Research Article

Iranian Journal of Range and Desert Research
Vol. 32, No. 1, Page 50- 70 (2025)

DOI: 10.22092/ijrdr.2025.133485

Investigating the geochemical characteristics of Hamoun Wetland sediments

Samira Zandifar[1*], Adele Jamalian[2], Farhad Khaksarian[3], Hamidreza Abbasi [4], Mohammad Reza Forudi Jahromi[5]

1*- Corresponding author, Assistant professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, Email: Zandifar@rifr-ac.ir
2- Assistant professor, Department of Geology, Faculty of earth Siences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3- Researcher, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
4- Assistant professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
5- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Dashtestan Branch, Islamic Azad University, Dashtestan, Iran

Received:03/05/2024 Revised:01/08/2025 Accepted: 03/11/2025 Published: 04/07/2025

Abstract

Background and Objectives

Geochemical analyses provide valuable insights into sediment origin, transport mechanisms, weathering processes, sedimentary environments, and tectonic conditions. Identifying the sources of wind deposits and lake sediments is crucial for reconstructing environmental disturbances, assessing dust storm frequency, and understanding long-term landscape evolution. This study investigates the geochemical composition, sediment dynamics, and provenance of wind deposits in the Hamoun Sistan wetland, southeastern Iran, through geochemical analysis.

Methodology

A total of 20 surface sediment samples (0–30 cm depth) were collected based on geomorphological units and topographic maps. Samples were pulverized to 64 µm for analysis. Major oxide percentages and trace element concentrations were determined using a Philips PW2400 XRF (Rh-tube, accuracy: 0.01 wt%) and ICP-MS at the Binaloud Mines Laboratory (Tehran University Science and Technology Park). Data were normalized against the upper continental crust for comparison. Samples S1–S7 were collected from the southern basin, while S8–S20 were from the northern basin. The Ni/Sr ratio cumulative distribution diagram was used for classification, and multivariate clustering was performed using multi-resolution graph-based clustering (MRGC), an unsupervised method suitable for spatially undefined datasets.

Results

Sediments in the southern basin exhibit higher concentrations of detrital particles (quartz, fine-grained mica, and carbonates), supported by a strong correlation ($R^2 = 0.77$) between SiO_2 and Al_2O_3, indicating aluminosilicate dominance. In contrast, northern samples show elevated MgO, CaO, and Na_2O levels, suggesting mafic/ultramafic source rocks, along with high Fe_2O_3 concentrations indicative of iron-bearing minerals (e.g., biotite, amphibole).

Northern sediments, rich in quartz, feldspar, and mica, align with intermediate igneous rock

Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijrdr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

compositions, implying an igneous origin. Southern samples, dominated by quartz and feldspar, reflect sedimentary recycling and higher maturity (classified as arenites), whereas northern sediments are greywackes.
Trace element analysis reveals greater enrichment of Rb, Ba, and Sr in northern samples, while high-field-strength elements (Th, U, Hf, Zr) remain immobile. Lower Ni, Cr, and V concentrations in southern samples indicate minimal mafic influence, supported by higher LREE/HREE ratios, consistent with felsic-rich sources.
Tectonic discrimination places northern sediments in an active continental margin setting, while southern samples exhibit transitional active-passive margin characteristics.

Conclusion

Geochemical and petrographic analyses reveal distinct sediment provenances for the northern and southern Hamoun wetlands. Northern sediments derive from erosion of eastern Afghan Hamoun Basin rocks (active margin), whereas southern sediments originate from western passive margin sources. These findings highlight the wetland's complex sedimentological history and provide a basis for future soil erosion and dust storm management.

Keywords: Dust, geochemistry, sediment, Sistan, tectonics.

بررسی خصوصیات ژئوشیمیایی رسوبات تالاب هامون هیرمند

سمیرا زندی‌فر[۱*]، عادله جمالیان[۲]، فرهاد خاکساریان[۳]، حمیدرضا عباسی[۴] و محمدرضا فرودی جهرمی[۵]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پست الکترونیک: Zandifar@rifr-ac.ir

۲- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- کارشناس پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴- استادیار پژوهشی ، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۵- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دشتستان، دانشگاه آزاد اسلامی، دشتستان، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۲/۱۵ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۱۲/۲۱ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸

چکیده

سابقه و هدف

آنالیزهای ژئوشیمیایی می‌توانند اطلاعات مفیدی را در مورد منشأ رسوبات، نحوه انتقال آنها، هوازدگی، محیط رسوبی و شرایط تکتونیکی نشان دهند. شناسایی منشأ نهشته‌های بادی و رسوبات دریاچه‌ای یکی از عوامل مهم برای بازسازی آشفتگی‌های محیطی و شناخت فراوانی طوفان‌های گردوغبار است و برای درک تکامل بعدی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از اجرای این پژوهش، درک وضعیت ژئوشیمی، دینامیک و سازوکارهای حرکت رسوبات و تعیین منشأ نهشته‌های بادی تالاب هامون سیستان در جنوب‌شرق ایران براساس تجزیه‌وتحلیل ژئوشیمیایی است.

مواد و روش‌ها

در مجموع ۲۰ نمونه رسوبات سطحی (تا عمق ۳۰ سانتی متری) براساس واحدهای ژئومورفولوژیکی و نقشه‌های توپوگرافی برای شناسایی منشأ و ترکیب تالاب هامون جمع‌آوری شدند. نمونه‌های انتخاب شده برای آنالیز ژئوشیمیایی تا ۶۴ میکرومتر پودر گردیدند. درصد عمده اکسیدها و غلظت عناصر به ترتیب توسط دستگاه XRF مدل PhilipsPW2400 مجهز به Rh-tube با دقت ۰/۰۱ درصد وزنی و ICP-MS در آزمایشگاه مواد معدنی کانساران بینالود مستقر در پارک علم و فناوری پردیس دانشگاه تهران اندازه‌گیری شد. برای مقایسه بهتر نتایج آنالیز نمونه‌های رسوبی با یک استاندارد جهانی، مقادیر اندازه‌گیری شده برای اکسیدهای اصلی عناصر کمیاب در هر نمونه، به مقادیر متوسط همین عناصر در پوسته قاره بالایی نرمال گردید. نمونه‌های S1 تا S7 از جنوب حوضه و S8 تا S20 از شمال منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. برای طبقه‌بندی نقاط از نمودار توزیع تجمعی نسبت Ni/Sr استفاده شد. برای خوشه‌بندی نمونه‌ها، از نتایج آنالیز ژئوشیمیایی استفاده شده است. به‌طورکلی، برای پیش‌پردازش مجموعه داده‌های چند متغیره با توزیع فضایی ناشناخته، یک روش بدون نظارت تقسیم‌بندی داده‌ها ترجیح داده می‌شود. خوشه‌بندی مبتنی بر گراف با وضوح چندگانه (MRGC) یکی از روش‌های پذیرفته شده برای این پژوهش است.

نتایج

نتایج نشان می‌دهد که رسوبات در بخش جنوبی حوضه حاوی غلظت بالاتری از ذرات رسوبی آواری مانند کوارتز و میکای ریزدانه و کربنات است. وجود ترکیب آلومینوسیلیکات در نمونه‌ها با توجه به ضریب تعیین ۰/۷۷ بین SiO_2 و Al_2O_3 تأیید می‌شود. غلظت بالای CaO،MgO و Na_2O در نمونه‌های شمالی نشان‌دهنده حضور کانی‌های مافیک و فرامافیک در سنگ‌های منشأ است. همچنین، غلظت بالای Fe_2O_3 در این نمونه‌ها، حکایت از حضور کانی‌های آهن‌دار مانند بیوتیت و آمفیبول دارد. نمونه‌های شمالی، با توجه به حضور دانه‌های کوارتز، فلدسپات و میکا و قرارگیری در محدوده سنگ‌های آذرین با ترکیب متوسط، منشأ آذرین دارند. این نشان می‌دهد که

بخش قابل توجهی از رسوبات شمالی از تخریب سنگ‌های آذرین مشتق شده‌اند. در مقابل، نمونه‌های جنوبی عمدتاً از کوارتز و فلدسپات تشکیل شده‌اند که نشان‌دهنده منشأ رسوبی آنهاست. این نمونه‌ها به عنوان سنگ آرنایت طبقه‌بندی می‌شوند که نشان از بلوغ رسوبی بالاتر نسبت به نمونه‌های شمالی دارد.
آواری‌های قسمت جنوبی به عنوان سنگ آرنایت طبقه‌بندی می‌شوند، در حالی که نمونه‌های قسمت‌های شمالی گری‌وک هستند. نمونه‌های شمالی در محدوده سنگ‌های آذرین با ترکیب متوسط قرار گرفته‌اند. بنابراین برخاستگاه رسوبات با توجه به حضور دانه‌های کوارتز و فلدسپات و میکا منسوب به سنگ‌های آذرین است. در حالی که منشأ نمونه‌های جنوبی مربوط به سنگهای آذرین فلسیک می‌باشد. غنی‌سازی Rb، Ba و Sr در نمونه‌های قسمت شمالی در مقایسه با نمونه‌های قسمت جنوبی بیشتر است. در مقابل، عناصر با قدرت میدان بالا (HFSE) Th، U، Hf، و Zr غیرمتحرک هستند. کاهش مقادیر نیکل، کروم و وانادیم در نمونه‌های بخش جنوبی نشان‌دهنده اثر کم از منشأ مافیک است. همچنین، نسبت بالاتر LREE/HREE سنگ‌های منبع غنی از فلسیک را برای نمونه‌های جنوبی نشان می‌دهد. نمونه‌های شمالی در حاشیه فعال قاره و نمونه‌های قسمت جنوبی بین محیط حاشیه فعال و غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند.
نتیجه‌گیری
تجزیه‌وتحلیل شیمیایی ۲۰ نمونه جمع‌آوری شده از تالاب نشان داد که نمونه‌های بخش شمالی و جنوبی تالاب از نظر ترکیبات شیمیایی تفاوت‌های قابل توجهی با هم دارند. با بررسی دقیق‌تر این داده‌ها و مطالعه میکروسکوپی نمونه‌ها (پتروگرافی)، مشخص شد که رسوبات این دو بخش منشأهای متفاوتی دارند. رسوبات بخش شمالی تالاب عمدتاً از فرسایش سنگ‌های مناطق شرقی‌تر مانند حوضه هامون در افغانستان و حاشیه فعال قاره به وجود آمده‌اند. در مقابل، رسوبات بخش جنوبی منشأ غربی‌تر دارند و از فرسایش سنگ‌هایی در حاشیه غیرفعال قاره تشکیل شده‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مواد رسوبی در تالاب از مناطق مختلفی با ویژگی‌های زمین‌شناسی متفاوت منشأ گرفته‌اند. این اطلاعات می‌تواند در مطالعات آینده برای پیش‌بینی فرسایش خاک و مدیریت مشکلات ناشی از گردوغبار مفید باشد.

واژه‌های کلیدی: گردوغبار، سیستان، رسوب، تکتونیک، ژئوشیمی.

