۶	۱۵/۲۳	-	-
Mn	mg.kg ⁻¹	۲۱/۵۰**	۰/۰۳	۲۶/۴	-	-
Cu	mg.kg ⁻¹	۲۲/۸۴**	۰/۸۱	۱/۲۲	۰/۸۳	۱/۱۹
Cd	mg.kg ⁻¹	۸/۸۱**	۰/۷۳	۱/۳۵	۰/۸	۱/۲۹
Fe	mg.kg ⁻¹	۲۳/۳۰**	۰/۰۱	۵۸/۷	-	-
Fe/Mn	-	۸/۷۸**	۰/۰۱	۶۰/۸	۰/۷۹	۱/۱
Fe/P	-	۲۹/۱۲**	۰/۱۳	۷/۳۶	۰/۸۸	۱/۲
Pb/Ni	-	۱/۶۳ ^{ns}	۰/۰۶	۱۵/۵۱	-	-

pH, OM, N, P, K, CaCO₃, Pb, Zn, Ni, Mn, Cu, Cd, Fe, Fe/Mn, Fe/P, Pb/Ni: به ترتیب برابر است با اسیدیته، ماده آلی، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کربنات کلسیم معادل، غلظت کل سرب، غلظت کل روی، غلظت کل نیکل، غلظت کل منگنز، غلظت کل مس، غلظت کل کادمیوم و غلظت کل آهن، نسبت آهن به منگنز، نسبت آهن به فسفر و نسبت سرب به نیکل.

نتایج تابع تشخیص

یکی از شروط اساسی در به‌کارگیری تحلیل تابع تشخیص، اطمینان از برقراری پیش‌فرض‌های آماری مانند نرمال چندمتغیره، برابری واریانس-کوواریانس و نبود هم‌خطی چندگانه میان متغیرهاست. در این پژوهش، بررسی این پیش‌فرض‌ها نشان داد که توزیع داده‌ها از نرمال چندمتغیره تبعیت می‌کنند. این نتیجه با استفاده از نمودار چندک-چندک فاصله ماهالانویس تأیید شد. برای بررسی برابری ماتریس واریانس-کوواریانس میان گروه‌های مختلف کاربری، از آزمون Box's M استفاده شد. مقدار این آزمون برابر با ۱۹/۶ به‌دست آمد که در سطح اطمینان ۹۹ درصد (Sig=0.21) معنی‌دار نبود. بنابراین، فرض برابری ماتریس‌های کوواریانس تأیید شد و استفاده از تحلیل تابع تشخیص امکان‌پذیر بود.

در ادامه، جهت ارزیابی وجود هم‌خطی چندگانه میان متغیرهای مستقل، از شاخص‌های آماری پارامتر تحمل (Tolerance) و عامل تورم واریانس (Variance Inflation Factor - VIF) استفاده شد. بررسی جدول ضرایب (Coefficients) نشان داد که مقادیر VIF برای متغیرهایی مانند فسفر، سرب، نیکل، منگنز و نسبت‌های Fe/Mn و Pb/Ni بالاتر از حد مجاز بوده (VIF > 10)، که نشان‌دهنده

هم‌خطی شدید میان این متغیرهاست. لذا این متغیرها از مدل حذف شدند. از نظر مفهومی، پارامتر تحمل، مقدار واریانس متغیر پیش بین است که به وسیله سایر متغیرهای پیش بین تبیین نشده است. اگر اندازه پارامتر تحمل در دامنه ۰/۴ باشد جای نگرانی دارد، اما اگر در دامنه ۰/۱ باشد مشکل آفرین است. پس از حذف متغیرهای مذکور، مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامتر تحمل سایر متغیرها همگی بیش از ۰/۴ بودند و حداقل مقدار ثبت‌شده ۰/۷۹ بود. این نتایج بیانگر آن است که هم‌خطی چندگانه در مدل نهایی برطرف شده و متغیرهای باقی‌مانده از نظر آماری استقلال کافی دارند. بنابراین، شرایط لازم برای اجرای دقیق تحلیل تابع تشخیص فراهم بوده و نتایج حاصل از آن از اعتبار آماری برخوردار هستند.

