

کاربرد ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای و پشت سدی در شناسایی خاستگاه رسوبات: مطالعه موردی از حوضه آبریز سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو- کرمان، ایران

هدا باوی

استاد مدعو گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

نویسنده مسئول: Bavi.hoda@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

دریاچه پشت سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو در جنوب کرمان، میزبان رسوبات ناشی از هوازدگی و فرسایش طبیعی سنگ‌های متنوع بالادست است. به منظور شناسایی خاستگاه این رسوبات، ۱۸ نمونه از رسوبات آواری در اندازه ماسه از آبراهه‌های اصلی و رسوبات ته‌نشست‌یافته در پشت سد برداشت شده است و با استفاده از روش‌های XRF و XRD مورد تجزیه ژئوشیمیایی قرار گرفته تا سهم جرمی عناصر اصلی، عناصر فرعی و عناصر نادر حاکی تعیین شود. محاسبه شاخص شیمیایی دگرسانی (CIA) و بررسی نمودار سه‌تایی A-CN-K نشان‌دهنده درجه هوازدگی پایین تا متوسط و شرایط آب‌وهوایی خشک تا نیمه‌خشک در ناحیه خاستگاه است. الگوی پراکنش داده‌ها در نمودارهای دوتایی و سه‌تایی نشان می‌دهد که ترکیب غالب رسوبات عمدتاً از سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا مافیک (آندزیت و آندزیت-بازالت) مشتق شده است که در کنار آن حضور سنگ‌های فلسیک (داسیت و ریوداسیت) نیز تایید می‌شود. مقادیر پایین کروم و نیکل، منشأ الترامافیک را رد می‌کنند. جایگاه نمونه‌ها در نمودارهای ژئوشیمیایی دوتایی و سه‌تایی و نسبت‌های کلیدی نظیر Th/U و La/Th حاکی از منشأ ماگماتیکی و جایگاه تکتونیکی مرتبط با قوس‌های آتشفشانی اقیانوسی (Oceanic Island Arc) هستند. این نتایج، اطلاعات پایه‌ای ارزشمندی جهت مدیریت منابع رسوبی در مناطق صنعتی و تدوین راهبردهای توسعه پایدار در اختیار مدیران و سیاستگذاران قرار می‌دهند.

واژگان کلیدی: معدن مس درآلو، سد رسوب‌گیر، خاستگاه، ژئوشیمی رسوبات، شاخص‌های دگرسانی

۱- پیشگفتار

ساختار رسوبات توانمندی قابل‌توجهی در حفظ و بازتاب اطلاعات کلیدی مربوط به موقعیت منشأ و تاریخچه هوازدگی و فرسایش در طول فرآیند انتقال از منبع تا محل ته‌نشینی^۱ دارا می‌باشد (روی و همکاران، ۲۰۲۵؛ پل و همکاران، ۲۰۲۳؛ بوروا و لاسکار، ۲۰۲۲؛ حسین و همکاران، ۲۰۱۸؛ روی و روزر، ۲۰۱۳؛ اعتمادسعید و همکاران، ۲۰۱۱؛ روزر و کورش، ۱۹۸۸؛ هایاشی و همکاران، ۱۹۹۷؛ پاتر، ۱۹۷۸). تحرک شیمیایی عناصر^۲ به نوع سنگ مادر و شرایط اقلیمی حاکم وابسته است و به طور عمده تحت تأثیر کانی‌شناسی و تغییرات فیزیکوشیمیایی منشأ طی فرآیند هوازدگی قرار دارد (کانهاییا و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین، آنالیز ویژگی‌های

ژئوشیمیایی رسوبات، شامل فراوانی جرمی عناصر اصلی^۳، عناصر فرعی^۴ و عناصر نادر حاکی^۵، امکان بازسازی و تفسیر فرآیندهای زمین‌شناسی مرتبط با تعیین منشأ را فراهم می‌آورد (روی و همکاران، ۲۰۲۵؛ چن و همکاران، ۲۰۲۴؛ لف، ۲۰۲۴؛ ساها و همکاران، ۲۰۲۳؛ بگم و همکاران، ۲۰۲۱؛ آرمسترانگ-آلترین و همکاران، ۲۰۲۱؛ هه و همکاران، ۲۰۲۰؛ روی و روزر، ۲۰۱۳؛ نسبیت و همکاران، ۱۹۹۶؛ مک‌لنن و همکاران، ۱۹۹۳؛ بهاتیا و کروک، ۱۹۸۶). رسوبات به عنوان یکی از مخازن کلیدی زمین و منابع مهم انتشار فلزات، نقش اساسی در فرآیندهای ژئوشیمیایی و توزیع فضایی عناصر بالقوه آلاینده^۶ (PCE) ایفا می‌کنند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴، ۲۰۲۴). مقدار ذخیره فلزات سنگین^۷ (HM) در رسوبات

^۵ trace elements

^۶ Presumably Contaminating Elements

^۷ heavy metals

^۱ source-to-sink

^۲ mobility

^۳ major elements

^۴ minor elements

سنگ یا سنگ‌های مولد^{۱۱} و شرایط آب و هوایی حاکم بر منطقه^{۱۲} می‌پردازد (روی و همکاران، ۲۰۲۵؛ باوی، ۱۳۹۹، ۱۴۰۲الف؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ کریتیچلی، ۲۰۰۷). این عوامل به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر ترکیب، ویژگی‌ها و رفتار رسوبات تأثیرگذار هستند. با بهره‌گیری از اطلاعات ژئوشیمیایی عناصر، می‌توان فرایندهای زمین‌شناسی مربوط به هوازگی، فرسایش و انتقال مواد را به صورت دقیق‌تر بازسازی کرد و در نتیجه، مدیریت پایدار منابع آب و خاک منطقه را بهبود بخشید.

۲- موقعیت زمین‌شناسی و جغرافیایی

سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو در منتهی‌الیه حوضه آبریز با وسعتی معادل ۱۴/۱۴ کیلومتر مربع و محیطی حدود ۱۹/۸۶ کیلومتر واقع شده است. این سد در بخش جنوبی حوضه آبریز دره انجیر (جنوب زیر حوضه قریه العرب) در جنوب استان کرمان واقع شده است. ارتفاعات محدودکننده این حوضه آبریز نقش مهمی در جدا کردن دو حوضه بزرگ دره انجیر و حوضه جازموریان ایفا می‌کنند. به طور کلی، ارتفاع متوسط این حوضه از سطح آب دریا برابر با ۳۰۶۸ متر است که آن را در دسته حوضه‌های مرتفع منطقه قرار می‌دهد. از نظر موقعیت جغرافیایی، این حوضه در طول‌های شرقی بین ۵۰۶۴۲۶ تا ۵۱۲۳۶۷ و عرض‌های شمالی بین ۳۲۵۵۶۴۶ تا ۳۲۶۰۱۱۷ قرار گرفته است. مطالعات میدانی و بازدیدهای صورت گرفته از بالادست سد رسوب‌گیر نشان می‌دهد که واحدهای سنگی این ناحیه تنوع زیادی ندارند و عمدتاً به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند: (۱) لیتولوژی‌های سخت: شامل سنگ‌هایی از جنس آندزیت، بازالت، توف، داسیت و ریوداسیت هستند. این سنگ‌ها به دلیل ساختار فشرده و سختی بالا، به عنوان بخش عمده سنگ‌های بستر منطقه شناخته می‌شوند و (۲) نهشته‌ها و لیتولوژی‌های سست: عمدتاً شامل آبرفت‌ها و سنگ‌های دگرسان شده می‌باشند. این واحدهای سنگی به دلیل بافت متخلخل‌تر و شرایط ژئومورفولوژیکی خاص خود، از نفوذپذیری نسبتاً خوبی برخوردارند. شایان ذکر است که در این پژوهش، سنگ یا سنگ‌های مادر رسوبات مورد بررسی، در جریان بازدیدهای صحرائی به وضوح قابل مشاهده و شناسایی هستند. این

می‌تواند به دلیل تفکیک کانی‌شناسی و همچنین تأثیرات انسان‌زاد^۸ دارای نوسانات مکانی چشمگیری باشد (روی و همکاران، ۲۰۲۵؛ هان و همکاران، ۲۰۲۴؛ آنگول و بیهان، ۲۰۲۰؛ چمن و همکاران، ۲۰۱۵؛ امین و همکاران، ۲۰۰۹؛ اسماعیل، ۱۹۹۳).

سدهای رسوب‌گیر به دلیل تجمع رسوبات در پشت خود به عنوان نقاط کلیدی در حوضه‌های آبریز شناخته می‌شوند. در این راستا، سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو واقع در جنوب استان کرمان با برخورداری از بالاترین استانداردهای طراحی و ساخت نمونه‌ای بارز از زیرساخت‌های حیاتی به شمار می‌آید. این سازه علاوه بر تأمین ظرفیت لازم برای ذخیره و کنترل رواناب‌ها و سیلاب‌های فصلی، نقش مؤثری در کاهش مخاطرات احتمالی و پیامدهای نامطلوب ناشی از سیلاب‌ها بر نواحی مسکونی پایین‌دست دارد. همان‌طور که در مطالعات باوی و زندمقدم (۱۴۰۴) گزارش شده است، فرسایش طبیعی منطقه، به عنوان عامل اصلی واردکننده رسوبات به مخزن سد شناخته شده است. سنگ‌های مادر بالادست از نظر پترولوژیکی عمدتاً شامل توف، آندزیت، بازالت، داسیت و ریوداسیت است که با دگرسانی‌های فیلک، آرژیلیتی و پروپیلیتی مشخص می‌شوند (شرکت ملی صنایع مس ایران، ۱۳۸۹؛ باوی، ۱۳۹۹؛ باوی، ۱۴۰۲a؛ باوی و زندمقدم، ۱۴۰۴). این سنگ‌ها به دلیل شرایط خاص محیطی (شرایط تکتونیکی فعال و نفوذ عوامل هوازگی مانند یخ‌زدگی آب در ترک‌ها، انبساط و انقباض‌های متناوب ناشی از تغییرات دمای شبانه‌روزی و واکنش‌های شیمیایی طبیعی)، نسبت به فرسایش حساسیت قابل توجهی دارند و هرگونه تخریب طبیعی یا تغییر در ساختار آن‌ها می‌تواند مستقیماً بر میزان رسوب ورودی به محدوده سد رسوب‌گیر تأثیرگذار باشد (باوی و زندمقدم، ۱۴۰۴). در نتیجه، هدف نهایی شناسایی خاستگاه اصلی رسوبات و سنگ‌های مادر با بالاترین پتانسیل فرسایش طبیعی است؛ از این‌رو، در راستای تحقق اهداف، مطالعه جامع و دقیق اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب خاکی متمرکز در رسوبات، ضرورتی انکارناپذیر است. در حوزه پترولوژی رسوبات، مطالعه خاستگاه^۹ شامل بررسی‌های گسترده‌ای است که به تعیین منبع سنگ مادر^{۱۰}، موقعیت تکتونیکی

¹¹ tectonic setting

¹² climate

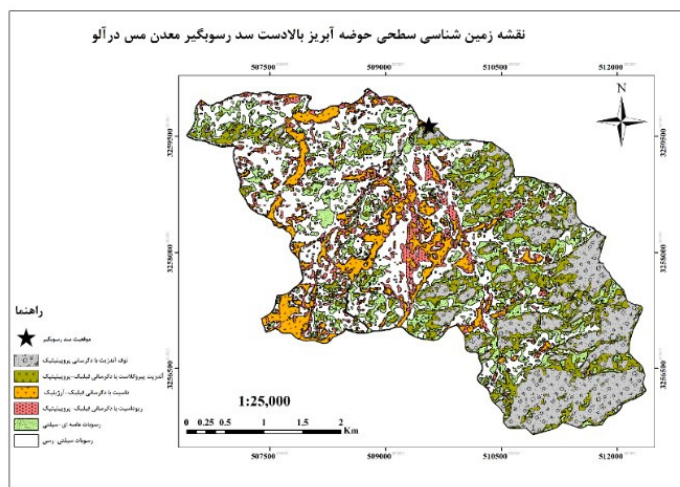
⁸ anthropogenic

⁹ provenance

¹⁰ parent rock

می‌آید. شکل ۱ نمایی کلی از توزیع واحدهای سنگی سخت و سست در سطح حوضه آبریز را نشان می‌دهد.

امر باعث افزایش اطمینان در تعیین خاستگاه اصلی رسوبات پشت سدی می‌شود و امکان تحلیل دقیق‌تر منشأ اصلی و فرایندهای رسوب‌گذاری در این منطقه فراهم



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی سطحی بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس در آلو (باوی و زنده‌مقدم، ۱۴۰۴)

Fig. 1. Surface geological map of the tailings dam watershed of Dar-e-Allo copper mine (Bavi & Zand-Moghadam, 2025).

