



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 7, No. 26, Summer 2026



Analysis of Chemical Weathering Intensity and Paleoclimatic Interpretation of Quaternary Sediments Using CIA and PIA Geochemical Indices in an Arid Environment (Case Study: Abarkuh Playa, Iran)

Mohammad Sharifi Paichoon^{1*}, Ali Shahriar², Mahdieh Masoudi³

¹ Associate Professor of Geomorphology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran,
Email: mscharifi@yazd.ac.ir

² Assistant Professor of Geomorphology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran,
Email: a.shahriar@yazd.ac.ir ³

³ M.Sc. Graduate, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran, Email: mahdiehm590@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper Article history: Received: 2026-6-22 Accepted: 2026-7-16 Keywords: Sedimentary Geochemistry, CIA)- Abarkooch Playa Quaternary Climate Change	This study examines the degree of chemical weathering in Quaternary sediments using geochemical proxies, particularly the CIA and PIA. The primary aim is to reconstruct past environmental and climatic conditions and to assess the intensity of chemical alteration in sediments in relation to weathering processes and sedimentary evolution. The investigation is based on geochemical and mineralogical data obtained from an 8-meter sedimentary trench comprising 15 samples from the Abarkouh playa. Major and trace elements, along with their corresponding oxides, were analyzed using XRF, and additional indices, including CIA, PIA, and a calcification index, were computed to evaluate weathering intensity and paleo-lake level fluctuations. The CIA is derived from the proportion of alumina relative to alkali and alkaline earth oxides, whereas the PIA reflects the extent of plagioclase feldspar alteration. The results indicate CIA values ranging from 20 to 50 and PIA values between 15 and 38, both of which point to weak to moderate chemical weathering conditions. Such relatively low values suggest limited hydrolytic processes, weak leaching of mobile elements, and a predominance of physical weathering over chemical alteration. Variations in these indices throughout the stratigraphic sequence further imply short-term climatic oscillations during the Quaternary, characterized by alternating dry and humid phases. Stratigraphic analysis of the trench reveals pronounced environmental changes. The lower and older sediments, enriched in stable oxides such as Al₂O₃, Fe₂O₃, and SiO₂, correspond to warm and humid conditions during the early Quaternary. The middle section reflects fluctuating humid, cold, and arid phases, evidenced by carbonate precipitation in sample 11 and elevated lake levels accompanied by enhanced biogeochemical activity and magnesium enrichment in samples 13 and 14. In contrast, the uppermost layer shows a marked increase in Na₂O and Cl, indicating progressive desiccation of the lake system and the establishment of present-day hyper-arid environmental conditions.

Cite this article: Sharifi Paichoon, M., Shahriar, A., Masoudi, M. (2026). Analysis of Chemical Weathering Intensity and Paleoclimatic Interpretation of Quaternary Sediments Using CIA and PIA Geochemical Indices in an Arid Environment (Case Study: Abarkuh Playa, Iran). Journal of the Climate Change research, 7 (26), 89-107.



©The author(s)

Publisher: Golestan University
DOI: [10.30488/ccr.2026.588183.1346](https://doi.org/10.30488/ccr.2026.588183.1346)



واکاوی شدت هوازدگی شیمیایی و تفسیر پالئو اقلیمی رسوبات کواترنری با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی CIA و PIA در مناطق خشک (مورد مطالعه: کویر ابرکوه)

محمد شریفی پیچون^{۱*}، علی شهریار^۲، مهدیه مسعودی^۳

^۱ دانشیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران، رایانامه: mscharifi@yazd.ac.ir

^۲ استادیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران، رایانامه: a.shahriar@yazd.ac.ir

^۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران، رایانامه: mahdiehm590@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۴/۲۵ واژه‌های کلیدی: ژئوشیمی رسوبی، هوازدگی شیمیایی (CIA)، کفه ابرکوه، کواترنر، تغییر اقلیم، کواترنری	این پژوهش به بررسی شدت هوازدگی شیمیایی رسوبات کواترنری با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی (CIA و PIA) می‌پردازد. هدف اصلی، بازسازی شرایط اقلیمی گذشته و ارزیابی میزان دگرسانی شیمیایی در رسوبات و ارتباط آن با فرایندهای هوازدگی و تکامل رسوبی با استفاده از ترکیبات ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی رسوبات یک ترانشه ۸ متری (شامل ۱۵ نمونه رسوبی) در چاله کویری ابرکوه، یکی از حوضه‌های ساختاری مهم در ایران مرکزی، است. تحلیل‌های کمی عناصر و اکسیدهای اصلی و فرعی به روش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام شد و شاخص‌های هوازدگی شیمیایی CIA، PIA و کلسیتی‌شدن رسوبات برای ارزیابی شدت دگرسانی و نوسانات تراز آب محاسبه گردید. شاخص CIA بر اساس نسبت اکسید آلومینیوم به مجموع اکسیدهای اصلی قلیایی و قلیایی خاکی محاسبه شده و شاخص PIA نیز میزان دگرسانی فلدسپارهای پلاژیوکلاز را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مقادیر CIA در بازه ۲۰ تا ۵۰ و مقادیر PIA در روندی همسو با آن در محدوده ۱۵ تا ۳۸ قرار دارند که هر دو نشان‌دهنده هوازدگی شیمیایی ضعیف تا متوسط هستند. پایین بودن این مقادیر بیانگر محدود بودن فرآیندهای هیدرولیز، ضعف شست‌وشوی شیمیایی و غلبه فرایندهای فیزیکی بر هوازدگی شیمیایی است. همچنین تغییرات نسبی در مقادیر شاخص‌ها نشان‌دهنده نوسانات اقلیمی کوتاه‌مدت در طول دوره کواترنر و شکل‌گیری فازهای خشک و مرطوب است. تحلیل توالی رسوبی ترانشه نشان‌دهنده نوسانات اقلیمی مشخص است؛ لایه‌های پایینی و قدیمی‌تر با افزایش غلظت اکسیدهای پایدار (Al_2O_3, Fe_2O_3 & SiO_3)، نشان‌دهنده فازهای گرم و مرطوب کواترنر پیشین هستند. در بخش‌های میانی، فازهای نوسانی مرطوب/سرد و خشک حاکم بوده که با ترسیب کربنات کلسیم در نمونه ۱۱ و افزایش تراز آب و فعالیت بیوشیمیایی (اوج‌گیری منیزیم) در نمونه‌های ۱۳ و ۱۴ همبستگی دارد. در نهایت، افزایش چشمگیر (Na_2O & Cl) در لایه‌های سطحی (نمونه ۱۵)، حاکی از خشک شدن تدریجی دریاچه و تثبیت شرایط فوق‌خشک کنونی است.

استناد: شریفی پیچون، محمد؛ شهریار، علی؛ مسعودی، مهدیه (۱۴۰۵). واکاوی شدت هوازدگی شیمیایی و تفسیر پالئو اقلیمی رسوبات کواترنری با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی CIA و PIA در مناطق خشک (مورد مطالعه: کویر ابرکوه). نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۷ (۲۶)، ۸۹-۱۰۷.



مقدمه

تغییرات اقلیمی دوره کواترنر و پیامدهای محیطی ناشی از آن، همواره یکی از مباحث محوری و کلیدی در مطالعات علوم زمین و بازسازی تاریخچه طبیعی زمین بوده است. شواهد متعدد ژئومورفولوژیکی و رسوبی نشان می‌دهند که در طول این دوره، نوسانات اقلیمی گسترده‌ای در سراسر فلات ایران به وقوع پیوسته است؛ به گونه‌ای که این تغییرات، تحولات عظیم ژئومورفولوژیک را در پیکره ساختاری و سطحی ایران بر جای گذاشته‌اند. اگرچه امروزه قلمرو ایران مرکزی تحت تأثیر اقلیم گرم و خشک قرار دارد، اما وجود پادگانه‌های آبرفتی وسیع، مخروط‌افکنه‌های عظیم، توالی‌های رسوبی آواری و شواهد فرسایش شدید ناشی از آب‌های جاری، حکایت از حاکمیت شرایط اقلیمی سردتر و مرطوب‌تر در مقاطعی از دوره کواترنر در این قلمرو دارد. در این میان، حوضه‌های بسته رسوبی و پلایاها به دلیل ماهیت هیدرولوژیکی خود، حساسیت بالایی به تغییرات اقلیمی نشان می‌دهند؛ به طوری که حتی نوسانات کوچک در میزان بارش و تعادل هیدرولوژیکی حوضه، باعث تغییرات عمده در سطح آب، شوری و نوع رسوب‌گذاری آن‌ها می‌شود. بر پایه این نظر، رسوبات چاله‌های کویری به دلیل حساسیت بالای خود به تغییرات اقلیمی، به‌عنوان آرشیوهای طبیعی ارزشمند در بازسازی شرایط دیرینه محیطی شناخته می‌شوند. در این حوضه‌ها، حتی تغییرات جزئی در میزان بارش می‌تواند موجب نوسانات قابل توجه در سطح دریاچه و شوری آب شود، در حالی که تغییرات در مقیاس بزرگ‌تر، بازتابی از تعادل هیدرولوژیکی حوضه بوده که خود تابع شرایط اقلیمی و ویژگی‌های نفوذپذیری بستر است (تراسما، ۲۰۱۱). بنابراین، پلایاها و چاله‌های کویری همواره به‌عنوان شاخص‌های کلیدی تغییرات اقلیمی مورد توجه پژوهشگران علوم زمین قرار گرفته‌اند. شواهد ژئومورفولوژیکی گسترده در ایران مرکزی نیز نشان می‌دهد که این ناحیه در دوره کواترنر تحت تأثیر نوسانات شدید اقلیمی، از شرایط

مرطوب‌تر و سردتر تا اقلیم خشک کنونی، دستخوش تحولات اساسی شده است.

