مجله علمی‌پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان

سال یازدهم، شماره سی‌وششم، پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۸۳ـ۱۰۱

مقالهٔ پژوهشی

ژئوشیمی رسوبات پلایای سبزوار: کاربرد آن در تعیین موقعیت تکتونیکی و شرایط آب‌وهوای دیرینه

ملیحه پورعلی[۱]، عادل سپهر[۲]*، ابوالفضل جمشیدی‌پور[۳]

دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۵ **پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰**

چکیده

پلایای سبزوار در شرق کویر بزرگ ایران مرکزی با مساحت حدود ۲۶۴۸ کیلومتر مربع واقع شده است. در این پژوهش به طبقه‌بندی، تعیین سنگ منشأ، هوازدگی و موقعیت تکتونیکی رسوبات پلایای سبزوار با استفاده از آزمایش پراش اشعهٔ ایکس (XRD)، فلورسانس اشعهٔ ایکس (XRF) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بر روی رسوبات پلایا پرداخته شده است. نتایج بیانگر وجود کانی‌های آواری و تبخیری مانند کوارتز، ایلیت، پالیگورسکیت، کلسیت، دولومیت و هالیت در رسوبات است. مقایسهٔ بین مقادیر اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی رسوبات با مقادیر پوستهٔ بالایی قاره‌ای نشانگر غنی‌شدگی برای Fe_2O_3، CaO، Na_2O، MgO، MnO، As، Co، Cr، Ni، Cu، Pb، Sr، Y و Zn و تهی‌شدگی برای SiO_2، Al_2O_3، K_2O، TiO_2، P_2O_5، Ba، Ce، Nb، Rb، V و Zr است. رسوبات بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی از نوع واکی هستند. بررسی شاخص‌های ژئوشیمیایی Al_2O_3/SiO_2، K_2O/Na_2O، Fe_2O_3+MgO، Cr/V و Y/Ni بیانگر ترکیبات حدواسط تا مافیک است. میزان شاخص‌های هوازدگی شیمیایی در ناحیهٔ منشأ با استفاده از روش CIA بین ۳۲ تا ۴۸ و برای روش CIX در حدود ۴۳ تا ۶۴ بوده است. همچنین بررسی مقادیر SiO_2 در مقابل مقادیر $Al_2O_3+K_2O+Na_2O$ نشان‌دهندهٔ آب‌وهوای خشک در ناحیهٔ منشأ است. نتایج بیانگر یک موقعیت تکتونیکی فعال برای رسوبات پلایای سبزوار است.

کلیدواژه‌ها: برخاستگاه، پلایای سبزوار، شاخص هوازدگی، رسوبات عهد حاضر، ژئوشیمی.

---

۱. استاد مدعو گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. دانشیار مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، adelsepehr@um.ac.ir

۳. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی گرایش رسوب‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

* این مقاله برگرفته از رسالهٔ دکتری است.

DOI: 10.22052/DEEJ.2021.11.36.44

مقدمه

پلایا به‌عنوان لندفرم غالب در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته شده و در برخی موارد تنها شاهد از شرایط محیطی گذشته در مناطق نیمه‌خشک است (سیمکاتز-کلاس[1] و همکاران، ۲۰۱۰؛ کادیر[2] و همکاران، ۲۰۱۸). امروزه روش‌های ژئوشیمیایی برای مطالعهٔ فرایندهای ژئوشیمیایی، تکتونیک و منشأ رسوبات پلایا مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین جنبهٔ مطالعات برخاستگاه، تعیین سنگ منشأ[3]، پستی و بلندی[4]، شرایط اقلیمی در ناحیهٔ منشأ، موقعیت تکتونیکی[5]، تاریخچهٔ حمل[6] و تغییرات دیاژنتیکی است (جین[7] و همکاران، ۲۰۰۶). ترکیب رسوبات اساساً به‌وسیلهٔ سنگ منشأ و تغییراتی که در طول حمل‌ونقل از ناحیهٔ سنگ منشأ بر روی رسوبات صورت می‌گیرد، کنترل می‌شود (باتیا[8]، ۱۹۸۳؛ دیکینسون[9] و همکاران، ۱۹۸۳؛ اکامپو-دیاز[10] و همکاران، ۲۰۲۰). پژوهشگران مدل‌هایی مربوط به لیتولوژی ناحیهٔ منشأ (براسیالی[11] و همکاران، ۲۰۰۷؛ زند-مقدم و همکاران، ۲۰۱۳؛ موقال[12] و همکاران، ۲۰۱۸؛ شهرکی و همکاران، ۲۰۲۱)، موقعیت تکتونیکی (باتیا، ۱۹۸۳؛ نوروزی و همکاران، ۲۰۱۴)، هوازدگی شیمیایی (نزبیت و یانگ[13]، ۱۹۸۲؛ گرزنتی[14] و همکاران، ۲۰۱۴) و پتروگرافی (هرون[15]، ۱۹۸۸؛ پتیجان[16] و همکاران، ۱۹۸۷؛ آرمسترانگ-آلترین[17] و همکاران، ۲۰۱۹) را برای رسوبات و سنگ‌های رسوبی سیلیسی آواری استفاده کرده‌اند. تاکنون تحقیقی دربارهٔ برخاستگاه رسوبات پلایای سبزوار انجام نشده است؛ هدف از این پژوهش مطالعهٔ کانی‌شناسی و ژئوشیمی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی رسوبات پلایای سبزوار به‌منظور بررسی خاستگاه و تعیین منشأ رسوبات آواری برای دستیابی به موقعیت تکتونیکی و بررسی فرایندهای هوازدگی در ناحیهٔ سنگ منشأ است.

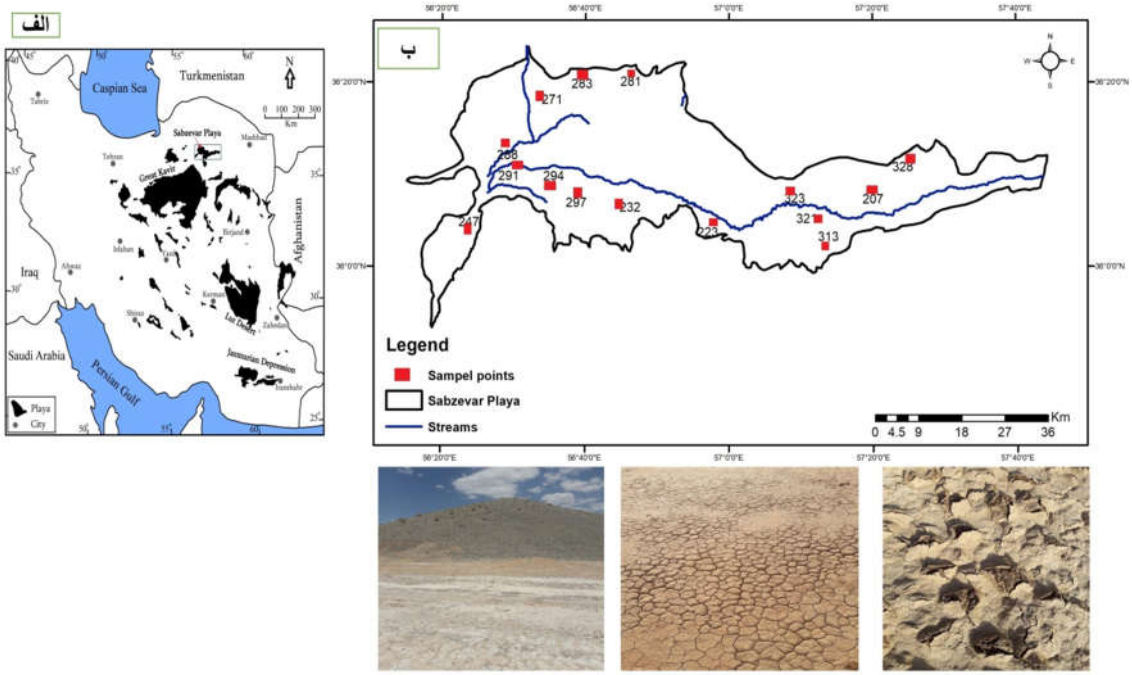
منطقهٔ مطالعاتی و زمین‌شناسی

پلایای سبزوار به‌عنوان منطقهٔ مورد مطالعه در شرق حوضهٔ کویر بزرگ ایران مرکزی با مساحت حدود ۲۶۴۸ کیلومتر مربع بین عرض جغرافیایی ′۵۵ °۳۵ تا ′۲۵ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ′۱۵ °۵۶ تا ′۴۵ °۵۷ شرقی واقع شده است. این پلایا اغلب به‌همراه کویر بزرگ ایران و پلایاهای اطراف آن (مانند کویر دامغان، پلایای بجستان و کویر حاج علیقلی) به نام حوضهٔ دشت کویر طبقه‌بندی می‌شود (جولاده رودبار[18] و همکاران، ۲۰۱۵) (شکل ۱). اختلاف ارتفاع توپوگرافی منطقه بین ۷۵۰ تا ۹۰۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد است. پلایای سبزوار دارای آب‌وهوای نیمه‌خشک و خشک با میانگین دمای سالانهٔ ۱۷/۵ درجهٔ سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۵۰ـ۲۰۰ میلی‌متر است (بر اساس گزارش‌های ایستگاه سینوپتیک سبزوار در فاصلهٔ سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۰). رخساره‌های ژئومورفیک پلایای سبزوار شامل دلتای مخروط‌افکنه، دشت ریگی، نبکا، رخسارهٔ پهنهٔ رسی (دق)، رخسارهٔ پهنهٔ پف‌کرده و پوسته‌های نمکی هستند (پورعلی و همکاران، ۲۰۲۰).

