

Analyzing the Sedimentological Parameters and Size Distribution Pattern in Hamoun Hirmand Sediments

S. Zandifar^{1*}, A. Jamalian², M. Naeimi¹

1. Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangeland, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
2. Postdoctoral Researcher, Faculty of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

* Corresponding Author: Zandifar@rifr-ac.ir

Received date: 11/03/2024

Accepted date: 22/05/2024

 [10.22034/JDMAL.2024.2024636.1456](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2024636.1456)

Extended Abstract

Introduction

Sistan, located in the southeast of Iran, is one of the driest areas in the world that has been impacted by dust storms. The region characterized by a shortage of water resources and fragile ecosystems that are highly sensitive to climate change. Due to the lack of vegetation, this region is considered one of the windiest deserts in the world, with a high speed of wind erosion and sand movement. Sistan dust is believed to come from the sediments found in the Hamon Hirmand wetland in Sistan and Baluchistan province, yet there is little information available about their condition, which restricts our comprehension of the dynamics of wind-blown dust and the mechanisms of sediment movement. Identifying the characteristics and distribution pattern of sediments in the Hamon lagoon bed is the primary objective of this research.

Material and Methods

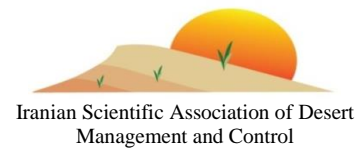
After the initial visit and determining the boundary of the study area, 271 sediment samples were taken from the depths of 30 cm and 60 cm in Hamon Sabri area and a part of Hamon Hirmand. The samples were granulated by a sieving machine and particles smaller than 0.063 microns were separated. The isolated samples were used for study with a Zeiss 47 2500-9901 binocular microscope and a lens with 4X magnification, grain measurement by sieve and laser. The size of the particles in the collected sediment samples ranges from 75 to 600 microns and they are sieved with sieves with a diameter of 25, 35, 50, 60, 80, 120, 140, 200 and smaller than 200 mesh. The sedimentology laboratory examined the texture (size, texture, circulation) and mineralogy of the samples after preparing them. In this research, particles smaller than 63 microns were measured by sieving and laser method using the Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer, Horiba-LA950 at the National Institute of Oceanography. The final step was to draw the zonings by interpolation in the Arc GIS 10.3 software environment.

Discussion and Conclusion



Desert Management

www.isadmc.ir



As the abundance of destructive particles shifts from east to west, the direction of sediment carrier flow is shifting from east to west of the region. This causes the eastern part to have larger particles. As we move further west in the studied area, we find that there is a greater amount of fine-grained clay particles and less destructive large-grained and well-circulated particles like quartz and unstable mica minerals. It is evident that there is a trend of changes from the north to the south of the studied area. The study's middle part has the maximum displacement of destructive coarse-grained particles, while the southern part is filled with particles ranging from sand to clay. It appears that the carrier flow's direction can be divided into two directions, north to south and west to east. At the top of the Lagoon, where the sediments are from multiple sources and the velocity is higher, coarse and fine particles are transported together, and sedimentation is weaker. By moving towards the center of the basin, the wind speed is decreased, and with the sediments coming from only one source, the settling will gradually improve. A trend has been observed in the Hamon wetland area that deviates from the defined path, but it can be justified. Wetland sediments are supplied by wind in addition to water, which indicates that there is weak sedimentation. The particles become more elongated as they move away from the border and towards the center of the basin. This shows that the sediments have suffered more erosion under the influence of wind and the long distance from the source. The wetland does not follow this trend. Due to the low water velocity and short distance from the source, particles tend to not have good elongation towards the center of the study area. The direction of the wind is indicated by tilts with low values in the samples under study. Moving away from the border and closer to the center of the basin causes a decrease in the multi-origin sediments and an increase in tilting degree. This research indicates that the particles are gradually becoming smaller and have a similar origin. A low degree of tilting is observed in the wetland part, which indicates that the sediments come from multiple sources and are blue in color. Three main breaking points have been observed in particles with sizes of 1, 2, and 3 ϕ . Different mechanisms have influenced the transport of sediment particles in the Sistan Basin, and they have different origins and are not of a single origin, as shown by this issue. Folk's gravel-sand-mud triangle indicates that the Sistan samples lie in the sand-mud axis, and their concentration is frequently at the top of the sand and mud of the Folk diagram. The clay particles of these samples contain the most colloidal particles in the southern part of Hamon Hirmand. The distribution map of clay particles shows that the northwest, center-west, and southeast of the studied area have the highest polymodal abundance. The southwest of the region has the least abundance observed. The study area's clay particle distribution method reveals that sediments originate from two regions in Afghanistan and an internal origin. Due to the windy nature of the feeding system in the west and southwest of the study area, fine and colloidal particles have the highest amount in this area and in the center of the study area, especially the wetland. Due to the multi-origin nature of the sedimentary system, Hamoun includes a wider range of particles in terms of size. The distribution of clay particles in the studied area shows that the sediments originate from two different regions. The findings of this research can help to improve the management of wind erosion in the sediment source areas and the sustainable development of the region.

Keywords: Sistan; Dust; Provenance; Sorting; Wind erosion





ارزیابی ویژگی‌های رسوب‌شناسی و الگوی توزیع اندازه رسوبات هامون هیرمند

سمیرا زندی فر^{۱*}، عادلہ جمالیان^۲، مریم نعیمی^۱

۱. استادیار بخش تحقیقات بیابان، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

۲. پژوهشگر پسادکتری، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: zaresalman@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲

doi [10.22034/JDMAL.2024.2024636.1456](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2024636.1456)

چکیده

یکی از خشک‌ترین مناطق جهان که زیر تأثیر توفان‌های گردوغبار قرار دارد، منطقه سیستان در شرق ایران است که منابع آبی کم و بوم‌سازگان شکننده آن نسبت به تغییرات اقلیمی بسیار حساس هست. با این حال، اطلاعات بسیار کمی در مورد وضعیت رسوبات در تالاب هامون هیرمند در استان سیستان و بلوچستان به‌عنوان منبع گردوغبارهای سیستان در دسترس است که درک ما را از دینامیک گردوغبار بادی و سازوکارهای حرکت رسوب محدود می‌کند. هدف اصلی پژوهش حاضر شناسایی ویژگی‌ها و الگوی توزیع رسوبات بستر تالاب هامون می‌باشد. بر این اساس پس از نمونه‌برداری از ۲۷۱ نقطه از رسوبات بستر تالاب، ذرات ریزتر از $63\mu\text{m}$ توسط الک و روش لیزری دانه‌سنجی و توزیع ذرات رسوب بررسی شدند. بررسی ویژگی‌های جوشدگی، کج‌شدگی و کشیدگی توسط روش فولک انجام شد و نقشه توزیع آن‌ها ترسیم شد. در منطقه مورد بررسی کج‌شدگی‌های با مقدار کم (۰.۱ تا ۱) نشان‌دهنده منشأ بادی هستند. با فاصله گرفتن از مرز تالاب و نزدیک‌تر شدن به مرکز حوضه ذرات کشیده‌تر می‌شوند و این نشان می‌دهد که رسوبات تحت تأثیر باد و طولانی بودن مسیر از منشأ، فرسایش بیشتری را متحمل شده‌اند. همچنین نتایج نشان داد که ذرات کلوئیدی در جنوب محدوده مورد بررسی در هامون هیرمند بیشترین فراوانی را در ذرات رسی این نمونه‌ها دارند. به‌علاوه به‌دلیل بادی بودن سیستم تغذیه در غرب و جنوب غربی تالاب، ذرات ریز و کلوئیدی بیشترین مقدار را در این محدوده دارند و در مرکز محدوده مطالعاتی و به ویژه دریاچه هامون به‌دلیل چند منشأ بودن سیستم آوردهای رسوبی، محدوده وسیع‌تری از ذرات از نظر اندازه را در برمی‌گیرد. شیوه توزیع ذرات رسی در محدوده مورد بررسی نشان می‌دهد که برخاستگاه رسوبات از دو منطقه متفاوت می‌باشد. این یافته‌ها می‌تواند به بهبود مدیریت فرسایش بادی در مناطق منبع رسوب کمک کند.