۳- جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه، تعداد ۱۸ نمونه رسوبی بر مبنای شرایط میدانی از آبراهه‌های درجه ۱ بالادست سد و محل سد رسوب‌گیر برداشت شده است. تمامی نمونه‌های رسوب برداشت شده بیانگر شرایط طبیعی منطقه بوده و تحت تأثیر هیچ‌گونه فعالیت انسانی قرار نگرفته‌اند. به منظور حفظ شرایط فیزیکی و شیمیایی اولیه، نمونه‌های برداشت شده بلافاصله پس از جمع‌آوری در کیسه‌های پلی‌اتیلنی تمیز قرار داده شدند، با شناسه‌های منحصر به فرد (Sample ID) برچسب‌گذاری شده و سپس جهت آماده‌سازی به آزمایشگاه رسوب‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان منتقل شدند. در آزمایشگاه، نمونه‌های مرطوب به مدت یک هفته در شرایط طبیعی و با استفاده از تابش مستقیم نور خورشید خشک شدند تا از تغییرات شیمیایی ناشی از حرارت مصنوعی جلوگیری شود. پس از اتمام فرآیند خشک‌کردن، اجزاء زائد از جمله بقایای گیاهی و همچنین ذرات درشت مانند سنگ‌ریزه‌ها یا کلوخه‌های کوچک سنگی، به صورت دستی و با دقت بالا از کل حجم نمونه‌ها جدا شدند. در مرحله بعد، نمونه‌های خشک‌شده با استفاده از هاون چینی (مورتار) به خوبی آسیاب (پودر) شده و سپس از الک با اندازه ۱۰ مش عبور داده شدند تا اندازه

دانه‌ها یکنواخت و برای آنالیزهای دقیق عنصری آماده شوند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها جهت آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و پراش پرتو X (XRD) از هر نمونه مقدار مشخصی (تقریباً ۵۰ میلی‌گرم) در بسته‌هایی مجزا قرار داده شد. هر بسته به همراه برچسب شناسایی دقیق جهت ردیابی نمونه‌ها، به آزمایشگاه زرازمای تهران ارسال شد. این نمونه‌ها دارای منشأ آواری بوده و تحت شرایط هوازدگی سنگ مادر، فرسایش و حمل و نقل رودخانه‌ای قرار گرفته‌اند. در پی آنالیز ژئوشیمیایی رسوبات برداشت شده، مقدار ۹ عنصر اصلی، ۱۵ عنصر فرعی و ۱۳ عنصر نادر خاکی محاسبه شده است. مقدار عناصر اصلی (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO) به صورت اکسیدی و بر حسب درصد وزنی (%wt) گزارش شده‌اند. غلظت کلی^۱ عناصر فرعی (Rb, Sr, Ba, Pb, Th, U, Zr, Nb, Y, Sc, V, Cr, Co, Ni, Zn, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu) و عناصر نادر (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu) به صورت عنصری و بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم (ppm) محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است که در این مطالعه الگوهای نرمالیزاسیون غلظت کل عناصر بر اساس متوسط پوسته قاره‌ای فوقانی (UCC) رسم شده است (Kemp and Hawkesworth, 2004).

¹ Total concentration

۴- نتایج

دهد (دیکینسون، ۱۹۸۵، ۱۹۸۸). نتایج حاصل از آنالیز رسوبات با منشأ آواری در قالب اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و عناصر کمیاب در سه جدول ۱، ۲ و ۳ آورده شده است. در این جدول‌ها علاوه بر نتایج عنصری پارامترهایی از قبیل اندیس شیمیایی هوازدهی^۱ (CIA) و اندیس تنوع ترکیبی^۲ (ICV) نیز محاسبه و نمایش داده شده‌اند که در مطالعات خاستگاه مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

رسوبات زمینه مناسبی را برای بررسی و تحلیل عوامل مؤثر بر فرآیندهای رسوب‌گذاری فراهم می‌آورند که این امر امکان بازسازی محیط‌های رسوبی در حوضه‌های مختلف را میسر می‌سازد. علاوه بر این، غلظت و فراوانی عناصر موجود در رسوبات می‌تواند تصویری دقیق و قابل اعتماد از فرآیندهای رسوب‌گذاری و ترکیب سنگ‌های مادر ارائه

جدول ۱. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی اکسیدهای عناصر اصلی رسوبات (هایلایت سبز: کمترین غلظت و هایلایت قرمز: بیشترین غلظت)

Table 1. Geochemical analysis results of major element oxides in the sediments (green highlight: lowest concentration; red highlight: highest concentration)

Element	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	CIA	ICV
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
S1	51.02	26.87	10.04	1.90	9.28	4.16	2.92	0.68	0.08	62.15	1.08
S2	54.88	27.23	15.67	2.03	7.02	4.32	3.41	0.83	0.12	64.87	1.23
S3	54.02	27.92	15.01	2.02	6.34	4.36	3.46	0.83	0.12	66.35	1.15
S4	53.48	27.49	27.91	1.43	3.75	3.43	3.53	1.20	0.23	71.96	1.51
S5	53.21	27.55	16.50	1.65	5.46	4.61	3.41	0.92	0.11	67.14	1.19
S6	57.70	29.58	12.21	1.71	3.09	3.85	4.04	0.75	0.09	72.93	0.87
S7	59.80	29.11	10.64	1.40	5.78	2.82	4.54	0.74	0.10	68.90	0.89
S8	48.59	44.14	15.21	1.60	2.11	0.99	6.10	0.56	0.09	82.75	0.60
S9	38.55	22.58	8.61	1.17	16.51	1.46	3.15	0.49	0.13	51.66	1.40
S10	54.45	26.89	33.08	1.88	2.84	2.60	2.87	1.43	0.14	76.39	1.67
S11	46.34	22.22	10.21	1.17	13.57	2.53	3.49	0.59	0.07	53.14	1.42
S12	55.71	25.72	21.68	1.52	5.39	3.13	3.59	0.88	0.10	67.98	1.41
S13	68.65	26.59	10.67	0.79	2.04	4.43	4.33	0.67	0.10	71.11	0.87
S14	67.33	26.89	10.75	0.78	2.00	4.50	4.40	0.67	0.10	71.16	0.86
S15	42.62	24.21	9.75	1.63	15.69	2.02	3.22	0.51	0.10	53.64	1.36
S16	57.42	29.17	19.07	1.44	3.96	1.01	4.46	0.62	0.10	75.58	1.05
S17	49.14	27.93	15.21	2.32	7.32	3.56	2.37	0.70	0.09	67.83	1.13
S18	46.28	26.41	11.07	2.16	9.98	3.37	2.42	0.65	0.08	62.61	1.13
Min	38.55	22.22	8.61	0.78	2.00	0.99	2.37	0.49	0.07	51.66	0.60
Max	68.65	44.14	33.08	2.32	16.51	4.61	6.10	1.43	0.23	82.75	1.67
Mean	53.29	27.69	15.18	1.59	6.78	3.18	3.65	0.76	0.11	67.12	1.16
UCC	66.60	15.40	5.04	2.48	3.59	3.27	2.80	0.64	0.10		

جدول ۲. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی عناصر فرعی رسوبات (هایلایت سبز: کمترین غلظت و هایلایت قرمز: بیشترین غلظت)

Table 1. Geochemical analysis results of minor element in the sediments (green highlight: lowest concentration; red highlight: highest concentration)

Element	Rb	Sr	Ba	Pb	Th	U	Zr	Nb	Y	Sc	V	Cr	Co	Ni	Zn
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
S1	42	421.7	280	11	3.09	2.1	69	4.8	14.6	14.1	124	58	15.3	25	68
S2	51	419.8	310	17	2.74	1.2	67	1.5	17.3	17.2	161	57	21.6	24	81
S3	49	433.2	313	20	2.59	0.9	70	2.6	17.5	13.2	162	59	18.3	22	82
S4	52	222	321	32	4.12	1.3	93	3.9	24.2	20.5	220	85	29.6	23	157
S5	45	414.6	339	14	3.33	1.1	72	6.5	14.5	13.5	183	77	19.4	31	90
S6	49	193.9	322	16	1.93	0.8	79	0.5	16.5	17.6	135	28	19.9	15	84
S7	50	179.3	435	22	2.51	0.9	84	4.5	20.2	18.4	122	35	16.5	18	92
S8	61	152.8	439	23	2.98	0.8	20	4.5	19.9	26	165	21	19.7	17	147
S9	41	235.6	295	22	1.35	0.81	51	3.6	15.1	15.1	110	29	15.7	17	70
S10	39	160.7	260	20	1.11	0.9	36	2.7	15.7	20.3	301	99	31.5	30	103
S11	56	345.9	443	11	1.61	0.9	57	4	13.9	12.2	112	38	14.8	13	80
S12	54	278.8	425	20	2.81	1.1	77	8	17.6	18.1	172	42	20.3	15	98
S13	64	227.3	634	39	3.86	1.2	78	6.9	14.9	10.4	106	40	13.3	15	105
S14	63	222	653	43	4.03	1.2	76	5.9	14.8	10.4	108	38	14	14	107
S15	50	261.5	310	11	1.21	0.69	52	4.3	15.5	16.4	123	36	14.6	20	72
S16	60	163.7	735	19	4.17	1	73	6.5	19.8	18.6	120	44	28.5	24	137
S17	29	236.4	215	13	0.54	0.6	47	2.1	16.9	21.1	147	39	21.8	20	79
S18	28	262.2	217	12	0.71	0.7	48	4	16.4	20	141	35	21.2	19	79
Min	28	152.8	215	11	0.54	0.6	20	0.5	13.9	10.4	106	21	13.3	13	68
Max	64	433.2	735	52	4.17	2.1	93	8	24.2	26	301	99	31.5	31	157
Mean	49.06	268.41	385.89	21.39	2.48	1.01	63.83	4.27	16.96	16.84	150.67	47.78	19.78	20.11	96.17
UCC	49	320	456	11	5.6	1.3	132	8	19	21.9	138	135	26.6	59	72

² Index of Compositional Variability

¹ Chemical Index of Alteration

جدول ۳. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی عناصر نادر خاکی (REEs) رسوبات (هایلایت سبز: کمترین غلظت و هایلایت قرمز: بیشترین غلظت)
Table 1. Geochemical analysis results of REEs in the sediments (green highlight: lowest concentration; red highlight: highest concentration)

ΣREE		LREEs						HREEs						
Element	Unit	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Er	Tm	Yb	Lu
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
S1	16.00	31.00	2.45	9.20	2.25	0.87	2.15	0.42	2.60	1.58	0.21	1.90	0.18	
S2	16.00	31.00	2.77	11.20	2.67	1.01	2.67	0.51	3.18	2.02	0.26	2.70	0.23	
S3	16.00	31.00	2.73	10.70	2.69	0.93	2.44	0.49	3.17	1.83	0.27	2.80	0.21	
S4	23.00	48.00	4.74	18.40	4.75	1.34	3.91	0.73	5.01	2.92	0.33	4.90	0.24	
S5	17.00	31.00	2.75	10.50	2.42	0.84	1.90	0.39	2.33	1.50	0.19	2.30	0.14	
S6	14.00	28.00	2.32	8.50	2.36	0.70	1.96	0.41	2.69	1.50	0.22	2.60	0.14	
S7	17.00	34.00	3.32	13.50	3.31	1.11	2.55	0.56	3.73	2.08	0.26	2.80	0.22	
S8	20.00	36.00	3.94	15.30	3.90	1.06	2.44	0.50	3.25	1.82	0.23	2.60	0.19	
S9	13.00	26.00	2.35	9.30	2.60	0.76	1.84	0.43	2.66	1.46	0.19	1.80	0.16	
S10	13.00	21.00	2.48	9.50	2.61	0.86	1.92	0.46	3.02	1.97	0.24	3.60	0.19	
S11	14.00	25.00	2.36	9.40	2.42	0.76	1.54	0.40	2.33	1.30	0.17	1.90	0.11	
S12	16.00	31.00	3.60	13.40	3.39	0.93	2.04	0.49	3.25	1.86	0.23	3.10	0.19	
S13	18.00	34.00	3.88	13.80	2.90	0.84	1.71	0.39	2.32	1.34	0.15	1.90	0.05	
S14	19.00	35.00	4.28	15.20	3.23	0.91	1.72	0.43	2.56	1.37	0.17	1.90	0.10	
S15	12.00	24.00	2.58	9.70	2.38	0.83	1.67	0.44	2.80	1.46	0.18	2.10	0.14	
S16	18.00	36.00	4.67	17.80	4.31	1.22	2.22	0.54	3.73	2.05	0.28	3.00	0.20	
S17	11.00	21.00	1.91	8.70	2.55	0.91	2.06	0.48	3.08	1.69	0.21	2.50	0.16	
S18	11.00	22.00	1.80	8.10	2.43	0.81	1.97	0.43	3.06	1.65	0.23	2.30	0.19	
Min	11.00	21.00	1.80	8.10	2.25	0.70	1.54	0.39	2.32	1.30	0.15	1.80	0.05	
Max	23.00	48.00	4.74	18.40	4.75	1.34	3.91	0.73	5.01	2.92	0.33	4.90	0.24	
Mean	15.78	30.28	3.05	11.79	2.95	0.93	2.15	0.47	3.04	1.74	0.22	2.59	0.17	
UCC	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	2.3	0.33	2.2	0.32	

($UCC=15/4$) به‌طور چشمگیری افزایش یافته است، که می‌تواند نشان‌دهنده فرآیندهای فرسایش و شست‌وشوی عناصر آلومینیومی از منشأ تا محل دریاچه پشت سد رسوب‌گیر باشد. اکسید آهن سه‌ظرفیتی (Fe_2O_3) با مقادیری بین $8/61$ تا $33/08$ درصد وزنی و میانگین $15/18$ درصد وزنی، نسبت به UCC به مراتب غنی‌تر است (حدود ۳ برابر)، که ممکن است منعکس‌کننده حضور فازهای اکسیدی یا مواد آلی غنی از آهن در رسوبات باشد (باوی و همکاران، ۲۰۲۳b؛ روی و همکاران، ۲۰۲۵). MgO با میانگین $1/59$ درصد وزنی نسبت به UCC تهی‌شدگی نشان می‌دهد، که این کاهش می‌تواند بیانگر منبع سنگی با محتوای پایین منیزیم یا فرآیندهای تغییر یافته پس از رسوب‌گذاری باشد (باوی، ۱۴۰۲الف). اکسید کلسیم (CaO) و اکسید سدیم (Na_2O) به ترتیب در بازه‌های ۲ تا $16/51$ درصد وزنی (میانگین $6/78$) و $0/99$ تا $4/61$ درصد وزنی (میانگین $3/18$) قرار دارند؛ مقادیر سدیم نسبت به UCC کاهش یافته است که می‌تواند به تفاوت در منابع معدنی یا فرآیندهای دگرگونی نسبت داده شود؛ از سوی دیگر افزایش میزان کلسیم در رسوبات می‌تواند با شست‌وشوی واحدهای کربناته در بالادست و مسیر آبراهه‌ها در ارتباط باشد (باوی و همکاران، ۱۴۰۲الف، b، ۲۰۲۴). مقدار اکسید پتاسیم (K_2O) در محدوده $2/37$ تا $6/1$ درصد وزنی با میانگین $3/65$ درصد وزنی قرار دارد که

از فاکتورهای محاسبه بلوغ شیمیایی رسوبات استفاده از نسبت SiO_2/Al_2O_3 است که معرف فراوانی کانی کوارتز در مقابل کانی‌هایی که در ترکیب خود اکسید آلومینیوم ذخیره کرده‌اند مانند کانی‌های رسی و فلدسپات‌ها است (پاتر، ۱۹۷۸). از سوی دیگر، مجموع Na_2O+K_2O نشان‌دهنده مقدار فلدسپات‌های آلکالین در رسوبات است (رولینسون، ۱۹۹۳). با توجه به مقادیر کم کوارتز و مقادیر زیاد کانی رسی در نمونه‌های رسوب (باوی، ۱۳۹۹؛ باوی و همکاران، ۱۴۰۲الف) نسبت لگاریتمی SiO_2/Al_2O_3 در این رسوبات پایین است. بنابراین نمودار پتی‌جان و همکاران (پتی‌جان و همکاران، ۱۹۸۷) ترکیب گریوکی را برای این رسوبات نشان می‌دهد (شکل ۲).