مقدمه

طوفان‌های شن و گردوغبار پدیده‌ای رایج در سراسر محیط‌های بیابانی جهان هستند و باعث تخریب جدی زیست محیطی، اقلیمی، اقتصادی و ایجاد مخاطرات سلامتی برای جوامع انسانی می‌شوند (Goudie, 2014). ازاین‌رو، مطالعه گردوغبارهای بیابان در ارتباط با مسائل مربوط به کیفیت آب و هوا، محیط‌زیست و سلامت انسان حیاتی است. پدیده گردوغبار از سالیان نه چندان دور سرزمین ایران را به‌ویژه در غرب و جنوب‌شرق متأثر کرده است. اخیراً به دلیل فراوانی بالای رخداد این پدیده، مسئله گردوغبار بسیار جدی تلقی شده و توجه همگان به‌ویژه محققان را در این زمینه به خود جلب کرده است. پدیده گردوغبار معلول علت‌های متعددی است که عوامل محیطی و انسانی زمینه‌ساز آن بوده‌اند (Goudie and Middleton, 2001). وزش بادهای ناحیه‌ای و منطقه‌ای در نواحی مستعد گردوغبار موجب پراکنش ذرات گردوغبار معلق در هوا می‌شوند و ضررهای جانی، مالی و محیط‌زیستی را در این مناطق موجب می‌گردند (Prospero *et al*, 2002). مطالعه رسوبات بادی عهد حاضر که در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک نهشته شده‌اند، یک گام اساسی برای درک تکامل محیطی و توسعه پایدار است (Jiang and Yang., 2019). از این‌رو، شناسایی رسوبات و ژئوشیمی آن‌ها به منظور افزایش دانش ما در مورد سازوکارهای تولید گردوغبار مهم است تا بتوانیم راهبردهای مناسب برای کنترل و جلوگیری از توزیع آنها را برنامه‌ریزی کنیم (Parris *et al*., 2010). رسوبات بادی که در محیط‌های دریاچه‌ای ته‌نشین شده‌اند، شاخص خوبی برای مطالعه اقلیم دیرینه هستند(An *et al*., 2012). بنابراین باید به رسوبات بادی به دلیل پیامدهای محیطی و ژئومورفولوژیکی آن‌ها توجه ویژه‌ای شود (Jiang and Yang., 2019). به منظور بازسازی منشأ رسوبات بادی، باید سهم هریک از عوامل

حاکم بر رفتار رسوبات از منبع شناسایی شود (Schneider, 2016). آنالیزهای ژئوشیمیایی می‌تواند اطلاعات مفیدی را در مورد منشأ، انتقال رسوب، هوازدگی، محیط رسوبی و شرایط تکتونیکی نشان دهد (McLennan *et al*., 1993; Bhatia 1983). تغییرات محیطی، سنگ‌شناسی سنگ منشأ، توپوگرافی، هوازدگی و سازوکارهای انتقال رسوب باعث تغییرات قابل‌توجهی در ترکیب کانی‌شناسی و شیمی سنگ‌های آواری می‌شوند (Ling *et al*., 2021). همچنین، تجزیه‌وتحلیل ترکیبات شیمیایی مختلف می‌تواند شرایط تکتونیکی مختلف منشأ را نشان دهد (Zaid and Gahtani., 2015; Pang *et al*., 2022). بنابراین، ویژگی‌های ژئوشیمیایی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد شرایط اقلیمی و شرایط تکتونیکی منطقه مورد بررسی ارائه دهد. عناصر اصلی، کمیاب و کمیاب خاکی، گزینه‌های خوبی برای شناسایی ترکیب شیمیایی نهشته‌های بادی هستند (Jiang and Yang., 2019, Wu *et al*., 2023). سیستان بخشی از قلمرو ساختاری–رسوبی در شرق ایران است که ریخت‌شناسی متنوعی بر آن حاکم است. دو فرونشست تکتونیکی لوت و جازموریان، مناطق پست و فروافتاده استان هستند و دو قله آتشفشان تفتان و بزمان بلندی‌های استان را تشکیل می‌دهند. ویژگی‌های ریخت‌شناسی سیستان در همه جا یکسان نیست. سیمای کنونی زمین در منطقه سیستان نتیجه تحولاتی است که در طی دوره‌های سه‌گانه زمین‌شناسی (پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک) و پیش از آن دستخوش فرایندهای زمین‌ساختی و نهشت و فرسایش قرار گرفته است. وضعیت زمین‌شناسی آن نیز در نتیجه این تحولات زمین‌شناختی مانند کوه‌زایی، خشکی‌زایی، گسلش، نهشت رسوبات و فرسایش آنها در ادوار مختلف بوده است. هریک از پدیده‌های زمین‌شناسی نام‌برده دارای ویژگی‌ها و تأثیرات خاصی بوده که وضع زمین‌شناسی سیستان متأثر از همین ویژگی‌ها می‌باشد (Middleton, 1986, 2019). این منطقه با وجود تپه‌های ماسه‌ای متعدد و طوفان‌های شن و گردوغبار فراوان، به عنوان یکی از مناطق مستعد فرسایش بادی در ایران شناخته می‌شود(Whitney, 2007) ، که این موضوع بر روی رسوبات دریاچه و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه تأثیر بسزایی داشته است. رسوبات دریاچه‌ای، به عنوان بایگانی طبیعی تغییرات محیطی، اطلاعات ارزشمندی در مورد فرایندهای مختلف زمین‌شناسی مانند فرسایش، رسوب‌گذاری و تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهند. با مطالعه دقیق ترکیب شیمیایی، کانی‌شناسی و اندازه ذرات این رسوبات، می‌توان به اطلاعاتی در مورد منشأ رسوبات، شرایط آب و هوایی گذشته و فرایندهای انتقال رسوب، ازجمله فرسایش بادی، دست یافت. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه، یعنی حوضه آبریز دریاچه هامون در جنوب‌شرق ایران، تحت تأثیر شدید پدیده گردوغبار قرار دارد، بررسی ارتباط بین رسوبات دریاچه‌ای و فرایندهای فرسایش بادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تالاب هامون با مشکلات جدی ناشی از طوفان‌های گردوغبار مواجه است که بر فعالیت‌های انسانی، اکوسیستم و کیفیت هوا تأثیر می‌گذارد. مطالعات پیشین در این منطقه عمدتاً بر روی پدیده‌های مرتبط با گردوغبار مانند طوفان‌های شن و ماسه‌های بادی متمرکز بوده است (Hamzeh *et al*., 2016; Rashki and Kaskaoutis, 2012; Rashki *et al*., 2013; Abbasi *et al*., 2018a, b; Ebrahimi-Khusfi, *et al*., 2023). همچنین تأثیر بادهای ۱۲۰ روزه، بادهای گرم و خشک با سرعت بالا که به‌طور معمول از اواسط بهار تا اوایل پاییز در منطقه سیستان می‌وزند و با فرسایش خاک و انتقال حجم عظیمی از ذرات ریز به هوا، باعث ایجاد طوفان‌های گردوغبار شدید می‌شوند (Karimi *et al*., 2013)، بر افزایش پدیده گردوغبار و زندگی ساکنان سیستان (Alisofi *et al*., 2024, Vaezi *et al*., 2024) و مطالعه رسوب‌شناسی و تحلیل حساسیت منطقه به غبار (Jadidoleslami Ghalehno *et al*., 2024) و منشأیابی رسوبات بادی رودخانه‌ای و طوفانهای شن در دشت سیستان (Vaezipour and Azhdari Moghadam, 2011) مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، مطالعات ژئوشیمیایی در مورد بررسی ذرات رسوبی برای تعیین خاستگاه نهشته‌های بادی تالاب هامون تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، با تمرکز بر رسوبات دریاچه هامون، به دنبال بررسی ارتباط بین تغییرات در ترکیب

شیمیایی رسوبات دریاچه‌ای و خاستگاه تکتونیکی رسوبات هستیم. تغییرات ترکیب شیمیایی رسوبات دریاچه‌ای تحت تأثیر عوامل متعددی ازجمله فرایندهای فرسایش بادی، فعالیت‌های آبی و تغییرات اقلیمی قرار دارد. در نتیجه، برقراری یک ارتباط مستقیم و ساده بین این عوامل، به‌ویژه در محیط‌های تالابی که شرایط آنها به‌طور مداوم در حال تغییر است، دشوار می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند به درک بهتر فرایندهای زمین‌شناسی و محیطی در منطقه سیستان و پیش‌بینی تغییرات آینده کمک شایانی کند. با شناسایی دقیق منابع گردوغبار و عوامل مؤثر بر شدت فرسایش بادی، می‌توان اقدامات مدیریتی مناسب‌تری برای مقابله با پدیده گردوغبار و بهبود کیفیت زندگی ساکنان منطقه اتخاذ کرد.