یکی از کارآمدترین و دقیق‌ترین ابزارها در واکاوی ویژگی‌های رسوبی و بازسازی نوسانات محیطی دیرینه، استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی و تحلیل‌های ژئوشیمیایی رسوبات آواری است. ترکیب شیمیایی و توزیع عناصر در رسوبات، تابع پیچیده‌ای از متغیرهای متعدد زمین‌شناختی نظیر ساختار زمین‌ساختی، ترکیب سنگ منشأ، کانی‌شناسی اولیه، دما، ترکیب سیالات درون‌روزنه‌ای، شرایط اکسایش و احیا (Eh-pH)، به ویژه نوسانات آب‌وهوایی است (Rollinson, 1993). از آنجا که عناصر شیمیایی نسبت به شرایط محیطی حساس هستند، توزیع و فراوانی عناصر اصلی و فرعی می‌تواند شاخصی قابل اعتماد برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته باشد (Sai, 2004). در فرآیند هوازدگی شیمیایی، اکسیدهای پایدار نظیر آلومینیوم (Al_2O_3)، آهن (Fe_2O_3) و سیلیسیم (SiO_2) در برابر شستشو مقاوم و نامحلول باقی می‌مانند، در حالی که اکسیدهای کلسیم (CaO)، منیزیم (MgO) و سدیم (Na_2O) عناصری متحرک و محلول هستند که در محیط‌های مرطوب به سرعت آبشویی می‌شوند (آدابی، ۱۳۹۰). بر این اساس، غلظت اکسیدهای مقاوم در دوره‌های گرم و مرطوب به دلیل تشدید هوازدگی افزایش و در دوره‌های سرد و خشک کاهش می‌یابد (پورمعافی، ۱۳۸۷). از این رو، استفاده و بهره‌گیری از شاخص‌های دگرسانی و نسبت‌های عنصری نظیر شاخص هوازدگی شیمیایی (CIA)، اندیس دگرسانی پلاژیوکلاز (PIA)، شاخص کلسیتی شدن و نسبت‌هایی همچون Al/Na , Fe/Si , Mg/Ca و K/Ca ابزارهای قدرتمندی را برای تفکیک فازهای اقلیمی، سنجش شدت هوازدگی و درک فرآیندهای رسوب‌گذاری فراهم می‌سازند. برای نمونه، غنی‌شدگی کلسیم بازتابی از تبخیر شدید و اقلیم خشک است، در حالی که افزایش بارندگی و ایجاد شرایط احیایی منجر به غنی‌شدگی منیزیم و منگنز و کاهش نسبت Mg/Al در اثر هوازدگی می‌شود. رسوبات کواترنری در چاله‌های بسته و خشک، آرشیوی حساس از

برهم‌کنش هوازدگی، فرسایش، انتقال و نوسانات اقلیمی هستند. شاخص شیمیایی دگرسانی CIA از زمان معرفی آن برای سنجش شدت هوازدگی شیمیایی در طیف گسترده‌ای از توالی‌های رسوبی به کار رفته و در بسیاری از مطالعات، افزایش آن با تشدید هوازدگی و شرایط گرم‌تر و مرطوب‌تر هم‌خوانی داشته است؛ برای نمونه وانگ^۱ و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که تغییرات CIA در رسوبات دریاچه کیانگهای^۲ با نوسانات اقلیم اواخر کواترنر همسو است و افزایش CIA در دوره‌های گرم و مرطوب‌تر رخ می‌دهد.

در سال‌های اخیر، ژئوشیمی رسوبات به‌عنوان یکی از رویکردهای بنیادی و پیشرفته در بازسازی تغییرات اقلیمی و محیط‌های دیرینه در دوره کواترنر جایگاه ویژه‌ای یافته است. این رویکرد بر این اصل استوار است که ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی رسوبات بازتاب مستقیمی از شرایط اقلیمی، هوازدگی و فرایندهای رسوب‌گذاری در گذشته زمین‌ساختی دارد. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی، به‌ویژه شاخص‌های هوازدگی شیمیایی مانند CIA، PIA و ICV در کنار نسبت‌های عنصری و داده‌های کانی‌شناسی، ابزارهای مؤثری برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته محسوب می‌شوند. این شاخص‌ها امکان ارزیابی شدت هوازدگی، تفکیک تغییرات منبع رسوبات، و شناسایی نوسانات اقلیمی در مقیاس‌های زمانی مختلف را فراهم می‌سازند.

در مطالعات بین‌المللی، داس^۳ و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی، شرایط اقلیمی کواترنری شمال غرب فلوریدا را بازسازی کردند و نقش مؤثر این شاخص‌ها را در تحلیل تغییرات محیطی نشان دادند. فرانک^۴ و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی رسوبات دریاچه اهرید مقدونیه، ژئوشیمی رسوبات را ابزاری قابل اعتماد برای تفسیر نوسانات اقلیمی کواترنر

معرفی کردند. همچنین سان^۵ و همکاران (۲۰۱۹) با مطالعه رسوبات هولوسن دریاچه چنگهای در جنوب غرب چین، به بازسازی محیط دیرینه پرداختند. یانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۱) در مناطق قطبی نشان دادند که در دوره‌های گرم، شدت هوازدگی شیمیایی و تغییرات ژئوشیمیایی عناصر در رسوبات افزایش می‌یابد. وو^۷ و همکاران (۲۰۲۱) نیز با ترکیب شاخص CIA و تحلیل اندازه دانه‌ها، تغییرات اقلیمی و انسانی طی ۷۴۰۰ سال گذشته را در فلات ساندای غربی بازسازی کردند. در مطالعه‌ای دیگر، ما^۸ و همکاران (۲۰۲۴) در دریاچه زیگتنگ فلات تبت به تحلیل دقیق تغییرات اقلیمی با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی پرداختند. وایس^۹ و همکاران (۲۰۲۰) نیز در دریاچه چوکوتکا در شرق روسیه نشان دادند که تغییرات غلظت عناصر و ویژگی‌های بافتی رسوبات ارتباط مستقیمی با نوسانات اقلیمی و هیدرولوژیکی اواخر کواترنر دارد.

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی انجام گرفته است. برای مثال، تقوی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از عناصر حساس به تغییرات محیطی مانند کلسیم، منیزیم، منگنز و استرانسیوم و نسبت‌های آن‌ها در تالاب گاوخونی، نشان دادند که این منطقه در طول کواترنر دوره‌های متناوب خشک، مرطوب و نیمه‌خشک را تجربه کرده است. زارع‌زاده و رضائی (۱۳۹۰) با بررسی ژئوشیمی و کانی‌شناسی پادگانه‌های دریایی جزیره قشم، نقش شرایط شیمیایی و هیدرولوژیکی را در توسعه محیط‌های رسوبی و زیستی تبیین کردند. امجدی و همکاران (۱۳۹۲) نیز با استفاده از ژئوشیمی عناصر اصلی رسوبات آواری، شرایط اقلیمی دیرینه در ناحیه چابهار را مورد بررسی قرار دادند. بهبهانی و همکاران (۱۳۹۳) با مطالعه ژئوشیمی آلی رسوبات خورموسی، ارتباط میان میزان مواد آلی، کربنات کلسیم و شرایط رسوب‌گذاری را نشان دادند. فیضی و

5. Sun

6. Yang

7. Wu

8. Ma

9. Vyse

1. Wang

2. Qionghai

3. Das

4. Francke

رسوب گذاری و تکامل محیط های رسوبی این حوضه ارائه دهد. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی ویژگی های ژئوشیمیایی رسوبات چاله کویری ابرکوه و استفاده از شاخص های هوازدگی شیمیایی، نسبت های عنصری و ترکیب اکسیدهای اصلی به منظور بازسازی تغییرات اقلیمی کواترنر و تبیین ارتباط میان فرآیندهای هوازدگی، رسوب گذاری و نوسانات اقلیمی در ایران مرکزی است.

مواد و روش ها

موقعیت جغرافیایی: منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، چاله کویری ابرکوه است که در حدود ۲۰ کیلومتری شرق شهرستان ابرکوه در استان یزد واقع شده است. این چاله کویری در بخش مرکزی ایران قرار گرفته و از نظر زمین ساختی در محدوده زون سندانج-سیرجان و در حاشیه شمال شرقی آن واقع شده است. پلائیای ابرکوه با وسعتی بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر مربع، بین عرض های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی و طول های جغرافیایی ۵۳ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی گسترده شده است. این کویر از غرب به کوه گینه علی و روستاهای اسفندآباد و مهرآباد، از جنوب غرب به کوه های پوزه سیاه و حوض سفید، از جنوب به کفه بدر شیراز، از شرق به کوه چاه زرد و از شمال به جاده ابرکوه-تفت محدود می شود. پلائیای ابرکوه دارای شکلی بیضوی و کشیدگی غالب شمالی- جنوبی است، به طوری که طول محور بزرگ آن حدود ۵۰ کیلومتر و عرض آن نزدیک به ۳۵ کیلومتر است. متوسط ارتفاع این چاله از سطح آب های آزاد حدود ۱۴۶۰ متر برآورد شده است.

چاله ابرکوه یکی از شناخته شده ترین حوضه های کویری ایران به شمار می رود که در میان ارتفاعات پیرامونی محصور شده است. تأمین آب این حوضه عمدتاً از طریق رودخانه کاسه در حاشیه شمال غربی و همچنین تعدادی آبراهه فصلی و رودخانه های منشأ گرفته از ارتفاعات جنوب شرقی صورت می گیرد. این ویژگی موجب شده است که رسوبات حاصل از

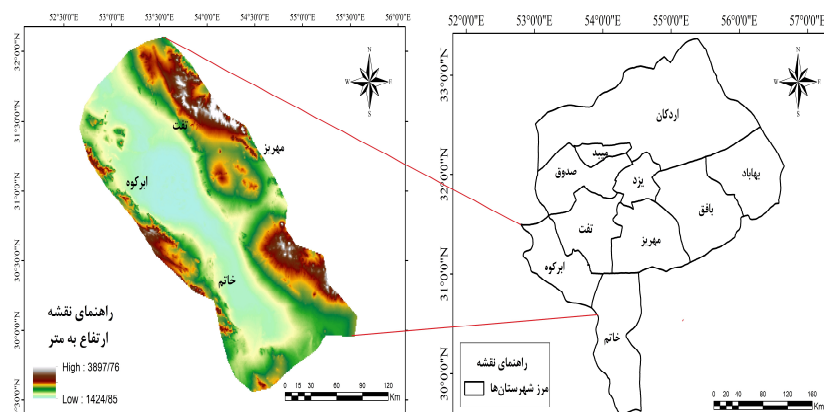
همکاران (۱۳۹۶) به بررسی و تحلیل اقلیم دیرینه برش رسوبی نوده در استان گلستان در شمال ایران با استفاده از ژئوشیمی عناصر پرداختند. همچنین جلیلیان و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه پلائیای گاوخونی بیان کردند که این منطقه در گذر کواترنر پایانی تحت تأثیر نوسانات شدید اقلیمی قرار داشته و از شرایط مرطوب در پلیستوسن پسین به سمت اقلیم خشک و نیمه خشک در هولوسن متأخر تغییر یافته است که این تغییرات در نهشته های تبخیری منطقه به خوبی قابل مشاهده است. بیات و همکاران (۱۴۰۱) نیز با مطالعه پلائیای جازموریان نشان دادند که نسبت های عنصری در رسوبات پلاپاها و دریاچه ها ابزار ارزشمندی برای بازسازی شرایط اقلیمی و محیطی دوره کواترنر محسوب می شوند.