ترکیب ژئوشیمیایی رسوبات عمدتاً تحت تأثیر ترکیب کانی‌شناسی و شیمیایی آن‌ها قرار دارد. یکی از فراوان‌ترین اجزاء موجود در نمونه‌های تحلیل شده، SiO_2 است که مقدار آن در رسوبات برداشت شده بطور متوسط $53/29$ و از حداقل $38/55$ درصد در نمونه S9 تا حداکثر $68/65$ درصد در نمونه S13 متغیر است. هر دو این نمونه‌ها متعلق به آبراهه‌های منشأ گرفته از معدن است. میانگین SiO_2 ($53/29$) نسبت به مقادیر گزارش شده برای پوسته قاره‌ای بالایی ($UCC=66/6$) تهی‌شدگی نشان می‌دهد. غلظت آلومینا (Al_2O_3) نیز در بازه $22/22$ تا $44/14$ درصد وزنی (میانگین $27/69$) قرار دارد که نسبت به مقدار استاندارد

نیز در مقایسه با UCC بالاتر گزارش شده و در بازه ۰/۰۷ تا ۰/۲۳ درصد وزنی (میانگین ۰/۱۱ درصد وزنی) قرار دارد (جدول ۱).

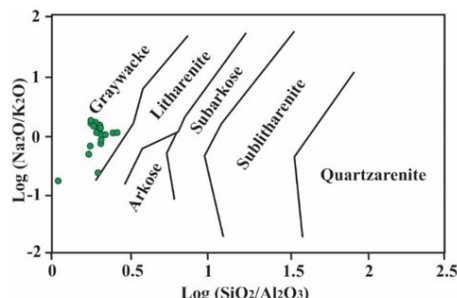
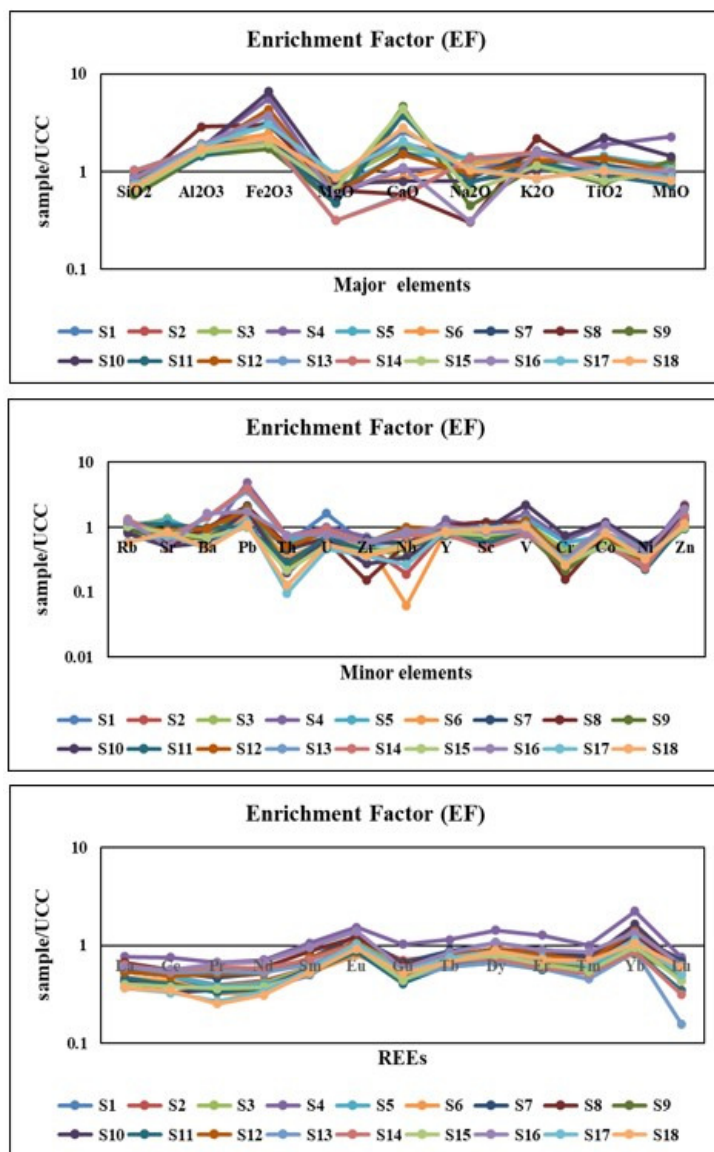


Fig. 2. Geochemical classification of clastic sediments according to Pettijohn et al. (1987). All sediment samples fall within the greywacke field, which reflects the high content of clay minerals in the samples.

بر کیلوگرم. در مقابل، عناصر HREE شامل گادولینیم (Gd) با میانگین ۲/۱۵، تربیم (Tb) با میانگین ۰/۴۷، دیسپروزیم (Dy) با میانگین ۳/۰۴، اربیوم (Er) با میانگین ۱/۷۴، تولیوم (Tm) با میانگین ۰/۲۲، ایتریوم (Yb) با میانگین ۲/۵۹ و لووتسیم (Lu) با میانگین ۰/۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم می باشند (جدول ۳). این موضوع به طور جامع پذیرفته شده است که ترکیب شیمیایی تجمعات رسوبی به طور قابل توجهی تحت تأثیر سهم جرمی فازهای مقاوم در برابر هوازدگی (همچون زیرکن، اسپینل کروم، آپاتیت و مونازیت) قرار دارد. این فازها می توانند منجر به تغییرات نامنظم و پیچیده در غلظت عناصر کمیاب در نمونه های رسوبی شوند (روی و همکاران، ۲۰۲۵؛ سها و همکاران، ۲۰۲۳، کاکس و همکاران، ۱۹۹۵). الگوهای تغییرات غنی شدگی ΣREE نشان می دهد که: ۱) روند کلی تغییرات غلظت عناصر نادر خاکی تا حدود زیادی از روند تغییرات غلظت در پوسته فوقانی زمین تبعیت می کنند. ۲) غلظت عناصر نادر خاکی سبک (LREEs) بالاتر از عناصر نادر خاکی سنگین (HREEs) در نمونه های رسوب است. ۳) ارزیابی نمودارهای غنی شدگی نشان می دهد که در اغلب عناصر ΣREE غنی شدگی قابل توجهی وجود ندارد. شکل ۳ الگوهای غنی شدگی عناصر اصلی، فرعی و کمیاب خاکی را نسبت به استاندارد پوسته قاره ای بالایی (UCC) نشان می دهد.

¹ Light Rare Earth Elements



شکل ۳. الگوهای غنی‌شدگی عناصر اصلی، فرعی و نادر خاکی نسبت به میانگین UCC

Fig. 3. Normalized enrichment patterns of major, minor and REEs in the sediments relative to the average upper continental crust (UCC)

۵- بحث

فرآیند شکل‌گیری، تخریب یا دگرسانی کانی‌ها تأثیر چشم‌گیری بر ترکیب عناصر شیمیایی موجود در رسوبات دارد. در نتیجه، این عناصر در واکنش به تغییرات مکانیکی و شیمیایی یا تحول کانی‌ها، الگوهای رفتاری مشخصی از خود نشان می‌دهند (هازن و همکاران، ۲۰۰۸؛ باوی، ۱۳۹۹؛ الف، ۱۴۰۲ b، ۲۰۲۳). ترکیب شیمیایی رسوبات برای عناصر اصلی، عناصر فرعی و عناصر نادر خاکی نسبت به میانگین ترکیب پوسته قاره‌ای بالا (UCC) نرمال‌سازی شده است تا تغییرات موجود در رسوبات نسبت به UCC

مشخص گردد (کمپ و هاکسورث، ۲۰۰۴). نرمال‌سازی میانگین نمونه‌ها در برابر UCC در شکل ۳ نشان داده شده است. میانگین نرمال‌سازی اکسیدهای SiO_2 (۰/۸)، MgO (۰/۶) و تا حدودی Na_2O (۰/۹۷) نسبت به UCC، تهی‌شدگی در فراوانی جرمی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده از دست رفتن تدریجی کانی‌های سیلیکاته از جمله فلدسپارها است (رادنیک و همکاران، ۲۰۰۳). در مقابل، در Al_2O_3 (۱/۸)، Fe_2O_3 (۳/۰۱)، CaO (۱/۹)، K_2O (۱/۳)، TiO_2 (۱/۲) و MnO (۱/۱) غنی‌شدگی نشان می‌دهند. کاهش Na_2O ، MgO و SiO_2 بیانگر تخریب

در سنگ‌های بازیک و اولترابازیک‌های اولیه دارند (راندیو و همکاران، ۲۰۱۴؛ باوی و همکاران، ۱۴۰۳ الف).

۵-۱- هوازدگی خاستگاه^۲

هوازدگی شیمیایی با تسهیل در تحرک‌پذیری و حذف عناصر و یون‌های مختلف از سیستم تأثیر قابل‌توجهی بر کانی‌شناسی و ترکیب عنصری رسوبات دارد. شدت هوازدگی رسوبات را می‌توان از طریق بررسی‌های ژئوشیمیایی عناصر اصلی، عناصر فرعی و نادر خاکی تعیین کرد (اوتا، ۲۰۰۴؛ نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲؛ ۱۹۸۴؛ ۱۹۹۶؛ جانسون، ۱۹۹۳؛ مک‌لنن و همکاران، ۱۹۹۳). تغییرات در نسبت جرمی عناصر موجود در رسوبات، ویژگی‌های زمین‌شناسی مرتبط با بلوغ^۳، شدت هوازدگی و فرآیندهای حمل‌ونقل را حفظ کرده و بازتاب می‌کند. جهت تعیین درجه هوازدگی منطقه خاستگاه رسوبات، اندیس‌های متفاوتی بر پایه نسبت اکسیدهای عناصر متحرک (برای مثال: Na₂O, K₂O, CaO, MgO) به غیرمتحرک (برای مثال: Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂) معرفی شده است (فون ایناتن و همکاران، ۲۰۰۳؛ نسبیت و یانگ، ۱۹۹۶؛ فدو و همکاران، ۱۹۹۵). از آنجا که آلومینیوم از جمله عنصری است که در حالت اکسیدی غیرمتحرک است؛ بنابراین در طی هوازدگی مقدار آن نسبتاً ثابت است؛ از این‌رو، مقایسه رفتار اکسید آلومینیوم در برابر سایر اکسیدها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در زمینه هوازدگی منطقه خاستگاه ارائه کند. اندیس شیمیایی دگرسانی یا آلتراسیون (CIA)، ارزیابی مناسبی از میزان حضور کانی‌های رسی ثانویه در ارتباط با تجزیه فلدسپارهای اولیه ارائه می‌دهد (شائو و همکاران، ۲۰۱۲؛ فدو و همکاران، ۱۹۹۵؛ نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲).

