

Assessment of Weathering Indices Efficiency in Provenance Tracing of Aeolian Sediments

Kazem Taherinezhad - Javazm¹ | Kazem Nosrati²

1. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
 2. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: k_nosrati@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 04 Apr 2025

Received in revised form:
08 May 2025

Accepted: 15 May 2025

Available online: 23 Sep 2025

Keywords:

Wind erosion,
Land degradation,
Wind erosion control,
Bayesian mixing model.

ABSTRACT

Controlling soil erosion and sediment production mitigates both local and regional impacts of wind erosion, thereby promoting environmental sustainability. This study assessed the effectiveness of weathering indices in identifying and differentiating sediment sources and their respective contributions to wind-blown deposits in the Daranjir Desert, located in Bafq. A total of 21 samples were collected from potential sediment sources—including alluvial fans, agricultural lands, and clay plains—alongside 7 samples from sand dunes representing the annual sediment yield. Fifty-four weathering indices were calculated. Using statistical analysis, four indices—Fe/Al, Bases to Alumina, Chemical Proxy of Alteration (CPA), and K/Al—were identified as optimal tracers, demonstrating 100% accuracy in distinguishing sediment sources. According to a Bayesian mixing model, the estimated contributions to sediment production were 86% from clay plains, 9.5% from alluvial fans, and 9.5% from agricultural lands. Simulations using a virtual sediment model revealed strong concordance between predicted and observed data. These findings underscore the utility of weathering indices as reliable tracers for source attribution in wind-blown sediments, offering valuable insights for erosion control and sustainable environmental management.

Cite this article: Taherinezhad – Javazm, K., & Nosrati, K. (2025). Assessment of Weathering Indices Efficiency in Provenance Tracing of Aeolian Sediments. *Geography and Environmental Sustainability*, 15(3), 7-26. <https://doi.org/10.22126/GES.2025.11978.2853>



© The Author (s).

DOI: <https://doi.org/10.22126/GES.2025.11978.2853>

Publisher: Razi University

ارزیابی کارایی شاخص‌های هوازدگی در منشأیابی رسوبات بادی

کاظم طاهری‌نژاد جوزم^۱ | کاظم نصرتی^۲

۱. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: فرسایش بادی، تخریب اراضی، کنترل فرسایش بادی، مدل ترکیبی بیسین.	کنترل فرسایش خاک و تولید رسوب موجب کاهش اثرات محلی و برون محلی فرسایش بادی و در نتیجه پایداری محیط‌زیست می‌گردد. در این پژوهش کارایی شاخص‌های هوازدگی در شناسایی و تفکیک منابع و سهم هرکدام در تولید رسوبات بادی کویردرانجیر بافق ارزیابی شد. بدین منظور، تعداد ۲۱ نمونه از منابع رسوب (شامل مخروطافکنه، اراضی کشاورزی و پهنه‌های رسی) و ۷ نمونه از تپه‌های ماسه‌ای به‌عنوان رسوب هدف سالانه جمع‌آوری گردید و ۵۴ شاخص هوازدگی محاسبه شد. با به‌کارگیری روش‌های آماری، چهار شاخص هوازدگی شامل K/Al, CPA, $Bases\ to\ Alumina$, Fe/Al به‌عنوان مجموعه ردیاب نهایی با قابلیت تفکیک ۱۰۰ درصدی منابع رسوبات بادی انتخاب شدند. بر اساس مدل Bayesian، سهم منابع در تولید رسوب برای پهنه رسی، مخروطافکنه و اراضی کشاورزی به ترتیب ۸۶٪، ۵/۹٪، ۵/۹٪ بود. نتایج شبیه‌سازی مدل رسوبات مجازی نشان داد که پیش‌بینی‌ها با داده‌های واقعی هماهنگی قابل‌توجهی دارند. نتایج این مطالعه کارایی شاخص‌های هوازدگی را به‌عنوان ردیاب‌های مؤثر برای تفکیک منشأ و سهم رسوبات بادی اثبات می‌نماید که در مدیریت فرسایش بادی و پایداری محیط‌زیست کاربرد دارند.
استناد: طاهری‌نژاد جوزم، کاظم؛ نصرتی، کاظم (۱۴۰۴). ارزیابی کارایی شاخص‌های هوازدگی در منشأیابی رسوبات بادی. <i>جغرافیا و پایداری محیط</i>. ۱۵ (۳)، ۷-۲۶. https://doi.org/10.22126/GES.2025.11978.2853	
© نویسندگان. DOI: https://doi.org/10.22126/GES.2025.11978.28531	
ناشر: دانشگاه رازی	



مقدمه

فرسایش بادی یک مشکل جدی در سراسر جهان (Pasztor et al., 2016)، و یکی از دلایل اصلی تخریب زمین به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی است (Zhou et al., 2025). مناطق خشک حدود ۴۰ درصد از اراضی سطح زمین را اشغال کرده‌اند که این اراضی اقامتگاه ۲۰ درصد از جمعیت زمین را تشکیل می‌دهد (Liu et al., 2011). اثرات محلی^۱ فرسایش بادی بر روی اراضی زراعی، توزیع مجدد، جابجایی خاک و فروپاشی ساختار خاک را به دنبال دارد. تنزل مواد آلی و مواد مغذی به کاهش عمق خاک قابل کشت و کاهش بهره‌وری خاک منجر می‌شود. اثرات برون محلی^۲ فرسایش که از عملیات رسوب‌گذاری یا وزش باد به وجود می‌آیند، ظرفیت رودخانه‌ها و مسیرهای زهکشی را کاهش، خطر طغیان رودخانه را افزایش و کانال‌ها را مسدود می‌کند (Morgan, 1995). کنترل فرسایش بادی اثرات محلی و برون محلی را کاهش داده، از تخریب خاک جلوگیری کرده، ریزگردها را کاهش و باعث تقویت اکوسیستم‌ها می‌گردد (اکبریان و نوحه‌گر، ۱۳۹۳) و به توسعه پایدار محیطی کمک می‌نماید.

در این میان، ایران با قرارگیری در کمربند خشک جهانی (Moradi et al., 2011)، به یکی از کانون‌های اصلی گرد و غبار تبدیل شده است (Shao, 2008). موقعیت خاص جغرافیایی و فیزیوگرافی و دوری از گستره‌های وسیع آبی، زمینه را برای توسعه فرسایش بادی در ایران فراهم کرده است (طاهری نژاد، ۱۳۹۶). بر اساس آمارها، حدود ۸۰ میلیون هکتار از اراضی کشور را مناطق کویری، تپه‌های ماسه‌ای و عرصه‌های با پوشش گیاهی ناچیز تشکیل می‌دهند (رفاهی، ۱۳۸۸) و شدت فرسایش بادی در برخی مناطق تا ۶ برابر میانگین جهانی گزارش شده است. ۴۰ درصد از اراضی کشور تحت تاثیر فرسایش کم یعنی زیر ۱۰ تن در هکتار، ۲۵ درصد تحت تاثیر فرسایش متوسط (بین ۲۵ تا ۵۰ تن در هکتار) و ۱۲ درصد یعنی بیش از ۵۰ تن در هکتار تحت تاثیر فرسایش شدید قرار دارند (قیصری و ایوبی، ۱۳۹۵). طبق آمار به‌دست‌آمده، فرسایش بادی سالیانه در حدود یک هزار میلیارد ریال به طور مستقیم و غیرمستقیم به منابع طبیعی کشور خسارت وارد می‌کند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ بنابراین اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب، کسب اطلاعات از اهمیت نسبی منابع رسوب و سهم آنها در تولید رسوب و در نتیجه شناسایی مناطق بحرانی دارای اهمیت است (Walling & Collins, 2004). زیرا به مدیران کمک می‌کند تا مناطق فرسایشی را شناسایی کنند و اقدامات حفاظت خاک را در الویت قرار دهند (Nauman et al., 2023).

در این راستا، روش منشأیابی رسوب به عنوان یک تکنیک نوین، با تعیین سهم منابع مختلف در تولید رسوب، ابزاری کلیدی برای مدیریت هدفمند فرسایش شناخته می‌شود (نصرتی و احمدی، ۱۳۹۷). روش‌های منشأیابی رسوب به طور عمده در سیستم‌های آبی مورد استفاده قرار گرفته است. اما در سال‌های اخیر در منشأیابی رسوبات بادی و گرد و غبار به طور محدود به کار گرفته شده است (Chen et al., 2021; Chen et al., 2022; Chen et al., 2024; Nosrati et al., 2021; Li et al., 2024; Nosrati et al., 2022). بدین ترتیب لازم است تا رویکردهای مرتبط با نوع ردیاب و یا مدل‌های منشأیابی مورد ارزیابی قرار گیرند.

در منشأیابی رسوب، ردیاب‌های گوناگونی مانند کانی‌شناسی (حکیم خانی، ۱۳۸۵)، خاصیت مغناطیسی (Nosrati et al., 2021)، رادیونوکلئیدی (Wilkinson et al., 2009)، عناصر ژئوشیمیایی (Li et al., 2020; Nosrati et al., 2014)، مواد آلی (Collins & Walling, 2007)، اندازه ذرات (Walling et al., 2000; Ballantine et al., 2009)، فعالیت آنزیم‌ها (نصرتی و همکاران، ۱۳۹۱ و Nosrati et al., 2011) و ایزوتوپ پایدار (Fox & Papanicolaon, 2008) استفاده می‌شود. در بین ردیاب‌ها، ردیاب‌های ژئوشیمیایی (Nosrati et al., 2021) با توجه به در دسترس بودن ابزار اندازه‌گیری، توانایی بالای آنها در تمایز بین منابع مختلف (Mohammadi Raigania et al., 2019) و همچنین سازگاری با محیط زیست، بیشترین استفاده را داشته‌اند.