از میان ردیاب‌هایی که وارد تحلیل تشخیص شدند فقط ۵ پارامتر شرایط ورود به تابع تشخیص را داشتند (جدول ۴). عنصر سرب اولین و نسبت Fe/P آخرین متغیرهای ورودی بودند که این امر نشان‌دهنده این است که این عنصر بیشترین درصد طبقه‌بندی (۰/۶۹) صحیح را داشت و Fe/P اثری بر افزایش درصد طبقه‌بندی صحیح نداشته ولی با توجه به کم کردن آماره Wilks Lambda باعث افزایش اختلاف بین گروه‌ها شده است.

جدول ۴. مراحل افزوده شدن ردیاب‌های ژئوشیمیایی در توابع تشخیص گام‌به‌گام در واحدهای کاربری.

مرحله	متغیر افزوده شده	ویلیکس لامبدا
۱	Pb	۰/۶۹
۲	Zn	۰/۵۲
۳	Cu	۰/۴۳
۴	OM	۰/۳۷
۵	P/Fe	۰/۳۳

مطالعات (Nosrati et al 2014, 2021) و Stone et al (2014) روش تحلیل تشخیص را به‌منظور جداسازی ردیاب‌های گوناگون در روش منشایی رسوب استفاده کردند و به کارآمد بودن روش در تفکیک منابع رسوب با استفاده از ردیاب‌ها اذعان نمودند. جدول نتایج ۵ آزمون تابع تحلیل تشخیص را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول، ۳ تابع بر اساس خصوصیات ردیاب‌ها مشخص شده است. درصد واریانس سه تابع به ترتیب برابر ۸۴/۷۱، ۱۲/۶۱ و ۲/۸۱ می‌باشد. طبق واریانس کل، اولین تابع، بیشترین سهم را در جداسازی گروه‌ها داشت و سایر توابع به ترتیب شماره در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند (جدول ۵). توابع به‌دست‌آمده از این روش مستقل می‌باشند و سهم آن‌ها در جداسازی گروه‌ها هم‌پوشانی ندارد. در این جدول معنی‌داری توابع به‌وسیله آماره کای اسکور مشخص شده است. این آماره به‌منظور صحت یا عدم صحت گروه‌بندی ردیاب‌ها در توابع استفاده شد و معنی‌داری بودن این آماره نشان‌دهنده گروه‌بندی خوب ردیاب‌ها در این تابع بود.

جدول ۵. مقادیر ویژه توابع تشخیص کانونی مورد استفاده در آنالیز تشخیص گام‌به‌گام ردیاب‌های ژئوشیمیایی در تشخیص واحدهای کاربری

توابع	مقادیر ویژه	درصد واریانس	درصد تجمعی	همبستگی کانونی	مربع کای	ویلیکس لامبدا	سطح معنی‌داری
۱	۱/۳۶	۸۴/۷۲	۸۴/۷۱	۰/۷۶	۱۲۴/۶۱	۰/۳۳	۰/۰۰۰
۲	۰/۲۰	۱۲/۶۱	۹۷/۲	۰/۴۱	۲۶/۱۱	۰/۷۹	۰/۰۰۱
۳	۰/۰۴	۲/۸۱	۱۰۰	۰/۲۲	۵/۰۰	۰/۹۵	۰/۰۱

نوع ردیاب‌های برگزیده به‌وسیله روش تحلیل تشخیص نشان می‌دهد که انتخاب اولیه ردیاب‌ها از گروه‌های مختلف یک ترکیب قدرتمند از ردیاب‌ها برای تشخیص منابع استفاده شده است. محقق (۱۳۹۵) بیان کرد عنصر مس با بیشترین درصد طبقه‌بندی صحیح (۷۳/۳) اولین و کادیم آخرین عنصر ورودی به تابع تشخیص گام‌به‌گام در تعیین واحدهای کاربری می‌باشد.