از این‌رو، جهت مطالعه درجه هوازدگی خاستگاه و بررسی شدت هوازدگی شیمیایی در سنگ مادر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص بر اساس نسبت عناصر پایدار (Al) به عناصر فرار در فرآیند هوازدگی (K, Na, Ca) محاسبه می‌شود و مقادیر بالای آن نشان‌دهنده درجه بالای هوازدگی و در نتیجه آب و هوای مرطوب و گرم در زمان تشکیل رسوبات می‌باشد. این اندیس طبق رابطه ۱ محاسبه می‌شود (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲):

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO * Na_2O + K_2O)] * 100$$

(رابطه ۱)

فلدسپار و میکا است؛ در حالی که غنی‌شدگی Fe₂O₃ و TiO₂ می‌تواند ناشی از حضور کانی‌های آهن‌دار مانند هماتیت و گوتیت باشد (داری، ۱۹۸۴؛ باوی و همکاران، ۱۴۰۲ ج). مقایسه میانگین مقادیر عناصر فرعی با UCC نشان می‌دهد که عناصر Sr (۰/۸۴)، Ba (۰/۸۵)، Th (۰/۴۴)، U (۰/۷۸)، Zr (۰/۴۸)، Nb (۰/۵۳)، Y (۰/۹)، Sc (۰/۷۷)، Cr (۰/۳۵)، Co (۰/۷۴) و Ni (۰/۳۴) تهی‌شدگی قابل‌ملاحظه‌ای نشان می‌دهند. در مقابل مقدار غلظت عناصر Pb (۱/۹) و Zn (۱/۳) در رسوبات غنی‌شدگی نشان می‌دهند. میانگین غنی‌شدگی Rb و V معادل پوسته زمین محاسبه شده است. این موضوع تا حدود زیادی نشان دهنده کمبود کانی‌های سنگین در ناحیه منشاء است (باوی، ۱۴۰۲ الف؛ روی و همکاران، ۲۰۲۵). افزون بر این، پایداری بالای کانی‌های سنگین در برابر هوازدگی ممکن است در کنترل فراوانی آن‌ها نقش داشته باشد، که این موضوع با نتایج حسین و همکاران (۲۰۲۲) و رویو همکاران (۲۰۲۵) نیز مطابقت دارد. همچنین، کاهش نسبی عنصر Rb در نرمال‌سازی بر اساس UCC نیز به وضوح دیده می‌شود که این نیز مؤید هوازدگی کمتر رسوبات نسبت به میانگین پوسته زمین است. با این حال، کاهش عناصر فرعی Sr و Ba نسبت به UCC نشان می‌دهد که کانی‌هایی مانند فلدسپار و میکا به مرور زمان بر اثر هوازدگی شیمیایی تخریب شده‌اند. فرآیندهای زمین‌شناسی مانند انحلال، ورمیکولیت‌سازی (ویلسون، ۲۰۰۴) یا تفکیک عنصری^۱ ممکن است از جمله دلایل کاهش این عناصر باشند (راندیک و همکاران، ۲۰۰۳؛ روی و همکاران، ۲۰۲۵). رفتار ژئوشیمیایی عناصر ΣREE در حوضه‌های آبریز معدنی توسط عواملی همچون کانی‌شناسی لیتولوژی سنگ مادر، ترکیب پسماندهای جامد، واکنش‌های هوازدگی و اکسیداسیون، کانی‌شناسی فازهای ثانویه، واکنش جذب و بازجذب، نحوه مدیریت زیست‌محیطی و شرایط آب و هوایی کنترل می‌شود (باوی و همکاران، ۱۴۰۳ الف). عناصر ΣREE ناهنجاری مثبت قابل توجهی در سنگ‌های اسیدی مانند ریوداسیت‌های درآلو نشان نمی‌دهند زیرا در مقایسه با شکل‌گیری سنگ‌های میانی و اسیدی، عناصر ΣREE عموماً تمایل به تجمع و غنی‌شدگی

³ maturity

¹ fractionation

² Weathering

شدت هواز دگی نمونه‌ها به محدوده ایلیت نزدیک شده که نشان از درجه بالای هواز دگی شیمیایی (CIA) در نمونه‌ها است. همه نمونه‌ها جهت روند پیش‌بینی شده هواز دگی (پیکان قرمز رنگ) را در پیش گرفته‌اند. روند گسترش هواز دگی به سمت افزایش کانی ایلیت است که فراوانی آن بصورت فاز اصلی و بعضاً فرعی و کمیاب توسط آنالیز XRD نمونه‌ها نیز تایید شده است (باوی و همکاران، ۱۳۹۹، ۱۴۰۲ الف). اعداد بدست آمده برای اندیس شیمیایی دگرسانی در رسوبات میزان هواز دگی پایین تا متوسط و آب و هوای خشک تا نیمه‌خشک را برای منطقه خاستگاه رسوبات نشان می‌دهد که با واقعیت اقلیمی موجود کاملاً تطابق دارد (جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۴؛ نسبیت و یانگ، ۱۹۸۲، ۱۹۸۴). قرار دادن داده‌های اکسیدهای اصلی در نمودار دوتایی SiO_2 در برابر مجموع اکسیدهای $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (ساتر و دوتا، ۱۹۸۶) شاخصی جهت تعیین روند بلوغ شیمیایی و به عنوان تابعی از آب و هوا برای رسوبات ماسه‌ای است که نشان‌دهنده حاکم بودن آب و هوای خشک تا نیمه‌خشک بر ناحیه خاستگاه است (شکل ۵). استفاده از عناصر فرعی همچون اورانیوم و توریم رهیافتی نوین در جهت تعیین هواز دگی منطقه خاستگاه رسوبات است. در طول هواز دگی و چرخه مجدد، اورانیوم برخلاف توریم، به راحتی متحرک شده و باعث افزایش نسبت Th به U می‌شود. بدین ترتیب با افزایش شدت هواز دگی اورانیوم از رسوبات شسته شده و مقدار آن کاهش خواهد یافت. در واقع، اکسیداسیون U^{4+} غیر محلول به U^{2+} محلول در چرخه هواز دگی سبب خروج اورانیوم و افزایش نسبت Th/U شود. مقادیر Th/U بیشتر از $3/8$ در رسوبات نشان‌دهنده هواز دگی در منطقه خاستگاه و چرخه مجدد می‌باشد (مکلنن و همکاران، ۱۹۹۳). شکل ۶ نمودار دوتایی Th/U در مقابل مقادیر Th را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است تمامی نمونه‌های رسوب (بجز نمونه S16) نسبت Th/U زیر $3/8$ را نشان می‌دهند؛ با توجه به اینکه مقدار این نسبت در پوسته قاره‌ای بالایی معادل $3/8$ است، بنابراین می‌توان چنین برآورد کرد که رسوبات آواری مورد مطالعه از سنگ مادرهایی مشتق شده‌اند که میزان هواز دگی کمی داشته یا وارد و چرخه مجدد رسوب‌گذاری نشده‌اند.

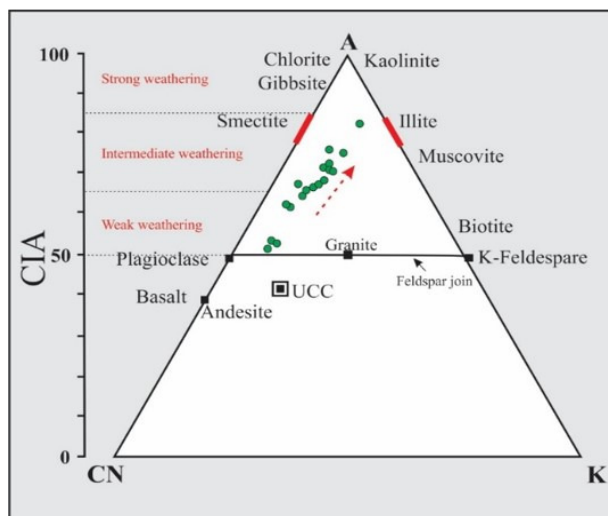
در این رابطه CaO^* مقدار کلسیم موجود در اجزای سیلیکاته سنگ است. از آنجا که نمونه‌های انتخابی شامل رسوبات سیمان نشده هستند بنابراین نیاز به انجام تصحیحات نمی‌باشد. پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) به همراه پلاژیوکلاز و فلدسپارهای تغییر نیافته، مقادیر CIA در حدود ۵۰ را نشان می‌دهند. مقدار CIA برای شیل‌های معمولی حدود ۷۰ تا ۷۵ است و به تدریج تا حدود ۱۰۰ برای رسوبات باقیمانده بسیار دگرسان‌شده که عمدتاً از کائولینیت، گیسیت و کلریت تشکیل شده‌اند، افزایش می‌یابد. مقادیر پایین CIA (کمتر از ۶۰) نشان‌دهنده شرایط هواز دگی نسبتاً ضعیف هستند که با واکنش‌های شیمیایی غیرفعال در محیط‌های سرد و خشک مشخص می‌شوند. در مقابل، مقادیر بالا (بیشتر از ۷۵) بیانگر شرایط هواز دگی شدیدتر در محیط‌های گرم‌تر هستند که سبب حذف کاتیون‌های ناپایدار مانند K ، Na و Ca نسبت به اجزای باقیمانده پایدار از قبیل Al و Ti در طی هواز دگی است (جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۴؛ نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴). بدین ترتیب میانگین میزان CIA برای رسوبات حوضه مطالعاتی $69/6$ محاسبه شده است که نشان‌دهنده هواز دگی متوسط در ناحیه خاستگاه است. بنابراین، می‌توان شرایط آب و هوایی خشک تا نیمه‌خشک را برای رسوبات آواری محدوده مطالعاتی پیشنهاد داد.

سیستم A-CN-K (Al_2O_3 ; $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$; K_2O) روشی نوین در جهت بررسی شدت هواز دگی ناحیه خاستگاه است (جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۴). در این سیستم سه تایی A بیانگر مقدار درصد CN ، Al_2O_3 نشان‌دهنده مقدار درصد $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$ و K برابر با مقدار درصد K_2O است. در این دیگرام مقدار CIA نمونه‌ها با آنچه که در بالا ارائه شده است، فرق می‌کند (به مقادیر CIA در سمت چپ دیگرام توجه شود). همانطور که در این سیستم سه متغیره مشاهده می‌شود (شکل ۴)، انتظار می‌رود نمونه‌های با هواز دگی و دیاژنز کم اغلب در محدوده پوسته فوقانی (UCC) و گرانیات قرار بگیرند. در این سیستم نمونه‌های رسوب برداشت شده در بالای خط اتصال پلاژیوکالزها به فلدسپات‌ها قرار گرفته‌اند. با افزایش مقدار هواز دگی و تخلیه عناصر متحرک همچون Na و Ca و باقی ماندن عناصر غیرمتحرک از قبیل K و Al سبب می‌شود که نمونه‌ها به ضلع A-K انتقال یابند (باوی، ۱۴۰۲). با افزایش

۵-۲- منشأ^۱

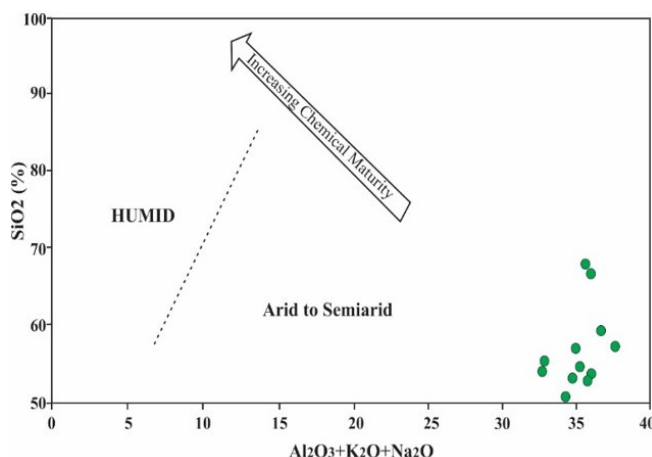
تحرك‌پذیری پایین عناصر اصلی، فرعی و نادر خاکی (REEs) از ویژگی‌های مهمی است که می‌تواند به‌عنوان شاخصی مؤثر در بررسی منشأ نهشته‌های رسوبی مورد استفاده قرار گیرد. داده‌های ژئوشیمیایی در تعیین سنگ منشأ بسیار مفید هستند (آرمسترانگ-آلترین و همکاران،

۲۰۰۴، ۲۰۱۵؛ کسکین، ۲۰۱۱؛ کاکس و همکاران، ۱۹۹۵؛ کریچتون و کاندی، ۱۹۹۳؛ تیلور و مک‌لنن، ۱۹۸۵). اجزاء ژئوشیمیایی اطلاعاتی در خصوص ترکیب سنگ منشأ و همچنین تأثیر فرآیندهای زمین‌شناسی از جمله هوازدگی^۲ و تفکیک^۳ ارائه می‌دهند (مک‌لنن و همکاران، ۱۹۹۳).



شکل ۴. جایگاه رسوبات آواری محدوده مطالعاتی در سیستم سه‌تایی A-CN-K (نسبیت و یانگ، ۱۹۸۴). نمونه‌های مورد مطالعه دارای روندی خطی در جهت افزایش هوازدگی به همراه افزایش کانی ایلیت می‌باشند.

Fig. 4. Ternary A-CN-K diagram showing the position of the studied clastic sediments (Nesbitt & Young, 1984). The samples exhibit a clear linear trend toward the direction of increasing chemical weathering, which is associated with a higher proportion of illite minerals.



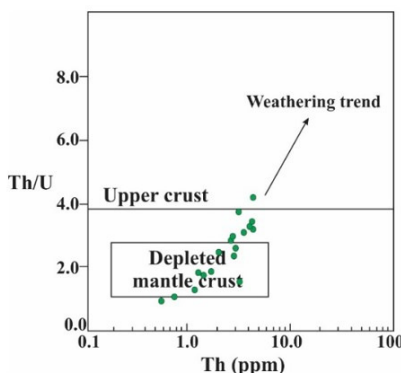
شکل ۵. شرایط آب و هوایی ناحیه خاستگاه رسوبات آواری محدوده مطالعاتی در نمودار دوتایی (ساتنر و دوتا، ۱۹۸۶). نمونه‌ها در شرایط آب و هوایی خشک تا نیمه‌خشک رسوب کرده‌اند.

Fig. 5. Binary diagram illustrating the paleoclimatic conditions of the source area for the studied clastic sediments (after Suttner & Dutta, 1986). The position of the samples suggests that the sediments were deposited under predominantly arid to semi-arid climate conditions.

³ sorting

¹ Provenance

² weathering



شکل ۶. جایگاه رسوبات ماسه‌ای مورد مطالعه در نمودار نسبت Th/U در مقابل U (مکلنن و همکاران، ۱۹۹۳) جهت نشان دادن درجه هوازدگی کم سنگ‌های مادر منطقه است.

Fig. 6. Th/U versus U diagram showing the position of the studied sandstones (McLennan et al., 1993). The plot indicates that the source rocks in the study area experienced a low degree of chemical weathering.