هوازدهی شیمیایی با تغییر ترکیب شیمیایی خاک و رسوبات، امکان شناسایی دقیق منشأ رسوبات بادی را فراهم می‌کند (Walker et al., 1981)، هوازدهی شیمیایی نه تنها در تکامل چشم اندازها (Moquet et al., 2011) و تنظیم اقلیم جهانی نقش دارد (Dessert et al., 2003; Moosdorf et al., 2011)، بلکه از طریق تاثیر بر چرخه‌های زیست ژئوشیمیایی، امکان تفکیک

1. On-Site

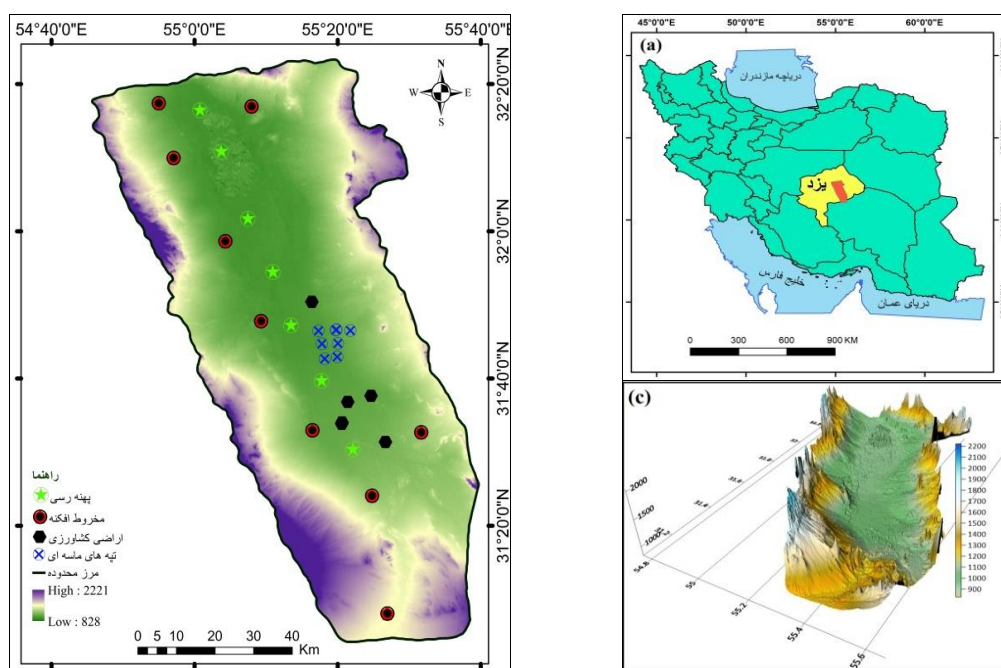
2. Off-Site

منابع رسوب و تعیین سهم آنها را فراهم می‌سازد (Lupker et al., 2013; Babechuk et al., 2014; Berger & Frei, 2014). بدین ترتیب تاثیر هوازدگی می‌تواند موجب تفاوت در منابع تولید رسوب گردد و در نتیجه شاخص‌های هوازدگی قابلیت تفکیک منابع رسوب را خواهند داشت و می‌توانند به عنوان ردیاب در منشأیابی منابع رسوبات بادی مورد استفاده قرار گیرند. شاخص‌هایی نظیر شاخص شیمیایی تغییر (CIA)، شاخص هوازدگی پارکر (WIP) و شاخص هوازدگی پلاژیوکلاز (PIA)، با تحلیل ترکیب شیمیایی رسوبات، به طور گستره‌ای در منشأیابی و بازسازی شرایط محیطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Buggle et al., 2011; Garzanti et al., 2013). با این حال، دقت و قابلیت اعتماد این شاخص‌ها ممکن است تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع سنگ منشأ، اندازه ذرات و شرایط اقلیمی قرار گیرد (Guo et al., 2018). به طور کلی منشأیابی رسوبات بادی در مرحله ابتدایی خود قرار دارد و توجه کمتری به بررسی و ارزیابی انواع ردیاب‌ها شده است. با توجه به این موضوع، در این پژوهش کارایی شاخص‌های هوازدگی به عنوان ردیاب‌های بالقوه برای ردیابی منشأ رسوبات بادی (تپه‌های ماسه‌ای) با استفاده از مدل ترکیبی بیسین ارزیابی شد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، کویر درانجیر در پهنه ایران مرکزی و در جنوب شرقی استان یزد واقع شده است. این کویر در شهرستان بافق و اردکان در بین عرض جغرافیایی $32^{\circ} 34' 50''$ تا $31^{\circ} 08' 20''$ شمالی و طول $54^{\circ} 49' 30''$ تا $55^{\circ} 49' 15''$ شرقی قرار گرفته که در شکل ۱ قابل مشاهده است. این کویر مساحتی بالغ بر ۷۰۰۰ کیلومتر مربع دارد و جهت شمال غرب - جنوب شرق دارد. از نظر ژئومورفولوژی در این منطقه دو گسل وجود دارد، این منطقه تحت تأثیر این دو گسل به صورت چاله‌ای با جهت شمال غربی - جنوب شرقی تبدیل شده است. این چاله ساختمانی که به صورت یک گرابن است از سمت غرب به گسل درانجیر و از سمت شرق به گسل بافق - رباط پشت بادام محدود است. بیشترین و کمترین ارتفاع از سطح دریا در این کویر به ترتیب ۲۲۲۱ و ۸۲۸ متر و متوسط ارتفاع آن ۱۵۲۴ متر است. به طور کلی منطقه مورد مطالعه پنج چشم‌انداز ژئومورفیک را شکل می‌دهد، ولی این چشم‌اندازها خود واحد فرمی کوچک‌تری را شامل می‌شوند. چشم‌اندازهای پنج‌گانه در منطقه مطالعاتی عبارتند از: ۱. چشم‌انداز سطوح محدب (تپه کوهستان)، ۲. چشم‌انداز سطوح هموار (سطوح مقعر)، ۳. چشم‌انداز پلکانی (تراس‌های دریاچه‌ای قدیمی)، ۴. چشم‌انداز کویری (سطوح مستوی)، ۵. چشم‌انداز سطوح ناپایدار تراکم بادی.



شکل ۱. موقعیت کویر درانجیر در ایران و استان یزد (a)، نقاط نمونه‌برداری (b)، و تصویر سه بعدی کویر درانجیر بافق (c)

نمونه برداری

در این پژوهش، نمونه برداری با دو رویکرد، یکی بر اساس منابع رسوب و دیگری بر اساس رسوب هدف انجام شد. نقاط نمونه برداری بر اساس نقشه های زمین شناسی، شیب و همچنین مشاهدات میدانی تعریف شدند. نمونه برداری با استفاده از بیلچه فلزی، پاکت مخصوص نمونه برداری، GPS و متر نواری از نقاط مشخص شده در شکل ۱، نمونه برداری صورت گرفت. تعداد ۲۸ نمونه با روش تصادفی سیستماتیک برداشت شد، که ۷ نمونه مربوط به رسوب هدف و ۲۱ نمونه از منابع رسوب از عمق ۵-۰ سانتی متر (۹ نمونه مخروط افکنه، ۵ نمونه اراضی کشاورزی، و ۷ نمونه پهنه رسی) برداشت گردید. برای اطمینان از اینکه نمونه ها نماینده کاملی از نقطه نمونه برداری باشند، در یک محدوده ۱۰۰ مترمربعی، ۵ نمونه جمع آوری شد. سپس این نمونه ها در یک ظرف ریخته و به خوبی مخلوط شدند. پس از مخلوط کردن، مقدار مورد نیاز که حدود یک کیلوگرم بود، از این مخلوط برداشت شد. نمونه برداری از رسوبات هدف (تپه های ماسه ای) نمونه ترکیبی از کل سال در سال ۱۴۰۱ برداشت شد که در یک محدوده ۱۰۰ متری ۵ نمونه برداشت و سپس با هم مخلوط گردید.

محاسبه شاخص های هواز دگی

به منظور محاسبه شاخص های هواز دگی، ابتدا لازم است عناصر ژئوشیمیایی در نمونه ها اندازه گیری شوند. تمام نمونه های منبع و رسوب هدف در آون در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. نمونه های برداشت شده از منابع رسوب و رسوب هدف (تپه های ماسه ای) با استفاده از الک کمتر از ۱۲۵ میکرومتر غربال شدند. اندازه مش الک شده بر اساس اندازه غالب ذرات در نمونه های رسوب انتخاب شد، تا اطمینان حاصل شود که نمونه های منبع و رسوب به طور مستقیم قابل مقایسه هستند. برای تعیین عناصر ژئوشیمیایی از آنالیز (ICP-OES اسپکترومتری نشری پلاسمای جفت شده القایی) استفاده گردید. این تحلیل بر روی ۲۸ نمونه از رسوب منبع و هدف انجام شد. ۵ گرم از هر نمونه به این منظور و همچنین تعیین غلظت عناصر ژئوشیمیایی مهم، با استفاده از دستگاه ICP-OES ساخت شرکت Agilent آلمان، مدل SPECTRO ARCOS شرکت دانش بنیان آریا شیمی شریف کرج اندازه گیری شدند.

شاخص های هواز دگی به عنوان ابزارهای کمی، برای ارزیابی شدت و الگوی تغییرات شیمیایی ناشی از تعامل سنگ ها با محیط زیست مورد استفاده قرار می گیرند. این شاخص ها عمدتاً بر پایه نسبت های عنصری و تغییرات در ترکیب شیمیایی مواد زمین شناسی استوار هستند. در این راستا، ۵۴ شاخص هواز دگی برای تمامی نمونه های منابع رسوب و نمونه های هدف طبق جدول ۱ محاسبه شدند. در این فرآیند، ابتدا تمام عناصر به درصد اکسیدهای مربوطه تبدیل شدند. سپس، وزن مولکولی این اکسیدها با استفاده از جرم مولی هر یک محاسبه گردید. در مرحله بعد، بر اساس فرمول های ارائه شده در جدول ۱، شاخص های مختلف هواز دگی محاسبه شدند. نتایج خلاصه ای از آمار مربوط به شاخص های هواز دگی نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. توصیف شاخص های هواز دگی و نسبت های عنصری

منبع	رابطه	شاخص هواز دگی
Parker (1970)	$[2\text{Na}_2\text{O}/0.35 + \text{MgO}/0.9 + 2\text{K}_2\text{O}/0.25 + \text{CaO}/0.7] \times 100$	WIP (Weathering Index of Parker)
Buggle et al., (2011); Cullers (2000)	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$	CPA (Chemical Proxy of Alteration)
Hamois & Moore (1988)	$[(\text{K}_2\text{O}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}))] \times 100$	ALK Ratio
Nesbitt & Young (1982)	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$	CIA (Chemical Index of Alteration)
Hamois & Moore (1988)	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})]$	AKN (Alumina to potassium-sodium oxide Ratio)
Hamois & Moore (1988)	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})]$	ACN (Alumina to Calcium-sodium oxide Ratio)
Garzanti et al., (2014)	CIA/WIP	IR
Vogt (1927)	$[(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O})/(\text{MgO} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})]$	V (Vogt's Residual Index)

ادامه جدول ۱.