واژگان کلیدی: سیستان؛ گردوغبار؛ منشأ؛ جوشدگی؛ فرسایش بادی



■ مقدمه

منطقه سیستان در انتهای یک حوضه بزرگ داخلی در یکی از خشک‌ترین مناطق جهان قرار دارد. با توجه به وابستگی تالاب هامون به رودخانه هیرمند، هرگونه تغییری در میزان آب رودخانه، مشکلاتی را برای کل حوضه به وجود می‌آورد. حوضه هیرمند از سال ۱۳۷۸ با خشکسالی شدید روبرو بوده و پیامدهای ناگواری برای منطقه داشته است (۲۸). در دوره‌های خشکسالی، بستر تالاب‌ها و مخروط‌افکنه‌های رودخانه‌های شمالی به منبع تولید گردوغبار تبدیل شده و موجب وقوع توفان‌های شدید گردوغبار در منطقه می‌شوند (۲۲). سیستان به دلیل موقعیت جغرافیایی خود، نقطه کانونی برخورد هوای سرد ارتفاعات با هوای گرم و خشک دشت است. در این منطقه، بادهای قوی نزدیک سطح زمین حداقل به مدت چهار ماه از سال می‌وزند. این بادهای بسیار شدید که به نام بادهای ۱۲۰ روزه شناخته می‌شوند و سرعت آن‌ها گاه به 28 m/s می‌رسد، هم‌زمان با گرمای زیاد حوضه در اوایل خرداد آغاز و تا اواخر شهریور به طول می‌انجامد (۱۸). بادهای ۱۲۰ روزه تأثیرهای قابل توجهی بر طبیعت منطقه و زندگی مردم از جمله زمان آبیاری و فعالیت‌های کشاورزی دارند. این بادهای که بیشتر از سمت شمال و شمال غربی می‌وزند، ناشی از اختلاف فشار زیاد بین کمربند پرفشار دائمی در ارتفاعات شمالی و منطقه کم‌فشار تابستانی در دشت سیستان هستند. توپوگرافی خاص دشت سیستان با ایجاد کانال‌های هدایت باد بین ارتفاعات غربی، شمالی و شرقی بر سرعت این بادهای می‌افزاید. این بادهای زمانی که سرعت باد در ارتفاع زیر 1 km از سطح زمین افزایش یابد، شکل می‌گیرند. تعامل اقلیم فراخشک با بادهای شدید، موجب تبخیر بسیار زیاد و بیش از 4000 میلی‌متر در طی ۴ سال شده‌است که در زمره بیشترین نرخ‌های تبخیر در جهان است (۵). تلفیق عوامل فوق با خشکی رسوبات و همچنین فقدان پوشش گیاهی متراکم موجب شکل‌گیری توفان‌های گردوغبار سهمگین در سیستان از اواسط بهار تا تابستان و اوایل پاییز می‌گردد. بررسی رسوبات بادی عهد حاضر که در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک نهشته شده‌اند، یک گام اساسی برای درک تکامل محیطی و توسعه پایدار

است (۱۴، ۱۶، ۱۸). این منطقه به‌عنوان یکی از باد خیزترین بیابان‌های جهان شناخته می‌شود که سرعت فرسایش باد و حرکت ماسه در آن به دلیل کمبود پوشش گیاهی زیاد است (۲۹) و شهرستان زابل در جنوب غربی آسیا در حوزه سیستان بیشترین توفان‌های گردوغبار و غبارآلودترین روزهای جهان را تجربه کرده است (۱۹). فعالیت رسوبات بادی در منطقه سیستان اغلب وابسته به بادهای ۱۲۰ روزه است که در داخل چهار دالان فرسایشی بر اساس توپوگرافی سطح زمین از سطح تالاب هامون انجام می‌شود (۱، ۲). در اینجا نهشته‌های بادی نقش مهمی بر کیفیت ساکنان این منطقه، بوم‌سازگان، سلامت انسان و کیفیت هوا دارند. توفان‌های شن و گردوغبار ساکنان محلی و زیرساخت‌های اطراف تالاب را با مشکلات عدیده‌ای روبرو کرده است.

بررسی‌های کلی که در این منطقه منتشر شده است به بررسی رسوبات، غبار و ویژگی‌ها آن می‌پردازند (۲۲)، ارزیابی نقش باد محلی «لوور» بر غبارزایی (۵، ۶)، غلظت ذرات معلق (PM) و کیفیت هوا (۲۳)، کانی‌شناسی غبار و ترکیب شیمیایی آن‌ها (۲۴) و بررسی تأثیر خشکی دریاچه‌های هامون بر قرار گرفتن در معرض آن، اقتصاد محلی و بوم‌سازگان‌ها (۲۶)، بررسی‌های پیشین روی سوابق رسوبی در این منطقه عمدتاً بر توفان‌های گردوغبار عهد حاضر، تپه‌های ماسه‌ای (۲، ۲۶) و بررسی نهشته‌های بادی تالاب هامون در دوره هولوسن (۱۲) متمرکز است. پژوهش‌های متعددی در مورد رسوبات تالاب هامون هیرمند و پدیده گردوغبار در منطقه سیستان انجام شده است که در اینجا به بیان برخی از آن‌ها می‌پردازیم. در تحقیقی با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی و تلفیق داده‌های مختلف از جمله تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های آب و هوایی، خاک و توپوگرافی، با دقت بالایی حساسیت زمین در منطقه سیستان را نسبت به گردوغبار نقشه‌برداری کردند (۱۳). روشی مبتنی بر مدل‌سازی ایزوتوپی^۱ برای تفکیک منشأ گردوغبار اتمسفر پیشنهاد شد. با استفاده از این روش می‌توان سهم منابع مختلف گردوغبار از جمله تالاب هامون هیرمند را در نقاط مختلف تعیین کرد (۸). عزیزاده چوباری و همکاران (۵) به بررسی تأثیر گردوغبار بر شدت باد و جریان‌های جوی در منطقه سیستان پرداختند.

^۱ GLUE

رسوب‌شناسی و ارائه مدل‌های دقیق‌تر از نحوه توزیع و حرکت رسوبات در این مناطق مفید است.

برای درک بهتر توزیع دانه‌ها در رسوبات که به‌وسیله فرایندهای مختلفی پراکنده شده‌اند از تحلی‌های آماری استفاده شد. این تحلیل‌ها شامل محاسبه ویژگی‌های جورشدگی، کج‌شدگی و کشیدگی رسوبات می‌باشد. پژوهش حاضر باهدف تعیین شیوه پراکنش نهشته‌های بادی تالاب هامون در جنوب شرق ایران بر اساس تحلیل‌ها و بررسی‌های پتروگرافی انجام شده است. در پایان ویژگی‌های رسوب‌شناسی رسوبات بستر تالاب و نحوه توزیع آن‌ها در منطقه، مشخص و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

■ مواد و روش

منطقه مورد بررسی

منطقه سیستان شامل یک گودی وسیع به مساحت 61000 km^2 در بخش جنوب غربی حوضه هیرمند است. دلتای رود هیرمند و سه پهنه آبی فصلی به نام‌های هامون پوزک، هامون صابری و هامون هیرمند به ترتیب با وسعت 480 km^2 ، 800 km^2 و 561 km^2 این گودی را پوشانده‌اند. دریاچه‌های هامون در مرز بین ایران و افغانستان و در محدوده $31^{\circ}39'$ تا $61^{\circ}35'$ طول شرقی و $31^{\circ}15'$ تا $31^{\circ}32'$ عرض شمالی واقع شده‌اند. در زمان پرآبی این تالاب‌ها با هم متصل شده و وسیع‌ترین دریاچه آب شیرین در ایران و افغانستان را به نام تالاب‌های هامون می‌سازند. وسعت تالاب هامون در زمان پرآبی 5660 km^2 است که از این مقدار 382 km^2 متعلق به ایران و بقیه متعلق به افغانستان است.

از نظر زمین‌شناسی استان سیستان و بلوچستان بخشی از یک قلمرو ساختاری-رسوبی با مورفولوژی متغیر است و به چند زیرپهنه شامل زابل-زاهدان-سراوان، زابل، لوت، جازموریان، مکران تقسیم می‌شود (۳).

بر اساس تقسیم‌بندی کوپن اقلیم کشور ما به دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک تقسیم می‌شود (۲۱). همچنین مسعودیان با بررسی ۲۷ عنصر اقلیمی و اعمال خوشه‌بندی بر روی نواحی اقلیمی ایران، استان سیستان و بلوچستان در گروه بادی و غباری و تندری قرار گرفته است (۱۷). اقلیم

در بررسی دیگری آن‌ها (۶) نشان دادند که گردوغبار می‌تواند بر الگوهای باد و احتمال وقوع توفان‌های گردوغبار تأثیرگذار باشد. همچنین آن‌ها در سال ۲۰۱۴ (۷) به‌طور خاص به تأثیر بادهای ۱۲۰ روزه بر فعالیت توفان‌های گردوغبار در حوضه سیستان پرداختند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بادهای ۱۲۰ روزه نقش مهمی در برانگیختن گردوغبار و ایجاد توفان در منطقه دارند. نتایج بررسی تغییرات سطح آب تالاب هامون و ارتباط آن با فعالیت گردوغبار و کیفیت هوا (۲۲، ۲۴) نشان داد که کاهش سطح آب تالاب، موجب خشکی بستر تالاب و افزایش گردوغبار می‌شود. همچنین محققان در پژوهش دیگری، به بررسی ویژگی‌های توفان‌های گردوغبار و میزان بار غبار افقی آن‌ها در منطقه سیستان پرداختند (۲۲، ۲۵). این مطالعه به درک بهتر شدت و وسعت این پدیده کمک می‌کند. در بررسی جامع در مورد منشأ گردوغبار در جنوب غرب ایران از روش‌های پیشرفته برای تجزیه و تحلیل آن استفاده شد و به درک بهتر منشأ این ذرات در این منطقه کمک کرد (۴). در منطقه سیستان گردوغبار زیادی از حوضه هامون به سایر نقاط منتقل می‌شود. میزان این ذرات به مدت زمان توفان، سرعت باد و فاصله از کانون گردوغبار بستگی دارد. اندازه ذرات گردوغبار در ایستگاه‌های نزدیک‌تر به هامون درشت‌تر است و در ایستگاه‌های دورتر ریزتر می‌شود (۲۵).