طبق نظریهٔ گانسر (گانسر[19]، ۱۹۵۵)، پلایای سبزوار یک دریاچهٔ کواترنری بوده که احتمالاً در اوایل پلیستوسن بسته شده است. به‌لحاظ زمین‌شناسی اطراف پلایای سبزوار عمدتاً شامل توالی‌های افیولیتی موسوم به افیولیت‌های سبزوار است (مقدم و همکاران، ۲۰۱۴). واحدهای نفوذی و آتشفشانی عمدتاً به سن ائوسن نیز در قسمت‌های شمالی و شرقی پلایای سبزوار مشاهده می‌شوند (رادفر و کهنسال، ۲۰۰۰). واحدهای رسوبی عمدتاً آواری (کنگلومرا و ماسه‌سنگ) و کربناته به سن‌های کرتاسه، ژوراسیک، ائوسن و جوان‌تر در اطراف پلایا

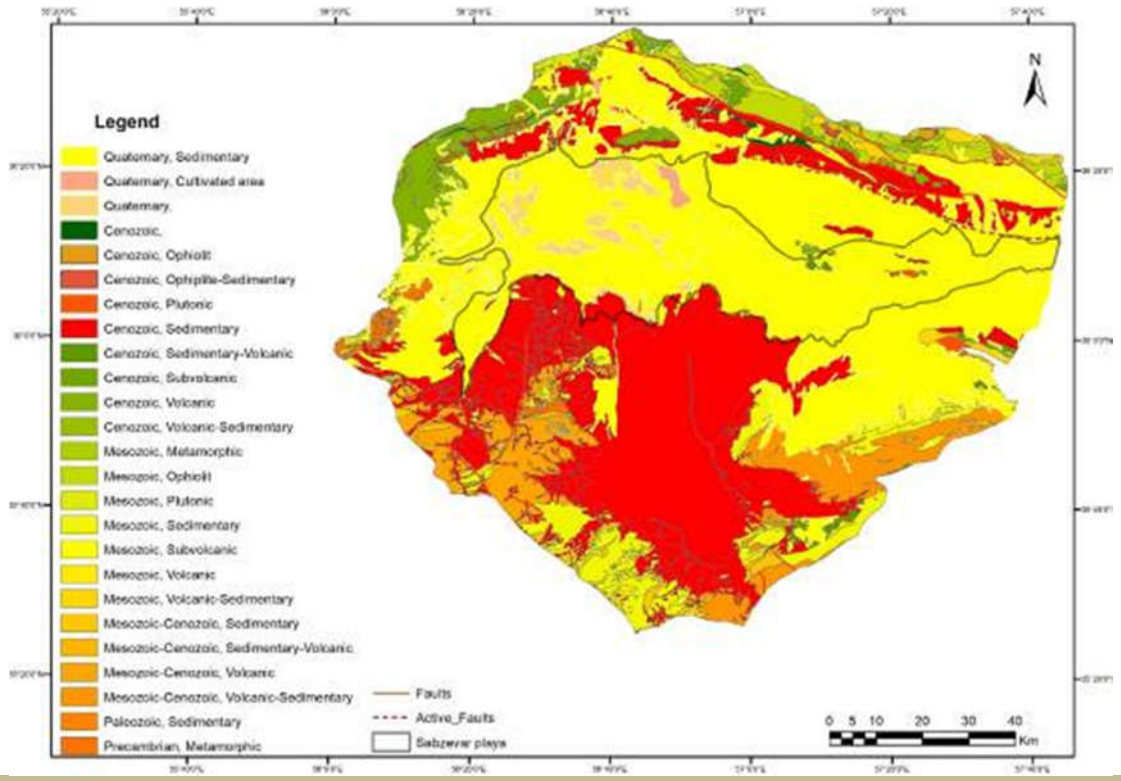
1. Smykatz-Kloss
2. Kadir
3. Source rocks
4. Relief
5. Tectonic Setting
6. Transport history
7. Jin
8. Bhatia
9. Dickinson
10. Ocampo-Diaz
11. Bracciali
12. Mughal
13. Nesbitt and Young
14. Garzanti
15. Herron
16. Pettijohn
17. Armstrong-Altrin
18. Jouladeh Roudbar
19. Gansser

به‌صورت پراکنده با رخنمون‌های فراوان قابل مشاهده‌اند. در نیمهٔ غربی منطقهٔ مطالعاتی، مجموعهٔ دگرگونی همراه با واحدهای رسوبی مربوط به قبل از ژوراسیک به‌همراه توالی‌های رسوبی وجود دارد. واحدهای رسوبی آن نیز عمدتاً از جنس دولومیت و آهک هستند (رادفر و کهنسال، ۲۰۰۰؛ خلعتبری–جعفری، ۲۰۱۳) (شکل ۲).



شکل (۱): الف. نقشهٔ توزیع پلایاهای ایران (کرینسلی، ۱۹۷۰)؛ ب. پلایای سبزوار همراه با موقعیت نقاط برداشت رسوب و تصاویری از منطقه

Figure (1): a. Distribution map of playas in Iran (Krinsley, 1970); b. Sabzevar playa with the location of sediment collection points and pictures of the area



شکل (۲): نقشهٔ زمین‌شناسی پلایای سبزوار (اقتباس از مجیدی، ۱۹۹۸؛ خلعتبری–جعفری ۲۰۱۳؛ رادفر و کهنسال، ۲۰۰۰)

Figure (2): Geological map of Sabzevar playa (Adapted from: Majidi, 1998; Khalatbari-Jafari, 2013; Radfar and Kohansal 2000)

مواد و روش مطالعه

به‌منظور مطالعهٔ ژئوشیمی و کانی‌شناسی رسوبات پلایای سبزوار طی مطالعات میدانی صورت‌گرفته در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸، تعداد ۱۳ نمونه رسوب به‌وسیلهٔ اوگر[1] دستی (ساخت شرکت ویندااس[2] آلمان) از نقاط مختلف جغرافیایی آن برداشت صورت گرفت و مختصات جغرافیایی و ارتفاعی برای هر محل نمونه با استفاده از یک سیستم موقعیت‌یاب جغرافیایی دستی[3] نیز ثبت شد. به‌منظور مطالعات کانی‌شناسی ۹ نمونه رسوب از سطح (۶ نمونه) و عمق یک‌متری (۳ نمونه) پلایا انتخاب و بدون هیچ تیماری پس از پودر کردن توسط هاون آگات، با استفاده از دستگاه پراش اشعهٔ ایکس (XRD) مدل Philips PW1730 ساخت کشور آلمان در محدودهٔ 2θ برابر با ۳ تا ۶۰ درجه در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد اندازه‌گیری شده و کانی‌ها با استفاده از پیک‌های مشخصهٔ آن‌ها در طیف نرمال توسط نرم‌افزار MATCH شناسایی و فراوانی نسبی کانی‌ها در هر نمونه با استفاده از سطح زیرمنحنی در الگوهای پراش اشعهٔ ایکس برآورد گردید. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VP 1450، LEO ساخت کشور آلمان و آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) برای ۱۰ نمونه از رسوبات (سطح تا عمق ۱۰ سانتی‌متری و عمق ۹۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری) به‌منظور شناسایی کانی‌های رسی اتوژنیک و آلوژنیک در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد نیز انجام شد. غلظت اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی برای ۱۳ نمونه رسوب با استفاده از فلورسانس اشعهٔ ایکس (XRF) مدل Philips PW1410/70 ساخت کشور آلمان مطابق روشی که توسط عبدی و همکارانش (۲۰۱۸) توضیح داده شده است، در آزمایشگاه بیم‌گستر تابان تعیین شد.

نتایج

نتایج حاصل از آنالیز پراش اشعهٔ ایکس (XRD) رسوبات پلایا در جدول (۱) نمایش داده شده است. بر اساس نتایج کانی‌شناسی به روش آنالیز پراش اشعهٔ ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS) کانی‌های آواری حاوی اکسید سیلیس، کانی‌های رسی، کانی‌های کربناته و کانی‌های تبخیری فراوان‌ترین کانی‌های شناسایی‌شده در رسوبات پلایای سبزوار هستند (شکل ۳). نتایج آزمایش فلورسانس اشعهٔ ایکس (XRF) بیانگر وجود اکسید سیلیسیم (SiO_2) با بیشترین فراوانی (بین ۳۹/۸ تا ۴۵/۵ درصد وزنی) در میان اکسیدهای اصلی شناسایی‌شدهٔ رسوبات است. پس از اکسید سیلیسیم، سایر اکسیدهای اصلی مانند (Al_2O_3) (۶/۷ تا ۱۰/۲ درصد وزنی)، (Fe_2O_3) (۴/۸ تا ۷/۳ درصد وزنی)، (CaO) (۵/۵ تا ۱۰ درصد وزنی)، (Na_2O) (۲/۹ تا ۹/۲ درصد وزنی)، (MgO) (۶/۲ تا ۱۱/۶ درصد وزنی)، (K_2O) (۱/۳ تا ۲/۳ درصد وزنی)، (TiO_2) (۰/۴ تا ۰/۶ درصد وزنی)، (MnO) (۰/۰۷ تا ۰/۱۱ درصد وزنی) و (P_2O_5) (۰/۱ تا ۰/۱۳ درصد وزنی) بیشترین درصد وزنی را به خود اختصاص داده‌اند. میزان L.O.I[4] در این نمونه‌ها نیز بین ۸/۱ تا ۱۶/۹ درصد وزنی رسوبات را شامل می‌شود (جدول ۲). عناصر فرعی در این نمونه‌ها نیز شامل آرسنیک As (۱ تا ۱۸ گرم در تن)، باریم Ba (۲۱۲ تا ۳۶۹ گرم در تن)، سریم Ce (۲۵ تا ۶۹ گرم در تن)، کبالت Co (۱۵ تا ۲۹ گرم در تن)، کروم Cr (۱۰۷ تا ۳۸۲ گرم در تن)، مس Cu (۵ تا ۵۰ گرم در تن)، نیوبیم Nb (۱ تا ۸ گرم در تن)، نیکل Ni (۱۳۲ تا ۵۸۸ گرم در تن)، سرب Pb (۸ تا ۴۲ گرم در تن)، روبیدیم Rb (۴۶ تا ۱۰۱ گرم در تن)، استرانسیم Sr (۲۱۲ تا ۹۶۵ گرم در تن)، وانادیم V (۵۶ تا ۹۵ گرم در تن)، ایتریم Y (۲۵ تا ۴۳ گرم در تن)، زیرکونیوم Zr (۸۵ تا ۱۸۸ گرم در تن)، روی Zn (۶۸ تا ۱۲۷ گرم در تن) و کلر Cl (۷ تا ۱۰۵۰۰۰ گرم در تن) است (جدول ۳).

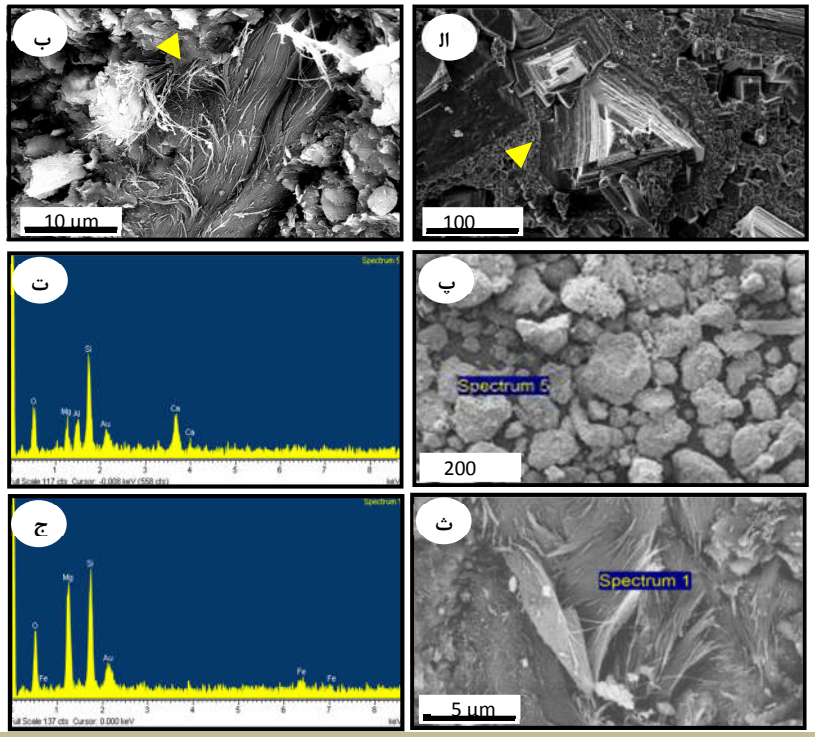
1. Auger
2. WINDAUS
3. GPS
4. Loss on ignition