چاله کویری ابرکوه یکی از مهم ترین حوضه های بسته رسوبی در ایران مرکزی است که به دلیل موقعیت جغرافیایی، شرایط هیدرولوژیکی و تداوم رسوب گذاری، ظرفیت بالایی برای ثبت تغییرات محیطی و اقلیمی دوره کواترنر دارد. با وجود اهمیت این حوضه در بازسازی تاریخچه اقلیم ایران مرکزی، تاکنون مطالعات انجام شده عمدتاً بر جنبه های زمین شناسی، ژئومورفولوژی و رسوب شناسی متمرکز بوده اند و ارزیابی جامع تغییرات اقلیمی بر پایه شاخص های ژئوشیمیایی رسوبات آواری، به ویژه با استفاده هم زمان از شاخص های هوازدگی شیمیایی CIA و PIA، نسبت های عنصری و ترکیب اکسیدهای اصلی، هنوز انجام نشده است. در نتیجه، شدت هوازدگی شیمیایی، روند تغییرات رطوبتی و خشکی، و ارتباط میان فرآیندهای رسوب گذاری و نوسانات اقلیمی در این حوضه همچنان با ابهام همراه است. این خلأ پژوهشی موجب شده است که نقش چاله ابرکوه در بازسازی تغییرات اقلیمی کواترنر ایران مرکزی به درستی تبیین نشود و امکان مقایسه آن با سایر حوضه های بسته ایران و مناطق خشک جهان نیز محدود باقی بماند. از این رو، استفاده از شاخص های ژئوشیمیایی رسوبات می تواند اطلاعات ارزشمندی درباره شدت هوازدگی، شرایط اقلیمی حاکم در زمان

فرسایش ارتفاعات اطراف در کف حوضه تجمع یافته و توالی رسوبی نسبتاً ضخیمی را تشکیل دهند. از نظر ژئومورفولوژیکی، بخش اعظم سطح چاله را پهنه‌های نمکزار فرا گرفته است که با فرورفتگی‌های پراکنده همراه هستند. پیرامون این نمکزارها را رسوبات ریزدانه و خاک‌های رسی پوشانده‌اند که در برخی بخش‌ها به‌ویژه در نواحی جنوب‌شرقی گسترش بیشتری دارند. در حد فاصل خاک‌های رسی و نمکزار، به‌ویژه در حاشیه شمال‌غربی حوضه، نوارهای باتلاقی نسبتاً وسیعی مشاهده می‌شود که تحت تأثیر ورود رواناب‌های فصلی و بالا بودن سطح ایستابی شکل گرفته‌اند. همچنین در بخش‌های شمال‌غربی کویر و در مجاورت مسیر رودخانه‌ها، مناطق باتلاقی پراکنده‌ای توسعه یافته است. وسعت این کویر بیش از ۲۰۰ هزار هکتار برآورد شده که حدود ۱۹۰۰ هکتار آن را تپه‌های ماسه‌ای و ماسه‌زارها تشکیل می‌دهند، در حالی که بخش عمده مساحت حوضه را پهنه‌های نمکی و رسوبات تبخیری دربر گرفته است. وجود این ویژگی‌ها در کنار موقعیت بسته حوضه، موجب شده است که پلایای ابرکوه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین آرسیوهای رسوبی و اقلیمی ایران مرکزی شناخته شود و شواهد ارزشمندی از تحولات محیطی و نوسانات اقلیمی دوره کواترنر را در خود حفظ کند.

از نظر زمین‌شناسی چاله ساختمانی ابرکوه، که در حاشیه شمالی زون سندج-سیرجان قرار دارد، بر اثر فعالیت گسل دهشیر و گسل‌های ریدل درجه ۲ و ۳

منشعب از آن و در امتداد آنها، در پلوی - کواترنری به وجود آمده است. این چاله، مانند چاله‌های متعدد دیگر نزدیک به آن، به دلیل تراکشن یک حوضه کشیده - جدا شده به وجود آمده است. این محدوده در یک زون برشی میان دو گسل راست‌بر فعال دهشیر - بافت و رفسنجان - انار قرار دارد. چرخش پادساعتگرد بلوک گسله بین دو گسل یادشده، مناطق کششی محلی را ایجاد کرده و کاهش ضخامت پوسته را سبب شده است. این امر موجب بالآمدگی منحنی زمین‌گرایی و ذوب بخشی شده و ولکانیسم محلی پلیوسن به بعد را به وجود آورده است. فعالیت گسل‌ها همراه با بالآمدگی گنبدها به تقطیع سطح هموار پیشین انجامیده و در بعضی نقاط فرونشینی بخشهایی از منطقه را سبب شده و چاله‌های ساختمانی متعددی از جمله چاله مذکور را به وجود آورده است (شریفی پیچون و تاج‌بخش، ۱۳۹۸). از نظر سنگ‌شناسی نیز منطقه مورد مطالعه جدید است به گونه‌ای که قدیمی‌ترین سنگهای محدوده چاله و پیرامون آن، سنگهای آهکی و آهکی دولومیتی پرمین پایانی است. تنها در بخش‌های غربی چاله، آهک‌ها و دولومیت‌های تریاس و به صورت موردی کرتاسه برونزدگی دارند. در حالی که بیشترین رسوبات چاله، رسوبات آبرفتی دوران کواترنری و نهشته‌های رودخانه‌ای هولوسن است و حتی رسوبات قبل از کواترنر آن، به شکل مقطعی و در سطح کوچک برونزدگی پیدا کرده‌اند (نقشه زمین‌شناسی ابرکوه).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی کویر ابرکوه در ایران و در استان یزد

روش‌شناسی پژوهش

به‌منظور بررسی تغییرات ژئوشیمیایی و بازسازی شرایط دیرینه‌محیطی چاله کویری ابرکوه، یک ترانشه رسوبی عمودی به عمق ۸ متر در بخش مرکزی کفه کویری حفر و مورد مطالعه قرار گرفت. انتخاب محل ترانشه با هدف ثبت بیشترین ضخامت رسوبات کواترنری و دسترسی به توالی رسوبی پیوسته انجام شد. در ابتدا ویژگی‌های صحرایی رسوبات شامل رنگ، ساختار، نوع رسوب، اندازه دانه، وجود لایه‌های رسی، ماسه‌ای و تبخیری و تغییرات رخساره‌ای ثبت شد. در مجموع، تعداد ۱۵ نمونه رسوبی از بخش‌های مختلف توالی برداشت شد. نمونه‌برداری به‌صورت سیستماتیک و با توجه به تغییرات لیتولوژیکی و رخساره‌ای انجام گرفت، به‌گونه‌ای که هر نمونه نماینده یک افق رسوبی مشخص بوده و امکان بررسی تغییرات عمودی ویژگی‌های ژئوشیمیایی در طول توالی فراهم شود. نمونه‌ها پس از برداشت در کیسه‌های پلاستیکی تمیز نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شدند. در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌ها در دمای محیط خشک شدند تا از تغییرات احتمالی ناشی از حرارت جلوگیری شود. سپس قطعات درشت و ذرات آلی احتمالی حذف شده و نمونه‌ها با استفاده از هاون آگات کاملاً پودر شدند تا اندازه ذرات آن‌ها برای انجام آنالیزهای ژئوشیمیایی یکنواخت شود. نمونه‌های پودر شده از الک با مش مناسب عبور داده شدند تا بخش ریزدانه و همگن برای آنالیز شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، برای بررسی روابط متقابل بین عناصر اصلی و شاخص‌های هوازدگی، تحلیل همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. همچنین تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر اساس ماتریس همبستگی اکسیدهای اصلی به منظور شناسایی عوامل کنترل‌کننده تغییرات ژئوشیمیایی رسوبات انجام گرفت.

آنالیز ژئوشیمیایی: برای تعیین ترکیب شیمیایی رسوبات، درصد اکسیدهای اصلی شامل Al_2O_3 ، SiO_2 ، Fe_2O_3 ، CaO ، MgO ، Na_2O و K_2O اندازه‌گیری شد. آنالیز عناصر اصلی با استفاده از دستگاه فلورسانس

اشعه ایکس (XRF) انجام گرفت. نتایج حاصل از XRF برای بررسی شدت هوازدگی شیمیایی، شرایط اقلیمی گذشته و فرآیندهای رسوب‌گذاری مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که نسبت عناصر متحرک و غیرمتحرک در طول فرآیندهای هوازدگی تغییر می‌کند، شاخص‌های ژئوشیمیایی مختلف برای تفسیر شرایط دیرینه‌محیطی محاسبه شدند. بر این اساس، برای تعیین شدت هوازدگی از شاخص‌های کلسیتی شدن^۱، هوازدگی شیمیایی^۲ (CIA) و شاخص هوازدگی پلاژیوکلاز^۳ (PIA) استفاده شد که در زیر نحوه محاسبه و ارزیابی هر سه شاخص آورده شده است. با توجه به احتمال حضور کانی‌های کربناته در رسوبات مورد مطالعه، مقادیر CIA و PIA محاسبه‌شده بر اساس CaO کل باید به عنوان مقادیر نسبی تفسیر شوند و روند تغییرات عمقی آنها بیشتر از مقادیر مطلق مورد توجه قرار گرفته است.