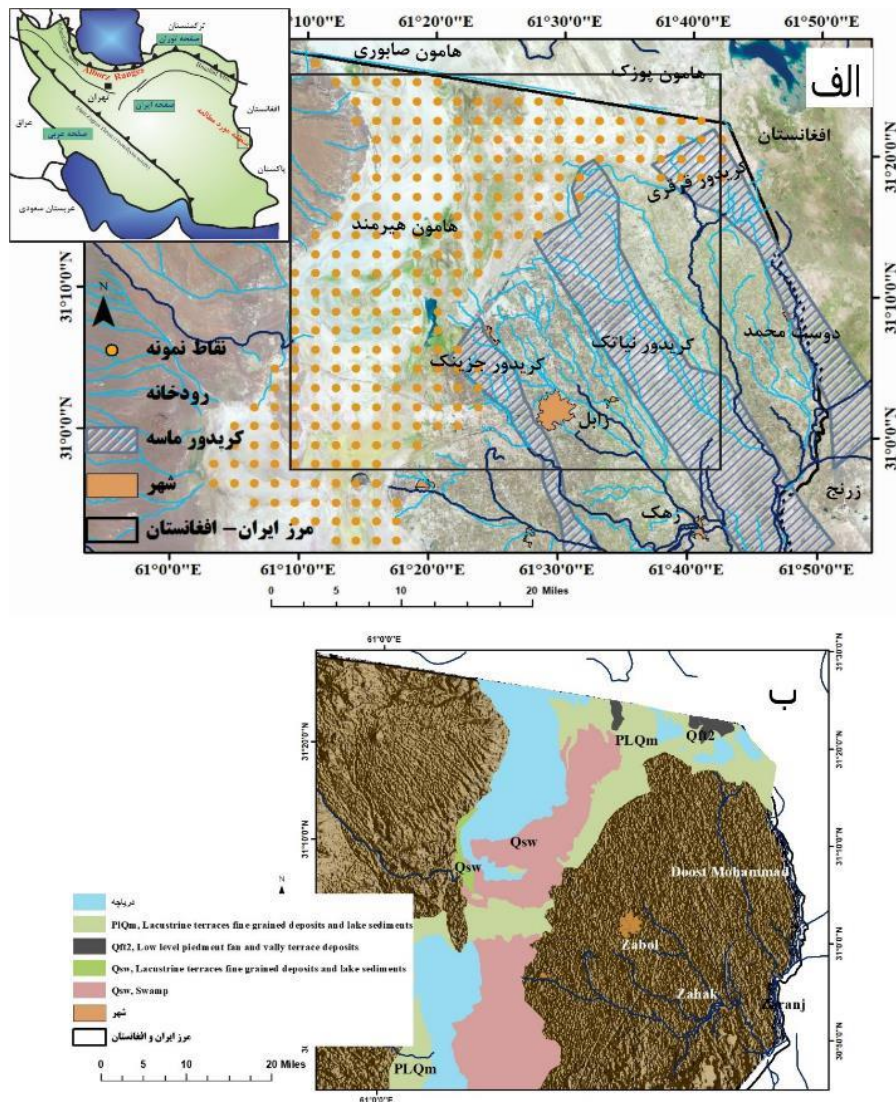
بررسی رسوبات تالاب هامون هیرمند می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در مورد منشأ این ذرات گردوغبار و نحوه انتشار آن‌ها در محیط ارائه دهد. این اطلاعات می‌تواند در تدوین راهکارهای مناسب برای کنترل و کاهش توفان‌های گردوغبار مفید باشد. بنابراین بررسی رسوبات این تالاب می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای فرسایش و رسوب‌گذاری در منطقه کمک کند و برای مدیریت پایدار منابع آب‌وخاک و جلوگیری از تخریب بیشتر تالاب ضروری است. از منظر بررسی‌های اقلیمی نحوه تأثیرگذاری این تغییرات بر فرآیندهای رسوب‌گذاری و فرسایش در منطقه برای پیش‌بینی و برنامه‌ریزی اثرات تغییرات اقلیمی بر منطقه لازم می‌باشد. همچنین بررسی رسوبات تالاب هامون هیرمند می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای رسوب‌شناسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کند. این بررسی برای توسعه دانش

ارتفاعات غربی و شمالی ایران از ورود جریان‌های هوای مرطوب به نقاط مرکزی جلوگیری می‌کنند (۴)؛ به همین دلیل دشت سیستان میزان اندکی بارندگی و کمتر از 60 mm/y دریافت می‌کند (۴).

روش تحقیق

در ابتدا موقعیت منطقه مورد بررسی در کشور مشخص شد و گزارش‌ها و مطالعات گذشته جمع‌آوری شد. همچنین داده‌های زمین‌شناسی نظیر نقشه‌ها، عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای، موجود بررسی شد. پس از بازدید اولیه و مشخص شدن مرز منطقه مورد بررسی، ۲۷۱ نمونه رسوبی در منطقه هامون صابری و بخشی از هامون هیرمند، از اعماق 30 cm برداشت شدند.

سیستان از نوع قاره‌ای است که دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم و خشک می‌باشد. میانگین دمای سالانه در حوضه سیستان 27°C است. بارندگی در سیستان و حوضه آبخیز آن کاملاً فصلی است و به شدت تحت تأثیر مرکز کم‌فشار غربی قرار دارد. سامانه‌های مدیترانه‌ای زمانی به استان می‌رسند که از نظر مقدار رطوبت بارش کافی در استان را ایجاد نمی‌کند. رژیم بارندگی سیستان و حوضه آبخیز آن کاملاً فصلی و مرتبط با مرکز کم‌فشار غربی است. رژیم باد در سیستان شامل بادهای 120 روزه در فصل تابستان است (۱۲). بادهای غربی عرض‌های میانی رطوبت گسترده‌های آبی غرب ایران را که مهم‌ترین آن دریای مدیترانه است، به سمت ارتفاعات غربی و در مرحله بعد فلات مرکزی ایران، هدایت می‌کنند. البته در این میان



شکل ۱. الف: موقعیت منطقه مورد بررسی و نقاط نمونه برداری. مستطیل مشکی محدوده مشخص در شکل‌های ۷ تا ۱۰ است، ب: نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی

جنگل‌ها و مراتع کشور جدا و به روش لیزری^۱ در موسسه ملی اقیانوس‌شناسی مورد دانه‌سنجی قرار گرفتند. برای بررسی بهتر و دقیق‌تر نمونه‌ها لازم است تا تعدادی از ویژگی‌های رسوب‌شناسی مورد بررسی قرار گیرند. جورشدگی^۲ ذرات و فراوانی ذرات دانه‌ریز و دانه‌درشت در نمونه‌ها، کج‌شدگی^۳ و کشیدگی^۴ توسط فرمول‌های ارائه‌شده به‌وسیله فولک انجام شد (۱۰، ۱۱). محاسبه آماری تحلیل اندازه دانه‌ها به روش هیستوگرام ترسیمی و برای ارزشیابی از ویژگی‌های آماری از قبیل میانگین، مد، جورشدگی و کج‌شدگی استفاده شد. برای طبقه‌بندی اندازه ذرات موجود در نمونه‌ها، از طبقه‌بندی نمونه‌های فولک (۱۰) استفاده شد.

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جورشدگی ذرات در رسوبات وجود دارد. در این بررسی، از روش انحراف معیار جامع ترسیمی در مقیاس لگاریتمی برای نمونه‌های رسوبات سیستان استفاده شد. این روش توسط فولک ارائه‌شده است و در مقایسه با انحراف معیار ترسیمی ساده، جورشدگی ذرات را با دقت بیشتری نشان می‌دهد. در انحراف معیار ترسیمی ساده، فقط جورشدگی ذرات در محدوده دوسوم زیر منحنی محاسبه می‌شود، درحالی‌که در انحراف معیار ترسیمی جامع، حدود ۹۰٪ توزیع ذرات در منحنی اندازه‌گیری شده و جورشدگی بهتری را نشان می‌دهد. این روش با رابطه (۱) محاسبه می‌شود: در این رابطه فی (Φ) معادل اندازه ذرات است. در منحنی نرمال توزیع ذرات از نقاط با فراوانی ۰.۸۴٪، ۰.۱۶٪، ۰.۹۵٪ و ۰.۵٪ استفاده شد.

$$\text{Sorting} = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (1)$$

طبقه‌بندی جدول ۱ برای نوع جورشدگی ذرات بر اساس مقدار انحراف معیار در یک سری رسوب توسط فولک آورده شده و در نقشه هم‌تراز جورشدگی رسوبات در منطقه سیستان نیز از این طبقه‌بندی استفاده شد.