منبع	رابطه	شاخص هوازدگی
Harnois & Moore (1988)	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})] \times 100$	CIW (Chemical Index of Weathering)
Fedo et al., (1995)	$[\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}]/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}) \times 100$	PIA (plagioclas Index of Altration)
Nordt & Driese (2010); Udagedara et al., (2016)	$[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO})]$	CALMAG Index
Brown et al., (2003); McLemore et al., (2008)	$\text{Ln} (\text{Fe}/\text{As})$	Brown
Von Eynatten et al., (2003)	$\text{Ln} [\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{geomeanAl}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O})]$	Brown
Baiyegunhi et al., (2017)	$[(\text{Fe}_2\text{O}_3+ \text{K}_2\text{O}+ \text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO}+\text{MnO})/\text{Al}_2\text{O}_3]$	ICV
Maynard (1992); McLemore et al., (2008)	$100 \times (\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+ \text{MgO}))$	Mg Index
Li et al., (1995); McLemore et al., (2008)	$[(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})]$	Rc (Residual coefficient)
Rocha Filho et al., (1985); DuzgorenAydin et al., (2002); McLemore et al., (2008)	$[(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3]$	ba1
Rocha Filho et al., (1985); DuzgorenAydin et al., (2002); McLemore et al., (2008)	$[(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3]$	ba2
Rocha Filho et al., (1985); DuzgorenAydin et al., (2002); McLemore et al., (2008)	$[(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{MgO})/ \text{Al}_2\text{O}_3]$	ba3
Piché & Jébrak (2004); McLemore et al., (2008)	$[(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/(\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})]$	AI
Chittleborough (1991); McLemore et al., (2008)	$[(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O})/ \text{TiO}_2]$	Chittleborough
Colman (1982); McLemore et al., (2008)	$[(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2)]$	Colman
Rocha Filho et al., (1985); Duzgoren-Aydin et al., (2002); McLemore et al., (2008)	$[(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})/\text{Al}_2\text{O}_3]$	Ba (Bases to Alumina)
Colman (1982); McLemore et al., (2008)	$[(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})/ \text{Al}_2\text{O}_3]$	Bases to Alumina
Large et al., (2001); McLemore et al., (2008)	$[(100 \times (\text{MgO}+\text{FeO})/ (\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$	CCPI
Chittleborough (1991); McLemore et al., (2008)	$[(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O})/ \text{ZrO}_2]$	WR
Feng (1997)	$[\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3]/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{P}_2\text{O}_5]$	FENG
Beavers et al., (1963); McLemore et al., (2008)	CaO/ZrO_2	sesquioxide content (SOC)
Jenny (1941)	$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$	
Harnois & Moore (1988)	Ti/Zr	
Kasanzu et al., (2016)	$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{MgO})$	
Kasanzu et al., (2016)	$(\text{FeO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$	
Kasanzu et al., (2016)	$\text{MgO}+\text{FeO}$	
Egli et al., (2019)	$(\text{Na}+\text{K})/\text{Ti}$	
Maher & Taylor (1988)	Fe/Ti	
Derakhshan-Babaei et al., (2020)	$(\text{Fe}+\text{Al})/\text{Zr}$	
Garrett & Lalor (2005); McLemore et al., (2008)	Fe/Na	
Conrey et al., (2001)	Ba/k	
Conrey et al., (2001)	Ba/La	
Zhao & Zheng (2015); Mohammadi Raigani et al., (2019)	Al/Ti	
Conrey et al., (2001)	Sr/Zr	
Lopez et al., (2006)	Ca/Mg	
Lopez et al., (2006)	Ca/Al	

ادامه جدول ۱.

منبع	رابطه	شاخص هوازدگی
Lopez et al., (2006)	K/Al	
Lopez et al., (2006)	Fe/Al	
Hamois & Moore (1988)	CaO/Na ₂ O	
Hamois & Moore (1988)	K ₂ O/Na ₂ O	
Hamois & Moore (1988)	K ₂ O/CaO	
Hamois & Moore (1988)	Mn/Fe	
Mohammadi Raigani et al., (2019)	P/Ca	
Lopez et al. (2006)	P/Fe	
Lopez et al. (2006)	P/Al	
Lopez et al. (2006)	Mn/Al	

انتخاب مجموعه ردیاب‌های نهایی

در تکنیک منشأیابی رسوب، تنها ردیاب‌هایی (شاخص‌های هوازدگی) قابل استفاده در مدل هستند که رفتار محافظه کارانه^۱ داشته و توانایی تفکیک بالایی بین منابع رسوب را ارائه دهند. از آنجایی که ویژگی‌های ردیاب‌ها ممکن است در طول فرایند انتقال تغییر کنند، انتخاب ردیاب‌های محافظه کارانه گامی اساسی و مهم در تعیین ردیاب‌های بهینه محسوب می‌شود. براین اساس، اولین گام در پرداختن به این مهم، حذف ردیاب‌های غیر محافظه کارانه از تجزیه و تحلیل بعدی است (Nosrati et al., 2018). برای تعیین ردیاب‌های غیر محافظه کارانه، دو آزمون بر روی داده‌ها اعمال شد. اول، قبل از اجرای آزمون‌های آماری برای انتخاب مجموعه نهایی ردیاب‌های حفاظت شده، آزمون Conservative test (آزمایش استاندارد براکت) انجام می‌گیرد تا ردیاب‌های غیر محافظه کار شناسایی شوند. در واقع، این آزمون حاصل مقایسه حداقل و حداکثر اندازه هر ردیاب بعلاوه و منه‌ای انحراف معیار بین منابع رسوب و رسوبات بادی است و اگر یک ردیاب بین این بازه قرار نگیرد، از ادامه تجزیه و تحلیل‌های آماری حذف می‌شود. دوم، میانگین اندازه ردیاب‌ها برای منابع رسوب و رسوبات بادی مورد توجه است و اگر نمونه‌ای مابین این بازه نباشد، از ادامه تجزیه و تحلیل حذف می‌شود (Nosrati et al., 2020).

برای تعیین ترکیب بهینه از ردیاب‌ها، روش‌های متفاوتی وجود دارد که می‌توان به روش آماری دومرحله‌ای کروسکال والیس و تحلیل تشخیص (Collins et al., 1997)، کروسکال والیس (Nosrati et al., 2018)، تجزیه کلاستر و تحلیل تشخیص اشاره کرد. در این پژوهش به منظور انتخاب ردیاب‌های بهینه، از آزمون تحلیل کروسکال والیس و تحلیل تشخیص گام به گام (DFA) استفاده شد. در مرحله اول از آزمون H یا کروسکال والیس برای تعیین ردیاب‌هایی که قادر به تفکیک منابع رسوب بودند، استفاده شد (Walling, 2013)؛ بنابراین، آزمون کروسکال والیس هر ردیابی را که اختلاف معنی‌داری در غلظت حداقل دو منبع رسوب را نشان ندهد، حذف می‌کند (Pulley et al., 2017). در نتیجه ردیاب‌هایی که سطح معنی‌داری آنها کمتر از ۰/۰۵ باشد، منابع رسوب را از هم تفکیک می‌کند و وارد مرحله بعد یعنی تابع تشخیص (DFA) می‌شود. در این تحلیل از ویلکس لامبدا به عنوان مبنای اصلی تشخیص و تفکیک منابع در آزمون DFA استفاده شد. آزمون DFA بر پایه کمینه‌سازی ویلکس لامبدا (Collins et al., 1997) عمل می‌کند و از ردیاب‌های بهینه به عنوان متغیرهای ورودی به مدل‌های ترکیبی برای کمی کردن سهم منابع رسوب معلق استفاده می‌شود. در نهایت پس از انتخاب ترکیب نهایی ردیاب‌ها برای تفکیک منابع رسوب بادی، نمودارهای زوجی (بی‌پلات) از ترکیبات ردیاب‌ها برای نمونه‌های منابع رسوب و رسوب هدف به عنوان روشی دقیق‌تر برای ارزیابی تغییرات در طی فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری بادی تهیه شدند.

تعیین سهم منابع رسوب و ارزیابی مدل با استفاده از نمونه‌های مجازی

در این پژوهش برای تعیین سهم رسوب از مدل ترکیبی بیسین (Nosrati et al., 2014)، برای تعیین سهم رسوبات و تخمین عدم قطعیت آنها، استفاده شد. روش اصلاح شده MixSIR Bayesian که توسط نصرتی و همکاران در سال ۲۰۱۴ پیشنهاد

شده است، برای تعیین نسبت توزیع رسوبات حاصل از منابع مختلف استفاده می‌شود. این روش بر اساس استنباط بیزی عمل می‌کند و توزیع رسوبات را در سه سطح دسته‌بندی می‌کند: در مرحله اول، توزیع احتمالی پیشین برای پارامترهای مدل تعیین می‌شود. این توزیع بر اساس اطلاعات و دانش اولیه‌ای که پیش از جمع‌آوری داده‌ها در دسترس است، تعریف می‌شود. به عبارت دیگر، باورها و پیش‌فرض‌های قبلی درباره پارامترهای مدل به عنوان پایه و اساس مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. این توزیع پیشین نقش مهمی در شروع فرایند مدل‌سازی ایفا می‌کند و به عنوان نقطه آغاز برای تحلیل‌های بعدی استفاده می‌شود. در مرحله دوم، یک مدل آماری طراحی می‌شود که بتواند منابع مختلف رسوب را از هم تفکیک کند. برای این کار، از ردیاب‌های مناسبی استفاده می‌شود که در طول فرایند انتقال رسوب، تغییر نمی‌کنند و ثابت باقی می‌مانند. این مدل باید به گونه‌ای ساخته شود که بتواند به طور دقیق منابع رسوب را از یکدیگر جدا کند و داده‌های قابل اعتمادی ارائه دهد. در مرحله سوم، توزیع احتمال پسین برای پارامترهای مدل با استفاده از قانون بیزی محاسبه می‌شود. به این صورت که توزیع احتمالی پیشین (که بر اساس اطلاعات اولیه تعیین شده بود) با توجه به داده‌های مشاهداتی جدید، به روزرسانی می‌شود. این به روزرسانی با کمک تابع درست‌نمایی و محاسبه احتمال پسین انجام می‌گیرد که در نهایت منجر به توزیع دقیق‌تری برای پارامترهای مدل می‌شود.

در واقع، این فرایند ترکیبی از اطلاعات قبلی و داده‌های جدید است که نتیجه آن، توزیع پسین نامیده می‌شود. این توزیع پسین، تخمین به روز شده‌ای از احتمال پارامترها ارائه می‌دهد و به عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی دقیق سهم منابع رسوب در فرسایش و تولید رسوب، نمونه‌های رسوب هدف با منابع رسوب مقایسه شدند. همچنین بر اساس تحلیل‌های انجام شده روی ۱۴ مجموعه داده؛ شامل مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده در مدل شبیه‌سازی رسوبات مجازی، محدوده خطای متوسط میانگین (MAE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و شاخص توافق (d) محاسبه گردید.