جدول (۱): مقادیر کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ رسوبات بر اساس پراش اشعهٔ ایکس (XRD)*

Table (1): Amounts of minerals forming sediments by XRD* method

No#	247	210	207	277	290	283	294	313	283
Depth (cm)	90-100	0-10	0-10	0-10	90-100	0-10	0-10	0-10	90-100
Illite	-	-	-	-	6.32	-	11.8	-	-
Halite	2.60	19.20	-	24.89	13.10	30.9	5.8	-	39.45
Quartz	51.90	34.04	37.80	26.75	26.23	33.9	40.9	41.7	32.41
Silvite	-	-	1.04	-	-	-	-	-	-
Nontronite	-	-	3.86	8.44	-	-	-	-	2.13
Palygorskite	-	-	4.94	8.44	5.30	-	5.3	-	2.5
Montmorillonite	5.60	3.30	3.13	-	7.55	-	-	-	-
Hedenbergite	-	-	-	-	6.00	-	-	-	-
Eastonite	4.10	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcite	20.80	12.31	22.60	21.81	13.60	22.12	25.8	40.8	23.51
Sepiolite	-	-	-	-	5.21	-	-	-	-
Zeolite	0.50	3.10	-	-	-	12	-	-	-
Albite	14.00	11.10	7.86	-	-	-	6	17.5	-
Cristobalite	-	-	17.76	-	-	-	-	-	-
Dolomite	-	2.20	-	7.41	-	-	-	-	-
Magnetite	-	3.40	-	-	-	-	-	-	-
Halloysite	-	7.05	-	-	7.85	-	-	-	-
Anhydrite	-	4.30	-	-	8.40	-	-	-	-

* همهٔ مقادیر به‌صورت نیمه‌کمی هستند.



شکل (۳): تصویر ریزنگاشت میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) الف. کانی‌هالیت؛ ب. کانی پالیگورسکیت؛ پ. کانی کوارتز؛ ت. طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) کانی کوارتز نشانگر حضور Si و O؛ ث. کانی اتوژنیک سپیولیت؛ ج. طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) کانی سپیولیت نشانگر حضور Si، Mg و O

Figure (3): Scanning electron microscopy (SEM) a: halite mineral b: palygorskite mineral c: quartz mineral d: energy dispersive spectroscopy (EDS) of quartz mineral indicating the presence of Si and O e: Sepiolite autogenic mineral f: energy dispersive spectroscopy (EDS) sepiolite mineral indicating the presence of Si, Mg and O

جدول (۲): مقادیر اکسیدهای اصلی (wt%) نمونه‌های بالک با روش XRF

Table (2): Amounts of major oxides (as wt%) of bulk samples by XRF method

No#	210	210	223	247	247	277	277	286	290	290	320	324	324
Depth (cm)	0-10	90-100	0-10	0-10	90-100	0-10	90-100	0-10	0-10	90-100	0-10	0-10	90-100
SiO_2	41.88	42.90	40.67	40.52	43.81	41.22	40.30	43.67	45.53	41.32	43.04	43.04	39.82
Al_2O_3	8.23	9.75	8.16	8.48	9.89	9.57	8.52	8.82	9.92	10.22	9.37	9.36	6.69
Fe_2O_3	5.08	6.47	5.12	5.92	5.86	6.72	6.64	6.35	6.57	7.28	5.67	5.67	4.78
CaO	6.29	6.90	7.79	7.90	9.97	7.69	5.89	7.67	8.63	5.47	8.41	8.41	7.39
Na_2O	9.24	3.51	6.70	5.95	2.93	6.45	5.14	5.82	4.39	3.36	7.34	7.34	5.45
MgO	9.75	9.07	7.52	8.84	6.16	7.97	11.16	9.38	8.53	8.46	7.28	7.27	11.62
K_2O	1.66	2.10	1.76	1.92	2.03	2.10	1.67	1.79	2.07	2.26	1.84	1.83	1.25
TiO_2	0.42	0.52	0.43	0.50	0.52	0.47	0.46	0.49	0.53	0.56	0.45	0.44	0.45
MnO	0.08	0.09	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.09	0.09	0.07
P_2O_5	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.12	0.10	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10
L.O.I	9.56	14.23	10.46	9.31	15.82	9.05	15.06	9.61	9.22	16.88	8.10	8.10	16.00

L.O.I: Loss on ignition

جدول (۳): مقادیر عناصر کمیاب (ppm) نمونه‌های بالک به روش XRF

Table (3): Trace elements data (ppm) of bulk samples analyzed by XRF method

NO#	210	210	223	247	247	277	277	286	290	290	320	324	324
Depth (cm)	0-10	90-100	0-10	0-10	90-100	0-10	90-100	0-10	0-10	90-100	0-10	0-10	90-100
As	8	7	15	6	8	1	N	18	17	8	7	5	5
Ba	212	264	257	282	336	309	244	301	369	267	286	286	242
Ce	44	30	52	N	N	47	69	58	N	25	52	52	N
Co	17	22	16	16	22	22	29	20	18	25	15	15	19
Cr	333	229	110	107	156	154	304	232	163	157	117	117	382
Cu	N	N	18	11	48	37	35	19	17	5	50	50	N
Nb	N	N	4	2	1	3	N	4	8	N	4	4	N
Ni	234	207	190	132	152	339	476	327	297	175	162	588	391
Pb	15	21	27	16	22	34	8	35	35	42	23	14	14
Rb	57	81	76	76	92	90	79	72	84	101	72	72	46
Sr	212	363	403	965	483	476	262	393	279	343	483	483	264
V	63	78	71	76	83	84	78	80	79	95	74	74	56
Y	28	43	28	30	42	30	27	32	32	34	25	25	33
Zr	85	145	126	158	188	137	148	134	138	161	127	127	93
Zn	68	97	74	86	97	92	90	87	102	127	78	78	71
Cl	42000	28905	105000	49000	18422	59000	35498	53000	38000	30666	69000	6.9	N

N: Not detected

بحث

ژئوشیمی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی رسوبات منطقهٔ مطالعاتی

بررسی توزیع اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی در پلایای سبزوار و مقایسهٔ آن‌ها با مقادیر پوستهٔ قاره‌ای بالایی (UCC) حاصل از مطالعات تیلور و مک‌لنن[1] (۱۹۸۵) و همچنین پلات این اکسیدها و عناصر در مقابل یکدیگر، اطلاعات مفیدی از سنگ منشأ رسوبات، هوازدگی شیمیایی رسوبات، آب‌وهوای دیرینه و جایگاه تکتونیکی ناحیهٔ رسوب‌گذاری

1. Taylor & McLennan

ارائه کرد. در مقایسه با مقادیر پوستهٔ قاره‌ای بالایی (UCC)، اکسیدهای اصلی رسوبات پلایای سبزوار شامل Fe_2O_3، CaO، Na_2O، MgO و MnO غنی‌شدگی نشان داده‌اند و در مقابل، اکسیدهای اصلی SiO_2، Al_2O_3، K_2O، TiO_2 و P_2O_5 دچار تهی‌شدگی هستند (شکل 4a). اکسید سیلیسیم (SiO_2) به‌عنوان یک شاخص ژئوشیمیایی مهم و نشانگر کوارتز در ناحیهٔ منشأ است (عادل و همکاران، ۲۰۰۸). تغییرات روند SiO_2 در مقابل اکسیدهایی مانند Al_2O_3 و K_2O در منطقه مثبت بوده و در مقابل، با Na_2O منفی بوده است که در ارتباط با مقادیر پایین فلدسپات‌ها و فراوانی کانی‌های رسی در نمونه‌هاست (شکل 5a to c). یکی دیگر از شاخص‌های ژئوشیمیایی که در مطالعهٔ رسوبات آواری استفاده می‌شود، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) به‌عنوان یک اکسید غیرمتحرک است. این اکسید در مقابل هوازدگی، دیاژنز و دگرگونی رسوبات مقاوم است (باتومایک[1] و همکاران، ۲۰۰۶؛ عادل و همکاران، ۲۰۰۸). روند تغییرات Al_2O_3 در مقابل Na_2O در منطقه منفی بوده که نشانگر عدم همراهی این دو اکسید اصلی با یکدیگر و فراوانی سیلیکات‌های آلومینیوم‌دار (کانی رسی) در ناحیهٔ منشأ رسوبات است (شکل 5d).

غنی‌شدگی در مقادیر اکسیدهای CaO، MgO و Na_2O و روند منفی Na_2O در مقابل SiO_2 و Al_2O_3 نشانگر وجود کانی‌های کربناته مانند دولومیت و کلسیت و همچنین وجود کانی‌های تبخیری از نوع کلرید مانند کانی‌هالیت است (جمشیدی‌پور و همکاران، ۲۰۲۱). در پلایای سبزوار نیز چنین روندی صورت گرفته است. همچنین نتایج (XRD) تأییدکنندهٔ وجود کانی‌های کربناته و تبخیری در پلایای سبزوار است. مقادیر بالای Fe_2O_3 و MnO نیز در ارتباط با حضور مگنتیت به‌عنوان یک کانی سنگین است (زند-مقدم و همکاران، ۲۰۱۳؛ جعفرزاده و همکاران، ۲۰۱۴) در پلایای سبزوار نیز مقادیر بالای Fe_2O_3 و MnO نشانگر حضور مگنتیت در منطقه است. همچنین روند مثبت اکسید SiO_2 و Al_2O_3 در مقابل یکدیگر، نسبت‌های تقریباً پایین SiO_2/Al_2O_3 و تهی‌شدگی رسوبات پلایا از این دو اکسید نسبت به مقادیر پوستهٔ قاره‌ای بالایی (UCC) نمایانگر مقادیر نسبتا کم رسوبات سیلیسی آواری در مقابل سایر رسوبات پلایا و فراوانی ذرات کوارتز و کانی‌های رسی نسبت به فلدسپارها در رسوبات است. مقادیر غنی‌شدهٔ Na_2O در کنار مقادیر Al_2O_3 و K_2O_3 به‌علت حضور فلدسپارها و کانی‌های رسی در رسوبات است (خانه‌باد و همکاران، ۲۰۱۲؛ صالحی و همکاران، ۲۰۱۴) که به نظر می‌رسد با توجه به شواهد کانی‌شناسی و تبعیت اکثر اکسیدهای اصلی منطقه، از Al_2O_3، مقادیر زیادی از کانی‌های رسی در رسوبات در اثر تجزیهٔ شیمیایی فلدسپارها حاصل شده باشند. مقادیر TiO_2 عمدتاً در ارتباط با سنگ‌های مافیکی ولکانیکی و مقادیر کم آن می‌تواند ناشی از مشتق شدن آن‌ها از سنگ‌های حدواسط باشد (خانه‌باد و همکاران، ۲۰۱۲). تیتانیوم در سنگ‌های آذرین اصولاً به‌صورت ایلمنیت حضور دارد و می‌تواند جایگزین Al در الیوین و دیوپسید شود. وجود تیتانیم همچنین می‌تواند در ارتباط با روتیل و کانی‌های اوپاک باشد (پاندی و پارچا[2]، ۲۰۱۷).