تعیین سهم نسبی تولید رسوب

با توجه به معنی‌دار شدن تابع تشخیص و دقت بالای طبقه‌بندی ردیاب‌ها، ترکیب بهینه‌ای از ردیاب‌های ژئوشیمیایی وارد مدل ترکیبی چندمتغیره شد. در این مدل، با استفاده از روش حداقل‌سازی مجموع مربعات باقیمانده، سهم نسبی هر یک از منابع رسوب برای هر ردیاب بهینه‌سازی شده و در نهایت درصد مشارکت هر کاربری در تولید رسوب تعیین گردید (جدول ۶). نتایج مدل نشان داد که در بین کاربری‌های مورد بررسی، کاربری مرتع با ۳۴ درصد بیشترین سهم را در تولید رسوبات حوضه آبخیز باغان دارد، و پس از آن به ترتیب باغ (۲۵/۷ درصد)،

زراعت دیم (۲۲/۳ درصد) و زراعت آبی (۱۸ درصد) قرار گرفتند.

کاربری مرتع به عنوان اصلی ترین منبع رسوب در منطقه شناخته شد. این امر را می توان به عواملی چون: مساحت زیاد مراتع، شیب تند اراضی (بیش از ۲۵ درصد)، ویژگی های زمین شناسی حساس به فرسایش، چرای بی رویه دام، قطع پوشش گیاهی جهت سوخت، و تغییر کاربری اراضی نسبت داد. این شرایط سبب کاهش کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک در این کاربری شده که خود با کاهش کربن آلی، کاهش پایداری خاکدانه ها، کاهش تخلخل و ظرفیت نگهداری آب، و افزایش چگالی ظاهری خاک همراه بوده است.

کاربری باغ دومین منبع مهم تولید رسوب بود. با وجود مساحت کمتر نسبت به مرتع، این کاربری سهم بالایی در تولید رسوب دارد. علت این موضوع، استقرار باغات در شیب های تند، نبود مدیریت اصولی خاک و آب، و استفاده از روش های سنتی و نامناسب آبیاری نظیر غرقابی در این شیب هاست. همچنین، برخی باغات در دل اراضی مرتعی واقع شده اند که موجب تشدید فرآیندهای فرسایشی می شود.

کاربری زراعت دیم با وجود مساحت نسبتاً زیاد، سهم نسبتاً کمتری در تولید رسوب داشت. این مسئله را می توان به دو عامل اصلی نسبت داد: اول، کم بودن منابع آبی در این اراضی که خود منجر به کاهش تولید رواناب و رسوب می شود؛ دوم، احتمال به تله افتادن رسوبات طی مسیر انتقال در زیرحوضه، که مانع از خروج بخش قابل توجهی از رسوبات به ایستگاه خروجی می گردد.

کمترین سهم در تولید رسوب به کاربری زراعت آبی تعلق داشت. علت این موضوع را می توان در مساحت محدود این اراضی، استقرار در شیب های ملایم تر و همچنین دارا بودن میزان بالاتر کربن آلی خاک نسبت به سایر کاربری ها دانست. کربن آلی بیشتر باعث افزایش چسبندگی خاک و کاهش فرسایش پذیری آن می شود.

نتایج این پژوهش با یافته های برخی مطالعات پیشین مقایسه شد. به عنوان مثال، نتایج با تحقیق Collins et al (1997) در دو حوضه در انگلستان که مرتع را به عنوان منبع اصلی رسوب معرفی کرده اند، و همچنین Collins et al (2012) که کمترین سهم را به زراعت آبی نسبت داده اند، مطابقت دارد. در مقابل، یافته ها با نتایج Nosrati et al (2011) و Wallbrink et al (2003) که مرتع را به عنوان کمترین منبع رسوب معرفی کرده اند، مغایر است.