موقعیت نمونه‌های برداشت‌شده در شکل ۱ (الف) به نمایش گذاشته شده است. پراکندگی نقاط نمونه‌گیری با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی (شکل ۲ ب) و توپوگرافی منطقه با فاصله استاندارد انجام شده است.

نمونه‌ها پس از برداشت به آزمایشگاه رسوب‌شناسی انتقال داده شدند. عملیات آماده‌سازی شامل پودر کردن کلوخه‌ها و بسته‌بندی و نام‌گذاری انجام شد. نمونه‌های برداشت‌شده با اندازه ذرات متفاوت برای بررسی با استریو میکروسکوپ انتخاب شدند. نمونه‌ها در سه حالت خشک، افزودن آب و افزودن اسید رقیق HCl بررسی و عکس‌برداری انجام شد. ذرات در نمونه‌های مورد بررسی در دو دسته تخریبی و غیرتخریبی و اغلب کربناته مورد بررسی قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها توسط دستگاه غربالگر دانه‌بندی شده و ذرات ریزتر از ۰/۰۶۳mm جدا شدند. نمونه‌های جداشده برای بررسی با استریو میکروسکوپ مدل Zeiss 47 2500-9901 و عدسی با بزرگنمایی 4X، دانه سنجی توسط الک و لیزر استفاده شدند. اندازه ذرات در نمونه‌های رسوبی برداشت‌شده دامنه‌ای بین کمتر از ۴μm تا ۶۰۰μm را در برمی‌گیرند و با غربال‌هایی با قطر ۲۵، ۳۵، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۴۰، ۲۰۰ و کوچک‌تر از ۲۰۰ مش (Pan) غربال شدند. مقیاس کرومباین که به نام مقیاس ونتورث نیز شناخته می‌شود، طبقه‌بندی لگاریتمی برای اندازه ذرات رسوبی است که در سال ۱۹۳۲ ابداع شد. مقیاس کرومباین ذرات رسوبی را به هشت طبقه اصلی تقسیم می‌کند. هر طبقه به‌نوبه خود به زیرمجموعه‌هایی با قطر دانه‌های خاص تقسیم می‌شود. برای تعیین اندازه‌ذرات رسوبی با استفاده از این مقیاس، از روش‌های مختلفی مانند غربالگری، تحلیل تصویری و هیدرومتر استفاده شد.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها در آزمایشگاه رسوب‌شناسی، بررسی بافت یعنی اندازه، جورشدگی، گردشگی و کانی‌شناسی رسوبات بر روی نمونه‌ها انجام شد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری قطر دانه‌ها وجود دارد. ذرات ریزتر از ۶۳μm توسط الک در آزمایشگاه خاکشناسی موسسه تحقیقات

³ Skewness

⁴ Kurtosis

¹ Laser Scattering Particle Size distribution Analyzer
Horiba -LA950

² Sorting

کشیدگی عبارت است از اندازه‌گیری نوک‌تیزی یا کشیدگی منحنی توزیع ذرات که از نسبت جورشدگی دنباله منحنی به جورشدگی قسمت وسط منحنی به‌دست‌آمده و با رابطه (۳) محاسبه می‌شود. فولک برای طبقه‌بندی کشیدگی منحنی‌ها مقیاسی به شرح جدول ۳ ارائه داده است.

$$\text{Kurtosis} = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (۳)$$

کشیدگی منحنی توزیع دانه پارامتری مهم در بررسی رسوبات است که اطلاعات ارزشمندی در رابطه با جورشدگی و اندازه دانه‌ها ارائه می‌دهد. این اطلاعات برای تفسیر و تعبیر محیط رسوبی و همچنین مشخص نمودن فرایندهای رسوب‌گذاری از اهمیت بالایی برخوردار است. درنهایت پهنه‌بندی‌ها توسط درون‌یابی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3. رسم شدند. ArcGIS 10.3 طیف وسیعی از روش‌های درون‌یابی را برای تخمین مقادیر داده‌ها در نقاطی که داده‌ای وجود ندارد، ارائه می‌دهد.

در این بررسی از روش درون‌یابی کریجینگ استفاده شد. این روش از آمار فضایی برای تخمین مقادیر در نقاط ناشناخته با در نظر گرفتن همبستگی فضایی بین نقاط نمونه استفاده می‌کند. ویژگی‌های مورد استفاده شامل اندازه دانه و جورشدگی بودند.

کشیدگی منحنی توزیع دانه پارامتری مهم در بررسی رسوبات است که اطلاعات ارزشمندی در رابطه با جورشدگی و اندازه دانه‌ها ارائه می‌دهد. این اطلاعات برای تفسیر و تعبیر محیط رسوبی و همچنین مشخص نمودن فرایندهای رسوب‌گذاری از اهمیت بالایی برخوردار است.

کج‌شدگی به معنای عدم تقارن یا عدم تناسب در منحنی توزیع ذرات است که توسط دنباله منحنی توزیع مشخص می‌شود. در منحنی‌های متقارن، مقدار کج‌شدگی صفر است. در منحنی‌هایی که دنباله آن‌ها به سمت راست (سمت رسوبات دانه‌ریز) متمایل باشد، کج‌شدگی مثبت است. در منحنی‌هایی که دنباله آن‌ها به سمت چپ (سمت رسوبات دانه‌درشت) متمایل باشد، کج‌شدگی منفی است. بررسی کج‌شدگی منحنی از روی دنباله آن صورت می‌گیرد که این خود در ارتباط با اندازه ذرات تشکیل‌دهنده رسوب یا سنگ است؛ بنابراین، از کج‌شدگی برای تعبیر و تفسیر محیط رسوبی و فرایندهایی که باعث حمل‌ونقل ذرات شده‌اند استفاده می‌شود. برای مثال اگر ذرات تشکیل‌دهنده رسوب از نوع دانه‌ریزها (مانند سیلت و رس) باشند، دنباله منحنی به سمت راست رفته و نشان‌دهنده رسوب‌گذاری در یک محیط آرام است. اگر دنباله منحنی به سمت چپ متمایل باشد، نشان‌دهنده فراوانی ذرات دانه‌درشت در محیط‌های پراثرژی می‌باشد. محاسبه کج‌شدگی در این بررسی بر اساس روش کج‌شدگی ترسیمی جامع بود که در این روش ۹۰٪ منحنی در نظر گرفته شد و مقدار به‌دست‌آمده دقیق‌تر است (رابطه ۲) (۱۰).

مطابق رابطه ۱، در این رابطه نیز فی (φ) معادل اندازه ذرات است. در رابطه کج‌شدگی از ذرات با فراوانی در نقاط ۱۶٪، ۸۴٪، ۵۰٪، ۹۵٪ و ۵٪ در منحنی نرمال توزیع ذرات استفاده شد. در جدول ۲ طبقه‌بندی انواع کج‌شدگی ارائه شد (۱۰).

$$\text{SKI} = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - \varphi_5)} \quad (۲)$$

جدول ۱. طبقه‌بندی جورشدگی ذرات رسوبی (۱۰، ۱۱)

مقدار	نوع جورشدگی
کمتر از $\varphi ۰/۳۵$	بسیار خوب
$۰/۵$ تا $۰/۳۵$	خوب
$۰/۷۱$ تا $۰/۵$	خوب متوسط
۱ تا $۰/۷۱$	متوسط
۲ تا ۱	اندک
۴ تا ۲	بسیار اندک
بیشتر از $\varphi ۴$	بی‌نهایت ضعیف

جدول ۲. طبقه‌بندی کج‌شدگی ذرات رسوبی (۱۰، ۱۱)

مقدار	نوع کج‌شدگی
از +۱ تا +۰/۳	ذرات بسیار ریز یا بسیار مثبت
از +۰/۳ تا +۰/۱	ذرات ریز یا مثبت
از +۰/۱ تا -۰/۱	متقارن
از -۰/۱ تا -۰/۳	ذرات درشت یا منفی
از -۰/۳ تا -۱	ذرات بسیار درشت یا بسیار منفی

جدول ۳. طبقه‌بندی کشیدگی ذرات رسوبی (۱۰، ۱۱)

کشیدگی	بسیار پهن	پهن	متوسط	کشیده	بسیار کشیده	بی‌نهایت کشیده
مقدار	کمتر از ۰/۶۷	۰/۶۷ تا ۰/۹	۰/۹ تا ۱/۱۱	۱/۱۱ تا ۱/۵	۱/۵ تا ۳	بیشتر از ۳