نتایج

جدول ۲ غلظت ردیاب‌ها که شامل ۵۴ شاخص هوازدگی است در منابع رسوب و نمونه‌های رسوب هدف در کویر درانجیر بافاق را نشان می‌دهد. نتایج آزمون استاندارد براکت نشان داد که در واحدهای منابع رسوب ۲۰ ردیاب (ALK, CALMAG Index, Brown1, Mg Index, AI, Chittellborough, CCPI, WR, CaO/ZrO₂, Ti/Zr, Mgo+Feo, (Na+k)/Ti, (Fe+AI)/Zr, Ba/K, Ba/La, Sr/Zr, Ca/Mg, CaO/Na₂O, Mn/Fe, Mn/AI) محافظه کارانه نبوده و از تجزیه و تحلیل بعدی حذف شدند. به منظور انتخاب ردیاب‌ها در مرحله اول از آزمون H یا کروسکال والیس استفاده شد که نتایج آزمون در هر مجموعه از منابع رسوب در جدول ۲ خلاصه شده است. با توجه به جدول از ۵۴ شاخص هوازدگی که به عنوان ردیاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ۳۳ شاخص هوازدگی در آزمون کروسکال والیس تایید و وارد مرحله آزمون تحلیل تشخیص شدند.

جدول ۲. داده غلظت ردیاب برای منابع رسوب و رسوب هدف، نتایج آزمون تعیین ردیاب‌های محافظه کارانه و نتایج آزمون کروسکال

والیس برای تفکیک منابع رسوبی

ردیاب	منابع رسوب				رسوب هدف	
	مخروط افکنه		اراضی کشاورزی		پهنه رسی	
	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار	انحراف میانگین معیار
WIP	۴۴۰/۹	۱۸/۵۹	۴۷۶/۲۸	۷/۱۸	۵۱۶/۹۲	۱۳/۵۶
CPA	۴۰/۶۳	۱۱/۰۶	۶۵/۴۴	۰/۵۲	۶۶/۴۲	۱/۰۸
ALK	۳۳/۰۶	۲/۳۰	۲۵/۳۳	۱/۴۳	۳۰/۱۴	۰/۹۰
CIA	۲۵/۶۳	۱۰/۵۲	۵۰/۴۳	۰/۸۵	۵۲/۸۹	۰/۹۷
AKN	۰/۴۵	۰/۴۴	۱/۴۱	۰/۰۴	۱/۳۸	۰/۰۶
ACN	۰/۳۱	۰/۱۰	۰/۵۸	۰/۰۰۸	۰/۵۸	۰/۰۱
IR	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۱۰	۰/۰۰۳	۰/۱۰	۰/۰۰۳
V	۰/۵۹	۰/۲۳	۰/۸۴	۰/۰۲	۱/۰۱	۰/۰۴
CIW	۳۱/۴۵	۱۱/۱۶	۵۵/۴۳	۰/۶۲	۵۹/۷۹	۱/۰۳

ادامه جدول ۲.

ردیاب	منابع رسوب				رسوب هدف	
	مخروط افکنه		اراضی کشاورزی		سالیانه	
	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
PIA	۱۱/۳۳	۱۶/۰۳	۵۰/۵۱	۱/۰۲	۵۳/۷۶	۱/۲۶
CALMAG	۰/۴۰	۰/۰۷	۰/۵۳	۰/۰۱	۰/۵۹	۰/۰۱
Brown1	۷/۲۲	۰/۰۷	۷/۲۸	۰/۰۵	۷/۴۷	۰/۰۷
Brown2	۰/۰۶	۰/۳۳	۰/۹۱	۰/۰۳	۰/۹۹	۰/۰۲
ICV	۷/۱۶	۱/۵۷	۲/۵۸	۰/۱۱	۲/۶۴	۰/۰۸
Mg Index	۵۷/۶۴	۴/۷۶	۶۳/۱۱	۱/۶۸	۶۵/۶۲	۱/۵۱
Rc	۱/۲۳	۰/۲۶	۱/۲۷	۰/۰۳	۱/۵۷	۰/۰۷
ba1	۲/۱۸	۰/۵۳	۰/۷۰	۰/۰۲	۰/۷۲	۰/۰۳
ba2	۱/۴۵	۰/۲۹	۰/۸۶	۰/۰۵	۰/۶۹	۰/۰۳
ba3	۲/۹۱	۰/۶۵	۱/۲۹	۰/۰۵	۱/۲۴	۰/۰۶
AI	۰/۶۰	۰/۰۳	۰/۴۵	۰/۰۱	۰/۵۱	۰/۰۰۹
Chittleborough	۲۱/۳۹	۰/۸۹	۳۹/۱۳	۱/۶۳	۳۲/۶۵	۱/۶۵
Colman	۰/۷۸	۰/۰۹	۰/۷۶	۰/۰۲	۰/۶۲	۰/۰۲
Ba	۲/۹۰	۰/۷۱	۰/۹۸	۰/۰۳	۰/۸۹	۰/۰۳
Bases to Alumina	۳/۶۳	۰/۸۳	۱/۵۶	۰/۰۶	۱/۴۱	۰/۰۶
CCPI	۱۸۸/۴۴	۱۱/۴۷	۱۶۵/۴۰	۲/۹۳	۱۶۴/۱۴	۲/۲۵
WR	۲۹۰۹/۷۹	۲۶۰/۶۵	۴۷۱۸/۰۲	۵۲۶/۵۹	۳۷۰۱/۶۶	۸۸۰/۸۴
FENG	۱/۵۳	۰/۲۸	۱/۵۴	۰/۰۴	۱/۷۷	۰/۰۸
SOC	۱/۲۴	۰/۲۸	۱/۷۳	۰/۰۲	۲/۱۰	۰/۰۸
CaO/ZrO ₂	۷۱۷/۲۴	۵۵/۴۳	۹۳۶/۷۳	۹۹/۸۹	۵۱۵/۹۹	۱۱۴/۱۸
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃	۰/۲۸	۰/۱۶	۰/۹۹	۰/۰۵	۰/۸۲	۰/۰۲
Ti/Zr	۷۱/۳۹	۵/۵۶	۶۳/۳۶	۷/۴۱	۵۷/۴۶	۱۱/۰۵
Al ₂ O ₃ /(FeO+MgO)	۰/۴۰	۰/۱۹	۰/۹۲	۰/۰۵	۰/۸۸	۰/۰۳
(FeO+MgO+Al ₂ O ₃)/(K ₂ O+CaO+Na ₂ O)	۱/۱۹	۰/۵۱	۲/۱۱	۰/۰۴	۲/۳۹	۰/۰۷
Mgo+Feo	۰/۶۸	۰/۰۸	۰/۹۳	۰/۰۳	۱/۰۷	۰/۰۴
(Na+K)/Ti	۱۸/۹۴	۱/۱۲	۲۲/۵۱	۰/۵۷	۲۲/۶۵	۰/۹۶
Fe/Ti	۱۴/۸۳	۱/۱۸	۱۶/۳۶	۰/۸۳	۱۹/۸۳	۱/۲۸
(Fe+Al)/Zr	۱۶۴۹/۹۱	۶۱۰/۴۴	۳۰۴۱/۳۱	۲۸۲/۴۴	۲۹۶۶/۵۱	۶۳۱/۱۸
Fe/Na	۱/۴۴	۰/۲۸	۱/۱۴	۰/۰۶	۱/۴۵	۰/۰۸
Ba/k	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱
Ba/La	۱۷/۵۶	۳/۳۵	۱۶/۱۷	۱/۳۲	۱۰/۲۶	۰/۵۵
Al/Ti	۸/۲۷	۶/۵۶	۳۱/۷۸	۱/۸۴	۳۱/۶۹	۱/۲۸
Sr/Zr	۱۹/۱۰	۳/۱۰	۲۳/۷۶	۲/۳۷	۱۱/۹۵	۲/۷۷
Ca/Mg	۱۳/۴۰	۲/۳۲	۶/۴۸	۰/۳۰	۴/۳۸	۰/۳۱
Ca/Al	۴/۴۳	۱/۰۹	۱/۷۰	۰/۰۶	۱/۰۳	۰/۰۳
K/Al	۱/۰۴	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۰۲	۰/۳۱	۰/۰۱
Fe/Al	۱/۷۹	۰/۳۷	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/۶۲	۰/۰۲
CaO/Na ₂ O	۰/۴۹	۰/۰۳	۰/۵۲	۰/۰۱	۰/۳۳	۰/۰۱
K ₂ O/Na ₂ O	۰/۴۹	۰/۰۵	۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۴۳	۰/۰۱
K ₂ O/CaO	۱/۰۰	۰/۰۸	۰/۶۴	۰/۰۳	۱/۳۰	۰/۰۷
Mn/Fe	۰/۰۲	۰/۰۰۸	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰۱
P/Ca	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱
P/Fe	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
P/Al	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱
Mn/Al	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱

n.c محافظت نشده - * معنی داری: ۰/۰۵ - آزمون کروسکال والیس

دومین مرحله انتخاب بهینه ردیاب، تحلیل تابع تشخیص گام‌به‌گام برای منابع رسوب است. برای منابع رسوبی در بین ۳۳ شاخص هوازدگی عبور یافته از آزمون H (کروسکال والیس)، ۴ شاخص هوازدگی (CPA, Bases to Alumina, Fe/Al, K/Al) برای ترکیب بهینه ردیاب که ۱۰۰ درصد از نمونه‌های نوع منبع را تفکیک و به درستی طبقه‌بندی نمودند انتخاب شدند. ویلکس لامبدا یک شاخص آماری است که نسبت پراکندگی داده‌ها درون هر گروه را به پراکندگی کلی داده‌ها نشان می‌دهد. آماره ویلکس لامبدا (λ) به عنوان یکی از معیارهای کلیدی در تحلیل‌های چندمتغیره، نقش مهمی در ارزیابی تفاوت‌های بین گروهی ایفا می‌کند. این شاخص که بر پایه نسبت تغییرات درون گروهی به تغییرات بین گروهی استوار است، توان جداسازی گروه‌ها را در فضای چند بعدی متغیرها اندازه‌گیری می‌نماید. برخلاف روش‌های تک متغیره که تنها یک بعد از تفاوت‌ها را بررسی می‌کنند، ویلکس لامبدا با در نظر گرفتن هم‌زمان تمامی ابعاد، تصویری جامع‌تر از تفاوت‌ها ارائه می‌دهد. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که کاهش مقدار این آماره با بهبود توان تشخیصی مدل همراه است، به طوری که افزودن هر متغیر ردیاب جدید موجب افزایش قدرت تفکیک پذیری تحلیل می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳. وضعیت مراحل مختلف ورود عناصر به مدل در منابع رسوب

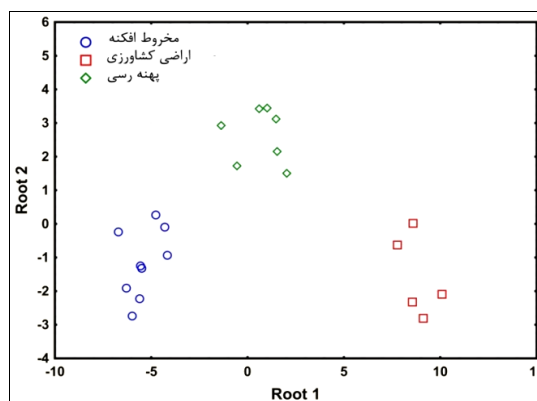
ردیاب	ویلکس لامبدا	F-remove	H-value	سطح معنی‌داری	تاب‌آوری
Fe/Al	۰/۰۰۹	۵/۲۳	۱۴/۵۵	<۰/۰۰۱	۰/۹۹
Bases to Alumina	۰/۰۴۰	۵۰/۲۱	۱۱/۰۴	<۰/۰۰۴	۰/۹۹
CPA	۰/۰۲۱	۲۲/۶۸	۱۰/۰۸	<۰/۰۰۶	۰/۹۹
K/Al	۰/۰۰۸	۴/۹۲	۱۱/۷۸	<۰/۰۰۳	۰/۹۹

بر اساس داده‌های جدول ۴، روش تحلیل تشخیص خطی چندمتغیره (DFA) به صورت سالیانه دو تابع تمایزدهنده با سهم واریانس ۰/۹۹ درصد تعیین نموده که در مجموع ۱/۹۸ درصد از تغییرپذیری کل داده‌ها را تبیین می‌کنند. آزمون کای - اسکوئر (X^2) معنی‌داری آماری این توابع را در سطح اطمینان ۰/۰۵ تأیید کرده است.