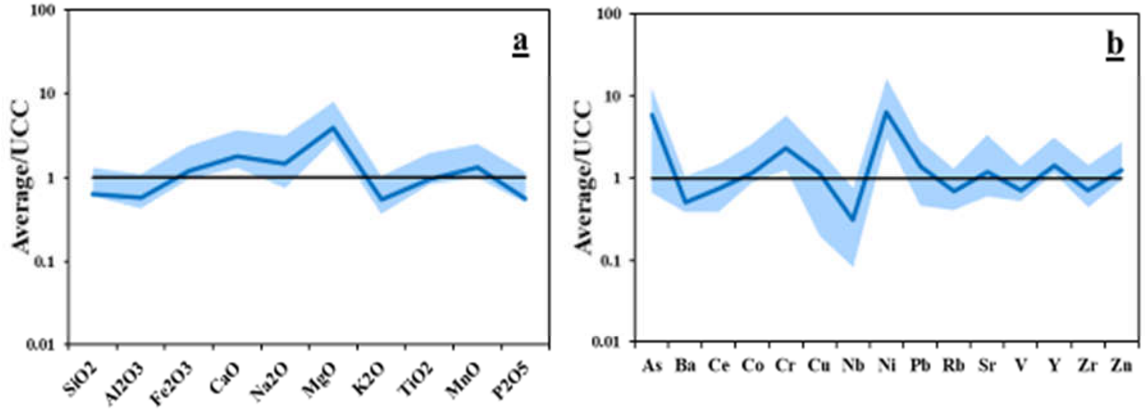
عناصر فرعی مانند Nb ، Co ,Zr ,Y ,V ,Ni ,Ce در رسوبات آواری تحت شرایط هوازدگی، دیاژنز و سطوح متوسط دگرگونی غیرقابل تغییر بوده و عموماً حفظ می‌شوند (مک‌لنن[3] و همکاران، ۱۹۹۳) همچنین نشانه‌های منشأ رسوبات را می‌توان با استفاده از نسبت‌های عناصر فرعی به دست آورد (استفن[4] و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین عناصر فرعی می‌توانند نشانگر مفیدی برای تشخیص موقعیت تکتونیکی و منشأ رسوبات باشند. همچنین رسوبات سیلیسی- آواری دانه‌ریز نسبت به رسوبات سیلیسی- آواری دانه‌درشت‌تر، میزان حفظ‌شدگی بهتری از عناصر فرعی را در خود دارند (مک‌لنن، ۲۰۰۱). در مقایسه با مقادیر پوستهٔ قاره‌ای بالایی (UCC) عناصر فرعی رسوبات پلایای سبزوار شامل As، Co، Cr، Ni، Cu، Pb، Sr، Y و Zn غنی‌شدگی

1. Batumike

2. Pandey and Parcha
3. McLennan
4. Steffen

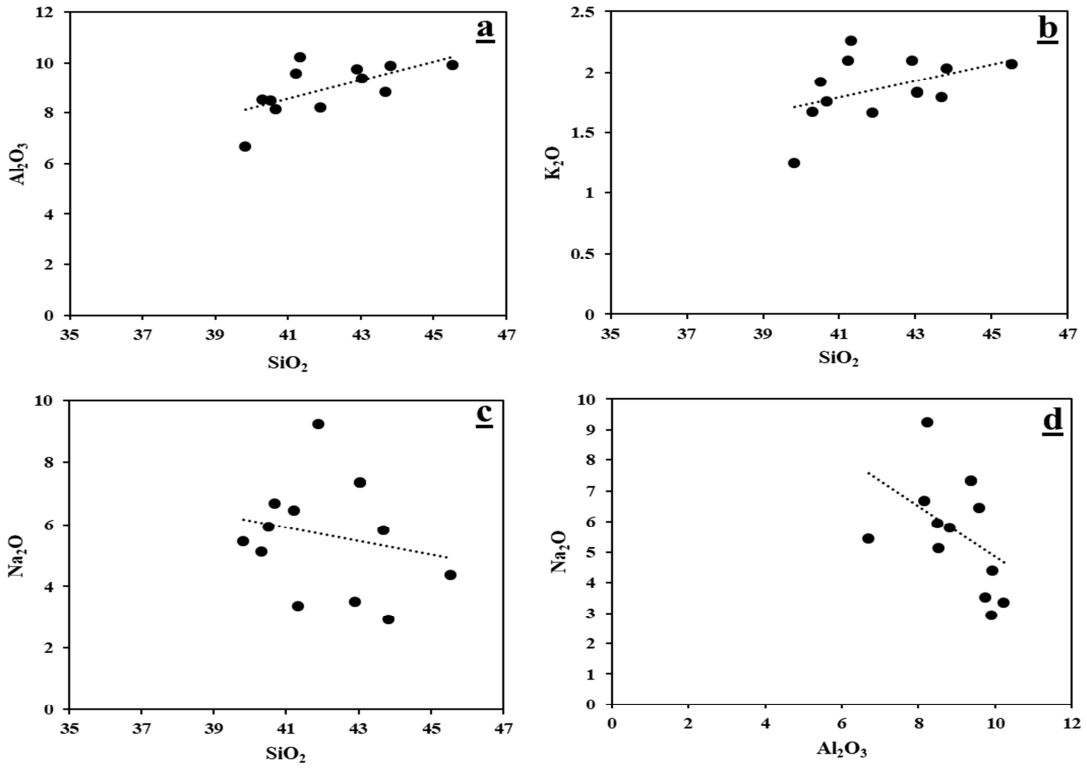
نشان داده و در مقابل اکسیدهای اصلی مانند Ba، Ce، Nb، Rb، V و Zr دچار تهی‌شدگی شده‌اند (شکل 4b).

Nb عنصری ناسازگار است؛ این عنصر می‌تواند به مقدار کم جانشین Ti در کانی روتیل شود. باقی ماندن چنین فاز دیرگدازی در منشأ می‌تواند باعث تهی‌شدگی Nb در ماگماهای مربوط به فرورانش شود. همچنین جذب انتخابی بیشتر Nb در شبکهٔ آمفیبول باقی‌مانده، نسبت به فازهای دیگر گوشته‌ای می‌تواند عاملی برای ایجاد آنومالی منفی این عنصر باشد (گرین و همکاران، ۱۹۸۹). غنی‌شدگی از عنصر Sr می‌تواند به‌دلیل جایگزینی این عنصر با K در کانی‌های پتاسیم‌دار باشد؛ همچنین Sr جایگزین Ca در کانی‌های کلسیم‌دار می‌شود. آنومالی‌های منفی TiO_2 و Nb می‌تواند نشانگر سنگ‌هایی از منطقهٔ فرورانش اقیانوسی باشد (عادل و همکاران، ۲۰۰۸).



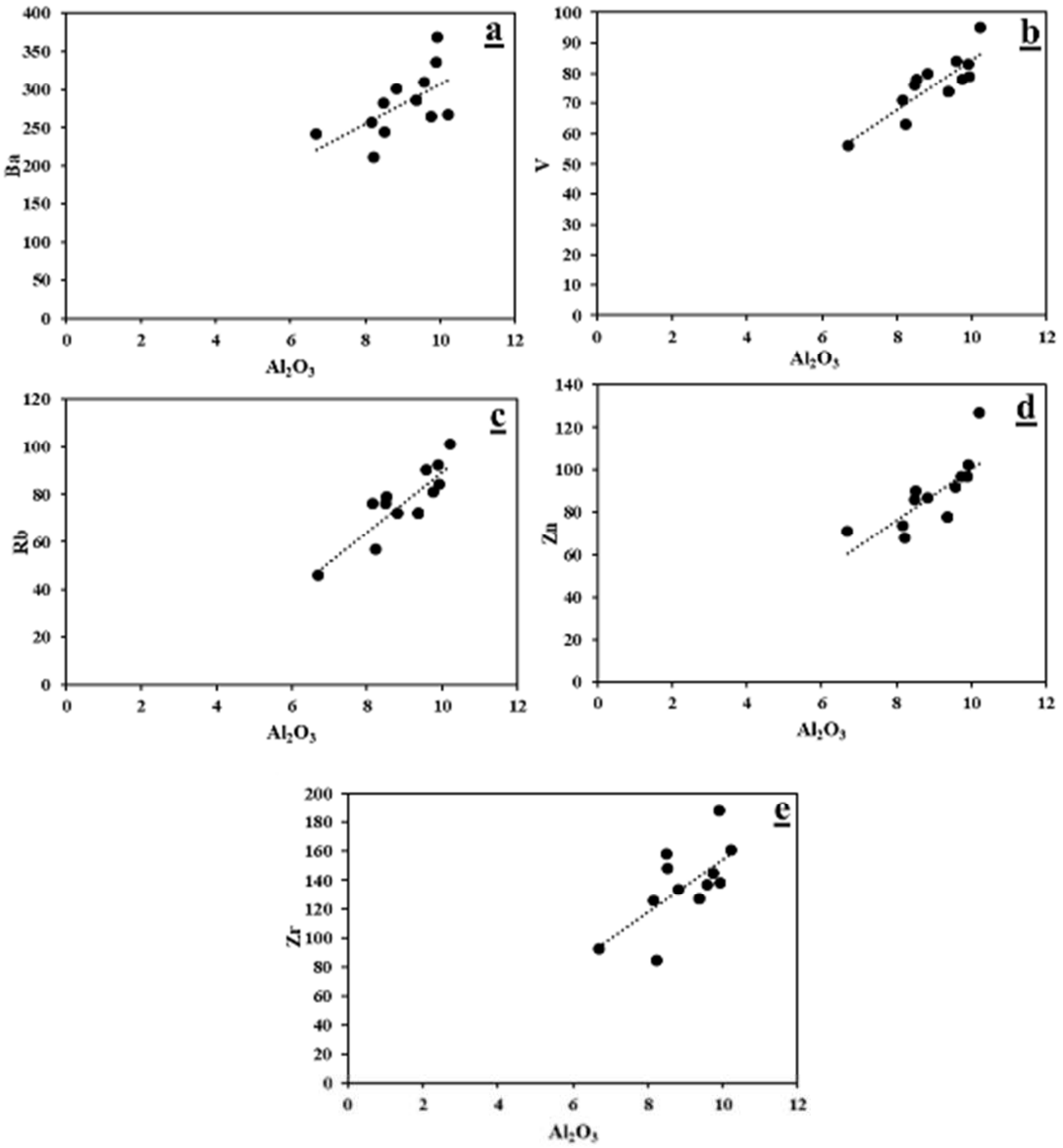
شکل (۴): مقادیر نرمالیزه‌شده: a) اکسیدهای اصلی و b) عناصر فرعی پلایای سبزوار به روش(تیلور و مک‌لنن، ۱۹۸۵)

Figure (4): Normalized values of a) major oxides and b) trace elements of Sabzevar playa by the method (Taylor & McLennan, 1985)



شکل (۵): مقادیر SiO_2 در مقابل a) Al_2O_3 b) K_2O c) Na_2O d) مقادیر Al_2O_3 در مقابل Na_2O (wt%)