این نمودار می‌توان دریافت که رسوبات ماسه‌ای غالباً روند هوازدگی سنگ‌های حدواسط آندزیتی تا بازیک را دنبال می‌کنند. نسبت مولکولی اکسیدهای عناصر غیرمتحرک از قبیل Al_2O_3/TiO_2 نیز یکی از نسبت‌های مهم در تشخیص لیتولوژی سنگ مادر رسوبات است. در صورتی که این نسبت کمتر از ۱۴ محاسبه شود، رسوبات از سنگ مادرهای مافیک مشتق شده‌اند اما در مواردی که این نسبت بین ۱۹ تا ۲۸ باشد، سنگ مادر رسوبات سنگ‌های فلسیک هستند (اندرسون و همکاران، ۲۰۰۴؛ گپرتی و همکاران، ۱۹۹۶). این نسبت در رسوبات مورد مطالعه بین ۱۸ تا ۷۹ در تغییر است؛ بنابراین می‌توان سنگ‌های مادر حدواسط تا اسیدی منطقه که غالباً شامل آندزیت‌ها، ریوداسیت‌ها و داسیت‌ها است را برای این رسوبات پیشنهاد داد. از شاخص‌های مهم در تفکیک لیتولوژی‌های خاستگاه رسوبات سیلیسی آواری استفاده از عناصر فرعی و عناصر نادر خاکی بویژه عناصری که تحرک و انحلال‌پذیری کمتری در طول چرخه رسوبی دارند می‌باشد (مکلنن و همکاران، ۲۰۰۳). از آنجا که توزیع عناصر نادر خاکی (REEs) در مقابل عناصری همچون Th و Cr ، Co در طول فرآیندهای رسوبی کمتر تحت تاثیر شرایط قرار می‌گیرند (آرمسترانگ-آلترین و همکاران، ۲۰۱۲؛ مکلنن و همکاران، ۱۹۹۳)؛ از این‌رو، قرارگیری نسبت این عناصر (La/Sc ، Co/Th ، Th/Sc) و La/Co در مقابل همدیگر در سیستم‌های دوتایی یکی از راه‌های موثر در تفکیک سنگ‌های مادر فلسیک از مافیک است (فرالیک، ۲۰۰۳؛ مکلنن و همکاران، ۲۰۰۳). مقادیر نسبت Co/Th در تمامی نمونه‌ها بالاتر از ۱/۲۷ (خط جدا کننده سنگ‌های فلسیک از بازیک) محاسبه شده است

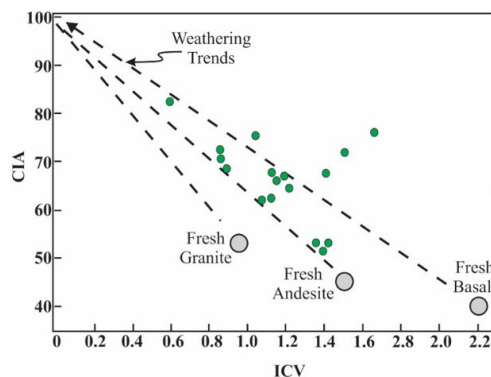
بر اساس درصد فراوانی اکسیدهای اصلی از قبیل SiO_2 ، CaO ، MgO ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 امکان تفکیک سنگ‌های مادر مافیک و فلسیک وجود دارد اما این تشخیص به صورت خیلی واضح انجام نمی‌شود زیرا در موارد بسیاری سنگ مادرهای مختلف از لحاظ ترکیب عناصر اصلی مشابه هستند (مکلنن و همکاران، ۲۰۰۳). یکی از فاکتورهای تفکیک نواحی خاستگاه براساس اکسیدهای عناصر اصلی، استفاده از سیستم سه‌تایی A-CN-K است. همانگونه که پیش از این نیز اشاره شد، این نمودار برای تعیین شدت هوازدگی نیز به کار می‌رود. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود که روند هوازدگی نمونه‌های رسوبی از سنگ مادرهای با ترکیب فلسیک آغاز شده و به سمت راس A امتداد می‌یابد. با قرار دادن مقادیر اندیس شیمیایی هوازدگی (CIA) در مقابل اندیس تنوع ترکیبی (ICV) (جدول ۱) می‌توان تا حدود زیادی اطلاعاتی از جنس سنگ مادر رسوبات نیز بدست آورد. اندیس تنوع ترکیبی برای ارزیابی ترکیب کانی‌شناسی اولیه و میزان تکامل ژئوشیمیایی رسوبات استفاده می‌شود. مقادیر بالای ICV معمولاً به رسوبات با منشأ آذرین و ترکیب کم‌تغییر یافته اشاره دارد، در حالی که مقادیر پایین ICV معرف رسوبات تکامل‌یافته و حاصل چرخه‌های چندمرحله‌ای هستند. میزان اندیس تنوع ترکیبی از طریق رابطه ۲ بدست می‌آید (پاتر و همکاران، ۲۰۰۵):

$$ICV = \frac{Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2}{Al_2O_3} \quad (\text{رابطه ۲})$$

شکل ۷ نشان‌دهنده جایگاه نمونه‌های رسوب بر روی نمودار دوتایی (پاتر و همکاران، ۲۰۰۵) است. با توجه به

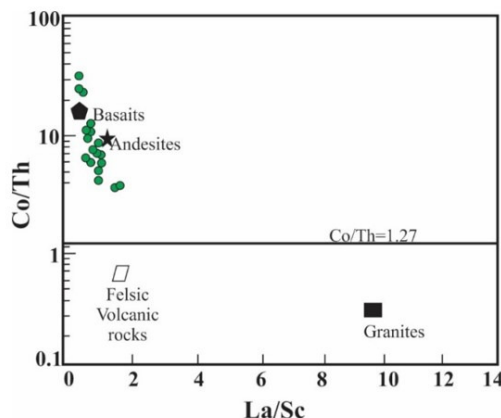
Th/Sc (ورونکوویچ و کاندی، ۱۹۸۷) می‌توان سنگ مادر رسوبات ماسه‌ای را مشخص کرد. بر اساس این نمودار و مقادیر پایین نسبت Th/Sc تمامی نمونه‌ها در زیر خط سنگ‌های مافیک قرار گرفته‌اند (شکل ۹).

بنابراین بر اساس نمودار دوتایی La/Sc در مقابل Co/Th (گو و همکاران، ۲۰۰۲) سنگ مادر رسوبات آواری مورد مطالعه آندزیت تا بازالت در نظر گرفته می‌شود (شکل ۸). با استفاده از نمودار دوتایی نسبت‌های Cr/Th در مقابل



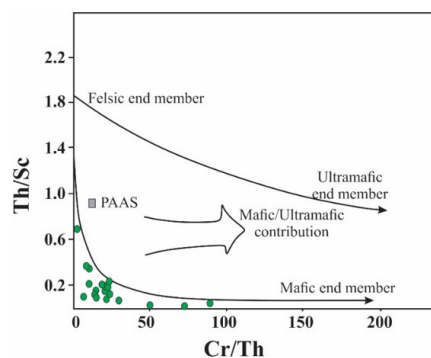
شکل ۷- جایگاه نمونه‌های رسوب در نمودار دوتایی ICV در مقابل CIV (پاتر و همکاران، ۲۰۰۵)؛ رسوبات محدوده مطالعاتی روند مشتق شدن از سنگ مادرهای آندزیتی و بازالتی را نشان می‌دهند.

Fig. 7. Binary diagram of ICV versus CIV showing the position of the studied sediment samples (after Páter et al., 2005). The results indicate that the sediments were primarily derived from andesitic and basaltic source rocks.



شکل ۸- جایگاه نمونه‌های رسوب محدوده مطالعاتی در نمودار دوتایی La/Sc در مقابل Co/Th (گو و همکاران، ۲۰۰۲)؛ سنگ مادر نمونه‌های رسوب در محدوده آندزیت تا بازالت قرار دارد.

Fig. 8. La/Sc versus Co/Th binary diagram showing the position of the studied sediment samples (Gu et al., 2002). The diagram indicates that the sediments were derived from source rocks ranging from andesite to basalt.

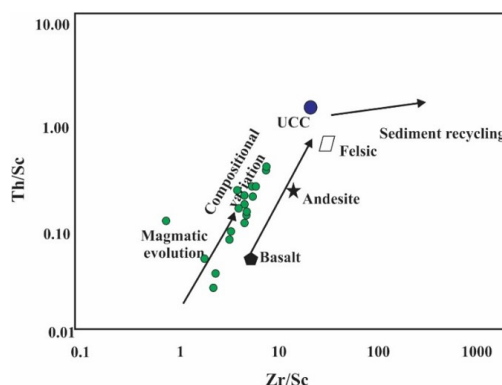


شکل ۹- نمودار دوتایی نسبت Cr/Th در مقابل Th/Sc (ورونکوویچ و کاندی، ۱۹۸۷) سنگ مادر نمونه‌های رسوب را آندزیت تا بازالت پیشنهاد می‌کند.

Fig. 9. Binary diagram of Cr/Th versus Th/Sc (Verma & Condie, 1987) showing the position of the studied sediment samples. The plot suggests that the sediments were derived from source rocks ranging from andesite to basalt.

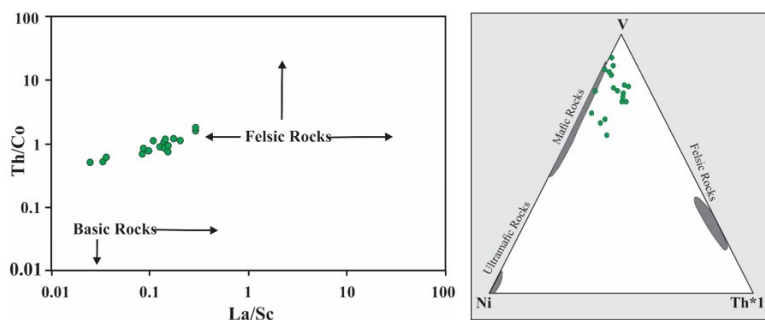
(مکلنن و همکاران، ۱۹۹۳، ۲۰۰۳) و جایگیری نمونه‌های رسوب آواری مورد مطالعه بر روی این دیاگرام نشان می‌دهد که این رسوبات از سنگ مادرهای با ترکیب آندزیتی و بازالتی مشتق شده‌اند (شکل ۱۰). رفتار متقابل La/Sc در برابر Th/Co در سیستم دوتایی (کولرز، ۲۰۰۲) (شکل ۱۱) و پلات داده‌های عناصر V ، Ni و $Th*10$ در سیستم سه‌تایی (براشیالی و همکاران، ۲۰۰۷) نیز تاییدی بر سنگ مادر با ترکیب فلسیک تا حدواسط برای رسوبات محدوده مطالعاتی است (شکل ۱۱).

پلات نسبت‌های عنصری Zr/Sc در مقابل Th/Sc یکی دیگر از نسبت‌هایی است که تفکیک سنگ‌های مادر مختلف و تاثیر چرخه مجدد رسوب‌گذاری^۱ بر روی رسوبات آواری را امکان‌پذیر کرده است؛ در طول فرآیندهای رسوبی با افزایش حمل و نقل نسبت Zr/Sc افزایش می‌یابد. از این‌رو با قرار دادن مقادیر این نسبت‌ها در مقابل یکدیگر می‌توان به ماهیت سنگ مادر و چرخه‌های رسوبی پی برد. رسم سیستم دوتایی قرارگیری این دو نسبت در کنار یکدیگر



شکل ۱۰. جایگاه نمونه‌های رسوب محدوده مطالعاتی در نمودار دوتایی نسبت Zr/Sc در برابر Th/Sc (مکلنن و همکاران، ۲۰۰۳). این نمودار نشان دهنده سنگ مادر با ترکیب آندزیتی تا بازالتی برای نمونه‌های مورد مطالعه است.

Fig. 10. Zr/Sc versus Th/Sc binary diagram showing the position of the studied sediment samples (McLennan et al., 2003). The plot indicates that the sediments were derived from source rocks with compositions ranging from andesite to basalt.



شکل ۱۱. جایگاه نمونه‌های رسوب محدوده مطالعاتی در نمودار دوتایی نسبت La/Sc در برابر Th/Co (کولرز، ۲۰۰۲) و نمودار سه‌تایی $V-Ni-Th*10$ (براشیالی و همکاران، ۲۰۰۷). نمودار دوتایی نشان‌دهنده سنگ مادر با ترکیب غالب فلسیک و نمودار سه‌تایی نشان‌دهنده سنگ مادر با ترکیب حدواسط تا بازیگ برای نمونه‌های مورد مطالعه است.

Fig. 11. Binary diagram of La/Sc versus Th/Co (Cullers, 2002) and ternary diagram of $V-Ni-Th*10$ (Brasher et al., 2007) showing the studied sediment samples. The binary diagram indicates that the sediments were mainly derived from felsic source rocks, whereas the ternary diagram suggests that some source rocks had intermediate to mafic compositions.

(گارور و همکاران، ۱۹۹۶). مقادیر کروم و نیکل در نمونه‌های رسوب مورد مطالعه بسیار پایین‌تر (میانگین نیکل $20/4$ ppm و میانگین کروم $35/7$ ppm) از مقادیر پیشنهادی برای سنگ‌های الترامافیک است (جدول ۲)؛

عناصر Ni و Cr از عناصر فرعی تعیین‌کننده ترکیب سنگ مادر رسوبات آواری است (رحمان و سوزوکی، ۲۰۰۷). مقادیر کروم < 150 ppm و نیکل < 100 ppm شواهدی از خاستگاه با سنگ مادر الترامافیک برای رسوبات است

¹ sediment recycling

(شامل Lu و Yb, Tm, Er, Dy, HREEs Tb, Gd) شامل HREEs: ابزاری نوین در تفکیک سنگ‌های مادر با ترکیب فلسیک از مافیک است؛ این نسبت در رسوبات حاصل از هوازدگی و فرسایش از این سنگ‌ها ثابت است (آرمسترانگ-آلترین و همکاران، ۲۰۱۲). در نمونه‌های رسوبی محدوده مطالعاتی غلظت LREEs بالاتر از HREEs است (جدول ۳). این الگوی تغییرات غلظت در عناصر نادر خاکی منطبق با الگوی عنصری سنگ مادر فلسیک است. استفاده از نسبت برخی عناصر فرعی و مقایسه مقادیر این عناصر در پوسته زمین، سنگ‌های مافیک و سنگ‌های فلسیکی با مقادیر ذخیره شده در رسوبات مورد مطالعه نشان می‌دهد که غالب این رسوبات ترکیبی حدواسط سنگ‌ها مافیک و فلسیک نشان می‌دهند، که این امر می‌تواند تا حدود زیادی اشاره به ریوداسیت‌ها و آندزیت‌های منطقه داشته باشد (جدول ۴).