شکل ۲، بررسی هندسی عملکرد توابع از طریق نمودار پراکندگی مبتنی بر تابع ۱ و تابع ۲ را نشان می‌دهد. توزیع مکانی نقاط در این نمودار، جداسازی کامل خوشه‌های مربوط به منابع رسوبی متفاوت را بدون هیچگونه هم‌پوشانی نمایش می‌دهد. این الگوی پراکندگی، هم‌خوانی کامل با نتایج کمی داشته و توان تفکیک ۱۰۰ درصدی مدل را از دیدگاه ترسیمی تأیید می‌نماید. این نمودار تفکیک منابع رسوب را به درستی نشان می‌دهد، چرا که قدرت تفکیک منابع ۱۰۰ درصد بوده است. چنین سطحی از دقت، نشانگر انتخاب بهینه متغیرهای ردیاب و پایداری ساختار داده‌ها است.

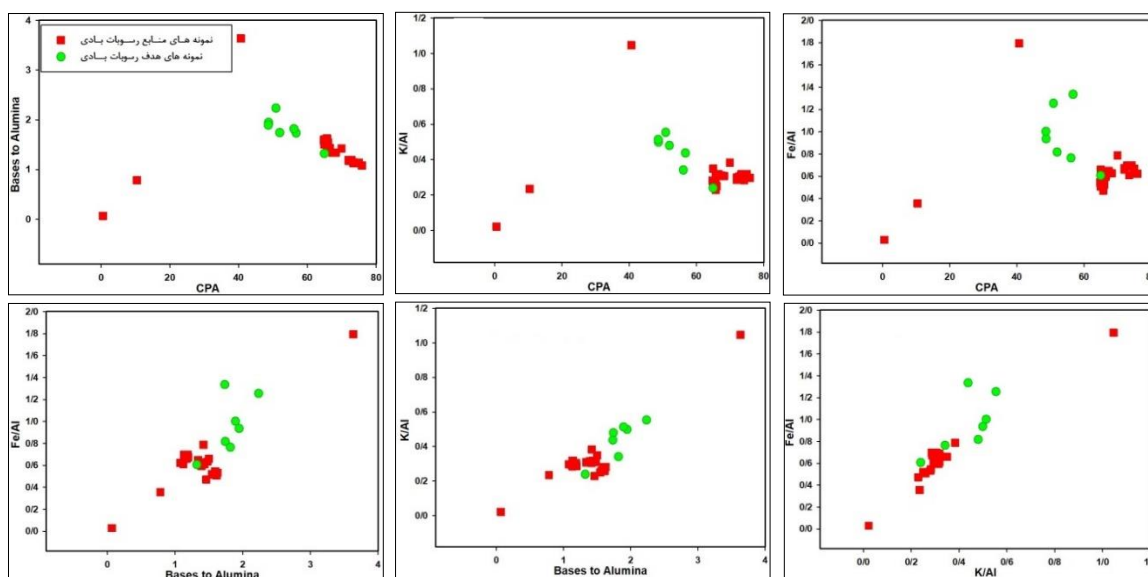
جدول ۴. ویژگی‌های توابع تحلیل تشخیص در منابع رسوب

تابع	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد تجمعی واریانس	همبستگی کانونی	کای اسکوئر	سطح معنی‌داری
۱	۳۶/۵۴	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸۶	۸۶/۴۱	<۰/۰۰۱
۲	۴/۰۱	۰/۹۹	۱/۹۸	۰/۸۹۴	۲۶/۵۹	<۰/۰۰۱



شکل ۲. نمودار پراکندگی توابع تشخیص اول و دوم حاصل از تحلیل تشخیصی (DFA) برای نمایش ترکیب بهینه ردیاب‌ها در تمایز بین منابع رسوبی مختلف

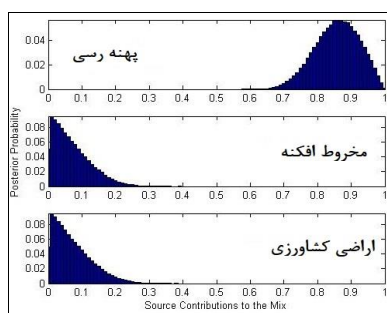
در شکل ۳، برای ردیاب‌های انتخاب شده در ترکیب نهایی، نمودارهای زوجی (بی پلات‌ها) تمام جفت‌های ردیاب برای نمونه‌های منابع رسوب و نمونه‌های رسوب هدف مقایسه شدند تا رفتار محافظه‌کارانه^۱ ارزیابی شود. ردیاب‌های نهایی با استفاده از مجموعه‌ای از نمودارهای بی پلات، رفتار محافظه‌کارانه را با استفاده از نمودارهای دوبعدی بین ۴ ردیاب مورد بررسی قرار دادند. به‌طور کلی، نمونه‌های مربوط به تپه‌های ماسه‌ای (به‌عنوان رسوب هدف) و نمونه‌های مربوط به منابع احتمالی رسوب، هر چهار ردیاب در یک فضای مشترک قرار گرفتند. این هم‌پوشانی فضایی، رفتار محافظه‌کارانه این ردیاب‌ها را تأیید می‌کند. این مقایسه‌ها نشان می‌دهند که هیچ تغییر عمده‌ای در ردیاب‌ها در طول فرآیندهای انتقال رسوب و رسوبگذاری از طریق فرسایش بادی و فرآیندهای رسوبی رخ نداده است.



شکل ۳. نمودارهای دو بعدی (بی پلات) تمامی جفت‌ها برای ترکیب نهایی ردیاب‌ها

سهم منابع رسوب

سهم منابع رسوب تخمین زده شده توسط مدل MixSIR، همراه با محدوده‌های عدم قطعیت (۹۵-۰/۵٪) در شکل ۴ نمایش داده شده است. اگر میانه سهم هر منبع برابر با میانه یا صدک ۵۰ باشد و صدک ۵ و ۹۵ بیانگر سطوح اطمینان عدم قطعیت باشد، نتایج حاصل از ترکیب ردیاب‌ها مشخص می‌کند که برای سه منبع رسوبی (پهنه رسی، مخروط افکنه‌ها و اراضی کشاورزی) سهم تولید رسوب هر یک به ترتیب ۸۶ (۷۴/۲ تا ۹۵/۸)، ۵/۹ (۰/۵ تا ۱۷/۹)، ۵/۹ (۰/۸ تا ۱۸/۳) درصد می‌باشد. مقادیر داخل پرانتز بیانگر حدود اطمینان صدک ۵ و ۹۵ درصد می‌باشد. نتایج نشان دهنده تغییرات معنی‌دار در سهم منابع رسوبی می‌باشد، به این صورت که بیشترین سهم تولید رسوب سالانه مربوط به پهنه رسی (۰/۸۶٪) می‌باشد. سایر منابع رسوبی سهم ناچیزی در تولید رسوب داشتند.



شکل ۴. سهم منابع رسوبی کویر در انجیر با استفاده از مدل عدم قطعیت

ارزیابی دقت پیش‌بینی‌های مدل با استفاده از ترکیب‌های مجازی رسوب

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مدل رسوبات مجازی که در جدول ۵ ارائه شده، گویای کارایی و دقت بالای روش مورد استفاده در این مطالعه است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده روی ۱۴ مجموعه داده شامل مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده، محدوده خطای متوسط مطلق (MAE) بین ۰ تا ۱۸/۴ درصد متغیر می‌باشد. در ارزیابی خطاها، مقدار RMSE (خطای جذر میانگین مربعات) بین ۰/۴ تا ۹/۲ درصد محاسبه گردید. همچنین مقادیر شاخص توافق (d) بین ۰/۴ تا ۱ درصد به دست آمد که حاکی از هماهنگی مناسب بین داده‌های پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی است (هر چقدر این مقادیر به عدد ۱ نزدیک‌تر باشند، هم‌پوشانی بهتری خواهند داشت). خطاهای مشاهده شده در این پژوهش در محدوده سایر مطالعات قرار دارند.

جدول ۵. سهم شناخته شده و پیش‌بینی شده منابع رسوبات بادی سالانه بر اساس نمونه‌های مجازی و انواع خطا

شاخص توافق (d)	میانگین خطای مطلق (MAE)	خطای میانگین مربعات (RMSE)	سهم پیش‌بینی شده منابع رسوبات بادی			سهم شناخته شده منابع رسوبات بادی		
			رسوبات بادی			رسوبات بادی		
			۳	۲	۱	۳	۲	۱
۰/۰۴	۰/۰	۱/۶	۱۳/۲	۳۵/۰	۳۳/۶	۳۳/۳	۳۳/۳	۳۳/۳
۱/۰۰	۶/۵	۴/۴	۳/۴	۲/۳	۹۳/۵	۰	۰	۱۰۰
۰/۹۹	۱۴/۸	۷/۷	۷/۹	۸۹/۵	۲/۳	۰	۱۰۰	۰
۰/۹۹	۱۰/۰	۹/۲	۸۷/۳	۹/۴	۲/۵	۱۰۰	۰	۰
۱/۰۰	۲/۴	۱/۳	۲۳/۲	۲۶/۱	۵۰/۶	۲۵	۲۵	۵۰
۱/۰۰	۱۸/۴	۰/۴	۲۴/۴	۵۰/۴	۲۵/۱	۲۵	۵۰	۲۵
۰/۹۹	۵/۶	۱/۶	۴۷/۸	۲۶/۸	۲۵/۲	۵۰	۲۵	۲۵
۱/۰۰	۷/۵	۰/۴	۱۲/۹	۱۲/۳	۷۵/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۷۵
۱/۰۰	۱۳/۱	۰/۷	۱۰/۶	۹/۹	۷۹/۰	۱۰	۱۰	۸۰
۱/۰۰	۱۲/۸	۲/۰	۶/۹	۴/۸	۸۷/۲	۵	۵	۹۰
۰/۹۹	۱۱/۷	۵/۵	۷۳/۴	۱۶/۹	۹/۴	۸۰	۱۰	۱۰
۱/۰۰	۲/۱	۲/۴	۱۲/۶	۷۶/۹	۱۰/۶	۱۰	۸۰	۱۰
۰/۹۹	۱/۸	۷/۵	۸۰/۶	۱۳/۹	۴/۹	۹۰	۵	۵
۱/۰۰	۸/۶	۳/۹	۹/۴	۸۴/۹	۵/۸	۵	۹۰	۵