موجود در نمونه‌ها نیز در آزمایش با اسید، انحلال‌یافتگی نشان می‌دهد. علاوه بر کوارتز، میکاها نیز به‌وفور در میان ذرات مشاهده می‌شوند. بررسی نمونه‌های رسوبات بخش‌های میانی و غربی منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که این رسوبات دارای ویژگی‌های متمایزی نسبت به رسوبات حاشیه شرقی منطقه هستند. مهم‌ترین ویژگی‌های این رسوبات عبارت‌اند از ۱- حضور ذرات تخریبی کوارتز با فراوانی کمتر: در مقایسه با حاشیه شرقی منطقه، رسوبات بخش‌های میانی و غربی از ذرات تخریبی کوارتز کمتری برخوردار هستند. این امر می‌تواند نشان‌دهنده شرایط شیمیایی و فیزیکی متفاوت در زمان تشکیل این رسوبات باشد. ۲- ریزدانه‌گی و فراوانی ذرات سیلت و رس: رسوبات بخش‌های میانی و غربی به‌طور کلی ریزتر هستند و از ذرات سیلت و رس بیشتری نسبت به حاشیه شرقی منطقه تشکیل شده‌اند. این امر می‌تواند نشان‌دهنده انرژی کمتر جریان سیال در زمان رسوب‌گذاری این رسوبات باشد. نمونه‌های نیمه شمالی منطقه دارای کانی تخریبی کوارتز با اندازه‌ای در حد سیلت هستند که فراوانی آن به سمت شرق منطقه کاهش یافته و فراوانی ذرات رسی بیشتر می‌شود. با حرکت به سمت غرب حوضه از میزان فراوانی و درشتی این ذرات تخریبی کاسته شده و فراوانی رس‌ها قابل توجه می‌گردد.

با توجه به روند تغییرات فراوانی ذرات تخریبی از شرق به غرب، به نظر می‌رسد جهت جریان حامل رسوبات از شرق به غرب منطقه بوده که ذرات درشت‌تر را در قسمت شرقی برجای گذاشته و با حرکت به سمت غرب محدوده

در نهایت پهنه‌بندی‌ها توسط درون‌یابی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.3 رسم شدند. ArcGIS 10.3 طیف وسیعی از روش‌های درون‌یابی را برای تخمین مقادیر داده‌ها در نقاطی که داده‌ای وجود ندارد، ارائه می‌دهد. در این بررسی از روش درون‌یابی کریجینگ استفاده شد. این روش از آمار فضایی برای تخمین مقادیر در نقاط ناشناخته با در نظر گرفتن همبستگی فضایی بین نقاط نمونه استفاده می‌کند. ویژگی‌های مورد استفاده شامل اندازه دانه و جورشدگی بودند.

نتایج و بحث

بررسی نمونه‌ها با استریو میکروسکوپ

ذرات در نمونه‌های مورد بررسی در دو دسته تخریبی و غیرتخریبی و اغلب کربناته مورد بررسی قرار گرفتند. در میان ذرات تخریبی، دانه‌های کوارتز، فلدسپار و میکا مشاهده شدند. ذرات کوارتز با گرد شدگی متوسط و اغلب به رنگ شیری، قهوه‌ای تا قرمز و دودی با جلای خوب نمایان بودند. بخش کربناته نمونه به‌صورت ذرات در ابعاد سیلت و رس به رنگ قهوه‌ای و خاکستری روشن تا تیره می‌باشد که با اسید HCl جوشش دارد.

در نمونه‌های قسمت جنوبی محدوده مورد بررسی کانی‌های تخریبی شامل کوارتز و میکا مشاهده می‌شود. نمونه‌ها که همگی ماهیت کربناته دارند، با اسید HCl مورد آزمایش قرار گرفتند. ریزدانه بودن ذرات به دلیل حمل و نقل آبی یا بادی تا قسمت جنوبی منطقه می‌باشد. نمونه‌های واقع در بخش میانی و شرقی منطقه مورد بررسی دارای ذرات درشت‌دانه، صیقلی و گرد شده کوارتز هستند. $CaCO_3$

زمین‌شناسی منطقه و تغییرات محیطی در طول زمان استفاده شود. روش‌های مختلفی برای تحلیل توزیع دانه وجود دارد، از جمله الک کردن، لیزر سنجش ذرات و تصویربرداری میکروسکوپی. انتخاب روش مناسب به نوع رسوبات و اطلاعات مورد نیاز بستگی دارد.

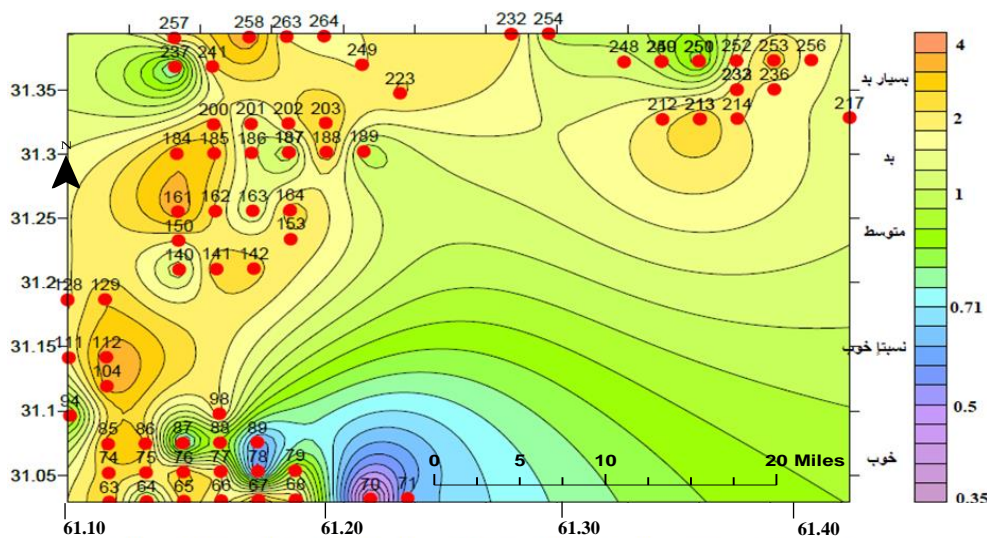
نتایج بررسی جورشدگی رسوبات نشان می‌دهد که در قسمت بالایی منطقه مطالعاتی که سرعت حمل بالاتر است، انتقال ذرات درشت و ریز با هم صورت می‌گیرد و جورشدگی ضعیف‌تر است. با حرکت به سمت مرکز حوضه از سرعت باد کاسته شده و جور شدگی نیز به تدریج بهتر می‌شود (شکل ۲). در محدوده تالاب هامون روندی مستثنا از مسیر تعریف‌شده، مشاهده می‌شود که این نیز قابل توجیه است. فاصله کم از منشأ این اجازه را نمی‌دهد رسوبات مسیر زیادی را طی کنند و جورشدگی بهتری داشته باشند. رسوبات تالاب علاوه بر آورد آبی توسط باد هم تأمین می‌شود و این مطلب دلالت بر جورشدگی ضعیف دارد. همچنین سرعت و قدرت جریان آب در دریاچه‌ها کم است و در نتیجه جورشدگی ضعیف می‌باشد.

در نمونه‌های مورد بررسی در تالاب هامون کج شدگی با مقدار کمی نشان‌دهنده منشأ بادی است. در نقشه کج‌شدگی با دور شدن از مرز و نزدیک شدن به مرکز حوضه مقدار آن بزرگ‌تر می‌شود که نشان می‌دهد ذرات رفته‌رفته ریزتر و منشأ آن‌ها به همدیگر شبیه است. در قسمت تالاب شاخص کج‌شدگی کمتر می‌شود (شکل ۳).

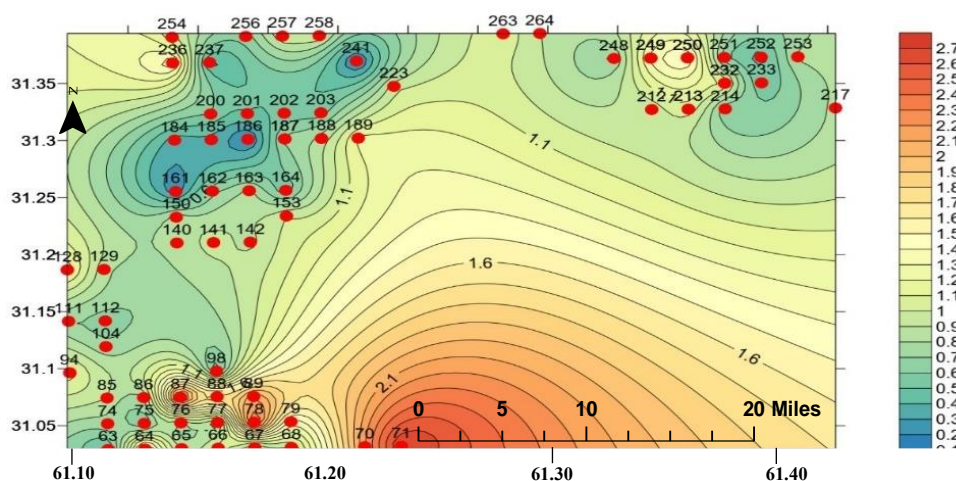
مورد بررسی، فراوانی بیشتر ذرات ریزدانه رسی و عدم حضور ذرات درشت‌دانه و خوب گردشده تخریبی نظیر کوارتز و نیز کانی‌های ناپایدار میکا دیده می‌شود. این روند تغییرات از شمال به جنوب محدوده مورد بررسی نیز مشهود است، به گونه‌ای که بیشترین جابجایی ذرات درشت‌دانه تخریبی تا قسمت میانی محدوده مورد بررسی بوده و قسمت جنوبی با فراوانی ذرات در حد رس مواجه هست؛ بنابراین به نظر می‌رسد برای جهت جریان حامل، دو مسیر شمال به جنوب و شرق به غرب را بتوان در نظر گرفت.