مواد و روش

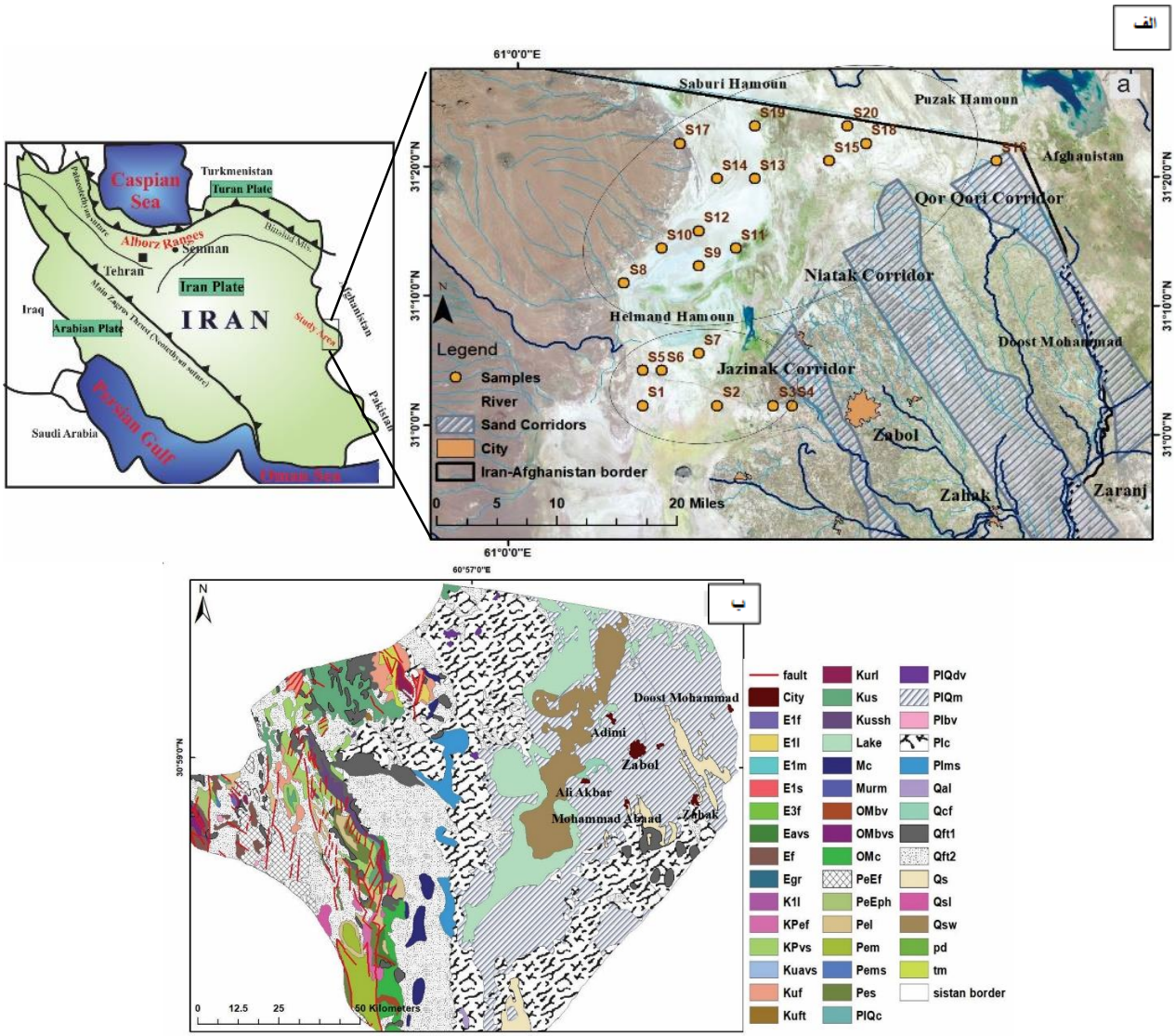
منطقه مورد مطالعه

حوضه سیستان، از نظر تکتونیکی، یک حوضه پس‌کششی (back-arc basin) محسوب می‌شود که در نتیجه فرورانش پوسته اقیانوسی عمان به زیر بلوک لوت شکل گرفته است. این حوضه در بخش غربی بلوک افغانستان قرار دارد و به بلوک لوت در مرکز ایران محدود می‌شود. موقعیت تکتونیکی خاص سیستان، آن را مستعد فعالیت‌های زمین‌ساختی مانند گسلش، چین‌خوردگی و زمین‌لرزه کرده است. وجود گسل‌های فعال متعدد در منطقه، ازجمله گسل نهبندان و گسل هریرود، بر پایداری و شکل‌گیری زمین‌ریخت‌شناسی حوضه تأثیر بسزایی داشته است (Broker *et al.*, 2022). زمین‌شناسی منطقه سیستان به دلیل قرارگیری در یک منطقه تکتونیکی فعال، بسیار پیچیده است. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که سنگ‌های منطقه عمدتاً از رسوبات آبرفتی، رسوبات تبخیری و سنگ‌های آذرین آتشفشانی تشکیل شده‌اند. سن این سنگ‌ها به دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، ازجمله نئوژن و کواترنر بازمی‌گردد (Broker *et al.*, 2022). منطقه سیستان با افغانستان، شهر زاهدان، استان خراسان جنوبی و بیابان لوت احاطه شده است. متوسط بارش‌ها در این منطقه ۶۵ میلیمتر و حداکثر، میانگین و حداقل دمای مطلق در این منطقه به ترتیب ۴۹، ۲۴ و ۷- درجه سانتیگراد است (Erfani, 2015). سیستان یک منطقه کلیدی برای واکنش متقابل هوای سرد ارتفاعات با هوای گرم و خشک دشت است که در آن بادهای قوی نزدیک سطح زمین برای حداقل چهار ماه از سال ادامه دارد. بادهای ۱۲۰ روزه اثرهای زیادی بر روی زمین‌ریخت‌شناسی و زندگی مردم ازجمله زمان آبیاری و فعالیت‌های کشاورزی منطقه دارد. تعامل اقلیم فراخشک با بادهای شدید موجب شکل‌گیری میزان بسیار زیاد تبخیر (بیش از ۴۰۰۰ میلی‌متر در سال) در منطقه می‌گردد که در زمره بیشترین میزان تبخیر در جهان است. تلفیق عوامل ذکرشده با خشکی رسوبات و فقدان پوشش گیاهی متراکم موجب شکل‌گیری طوفان‌های گردوخاک سهمگین در سیستان از اواسط بهار تا تابستان و اوایل پاییز می‌گردد. رودخانه هیرمند نقش مهمی در منطقه سیستان ایفا می‌کند. آب این رودخانه از ذوب برف‌های کوه‌های جنوب‌غربی هندوکش حاصل می‌شود. سه رودخانه کوچکتر نیز به نام‌های خاش، فراه و هاروت جریان‌های قابل توجهی دارند. دریاچه‌های هامون در مرز میان افغانستان و ایران و در محدوده ۶۰ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این دریاچه‌های تالابی از سه بخش عمده به نام‌های هامون پوزک، هامون صابری و هامون هیرمند تشکیل شده است. این تالاب‌ها در زمان پرآبی به هم متصل شده و به‌صورت یکپارچه درمی‌آیند و وسیع‌ترین دریاچه آب شیرین در ایران و افغانستان را به نام تالاب‌های هامون می‌سازند. این تالاب با مساحت ۴۰۰۰ کیلومتر مربع و عمق متوسط ۵ متر (در فصول پر آبی)، بزر گترین دریاچه آب شیرین کشور، سومین دریاچه بزرگ کشور پس از خزر و ارومیه و هفتمین تالاب بین‌المللی جهان است (Khaksefidi and Nora, 2008). وابستگی دریاچه هامون به رودخانه هیرمند باعث شده تا هرگونه نوسان در میزان آب آن، مشکلاتی را برای کل سیستم بوجود بیاورد.

داده و روش

در مجموع ۲۰ نمونه از رسوبات سطحی (تا عمق ۵ سانتی‌متری) براساس واحدهای ژئومورفولوژیکی (شامل دشت‌های آبرفتی، تپه‌های ماسه‌ای، کفه‌های نمکی و واحدهای کوهستانی) و نقشه‌های توپوگرافی به صورت رندوم برای شناسایی خاستگاه تکتونیکی ذرات رسوبی تالاب هامون جمع‌آوری شدند. رسوبات محل‌های نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شد که بخش‌های جنوب‌غربی، شمال‌غربی و غربی دالان‌های حرکت شن و ماسه را به عنوان مناطق تولید گردوغبار پوشش دهد (شکل ۱). نمونه‌های خشک غربال شده، مورد مطالعه پتروگرافی توسط میکروسکوپ بینوکولار قرار گرفتند. همچنین توزیع اندازه ذرات رسوبی تعیین شده است. در این پژوهش ذرات ریزتر از ۶۳ میکرون توسط الک در مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور و روش لیزری بوسیله دستگاه مدل Laser Scattering Particle Size distribution) Analyzer (Horiba -LA950) در مؤسسه ملی اقیانوس‌شناسی (پس از حذف مواد آلی، تجزیه با سدیم هگزامتافسفات، هم زدن به مدت ۲ ساعت و استفاده از اولتراسوند) مورد دانه‌سنجی قرار می‌گیرد. طبقه‌بندی ذرات بر مبنای مقیاس ونت ورث (Wentworth, 1922) انجام شده است. کلیه نمونه‌های جدا شده براساس اندازه در غربالگری مرطوب در آزمایشگاه زمین‌شناسی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور مورد تجزیه‌وتحلیل ژئوشیمیایی قرار گرفتند. درصد عمده اکسیدها و غلظت عناصر به ترتیب توسط دستگاه XRF مدل PhilipsPW2400 مجهز به Rh-tube با دقت ۰/۰۱ درصد وزنی و ICP-MS در آزمایشگاه مواد معدنی کانساران بینالود مستقر در پارک علم و فناوری پردیس دانشگاه تهران اندازه‌گیری شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها و غربالگری آنها، مراحل شامل خشک کردن، آسیاب کردن، همگن‌سازی و تهیه قرص برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای آنالیز انجام شده است. ابتدا نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا رطوبت اضافی آنها به‌طور کامل تبخیر شود. نمونه‌های خشک شده در آسیاب سیاره‌ای با اندازه ذرات کمتر از ۶۴ میکرومتر آسیاب شدند تا برای آنالیز با دستگاه‌های XRF و ICP-MS مناسب شوند. برای اطمینان از یکنواختی ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، پودر حاصل به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه شیکر مکانیکی تکان داده شد. از پودر همگن شده، قرص‌هایی با قطر و فشار یکسان برای آنالیز با دستگاه XRF تهیه شد. در فرایند آنالیز نمونه‌ها با دستگاه XRF، دستگاه با استفاده از استانداردهای مرجع گواهی شده کالیبره شد. قرص‌های تهیه شده در دستگاه XRF قرار گرفته و شدت پرتوهای ایکس ساطع شده از عناصر مختلف اندازه‌گیری گردید. با استفاده از نرم‌افزار دستگاه XRF و منحنی‌های کالیبراسیون، درصد اکسیدهای اصلی در نمونه‌ها محاسبه شد. در آنالیز با دستگاه ICP-MS، نمونه‌های پودر شده در اسید نیتریک غلیظ حل شده و بعد با آب مقطر رقیق شدند. دستگاه ICP-MS با استفاده از استانداردهای مرجع تک عنصری کالیبره شد. محلول‌های تهیه شده به داخل دستگاه ICP-MS تزریق شده و شدت امواج ساطع شده از یون‌های عناصر مختلف اندازه‌گیری گردید. با استفاده از نرم‌افزار دستگاه ICP-MS و منحنی‌های کالیبراسیون، غلظت عناصر کمیاب در نمونه‌ها محاسبه شد. کلیه مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، آنالیز و کنترل کیفیت داده‌ها مطابق با استانداردهای بین‌المللی و دستورالعمل‌های آزمایشگاه انجام شده است. برای ارزیابی اکسیدهای اصلی و عناصر کمیاب، همه مقادیر در برابر پوسته قاره بالایی نرمال شدند (McLennan, 2001). نمونه‌های S1 تا S7 از جنوب حوضه و S8 تا S20 از شمال حوضه انتخاب شدند. برای طبقه‌بندی نقاط از نمودار توزیع تجمعی نسبت Ni/Sr استفاده شد. برای بررسی تفاوت‌های ژئوشیمیایی بین نمونه‌های شمالی و جنوبی تالاب هامون و تعیین منشأ رسوبات، از نمودار هارکر استفاده گردید. در تهیه نمودار هارکر ابتدا ترکیب شیمیایی سنگ‌ها با استفاده از آنالیزهایی مانند XRF یا ICP-MS تعیین می‌شود. این آنالیزها مقدار اکسیدهای مختلف مانند

سیلیس، آلومینا، آهن، منیزیم، کلسیم، پتاسیم و سدیم را در سنگ مشخص می‌کند. سپس در مرحله نرمال‌سازی داده‌ها، غلظت اکسیدهای مختلف نسبت به سیلیس نرمال می‌شود. این کار سبب شده تا تغییرات نسبی در ترکیب سنگ‌ها بدون توجه به تفاوت در مقدار کل سیلیس مقایسه شود. در نهایت، مقادیر نرمال شده اکسیدها بر روی محورهای عمودی و سیلیس بر روی محور افقی نمودار ترسیم می‌شود.