Figure (4): The values of SiO2 VS a) Al2O3. b) K2O. c) Na2O. d) Al2O3 vs. Na2O values (wt%)



شکل (۶): مقادیر Al_2O_3 (wt%) در مقابل عناصر فرعی (ppm). a (Ba .b (V .c (Rb .d (Zn .e (Zr

Figure (6): Amounts of Al_2O_3 (wt%) vs. trace elements (ppm) a(Ba .b(V .c (Rb .d (Zn .e (Zr

طبقه‌بندی ژئوشیمیایی رسوبات

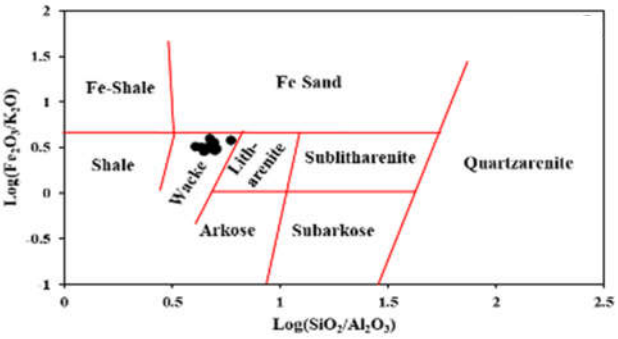
در رسوبات آواری، یافتن رابطه‌ای بین کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی رسوبات دشوار است زیرا ممکن است طبقه‌بندی ژئوشیمیایی رسوبات از طبقه‌بندی‌های رایج مانند طبقه‌بندی فولک (فولک[1]، ۱۹۸۰) که بر پایهٔ فراوانی کوارتز، فلدسپار و خرده‌سنگ استوار است، پیروی نکند. طبقه‌بندی ژئوشیمیایی می‌تواند میزان بلوغ کانی‌شناسی در رسوبات را تعیین کند (داس[2] و همکاران، ۲۰۰۶). متداول‌ترین معیار در تعیین بلوغ کانی‌شناسی رسوبات، مقدار SiO_2 و نسبت SiO_2/Al_2O_3 می‌باشد که نمایانگر فراوانی کوارتز، رس و فلدسپار است (پاتر[3]، ۱۹۷۸). این میزان در طی هوازدگی، حمل‌ونقل و چرخهٔ مجدد رسوبات افزایش می‌یابد. نسبت SiO_2/Al_2O_3 بیشتر از ۵ـ۶ در سنگ‌های رسوبی نشان‌دهندهٔ بلوغ کانی‌شناسی بالاست

1. Folk

2. Das
3. Potter

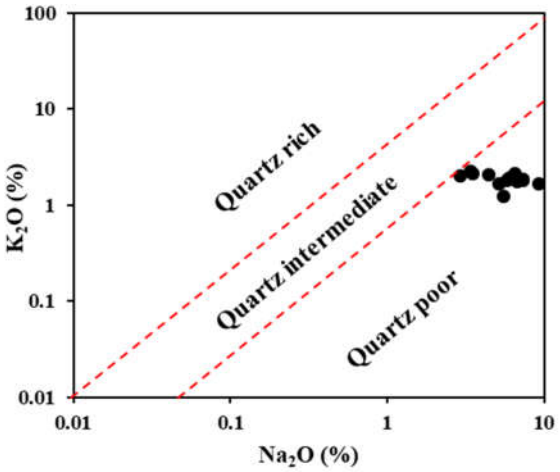
(روزر[1] و همکاران، ۱۹۹۶). این نسبت در نمونه‌های مورد مطالعهٔ پلایای سبزوار نسبتاً کم (۴ــ۶ با میانگین ۴/۹) می‌باشد که نشانگر بلوغ کانی‌شناسی نسبتاً پایین و در نتیجه فراوانی بیشتر کانی‌های رسی در مقابل کوارتز است. به‌طور کلی میزان سیلیس در رسوبات پلایای سبزوار به‌طور میانگین ۴۲ درصد وزنی است. میزان سیلیس نسبتاً پایین در این رسوبات در ارتباط با فراوانی کم کانی کوارتز است. همچنین پلات SiO_2 در برابر Al_2O_3 رسوبات منطقه رابطهٔ مستقیم و مثبتی را تقریباً نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از حضور کانی‌های فیلوسیلیکات باشد.

بر اساس طبقه‌بندی هرون (هرون[2]، ۱۹۸۸)، رسوبات پلایای سبزوار از نوع وکی هستند (شکل ۷). حضور بالای کانی‌های رسی در این رسوبات نیز شاهدی دیگر بر وکی بودن رسوبات است. نسبت Fe_2O_3/K_2O برای تعیین پایداری کانی‌ها کاربرد دارد (داس و همکاران، ۲۰۰۶)، زیرا کانی‌های فرومنیزین در طول هوازدگی پایداری کمتری دارند (رولینسون[3]، ۱۹۹۳). کروک[4] (۱۹۷۴) معتقد است نسبت Na_2O/K_2O شاخصی برای سنجش میزان کوارتز در رسوبات است. رسوبات پلایای سبزوار با توجه به این شاخص فقیر از کوارتز می‌باشند (شکل ۸).



شکل (۷): طبقه‌بندی ژئوشیمیایی رسوبات پلایا بر اساس نمودار (هرون، ۱۹۸۸)

Figure (7): Geochemical classification of playa sediments based on the diagram (Herron, 1988)



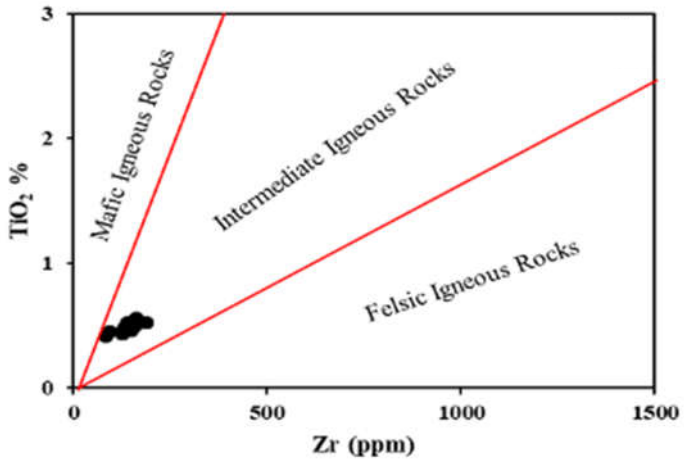
شکل (۸): نمودار K_2O در مقابل Na_2O نشانگر رسوبات فقیر از کوارتز است (کروک، ۱۹۷۴)

Figure (8): K_2O vs. Na_2O plot indicates quartz-poor sediments (Crook, 1974)

ترکیب سنگ منشأ رسوبات

تعیین ترکیب سنگ منشأ رسوبات با توجه به ترکیب کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی آن‌ها انجام می‌پذیرد (خانه‌باد و همکاران، ۲۰۱۲). ترکیب شیمیایی رسوبات تابع فرایندهای پیچیده‌ای همانند هوازدگی، حمل‌ونقل، دیاژنز، جورشدگی و تمرکز کانی‌های سنگین است که ممکن است ترکیبات به ارث رسیده از ناحیهٔ منشأ را تغییر دهند (مک‌لنن و همکاران، ۱۹۹۳). اگر تأثیر این فرایندها کم و فاصلهٔ حمل‌ونقل کوتاه باشد، ترکیب ژئوشیمیایی رسوبات منعکس‌کنندهٔ سنگ‌شناسی منشأ آن‌هاست (لاکاسی[5] و همکاران، ۲۰۰۴). نسبت TiO_2 به Zr برای بررسی سنگ منشأ در رسوبات آواری به کار می‌رود (هیاشی[6] و همکاران، ۱۹۹۷). با توجه به نسبت TiO_2 و Zr (شکل ۹) رسوبات پلایای سبزوار از سنگ منشأهای آذرین حدواسط تشکیل شده‌اند.

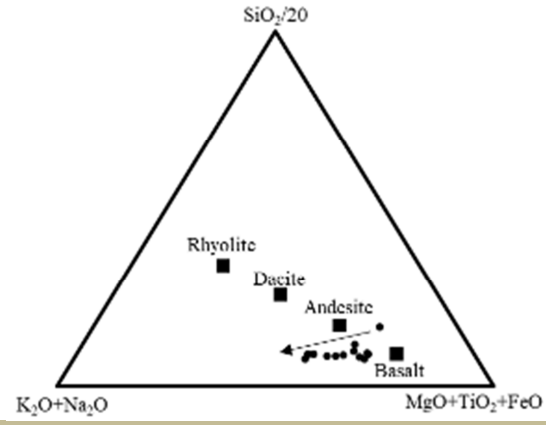
1. Roser
2. Herron
3. Rollinson
4. Crook
5. Lacassie
6. Hayashi



شکل (۹): نمودار تعیین سنگ منشأ رسوبات بر اساس مقادیر TiO_2 در مقابل Zr (هیاشی و همکاران، ۱۹۹۷)

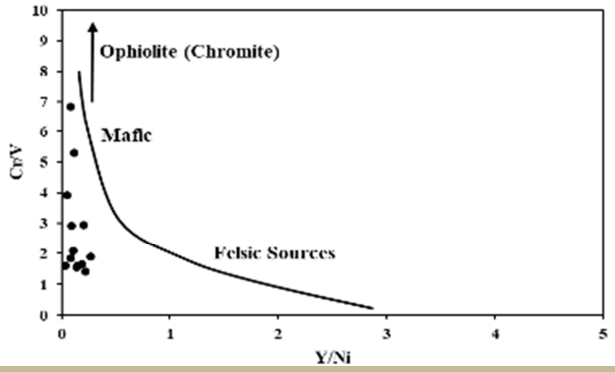
Figure (9): Diagram of determination of source rock of sediments based on TiO_2 vs. Zr values (Hayashi et al., 1997)

مقادیر اکسیدهای اصلی بر روی نمودارهای هیاشی و همکاران (۱۹۹۷) نمایانگر سنگ منشأ ترکیبی بازالتی تا حدواسط است که با توجه به نسبت K_2O/Na_2O این سنگ منشأ بایستی فقیر از کوارتز بوده باشد (شکل ۱۰). مقادیر نسبت‌های عناصر فرعی مانند Cr/V و Y/Ni در نمودار مک‌لنن و همکاران (۱۹۹۳) نیز نشانگر یک سنگ منشأ حدواسط تا مافیک نزدیک به سری‌های افیولیتی است (شکل ۱۱). با توجه به شواهد فوق و زمین‌شناسی منطقه، رسوبات پلایا حاصل دو سنگ منشأ از کمپلکس‌های دگرگونی در غرب و افیولیت‌های سبزوار در شمال شرق‌اند.



شکل (۱۰): نمودار سه‌گانه (هایاشی و همکاران، ۱۹۹۷) نشانگر حضور سنگ منشأ بازالت تا آندزیت برای رسوبات پلایای سبزوار است.