بحث

برای مدیریت مناطق خشک و بیابانی که با مسئله فرسایش بادی مواجه هستند، شناسایی و سنجش منشأ رسوبات از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. این پژوهش به‌عنوان اولین گام در مسیر کمی‌سازی سهم منابع رسوب بادی با استفاده از اندازه‌گیری عناصر ژئوشیمیایی و شاخص‌های هوازدگی در کویر درانجیر بافق می‌باشد. در این پژوهش، به‌منظور تعیین سهم منابع تولید رسوب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از مدل ترکیبی بیسین استفاده شد. این مدل با بهره‌گیری از رویکرد احتمالاتی بیسین و تلفیق داده‌های مشاهده شده با دانش پیشین، ابزاری قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای شناسایی و تعیین سهم منابع رسوبات بادی ارائه می‌دهد. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، بیشترین سهم تولید رسوب مربوط به پهنه رسی (۸۶) درصد می‌باشد. همچنین از میان ۵۴ شاخص هوازدگی ۴ شاخص هوازدگی (CPA، Bases to Alumina، Fe/Al، K/Al) به‌عنوان ردیاب نهایی که توانستند بیشترین میزان تفکیک منابع رسوب را به خود اختصاص دهند، شناخته شدند.

نتایج حاصل از مدل‌سازی رسوب مجازی نشان داد که هماهنگی مناسب بین داده‌های پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی وجود دارد. به‌طور کلی خطاهای مشاهده شده در مدل رسوب مجازی قابل‌قبول هستند و از نظر آماری نیز به تقویت اعتبار علمی روش تحلیل ما کمک می‌کنند. بر اساس مطالعات مختلف درباره شناسایی سهم منابع رسوب با استفاده از عناصر ژئوشیمیایی و شاخص‌های هوازدگی (روشن‌نکو و همکاران، ۱۴۰۳؛ محمدخان و همکاران، ۱۴۰۰؛ فیض‌نیا و همکاران، ۱۳۹۴؛

(Chen et al., 2018 ; Du & Tan, 2018 Liu & Yang, 2018; Liu et al., 2013; Meng et al., 2019; Wang et al., 2019; می توان عنوان کرد هر محیط دارای عناصر ژئوشیمیایی و شاخص های متفاوتی است. در این مطالعه باتوجه به پیمایش های زمینی و بررسی هایی که صورت گرفته، پهنه های رسی به عنوان منبع تولید رسوب شناخته می شود. به دلیل اختلاف دمای شدید بین شب و روز در این منطقه، این نوسانات دمایی باعث انقباض و انبساط خاک های رسی می شود. خاک های رسی نیز به دلیل خاصیت انبساط پذیری (به دلیل وجود کانی اسمکتیت) در اثر خشک شدن سریع ترک های عمیقی ایجاد می کنند، این ترک ها ذرات ریز لایه های زیرین را آزاد کرده و توسط باد قابل حمل هستند.

در منطقه مورد مطالعه، پهنه های رسی لایه های سخت و شکننده از جنس کربنات ها و نمک ها^۱ دارند که به صورت موقت از فرسایش زیر لایه محافظت می کند؛ اما عوامل طبیعی مانند تغییرات شدید دمایی، بارش های ناگهانی و بعضاً اندک (شکستن پوسته توسط قطرات باران) و یا فعالیت های انسانی باعث تخریب این پوسته شده و ذرات ریز زیرین که بسیار ریز (کمتر از ۲ میکرون) و سبک هستند، به سرعت توسط باد برداشت و حمل می شوند. عامل دیگر اینکه در طول سال، فرایندهای هوازدگی فیزیکی (تبلور نمک و سایش بادی) و شیمیایی (تجزیه کانی های رسی) مقادیر بسیار زیادی ذرات ریز تولید می کنند. این ذرات در پهنه های رسی نهشته می شوند و به عنوان یک منبع غنی آماده انتقال توسط بادهای غالب هستند. به طور کلی در منطقه کویر در انجیر، پهنه های رسی به دلیل نوسانات دمایی و ترک خوردگی، ذرات ریز تولید می کنند که به راحتی توسط باد حمل می شوند. فقدان پوشش گیاهی و فرایندهای هوازدگی در کویر در انجیر بافق نیز به تشدید فرسایش بادی کمک می کنند.

نتیجه گیری

فرسایش بادی به عنوان یکی از عوامل تخریب محیط زیست در مناطق خشک و نیمه خشک، پیامدهای گسترده ای برای پایداری محیط زیست و جوامع انسانی به همراه دارد. اهمیت بررسی رسوبات بادی و شناسایی منشأ آنها موجب شد تا در این پژوهش به بررسی منشأ این رسوبات با استفاده از شاخص های هوازدگی ژئوشیمیایی پرداخته شود. این مطالعه برای اولین بار در کویر در انجیر بافق به شناسایی منابع رسوبات بادی با استفاده از ردیاب های ژئوشیمیایی و شاخص های هوازدگی پرداخته است. در این پژوهش، به منظور تعیین سهم منابع تولید رسوب، از مدل ترکیبی بیسین استفاده شد. پیشنهاد می شود در مطالعات آتی در حوزه منشأیابی رسوب، سایر منابع عدم قطعیت نیز مورد بررسی قرار گیرند.

در نهایت، یافته های این تحقیق می تواند به عنوان پایه ای برای کاهش فرسایش و کنترل رسوب در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد. با شناسایی دقیق منابع اصلی تولید رسوب در منطقه، امکان طراحی و اجرای اقدامات مدیریتی و حفاظتی کوثر فراهم خواهد شد. به طور کلی پژوهش در رابطه با شناسایی منابع رسوب دارای محدودیت هایی است. بودجه های پژوهشی به طور مستقیم بر تعداد نمونه های جمع آوری شده برای منابع رسوب و رسوب هدف تأثیر گذار است. جهت بررسی نوع و سهم هر یک از منابع در فصل های مختلف که سرعت و جهت باد متفاوت است، پیشنهاد می گردد در مطالعات آتی، منشأیابی رسوبات بادی با در نظر گرفتن ویژگی های باد به ویژه پتانسیل حمل رسوب در فصل های مختلف انجام شود.

منابع

- اکبریان، محمد؛ نوحه گر، احمد (۱۳۹۳). ارزیابی تاثیر جنگل کاری در کاهش فرسایش بادی محدوده پی بشک در شهرستان جاسک. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۹ (۱۱۴)، ۱۷۹-۱۹۰. https://jgr.ui.ac.ir/article_18061.html
- حکیم خانی، شاهرخ (۱۳۸۵). *بررسی استفاده از ردیاب ها در منشأیابی رسوبات آبی ریزانه (مطالعه موردی حوضه ایستگاه پخش سیلاب پلدشت)*. پایان نامه دکتري احیا مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه تهران.
- رفاهی، حسینی (۱۳۸۸). *فرسایش بادی و کنترل آن*. تهران: دانشگاه تهران.
- روشن نکو، پروین؛ نصرتی، کاظم؛ دهنبدی، رضا (۱۴۰۴). کارایی شاخص های هوازدگی و عناصر ژئوشیمیایی در منشأیابی منابع رسوب زیر حوضه ها (منطقه مطالعاتی: حوضه آبخیز الوند، استان کرمانشاه). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۱)، ۱-۱۶. doi:

10.22059/ijswr.2024.378696.669743

طاهری‌نژاد، کاظم (۱۳۹۶). تحلیل مکان‌گزینی و تغییرات مورفولوژیکی ریگ بافتی با تاکید بر نقش باد و توپوگرافی محلی. پایان نامه کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه یزد.

فیض‌نیا، سادات؛ پورطیب، فرانک؛ احمدی، حسن؛ شیرانی، کوروش (۱۳۹۴). منشأیابی رسوبات بادی حاشیه پلایای گاوخونی با استفاده از روش ژئوشیمی. فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۲(۴)، ۶۹۵-۷۱۰. doi: 10.22092/ijrdr.2016. 106042

قیصری، فاطمه؛ ایوبی، شمس‌الله (۱۳۹۵). بررسی تغییرپذیری برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در طول یک ترانسکت تحت تأثیر فرسایش بادی در منطقه سگری اصفهان. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰(۱)، ۱۳۶-۱۴۸. doi: 10.22067/jsw.v30i1.31897

محمدرضا، شیرین؛ آبروش، صادق؛ ثروتی، محمدرضا؛ قهرودی تالی، منیژه (۱۴۰۰). منشأیابی رسوبات بادی بر اساس ردیاب‌های ژئوشیمیایی به روش انگشتنگاری رسوبی. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۲(۴۶)، ۳۰-۱۷. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161553.html

ملکی، صدیقه؛ کریمی، علیرضا؛ هاشمی، حسن (۱۳۸۹). فرسایش بادی و کنترل آن در گناباد. در: مجموعه مقالات دومین همایش ملی فرسایش بادی و طوفان‌های گرد و غبار، (صص. ۲۷-۳۱). یزد: دانشگاه یزد. <https://civilica. om/doc/101026>

نصرتی، کاظم؛ احمدی، فروزان (۱۳۹۷). منشأیابی منابع رسوب در فصل‌های بهار و پاییز با استفاده از ردیاب‌های ژئوشیمیایی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۲(۴۶)، ۶۵-۷۳. <https://www.magiran.com/p1905103>

نصرتی، کاظم؛ احمدی، حسن؛ شریفی، فرود (۱۳۹۱). منشأیابی منابع رسوب، ارتباط بین فعالیت‌های آنزیمی خاک و رسوب. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۶(۶۰)، ۲۲۷-۲۳۷. doi: 10.1001.1.24763594.1391.16.60. 19.4