شاخص کلسیتی شدن: شاخص کلسیتی شدن^۴ که معمولاً به صورت نسبت اکسیدی کربنات کلسیم و منیزیم به نسبت آلومینیوم است ابزار ارزشمندی برای ارزیابی میزان تجمع کربنات‌ها در مقایسه با بخش سیلیکاتی و تخریبی رسوب است. کلسیتی شدن بر اساس رابطه ۱ تعیین می‌شود:

$$\text{Calsification Index} = \frac{CaO + MgO}{Al_2O_3} \quad \text{رابطه ۱}$$

بر این اساس، رسوبات غنی از کربنات که اغلب در محیط‌های خشک و یا گاهی شور در حوضه‌های بسته داخلی، به دلیل نرخ تبخیر بالا و تجمع کربنات کلسیم و منیزیم شدید شکل می‌گیرند، افزایش می‌یابد (Morad, 1998; Dutton & Loucks, 2010). در این حالت، مقادیر شاخص معمولاً بزرگتر از ۱ بوده و در مناطق کاملاً کربناته می‌تواند به اعداد بسیار بالاتر (مثلاً ۵ تا ۱۰ یا حتی در پاره‌ای موارد بیشتر) هم برسد. اما در محیط‌های مرطوب یا هوازده، به دلیل

1 Calsification Index

2 Chemical Index of Alteration

3 Plagioclase Index of Alteration

4 Calcification Index

شستشوی بالا^۱ کاتیون‌های محلول از قبیل کلسیم و منیزیم از محیط رسوبی خارج شده و عناصر کم-حرکت‌تر مانند آلومینیوم در بخش رسوبات تخریبی باقی می‌مانند. در این محیط‌های رسوبی اغلب شاخص کلسیتی شدن کوچکتر از ۱ است.

شاخص هوازگی شیمیایی^۲ (CIA) : شاخص هوازگی شیمیایی (CIA) در مطالعات ژئوشیمیایی رسوبات برای بازسازی شرایط اقلیمی گذشته به کار می‌رود و مقدار آن بین ۰ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند (Nesbitt & Young, 1984; Maynard, 1992). این شاخص نشان‌دهنده میزان تبدیل فلدسپار به کانی‌های رسی و درجه حذف کاتیون‌های ناپایدار (Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+}) در طی فرآیند هوازگی است و بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Honda et al., 20) :

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه فوق، CaO نشان‌دهنده کلسیم موجود در اجزای سیلیکاته سنگ است. مقادیر CIA از حدود ۵۰ یا کمتر برای بیشتر سنگ‌های آذرین و دگرگونی غیرهوازده و تا حدود ۱۰۰ برای باقیمانده‌های آلومینوسیلیکات خالص از قبیل کائولن در نتیجه هوازگی شدید در تغییر است؛ بنابراین، CIA، مقیاس عددی مقادیر کانی‌های موجود در یک رسوب سیلیسی‌آواری در نظر گرفته می‌شود که دستخوش هوازگی شیمیایی شده است. بر اساس یک قاعده کلی پایین بودن شاخص دگرسانی شیمیایی نشان‌دهنده نبود دگرسانی یا دگرسانی خیلی پایین در گذشته بوده است و منعکس کننده شرایط آب و هوایی سرد و خشک و یا گرم و خشک است. در حالی که بالا بودن این شاخص دلالت بر شرایط گرم و مرطوب و هوازگی شیمیایی شدید دارد (۱۹۹۵، Fedo al et Nesbitt & Young (1984)). بر اساس نظر (۱۹۸۴) مقادیر CIA کمتر از ۵۰ نشانگر هوازگی ضعیف یا عدم هوازگی، بین ۵۰-۶۰ هوازگی متوسط و بیشتر از ۸۰ بیانگر هوازگی شدید است.

شاخص هوازگی شیمیایی^۳ PIA: شاخص هوازگی PIA برای سنجش شدت هوازگی شیمیایی فلدسپارهای پلاژیوکلاز به کار می‌رود و میزان دگرسانی آن‌ها به کانی‌های رسی را نشان می‌دهد که بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$PIA = \frac{Al_2O_3 - K_2O}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O} \quad \text{رابطه ۳}$$

مقادیر عددی PIA آن بین صفر تا ۱۰۰ است. بر این اساس، اگر مقدار حاصل شده کمتر از ۵۰ باشد، نشان دهنده هوازگی ضعیف در شرایط خشک یا سرد است، بین ۵۰-۷۰ هوازگی متوسط و بیشتر از ۷۰ نشان دهنده هوازگی شدید است.

یافته‌های پژوهش

بررسی عناصر شیمیایی رسوبی به روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF) : به منظور تعیین ترکیب ژئوشیمیایی و کانی‌شناسی رسوبات کفه ابرکوه، نمونه‌برداری از یک ترانشه به ارتفاع ۸ متر (محل کوره آجرپزی) انجام شد. نمونه شماره ۱ در عمیق‌ترین لایه (کف ترانشه) و نمونه شماره ۱۵ در بالاترین لایه (سطح زمین) قرار دارد. تحلیل اکسیدهای اصلی و عناصر فرعی به روش XRF در سازمان زمین‌شناسی کشور صورت گرفت که نتایج آن در جداول ۱ و ۲ منعکس شده است. این تحلیل‌ها امکان شناسایی عناصر اصلی و فرعی رسوبات و بازسازی شرایط محیطی و اقلیمی گذشته را فراهم می‌کنند.

1. Leaching

2. Chemical Index of Alteration

3. Plagioclase Index of Alteration

جدول ۱: نتایج آنالیز عناصر اصلی بر اساس روش فلورسانس پرتو ایکس (%)

Sample No	ضخامت لایه	ارتفاع از سطح زمین	Lab. No	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
1	115	10	366	34/3	10/5	6/3	17/2	4/3	2/3	2/0
2	50	125	367	38/7	12/5	6/1	10/2	7/7	2/9	2/0
3	45	175	368	33/1	10/6	6/1	17/5	3/9	3/5	2/1
4	90	230	369	35/8	11/1	5/3	16/3	5/3	3/1	2/1
5	65	320	370	37/5	11/6	6/5	15/8	5/3	1/6	2/1
6	25	385	371	33/1	10/1	5/8	19/6	4/3	2/3	2/1
7	50	410	372	34/6	9/9	5/7	16/7	5/7	2/9	2/2
8	55	460	373	33/3	9/6	5/6	20/1	4/2	2/8	2/1
9	35	515	374	34/3	9/4	5/0	20/8	4/3	2/6	2/0
10	85	550	375	32/0	10/2	4/9	17/5	5/0	4/4	2/1
11	45	635	376	26/3	7/9	4/0	28/0	3/8	1/2	1/7
12	35	680	377	33/7	10/1	5/2	18/9	5/5	2/3	2/2
13	75	715	378	34/5	10/7	5/5	16/3	7/5	1/6	2/3
14	40	790	379	35/0	11/9	5/6	13/9	7/3	2/1	2/1
15	20	830	380	30/3	9/8	4/7	17/1	7/4	3/0	2/0

جدول ۲: نتایج آنالیز عناصر فرعی بر اساس روش فلورسانس پرتو ایکس (%) نتایج آزمایش

Seq.	ارتفاع از سطح زمین (Cm)	ضخامت لایه (Cm)	Lab. No	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂	SrO	Cl	L. O. I. *
1	10	115	366	0/3	0/1	0/1	0/6	<. 1	1/2	20/5
2	125	50	367	0/4	0/1	0/1	0/6	<. 1	1/8	16/4
3	175	45	368	0/4	0/1	<. 1	0/6	<. 1	2/7	19/2
4	230	90	369	0/4	0/1	0/1	0/6	<. 1	2/0	17/5
5	320	65	370	0/1	0/1	0/1	0/6	<. 1	0/7	17/7
6	385	25	371	0/3	0/1	<. 1	0/6	<. 1	1/3	20/1
7	410	50	372	0/3	0/1	<. 1	0/6	<. 1	2/1	18/9
8	460	55	373	0/4	0/1	0/1	0/7	<. 1	1/8	18/9
9	515	35	374	0/4	0/1	<. 1	0/6	<. 1	1/3	18/9
10	550	85	375	0/6	0/1	0/1	0/5	0/1	3/3	19/0
11	635	45	376	0/2	0/1	0/1	0/4	0/1	0/5	25/4
12	680	35	377	0/4	0/1	0/1	0/7	0/1	1/5	19/0
13	715	75	378	0/1	0/1	<. 1	0/6	0/1	0/7	19/9
14	790	40	379	0/4	0/1	0/1	0/6	0/1	1/1	19/5
15	830	20	380	0/4	0/1	<. 1	0/5	0/6	2/4	21/5

و Na₂O تحت تأثیر شرایط آب و هوایی و فرایندهای رسوبی قرار می‌گیرند. در واقع، در مطالعات ژئوشیمیایی رسوبی، اکسیدهای SiO₂، Al₂O₃، Fe₂O₃ به عنوان ترکیبات نامتحرک شاخص هوازدگی شیمیایی شناخته می‌شوند، در حالی که عناصر CaO، MgO و Na₂O بسیار متحرک بوده و نشان‌دهنده تغییرات تراز آب و نرخ تبخیر هستند. بر این اساس،