شکل ۱– الف: محل‌های نمونه‌برداری رسوب در تالاب هامون، در جنوب‌شرقی ایران (نمونه‌های شمالی و جنوبی منطقه به‌وسیله بیضی از هم جدا شده‌اند). هاشور راهروها حرکت شن و ماسه را نشان می‌دهد (**Abbasi *et al.*, 2018**). ب: نقشه زمین‌شناسی دشت سیستان

Figure1-(a): Sediment sampling sites in the Hamoun Wetland, in south eastern of Iran (the north and south samples of the region are separated by ovals). Hatching parts show sand movement corridors (Abbasi et al., 2018). (b): Geological map of Sistan plain.

برای خوشه‌بندی نمونه‌ها از نتایج آنالیز ژئوشیمیایی استفاده شده است. به‌طورکلی، برای پیش پردازش مجموعه داده‌های چند متغیره با توزیع فضایی ناشناخته، یک روش بدون نظارت تقسیم‌بندی داده‌ها ترجیح داده می‌شود. خوشه‌بندی مبتنی بر گراف با وضوح چندگانه (MRGC) که توسط Ye و Rabiller در سال ۲۰۰۰ معرفی شد، یکی از روش‌های پرکاربرد برای تقسیم داده‌ها به گروه‌های همگن است. در این روش تعداد بهینه خوشه‌ها براساس تراکم داده‌ها تعیین می‌شود. تعداد زیادی خوشه پیشنهاد شده و تعداد بهینه توسط کاربر انتخاب می‌شود (Ye and Rabiller, 2005). همیشه یک وابستگی سلسله مراتبی وجود دارد. بنابراین، خوشه‌هایی با وضوح بالاتر (خوشه‌های کمتر) همیشه زیر خوشه‌هایی با وضوح پایین‌تر (خوشه‌های بیشتر) هستند. این با قانون سازماندهی رخساره‌ها در مطالعات زمین‌شناسی مطابقت دارد.

نتایج

پتروگرافی

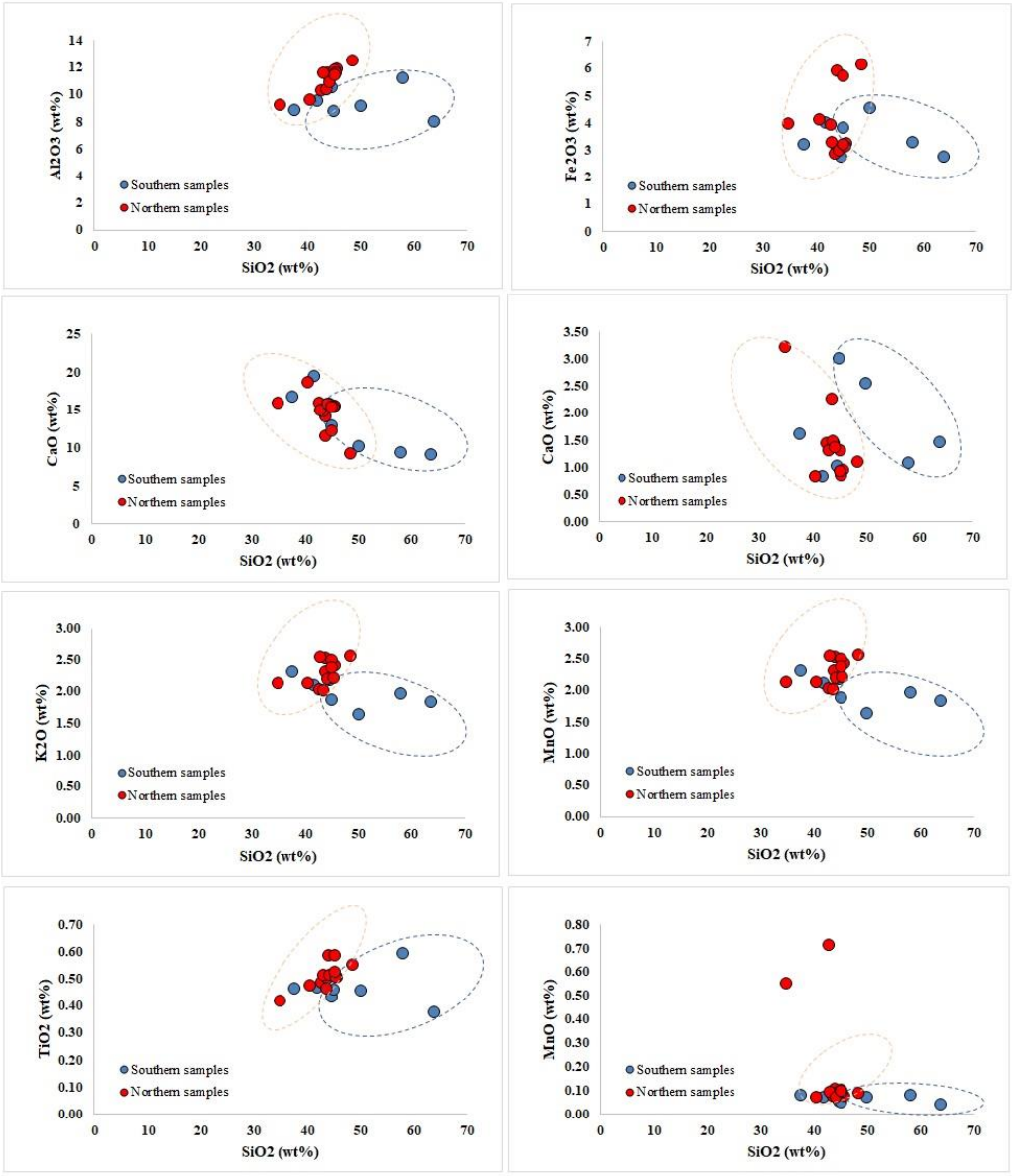
بررسی‌های پتروگرافی دو جزء اصلی ذرات رسوبی را در نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهند که شامل ذرات آواری و غیرآواری هستند. ذرات آواری بیشترین فراوانی را دارند و کوارتز، فلدسپات و میکا بر آن غالب هستند. دانه‌های کوارتز در نمونه‌های مورد مطالعه دارای گردشدگی متوسط بوده و به رنگ‌های قهوه‌ای، قرمز، خاکستری و سفید دیده می‌شوند. ذرات غیرآواری عمدتاً از جنس خرده‌های آهکی در اندازه‌های سیلت و رس، با رنگ قهوه‌ای کم‌رنگ تا خاکستری تیره مشاهده می‌شوند. البته توزیع ذرات رسوبی از قسمت شمالی تا جنوبی متفاوت است. توزیع اندازه ذرات رسوبی با روش پراش لیزری تخمین زده شده و فرکانس بالاتری از رس تا سیلت ریز را در قسمت شمالی حوضه نشان می‌دهد که به ترتیب حدود ۳۸٪ و ۳۱٪ را شامل می‌شود (جدول ۱). ذرات رسوبی باقی مانده از ماسه بسیار ریز حدود ۱۳ درصد، سیلت درشت تا متوسط ۹ درصد و خاک رس ۱۷ درصد تشکیل شده است. دانه‌های کوارتز درشت و گردشده در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه، جایی که میکاها نیز فراوان‌تر هستند، بیشتر دیده می‌شود. با حرکت به سمت قسمت غربی حوضه، فراوانی ذرات رسوبی درشت کاهش می‌یابد، در حالی که فراوانی ذرات رسوبی ریز افزایش پیدا می‌کند. رسوبات در بخش جنوبی حوضه حاوی غلظت بالاتری از ذرات رسوبی آواری مانند کوارتز و میکای ریزدانه و کربنات است. این منطقه همچنین دارای غلظت بالاتری از سیلت ریز و رس است که به ترتیب ۲۸ و ۲۰ درصد از کل ذرات رسوبی را تشکیل می‌دهد. در مقابل، هر دو منطقه شمالی و جنوبی حوضه حاوی ماسه متوسط تا بسیار ریز، سیلت درشت تا متوسط و رس به نسبت‌های مختلف هستند (جدول ۱). نقشه‌های تهیه شده توسط Zandifar و همکاران (۲۰۲۴)، در مورد پراکندگی ذرات رسوبی، اطلاعات ارزشمندی را در مورد توزیع فضایی ذرات در این محدوده مطالعاتی ارائه می‌دهند. باد به عنوان عامل اصلی جابه‌جایی ذرات ریز و کلوئیدی، نقشی کلیدی در توزیع فضایی آنها ایفا می‌کند. فراوانی ذرات ریز و کلوئیدی در جنوب‌غربی محدوده که تحت تأثیر بادهای غربی و جنوب‌غربی قرار دارد، به‌طور قابل توجهی بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که باد این ذرات را از مناطق دیگر به این منطقه منتقل کرده و در آنجا انباشته می‌کند (Zandifar *et al*., 2024).

جدول ۱- بافت، نام و اندازه ذرات رسوبی برای ۲۰ نمونه منتخب از رسوبات تالاب هامون
Table 1: Textural, Name and Grain-size for 20 selected samples of Hamoun Wetland sediments.

Samples	Samples Type	Textural Group	Sediment Name	Mean (μm)
S1	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	200.2
S2	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	166.5
S3	Unimodal, Poorly Sorted	Muddy Sand	Very Coarse Silty Very Fine Sand	102.8
S4	Trimodal, Very Poorly Sorted	Sandy Mud	Coarse Sandy Very Fine Silt	78.97
S5	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	155.1
S6	Trimodal, Poorly Sorted	Muddy Sand	Very Coarse Silty Coarse Sand	167.2
S7	Trimodal, Poorly Sorted	Muddy Sand	Coarse Silty Medium Sand	183.0
S8	Trimodal, Very Poorly Sorted	Muddy Sand	Very Coarse Silty Coarse Sand	131.5
S9	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	151.6
S10	Trimodal, Poorly Sorted	Muddy Sand	Very Coarse Silty Coarse Sand	153.1
S11	Trimodal, Poorly Sorted	Muddy Sand	Very Coarse Silty Coarse Sand	148.9
S12	Bimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	174.9
S12	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Fine Sand	197.8
S13	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	188.3
S15	Trimodal, Poorly Sorted	Muddy Sand	Fine Silty Coarse Sand	151.9
S16	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	168.8
S17	Bimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Fine Sand	192.6
S18	Bimodal, Moderately Sorted	Sand	Moderately Sorted Medium Sand	215.4
S19	Trimodal, Poorly Sorted	Sand	Poorly Sorted Coarse Sand	168.9
S20	Trimodal, Very Poorly Sorted	Muddy Sand	Very Coarse Silty Coarse Sand	146.9