Figure 10- The ternary diagram (Hayashi et al., 1997) shows the presence of basalt to andesite source rock for Sabzevar playa sediments



شکل (۱۱): نمودار تغییرات نسبت Cr/V در مقابل Y/Ni (مک‌لنن و همکاران، ۱۹۹۳) نمایانگر ترکیبات نزدیک به مافیک تا افیولیتی برای سنگ منشأ رسوبات سبزوار است.

Figure (11): The graph of Cr/V vs. Y/Ni ratio (McLennan et al., 1993) shows compositions close to mafic to ophiolitic for the source rock of Sabzevar sediments

هوازدگی و آب‌وهوای ناحیهٔ منشأ

ژئوشیمی رسوبات تابع پیچیده‌ای از ترکیب رسوبات، شدت هوازدگی، چرخه‌های رسوبی مجدد، دیاژنز و جورشدگی است (مک‌لنن و همکاران، ۱۹۹۳). آنالیزهای ژئوشیمیایی، وسیلهٔ مناسبی برای تعیین جایگاه تکتونیکی در رسوباتی هستند که تحت‌تأثیر دیاژنز شدید و متامورفیسم یا سایر فرایندهای دگرسانی و هوازدگی قرار نگرفته‌اند (مک‌لنن و همکاران، ۱۹۹۳). دگرسانی رسوبات در طی هوازدگی باعث تخلیهٔ عناصر قلیایی شده و باعث افزایش نسبی Al_2O_3 می‌شود (گارسیا[1] و همکاران، ۲۰۰۴). افزایش درجهٔ هوازدگی شیمیایی ممکن است طی کاهش فعالیت‌های تکتونیکی یا تغییرات آب‌وهوایی به‌سمت شرایط گرم و مرطوب صورت گیرد (جیکوبسون[2] و همکاران، ۲۰۰۳).

تاریخچهٔ هوازدگی رسوبات را اغلب توسط محاسبهٔ نسبت اکسیدهای متحرک Na_2O، K_2O و CaO به اکسید غیرمتحرک Al_2O_3 اندازه‌گیری می‌کنند (نزبیت و یانگ[3]، ۱۹۸۴). اندیسی که در این رابطه بیشترین کاربرد دارد، اندیس شیمیایی آلتراسیون (CIA) است که توسط نزبیت و یانگ پیشنهاد شد. این اندیس توسط فرمول زیر بدست می‌آید:

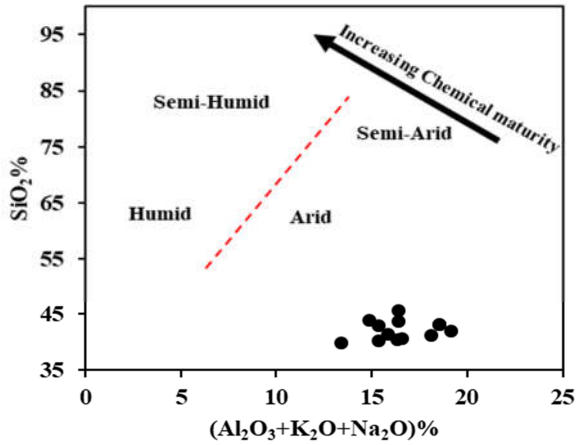
$$CIA = 100.[Al2O3/(Al2O3 + CaO* + Na2O + K2O)] \quad (۱)$$

منظور از CaO در این فرمول اکسید کلسیم موجود در اجزای سیلیکاتهٔ رسوبات است. در پلایای سبزوار این مقدار بین ۳۲ تا ۴۸ درصد وزنی در نمونه‌هاست. مقدار CIA پایین نشان‌دهندهٔ این است که دگرسانی وجود نداشته یا خیلی پایین بوده و منعکس‌کنندهٔ شرایط اقلیمی سرد و خشک می‌باشد (نزبیت و یانگ، ۱۹۸۲). گارزانتی[4] و همکاران (۲۰۱۴) پیشنهاد کردند در نمونه‌هایی با مقادیر کربنات بالا (مانند پلایای سبزوار) که دقیقاً میزان کربنات درون شبکهٔ بلوری سیلیکات و کربنات به‌صورت اجزا و سیمان در سنگ‌ها و رسوبات قابل تفکیک نیستند، از اندیس CIX استفاده شود که فرمول آن به شرح زیر است:

$$CIX = 100.[Al2O3/(Al2O3 + Na2O + K2O)] \quad (۲)$$

میزان این شاخص در نمونه‌ها بین ۴۳ تا ۶۴ می‌باشد که نشانگر میزان دگرسانی نسبتاً پایین در پلایای سبزوار و تأثیر اندک هوازدگی بر روی رسوبات است.

در تعیین آب‌وهوا با استفاده از اکسیدهای اصلی، رسم دیاگرام SiO_2 در برابر $Al_2O_3 + K_2O + Na_2O$ (ساتنر و دوتا[5]، ۱۹۸۶)، برای رسوبات پلایای سبزوار نشان‌دهندهٔ شرایط آب‌وهوایی خشک در ناحیهٔ منشأ است (شکل ۱۲). با توجه به تشکیل پلایای سبزوار در یک آب‌وهوای خشک و گرم و مقادیر ناچیز فلدسپارها، احتمالاً کانی‌های رسی در این پلایا به‌صورت دیاژنزی و ثانویه تشکیل نگردیده و بیشتر به‌صورت آواری به داخل پلایا حمل شده‌اند.



شکل (۱۲): نمودار SiO_2 در برابر $Al_2O_3+K_2O+Na_2O$ از ساتنر و دوتا (سوتنر و دوتا، ۱۹۸۶) که نمایانگر آب‌وهوای خشک در ناحیهٔ منشأ برای رسوبات پلایای سبزوار است.

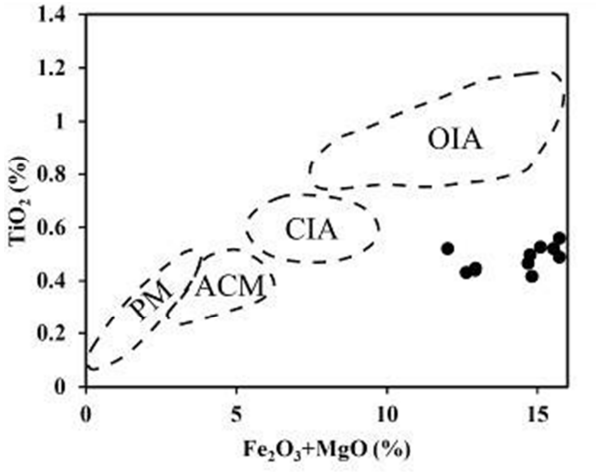
Figure (12): The diagram of SiO2 vs. Al2O3+K2O+Na2O from (Suttner and Dutta, 1986), which represents the dry climate in the source area for the Sabzevar playa sediments

موقعیت تکتونیکی

از مقادیر اکسیدهای اصلی برای تعیین موقعیت تکتونیکی رسوبات استفاده می‌شود (باتیا، ۱۹۸۳). رسوبات پلایای سبزوار دارای مقادیر بسیار بالایی از ترکیبات Fe_2O_3+MgO و مقادیر پایینی از نسبت‌های K_2O/Na_2O و

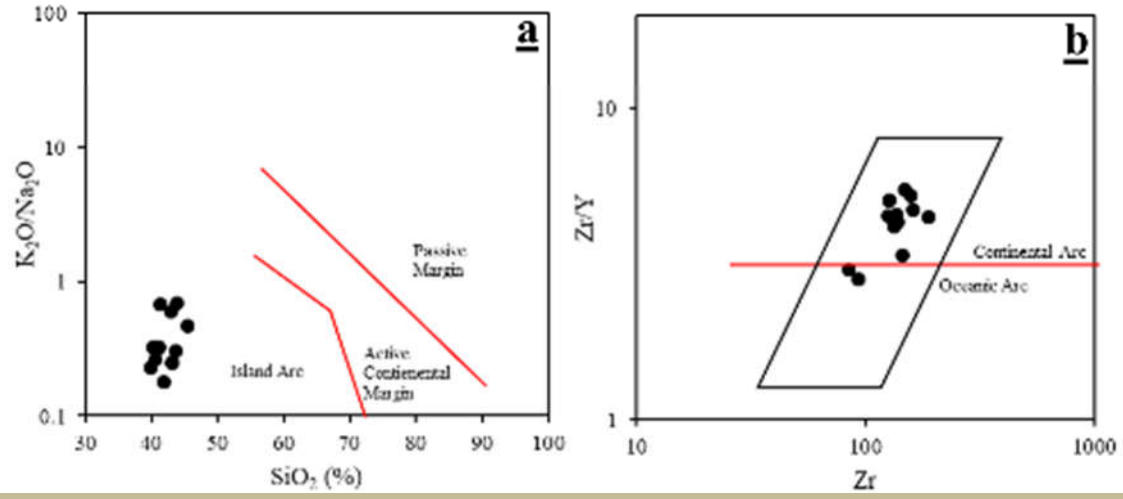
1. Garcia
2. Jacobson
3. Nesbitt and Young
4. Garzanti
5. Suttner and Dutta

$Al_2O_3/(CaO+MgO)$ را شامل می‌شود. با توجه به نمودار باتیا (۱۹۸۳) این رسوبات نزدیک به جزایر کمانی اقیانوسی تا قاره‌ای هستند (شکل ۱۳). بر اساس مقادیر بسیار نزدیک K_2O و Na_2O و مقادیر پایین SiO_2 این رسوبات می‌توانند در یک کمان اقیانوسی تشکیل شده باشند (روزر و کرش[1]، ۱۹۸۶). شاخص نسبت Zr/Y در مقابل مقادیر Zr برای تعیین محل کمان ماگمایی کاربرد دارد (پیرس و نری[2]، ۱۹۷۹؛ شفاعی‌مقدم و همکاران، ۲۰۱۴). بر اساس شاخص Zr و Y، رسوبات پلایای سبزوار اکثرا در کمان ماگمایی قاره‌ای تشکیل گردیده‌اند (شکل ۱۴).