مطالعه محقق (۱۳۹۵) در حوضه آبخیز چغاخور نیز نشان داد که مرتع ضعیف بیشترین و باغ کمترین سهم را در تولید رسوبات دارد، که با بخشی از نتایج این پژوهش هم راستا نیست. همچنین، در پژوهش Haddadchi et al (2014) در منطقه طالقان، ۱۱ ردیاب ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج دو مدل ترکیبی حاکی از نقش پررنگ زمین های کشاورزی در تولید رسوبات معلق و بستری بود. این مدل ها دقت حدود ۷۱ درصدی در منشأیابی ارائه دادند. مطالعه Smith et al (2013) نیز با استفاده از مدل ترکیبی چندمتغیره نشان داد که ۶۴ درصد از رسوبات تولید شده ناشی از جنگل های سوخته بوده و ضریب کارایی مدل در این پژوهش ۹۸ درصد برآورد شده بود. همچنین، Franz et al (2014) در شهر برازیلیا با استفاده از مدل حداقل مربعات، منشأ ۸۵ درصد رسوبات را مناطق مسکونی معرفی کردند.

ارزیابی دقت مدل

مدل ترکیبی چندمتغیره مورد استفاده در این پژوهش، دقت بالایی از خود نشان داد. میانگین خطای نسبی برای نمونه ها بین ۱/۸۹ تا ۱۳ درصد متغیر بود و میانگین خطای نسبی کل برابر با ۱۰/۵ درصد به دست آمد. همچنین، ضریب کارایی مدل برابر با ۰/۸۸ برآورد شد که نشان دهنده قابلیت اطمینان و کارایی مناسب مدل در برآورد سهم نسبی منابع رسوب در حوضه آبخیز باغان است. پژوهشگران معتقدند برای نشان دادن اهمیت نسبی منابع گوناگون در تولید رسوب یک حوضه آبخیز منشأیابی رسوب با استفاده از مدل چندمتغیره یکی از کارآمدترین راهکارهاست (Collins et al., 2013; Stone et al., 2014).