بنابراین منشاء سنگ مادر الترامافیکی برای رسوبات مورد مطالعه رد می‌شود. روبیدیوم (Rb) نیز جزو عناصری است که با مقدار آن در رسوبات می‌توان سنگ‌های مادر اسیدی-حدواسط و بازیک را از یکدیگر تفکیک کرد. بر این اساس رسوباتی که دارای میزان $Rb < 40 \text{ ppm}$ باشند از سنگ‌های مادر اسیدی تا حدواسط و رسوباتی که حاوی روبیدیوم $40 \text{ ppm} >$ هستند از سنگ‌های مادر بازیک مشتق شده‌اند (فلوید و لوریج، ۱۹۸۷)؛ بر اساس مقادیر این عنصر در رسوبات مورد مطالعه (جدول ۲)، تنها نمونه‌های S17، S18 و S10 به ترتیب با مقادیر روبیدیوم 29 ppm ، 28 و 39 از سنگ‌های مادر با ترکیب بازیک منشاء گرفته‌اند و سایر نمونه‌ها با مقادیر روبیدیوم ۴۱ تا ۶۴ از سنگ‌های مادر اسیدی تا حدواسط مشتق شده‌اند. استفاده از نسبت عناصر نادر خاکی سبک (شامل Ce, La, Pr, Nd, Sm, Eu, LREEs) به عناصر نادر خاکی سنگین

جدول ۴. نسبت عناصر فرعی جهت تفکیک سنگ مادر. مقدار نسبت‌های به دست آمده در رسوبات مورد مطالعه با دامنه تغییرات آن‌ها در پوسته فوقانی، سنگ‌های اسیدی و بازی (زنده‌مقدم و همکاران، ۲۰۱۳) مقایسه شده است.

Table 4. Minor element ratios for identifying source rock types. The ratios measured in the studied sediments are compared with the typical ranges for the upper continental crust, felsic (acidic), and mafic (basic) rocks (Zand-Moghadam et al., 2013).

Elemental Ratio	UCC	Mafic rocks	Felsic rocks	Dar-e-Allo sediments
La/Sc	2.21	0.43-0.86	2.5-16.3	0.30-5.13
Th/Sc	0.79	0.05-0.22	0.84-20.5	0.002-4.9
La/Co	1.76	0.14-0.38	1.80-13.8	0.11-2.1
Th/Co	0.63	0.04-1.40	0.67-19.4	0.001-0.5

۵-۳- جایگاه تکتونیکی^۱

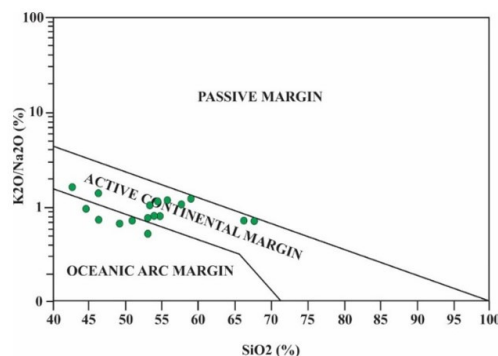
جایگاه تکتونیکی تاثیر مستقیم بر ترکیب سیستم‌های رسوبی دارد لذا با توجه به ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمی رسوبات می‌توان جایگاه تکتونیکی را مشخص کرد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴؛ سها و همکاران، ۲۰۲۳؛ هو و همکاران، ۲۰۲۰؛ زید، ۲۰۱۳). تأثیر غالب تکتونیسم فعال و شیب‌های تند از ابتدای مسیر حرکت رسوبات تا انتها، منجر به تخلیه سریع رسوبات می‌شود. در مقابل، شرایط تکتونیکی در مناطق با شیب ملایم‌تر باعث افزایش زمان ماند رسوبات می‌شود که نتیجه‌ی آن هوازدگی و دگرسانی شیمیایی در طی فرآیند حمل‌ونقل است. رسوبات در نهایت اثرات و نشانه‌های فرآیندهایی را که پشت سر گذاشته‌اند در خود حفظ می‌کنند. در این میان

مطالعات پتروگرافی رسوبات آواری نشان از سنگ مادر حدواسط تا مافیک (غالباً آندزیت و آندزیت بازالت) است و این امر توسط داده‌های ژئوشیمی نیز تایید می‌شود. با این وجود، داده‌های ژئوشیمیایی شواهدی از حضور سنگ مادر اسیدی یا فلسیک را نیز نشان می‌دهد که این امر به علت حضور سنگ‌های داسیتی و ریوداسیتی در بالادست منطقه می‌باشد. بنابراین، سنگ‌های مادر فلسیک در خاستگاه رسوبات برداشت شده از حوضه آبریز نقش کمتری را نسبت به سنگ‌های آذرین حدواسط و مافیک دارند. وجود سنگ مادر رسوبی کربناته نیز با توجه به مشاهده خرده‌سنگ‌های کربناته در رسوبات ماسه‌ای تایید می‌شود (باوی، ۱۴۰۲الف)؛ هرچند نقش این سنگ منشاء در تامین رسوبات محدوده از اهمیت چندانی برخوردار نیست.

¹ Tectonic setting

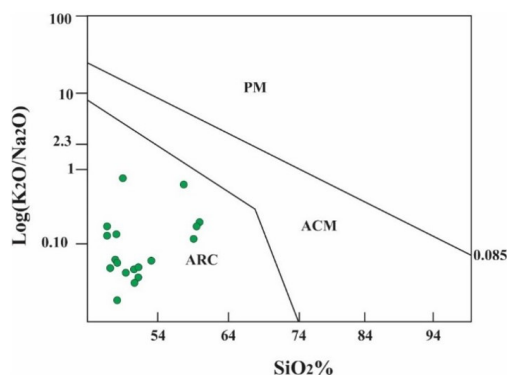
کمانی اقیانوسی^۳ در نظر گرفت (شکل ۱۲). روزر و کورش (۱۹۸۶) بر اساس مقادیر SiO_2 و نسبت لگاریتمی $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ در رسوبات سه جایگاه تکتونیکی غیرفعال قاره‌ای^۴، فعال قاره‌ای^۵ و حواشی جزایر کمانی اقیانوسی^۶ را تفکیک کردند. نمونه‌های رسوب آواری مورد مطالعه در محدوده جزایر کمانی ترسیم شده‌اند (شکل ۱۳).

مطالعه انواع سیستم‌های ژئوشیمیایی دوتایی و سه‌تایی عناصر جهت تعیین جایگاه تکتونیکی رسوبات آواری بکار برده شده است. در سیستم دوتایی روزر و کورش (روزر و کورش، ۱۹۸۶) با قرار دادن مقدار درصد SiO_2 در برابر مجموع K_2O و Na_2O می‌توان جایگاه تکتونیکی رسوبات ریزدانه ماسه‌ای را غالباً مرزهای فعال قاره‌ای^۲ و حاشیه



شکل ۱۲. جایگاه رسوبات ماسه‌ای مورد مطالعه در نمودار دوتایی SiO_2 در برابر $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ جهت تفکیک جایگاه تکتونیکی (روزر و کورش، ۱۹۸۶): این نمودار جایگاه تکتونیکی مرزهای فعال قاره‌ای و حاشیه کمانی اقیانوسی را برای رسوبات ماسه‌ای نشان می‌دهد.

Fig. 12. Binary diagram of SiO_2 versus $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ showing the tectonic setting of the studied sandstones (Roser & Korsch, 1986). The plot indicates that the sandstones were deposited in settings corresponding to continental active margins and oceanic arcs.



شکل ۱۳. جایگاه تکتونیکی رسوبات ماسه‌ای مورد مطالعه در نمودار دوتایی SiO_2 در مقابل $\text{Log}(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ (روزر و کورش، ۱۹۸۶): نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده جزایر کمانی اقیانوسی قرار دارند.

Fig. 13. Binary diagram of SiO_2 versus $\text{Log}(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ showing the tectonic setting of the studied sandstones (Roser & Korsch, 1986). The diagram indicates that the samples were deposited in an oceanic island arc setting.

$\text{Th-Co-Zr}/10$ و $\text{Th-Sc-Zr}/10$ (باتیا و کروک، ۱۹۸۶) استفاده شده است. بر اساس این دیاگرام‌ها جایگاه تکتونیکی نمونه‌های مورد مطالعه قوس‌های ماگماتیکی اقیانوسی معرفی شده‌اند (شکل ۱۴-B-C-D).

از روی نسبت برخی عناصر فرعی کلیدی دیگر از جمله Th/U ، Th/Sc ، La/Th و Rb/Sr در رسوبات ماسه‌ای می‌توان به عنوان ابزاری قدرتمندی در جهت تعیین

پلات داده‌های عناصر اصلی در سیستم سه‌تایی کورنبرگ (کورنبرگ، ۱۹۹۴) نیز موکد تشکیل رسوبات مورد مطالعه در جایگاه تکتونیکی قوس‌های کمانی ماگماتیکی است (شکل ۱۴-A). علاوه بر اکسیدهای اصلی، کاربرد عناصر فرعی و نادر خاکی در سیستم‌های سه‌تایی نیز اطلاعات ارزشمندی جهت تشخیص جایگاه تکتونیکی ارایه می‌کنند. از این‌رو، در این تحقیق از سیستم‌های سه‌تایی La-Th-

⁵ Active margin

⁶ Oceanic island arc

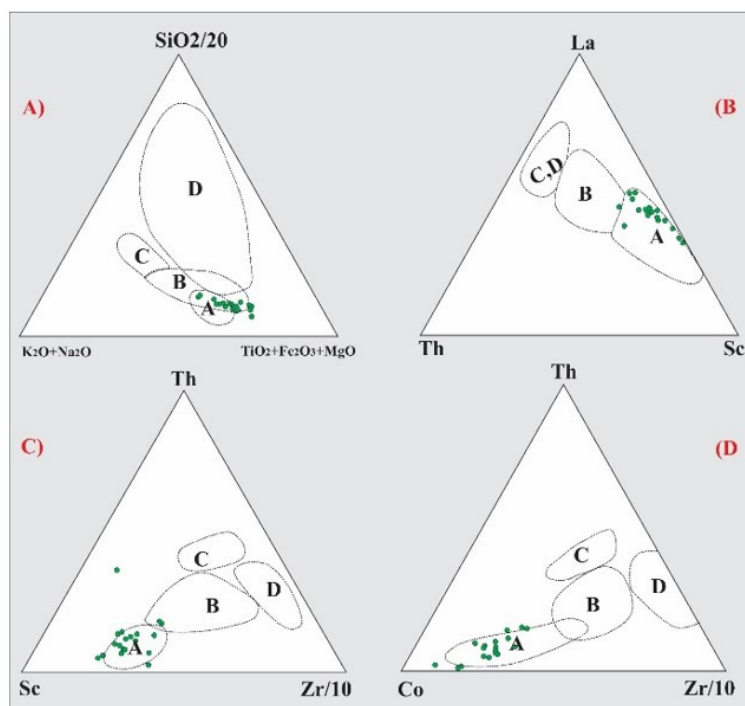
² Active continental margin

³ Oceanic arc margin

⁴ Passive margin

معدن مس درآلو و انطباق این مطالعات آزمایشگاهی با مشاهدات صحرایی می‌توان خاستگاه اصلی این رسوبات را در شرایط هوازدگی و فرسایش طبیعی منطقه غالباً به لیتولوژی‌های آندزیت تا بازالت و داسیتی تا ریوداسیتی در شرایط آب و هوایی خشک تا نیمه‌خشک و موقعیت تکتونیکی حاشیه فعال (اقیانوسی - قاره‌ای) منسوب کرد.

وضعیت تکتونیک منطقه استفاده کرد (باتیا و کروک، ۱۹۸۶). مقادیر این نسبت‌ها در ماسه‌سنگ‌های مربوط به جایگاه‌های تکتونیکی مختلف و رسوبات مورد مطالعه در جدول ۵ آورده شده است؛ بر اساس مقادیر بدست آمده جایگاه تکتونیکی رسوبات مورد مطالعه بیشتر به شرایط تکتونیکی جزایر کمانی اقیانوسی (OIA) نزدیک است. با توجه به مطالعه ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌های منشعب از



شکل ۱۴. جایگاه تکتونیکی رسوبات ماسه‌ای مورد مطالعه در دیاگرام‌های مثلثی. (A) دیاگرام مثلثی عناصر اصلی (کرونگر، ۱۹۹۴). نمونه‌های مورد مطالعه اغلب در محدوده A قرار گرفته‌اند. (B)، (C) و (D) دیاگرام‌های مثلثی عناصر فرعی (باتیا و کروک، ۱۹۸۶) که برای رسوبات عمدتاً محدوده A را نشان می‌دهند. هر یک از محدوده‌ها به صورت زیر تعریف شده‌اند: A: جزیره کمانی اقیانوسی؛ B: جزیره کمانی قاره‌ای؛ C: مرز فعال قاره‌ای؛ D: مرز غیر فعال قاره‌ای.

Fig. 14. Ternary diagrams illustrating the tectonic setting of the studied sandstones. (A) Major element ternary diagram (Cox et al., 1994), showing that most samples plot in field A. (B), (C), and (D) Trace element ternary diagrams (Bhatia & Crook, 1986), also indicating that the sediments predominantly fall within field A. The definitions of each field are as follows: A: Oceanic Island arc; B: Continental Island arc; C: Active continental margin; D: Passive continental margin.

جدول ۵. جایگاه تکتونیکی رسوبات آواری معدن مس درآلو براساس نسبت عناصر فرعی و نادر خاکی در محیط‌های تکتونیکی مختلف (یان و همکاران، ۲۰۱۲؛ باتیا و کروک، ۱۹۸۶)

Tables 5. Tectonic setting of the clastic sediments from the Dar-e-Allo copper mine inferred from trace and rare earth element ratios, compared across different tectonic environments (Yan et al., 2012; Bhatia & Crook, 1986).