ژئوشیمی

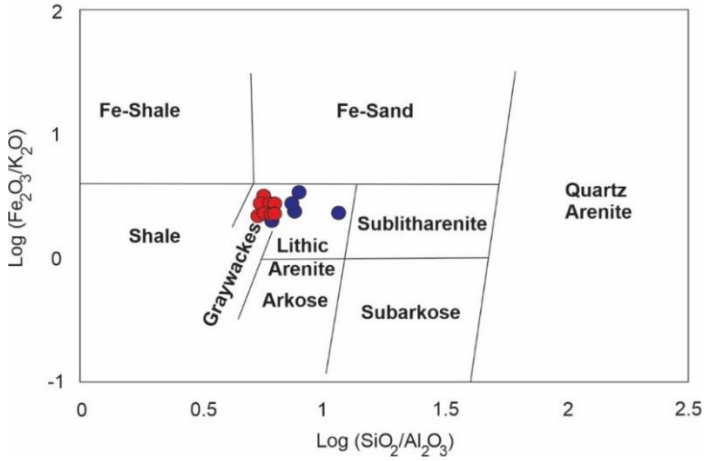
نتایج آنالیزهای XRF و ICP-MS تالاب هامون در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. غلظت‌های اکسیدهای اصلی نسبت به سیلیس نرمال شده و برای نشان دادن تفاوت‌های ژئوشیمیایی بین نمونه‌های شمالی و جنوبی بر روی نمودار هارکر ترسیم شده‌اند (شکل ۲). به‌طورکلی، غلظت SiO_2 در همه نمونه‌ها به‌جز نمونه S3 که غلظت آن ۶۳٪۹ است، پایین می‌باشد. نمونه‌های جنوبی حوضه نسبت به نمونه‌های شمال‌غربی و شمال‌شرقی، محتوای SiO_2 بالاتری دارند. نمونه‌های شمالی حاوی مقادیر بیشتری از اکسیدهای آهن(Fe_2O_3) ، پتاسیم (K_2O)، کلسیم (CaO) و منگنز (MnO)نسبت به نمونه‌های جنوبی هستند، در حالی که سدیم (Na_2O)و منیزیم (MgO) هیچ ارتباط مشخصی با سیلیس (SiO_2)نشان نمی‌دهند. این تفاوت‌ها احتمالاً به دلیل منشأ متفاوت نمونه‌هاست. نمونه‌های شمالی که احتمالاً از کمربندهای آذرین بلوک هیرمند افغانستان سرچشمه می‌گیرند، غنی‌تر از عناصر ناشی از کانی‌های ماگمایی هستند. در مقابل، نمونه‌های جنوبی که احتمالاً تاریخچه دگرسانی طولانی‌تری را پشت سر گذاشته‌اند، ممکن است در اثر فرایندهای دگرسانی، بخشی از عناصر خود را از دست داده یا ترکیبشان تغییر کرده باشد.



شکل ۲- تجزیه‌وتحلیل نمودار هارکر از عناصر اصلی

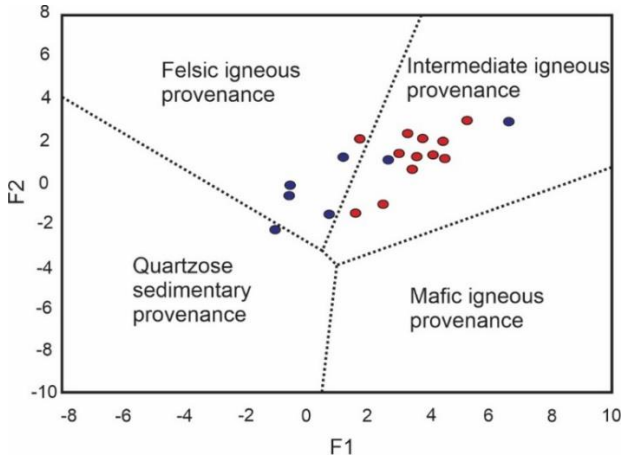
Figure2- Harker diagram analysis of the main elements

با توجه به نسبت‌های لگاریتمی اکسیدهای اصلی SiO_2/Al_2O_3 در برابر $Fe_2O_3/K2O$ که توسط هرون (Herron, 1988) پیشنهاد شد، نمونه‌های شمالی در شکل ۳ در بخش گری‌وکی رسم شده‌اند، در حالی که نمونه‌های جنوبی در ناحیه آرنایت طبقه‌بندی گردیده‌اند. همانطور که در شکل ۴ براساس نمودار Roser و همکاران (۱۹۸۶) نشان داده شده است، منشأ نمونه‌های شمالی متعلق به آذرین میانی است، در حالی که نمونه‌های جنوبی از منابع فلسیک منشأ می‌گیرند.



شکل ۳- طبقه‌بندی ژئوشیمیایی بادیان سیستان براساس لگ (SiO_2 / Al_2O_3) در مقابل لگ (Fe_2O_3 / K_2O) (Herron, 1988)

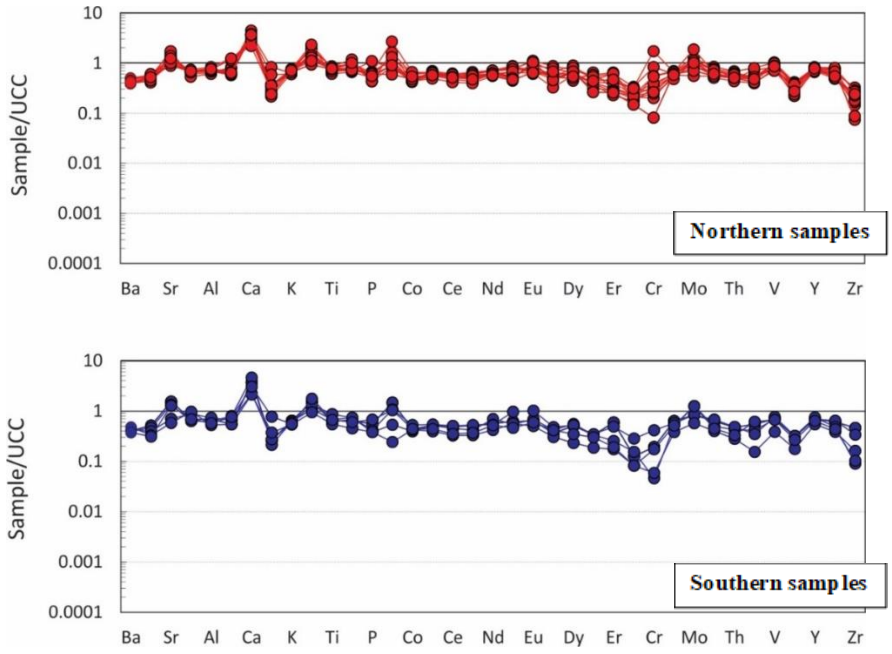
Figure 3- Geochemical classification of the Sistan Aeolians based on log (SiO_2 / Al_2O_3) versus log (Fe_2O_3 / K_2O) after (Herron, 1988)



شکل ۴- تابع تمایز نمونه‌های سیستان براساس عناصر اصلی ($F1=-1.773TiO_2 +0.607Al_2O_3 +0.76Fe_2O_3T- 1.5MgO+0.616CaO+0.509Na_2O-1.224K_2O-9.09$؛ $F2=0.445TiO_2+ 0.07TiO_2 + 0.07A.438CaO + 1.475Na_2O + 1.426K2O-6.861$).

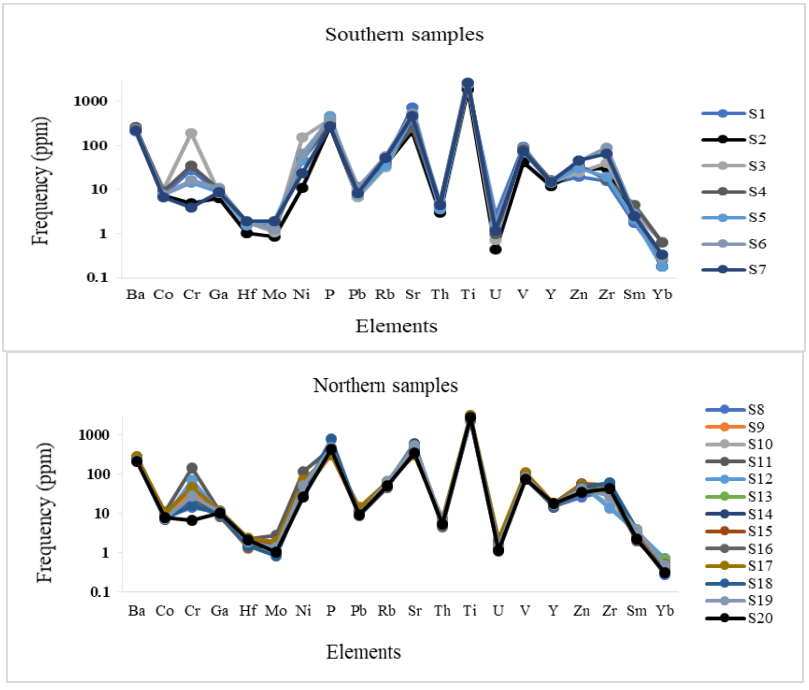
Fig. 4- Discrimination function of the Sistan samples based on major elements ($F1=-1.773TiO2 +0.607Al_2O_3 +0.76Fe_2O_3T- 1.5MgO+0.616CaO+0.509Na_2O-1.224K_2O-9.09$; $F_2=0.445TiO_2+ 0.07Al_2O_3-0.25Fe_2O_3T - 1.142MgO + 0.438CaO + 1.475Na_2O + 1.426K_2O-6.861$).

با بررسی غلظت عناصر کمیاب نرمال شده مشاهده می‌شود که نمونه‌های شمالی در عناصر Al، Fe، Ca، K، Mn و P غنی‌سازی نشان می‌دهند. علاوه بر این، عناصر غیر متحرک مانند Ba، Rb و Sr در قسمت شمالی در مقایسه با نمونه‌های جنوبی غنی‌تر هستند، همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، نمونه‌های جنوبی از نظر Ni، Cr، Si، Zr، Th، U، V و Hf غنی شده‌اند.



شکل ۵- عناصر کمیاب نرمال شده به UCC (پوسته قاره بالایی براساس MacLennan، ۲۰۰۱)

Figure 5- Normalized trace elements to the UCC (Upper continental crust based on MacLennan, 2001).