جدول ۶. سهم کل کاربری طبق مدل ترکیبی چندمتغیره

کاربری	ردیاب ژئوشیمیایی
مرتع	۳۴
زراعت دیم	۲۲/۳
زراعت آبی	۱۸
باغ	۲۵/۷

نتیجه گیری و پیشنهادها

بررسی سهم نسبی کاربری‌های مختلف اراضی در تولید رسوب با بهره‌گیری از مدل ترکیبی چندمتغیره و ردیاب‌های ژئوشیمیایی نشان داد که کاربری مرتع با داشتن بالاترین سهم (۳۴ درصد) به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تولید رسوب در حوضه آبخیز باغان شناخته می‌شود. این امر احتمالاً به‌واسطه مساحت گسترده، شیب‌های تند، چرای مفرط دام، تخریب پوشش گیاهی و حساسیت زمین‌شناسی منطقه قابل توجهی است. پس از آن، کاربری باغ به دلیل شیب زیاد، آبیاری غرقابی و نبود اقدامات حفاظتی مؤثر، سهم قابل توجهی از رسوب حوضه را به خود اختصاص داده است. کاربری دیم با وجود گستردگی بیشتر نسبت به باغ، به دلیل موقعیت جغرافیایی خشک‌تر و فرصت ته‌نشینی بیشتر رسوبات در مسیر انتقال، سهم کمتری در تولید رسوب داشته است. نهایتاً، کاربری زراعت آبی با کمترین سهم در تولید رسوب، به دلیل مساحت محدود، شیب کم و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک ازجمله محتوای بالاتر کربن آلی، تأثیر ناچیزی در فرسایش منطقه داشته است. ارزیابی عملکرد مدل چندمتغیره نیز نشان داد که با میانگین خطای نسبی ۱۰/۵ درصد و ضریب کارایی ۰/۸۸، مدل از دقت و اعتبار مناسبی برخوردار بوده و توانسته به‌طور مؤثری سهم کاربری‌ها را در تولید رسوب برآورد نماید. این نتایج ضمن هم‌راستایی با برخی مطالعات پیشین، در برخی موارد نیز تفاوت‌هایی با پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد که ناشی از تفاوت‌های اکولوژیکی، مدیریتی و شرایط فیزیوگرافی مناطق مختلف است. درمجموع، یافته‌های این مطالعه نشان‌دهنده کارآمدی بالای تکنیک منشأیابی رسوب در درک دینامیک رسوب و برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع طبیعی در مقیاس حوضه آبخیز می‌باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود برای کاهش میزان رسوب‌زایی در حوضه آبخیز باغان، مدیریت کاربری‌های مرتعی به‌ویژه در مناطق با شیب بالا در اولویت قرار گیرد. اعمال روش‌های حفاظت خاک مانند کنترل چرای دام، جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی و اجرای عملیات بیولوژیکی و مکانیکی در اراضی مرتعی و باغی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش فرسایش داشته باشد. همچنین توصیه می‌شود آبیاری باغ‌ها به‌صورت اصولی و مطابق با شیب اراضی و ظرفیت نگهداری خاک اصلاح گردد. استفاده از روش‌های نوین آبیاری و اجرای عملیات خاک‌ورزی حفاظتی در زراعت دیم نیز می‌تواند در کاهش سهم رسوب این کاربری مؤثر باشد. در نهایت، تکرار مطالعات منشأیابی رسوب در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف و ترکیب روش‌های آماری پیشرفته‌تر با داده‌های میدانی می‌تواند دقت مدل‌های منشأیابی را افزایش داده و مبنای تصمیم‌گیری‌های بهتری در مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز فراهم کند.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

- حکیم خانی، شاهرخ، و علیچکانپور، احمد (۱۳۸۹). تشخیص داده‌های پرت در روش منشأیابی رسوب. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی). دوره ۱۷: ۴۳-۲۳.
- حیدری، کهزاد؛ نجفی نژاد، علی؛ خرمالی، فرهاد و بابائزاد، منوچهر (۱۳۹۲). تعیین سهم واحدهای کاری در تولید رسوب معلق با استفاده از روش منشأیابی رسوب (مطالعه موردی: آبخیز تول‌بنه، استان گلستان). مجله پژوهش‌های فرسایش محیطی جلد ۳. شماره ۳ صفحات ۳۸-۲۷.
- قدیمی، علی اصغر؛ خداشناس، سعیدرضا، اکبرزاده، محمد رضا و قهرمان، بیژن (۱۳۹۴). منشأیابی رسوبات ورودی به دریاچه سدها با استفاده از عناصر شیمیایی (مطالعه موردی: رودخانه قلجق در استان خراسان شمالی). نشریه سد و نیروگاه آبی/ایران، دوره ۲. شماره ۶. صفحات ۳۱-۲۰.
- کوهپایما، اصغر، فیض نیا، سادات، احمدی، حسن، و هاشمی، سید علی اصغر (۱۳۹۰). بررسی ارتباط بین رسوبات نهشته شده در پشت بندهای کوچک با منابع تولید رسوب بر اساس روش منشأیابی در استان سمنان. پژوهش‌های آبخیزداری. پژوهش و سازندگی. دوره ۲۴، صفحات ۲۸-۲۰.
- محقق، پروانه. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر کاربری اراضی بر تولید رواناب و رسوب در حوضه آبخیز چغاخور (استان چهارمحال و بختیاری). پایان‌نامه دکتری فیزیک و حفاظت خاک. دانشگاه شهرکرد. ۱۵۲ صفحه.
- نصرتی، کاظم. (۱۳۹۰). منشأیابی رسوب بر اساس برآورد عدم قطعیت. پژوهش‌های آب/ایران، سال پنجم. شماره ۹. صفحات ۶۰-۵۱.