اهمیت تحلیل توزیع دانه در رسوبات

تحلیل توزیع دانه‌های رسوبی از اهمیت زیادی در بررسی رسوبات برخوردار است. این تحلیل امکان درک مشخصات مختلف رسوبات و فرایندهایی که باعث تشکیل آن‌ها شده‌اند را به طور دقیق‌تر فراهم می‌کند. ذرات رسوبی عمدتاً توسط آب و هوا جابجا می‌شوند. با کاهش سرعت جریان، ذرات با اندازه‌های مختلف از یکدیگر جدا شده و رسوب می‌کنند. اگر رسوب از منابع مختلفی سرچشمه گرفته باشد، ذرات می‌توانند از گراول تا رس متغیر باشند و توزیع ذرات به منبع اولیه و فرایندهای حاکم بر رسوب‌گذاری، به‌ویژه قدرت جریان بستگی دارد. بررسی توزیع دانه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد منشأ رسوبات و شناسایی سنگ‌های مادر، محیط رسوبی، فرایندهای غالب حمل و نقل ذرات، مانند معلق شدن، غلتش یا کشش و تاریخچه



شکل ۲. نقشه خطوط هم‌تراز جورشدگی در رسوبات تالاب هامون

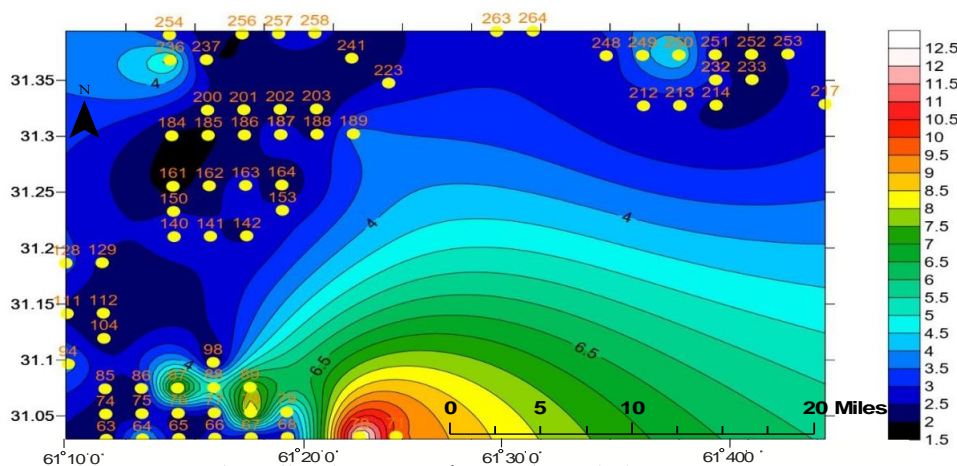


شکل ۳. نقشه خطوط هم‌تراز کج‌شدگی در رسوبات تالاب هامون

کمتر است. این امر نشان‌دهنده حمل‌ونقل کوتاه‌تر ذرات، منشأهای متنوع‌تر و فرسایش بیشتر ذرات در این بخش‌ها است. هرچه از مرز دورتر و به مرکز حوضه نزدیک شویم ذرات کشیده‌تر می‌شوند و نشان‌دهنده این است که رسوبات تحت تأثیر باد و طولانی بودن مسیر از منشأ، فرسایش بیشتری را متحمل شده‌اند. این روند در تالاب صادق نیست و چون سرعت آب در تالاب‌ها معمولاً کم و فاصله از منشأ پایین است پس نشان می‌دهد که ذرات کشیدگی خوبی نسبت به مرکز حوضه ندارند (شکل ۴). در نمودارهای تجمعی رسوبات، شیب خط نقشی کلیدی در تفسیر جورشدگی ایفا می‌کند. این شیب در واقع تابعی از انحراف معیار یا جورشدگی ذرات رسوبی است. در نموداری با شیب تند، ذرات رسوبی اندازه‌های مشابهی دارند و به‌طور متمرکز در اطراف یک اندازه خاص تجمع یافته‌اند.

کشیدگی منحنی توزیع دانه اطلاعات ارزشمندی در مورد جورشدگی و اندازه ذرات در رسوبات ارائه می‌دهد. این اطلاعات برای تفسیر محیط رسوبی و فرایندهای رسوب‌گذاری حائز اهمیت است.

در مورد رسوبات سیستان، توزیع شاخص کج‌شدگی ذرات نشان می‌دهد که هرچه عدد کج‌شدگی بالاتر باشد، ذرات از حالت پهن خارج شده و به سمت کشیدگی می‌روند. این امر با نسبت جورشدگی دنباله منحنی به جورشدگی قسمت وسط منحنی به دست می‌آید. افزایش کشیدگی در بخش‌های مرکزی و شرقی تالاب هامون نشان‌دهنده حمل‌ونقل طولانی‌تر ذرات از منشأ است. به این معنی که ذرات در این بخش‌ها از منشأ واحدتری سرچشمه می‌گیرند و کمتر دچار فرسایش شده‌اند. فرایند رسوب‌گذاری در این بخش‌ها در شرایط آرام‌تر و با سرعت کمتری انجام شده است. کشیدگی ذرات در بخش‌های غربی و جنوبی تالاب



شکل ۴. نقشه خطوط هم‌تراز کج‌شدگی در رسوبات تالاب هامون.

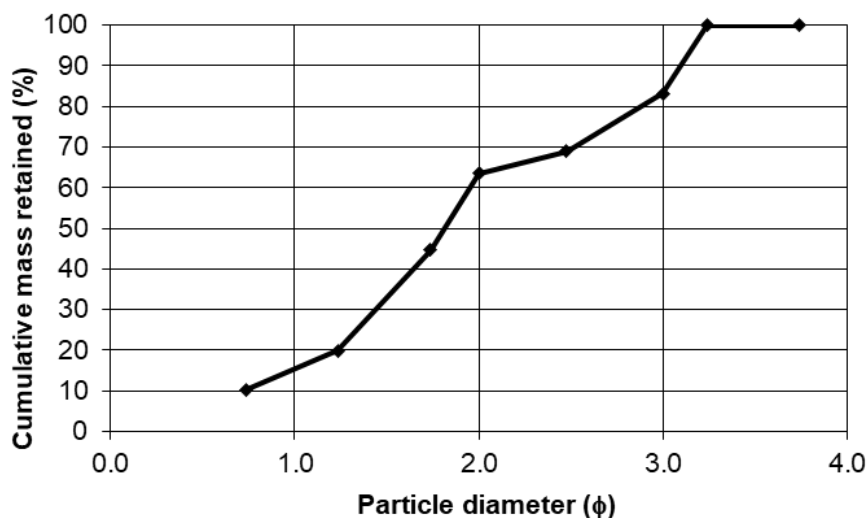
محدوده ماسه و ماسه گلی و تا حدودی سیلت و گل قرار دارد، برای نام‌گذاری دقیق‌تر رسوبات، از مثلث سه‌تایی ماسه، سیلت و رس فولک استفاده شد (شکل ۲). طبق تعریف، اگر بیش از ۹٪ ذرات موجود در یک نمونه در اندازه ماسه باشند، آن سنگ ماسه‌سنگ نامیده می‌شود. با این حال بیشتر نمونه‌های برداشت‌شده دارای ۹٪ ماسه می‌باشد که طبق نمودار فولک ماسه نام دارند.

تحلیل دانه بندی رسوبات بخش سیلت - رس تالاب هامون
نقشه توزیع فراوانی ذرات کلوئیدی، رس‌ها و ذرات در اندازه سیلت بسیار ریز در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نمایش داده شده است. همچنین فراوانی درشت‌ترین ذرات موجود در هر نمونه که طیف اندازه آن‌ها از سیلت متوسط تا ماسه متوسط بود، در شکل ۱۰ دیده می‌شود.