شکل (۱۳): نمودار دوبعدی باتیا (باتیا، ۱۹۸۳) با استفاده از اکسیدهای اصلی در رسوبات پلایای سبزوار، نشانگر محدوده‌های نزدیک به موقعیت‌های تکتونیکی به جزایر کمانی اقیانوسی و قاره‌ای است. (PM: Passive Margin; OIA: Oceanic Island Arc; CIA: Continental Island Arc; ACM: Active Continental Margin)

Figure (13): Bhatia's two-dimensional diagram (Bhatia, 1983) using major oxides in Sabzevar playa sediments, showing ranges close to tectonic positions to oceanic and continental arc islands. (PM: Passive Margin; OIA: Oceanic Island Arc; CIA: Continental Island Arc; ACM: Active Continental Margin)



شکل (۱۴): نمودارهای موقعیت تکتونیکی رسوبات بر اساس اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی در رسوبات پلایای سبزوار. a) نمودار نسبت K_2O/Na_2O در مقابل SiO_2 نشان دهنده موقعیت تکتونیکی جزایر قوسی برای این رسوبات است (روزر و کورچ، ۱۹۸۶). b) نمودار Zr در مقابل Zr/Y نشانگر کمان قاره‌ای در این رسوبات است (پیرس و نری، ۱۹۷۹)

Figure (14): Diagrams of tectonic position of sediments based on main oxides and trace elements in Sabzevar playa sediments. a) Plot of K_2O/Na_2O versus SiO_2 ratio indicates the island arc tectonic setting for these sediments (Roser and Korsch, 1986). b) Zr versus Zr/Y plot indicates the continental arc in these sediments (Pearce and Norry, 1979)

1. Roser and Korsch
2. Pearce and Norry

نتیجه‌گیری

رسوبات پلایای سبزوار از نظر کانی‌شناسی، عمدتاً از کانی‌های آواری، رسی، کربناته، سولفاته و کلریده تشکیل شده است. این رسوبات با توجه به مقادیر اکسیدهای Fe_2O_3/K_2O و حضور کانی‌های رسی بر اساس طبقه‌بندی هرون معادل وک‌ها هستند. مقادیر غنی‌شده اکسیدهای CaO، MgO و Na_2O به نسبت مقادیر پوسته قاره‌ای بالایی و روند منفی Na_2O در مقابل SiO_2 و Al_2O_3 ناشی از کانی‌های کربناته مانند دولومیت، کلسیت و حضور کانی‌هالیت در محیط رسوب‌گذاری پلایا است. مقادیر بالای اکسید Fe_2O_3 در رسوبات به‌خاطر حضور مگنتیت است. رابطهٔ مثبت SiO_2 و Al_2O_3 و نسبت SiO_2/Al_2O_3 و تهی‌شدگی این دو اکسید ناشی از مقادیر نسبتاً کم رسوبات سیلیسی آواری در مقابل سایر رسوبات پلایا و فراوانی ذرات کوارتز و کانی‌های رسی است. مقادیر غنی‌شدهٔ Na_2O در کنار مقادیر Al_2O_3 و K_2O به‌علت حضور فلدسپارها و کانی‌های رسی است. مقادیر پایین TiO_2 می‌تواند ناشی از مشتق شدن آن‌ها از سنگ‌های حدواسط باشد. غنی‌شدگی عنصر Sr می‌تواند به‌دلیل جایگزینی این عنصر با K در کانی‌های پتاسیم‌دار و جایگزینی با Ca در کانی‌های کلسیم‌دار نیز باشد. بر اساس روند مثبت TiO_2 در مقابل Zr و Al_2O_3 و نسبت‌های عناصر فرعی مانند Cr/V و Y/Ni، رسوبات پلایای سبزوار از منشأ سنگ آذرین حدواسط تا حدی مافیک مشابه با افیولیت‌ها تشکیل شده‌اند. با توجه به سنگ‌شناسی اطراف پلایای سبزوار و شواهد ژئوشیمیایی سری افیولیت‌های سبزوار در شمال شرق، ولکانیک‌های ائوسن و کمپلکس دگرگونی در غرب پلایا نقش اصلی در تأمین رسوبات پلایای سبزوار داشته‌اند. داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات در ناحیهٔ منشأ شواهدی از یک آب‌وهوای خشک با دگرسانی نسبتاً پایین را نشان می‌دهد. کانی‌شناسی و آنالیز ژئوشیمیایی اکسیدها نشان‌دهندهٔ آب‌وهوای گرم در گذشته است که اخیراً به یک آب‌وهوای خشک‌تر تبدیل شده است. در عمق ۱ متری، مقادیر کم Na2O/Al2O3، Na2O/TiO2، و Na2O/K2O و مقادیر بالای SiO2/Al2O3 و Zr/Al2O3 یافت شد، این نسبت‌ها رطوبت بالاتری را در گذشته منعکس می‌کنند که که شدت آن با عمق افزایش یافت. افزایش نسبت Sr/Ba نشان‌دهندهٔ شیوع خشکی است که این نسبت به سطح افزایش می‌یابد. محتوای SiO2 بالاتر، فعالیت بادی بیشتری را در محیط اطراف خود نشان می‌دهد و از آنجا که میانگین SiO2 سطح کمی بیشتر از عمق‌های دیگر است، نتایج نشان‌دهندهٔ افزایش وزش باد در سال‌های اخیر است. صرف‌نظر از رسوبات سطحی، هر دو SiO2 و Zr به‌تدریج با عمق رشد می‌کنند و یک همبستگی منفی با فلزات نشان می‌دهند. این نشان‌دهندهٔ منابع مختلف فلزات در پلایا است. محیط تکتونیکی پلایای سبزوار بر اساس داده‌های ژئوشیمیایی اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی موقعیت تکتونیکی فعال مانند کمان‌های ماگمایی اقیانوسی تا قاره‌ای بر جای گذاشته است، که این منطبق بر دیگر نتایج و سنگ منشأ افیولیتی منطقه بوده است.

قدردانی

این مقاله تحلیل قسمتی از داده‌های رسالهٔ دکتری طرح پژوهشی شمارهٔ ۴۱۸۳۲-۳ می‌باشد و تحت حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

منابع

1. Abdi, L., Rahimpour-Bonab, H., Mirmohammad-Makki, M., Probst, J., & Langeroudi, S. R. (2018). Sedimentology, mineralogy, and geochemistry of the Late Quaternary Meyghan Playa sediments, NE Arak, Iran: palaeoclimate implications. Arabian Journal of Geosciences, 11(19), 1-18.
2. Adel I.M., Akarish, B., Amr M. El-Gohary, N., 2008. Petrography and geochemistry of Lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. Journal of African Earth Sciences 52, 43-54.
3. Armstrong-Altrin, J. S., Botello, A. V., Villanueva, S. F., & Soto, L. A. (2019). Geochemistry of surface sediments from the northwestern Gulf of Mexico: implications for provenance and heavy metal contamination.

Geological Quarterly, 63(3), 522-538.
4. Batumike, I.L., Cailteux, H., Kumpunzu, A.B., 2006. Lithostratigraply, basin devolopoment, base metal deposits and regeional conelathions of the Neoprotrozic Ngoba and Kondelvngu rock Successions, Central Atican. Gondwana Research 432-447.
5. Bhatia, M.R., 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology 91, 611–627.
6. Bracciali, L., Marroni, M., Pandolfi, L., Rocchi, S., Arribas, J., Critelli, S., & Johnsson, M. J. (2007). Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins. Special Papers-Geological Society of America, 420, 73.
7. Crook, K.A.W., 1974. Lithogenesis and geotectonics: the significance of compositional variations in flysch arenites (graywackes). In: Dott. Jr., R.H., Shaver, R.H. (Edition), Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation. SEPM Special Publication 19, 304–310.
8. Das, B.K., AL-Mikhlafi, A.S., Kaur, P., 2006. Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. Journal of Asian Earth Science 26, 649-668.
9. Dickinson, W.R., Beard L.S., Brakenridge, G.R., Erjavec J.L., Ferguson, R.C., Inman K.P., 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. Geological Society of America Bulletin 94, 222-35
10. Folk, E., 1980. Petrography of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Company 182 p.
11. Gansser, A. (1955). New aspects of the geology of Central Iran. Proceedings of the 4th World Petroleum Congress, Rome, Section 1, pp. 280-300.
12. Garcia, D., Ravenne, C., Marechal, B., Moutte, J., 2004. Geochemical variability induced by entrainment sorting: quantified signals for provenance analysis. Sedimentary Geology 171, 113-128.
13. 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.
14. Green, T. H., Sie, S. H., Ryan, C. G., & Cousens, D. R. (1989). Proton microprobe-determined partitioning of Nb, Ta, Zr, Sr and Y between garnet, clinopyroxene and basaltic magma at high pressure and temperature. Chemical Geology, 74(3-4), 201-216.
15. Hayashi, K., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of 1.9 sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta 61, 4115–4137.
16. Herron, M.M., 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. Journal Sedimentary Petrology 58, 820–829.
17. Jacobson, A.D., Blum, J.D., Chamberlain, C.P., Craw, D., Koons, P.O., 2003. Climatic and tectonic controls on chemical weathering in the New Zealand Southern Alps. Geochimica et Cosmochimica Acta 37, 29–46.
18. Jafarzadeh, M., Harami, R. M., Amini, A., Mahboubi, A., & Farzaneh, F. (2014). Geochemical constraints on the provenance of Oligocene–Miocene siliciclastic deposits (Zivah Formation) of NW Iran: implications for the tectonic evolution of the Caucasus. Arabian Journal of Geosciences, 7(10), 4245-4263.
19. Jamshidipour, A., Khanehbad, M., Moussavi-Harami, R., & Mahboubi, A. (2021). Dolomitization models in the Sibzar Formation (Middle Devonian), Binalood Mountains (NE Iran): Based on the petrographic and geochemical evidence. Journal of African Earth Sciences, 176, 104124.
20. Jouladeh Roudbar, A., Eagderi, S. and Esmaeil H.R. 2015, Fishes of the Dasht-e Kavir basin of Iran: an updated checklist. International Journal of Aquatic Biology 3 (4): 263-273.
21. Jin, Z., Li, F., Cao, J., Wang, S., Yu, J., 2006. Geochemistry of Daihai Lake sediments, Inner Mongolia, north China: Implications for provenance, sedimentary sorting and catchment weathering. Geomorphology 80, 147–163.
22. Kadir, S., Eren, M., Külah, T., Erkoyun, H., Huggett, J., & Önalgil, N. (2018). Genesis of palygorskite and calcretes in Pliocene Eskişehir Basin, west central Anatolia, Turkey. Catena, 168, 62-78.
23. Khalatbari-Jafari, M., 2000. Geological Map of Abbas-Abad (1:100000 Scale). Geological survey and mineral exploration publications, Iran.