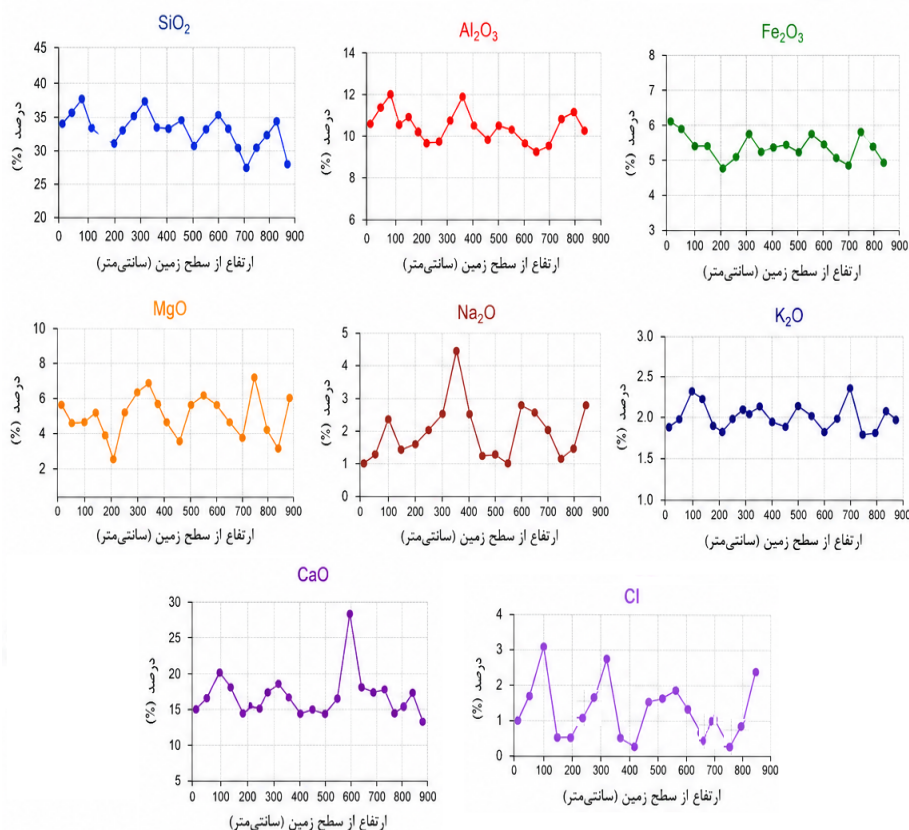
در ابتدا، با استفاده از نتایج XRF، عناصر اصلی شامل K₂O، Na₂O، MgO، CaO، Fe₂O₃، Al₂O₃، SiO₂ (جدول ۱) و عناصر فرعی شامل SO₃، P₂O₅، MnO، TiO₂، SrO و Cl (جدول ۲) تعیین شدند. عناصر مقاوم در برابر هوازدگی شیمیایی مانند Al₂O₃ و TiO₂ به عنوان شاخص‌های مقایسه‌ای در تحلیل نمونه‌ها استفاده شدند، در حالی که عناصر متحرک مانند CaO

تجزیه و تحلیل نسبت‌های عناصر و اکسیدها در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در دوره کواترنر نوسانات و حتی تغییرات در شرایط آب و هوایی به شکل چشمگیری وجود داشته است. برای مثال، لایه‌هایی پایینی رسوبات آب و هوای گرم و مرطوب و لایه‌های میانی و همچنین بالایی آب و هوای گرم و خشک را نشان می‌دهند. افزایش عناصر پایدار مانند سیلیسیم، آلومینیم و آهن در لایه‌های پایینی و قدیمی‌تر نمایانگر شرایط گرم و مرطوب و افزایش سدیم و کالشیوم Fe و Mg در دوره‌های اخیر (احتمالاً هولوسن میانی به این سمت) نمایانگر شرایط گرم و خشک است. نمونه‌های مرتبط با بخش‌های میانی رسوبات، نشان‌دهنده دوره‌های ترکیبی گرم و مرطوب و سرد و خشک هستند. در دوره جدیدتر (احتمالاً هولوسن)، ویژگی‌های شیمیایی عناصر رسوبی بیانگر آب و هوای گرم و خشک کنونی با افزایش Na_2O و افزایش CaO هستند.

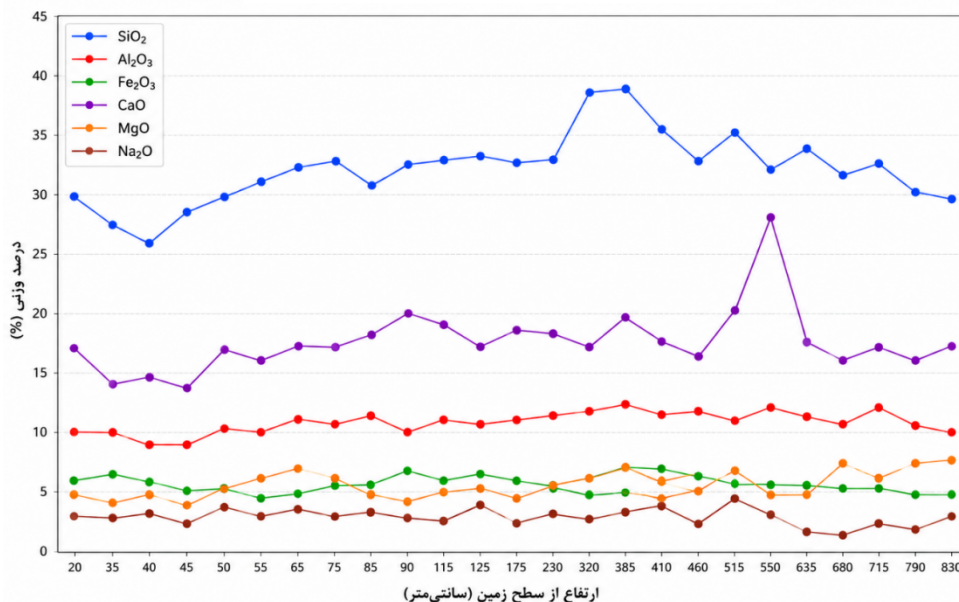
بدین روی، در کواترنر بالایی و هولوسن پیشین (احتمالاً فاز مرطوب و احیایی بر منطقه حاکم بوده است. بالابودن نسبت $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (فراوانی کوارتز)، همراه با مقادیر بالای آهن و منگنز و تیره بودن لایه‌ها، نشان‌دهنده شرایط احیایی، افزایش بارندگی و جریان‌های سیلابی به سمت حوضه است. پایداری کوارتز در این فاز (گرم و مرطوب) از شواهد این مساله است. اما به سمت لایه‌های سطحی رسوبات (یعنی دوره‌های جدیدتر، رسوب نمونه ۱۰)، با کاهش شدید آهن و جهش فوق‌العاده سدیم (برابر با ۴/۴٪، کلر ۳/۳٪) و گوگرد، نشان‌دهنده افت تراز آب، انحلال هالیت و حاکمیت شرایط شدیداً تبخیری است. در رسوبات بخش‌های میانی (نمونه ۱۱)، کمترین میزان سیلیس (۳/۲۶٪) و بالاترین میزان کلسیم (CaO) برابر با (۲۸٪)، نشان‌دهنده رسوب‌گذاری شیمیایی کربنات کلسیم در یک اقلیم خشک و روشن شدن رنگ لایه است. در بخش‌های بالایی (نمونه ۱۳ و ۱۴)، منیزیم به اوج خود (۵/۷٪) رسیده و سدیم کاهش پیدا کرده است (شکل‌های ۲ و ۳). بالا رفتن منیزیم و کلسیم در این فاز احیایی، گویای افزایش فعالیت بیوشیمیایی و بالارفتن تراز آب دریاچه ابرکوه است. اما، با نزدیک

شدن به سطح زمین (نمونه ۱۵)، سیلیسیم و آهن کاهش یافته و سدیم (۳٪) و کلر دوباره روندی صعودی به خود می‌گیرند. این امر حاکی از خشک شدن تدریجی دریاچه، رسوب نمک و تثبیت اقلیم گرم و خیلی خشک کنونی در منطقه است.

شاخص کلسیتی شدن و تغییرات آب و هوایی گذشته: کلسیتی شدن به معنای عمل یا فرایند تشکیل کلسیت و دگرسانی سنگ‌های موجود به وسیله کلسیت می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، شاخص کلسیتی شدن از نسبت کلسیم و منیزیم به آلومینیم بدست می‌آید. بر اساس نتایج حاصله از نسبت عناصر در ترانسه مورد بررسی در کفه کویری ابرکوه می‌توان بیان داشت که مقادیر کلسیتی شدن در طول زمان به طور کلی زیاد بوده است و بر پایه آن منطقه به طور کلی به خشکی متمایل بوده است و آب و هوای خشک و نیمه خشک در سراسر کواترنر بر منطقه حاکم بوده است (جدول ۳). هر چند که این مقادیر و نسبت‌ها در طول زمان یک اندازه نبوده و در گستره ۰.۱ تا ۴ قرار داشته است. در مقاطعی (مانند نمونه ۱۱)، مقدار کلسیتی شدن به حداکثر خود رسیده است. در دوره‌های با بارش کمتر و کاهش زیاد مقادیر آب ورودی به چاله کویری، کربنات‌ها ترسیب بیشتری و غلبه بیشتری پیدا می‌کنند. اما در دوره‌های مرطوب با افزایش بارندگی‌ها (مانند نمونه‌های ۲، ۴، ۵ و ۱۴) کربنات‌ها شسته شده و ترسیب کمتری پیدا کرده‌اند. حتی در صورت وجود در داخل آب راکد دریاچه (کویر کنونی)، به شکل محلول باقی مانده و از این رو سهم کمتری در داخل رسوبات باقی مانده دارند. بعلاوه، هوازگی بیشتر در بالادست حوضه‌ها سبب شده که مقادیر رسوبی بیشتری وارد کف چاله شده و ترسیب پیدا کند. با وجود این، نمی‌توان نقش غلبه سنگ‌های کربناتی منطقه در مقایسه با سنگ‌های سیلیکاتی را نادیده گرفت. اگر چه سنگ‌های سیلیکاته (داسیت و در حوضه‌های دوردست‌تر گرانیت‌ها) در مجاورت کفه کویر مورد مطالعه هستند، اما از نظر حجم، وسعت و برونزدگی، سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) گستردگی بیشتری دارند.