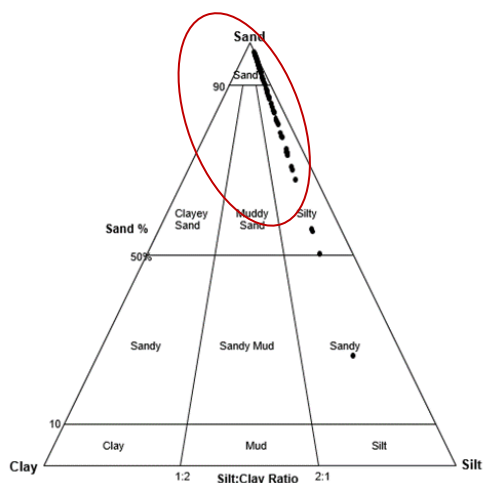
تحلیل دانه‌سنجی نمونه‌های منتخب، ذرات کلوئیدی را در نمونه‌های ۸۶، ۹۸، ۱۱۱، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۰۱ و ۲۵۸ نشان داد. بیشترین فراوانی ذرات کلوئیدی در نمونه ۸۶ و کمترین فراوانی آن در نمونه ۲۰۱ مشاهده شد. اندازه ذرات کلوئیدی در این تحلیل ریزتر از $0.82\mu\text{m}$ است. نقشه توزیع این ذرات در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در نقشه مشاهده می‌شود، فراوانی ذرات کلوئیدی در جنوب محدوده مورد بررسی در دشت سیستان بیشترین فراوانی را دارد. ذرات رسی ریزتر از $3.28\mu\text{m}$ و درشت‌تر از $0.82\mu\text{m}$ در این تحلیل حضور دارند. در تمام نمونه‌های منتخب ذرات رسی با فراوانی‌های متفاوت مشاهده می‌شوند.

این نشان‌دهنده جورشدگی خوب و انتقال ذرات توسط یک جریان با سرعت ثابت است. در نموداری با شیب ملایم، ذرات رسوبی اندازه‌های متنوعی دارند و در طیف وسیعی از اندازه‌ها توزیع شده‌اند. اگر ذرات از نظر اندازه در گروه‌های مختلفی قرارگیرند بر روی منحنی به‌وسیله‌ی خط‌های مستقیم شکسته می‌شوند که این خود منعکس‌کننده سازوکارهای مختلف حمل است. سه نقطه شکست اصلی در ذرات با اندازه‌های ۱/۳، ۲ و ۳ فی مشاهده می‌شود (شکل ۵). همین موضوع نشان می‌دهد که سازوکارهای متفاوتی بر حمل ذرات رسوبی در حوضه سیستان اثرگذار بوده‌اند و ذرات دارای منشأهای متفاوتی هستند و تک منشأیی نمی‌باشند. طبق طبقه‌بندی کرومباین اندازه ذرات برمبنای فی از ۸- تا ۸+ متغیر است که ۸- معادل اندازه ذرات در حد قطعه سنگ و بزرگ‌تر از 256mm ، صفر معادل اندازه ماسه و 1mm و ۸ معادل ذرات در حد رس و کوچک‌تر از 0.039mm است. از آنجایی که دامنه اندازه ذرات مورد بررسی از رس تا حدود ماسه متغیر است لذا برای ترسیم نمودار فراوانی ذرات در محدوده اندازه‌های صفر تا 4ϕ اندازه گرفته شد. درصد فراوانی ساده ذرات محاسبه و سپس درصد فراوانی تجمعی محاسبه شد.

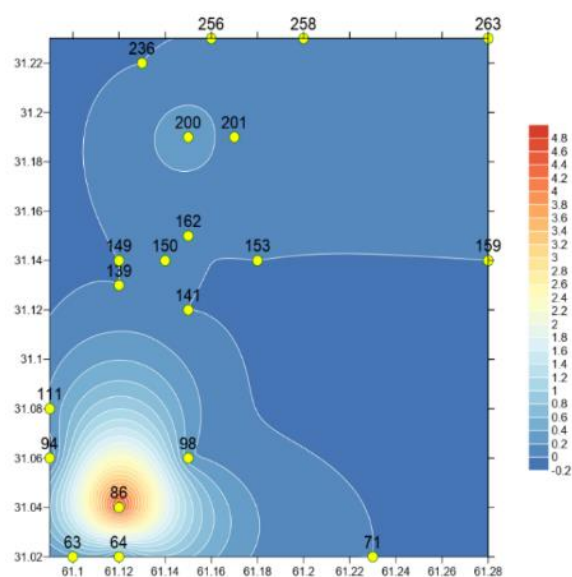
بر اساس مثلث گراول-ماسه-گل نمونه‌های سیستان در محور ماسه-گل مثلث فولک قرار می‌گیرند و تمرکز نمونه‌ها اغلب در رأس ماسه و ماسه گلی نمودار فولک قرار می‌گیرد (شکل ۶). با توجه به این که تمرکز نمونه‌ها اغلب در



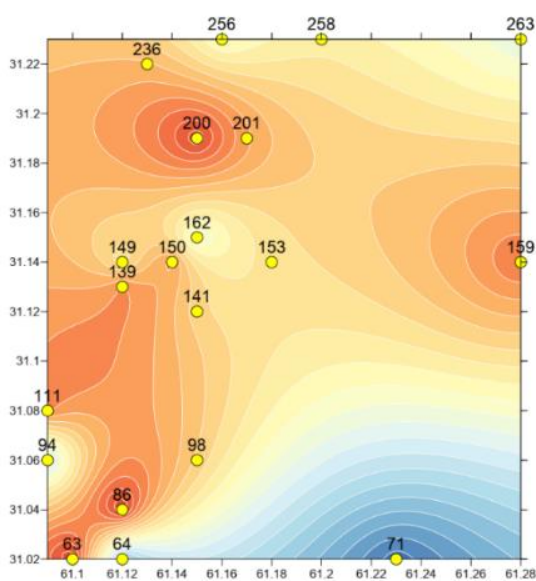
شکل ۵. نمودار تجمعی رسوبات منطقه مورد بررسی با توجه به قطر ذرات



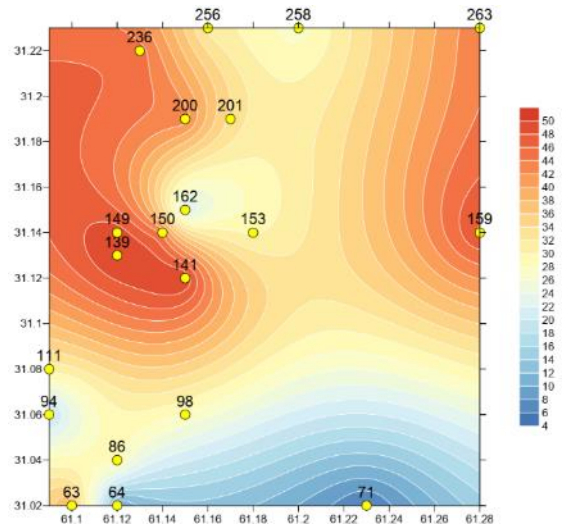
شکل ۶. توزیع رسوبات بر روی مثلث گراول - ماسه - گل و مثلث ماسه-سیلت-رس (۱۰)



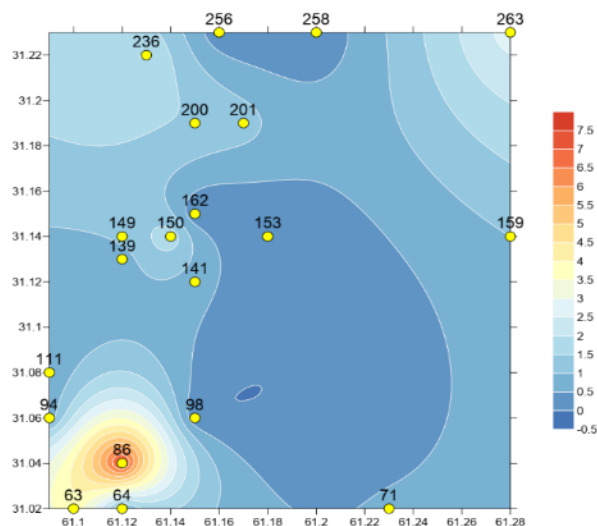
شکل ۷. نقشه توزیع مکانی فراوانی ذرات کلئیدی بر اساس نتایج دانه‌بندی لیزری در منطقه مورد بررسی (محدوده نقشه در شکل ۱ نشان داده شده است)



شکل ۸. نقشه توزیع مکانی فراوانی ذرات رسی بر اساس نتایج دانه‌بندی لیزری در منطقه مورد بررسی (محدوده نقشه در شکل ۱ نشان داده شده است)



شکل ۹. نقشه توزیع مکانی فراوانی ذرات سیلت خیلی ریز بر اساس نتایج دانه‌بندی لیزری در منطقه مورد بررسی (محدوده نقشه در شکل ۱ نشان داده شده است)



شکل ۱۰. نقشه توزیع مکانی فراوانی مکانی درشت‌ترین ذرات هر نمونه (از سیلت متوسط تا ماسه متوسط) بر اساس تحلیل لیزر در منطقه مورد بررسی

ذرات سیلت خیلی ریز مشابه ذرات رسی و در قسمت‌های شرق و شمال شرقی، مرکز غرب و جنوب شرق محدوده مورد بررسی است.