24. Khanehbad, M., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Najafi, M., Mahmudy Gharaie, M.H., 2012. Geochemistry of Carboniferous sandstones (Sardar Formation), East-Central Iran: Implication for provenance and tectonic setting. Acta Geological Sinica 86(5), 1200-1210.
25. Krinsley, D. B. (1970). A geomorphological and paleoclimatological study of the playas of Iran. Geological survey of United States Department of Interior, Washington DC, pp 320.
26. Lacassie, J.P., Roser, B., Ruiz Del Solar, J., Herve, F., 2004. Discovering geochemical patterns using self-organizing neural networks: a new perspective for sedimentary provenance analysis. Sedimentary Geology 165, 175-191.
27. "Majidi, J., 1998. Geological Map of Sabzevar (1:100000 Scale). Geological survey
28. and mineral exploration publications, Iran."
29. McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., & Hanson, G. N. (1993). Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. Geological Society of America, Special Paper, 284, 21–40.
30. McLennan, S.M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. Geochemistry, Geophysics, Geosystems (Electrical Journal of Earth Sciences), April 20, 2.
31. Moghadam, H. S., Corfu, F., Chiaradia, M., Stern, R. J., & Ghorbani, G. (2014). Sabzevar Ophiolite, NE Iran: Progress from embryonic oceanic lithosphere into magmatic arc constrained by new isotopic and geochemical data. Lithos, 210, 224-241.
32. Mughal, Muhammad Saleem, Chengjun Zhang, Dingding Du, Li Zhang, Sohail Mustafa, Fahad Hameed, Muhammad Rustam Khan, Muhammad Zaheer, and Dembele Blaise. "Petrography and provenance of the Early Miocene Murree Formation, Himalayan Foreland Basin, Muzaffarabad, Pakistan." Journal of Asian Earth Sciences 162 (2018): 25-40.
33. Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature 299, 715–717.
34. Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based upon thermodynamic and kinetic consideration. Geochimica et Cosmochimica Acta 48, 1523-1534.
35. Nowrouzi, Z., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Mahmudy Gharaie, M. H., & Ghaemi, F. (2014). Petrography and geochemistry of Silurian Niur sandstones, Derenjal Mountains, East Central Iran: implications for tectonic setting, provenance and weathering. Arabian Journal of Geosciences, 7(7), 2793-2813.
36. Ocampo-Díaz, Yam Zul Ernesto, Giovani Sosa-Ceballos, Ricardo Saucedo, José Luis Macías, Xavier Bolós, Ulises Alejandro Radilla-Albarrán, Margarita Martínez-Paco, Ulises Salinas-Ocampo, and Guillermo Cisneros-Máximo. "Provenance and compositional variations of intra-caldera lake sediments at La Primavera, Jalisco, Western Mexico." Journal of South American Earth Sciences 110 (2021): 103335.
37. Pandey, S., & Parcha, S. K. (2017). Provenance, tectonic setting and source-area weathering of the lower Cambrian sediments of the Parahio valley in the Spiti basin, India. Journal of Earth System Science, 126(2), 1-16.
38. Pearce, J. and Norry, M., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology, 69(1), 33-47.
39. Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R., 1987. Sand and Sandstone. (2nd Edition) Berlin7, Springer-Verlag 553 p.
40. Potter, P.E., 1978. Petrology and chemistry of modern big river sands. Journal of Geology 86, 423-449.
41. Pourali, M., Sepehr, A., & Mahmudy Gharaie, M. H. (2020). Depositional pattern of sediments in a dry-lake Playa in NE Iran; Implication for geomorphologic characteristics. Desert Ecosystem Engineering Journal, 3(1), 11-24.
42. "Radfar, J., and Kohansal, R., 2000. Geological Map of Davarzan (1:100000 Scale). Geological survey and mineral exploration publications, Iran."
43. Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation, Longman 352.
44. Roser, B.P., Cooper, R.A., Nathan, S., Tulloch, A.J., 1996. Reconnaisance sandstone geochemistry, provenance and tectonic setting of the Lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. New

Zealand Journal Geology and Geophysics 39, 1-16.
45. 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.
46. Salehi, M.A., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Wilmsen, M., Heubeck, C., 2014. Tectonic and palaeogeographic implications of compositional variations within the siliciclastic Ab-Haji Formation) Lower Jurassic, east-central Iran). Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie 1, 21-48.
47. Shahraki, M., Mahmudy Gharaie, M. H., Moussavi-Harami, R., & Rashki, A. (2021). Geochemistry of Bandan River sediments in Sistan Basin (Eastern Iran): implication for provenance and environmental impact on the Hamoun Lake pollution. Environmental earth sciences, 80(1), 1-17.
48. Smykatz-Kloss, W., & Roy, P. D. (2010). Evaporite mineralogy and major element geochemistry as tools for palaeoclimatic investigations in arid regions: A synthesis. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62(3), 379-390.
49. Steffen, K., Rüdiger, D., Ulrike, S., Hannelore, K., 2007. Provenance of the Carboniferous Hochwipfel Formation (Karawanken Mountains, Austria/Slovenia)-Geochemistry versus petrography. Sedimentary Geology 203, 246-266.
50. Suttner, L., J., and Dutta, P., K., 1986. Alluvial sandstone composition and palaeoclimate: framework mineralogy. Journal of Sedimentary Petrology, 56, 329–345.
51. Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, 312 pp.
52. 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. Implications for provenance. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 83, 1-14.

Investigating Geochemistry of Sabzevar Playa Sediments: Implications for Tectonic Setting and Paleoclimate Changes

Maliheh Pourali[1], Adel Sepehr[2*], Abolfazl Jamshidipour[3]

Received: 06/09/2022 Accepted: 30/01/2023

Extended Abstract

Introduction: Known as the dominant landform in arid and semi-arid regions, Playa offers the only evidence of past environmental conditions in semi-arid regions. in other words, considering the fact that Playa constitutes a region with negative water balance for more than half of the year and capillary properties close to the surface and sediments, playa sediments are, in some cases, considered as the only evidence of past environmental conditions in arid and semi-arid regions. On the other hand, geochemical methods are used to examine geochemical processes, tectonics, and the origin of playa sediments, the most important aspect of which is to discover the origins of changes in rocks, relief, climate, tectonic setting, transport history, and diagenesis. It should also be noted that the Quaternary period is considered responsible for the escalation of eolian processes, desert formation, and dryness of lakes, being characterized by drastic changes in climatic conditions worldwide.

Materials and method: Stretching over an area of approximately 120 km, the Sabzevar Playa is one of the most elongated depressions in the Khorasan Razavi province in northeastern Iran. The Playa is located between 35°55' – 36°25' north latitude and 56°15' – 57°45' east longitude, covering an area of 2648 km^2, which is typically classified along with Great Kavir and its surrounding playas (e.g. Damghan Kavir, Bajestan playa, Haj Aligholi Kavir) under the name of the "Dasht-e Kavir" basin. In addition, seasonal hydrological currents flows in the playa. However, according to krinsley (1970), the playa had been a closed basin throghout the Pliocene, which has then been converted to a semi-closed basin under the influence of the fault activities.

The geological nature of the playa comprises of alluvial and evaporation sediments belonging to the Quaternary period, including Windborne dunes, tertiary igneous rocks, and Cretaceous carbonates (dolomite and limestone) which are mainly found in neighboring mountain flanks. Moreover, some areas in the periphery of Sabzevar Playa constitute ophiolite sequences called Sabzevar ophiolites. On the other hand, while intrusive and volcanic units are mainly found around the northern and eastern parts of the Playa, carbonates and detrital sedimentary units containing conglomerates and sandstone are scattered along the playa, possessing abundant outcrops. It should be noted that there exists a metamorphic complex with pre-Jurassic sedimentary sequences near the western half of the playa, being characterized by a varying degree of metamorphism from green-schist to amphibolite.

This study examined one hundred sixty air-dried powder samples to identify both bulk and clay mineralogy using the X-ray diffraction (XRD) technique at the central laboratory of the Ferdowsi University of Mashhad and Razi Applied Science Foundation in Tehran. Moreover, the major concentrations of oxide and trace elements were determined via X-ray Fluorescence (XRF) method based on the procedure introduced by Abdi et al., (2018). Finally, the elemental ratios were, as major representatives of environmental changes (wet/dry periods), calculated at surface and depth levels.

Results: The mineralogical results obtained via the application of the X-ray diffraction (XRD) technique and scanning electron microscopy (SEM-EDS) method revealed that silica oxide, clay, carbonate, and evaporite minerals were the most abundant minerals identified in the sediments of Sabzevar playa (Table 1). On the other hand, the results of the X-ray fluorescence (XRF) technique showed that silicon oxide (SiO_2) had the highest abundance (between 39.8 and 45.5% by weight) among the main oxides identified in the sediments. Furthermore, the amount of L.O.I (Loss on ignition) was 1.8 to 16.9 percent of the sediments' weight in the samples . It was also found that minor elements in the above-mentioned samples comprised of As Ba Ce, Co, Cr, Cu, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, V, Y, Zr, Zn, and Cl.

1. Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2. Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; adelsepehr@um.ac.ir
3. Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
DOI: 10.22052/DEEJ.2021.11.36.44

Table 1: Amounts of minerals found in the sediments by XRD* method

No#	247	210	207	277	290	283	294	313	283
Depth (cm)	90-100	0-10	0-10	0-10	90-100	0-10	0-10	0-10	90-100
Illite	-	-	-	-	6.32	-	11.8	-	-
Halite	2.60	19.20	-	24.89	13.10	30.9	5.8	-	39.45
Quartz	51.90	34.04	37.80	26.75	26.23	33.9	40.9	41.7	32.41
Silvite	-	-	1.04	-	-	-	-	-	-
Nontronite	-	-	3.86	8.44	-	-	-	-	2.13
Palygorskite	-	-	4.94	8.44	5.30	-	5.3	-	2.5
Montmorillonite	5.60	3.30	3.13	-	7.55	-	-	-	-
Hedenbergite	-	-	-	-	6.00	-	-	-	-
Eastonite	4.10	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcite	20.80	12.31	22.60	21.81	13.60	22.12	25.8	40.8	23.51
Sepiolite	-	-	-	-	5.21	-	-	-	-
Zeolite	0.50	3.10	-	-	-	12	-	-	-
Albite	14.00	11.10	7.86	-	-	-	6	17.5	-
Cristobalite	-	-	17.76	-	-	-	-	-	-
Dolomite	-	2.20	-	7.41	-	-	-	-	-
Magnetite	-	3.40	-	-	-	-	-	-	-
Halloysite	-	7.05	-	-	7.85	-	-	-	-
Anhydrite	-	4.30	-	-	8.40	-	-	-	-

*: all estimated values are approximate

Discussion and Conclusion: Taking the Fe2O3/K2O oxide values and the presence of clay minerals into consideration, it could be argued that according to Herron's classification (Herron, 1988), Sabzevar playa's sediments are equivalent to wackes. On the other hand, compared to the values of the upper continental crust and the negative trend of Na2O versus SiO2 and Al2O3, the enriched amounts of CaO, MgO, and Na2O oxides could be attributed to carbonate minerals such as dolomite, calcite, and the presence of halite minerals in the playa's sedimentation environment. Moreover, the enriched amounts of Na2O, Al2O3, and K2O3 could be justified by the presence of feldspars and clay minerals. It was also found that the high amounts of Fe2O3 oxide in the sediments were due to the presence of magnetite. Also, compared to the playa's other sediments and clay minerals, the relatively small amounts of siliceous sediments were found to be responsible for the positive correlation between SiO2 and Al2O3, the SiO2/Al2O3 ratio, and the depletion of these two oxides.

On the other hand, the low values of TiO2 could be attributed to their derivation from intermediate rocks. Moreover, the enrichment of the Sr element could have occurred due to the replacement of Sr with K and Ca in potassium and calcium minerals, respectively. In addition, taking the positive trend of TiO_2 into consideration, this study found that compared to Zr and Al2O3 and the ratios of minor elements such as Cr/V and Y/Ni, Sabzevar playa's sediments are of intermediate to mafic igneous origin similar to ophiolites.

It was also revealed that based on the lithology around Sabzevar playa and the geochemical evidence, the Sabzevar ophiolite series in the northeast of the playa and the metamorphic complex in its western part had played a major role in forming the sediments of Sabzevar playa, whose geochemical data in the original area showed evidence of a dry climate. Furthermore, it was found that the sediments had been left in an active tectonic setting such as oceanic to continental magmatic arcs, which is consistent with the ophiolitic origin of the region and other results found in this regard.

Keywords: Geochemistry, Modern Sediment, Provenance, Sabzevar Playa, Weathering Index.