References

- Akbarian, M., & Nohegar, A. (2013). Evaluation of the effect of afforestation on wind erosion reduction in the Pibeshk area of Jask County. *Geographical Research Quarterly*, 29(3), 179–190. https://jgr.ui.ac.ir/article_18061.html. (In Persian)
- Babechuk, M.G., Widdowson, M., & Kamber, B.S. (2014). Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chemical Geology*, 363, 56–75. doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.10.027.
- Ballantine, D., Walling, D., Collins, A., & Leeks, G. (2009). The content and storage of phosphorus in fine-grained channel bed sediment in contrasting lowland agricultural catchments in the UK. *Geoderma*, 151, 141-149. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.03.021.
- Baiyegunhi, C., Liu, K., & Gwavava, O. (2017). Geochemistry of sandstones and shales from the Eccu Group, Karoo Supergroup, in the Eastern Cape Province of South Africa: Implications for provenance, weathering and tectonic setting. *Open Geosciences*, 9, 340–360. doi: 10.1515/geo-2017-0028.
- Berger, A., & Frei, R. (2014). The fate of chromium during tropical weathering: a laterite profile from Central Madagascar. *Geoderma*, 213, 521–532. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.09.004.
- Beavers, A. H., Fehrenbacher, J. B., Johnson, P. R., & Jones, R. L. (1963). CaO-ZrO₂ molar ratios as an index of weathering. *Soil Science Society of America Journal*, 27, 408–412. doi: 10.2136/sssaj1963.03615995002700040018x.
- Brown, D. J., Helmke, P. A., & Clayton, M. K. (2003). Robust geochemical indices for redox and weathering on a granitic laterite landscape in central Uganda. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(15), 2711–2723. doi: 10.1016/S0016-7037(03)00104-2.
- Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., & Markovic, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies. *Quaternary International*, 240(1-2), 12–21. doi: 10.1016/j.quaint.2010.07.019.
- Collins, A. L., Walling, D. E., & Leeks, G. J. L. (1997). Fingerprinting the origin of fluvial suspended sediment in larger river basins: combining assessment of spatial provenance and source type. *Geografiska Annaler*, 79(4), 239–254. doi: 10.1111/j.0435-3676.1997.00020.x.
- Collins, A., & Walling, D. (2007). Sources of fine sediment recovered from the channel bed of

- lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology*, 88(1-2), 120–138. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.018.
- Colman, R. F. (1982). Affinity labeling of purine nucleotide sites in proteins. *Annual review of biochemistry*, 52(1), 67-91. doi: 10.1146/annurev.bi.52.070183.000435.
- Colman, S. M. (1982). *Chemical weathering of basalts and andesites: Evidence from weathering rinds* (Professional Paper 1246). U.S.A: Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/pp/1246/report.pdf>.
- Conrey, R.M., Hooper, P.R., Larson, P.B., Chesley, J., & Ruiz, J. (2001). Trace element and isotopic evidence for two types of crustal melting beneath a High Cascade volcanic center, Mt. Jefferson, Oregon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141(6), 710-732. doi: 10.1007/s004100100259.
- Chen, Q., Li, Z., Dong, S., Wang, N., Lai, D.Y.F., & Ning, K. (2018). Spatial variations in the chemical composition of eolian sediments in hyperarid regions: A case study from the Badain Jaran Desert, Northwestern China. *J. Sediment. Journal of Sedimentary Research*, 88(2), 290–300. doi: 10.2110/jsr.2018.11.
- Chen, F., Wang, X., Li, X., Wang, J., Xie, D., Ni, J., & Liu, Y. (2019). Using the sediment fingerprinting method to identify the sediment sources in small catchments with similar geological conditions. *Agriculture, ecosystems & environment*, 286, 106655. doi: 10.1016/j.agee.2019.106655.
- Chen, Q., Li, Z., Dong, S., Yu, Q., Zhang, C., & Yu, X. (2021). Applicability of chemical weathering indices of eolian sands from the deserts in northern China. *Catena*, 198, 105032. doi: 10.1016/j.catena.2020.105032.
- Chen, G., Liang, A., Dong, Z., Shi, W., Li, C., Nan, W., & Shao, T. (2022). Quantification of the aeolian sand source in the Ulan Buh Desert using the sediment source fingerprinting (SSF) method within MixSIAR modelling framework. *Catena*, 219, 106579. doi: 10.1016/j.catena.2022.106579.
- Chen, G., Li, G., Liang, A., Dong, Z., Liu, X., Ma, F., Cao, M., Yu, J., & Sadiq, M. (2024). Fingerprinting aeolian sediment sources in the Mu Us Sandy Land using the MixSIAR model. *Catena*, 241, 108049. doi: 10.1016/j.catena.2024.108049.
- Chetelat, B., Liu, C., Wang, Q., & Zhang, G. (2013). Assessing the influence of lithology on weathering indices of Changjiang river sediments. *Chemical Geology*, 359, 108–115. doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.09.018.
- Chittleborough, D. (1991). Indices of weathering for soils and palaeosols formed on silicate rocks. *Australian Journal of Earth Sciences*, 38(1), 115-120. doi: 10.1080/08120099108727959.
- Derakhshan-Babaei, F., Nosrati, K., Tikhomirov, D., Christl, M., Sadough, H., & Egli, M. (2020). Relating the spatial variability of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones. *Geomorphology*, 363, 107235. doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107235.
- Dessert, C., Dupre, B., Gaillardet, J., Francois, L.M., Allegre, C.J., Anderson, S.P., & Blum, A.E. (2003). Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology*, 202(3-4), 257–273. doi: 10.1016/j.chemgeo.2002.10.001.
- Du, S., Wu, Y., & Tan, L. (2018). Geochemical evidence for the provenance of aeolian deposits in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau. *Aeolian Research*, 32, 60–70. doi: 10.1016/j.aeolia.2018.01.005.
- Egli, M., Plötze, M., Tikhomirov, D., Kraut, T., Wiesenberger, G.L.B., Lauria, G., & Raimondi, S. (2019). Soil development on sediments and evaporites of the Messinian crisis. *Catena*, 187, 104368. doi: 10.1016/j.catena.2019.104368.
- Feiznia, S., Pourteib, F., Ahmadi, H., & Shirani, K. (2015). Sediment source fingerprinting of Gavkhuni playa margin aeolian deposits using geochemical methods. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 22(4), 695–710. doi: 10.22092/ijrdr.2016.106042. (In Persian)
- Fedo, C. M., Nesbitt, H.W., & Young, G.M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23. doi: 10.1130/0091-7613(1995)0232.3.CO;2.
- Feng, Z.-D. (1997). Geochemical characteristics of a loess-soil sequence in central Kansas. *Soil*

- Science Society of America Journal*, 61(2), 384–391. doi: 10.2136/sssaj1997.03615995006100020023x.
- Fox, J., & Papanicolaou, A. (2008). Application of the spatial distribution of nitrogen stable isotopes for sediment tracing at the watershed scale. *Journal of Hydrology*, 358(1-2), 46-55. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.032.
- Garzanti, E., Padoan, M., Peruta, L., Setti, M., Najman, Y., & Villa, I.M. (2013). Weathering geochemistry and Sr-Nd fingerprints of equatorial upper Nile and Congo muds. *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 14(2), 292–316. doi: 10.1002/ggge.20060.
- Garzanti, E., Padoan, M., Setti, M., López-Galindo, A., & Villa, I.M. (2014). Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa). *Chemical Geology*, 366, 61–74. doi: 10.1016/j.chemgeo.2013.12.016.
- Garrett, R. G., & Lalor, G. C. (2005). The Fe/Na ratio, a framework for modelling trace element distributions in Jamaican soils. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5(2), 147–157. doi: 10.1144/1467-7873/03-057.
- Ghaysari, F., & Ayobi, S. (2017). Investigation of variability in some physical and chemical properties of soil along a transect affected by wind erosion in Segzi region, Isfahan. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 30(1), 136–148. doi: 10.22067/jsv.v30i1.31897. (In Persian).
- Guo, Y., Yang, S., Ni, S., Chao, L., Ping, Y., & Wang, Z. (2018). Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 227, 48–63. doi: 10.1016/j.gca.2018.02.015.
- Harnois, L., & Moore, J. M. (1988). Geochemistry and origin of the Ore Chimney Formation, a transported paleoregolith in the Grenville Province of southeastern Ontario, Canada. *Chemical Geology*, 69(3-4), 267-289. doi: 10.1016/0009-2541(88)90039-3.
- Hakimkhani, S. (2006). *Investigation of using tracers in fingerprinting fine-grained water sediments (Case study: Poldasht flood spreading basin)*, Thesis, Faculty of Natural Resources, University of Tehran. (In Persian)
- Jenny, H. (1941). *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. New York: Dover (ISBN13 9780486681283).
- Kasanzu, C. H., Maboko, M. A. H., & Many, S. (2016). Reconstruction of Pliocene-Pleistocene sediment sources and weathering intensity in the paleo-life rich Olduvai and Laetoli basins of northern Tanzania using major and trace element geochemistry and Sr isotopic data. *Journal of African Earth Sciences*, 123, 89–98. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.07.019.
- Large, R. R., Gemmell, J. B., Paulick, H., & Huston, D. L. (2001). The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Economic Geology*, 96(5), 957–971. doi: 10.2113/gsecongeo.96.5.957.
- Li, B., Feng, Q., Li, Z., Wang, F., Luo, C., Li, R., & Hu, H. (2024). Provenance of surface dune sands in the Gurbantunggut Desert, northwestern China: Qualitative and quantitative assessment using geochemical fingerprinting. *Geomorphology*, 452, 109115. doi: 10.1016/j.geomorph.2023.109115.
- Li, Y., Gholami, H., Song, Y., Fathabadi, A., Malakooti, H., & Collins, A. L. (2020). Source fingerprinting loess deposits in Central Asia using elemental geochemistry with Bayesian and GLUE models. *Catena*, 194, 104808. doi: 10.1016/j.catena.2020.104808.
- Liu, Z., & Yang, X. (2013). Geochemical-geomorphological evidence for the provenance of aeolian sands and sedimentary environments in the Hunshandake Sandy Land, Eastern Inner Mongolia, China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 87(3), 871–884. doi: 10.1111/1755-6724.12095.
- Liu, Q., & Yang, X. (2018). Geochemical composition and provenance of aeolian sands in the Ordos Deserts, northern China. *Geomorphology*, 318, 354–374. doi: 10.1016/j.geomorph.2018.06.017.
- Liu, D., Abuduwaili, J., Lei, J., Wu, G., & Gui, D. (2011). Wind erosion of saline playa sediments