Provenance type	Th/U	Th/Sc	Rb/Sr	La/Th	Tectonic setting
Undissected magmatic arc	2.1	0.15	0.05	4.26	Oceanic island arc (OIA)
Dissected magmatic arc	4.6	0.85	0.65	2.36	Continental island arc (CIA)
Uplifted basement	4.8	2.59	0.89	1.77	Active continental margin (ACM)
Craton interior	5.6	3.06	1.19	2.22	Passive continental margin (PM)
Mean Dar-e-Allo sandstone	2.41	0.16	0.2	7.99	Oceanic island arc (OIA)

References

- Algül, F., Beyhan, M (2020) Concentrations and sources of heavy metals in shallow sediments in Lake Bafa, Turkey. *Scientific Reports*, 10: Article 68833. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68833-2>
- Amin, B., Ismail, A., Arshad, A., Yap, C. K., Kamarudin, M. S (2009) Anthropogenic impacts on heavy metal concentrations in the coastal sediments of Dumai, Indonesia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 148: 291–305. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0159-z>
- Andersson, P. O. D., Worden, R. H., Hodgson, D. M., Flint, S (2004) Provenance evolution and chemostratigraphy of a Paleozoic submarine fan-complex: Tanqua Karoo Basin, South Africa. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 555–577.
- Armstrong-Altrin, J. S., Lee, Y. I., Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Eby, N., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N. L (2012) Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Chemie der Erde/Geochemistry*, 72: 345–362.
- Armstrong-Altrin, J. S., Madhavaraju, J., Vega-Bautista, F., Ramos-Vázquez, M. A., Pérez-Alvarado, B. Y., Kasper-Zubillaga, J. J., Bessa, A. Z. E (2021) Mineralogy and geochemistry of Tecolutla and Coatzacoalcas beach sediments, SW Gulf of Mexico. *Applied Geochemistry*, 134: 105103.
- Armstrong-Altrin, J. S., Lee, Y. I., Verma, S. P., Ramasamy, S (2004) Geochemistry of sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, Southern India: Implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *Journal of Sedimentary Research*, 74: 285–297. <https://doi.org/10.1306/082803740285>.
- Armstrong-Altrin, J. S., Nagarajan, R., Balaram, V., Natalhy-Pineda, O (2015) Petrography and geochemistry of sands from the Chachalacas and Veracruz beach areas, western Gulf of Mexico, Mexico: Constraints on provenance and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, 64: 199–216. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.012>.
- Bavi, H (2020) Evaluation of the drainage basin affected by the Dar-e-Allo copper mine (southern Kerman) sedimentology, environmental geochemistry, and hydrogeochemistry studies (Internal report, Dar-e-Allo Copper Mine), 328 pp (in Persian).
- Bavi, H (2023a) Sedimentology, geochemistry and environmental assessment of rivers and streams affected by Dar-e-Allo Copper Mine, South Kerman (Doctoral dissertation). Ferdowsi University of Mashhad, 409 pp (in Persian).

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، هدف اصلی شناسایی سنگ مادر با بیشترین پتانسیل فرسایش و انتقال رسوب به دریاچه پشت سد رسوب‌گیر و همچنین ارزیابی میزان غنی‌شدگی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و نادر خاکی نسبت به ترکیب میانگین پوسته زمین (UCC) بوده است. این بررسی بر پایه داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای و پشت سدی انجام شده است. تحلیل نمودارهای عنکبوتی و محاسبه میانگین غنی‌شدگی عناصر اصلی، فرعی و نادر خاکی نسبت به ترکیب پوسته زمین، نشان‌دهنده غنی‌شدگی عناصری چون Pb, Mn, Ti, K, Ca, Fe, Al و Zn و در مقابل تهی‌شدگی Si, Mg, Na, Sr, Ba, Th, U, Ni, Co, Cr, Sc, Y, Nb, Zr و تمامی عناصر کمیاب خاکی می‌باشد. بررسی نسبت اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و کمیاب خاکی در نمودارهای دوتایی و سه‌تایی، منشأ اصلی این رسوبات در شرایط هوازدگی و فرسایش طبیعی منطقه را عمدتاً به لیتولوژی‌های آندزیتی و بازالتی و در مرحله بعد به داسیت‌ها و ریوداسیت‌ها نسبت می‌دهد. بر اساس ژئوشیمی اکسیدهای اصلی، عناصر فرعی و اندیس شیمیایی هوازدگی، میزان هوازدگی پایین تا متوسط در منطقه منشأ و وجود آب و هوای خشک تا نیمه‌خشک در هنگام رسوب‌گذاری این رسوبات مشخص می‌گردد، که با شرایط واقعی منطقه مطابقت دارد. همچنین، تحلیل پلات‌های عناصر اصلی و فرعی و محاسبه نسبت‌های شاخص عناصر فرعی نشان می‌دهد که جایگاه تکتونیکی رسوبات مطالعه شده عمدتاً به شرایط تکتونیکی جزایر کمانی اقیانوسی نزدیک است.

۷- تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم مراتب قدردانی از تمامی نهادها و افرادی که در انجام این تحقیق نقش ارزنده داشته‌اند، ابراز دارم. حمایت‌های گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد از طریق تخصیص کمک‌هزینه پژوهشی شماره ۳/۵۰۳۱۱ نقش بسزایی در پیشبرد این مطالعه داشته است. همچنین از همکاری صمیمانه و پشتیبانی مؤثر بخش تحقیق و توسعه شرکت صنایع مس سرچشمه و از تلاش‌های ارزشمند مدیریت و کارشناسان معدن مس درآلو قدردانی می‌شود. در پایان، از گروه زمین‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان که با فراهم‌سازی شرایط مناسب، نقش مهمی داشتند تشکر و قدردانی می‌گردد.

- Bavi, H., Mahmudy Gharai, M. H., Moussavi-Harami, R., Zand-Moghadam, H., Mahboubi, A., Tohidi, M. R (2023b) Spatial dispersion hot spots of contamination and human health risk assessments of PTEs in surface sediments of streams around porphyry copper mine, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01471-x>.
- Bavi, H., Mousavi Harami, S. R., Mahmoudi Qaraei, M. H., Zand Moghaddam, H., Mahboobi, A., Tohidi, M. R (2024a) Behavioral pattern of rare earth elements in different sedimentary systems of the Dar-e-Allo copper mine: An application for environmental studies. *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 34. (in Persian).
- Bavi, H., Moussavi-Harami, R., Mahmudy Gharai, M. H., Zand-Moghadam, H (2024b) A comparative study on speciation and availability risk of toxic and potentially toxic elements in different groups of sediments in the Dar-e-Allo copper mine, SE Iran. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 33: 1619–1651.
- Bavi, H., Moussavi-Harami, R., Mahmudy Gharai, M. H., Zand-Moghadam, H (2023c) Evaluation of mineralogical variations in sediments affected by the Dar-e-Allo copper mine, southern Kerman: An application for environmental studies. *Stratigraphy and Sedimentology Research*, 39: 1–26. <https://doi.org/10.22108/jssr.2023.136989.1254> (in Persian).
- Bavi, H., Zand-Moghadam, H (2025) Evaluation of erosion and sedimentation rate in the catchment basin of Dar-e-Allo copper mine waste dam in the south of Kerman by MPSIAC and EPM modeling. *Applied Sedimentology Semi-Annual Journal*, 13 (25): 175–199. <https://doi.org/10.22084/psj.2024.29449.1439>. (in Persian).
- Begum, M., Khan, R., Roy, D. K., Habib, M. A., Rashid, M. B., Naher, K., Islam, M. A., Tamim, U., Das, S. C., Al Mamun, S. M. M., Hossain, S. M (2021) Geochemical characterization of Miocene core sediments from Shahbazpur gaswells (Bangladesh) in terms of elemental abundances by instrumental neutron activation analysis. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 329: 239–252. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07770-4>.
- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W (1986) Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181–193. <http://doi.org/10.1007/BF00375292>.
- Boruah, R., Laskar, J. J (2022) Geochemical characteristics of Neogene sandstones of the East and West Siang Districts of Arunachal Pradesh, NE India: Implications for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *Acta Geochimica*, 41: 100–120. <https://doi.org/10.1007/s11631-021-00497-9>.
- Chen, L., Wang, Q., Zhu, G., Lin, X., Qiu, D., Jiao, Y., Lu, S., Li, R., Meng, G., Wang, Y (2024b) Dataset of stable isotopes of precipitation in the Eurasian continent. *Earth System Science Data*, 16: 1543–1557. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1543-2024>.
- Chen, W., Ban, H., Mao, C., Liang, H., Jiang, M (2024a) Sediment dynamics subject to sea level rise in the Yangtze River estuary. *Journal of Ocean University of China*, 23: 1572–1582. <https://doi.org/10.1007/s11802-024-5741-7>.
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L (1995) The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9).
- Crichton, J. G., Condie, K. C (1993) Trace elements as source indicators in cratonic sediments: A case study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, southeastern Wyoming. *Journal of Geology*, 101: 319–332.
- Critelli, S., Le Pera, E., Galuzzo, F., Milli, S., Moscatelli, M., Perrotta, S., Santantonio, M (2007) Interpreting siliciclastic–carbonate detrital modes in foreland basin systems: An example from Upper Miocene arenites of the Central Apennines, Italy. In J. Arribas, S. Critelli, & M. Johnsson (Eds.), *Sedimentary provenance: Petrographic and geochemical perspectives* (Geological Society of America Special Paper), 420: 107–133.
- Darby, D. A (1984) Trace elements in ilmenite: A way to discriminate provenance or age in coastal sands. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 1208–1218. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1984\)95](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1984)95).
- Dickinson, W. R (1985) Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In G. G. Zuffa (Ed.), *Provenance of arenites* (333–361). Springer.
- Dickinson, W. R (1988) Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins. In K. Kleinspehn & C. Paola (Eds.), *New perspectives in basin analysis* (3–25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3788-4_1.
- Etemad-Saeed, N., Hosseini-Barzi, M., Armstrong-Altrin, J. S (2011) Petrography and geochemistry of clastic sedimentary rocks as evidences for provenance of the Lower Cambrian Lalun Formation, Posht-e-badam block, Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 61: 142–159.

- 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: 921–924. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023).
- Floyd, P. A., Leveridge, B. E (1987) Tectonic environment of the Devonian mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society of London*, 144: 531–542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>.
- Fralick, P. W (2003) Geochemistry of clastic sedimentary rocks: Ratio techniques. In D. R. Lentz (Ed.), *Geochemistry of sediments and sedimentary rocks: Evolutionary considerations to mineral-deposit forming environments*, 4: 85–103. Geological Association of Canada.
- Girty, G. H., Ridge, D. L., Knaack, C., Johnson, D., Al-Riyami, R. K (1996) Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 107–118.
- Gu, X. X., Liu, J. M., Zheng, M. H., Tang, J. X., Qi, L (2002) Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72: 393–407.
- Han, X., Wu, H., Li, Q., Cai, W., Hu, S (2024) Assessment of heavy metal accumulation and potential risks in surface sediment of estuary area: A case study of Dagou River. *Marine Environmental Research*, 196: 106416.
- Hayashi, K. I., Fujisawa, H., Holland, H. D., Ohmoto, H (1997) Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 4115–4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7).
- Hazen, R. M., Papineau, D., Bleeker, W., Downs, R. T., Ferry, J. M., McCoy, T. J., Sverjensky, D. A., Yang, H (2008) Mineral evolution. *American Mineralogist*, 93: 1693–1720. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2955>.
- He, J., Garzanti, E., Dinis, P., Yang, S., Wang, H (2020) Provenance versus weathering control on sediment composition in tropical monsoonal climate (South China)-1. *Geochemistry and clay mineralogy*. *Chemical Geology*, 558, 119860. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo>.
- Hou, Q., Mou, C., Han, Z., Wang, Q., Tan, Z., Ge, X (2020) Petrography and geochemistry of the Lower Silurian sandstones from the Angzangou Formation in the North Qilian Belt, China: Implications for provenance, weathering and tectonic setting. *Geological Magazine*, 157: 477–496.
- Ismail, A (1993) Heavy metal concentrations in sediments off Bintulu, Malaysia. *Marine Pollution Bulletin*, 26: 0159. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(93\)90159-Z](https://doi.org/10.1016/0025-326X(93)90159-Z).
- Jafarzadeh, M., Moussavi-Harami, R., Friis, H., Amini, A., Mahboubi, A., Lenaz, D (2014) Provenance of the Oligocene–Miocene Zivah Formation, NW Iran, assessed using heavy mineral assemblage and detrital clinopyroxene and detrital apatite analyses. *Journal of African Earth Sciences*, 89: 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.09.006>.
- Johnsson, M. J (1993) The system controlling the composition of clastic sediments. In M. J. Johnsson & A. Basu (Eds.), *Processes controlling the composition of clastic sediments*, Geological Society of America Special, 284: 1–19. Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p1>.
- Kanhaiya, S., Singh, B. P., Mittal, P., Patra, A (2024) Regolith profiles developed from a granitic parent rock in a sub-humid climate: Implications for pedogenesis and chemical mobility of elements. *Journal of Sedimentary Environments*, 9: 63–79.
- Kemp, A. I. S., Hawkesworth, C. J (2004) Granitic perspectives on the generation and secular evolution of the continental crust. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on geochemistry*, 3: 349–410.
- Keskin, Ş (2011) Geochemistry of Çamardı Formation sediments, central Anatolia (Turkey): Implication of source area weathering, provenance, and tectonic setting. *Geosciences Journal*, 15: 185–195. <https://doi.org/10.1007/s12303-011-0014-z>.
- Kroonenberg, S. B (1994) Effects of provenance, sorting and weathering on the geochemistry of fluvial sands from different tectonic and climatic environments. In F. Kumon & K. M. Yu (Eds.), *Proceedings of the 29th International Geological Congress, Part A* (pp. 69–81). VSP Publications.
- McLennan, S. M., Bock, B., Hemming, S. R., Hurowitz, J. A., Lev, S. M., McDaniel, D. K (2003) The role of provenance and sedimentary processes in the geochemistry of sedimentary rocks. In D. R. Lentz (Ed.), *Geochemistry of sediment and sedimentary rocks: Evolutionary considerations to mineral deposit-forming environments* (GeoText 4, pp. 7–31). Geological Association of Canada.
- McLennan, S. M., Hemming, S. R., McDaniel, D. K., Hanson, G. N (1993) Geochemical approaches to sediment provenance and tectonics. In M. J. Johnson & A. Basu (Eds.), *Processes controlling the composition of clastic sediments* (pp. 21–40). Geological Society of America Special Paper 284: 21–40. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>.
- National Iranian Copper Industries Company (2010) Final exploration report of the Dar-e-