REFERENCES

- Ali-Ahyai, M., & Behbahani Zadeh, A. A. (1993). Methods of Soil Analysis Descriptions. *Soil and Water Research Institute. Technical Paper*, (893).
- Banaei, M. H. (1999). Moisture and thermal map of Iranian soils. *Soil and Water Research Institute, Tehran, Iran*.
- Bekele, B., & Gemi, Y. (2021). Soil erosion risk and sediment yield assessment with universal soil loss equation and GIS: in Dijo watershed, Rift valley Basin of Ethiopia. *Modeling Earth Systems and*

- Environment*, 7(1), 273-291.
- Bhattacharya, R. K., Chatterjee, N. D., & Das, K. (2020). Sub-basin prioritization for assessment of soil erosion susceptibility in Kangsabati, a plateau basin: a comparison between MCDM and SWAT models. *Science of the Total Environment*, 734, 139474.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Cao, H. F., Chang, A. C., & Page, A. L. (1984). *Heavy metal contents of sludge-treated soils as determined by three extraction procedures* (Vol. 13, No. 4, pp. 632-634). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Chen, C. N., Tfwala, S. S., & Tsai, C. H. (2020). Climate change impacts on soil erosion and sediment yield in a watershed. *Water*, 12(8), 2247.
- Choukri, F., Raclot, D., Naimi, M., Chikhaoui, M., Nunes, J. P., Huard, F., ... & Pépin, Y. (2020). Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2), 141-153.
- Collins, A. L., & Walling, D. E. (2002). Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of hydrology*, 261(1-4), 218-244.
- Collins, A. L., & Walling, D. E. (2007). Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology*, 88(1-2), 120-138.
- Collins, A. L., Blackwell, M., Boeckx, P., Chivers, C. A., Emelko, M., Evrard, O., ... & Zhang, Y. (2020). Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. *Journal of Soils and Sediments*, 20(12), 4160-4193.
- Collins, A. L., Walling, D. E., & Leeks, G. J. L. (1998). Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(1), 31-52.
- Collins, A. L., Zhang, Y. S., Hickinbotham, R., Bailey, G., Darlington, S., Grenfell, S. E., ... & Blackwell, M. (2013). Contemporary fine-grained bed sediment sources across the River Wensum Demonstration Test Catchment, UK. *Hydrological Processes*, 27(6), 857-884.
- Collins, A. L., Zhang, Y., McChesney, D., Walling, D. E., Haley, S. M., & Smith, P. (2012). Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modelling. *Science of the Total Environment*, 414, 301-317.
- Collins, A. L., Zhang, Y., Walling, D. E., Grenfell, S. E., & Smith, P. (2010). Tracing sediment loss from eroding farm tracks using a geochemical fingerprinting procedure combining local and genetic algorithm optimisation. *Science of the Total Environment*, 408(22), 5461-5471.
- Fatahi, A., Gholami, H., Esmaeilpour, Y., & Fathabadi, A. (2022). Fingerprinting the spatial sources of fine-grained sediment deposited in the bed of the Mehran River, southern Iran. *Scientific Reports*, 12(1), 3880.
- Franz, C., Makeschin, F., Weiß, H., & Lorz, C. (2014). Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil—using the fingerprint approach. *Science of the Total Environment*, 466, 513-523.
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., & Cerdà, A. (2017). Ongoing and emerging questions in water erosion studies. *Land Degradation & Development*, 28(1), 5-21.
- Ghadimi, A. A., Khodashenas, S. R., Akbarzadeh, M. R., & Ghahraman, B. (2015). Sediment Fingerprinting Entering the Lake Dam Using Chemicals (Case Study: Qoljoq River in North Khorasan province). *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*, 2(6), 20-31 .(in persian).
- Gruszowski, K. E., Foster, I. D., Lees, J. A., & Charlesworth, S. M. (2003). Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK. *Hydrological Processes*, 17(13), 2665-2681.
- Haddadchi, A., Hicks, M., Olley, J. M., Singh, S., & Srinivasan, M. S. (2019). Grid-based sediment tracing approach to determine sediment sources. *Land Degradation & Development*, 30(17), 2088-2106.
- Haddadchi, A., Nosrati, K., & Ahmadi, F. (2014). Differences between the source contribution of bed material and suspended sediments in a mountainous agricultural catchment of western Iran. *Catena*, 116, 105-113.
- Hair, J. F. (2011). Multivariate data analysis: An overview. *International encyclopedia of statistical science*, 904-907.
- Hakimkhani, Sh., & Alijanpour, A. (2010). Detection of outlier data in sediment source fingerprinting method. *Journal of Soil and Water Conservation Research (Agricultural and Natural Resources Sciences)*, 17, 23-43.(in persian..