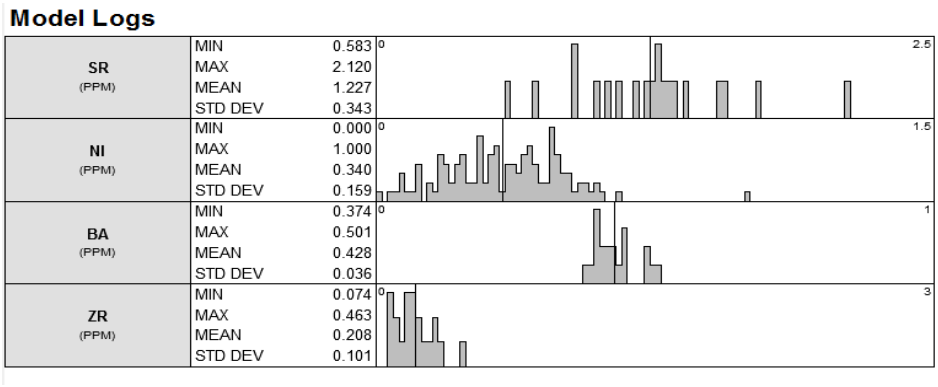
شکل ۶- نمودار تغییرات تحلیل عنصری در شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه

Figure 6- Diagram of changes in elemental analysis in the north and south of the studied area

میانگین غلظت عناصر خاکی کمیاب مانند La، Ce، Pr، Nd، Sm، Eu، Gd، Tb، Dy، Ho، Er و Yb در هر دو نمونه شمالی و جنوبی کمتر از مقادیر متوسط ۸۴/۵ ppm برای پوسته قاره‌ای بالایی (UCC) و ۶۷/۱۳ ppm برای شیل

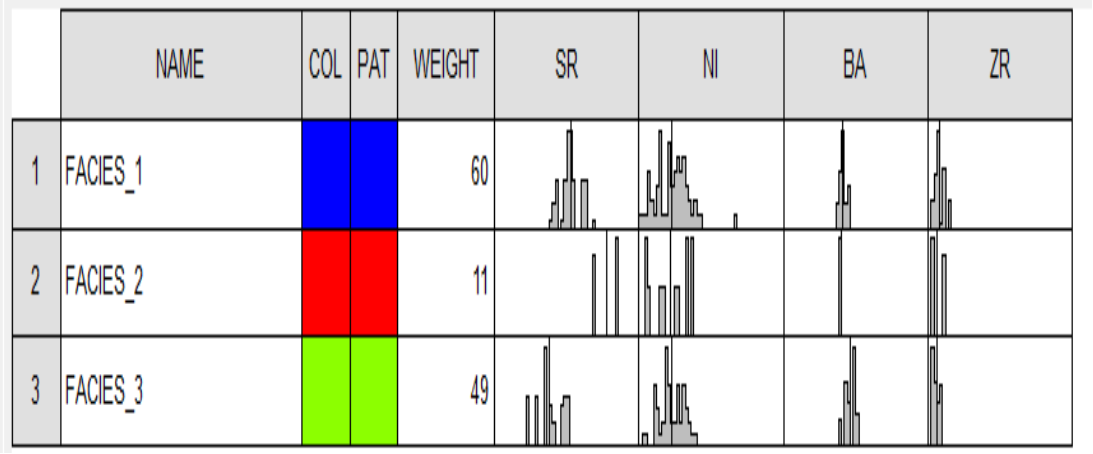
استرالیایی آرکئن پسین (PAAS) بود (شکل ۵). روند تغییرات عناصر در مناطق شمالی و جنوبی در شکل ۶ نشان داده شده است.

با در نظر گرفتن مشاهدات انجام شده در مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمیایی، نمونه‌هایی وجود دارند که شباهتی با نمونه‌های دیگر ندارند. انتخاب عناصر مهم برای تفکیک خوشه‌ها از بین تمامی نتایج ICP-MS و با استفاده از مطالعات پیشین می‌باشد. Teimurian و همکاران (۲۰۱۵) عنصر Ni را به منظور جداسازی منابع بادی مناسب شناختند. در مطالعه Najafi و Sadeghi (۲۰۱۳) عناصری همانند Sr, Zr, Ba به‌عنوان ترکیب بهینه معرفی شده‌اند. براساس نتایج حاصل از این مطالعات، ترکیب بهینه برای خوشه‌بندی یا جداسازی واحدهای زمین‌شناسی شامل چهار عنصر (Ba, Sr, Zr,Ni) است (شکل ۷)، بنابراین می‌توان از ترکیب یادشده، برای تعیین انواع واحدهای موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. بعد از تعیین داده‌های ورودی مناسب، با استفاده از روش MRGC از بین چهار نوع خوشه‌بندی ایجاد شده، خوشه‌بندی با ۱۲ دسته به‌عنوان بهترین خوشه‌بندی شناخته شد. در نتیجه با توجه به وزن هر خوشه از نظر خاستگاه، خوشه‌ها به سه خوشه اصلی تفکیک شدند (شکل ۸).



شکل ۷– داده‌های ژئوشیمیایی برای استفاده از روش MRGC

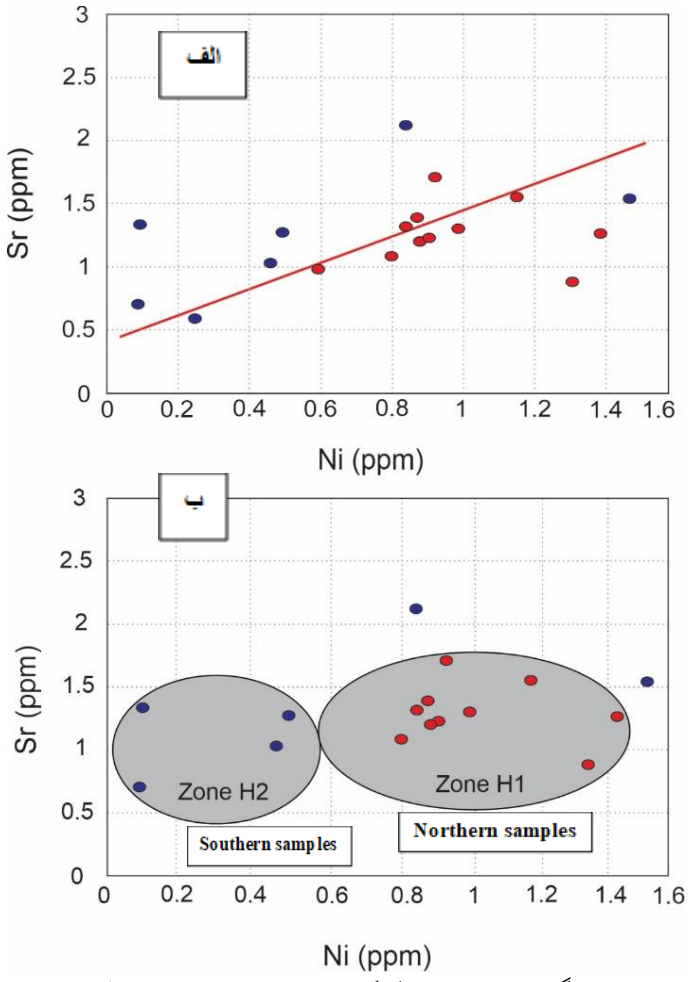
Figure 7- Geochemical data for using MRGC method



شکل ۸– طبقه‌بندی نهایی داده‌های ژئوشیمیایی با استفاده از روش MRGC

Figure 8- Final classification of geochemical data by using MRGC method

پس از تعیین خوشه‌های نهایی برای همبستگی داده‌ها، داده‌های ورودی Sr و Ni انتخاب شدند. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، ضریب همبستگی کلی پایین است، دلیل این همبستگی کم به دلیل ماهیت چند واحدی منطقه است. شکل ۹ جداسازی هر خوشه را نشان می‌دهد، با توجه به تفسیر نتایج تجزیه‌وتحلیل ICP-MS و با دقت مقادیر Sr و Ni، سه خوشه متناظر به هریک از مناطق با تمرکز بر نمودارهای عنکبوتی اختصاص داده شده است.



شکل ۹– الف: همبستگی عناصر. ب: تفکیک خوشه‌ای در نمودار متقاطع **Sr-Ni**

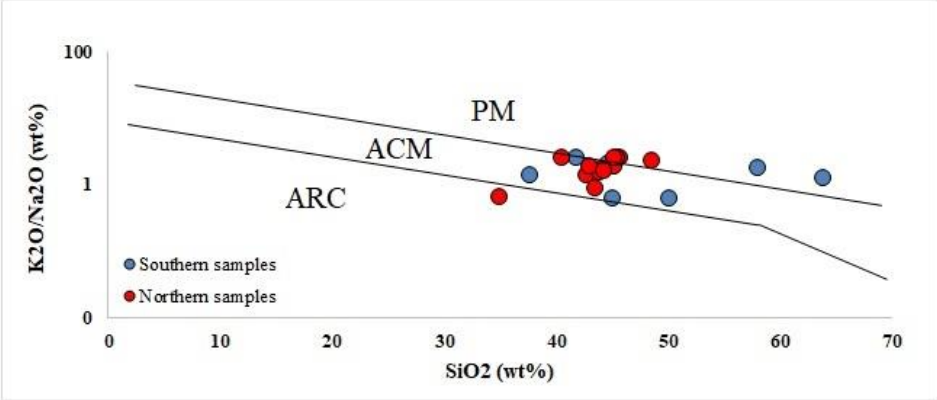
Figure 9- a: Element correlation. b: cluster segregation in the Sr-Ni cross plot

بحث

بررسی‌های ژئوشیمیایی و شناسایی منابع رسوبات بادی و دریاچه‌ای برای بازسازی تغییرات محیطی و تعیین فراوانی طوفان‌های گردوغبار بسیار مهم است (Ma *et al.*, 2016). با در نظر گرفتن کلیه اطلاعات جمع‌آوری شده از نمونه‌های مورد مطالعه، یافته‌های این تحقیق نشان داد که الگوی توزیع ذرات آواری در تالاب هامون از شرق به غرب متفاوت است و نشان‌دهنده جهت انتقال رسوب از شرق به غرب است. این موضوع منجر به رسوب ذرات درشت‌تر در قسمت شرقی حوضه و ذرات ریزتر در قسمت غربی شده است. همچنین این الگو در نواحی شمالی و جنوبی حوضه مشاهده شد. انتقال ذرات رسوبی درشت‌تر در بخش مرکزی حوضه به حداکثر خود رسیده، در حالی که بخش جنوبی عمدتاً از ذرات رسوبی ریزتر مانند خاک رس و ماسه بسیار ریز تشکیل شده است.