شءل ٢: نمائش ءءءئرءاء اكسئءءءاء شئمئاءئ رسوءاء ءر عمقءا و لاءهءاء مءءءل رسوءئ مءءءه مءاءه



شءل ٣: نمائش ءءءئرءاء اكسئءءءاء شئمئاءئ رسوءاء ءر عمقءا و لاءهءاء مءءءل رسوءئ

جدول ۳: محاسبه شاخص کلسیتی شدن رسوبات در لایه‌ها و اعماق مختلف

نمونه‌ها	Al ₂ O ₃	Mgo	cao	میزان کلسیتی شدن
۱	10/5	4/3	17/2	۲
۲	12/5	7/7	10/2	۴.۱
۳	10/6	3/9	17/5	۰.۱.۲
۴	11/1	5/3	16/3	۹.۱
۵	11/6	5/3	15/8	۸.۱
۶	10/1	4/3	19/6	۳.۲
۷	9/9	5/7	16/7	۲.۲
۸	9/6	4/2	20/1	۵.۲
۹	9/4	4/3	20/8	۶.۲
۱۰	10/2	5/0	17/5	۲.۲
۱۱	7/9	3/8	28/0	۴
۱۲	10/1	5/5	18/9	۴.۲
۱۳	10/7	7/5	16/3	۲.۲
۱۴	11/9	7/3	13/9	۷.۱
۱۵	9/8	7/4	17/1	۷.۲

شاخص دگرسانی شیمیایی CIA: مقدار CIA

نشان‌دهنده میزان نسبی کانی‌های رسی بوده و بیانگر درجه تبدیل فلدسپات به کانی‌های رسی در طی فرآیند هوازدگی شیمیایی است. بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول ۴ و شکل ۴ و مقادیر مربوط به آن، به طور کلی و بر مبنای شاخص هوازدگی CIA می‌توان بیان نمود که نمونه‌های ۸، ۹ و ۱۰ که مقادیر CIA آن‌ها بین ۲۷ تا ۲۹ قرار دارد، نشان‌دهنده هوازدگی بسیار پایین در این بخش از زمان زمین‌شناسی هستند. این وضعیت حاکی از نبود دگرسانی شیمیایی مؤثر بوده و با شرایط آب و هوایی سرد و خشک انطباق دارد. همچنین این نمونه‌ها مربوط به دوره کواترنر پیشین هستند که در این دوره میزان عناصر آهن و منیزیم پایین و مقدار سدیم نسبتاً بالا گزارش شده است که این ترکیب شیمیایی نیز بیانگر شرایط آب و هوایی گرم و خشک در آن زمان می‌باشد. در مقابل، نمونه ۱۱ که دارای مقدار CIA حدود ۲۰ است، مربوط به دوره کواترنر میانی بوده و نشان‌دهنده شرایط آب و هوایی سرد و خشک این دوره است. این نمونه کمترین میزان هوازدگی را

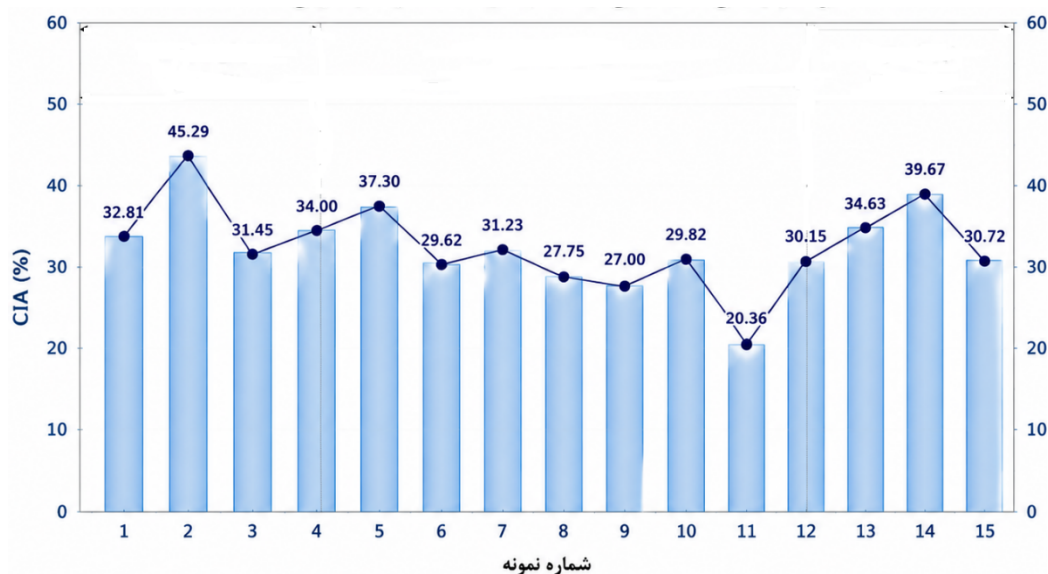
نشان داده و بیانگر ضعف شدید فرآیندهای دگرسانی شیمیایی در این دوره است.

همچنین نمونه‌های ۲، ۵ و ۱۴ که مقادیر CIA آن‌ها نزدیک به ۵۰ می‌باشد (جدول ۴ و شکل ۴)، نسبت به سایر نمونه‌ها دارای درجه هوازدگی بیشتری بوده و نشان‌دهنده دگرسانی شیمیایی متوسط در رسوبات هستند. این مقادیر بیانگر شرایط نسبتاً گرم و خشک می‌باشند. به طور خاص، نمونه‌های ۲ و ۵ مربوط به دوره کواترنر پیشین بوده که در آن میزان عناصر منیزیم، آهن و سیلیس بالا و مقدار کربنات کلسیم پایین‌تر گزارش شده است که این ویژگی‌ها نشان‌دهنده شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب در آن دوره است. در حالی که نمونه ۱۴ مربوط به دوره کواترنر میانی بوده و در آن میزان عناصر آهن، منیزیم و سیلیسیم بالا اما مقدار سدیم بسیار پایین است که این وضعیت نشان‌دهنده حاکم بودن شرایط آب و هوایی گرم و بسیار مرطوب در منطقه کویر ابرکوه می‌باشد. به طور کلی، با توجه به تحلیل‌های انجام شده می‌توان بیان داشت که میزان هوازدگی شیمیایی

در رسوبات کویر ابرکوه از شدت پایینی برخوردار بوده است.

جدول ۴: ارزیابی مقادیر شاخص CIA در منطقه مورد مطالعه در لایه ها و اعماق مختلف

CIA	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	ردیف
۲۲	10/5	17/2	2/3	2/0	1
۳۲٫۹	12/5	10/2	2/9	2/0	2
۲۱	10/6	17/5	3/5	2/1	3
۲۳٫۱	11/1	16/3	3/1	2/1	4
۲۵٫۶	11/6	15/8	1/6	2/1	5
۱۹٫۵	10/1	19/6	2/3	2/1	6
۲۰٫۹	9/9	16/7	2/9	2/2	7
۱۸٫۱	9/6	20/1	2/8	2/1	8
۱۷٫۵	9/4	20/8	2/6	2/0	9
29. 82	10/2	17/5	4/4	2/1	10
20. 36	7/9	28/0	1/2	1/7	11
30. 15	10/1	18/9	2/3	2/2	12
34. 63	10/7	16/3	1/6	2/3	13
39. 67	11/9	13/9	2/1	2/1	14
30. 72	9/8	17/1	3/0	2/0	15



شکل ۴: نمودار تغییرات مقادیر CIA در لایه ها و عمق های مختلف در منطقه مورد مطالعه

رسوبات آواری، خاک های قدیمی^۱ و توالی های کواترنری به کار می رود، در بازسازی تغییرات اقلیمی گذشته اهمیت بسیار برجسته ای دارد. چرا که در فرآیند هوازدگی شیمیایی، سرعت تخریب کانی ها

شاخص دگرسانی پلاژیوکلازها (PIA): شاخص ژئوشیمیایی مولار (مبتنی بر اکسیدهای اصلی) است که به طور اختصاصی برای پایش میزان هوازدگی، تخریب و دگرسانی کانی های گروه پلاژیوکلاز در

1 Paleosols

یکسان نیست و پلاژیوکلازها (به‌ویژه بخش‌های کلسیم‌دار) بسیار سریع‌تر و پیش از پتاسیم-فلدسپارها هوازده می‌شوند. زمانی که در یک محدوده اقلیمی، هوازده‌گی تازه آغاز شده یا شدت اقلیم مرطوب کم است، شاخص کل عمومی مانند CIA ممکن است تغییر محسوسی را نشان ندهد. چون فلدسپارهای پتاسیم‌دار هنوز دست‌نخورده‌اند. در حالی‌که شاخص PIA به دلیل حساسیت شدید به فازهای سدیم و کلسیم، نوسانات ظریف اولیه اقلیم (مرطوب/خشک) را به سرعت آشکار می‌کند. مقادیر محاسبه شده این شاخص برای منطقه مورد مطالعه در جدول شماره ۵ آمده است. میزان اندیس دگرسانی پلاژیوکلاز حدود ۵۱ مربوط به سنگ‌های غیرهوازده و تازه و میزان اندیس دگرسانی پلاژیوکلاز نزدیک به ۱۰۰ نشان دهنده تبدیل کامل فلدسپارها به کانی‌های رسی آلومینیوم‌دار ثانویه از قبیل کائولنیت، ایلیت و ژپسیت است.

براساس شاخص هوازده‌گی PIA براساس ۱۵ نمونه رسوبی کواترنری می‌توان گفت که نمونه رسوبی ۱۱ دارای پایین‌ترین مقدار هوازده‌گی است که مربوط به دوره کواترنریانی است و عدد قابل توجهی را به خود اختصاص داد است در این نمونه مقدار کربنات کلسیم بالایی ته نشست پیدا کرده است اما مقدار سدیم نسبتاً پایین و همچنین آلومینیم و سیلیس و منیزیم پایین در این دوره وجود داشته است که نشانه ای از آب و هوای سرد و خشک یا سرد و خشک بوده است ولی در نمونه ۲ که بالاترین عدد هوازده‌گی در شاخص PIA را دارا می‌باشد و به عدد ۴۵ نزدیک است می‌توان بیان نمود که هوازده‌گی نسبتاً بالایی را داشته است نمونه ۲ مربوط به دوره کواترنر پیشین است که دارای آب و هوای گرم و مرطوب است. می‌توان این نتیجه را گرفت که میزان هوازده‌گی در کویر ابرقو بر اساس شاخص PIA ضعیف بوده است.