- Allo copper deposit. Exploration and Development Engineering Unit, 197 p.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715–717.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based upon thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 1523–1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3).
- Nesbitt, H. W., Young, G. M (1996a) Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: Effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy. *Sedimentology*, 43: 341–358.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., McLennan, S. M., Keays, R. R (1996b) Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. *Journal of Geology*, 104: 525–542. <https://doi.org/10.1086/629850>.
- Paul, A. Q., Dar, S. A., Singh, B. P., Kumar, H., Ahmad, M (2023) Geochemistry of recent sediments of the Kurheri basin, Son River, Madhya Pradesh, Central India: Implications for source area weathering, sediment provenance, maturity, and sorting. *International Journal of Earth Sciences*, 112: 1803–1821. <https://doi.org/10.1007/s00531-023-02214-7>.
- Pejman, A., Nabi Bidhendi, G., Ardestani, M., Saeedi, M., Baghvand, A (2015) A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators*, 58: 365–373.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R (1987) *Sand and sandstone* (2nd ed.). Springer-Verlag.
- Potter, P. E (1978) Petrology and chemistry of modern Big River sands. *Journal of Geology*, 86: 423–449. <https://doi.org/10.1086/649693>.
- Potter, P. E., Maynard, J. B., Depetris, P. J (2005) *Mud and mudstones: Introduction and overview* (297 pp.). Springer.
- Randive, K., Kumar, J. V., Bhondwe, A., Lanjewar, S (2014) Understanding the behaviour of rare earth elements in minerals and rocks. *Gondwana Geological Magazine*, 29: 29–37.
- Rollinson, H. R (1993) *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical.
- Roser, B. P., Korsch, R. J (1986) Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94: 635–650.
- Roser, B. P., Korsch, R. J (1988) Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67: 119–139.
- Roy, D. K., Khan, R., Kundu, Z., Ornee, T. I., Rakib, M. M. H., Ovi, M. H., Roy, D., Pranto, A. I., Aishe, D. S., Abdullah, M., Nandi, N., Islam, F., Khan, M. H. R., Aldawood, S., Idris, A. M., Khan, A., Saha, A., Alam, M. S (2025) Major, trace, and rare earth element geochemistry of the Kuakata beach sand, Bangladesh: Implications for provenance, weathering, tectonic setting and heavy metal contamination. *Regional Studies in Marine Science*, 89: 104338. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104338>.
- Roy, D. K., Roser, B. P (2013) Climatic control on the composition of Carboniferous–Permian Gondwana sediments, Khalaspir basin, Bangladesh. *Gondwana Research*, 23: 1163–1171. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.07.006>.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Holland, H. D., Turekian, K. K (2003) Composition of the continental crust. In H. D. Holland & K. K. Turekian (Eds.), *The crust*, 3: 1–64.
- Saha, A., Roy, D. K., Khan, R., Ornee, T. I., Goswami, S., Idris, A. M., Biswas, P. K., Tamim, U (2023) Provenance, weathering, climate and tectonic setting of Padma River sediments, Bangladesh: A geochemical approach. *CATENA*, 233: 107485. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107485>.
- Suttner, L. J., Dutta, P. K (1986) Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. Framework mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 329–345.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M (1985) *The continental crust: Its composition and evolution*.
- Von Eynatten, H., Barceló-Vidal, C., Pawlowsky-Glahn, V (2003) Modelling compositional change: The example of chemical weathering of granitoid rocks. *Mathematical Geology*, 35: 231–251.
- Wang, L., Zhang, Y., Han, R., Li, X (2023) LA-ICP-MS analyses of trace elements in zoned sphalerite: A study from the Maoping carbonate-hosted Pb–Zn (–Ge) deposit, southwest China. *Ore Geology Reviews*, 157: 105468.
- Wang, S., Gu, Z., Guo, P., Zhao, W (2024) Comparative laboratory wettability study of sandstone, tuff, and shale using 12-MHz NMR T1–T2 fluid typing: Insight of shale. *SPE Journal*, 29: 4781–4803. <https://doi.org/10.2118/221496-PA>.
- Wang, Z. M., Han, C. M., Xiao, W. J., Sakyi, P. A (2017) Paleozoic subduction-related magmatism in the Duobagou area, Dunhuang block: Constrained by zircon U–Pb geochronology and Lu–Hf isotopes and whole-rock geochemistry of metaigneous rocks. *Lithosphere*, 9: 1012–1032. <https://doi.org/10.1130/L644.1>.

- Wronkiewicz, D. J., Condie, K. C (1987) Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: Source-area weathering and provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 2401–2416.
- Yan, Z., Wang, Z., Yan, Q., Wang, T., & Guo, X (2012) Geochemical constraints on the provenance and depositional setting of the Devonian Liuling Group, East Qinling Mountains, central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt. *Journal of Sedimentary Research*, 82: 9–24.
- Zand-Moghadam, H., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Rahimi, B (2013) Petrography and geochemistry of the Early–Middle Devonian sandstones of the Padeha Formation in the north of Kerman, SE Iran: Implication for provenance. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 83: 1–14.
- Zhang, C., Yu, Z. G., Zeng, G. M., Jiang, M., Yang, Z. Z., Cui, F., Zhu, M. Y., Shen, L. Q., Hu, L (2014) Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 73: 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.07.003>.
- Zhang, L., Yuan, X., Luo, L., Tian, Y., Zeng, S (2024) Seepage characteristics of broken carbonaceous shale under cyclic loading and unloading conditions. *Energy & Fuels*, 38: 1192–1203.
- Zhang, Y., Pe-Piper, G., Piper, D. J. W (2014) Sediment geochemistry as a provenance indicator: Unravelling the cryptic signatures of polycyclic sources, climate change, tectonism and volcanism. *Sedimentology*, 61: 383–410.
- Zaid, S. M (2013) Provenance, diagenesis, tectonic setting and reservoir quality of the sandstones of the Kareem Formation, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 85: 31–52. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.05.001>

Application of Stream and Reservoir Sediment Geochemistry in determining provenance: A Case Study from the watershed of Dar-e-Allo copper mine waste dam– Kerman, Iran

H. Bavi

Visiting Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

* Bavi.hoda@yahoo.com

Recieved: 2025.9.10 Accepted: 2025.11.16

Abstract

The sedimentation lake formed behind the waste dam of the Dar-e-Allo copper mine in south of Kerman, annually is the host of detrital material derived from the natural weathering and erosion of various upstream lithologies. To determine the provenance of these sediments, 18 samples were collected from clastic deposits along the main drainage channels as well as from sediments accumulated behind the dam. These samples were analyzed geochemically using XRF and XRD techniques to quantify the concentrations of major, minor, and rare earth elements. The calculated Chemical Index of Alteration (CIA) values, together with the A–CN–K ternary diagram, indicate a low to moderate degree of chemical weathering under arid to semi-arid climatic conditions in the provenance. The distribution patterns in binary and ternary geochemical diagrams reveal that the sediments are primarily derived from intermediate to mafic volcanic rocks (andesite and andesite–basalt), with minor contributions from felsic lithologies (dacite and rhyodacite). Low concentrations of chromium and nickel exclude any significant contribution from ultramafic sources. The position of the samples in binary and ternary discrimination diagrams, along with key geochemical ratios such as Th/U and La/Th, suggests a magmatic provenance associated with a tectonic setting typical of an Oceanic Island Arc. These findings provide valuable baseline data for sediment resource management in mining areas and contribute to the development of sustainable resource management strategies.

Keywords: Dar-e-Allo copper mine, Waste dam, Provenance, Sediment Geochemistry, Weathering Indices

Introduction

Sediments possess a remarkable ability to record and reflect key information related to their provenance, weathering, and erosion history from source to sink site. Geochemical characterization of sediments—including analyses of major, minor, and trace elements—serves as a powerful tool for interpreting geological processes and identifying sediment sources. The chemical mobility of elements largely depends on the composition of the parent rock, prevailing climatic conditions, and physicochemical alterations during weathering. Moreover, sediments act as major reservoirs for heavy metals and potentially contaminating elements (PCEs), playing a significant role in geochemical cycles and in assessing both natural and anthropogenic influences. The Dar-e-Allo copper mine sedimentation dam, located in southern Kerman Province, represents a key hydrological infrastructure designed to control

runoff and sediment accumulation. It also serves to mitigate flood risks and protect downstream settlements. Previous studies have indicated that natural erosion, driven by active tectonic settings and intense weathering processes, is the primary source of sediments entering the dam reservoir. The upstream parent rocks mainly consist of tuff, andesite, basalt, dacite, and rhyodacite, characterized by phyllic, argillic, and propylitic alterations, which make them highly susceptible to erosion. The main objective of this study is to identify the primary sources of sediments and determine the parent rocks with the highest natural erosion potential. To achieve this, a comprehensive geochemical investigation of major oxides and trace elements in the sediments is essential. Such analyses enable the reconstruction of weathering, erosion, and transport processes, ultimately contributing to the sustainable management of the region's water and soil resources.

Materials & Methods

Eighteen sediment samples were collected from first-order upstream channels and the waste dam to investigate their geochemical characteristics. After natural drying, removal of impurities, grinding, and sieving, about 50 mg of each sample was analyzed by XRF and XRD at Zar-Azma Laboratory. The detrital sediments, influenced by weathering, erosion, and fluvial transport, were analyzed for nine major oxides (wt%), fifteen minor elements, and thirteen REEs (ppm). Element concentrations were normalized to the Upper Continental Crust (UCC), providing key insights into sediment composition and provenance.

Results and Discussion

The SiO_2 content ranges from 38.55% to 65.68%, with an average Al_2O_3 of ~27.6%, and a low $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio indicating a greywacke composition rich in clay minerals. Fe_2O_3 is significantly enriched, while MgO and Na_2O are depleted, suggesting a volcanic source with low Mg and Na content. Trace elements like Ba, Sr, and V are abundant, though most show depletion relative to UCC. REE patterns reveal LREE enrichment, reflecting derivation from intermediate to mafic igneous rocks. Overall, the geochemical data indicate a volcanic provenance modified by weathering and sedimentary processes.

To assess the degree of weathering in the source area, various indices based on the ratio of mobile (Na_2O , K_2O , CaO , MgO) to immobile (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2) oxides were used. The Chemical Index of Alteration (mean $\text{CIA}=69.6$) suggests moderate chemical weathering and a semi-arid to arid paleoclimate. A-CN-K ternary plots show samples trending toward the illite field due to depletion of Na and Ca, confirming progressive weathering. XRD analyses support the presence of illite as a dominant alteration product. The Th/U ratios (<3.8) indicate limited weathering and minimal sediment recycling. Overall, geochemical proxies consistently point to low-to-moderate weathering intensity under dry to semi-arid climatic conditions in the provenance.

The provenance of the studied sediments was investigated using major, trace, and rare earth element geochemistry, as well as weathering and compositional indices. The A-CN-K ternary diagram indicates a weathering trend

from felsic parent rocks toward the Al, while CIA–ICV relationships suggest derivation from intermediate volcanic sources. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ratios (18–79) point to intermediate to felsic parent lithologies, mainly andesite and rhyodacite. Trace-element ratios (e.g., La/Sc, Th/Sc, Co/Th) and binary plots (e.g., Cr/Th vs. Th/Sc, Zr/Sc vs. Th/Sc) consistently indicate an andesitic to basaltic provenance with minimal sediment recycling. Low Cr and Ni concentrations exclude ultramafic sources, and Rb contents suggest most samples were derived from intermediate to felsic rocks. REE patterns, with enriched LREEs relative to HREEs, further support a felsic signature. Combined geochemical data and petrographic observations confirm a dominant intermediate–mafic source (andesite to basaltic andesite), with minor contributions from felsic (dacite, rhyodacite) and subordinate carbonate sources. Overall, the sediments reflect a mixed provenance dominated by intermediate igneous lithologies. Geochemical discrimination diagrams using major, trace, and REE data consistently place the studied sediments within an oceanic island arc (OIA) tectonic setting. Binary and ternary plots (SiO_2 vs. $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$, La–Th–Sc, Th–Sc–Zr/10) confirm deposition related to active continental margins and magmatic arc environments. Elemental ratios such as Th/U, Th/Sc, La/Th, and Rb/Sr further support this tectonic interpretation. These findings, combined with field observations, suggest sediment derivation from weathering and erosion of andesite-basaltic to rhyodacite lithologies under arid to semi-arid conditions within an active oceanic–continental margin setting.

Conclusions

This study aimed to identify the primary source rocks contributing to sediment erosion and transport into the Dar-e-Allo waste dam and to assess the enrichment of major oxides, minor elements, and REEs relative to the upper continental crust (UCC). Geochemical analyses reveal enrichment in Al, Fe, Ca, K, Ti, Mn, Pb, and Zn and depletion in Si, Mg, Na, Sr, Ba, Th, U, Zr, Nb, Y, Sc, Cr, Co, Ni, and REEs. Binary and ternary plots support derivation under natural weathering and erosion in arid to semi-arid climates. CIA values indicate low to moderate weathering intensity consistent with regional conditions. Tectonic discrimination diagrams further place the sediments within an oceanic island arc (OIA) setting.