این الگو نشان می‌دهد که عوامل مختلفی ازجمله انرژی جریان آب، توپوگرافی بستر و میزان رسوب‌گذاری در توزیع اندازه ذرات رسوبی در منطقه نقش داشته‌اند. وجود ذرات رسوبی ریز مانند خاک رس در بخش جنوبی نشان می‌دهد که در این منطقه فرایندهای هوازدگی و دگرسانی بیشتر رخ داده است و احتمالاً کانی‌های رسی بیشتری نسبت به سایر مناطق تشکیل شده است. همچنین، وجود کانی‌های رسی خاص می‌تواند اطلاعاتی در مورد شرایط آب و هوایی و محیط رسوب‌گذاری در گذشته ارائه دهد. به‌طورکلی، نتایج نشان‌دهنده انتقال رسوبات از مناطق با انرژی بالاتر و شیب بیشتر به سمت مناطق با انرژی کمتر و شیب کمتر است. توزیع ذرات رسوبی به گونه‌ای است که ذرات درشت‌تر در قسمت شرقی و ذرات ریزتر در قسمت غربی و جنوبی حوضه رسوب کرده‌اند. این الگو نشان می‌دهد که یک نیروی قدرتمند مانند باد، ذرات درشت‌تر را به مسافت‌های طولانی‌تر منتقل کرده است. جهت غالب انتقال رسوب از شرق به غرب و شمال به جنوب است که با جهت وزش بادهای غالب در منطقه همخوانی دارد. اگرچه هر دو فرایند باد و جریان آب در انتقال رسوبات نقش دارند، اما با توجه به الگوی توزیع ذرات و جهت انتقال، نقش باد پررنگ‌تر به نظر می‌رسد. البته ارتباط این یافته‌ها با منشأ رسوبات طوفان‌های گردوغبار نیز قابل توجه است. طوفان‌های گردوغبار عمدتاً ذرات ریز و درشت را از مناطق خشک و بیابانی برداشته و به مناطق دیگر منتقل می‌کنند. الگوی توزیع رسوبات در تالاب هامون با الگوی توزیع رسوبات در مناطق تحت تأثیر طوفان‌های گردوغبار بسیار شبیه است. باد عامل اصلی ایجاد و انتقال طوفان‌های گردوغبار است و در عین حال، عامل اصلی انتقال رسوبات در تالاب هامون تشخیص داده شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که رسوبات در تالاب هامون عمدتاً منشأ بادی دارند و طوفان‌های گردوغبار نقش مهمی در انتقال این رسوبات به تالاب هامون دارند. باد به عنوان عامل اصلی انتقال رسوبات در این منطقه شناخته می‌شود. در نتیجه، این استنتاج بیشتر براساس شرایط جریان باد است. اگرچه نقش باد پررنگ‌تر است، اما نمی‌توان نقش فرایندهای هیدرولوژیکی را در انتقال برخی از رسوبات، به‌ویژه ذرات ریزتر، کاملاً نادیده گرفت. عوامل دیگری مانند توپوگرافی منطقه، پوشش گیاهی و تغییرات اقلیمی نیز می‌توانند بر الگوی توزیع رسوبات تأثیرگذار باشند. برای درک بهتر این فرایندها، نیاز به مطالعات دقیق‌تر و جامع‌تری است که در آن عوامل مختلف مؤثر بر انتقال رسوبات به‌طور دقیق بررسی شوند. به‌طور خلاصه، شواهد موجود نشان می‌دهد که باد عامل اصلی انتقال رسوبات در تالاب هامون بوده و این رسوبات احتمالاً منشأ بادی دارند. همانطور که در نمودارها مشخص است، ضریب تبیین ۰/۷۷ بین SiO_2 و AL_2O_3 نشان می‌دهد که نمونه‌ها حاوی ترکیب آلومینوسیلیکات در ترکیب خود هستند. همبستگی مثبت K_2O و Al_2O_3 در نمونه‌های شمالی، نشان‌دهنده وجود پتاسیم در ساختار کانی‌هایی مانند فلدسپات‌ها و میکاها است. غلظت بالای MgO،CaO و Na_2Oدر نمونه‌های شمالی، به‌طورکلی با SiO_2 همبستگی منفی نشان می‌دهد. این همبستگی منفی به‌ویژه در مورد CaO قوی‌تر بوده و می‌تواند نشان‌دهنده حضور کانی‌های کربناته باشد. با این حال، تفسیر همبستگی‌های دیگر باید با احتیاط انجام شود، زیرا فرایندهای زمین‌شناسی بسیار پیچیده هستند و عوامل متعدد بر ترکیب شیمیایی سنگ‌ها تأثیرگذارند. عوامل دیگری مانند دمای تشکیل، فشار، حضور سیالات و ...می‌توانند بر این همبستگی‌ها تأثیرگذار باشند. بنابراین، وجود همبستگی مثبت یا منفی بین اکسیدهای مختلف لزوماً به معنای رابطه علت و معلولی بین آنها نیست و نیاز به بررسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تری دارد. همبستگی مثبت Fe_2O_3 وجود کانی‌های رسی، کانی‌های آهن‌دار و میکادار را نشان می‌دهد که با مشاهدات پتروگرافی همخوانی خوبی دارند (Zandifar *et al.*, 2024). غلظت‌های بالای کلسیم، سدیم و پتاسیم وجود کانی‌های فلدسپات و میکا را نشان می‌دهد. از نظر ژئوشیمیایی، آواری‌های قسمت جنوبی به عنوان سنگ آرنایت طبقه‌بندی می‌شوند، در حالی که نمونه‌های قسمت‌های شمالی گری‌وک هستند. نمونه‌های شمالی در محدوده سنگ‌های آذرین با ترکیب متوسط (درجه اسیدی و بازی) قرار گرفته‌اند. بنابراین برخاستگاه رسوبات با توجه به حضور

دانه‌های کوارتز و فلدسپار و میکا منسوب به سنگ‌های آذرین است. در حالی که منشأ نمونه‌های جنوبی مربوط به سنگهای آذرین فلسیک می‌باشد. غنی‌سازی Rb، Ba و Sr در نمونه‌های قسمت شمالی در مقایسه با نمونه‌های قسمت جنوبی بیشتر است. فلدسپارها و رس غلظت این عناصر را در ترکیبات کنترل می‌کند (Tylor and McLennan, 1995). در مقابل، عناصر با قدرت میدان بالا (HFSE) Th، U، Hf، و Zr غیرمتحرک هستند و می‌توانند به عنوان یک نماینده برای شناسایی منشأ رسوبات و سنگ‌ها استفاده شوند (Taylor and McLennan., 1985). این عناصر در سنگ‌های فلسیک غنی شده‌اند (Feng and Kerrich, 1990). کانی‌های سنگین نیز یکی از منابع اصلی برای غلظت‌های بالای Zr، Hf، Th و U هستند. کاهش مقادیر نیکل، کروم و وانادیم در نمونه‌های بخش جنوبی نشان‌دهنده اثر کم از منشأ مافیک است. همچنین، نسبت بالاتر LREE/HREE سنگ‌های منبع غنی از فلسیک را برای نمونه‌های جنوبی نشان می‌دهد. برای اعتبارسنجی تحقیقات ژئوشیمیایی و پتروگرافی، از نمودار تابع تفکیک Roser و Korsch (۱۹۸۶) استفاده می‌شود. نمودار تفکیک مناطق تکتونیکی برای تمایز بین حاشیه غیرفعال، حاشیه فعال قاره و قوس قاره‌ای استفاده شده است. همانطور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، نمونه‌های شمالی در حاشیه فعال قاره ترسیم شده‌اند، در حالی که نمونه‌های قسمت جنوبی بین محیط حاشیه فعال و غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند.

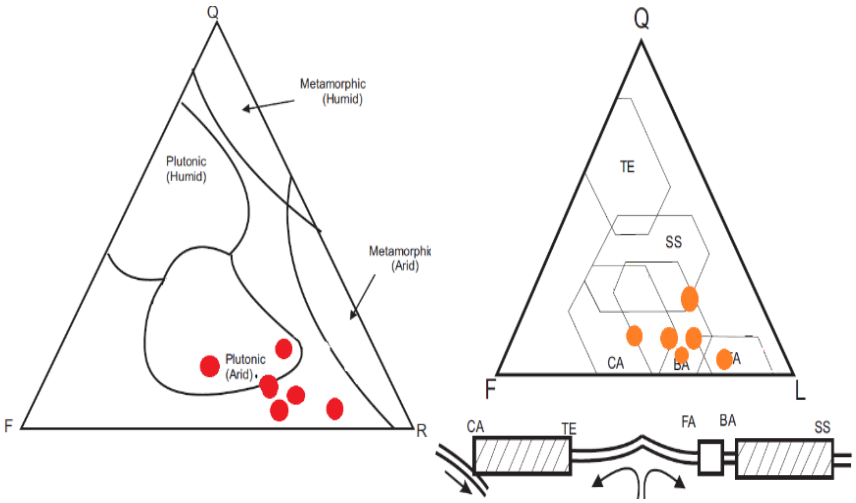


شکل ۱۰- نمودار تمایز تکتونیکی SiO_2 در برابر K_2O / Na_2O (Roser and Korsch, 1986)

مقادیر همه به درصد هستند. ARC: جزیره Arc، ACM: حاشیه قاره فعال، PM: حاشیه غیرفعال

Figure 10- Tectonic discrimination diagram of the SiO_2 against K_2O / Na_2O (Roser and Korsch., 1986). (PM) shown. The values are all percentages ARC: Island Arc, ACM: Active continental margin, PM: Passive margin.

وجود دو سیستم تکتونیک متفاوت و جنس متفاوت ورقه افغانستان با ورقه ایران در داده‌های ژئوشیمی قابل ردیابی می‌باشد. طبق نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده در این پژوهش، می‌توان آوردهای رسوبی، چه بادی و چه آبی را از دو منطقه خارج از کشور ایران و یک منطقه داخل ایران دانست. رسوبات جمع‌آوری شده از بخش‌های شمالی منطقه، منشأ یکسانی را از نظر سازوکارهای ژئوشیمی، تکتونیکی و حمل و نقل نشان دادند. نتایج حکایت از آن دارد که رسوبات این مناطق از بلوک هیرمند افغانستان منشأ می‌گیرد و توسط رودخانه‌های هیرمند و فراه به‌ترتیب به بخش‌های شمال‌شرقی و شمال‌غربی تالاب منتقل شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که رسوبات یافت شده در جنوب منطقه از کراتون داخلی و حاشیه قاره غیرفعال در ناحیه غرب تالاب هامون در ایران از مخروط‌افکنه‌های غربی سرچشمه می‌گیرند. شکل (۱۱) این توزیع را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- سمت چپ: تأثیر سنگ منشأ بر ترکیب رسوبات دریاچه هامون با استفاده از نمودار (Suttner *et al.*, 1981)

(ب): مثلث سمت راست: منشأ تکتونیکی رسوبات را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد (Yerino and Maynard, 1984). TE:

حاشیه قاره‌ای غیرفعال،SS: لغزش، CA: آرک قاره‌ای، BA: آرک پشتی، FA: آرک جلویی

Figure 11- (Left triangle): The effect of source rock on the composition of the Hamoun Lake sediments using Suttner et al. (1981) diagram. (Right triangle):) plots showing tectonic provenance of sediments in the study area. (Yerino and Maynard, 1984). TE: Passive Continental Margin, SS: Strike Slip, CA: Continental Arc, BA: Back Arc, FA: Fore Arc

به‌طور خلاصه، یافته‌های حاصل از بررسی‌های پتروگرافی و ژئوشیمیایی نهشته‌های تالاب هامون، بینش ارزشمندی را در مورد منشأ و انتقال رسوب در این منطقه نشان می‌دهد. همبستگی بین عناصر مختلف، روند جهت‌گیری انتقال رسوب و شناسایی مجموعه کانی‌های خاص به درک بهتر دینامیک زمین‌شناسی حوضه کمک می‌کند. نتایج این پژوهش با یافته‌های حاصل از بیابان‌های اوردوس (Chen *et al.*, 2021) همخوانی دارد. این یافته‌ها پیامدهایی برای فرایندهای رسوبی منطقه‌ای دارند و می‌توانند به عنوان پایه‌ای برای تحقیقات آینده در منطقه عمل کنند. با درک بهتر منشأ و نحوه انتقال رسوبات در تالاب هامون، می‌توان مدل‌های دقیق‌تری برای پیش‌بینی تغییرات محیطی در آینده و برنامه‌ریزی برای مدیریت پایدار منابع آب و خاک در این منطقه ارائه داد.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی «ژئوشیمی و منشأیابی رسوبات دریاچه‌های دشت سیستان» با کد مصوب ۱۲۴-۰۹-۰۹-۱۰۱-۹۹۰۶۲-۹۹۱۴۲۴ با بهره‌مندی از اعتبارات مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور انجام شده است. بدینوسیله نویسندگان از معاون محترم پژوهشی و همکاران آزمایشگاه خاک بخش تحقیقات بیابان مؤسسه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

References

– Abbasi, H., Gohardoust, A., Khaksarian, F., ganjali, M. 2018a. Morphologic characteristics of aeolian deposits and erosive winds in Sistan plain, Desert Management, 5(10): 28-42. doi: 10.22034/jdmal.2018.30648

– Abbasi, H., Opp, C., Groll, M.; Rohipour, H., Khosroshahi, M., Khaksarian, F.,Gohardoust, A.