جدول ۵: مقادیر شاخص PIA محاسبه شده برای منطقه مورد مطالعه

ردیف	K_2O	Na_2O	CaO	Al_2O_3	PIA
۱	2/0	2/3	17/2	10/5	۲۶٫۵
۲	2/0	2/9	10/2	12/5	۳۸
۳	2/1	3/5	17/5	10/6	۲۵
۴	2/1	3/1	16/3	11/1	۲۷
۵	2/1	1/6	15/8	11/6	۳۰
۶	2/1	2/3	19/6	10/1	۲۳
۷	2/2	2/9	16/7	9/9	۲۴
۸	2/1	2/8	20/1	9/6	۲۱
۹	2/0	2/6	20/8	9/4	۲۱
۱۰	2/1	4/4	17/5	10/2	۲۳
۱۱	1/7	1/2	28/0	7/9	۱۵
۱۲	2/2	2/3	18/9	10/1	۲۳
۱۳	2/3	1/6	16/3	10/7	۲۷
۱۴	2/1	2/1	13/9	11/9	۳۲
۱۵	2/0	3/0	17/1	9/8	۲۴

همبستگی پیرسون بین اکسیدهای اصلی
شاخص‌های هوازده‌گی CIA و PIA : نتایج تحلیل

ماتریکس همبستگی پیرسون نشان داد که شاخص
CIA بیشترین همبستگی مثبت را با Al_2O_3

همبستگی پیرسون نشان داد که شاخص PIA بیشترین همبستگی مثبت را با Al_2O_3 ($r=0.96$) و CaO ($r=0.81$) دارد (جدول ۶)، در حالی که با همبستگی منفی قوی ($r=-0.93$) مشاهده شد. این الگو بیانگر افزایش نسبی آلومینیوم و کاهش کلسیم در طی فرآیندهای هوازدگی شیمیایی است. همچنین همبستگی بسیار قوی بین PIA و CIA ($r=0.99$) نشان می‌دهد که هر دو شاخص روند مشابهی را در تغییرات شدت هوازدگی رسوبات کواترنری کویر ابرکوه ثبت می‌کنند.

($r=0.97$) و SiO_2 ($r=0.83$) دارد (جدول ۶). این رابطه قوی نشان‌دهنده نقش افزایش نسبی آلومینیوم و تمرکز کانی‌های رسی در افزایش شدت هوازدگی شیمیایی است. در مقابل، CIA با CaO همبستگی منفی بسیار قوی ($r=-0.94$) نشان داد که بیانگر کاهش کلسیم در اثر فرآیندهای هوازدگی و شست‌وشوی عناصر متحرک است. همچنین همبستگی مثبت Fe_2O_3 با CIA ($r=0.64$) می‌تواند نشان‌دهنده افزایش کانی‌های اکسیدی آهن در مراحل پیشرفته‌تر هوازدگی باشد. همچنین، نتایج تحلیل

جدول (۶) ماتریکس همبستگی پیرسون بین اکسیدهای اصلی شاخص‌های هوازدگی PIA و CIA

متغیر	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	CIA	PIA
SiO_2	1.00	0.81**	0.77**	-0.80**	-0.24	-0.11	0.22	0.83**	0.81**
Al_2O_3	0.81**	1.00	0.88**	-0.91**	-0.31	0.02	0.38	0.97**	0.96**
Fe_2O_3	0.77**	0.88**	1.00	-0.77**	-0.10	-0.08	0.45	0.64*	0.63*
CaO	-0.80**	-0.91**	-0.77**	1.00	0.19	0.02	-0.30	-0.94**	-0.93**
MgO	-0.24	-0.31	-0.10	0.19	1.00	-0.39	0.12	0.70**	0.69**
Na_2O	-0.11	0.02	-0.08	0.02	-0.39	1.00	-0.13	0.07	0.05
K_2O	0.22	0.38	0.45	-0.30	0.12	-0.13	1.00	0.35	0.30
CIA	0.83**	0.97**	0.64*	-0.94**	0.70**	0.07	0.35	1.00	0.99**
PIA	0.81**	0.96**	0.63*	-0.93**	0.69**	0.05	0.30	0.99**	1.00

* معنی‌دار در سطح ۰,۰۵؛ ** معنی‌دار در سطح ۰,۰۱

رسوبات کواترنری این حوضه مشخص شود. نتایج نشان می‌دهد که رسوبات مورد مطالعه عمدتاً در شرایط اقلیم خشک تا نیمه‌خشک، با شدت پایین هوازدگی شیمیایی و تحت تأثیر فرآیندهای تبخیری حاکم بر یک محیط پلایایی تشکیل یافته‌اند؛ با این حال، تغییرات مشاهده‌شده در شاخص‌های ژئوشیمیایی بیانگر آن است که شرایط اقلیمی منطقه در طول کواترنر ثابت نبوده و دوره‌هایی با تغییر در میزان رطوبت مؤثر، شدت هوازدگی و وضعیت هیدرولوژیکی حوضه رخ داده است.

بحث و نتیجه‌گیری

رسوبات حوضه‌های بسته کویری به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات تراز آب، میزان تبخیر، شوری و فرآیندهای هوازدگی، از مهم‌ترین آرشیوهای طبیعی برای بازسازی تغییرات محیطی و اقلیمی گذشته محسوب می‌شوند. در این پژوهش، ویژگی‌های ژئوشیمیایی رسوبات چاله کویری ابرکوه با استفاده از ترکیب اکسیدهای اصلی، شاخص‌های هوازدگی شیمیایی (CIA) و (PIA) شاخص کلسیتی‌شدن و نسبت‌های عنصری مورد بررسی قرار گرفت تا نقش تغییرات اقلیمی و فرآیندهای محیطی مؤثر بر تکامل

مقادیر شاخص هوازدهی شیمیایی (CIA) در رسوبات چاله ابرکوه نشان‌دهنده شدت پایین تا متوسط هوازدهی شیمیایی است. پایین بودن مقادیر این شاخص بیانگر حفظ نسبی کانی‌های اولیه، به‌ویژه فلدسپارها، محدود بودن هیدرولیز سیلیکات‌ها و کاهش شستشوی عناصر متحرک نظیر Ca، Na و K است. این شرایط با محیط‌های خشک و نیمه‌خشک سازگار است، زیرا محدودیت رطوبت موجب کاهش واکنش‌های شیمیایی بین آب و کانی‌ها شده و فرآیندهای هوازدهی فیزیکی و انتقال مکانیکی را نسبت به هوازدهی شیمیایی غالب می‌کند. دامنه تغییرات CIA در توالی رسوبی، با وجود غالب بودن شرایط خشک، نشان می‌دهد که حوضه ابرکوه در طول کواترنر دوره‌هایی با افزایش نسبی رطوبت را نیز تجربه کرده است. در این دوره‌ها، افزایش زمان حضور آب در محیط رسوبی و تقویت فرآیندهای هوازدهی شیمیایی موجب افزایش نسبی CIA شده است. از نظر ژئوشیمیایی، کاهش CIA بیانگر محدود بودن هیدرولیز سیلیکات‌ها و شستشوی ضعیف کاتیون‌های متحرک نظیر Ca^{2+} ، Na^{+} و K^{+} است، در حالی که افزایش آن نشان‌دهنده حذف این عناصر و غنی‌شدگی نسبی Al در محصولات هوازدهی می‌باشد. در شرایط اقلیمی مرطوب‌تر، هوازدهی شدیدتر موجب تشکیل کانی‌های رسی غنی از آلومینیوم مانند کائولینیت می‌شود، در حالی که در شرایط خشک، کانی‌های کم‌تغییرتر حفظ می‌گردند. بنابراین CIA شاخصی مناسب برای تفکیک فازهای خشک و مرطوب در توالی رسوبی ابرکوه محسوب می‌شود. این الگو با نتایج مطالعات انجام‌شده در سایر محیط‌های بسته قاره‌ای مطابقت دارد. برای نمونه، سان و همکاران (۲۰۱۹) در رسوبات هولوسن دریاچه چنگهای و ما و همکاران (۲۰۲۴) در دریاچه زیگتانگ فلات تبت نشان دادند که شاخص‌های هوازدهی شیمیایی می‌توانند تغییرات رطوبتی و نوسانات اقلیمی گذشته را در حوضه‌های بسته ثبت کنند. بنابراین، تغییرات CIA در رسوبات ابرکوه را می‌توان بازتابی از تغییرات نسبی رطوبت و شدت هوازدهی در طول کواترنر دانست.

مقادیر شاخص PIA نیز تفسیر مشابهی ارائه می‌دهد و نشان‌دهنده هوازدهی محدود پلاژیوکلازها در رسوبات منطقه است. پایین بودن این شاخص بیانگر آن است که تبدیل پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی به‌طور کامل رخ نداده و رسوبات تحت تأثیر شرایطی با محدودیت آب، زمان کوتاه تماس آب-رسوب و انتقال نسبتاً سریع از منبع به حوضه قرار داشته‌اند. این ویژگی در محیط‌های خشک معمول است و با نتایج مطالعات انجام‌شده در مناطق خشک و سرد جهان همخوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که افزایش رطوبت و دمای مؤثر موجب تشدید هوازدهی شیمیایی و تغییر ترکیب ژئوشیمیایی رسوبات می‌شود (Yang et al., 2021).

نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که شاخص‌های CIA و PIA دارای روابط معنی‌داری با برخی اکسیدهای اصلی هستند. هر دو شاخص بیشترین همبستگی مثبت را با Al_2O_3 نشان دادند CIA: $r=0.97$ ، PIA: $r=0.96$ و $p<0.01$ ، در حالی که با CaO رابطه منفی بسیار قوی مشاهده شد: CIA: $r=-0.94$ ، PIA: $r=-0.93$ و $p<0.01$. این الگو بیانگر نقش افزایش نسبی آلومینیوم و کاهش کلسیم در طی فرآیندهای هوازدهی شیمیایی است. همچنین رابطه بسیار قوی بین CIA و PIA ($r=0.99$ ، $p<0.01$) نشان‌دهنده روند مشابه این دو شاخص در نشان‌دادن تغییرات شدت هوازدهی رسوبات کواترنری کویر ابرکوه است.