- and its ecological effects in Ebinur Lake, Xinjiang, China. *Environmental Earth Sciences*, 63(2), 241-250. doi: 10.1007/s12665-010-0690-4.
- Liu, X., Du, H., Li, S., Wang, T., & Fan, Y. (2022). Effects of different cropland reclamation periods on soil particle size and nutrients from the perspective of wind erosion in the Mu Us Sandy Land. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 861273. doi: 10.3389/fenvs.2022.861273.
- Lopez, J. M. G., Bauluz, B., Nieto, F., & Oliete, A. Y. (2006). Factors controlling the trace-element distribution in fine-grained rocks: The Albian kaolinite-rich deposits of the Iberian Range (NE Spain). *Chemical Geology*, 231(1-2), 31-49. doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.08.024.
- Lupker, M., France-Lanord, C., Galy, V., Lave, J.M., & Kudrass, H. (2013). Increasing chemical weathering in the Himalayan system since the Last Glacial Maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 365, 243-252. doi: 10.1016/j.epsl.2013.01.038.
- Maleki, S., Karimi, A., & Hashemi, H. (2010). Wind erosion and its control in Gonabad. In *Proceedings of the 2nd National Conference on Wind Erosion and Dust Storms* (pp. 27-31). Yazd University. <https://civilica.com/doc/101026>. (In Persian).
- Maher, B.A., & Taylor, R.M. (1988). Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature*, 336(6197), 368-370. doi: 10.1038/336368a0.
- Maynard, J.B. (1992). Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. *The Journal of Geology*, 100 (3), 279-289. doi: 10.1086/629632.
- McLemore, V. T., Dunbar, N., Tachie-Menson, S., & Donahue, K. (2010). *The Effect of Weathering on the Acid-Producing Potential of the Goathill North Rock Pile, Questa mine, NM*. London: CRC Press. 10, 213-227.
- Meng, X., Liu, L., Zhao, W., He, T., Chen, J., & Ji, J. (2019). Distant Taklimakan Desert as an important source of aeolian deposits on the Chinese Loess Plateau as evidenced by carbonate minerals. *Geophysical Research Letters*, 46(9), 4854-4862. doi: 10.1029/2018GL081551.
- Moquet, J.-S., Crave, A., Viers, J., Seyler, P., Armijos, E., Bourrel, L., Chavarri, E., Lagane, C., Laraque, A., Casimiro, W.S.L., Pombosa, R., Noriega, L., Vera, A., & Guyot, J.-L. (2011). Chemical weathering and atmospheric/soil CO₂ uptake in the Andean and Foreland Amazon basins. *Chemical Geology*, 287(1-2), 1-26. doi: 10.1016/j.chemgeo.2011.01.005.
- Moosdorf, N., Hartmann, J., Lauerwald, R., Hagedorn, B., & Kempe, S. (2011). Atmospheric CO₂ consumption by chemical weathering in North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(24), 7829-7854. doi: 10.1016/j.gca.2011.10.007.
- Moradi, H. R., Rajabi, M., & Faragzadeh, M. (2011). Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran. *Catena*, 84(1-2), 35-46. doi: 10.1016/j.catena.2010.08.016.
- Mohammadi Raigania, Z., Nosrati, K., & Collins, A. (2019). Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources in a large Iranian catchment under dry-land cultivation and rangeland farming. Combining geochemical tracers and weathering indices. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 24-100613. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100613.
- Mohammadkhan, S., Abroosh, S., Sarvati, M. R., & Ghahroodi Tali, M. (2021). Sediment source fingerprinting of aeolian deposits using geochemical tracers through sediment fingerprinting method. *Geographical Studies of Arid Regions*, 12(46), 17-30. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161553.html. (In Persian)
- Morgan, R. P. C. (1995). *Soil Erosion and Conservation*. Longman: Ltd, UK. <https://scholar.google.com>.
- Nauman, T. W., Munson, S. M., Dhital, S., Webb, N. P., & Duniway, M. C. (2023). Synergistic soil, land use, and climate influences on wind erosion on the Colorado Plateau: Implications for management. *Science of the Total Environment*, 865, 164605. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164605.
- Nordt, L., & Driese, S. (2010). New weathering index improves paleorainfall estimates from Vertisols. *Geology*, 38(5), 407-410. doi: 10.1130/G30689.1.
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885), 715-717. doi: 10.1038/299715a0.
- Nosrati, K., Govers, G., Ahmadi, H., Sharifi, F., Amoozegar, M. A., Merckx, R., & Vanmaercke, M.

- (2011). An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: biochemical fingerprints? *Sediment Research*, 26(2), 136-151. doi: 10.1016/S1001-6279(11)60082-6.
- Nosrati, K., Govers, G., Semmens, B. X., & Ward, E. J. (2014). A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting. *Geoderma*, 217, 173-180. doi: 10.1016/j.geoderma.
- Nosrati, K., Haddadchi, A., Collins, A.L., Jalali, S., & Zare, M.R. (2018). Tracing sediment sources in a mountainous forest catchment under road construction in northern Iran: comparison of Bayesian and frequentist approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (31), 30979–30997. doi: 10.1007/s11356-018-3097-5.
- Nosrati, K., Akbari, M., Ayoubi, Sh., Degos, E., Koubansky, A., Coquatrix, Q., Pulley, S., & Collins, A. (2020). Storm dust source fingerprinting for different particle size fractions using colour and magnetic susceptibility and a Bayesian un-mixing model. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(24), 31578–31594. doi: 10.1007/s11356-020-09249-3.
- Nosrati, K., Akbari-Mahdiabad, M., Ayoubi, S., & Collins, A. L. (2021). An exploratory study on the use of different composite magnetic and colour fingerprints in aeolian sediment provenance fingerprinting. *Catena*, 200, 105182. doi: 10.1016/j.catena.2021.105182.
- 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126115.
- Nosrati, K., Moradian, H., Dolatkordestani, M., Mol, L., & Collins, A. L. (2022). The efficiency of elemental geochemistry and weathering indices as tracers in aeolian sediment provenance fingerprinting. *Catena*, 210, 105932. doi: 10.1016/j.catena.2021.105932.
- Nosrati, K., & Ahmadi, F. (2018). Sediment source fingerprinting during spring and autumn using geochemical tracers. *Iranian Journal of Geology*, 12 (46), 65–73. <https://www.magiran.com/p1905103>. (In Persian).
- Nosrati, K., Ahmadi, H., & Sharifi, F. (2012). Sediment source fingerprinting: Relationship between soil enzyme activities and sediment. *Journal of Agricultural Science and Technology, Water and Soil Science*, 16(60), 227–237. doi: 10.1001.1.24763594.1391.16.60.19.4. (In Persian)
- Pasztor, L., Négyesi, G., Laborczy, A., & Kovacs, T. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 2421-2432. doi: 10.5194/nhess-16-2421-2016.
- Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107(6), 501–504. doi: 10.1017/S0016756800058581.
- Piché, M., & Jébrak, M. (2004). Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 82(1-3), 59–77. doi: 10.1016/j.gexplo.2003.10.001.
- Price, J.R., & Velbel, M.A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202(3), 397–416. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126115.
- Pulley, S., Foster, I., & Antunes, P. (2014). The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene river basin. *Geomorphology*, 228, 303-319. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.09.016.
- Pulley, S., Foster, I., & Collins, A.L. (2017). The impact of catchment source group classification on the accuracy of sediment fingerprinting outputs. *Journal of Environmental Management*, 194, 16–26. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.04.048.
- Rafahi, H. (2009). *Wind erosion and conservation*. Tehran: University of Tehran. (In Persian).
- Raigani, Z. M., Nosrati, K., & Collins, A. L. (2019). Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources in a large Iranian catchment under dry-land cultivation and rangeland farming: Combining geochemical tracers and weathering indices. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 24, 100613. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100613.
- Rocha Filho, P., Antunes, F. S., & Falcão, M. F. G. (1985). Quantitative influence of the weathering upon the mechanical properties of a young gneiss residual soil. *Proceedings of the First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils*, 1, 281-294. https://scholar.google.com/scholar?cluster=15556124631364097905&hl=fa&as_

sdt=2005&sciodt=0,5.

- Roshan Nekou, P., Nosrati, K., & Dehbandi, R. (2025). Efficiency of weathering indices and geochemical elements in tracing sediment sources of sub-basins (Study area: Alvand watershed, Kermanshah province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(1), 1-16. doi: 10.22059/ijswr.2024.378696.669743. (In Persian)
- Shao, Y. (2008). *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-1-4020-8895-7_9.
- Taheri Nezhad, K. (2016). *Analysis of site selection and morphological changes of Bafq sand dunes with emphasis on the role of wind and local topography*, Thesis, Geomorphology, Yazd University (In Persian)
- Udagedara, D. T., Oguchi, C. T., & Gunatilake, A. A. J. K. (2017). Combination of chemical indices and physical properties in the assessment of weathering grades of sillimanite-garnet gneiss in tropical environment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76, 145-157. doi: 10.1007/s10064-016-0878-2.
- Uzgoren-Aydin, N., Aydin, A., & Malpas, J. (2002). Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering geology*, 63(1-2), 99-119. doi: 10.1016/S0013-7952(01)00073-4.
- Vogt, T. (1927). Sulitjelmfeltets geologi og petrografi. *Norges Geologiske Undersokelse*, 121, 1-560. doi: 10.4236/jhepgc.2023.91023.
- Von Eynatten, H., Barceló-Vidal, C., & Pawlowsky-Glahn, V. (2003). Modeling compositional change: the example of chemical weathering of granitoid rocks. *Mathematical Geology*, 35, 231-251. doi: 10.1023/A:1023835513705.
- Wang, X., Lou, J., Cai, D., & Jiao, L. (2019). Effects of Earth surface processes on the heterogeneity of surface soil elements and the responses of vegetation elements in the Otindag Desert, China. *Catena*, 183, 104214. doi: 10.1016/j.catena.2019.104214.
- Walling, D.E., & Collins, A. L. (2004). Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography*, 28(2), 159-196. doi: 10.1191/0309133304pp409ra.
- Walling, D.E., Owens, P.N., Waterfall, B.D., Leeks, G.J.L., & Wass, P.D. (2000). The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. *The Science of the Total Environment*, 251, 205-222. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00384-3.
- Walling, D. E., Golosov, V., & Olley, J. (2013). Introduction to the special issue, Tracer Applications in Sediment Research. *Hydrological Processes*, 27(6), 775-974. doi: 10.1002/hyp.9701
- Walker, J.C.G., Hays, P.B., & Kasting, J.F. (1981). A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C10), 9776-9782. doi: 10.1029/JC086iC10p09776.
- Wilkinson, S., Wallbrink, P., Hancock, G., Blake, W., Shakesby, R., & Doerr, S. (2009). Fallout radionuclide tracers identify a switch in sediment sources and transport-limited sediment yield following wildfire in a eucalypt forest. *Geomorphology*, 110, 140-151. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.04.001.
- White, A. F (1995). Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals in Soil: An Overview. Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals. *Mineralogical Society of America*, 31, 1-22. doi: 10.1515/9781501509650-011.
- Zhou, A., Zhao, W., Han, Y., Zhang, S., & Pereira, P. (2025). Effects and benefits of wind erosion prevention in China's dryland and surrounding countries. *Catena*, 251, 108812. doi: 10.1016/j.catena.2025.108812.
- Zhao, M.-Y., & Zheng, Y.-F. (2015). The intensity of chemical weathering: Geochemical constraints from marine detrital sediments of Triassic age in South China. *Chemical Geology*, 391, 111-122. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.11.004.