- Heidary, K., Najafi Nejad, A., Khormali, F., & Baba Nejad, M. (2013). Determining land units contributions to suspended sediment yield using sediment fingerprinting method (Case study: Tull Bane Basin, Golestan Province). *Quarterly Journal of Environmental Erosion Researches*, (11), 27–38.(in persian).
- Kouhpeima, A., Hashemi, S. A. A., Feiznia, S., & Ahmadi, H. (2010). Using sediment deposited in small reservoirs to quantify sediment yield in two small catchments of Iran. *Journal of Sustainable Development*, 3(3), 133.(in persian).
- Kuti, I. A., & Ewemoje, T. A. (2021). Modelling of sediment yield using the soil and water assessment tool (SWAT) model: a case study of the Chanchaga Watersheds, Nigeria. *Scientific African*, 13, e00936.
- Li, F., Zhang, J., Huang, J., Huang, D., Yang, J., Song, Y., & Zeng, G. (2016). Heavy metals in road dust from Xiandao District, Changsha City, China: characteristics, health risk assessment, and integrated source identification. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13), 13100-13113.
- Michelaki, K., & Hancock, R. G. (2013). Reassessment of elemental concentration data of sediments from the western delta of the Nile River. *Open Journal of Archaeometry*, 1(1), e2-e2.
- Miller, J. R., Mackin, G., & Miller, S. M. O. (2015). *Application of geochemical tracers to fluvial sediment* (p. 142). Cham: Springer International Publishing.
- Mohaghegh. P.(2016). Evaluation of land use type impact on runoff and sediment production in the Chughakhor watershed (Chaharmahal va Bakhtiari province). *The thesis of Ph.D in soil science. Faculty of Agriculture, Shahrekord University*.(in persian).
- Montanarella, L. (2015). Agricultural policy: Govern our soils. *Nature*, 528(7580), 32-33.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical And Microbiological Properties*, 9, 539-579.
- 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.
- Nosrati, K. (2011). Manshāyābi-ye resūb bar asas barāvard-e adam-e qat'iyat [Sediment source identification based on uncertainty estimation]. *Pazhuhesh-hā-ye Āb-e Irān (Iranian Water Research)*, 5(9), 51-60.(in persian).
- Nosrati, K., Govers, G., Ahmadi, H., Sharifi, F., Amoozegar, M. A., Merckx, R., and Vanmaercke, M. (2011). An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: biochemical fingerprints. *International Journal of Sediment Research*.26: 136-151.
- Nosrati, K., Govers, G., Semmens, B. X., & Ward, E. J. (2014). A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting. *Geoderma*, 217, 173-180.
- Olson, D. F. (1969). *Alaska reindeer herdsmen. A study of native management in transition*. Institute of Social, Economic and Government Research, University of Alaska.
- Owens, P. N. (2022). Sediment source fingerprinting: are we going in the right direction?. *Journal of Soils and Sediments*, 22(6), 1643-1647.
- Page AL, Miller RH, Keeney DR. (1982). Methods of soil analysis. *American Society of Agronomy*.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R. G. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the total environment*, 346(1-3), 1-16.
- Roudier, P., Beaudette, D. E., & Hewitt, A. E. (2012, April). A conditioned Latin hypercube sampling algorithm incorporating operational constraints. Minasny B, Malone BP, McBratney AB. Digital soil assessments and beyond: proceedings of the 5th Global workshop on digital soil mapping. Sydney: CRC Press.
- Sadeghi, S. H., Najafi, S., and Bakhtiari, A. R. (2017). Sediment contribution from different geologic formations and land uses in an Iranian small watershed, case study. *International journal of sediment research*, 32: 210-220.
- Smith, H. G., Blake, W. H., & Owens, P. N. (2013). Discriminating fine sediment sources and the application of sediment tracers in burned catchments: a review. *Hydrological Processes*, 27(6)
- Stone, M., Collins, A. L., Silins, U., Emelko, M. B., & Zhang, Y. S. (2014). The use of composite fingerprints to quantify sediment sources in a wildfire impacted landscape, Alberta, Canada. *Science of the Total Environment*, 473, 642-650.
- Tiecher, T., Minella, J. P. G., Caner, L., Evrard, O., Zafar, M., Capoane, V., ... & Dos Santos, D. R. (2017). Quantifying land use contributions to suspended sediment in a large cultivated catchment of Southern Brazil (Guaporé River, Rio Grande do Sul). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 237, 95-108.

- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis* (Vol. 2, pp. 131-160). Reading, MA: Addison-wesley.
- Uber, M., Legout, C., Nord, G., Crouzet, C., Demory, F., & Poulenard, J. (2019). Comparing alternative tracing measurements and mixing models to fingerprint suspended sediment sources in a mesoscale Mediterranean catchment. *Journal of Soils and Sediments*, 19(9), 3255-3273.
- Upadhayay, H. R., Lamichhane, S., Bajracharya, R. M., Cornelis, W., Collins, A. L., & Boeckx, P. (2020). Sensitivity of source apportionment predicted by a Bayesian tracer mixing model to the inclusion of a sediment connectivity index as an informative prior: illustration using the Kharka catchment (Nepal). *Science of the Total Environment*, 713, 136703.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.
- Wallbrink, P. J., Martin, C. E., & Wilson, C. J. (2003). Quantifying the contributions of sediment, sediment-P and fertiliser-P from forested, cultivated and pasture areas at the landuse and catchment scale using fallout radionuclides and geochemistry. *Soil and tillage research*, 69(1-2), 53-68.
- Walling, D. E. (2005). Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the total environment*, 344(1-3), 159-184.
- Walling, D. E., & Woodward, J. C. (1992). Use of radiometric fingerprints to derive information on suspended sediment sources. *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*, 210, 153-164.
- Walling, D. E., Collins, A. L., & Stroud, R. W. (2008). Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments. *Journal of Hydrology*, 350(3-4), 274-289.
- Wu, L., He, Y., & Ma, X. (2020). Can soil conservation practices reshape the relationship between sediment yield and slope gradient?. *Ecological Engineering*, 142, 105630.
- Yang, Y., Li, Y., & Zhang, J. (2016). Chemical speciation of cadmium and lead and their bioavailability to cole (*Brassica campestris* L.) from multi-metals contaminated soil in northwestern China. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 28(1-4), 33-41.
- Zhang, C., Selinus, O., & Schedin, J. (1998). Statistical analyses for heavy metal contents in till and root samples in an area of southeastern Sweden. *Science of the total environment*, 212(2-3), 217-232.
- Zhang, J., Yang, M., Zhang, F., Zhang, W., Zhao, T., and Li, Y. (2017). Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the Loess Plateau, PR China. *Land Degradation and Development*, 28: 2527-2539.
- Zorratipour, M., Zarei, H., Sharifi, M. R., and Radmanesh, F. (2021). Hydrological Simulation of Bakhtegan Basin in Iran Using the SWAT Model. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*. 44: 39-51.