2018b. Spatial and temporal variation of the aeolian sediment transport in the ephemeral Baringak Lake (Sistan Plain, Iran) using field measurements and geostatistical analyses. Z. Geomorphol, 61: 315–326. doi: 10.1127/zfg/2018/0451.

– Alisofi, M., Asghari Lafmejani, S., Heidary Mokarrar, H., & Pirani, M., 2024. Analysis of the effects of 120-day winds and dust storms on the livability of rural settlements (case study: Hirmand county), The Journal of Geographical Research on Desert Areas, 133-148. doi: 10.22034/grd.2024.20084.1578

– An, F., Ma, H., Wei, H., and Lai, Z. 2012. Distinguishing aeolian signature from lacustrine sediments of the Qaidam Basin in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and its palaeoclimatic implications. Aeolian Research, 4: 17-30. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.12.004

– Bhatia, M. R. 1983. Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones. Journal of Geology, 91: 611-27.

– Bröcker, M., Hövelkröger, Y., Rad, G. F., Berndt, J., Scherer, E. E., Kurzawa, T., & Moslempour, M. E., 2022. The magmatic and tectono-metamorphic history of the Sistan suture zone, Iran: New insights into a key region for the convergence between the Lut and Afghan blocks. Journal of Asian Earth Sciences, 236: 105313. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105313

– Chen G, Dong Z, Li C, Shi W, Shao T, Nan W and Yang J. 2021. Provenance of Aeolian Sediments in the Ordos Deserts and Its Implication for Weathering, Sedimentary Processes. Front. Earth Sci. 9:711802. doi: 10.3389/feart.2021.711802.

– Ebrahimi-Khusfi, Z., Zandifar, S., Ebrahimi-Khusfi, M., Tavakoli, V. 2023. Heavy metal mapping, source identification, and ecological risk assessment in the International Hamoun wetland, Sistan region, Iran. Environ Sci Pollut Res, 30, 29321–29335. https://doi.org/10.1007/s11356-022-23989-4

– Erfani, M., Afrougheh, S, Ardakani, T., Sadeghi, A., 2015. Tourism positioning using decision support system (case study: Chahnime—Zabol, Iran). Environ Earth Sci 74, 3135–3144. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4365-z

– Feng, R., Kerrich, R. 1990. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada: implications for provenance and tectonic setting. Geochimica et Cosmochimica Acta 54: 1061–1081. https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90439-R

– Goudie, A.S., Middleton, N.J. 2001. Saharan Dust Storms: Nature and Consequences. Earth-Science Reviews, 56, 179-204. https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00067-8

– Goudie, A.S. 2014. Desert Dust and Human Health Disorders. Environment International, 63, 101-113. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011

– Hamzeh, M.A.; Mahmudy-Gharaie, M.H.; Alizadeh-Lahijani, H.; Moussavi-Harami, R.; Djamali, M.; Naderi-Beni, A. 2016. Paleolimnology of Lake Hamoun (E Iran): Implications for past climate changes and possible impacts on human settlements. Palaios, 31: 616–629. 10.2110/palo.2016.055

– Herron, M. M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. Journal of Sedimentary Research, 58(5), 820-829. https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D

– Jadidoleslami Ghalehno, M., Asghari Sar Eskanrood, S., Abedini, M., & Mostafa Zadeh, R., 2024. Sedimentology of wind deposits in Sistan plain (east of Zahk city) and determination of wind erosion intensity. Geography and Human Relationships, 6(3): 566-579. (In Persian). 10.22034/gahr.2023.399609.1885

– Jiang, Q., Yang, X. 2019. Sedimentological and Geochemical Composition of Aeolian Sediments in the Taklamakan Desert: Implications for Provenance and Sediment Supply Mechanisms. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 124, 1217–1237. Doi: 10.1029/2018JF004990.

– Karimi, M., Yazdani, M., Naderi, A. 2013. The effect of 120-day winds on the safety of Sistan region, Geography and Environmental Planning, 24(2): 111-128. (In Persian).

– Khaksefidi, A., and Nora, N. 2008. Effects of dry water of Hirmand river on environmental issues of Sistan region and Hamoun wetland. The First International Conference on Water Crisis. (In Persian).

– Ling, Z., Li, J., Jin, J., Wang, J., Kong, F., Chen, L. 2021. Geochemical characteristics and provenance of aeolian sediments in the Yarlung Tsangpo valley, Southern Tibetan Plateau, Environ Earth Sci, 80, 623. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09928-5.

– Ma X., Zuo H., Tian M. Zhang L., Meng J., Zhou X., Min N., Liu Y. 2016. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques, Chemosphere, 144: 264-272. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.026.

– McLennan, S.M., Bock, B., Compston, W., Hemming, S.R., McDaniel, DK. 2001. Detrital zircon geochronology of Taconian and Acadian foreland sedimentary rocks in New England. J Sed Res, 71:305-317. https://doi.org/10.1306/072600710305

- McLennan, S.M., Hemming, S., McDaniel, DK., Hanson, G.N. 1993 Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. Geol Soc Am Spec Paper, 284:21-40. https://doi.org/10.1130/SPE284-p21.
- Middleton, N. 1986. A geography of dust storms in south-west Asia. Journal of Climatology, 6: 183-196.
- Middleton, N. 2019. Variability and Trends in Dust Storm Frequency on Decadal Timescales: Climatic Drivers and Human Impacts. Geosciences, 9: 261.
- Najafi, S., and Sadeghi, SHR. 2013. Estimation of sediment sources through comparing results from soil erosion mapping, fingerprinting and field measurement techniques, Watershed Engineering and Management, 5(3): 165-178. (In Persian). doi: 10.22092/ijwmse.2013.101817.
- Pang, Y., Wu, B., Gao, J. 2022. Provenance of aeolian sand in the Kumtag Desert, northwestern China, inferred from geochemical data. Arab J Geosci 15, 1415. https://doi.org/10.1007/s12517-022-10658-
- Parris, A.S., Bierman, P.R., Noren, A.J., Prins, M.A., Lini, A. 2010. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States. Journal of Paleolimnology, 43: 29-49.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., and Gill, T. E. 2002. Environmental Characterization Of Global Sources Of Atmospheric Soil Dust Identified With The Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (Toms) Absorbing Aerosol Product, Rev. Geophys., 40, 1002, https://doi.org/10.1029/2000RG000095
- Rashki, A., Kaskoutis, DG. Rautenbach, CJ.deW, Eriksson, PG., Qiang, M., Gupta, P. 2012. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. Aeolian Res; 5:51–62. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.12.001.
- Rashki, AR., Kaskaoutis, DG., Goudie, AS., Kahn, RA. 2013. Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. Sci Total Environ, 463–464:552–64. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.045
- Roser, B.P., Korsch, R.J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO2 content and K2O/Na2O ratio. J. Geol. 94: 635–650. https://doi.org/10.1086/629071
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. Chem. Geol. 67: 119–139. https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1.
- Schneider, S., Hornung, J., Hinderer, M., Garzanti, E. 2016. Petrography and geochemistry of modern river sediments in an equatorial environment (Rwenzori Mountains an Albertine rift, Uganda) – implications for weathering and provenance. Sediment. Geol. 336: 106–119. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.02.006.
- Suttner, LJ. Basu, A., Mack, GH. 1981. Climate and the origin of quartzarenites. J Sediment Petrol, 51:1235–1246.
- Teimurian, T., Feiznia, S., Seyedalikhani, S., Samadi arghini, H. 2015. Susceptibility assessment to erosion in the Fashand Catchment using mineralogical and geochemical methods. E.E.R; 5 (3):47-60. (In Persian). URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-220-fa.html
- Taylor, S.R., McLennan, S.M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, London, 312 pp.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. (1995). The geochemical evolution of the continental crust. Review of Geophysics 33: 241-65.
- Vaezi, A., Shahbazi, R., Sheikh, M. 2024. Environmental pollution and human health risks associated with atmospheric dust in Zabol City, Iran. Air Qual Atmos Health . https://doi.org/10.1007/s11869-024-01582-7
- Vaezipour, H.A., & Azhdari Moghadam, M. 2011. The origin of fluvial sediments and sandstorms in the Sistan plain. 4th Iran Water Resources Management Conference.
- Wentworth, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The journal of geology, 30(5): 377-392.
- Whitney, J. 2007. Geology, Water, and Wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghanistan. Scientific Investigations Report, 2006e5182. USGS, Virginia, p. 40. https://doi.org/10.3133/sir20065182.
- Wu P, Xie Y, Li Y, Kang C, Chi Y, Sun L, et al. 2023. Provenance variations of the loess deposits in the East Asian monsoon boundary zone, Northeast China: Response to the variations of climate and wind regimes. Catena. 222:106804. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106804.
- Ye, S.J., Rabiller, Ph., 2000. A new tool for electrofacies analysis: multi resolution graph based clustering. In: SPWLA 41 Annual Logging Symposium, June 4-7.
- Ye, S.-J., Rabiller, P. 2005. Automated electrofacies ordering, Petrophysics, 46(6): 409–423.
- Yerino, L. N., Maynard, J. B. 1984. Petrography of modern marine sands from the Peru-Chile Trench and adjacent areas. Sedimentology, 31:83–89.

https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb00724.x
– Zaid, S.M., Gahtani, F.A. 2015. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Hawkesbury sandstone (Middle Triassic), southern Sydney Basin, Australia. Turk. J. Earth Sci. 24: 72–98.
– Zandifar, S., Jamalian, A., Naemi, M. 2024. 'Analyzing the Sedimentological Parameters and Size Distribution Pattern in Hamoun Hirmand Sediments', Desert Management, 12(1):1-18. (In Persian). doi: 10.22034/jdmal.2024.2024636.1456