علاوه بر شاخص‌های هوازدهی، تغییرات ترکیب عناصر اصلی و نسبت‌های عنصری نیز اطلاعات مهمی درباره شرایط محیطی گذشته فراهم می‌کند. افزایش نسبی Ca و ترکیبات کربناته در برخی بخش‌های توالی رسوبی نشان‌دهنده توسعه شرایط تبخیری، افزایش تمرکز املاح محلول و گسترش محیط‌های پلایایی است. در حوضه‌های بسته، تغییرات کوچک در تعادل هیدرولوژیکی می‌تواند باعث تغییرات قابل توجه در سطح آب، شوری و نوع رسوب‌گذاری شود. بر این اساس، تغییرات ژئوشیمیایی مشاهده‌شده در چاله ابرکوه نشان‌دهنده تناوب بین دوره‌هایی با ورودی آب

پیرامونی موجب افزایش ورود آب و مواد آواری و توسعه شرایط دریاچه‌ای کم‌عمق شده است؛ در مقابل، در دوره‌های خشک‌تر، کاهش بارش و افزایش تبخیر باعث عقب‌نشینی پهنه آبی، افزایش شوری و تشکیل رسوبات تبخیری شده است. بنابراین، توالی رسوبی مورد مطالعه تصویری از گذار تدریجی یک سیستم دریاچه‌ای-پلایایی فعال به یک محیط خشک و فوق‌خشک را ثبت کرده است. در مجموع، نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های CIA، PIA، ترکیب اکسیدهای اصلی و نسبت‌های عنصری نشان می‌دهد که رسوبات کفه کویری ابرکوه آرشیوی ارزشمند از تغییرات اقلیمی و محیطی کواترنر در ایران مرکزی هستند. اگرچه ترکیب سنگ منشأ و ویژگی‌های زمین‌شناسی مناطق پیرامونی در کنترل اولیه ژئوشیمی رسوبات نقش داشته‌اند، اما تغییرات منظم شاخص‌های هوازدگی و عناصر حساس محیطی نشان می‌دهد که اقلیم و تغییرات هیدرولوژیکی مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تکامل این رسوبات بوده‌اند. بر این اساس، چاله کویری ابرکوه می‌تواند به‌عنوان یکی از رکوردهای مهم پالئواقلیمی در محیط‌های خشک ایران مرکزی برای بازسازی نوسانات اقلیمی کواترنر مورد استفاده قرار گیرد.

بیشتر و شرایط دریاچه‌ای کم‌عمق و دوره‌هایی با کاهش سطح آب، افزایش تبخیر و توسعه شرایط پلایایی است. این چرخه‌های دریاچه‌ای-پلایایی در سایر حوضه‌های خشک ایران نیز گزارش شده است. تقوی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از عناصر حساس محیطی مانند Ca، Mg، Mn و Sr در تالاب گاوخونی نشان دادند که تغییرات ژئوشیمیایی رسوبات می‌تواند دوره‌های خشک و مرطوب کواترنر را ثبت کند. همچنین جلیلیان و همکاران (۱۴۰۱) بیان کردند که پلایای گاوخونی در اواخر کواترنر از شرایط مرطوب‌تر پلیستوسن پسین به سمت اقلیم خشک‌تر هولوسن متأخر تکامل یافته است. نتایج حاصل از چاله ابرکوه نیز با این روند سازگار بوده و نشان می‌دهد که حوضه‌های بسته ایران مرکزی در پاسخ به تغییرات اقلیمی منطقه‌ای، چرخه‌هایی از توسعه شرایط دریاچه‌ای موقت، افزایش تبخیر، تمرکز املاح و گذار به محیط‌های خشک پلایایی را تجربه کرده‌اند. از دیدگاه تکامل محیطی، چاله ابرکوه یک سیستم رسوبی حساس به تغییرات تعادل هیدرولوژیکی است که رسوبات آن حاصل برهم‌کنش میان اقلیم، هوازدگی، انتقال رسوب و فرآیندهای تبخیری هستند. در دوره‌های مرطوب‌تر، افزایش رواناب از ارتفاعات

منابع

۱. آدابی، محمد حسین (۱۳۹۰). ژئوشیمی رسوبی. تهران: انتشارات آرین زمین، چاپ دوم، ۵۰۳ صفحه.
۲. امجدی، صدیقه، محمودی قرائی، محمد حسین، موسوی حرمی، رضا، محبوبی، اسدالله، علیزاده کتک لاهیجانی، حمید (۱۳۹۲) ژئوشیمی عناصر اصلی رسوبات آواری دریای عمان در ناحیه چابهار با تأکید بر منشأ، شرایط آب و هوای قدیمه و جایگاه زمین ساختی، رخساره‌های رسوبی، ۶ (۱)، ۱۹-۳۰.
۳. بیات، مقصود، فتوحی، صمد، نگارش، حسین، محمدی، علی (۱۴۰۱). ژئوشیمی رسوبی به عنوان شاخص تغییرات اقلیم کواترنری پایانی در پلایای جازموریان. دوفصلنامه کواترنری ایران، ۸ (۱ & ۲)، ۵۶-۸۲.
۴. بهبهانی، رضا، لک، راضیه، چنانی، نادر، و غلامرضا حسین‌یار (۱۳۹۳). ژئوشیمی آلی رسوبات خورموسی و نواحی دریایی مجاور آن، شمال باختر خلیج فارس، علوم زمین، ۹۲ (۲۳)، ۵۵-۶۶.
۵. پورمعافی، مریم (۱۳۸۷). ژئوشیمی. تهران: انتشارات آرین زمین.
۶. تقوی، لعبت؛ طیبی، صفیه؛ طیبی، سبحان؛ کریمیان، بهرام (۱۳۹۲). تحلیل اقلیم دیرینه بخش شمالی تالاب گاوخونی با استفاده از ژئوشیمی عناصر اصلی و فرعی. اکویولوژی تالاب، ۵ (۱۶)، ۵۳-۶۲.

۷. جلیلیان، طاهره، تقیان، علیرضا، لک، راضیه، درویشی خاتونی، جواد (۱۴۰۱) رسوب‌شناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی رسوبی توالی کواترنری پایانی رسوبات بستر پلایای گاوخونی با نگاهی براقلیم دیرینه، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۲ (۴۷)، ۹۳-۱۱۴.
۸. زارع‌زاده، رضوان، رضائی، پیمان (۱۳۹۰). مطالعه ژئوشیمی و کانی‌شناسی پادگانه‌های آهکی دریایی منتسب به کواترنری جزیره قشم، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۲۷ (۴۴)، ۱۲۱-۱۳۸.
۹. شریفی پیچون، محمد، تاجبخش، غلامرضا (۱۳۹۸) تحلیل مورفوتکتونیک‌ی شکل‌گیری چاله‌های کویری دامنه‌های جنوبی و جنوب شرقی شیرکوه در پلیو-کواترنری، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۷۶ (۴)، ۱۹-۳۴.
۱۰. شعبانی عراقی، عارفه، عزیزی، قاسم (۱۴۰۲) بررسی تحولات رسوبی و اقلیم دیرینه براساس رسوب‌شناسی و آنالیز عنصری در پلایای دامغان، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۲ (۱)، ۹۵-۱۱۳.
۱۱. فیضی، وحید؛ عزیزی، قاسم؛ علی‌محمدیان، حبیب؛ ملاشاهی، مریم (۱۳۹۶). تحلیل اقلیم دیرینه برش رسوبی نوده (استان گلستان) با استفاده از ژئوشیمی عناصر. فصلنامه کواترنری ایران، ۳ (۱)، ۲۹-۳۹.
۱۲. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ابرکوه (۱۳۸۴)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور
13. Das, O. , Wang, Y. , Donoghue, J. , Xu, X. , Coor, J. , Elsner, J. , & Xu, Y. (2013). Reconstruction of paleostorms and paleoenvironment using geochemical proxies archived in the sediments of two coastal lakes in northwest Florida. *Quaternary Science Reviews*, 68, 142-153.
14. Dutton, S. P. , & Loucks, R. G. (2010). Diagenetic controls on reservoir quality of deep-water Lower Cretaceous Travis Peak sandstones, East Texas. *Journal of Sedimentary Research*, 80(4), 330-347.
15. Francke, A. , Holtvoeth, J. , Codilean, A. T. , Lacey, J. H. , Bayon, G. , & Dosseto, A. (2020). Geochemical methods to infer landscape response to Quaternary climate change and land use in depositional archives: A review. *Earth-Science Reviews*, 207, 103218.
16. Honda, M. , & Shimizu, H. (1998). Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan Desert sands. *Sedimentology*, 45(6), 1125-1143.
17. Ma, X. , Wang, X. , Gao, Y. , Yue, F. , & Chen, W. (2024). Geochemical indicators on the central Tibetan Plateau lake sediments: Historical climate change and regional sustainability. *Sustainability*, 16(18), 8186.
18. Maynard, J. B. (1992). Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. *The Journal of Geology*, 100(3), 279-289.
19. Morad, S. (Ed.). (1998). Carbonate Cementation in Sandstones: Distribution Patterns and Geochemical Evolution. International Association of Sedimentologists (IAS) Special Publication, Volume 26. Wiley-Blackwell.
20. Nesbitt, H. W. , & Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et cosmochimica acta*, 48(7), 1523-1534.
21. Sai, K. (2004). Geochemistry of lake sediments as a record of environmental change in a high arctic watershed. *Chemie der Erde*, 64: 257-275
22. Sun, W. , Liu, E. , Zhang, E. , & Shen, J. (2019). Geochemistry of the Holocene sediments of Lake Chenghai, SW China, and its implications for paleoenvironmental reconstruction. *Quaternary International*, 523, 80-88.
23. Rollinson, H. R. , 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, New York, PP. 352
24. Vyse, S. A. , Herzsuh, U. , Andreev, A. A. , Pestryakova, L. A. , Diekmann, B. , Armitage, S. J. , & Biskaborn, B. K. (2020). Geochemical and sedimentological responses of Arctic glacial Lake Ilirney, Chukotka (Far East Russia), to palaeoenvironmental change since ~51. 8 ka BP. *Quaternary Science Reviews*, 247, 106607.
25. Wang, G. -x. , Wang, Y. , Wei, Z. , He, W. , Zhang, T. , & Ma, X. (2020). Geochemical records of Qionghai Lake sediments in southwestern China linked to late Quaternary climate

- changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109902>
26. Wu, K. , Shi, X. , Lou, Z. , Wu, B. , Li, J. , Zhang, H. , ... Rahim Mohamed, C. A. (2021). Sedimentary responses to climate changes and human activities over the past 7400 years in the western Sunda Shelf. *Frontiers in Earth Science*, 9, 631815.
 27. Yang, Z. , Zhang, Y. , Xie, Z. , Wang, J. , Li, Z. , Li, Y. , ... Sun, L. (2021). Potential influence of rapid climate change on elemental geochemistry distributions in lacustrine sediments: A case study at a high Arctic site in Ny-Ålesund, Svalbard. *Science of the Total Environment*, 801, 149784.
 28. Fedo, C. M. , Wayne Nesbitt, H. , & Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10), 921-924.