همان‌طور که توزیع فراوانی ریزترین ذرات یعنی ذرات کلوئیدی و رسی در محدوده مورد بررسی متفاوت است، توزیع ذرات درشت نیز در نمونه‌های منتخب، فراوانی و اندازه‌های متفاوتی را نشان می‌دهد. طیف اندازه ذرات در ۲۰ نمونه رسوبی که با استفاده از نتایج دانه‌بندی لیزری بررسی شدند، از ماسه درشت تا سیلت متوسط را شامل می‌شود. توزیع فراوانی این ذرات در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی ذرات درشت در جنوب غربی محدوده مورد بررسی متمرکز شده است.

فراوانی ذرات رسی از ۱/۳۷٪ تا ۲۴/۱۱٪ متفاوت هست. مطابق نقشه توزیع فراوانی ذرات رسی، بیشترین فراوانی به‌صورت پلی‌مودال در شمال غرب، مرکز-غرب و جنوب شرق محدوده مورد بررسی مشاهده می‌شود و کمترین فراوانی در جنوب غرب منطقه در محدوده نمونه‌های ۶۴ و ۷۱ دیده می‌شود (شکل ۸). شکل توزیع ذرات رسی در محدوده مورد بررسی تاییدی بر نتایج مطالعات توسط استریومیکروسکوپ نیز هست و نشان می‌دهد که برخاستگاه رسوبات از دو منطقه در شرق ایران از کشور افغانستان و شمال غرب و جنوب غرب تالاب از برخاستگاه داخلی می‌باشد. در این تحلیل سیلت خیلی ریز به ذرات درشت‌تر از $28/3 \mu m$ و ریزتر از $57/6 \mu m$ اطلاق می‌شود. توزیع فراوانی

می‌کند. عوامل متعددی بر حمل‌ونقل رسوبات در حوضه سیستان تأثیر می‌گذارند، از جمله:

باد نقش مهمی در فرسایش و حمل و نقل رسوبات در این منطقه خشک و کم‌بارش ایفا می‌کند. جهت غالب بادهای از غرب به شرق است که به جابجایی ذرات ریزتر به سمت غرب کمک می‌کند.

شیب زمین نیز در حمل‌ونقل رسوبات نقش دارد. حوضه سیستان دارای شیب ملایمی از شرق به غرب است که به حرکت ذرات در این جهت کمک می‌کند.

آب نیز در حمل و نقل رسوبات، به‌خصوص در قسمت‌های مرکزی حوضه که سرعت باد کمتر است، نقش دارد. این موضوع در بیابان‌های اوردوس چین نیز مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داد که فعالیت رودخانه‌ای نقش به‌سزایی در فرآیند انتقال رسوب و تأمین رسوبات تالاب‌ها ایفا می‌کند و حتی گاهی نقش تعیین‌کننده دارد؛ بنابراین، برای درک شکل‌گیری و تکامل تالاب‌های عهد حاضر، باید نقش فرآیندهای رودخانه‌ای را جدی گرفت (۹).

تالاب هامون نقش مهمی در دینامیک رسوبات در حوضه سیستان دارد. این تالاب به‌عنوان یک حوضه رسوبی عمل می‌کند و ذرات رسوبی را از مناطق اطراف جمع‌آوری می‌کند. سرعت آب در تالاب کم است که منجر به رسوبگذاری ذرات درشت‌تر و جورشدگی ضعیف‌تر رسوبات می‌شود. بررسی حاضر نشان می‌دهد که رسوبات در حوضه سیستان دارای منشأهای مختلفی هستند. برخی از رسوبات از افغانستان (منطقه شرقی حوضه) و برخی دیگر از داخل حوضه (منطقه شمال‌غربی و جنوب‌غربی) منشأ می‌گیرند. بررسی نتایج حاصل از پژوهش‌های دیگری در منطقه مورد بررسی نیز نشان داد که رسوبات کلوتک‌های دلتای قدیمی رودخانه هیرمند دارای دو منشأ داخلی و خارجی هستند (۱۲، ۲۱، ۲۲). همچنین نتایج پتروگرافی و رسوب‌شناسی در مناطقی در کشور چین نیز نشان می‌دهد که تفاوت‌های منشأ قابل‌توجهی در میان بخش‌های مختلف ماسه‌زار مواس^۱ وجود دارد، به‌عنوان مثال، رسوبات بادی از منطقه جنوب‌غربی به‌وضوح از سایر مناطق در ماسه‌زار مواس متمایز است و منشأ خارجی مشابهی را با بیابان هوبک^۲ نشان می‌دهد که به

نتایج دانه‌بندی لیزری و نقشه‌های تهیه شده، اطلاعات ارزشمندی در مورد توزیع فضایی ذرات در این حوضه ارائه می‌دهند. باد به‌عنوان عامل اصلی جابجایی ذرات ریز و کلوئیدی، نقشی کلیدی در توزیع فضایی آن‌ها ایفا می‌کند. در این بررسی، مشاهده شد که فراوانی ذرات ریز و کلوئیدی در جنوب‌غربی حوضه که تحت تأثیر بادهای غربی و جنوب‌غربی قرار دارد، به‌طور قابل‌توجهی بیشتر است. این امر نشان می‌دهد که باد این ذرات را از مناطق دیگر به این منطقه منتقل کرده و در آنجا انباشته می‌کند. نوع خاک نیز می‌تواند بر میزان جابجایی ذرات ریز و کلوئیدی توسط باد تأثیر بگذارد. خاک‌های با بافت ریزتر، ذرات ریز و کلوئیدی بیشتری را در خود جای می‌دهند و به دلیل چسبندگی کمتر، توسط باد جابجا می‌شوند.

وجود چندین منشأ برای سیستم‌های آورد رسوبی در مرکز حوضه و به‌خصوص در تالاب هامون، منجر به تنوع در اندازه ذرات در این منطقه می‌شود. این تنوع نشان‌دهنده آن است که منابع رسوبی مختلف، ذرات با اندازه‌های متفاوت را به این منطقه منتقل می‌کنند. هر یک از منابع رسوبی ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند فرسایش خاک، فعالیت‌های انسانی و شرایط آب و هوایی باشد. این عوامل می‌توانند بر اندازه و نوع ذراتی که توسط هر منبع رسوبی به این منطقه منتقل می‌شود، تأثیر بگذارند. تالاب هامون به‌عنوان یک رسوب‌گیر طبیعی، ذرات رسوبی مختلف را از منابع مختلف جمع‌آوری می‌کند. این امر می‌تواند به افزایش تنوع ذرات در این تالاب و اطراف آن موجب شود. علاوه بر باد و چند منشایی، عوامل دیگری مانند توپوگرافی، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی نیز می‌توانند بر توزیع فضایی ذرات در این منطقه تأثیر بگذارند. نتایج نشان می‌دهند که جهت غالب حمل‌ونقل رسوبات در حوضه سیستان از شرق به غرب است. این امر با کاهش تدریجی اندازه ذرات و افزایش فراوانی ذرات رسی در جهت غرب تأیید می‌شود. همچنین، حضور ذرات درشت‌تر در قسمت شرقی و عدم وجود ذرات درشت‌دانه و خوب‌گردشده تخریبی نظیر کوارتز و نیز کانی‌های ناپایدار میکا در غرب، این روند را تأیید

² Hobq Desert

¹ Mu Us Sandy Land

رسی این نمونه‌ها دارند. مطابق نقشه توزیع فراوانی ذرات رسی، بیشترین فراوانی به صورت پلی‌مودال در شمال غرب، مرکز-غرب و جنوب شرق محدوده موردبررسی مشاهده می‌شود و کمترین فراوانی در جنوب غرب منطقه مشاهده می‌گردد. شیوه توزیع ذرات رسی در محدوده موردبررسی نشان می‌دهد که برخاستگاه رسوبات از دو منطقه در افغانستان از شرق تالاب و یک برخاستگاه داخلی از شمال غرب و جنوب غرب محدوده مطالعاتی می‌باشد.

با توجه به نتایج تحلیل‌های لیزری و نقشه‌های تهیه شده می‌توان این‌طور تفسیر کرد که به دلیل بادی بودن سیستم تغذیه در غرب و جنوب غربی منطقه مورد بررسی، ذرات ریز و کلوئیدی بیشترین میزان را در این محدوده دارند و در مرکز محدوده مطالعاتی و مخصوصاً تالاب هامون به دلیل چند منشأ بودن سیستم آوردهای رسوبی، محدوده وسیع‌تری از ذرات از نظر اندازه را در برمی‌گیرد. یافته‌های حاصل از این پژوهش می‌تواند به بهبود مدیریت فرسایش بادی در مناطق منبع رسوب و رشد توسعه پایدار منطقه کمک کند.

■ سپاسگزاری

پژوهش حاضر در قالب طرح پژوهشی "مطالعات زمین‌شناسی، رسوب‌شناسی و پتروگرافی دشت سیستان" با کد مصوب ۹۹۱۴۳۰-۹۹۰۶۲-۹۹۰۶۲-۱۰۷-۰۹-۰۹-۱۲۴ با بهره‌مندی از اعتبارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور به انجام رسیده است. بدین‌وسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی و همکاران آزمایشگاه خاک بخش بیابان موسسه مربوطه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

جورشدگی، ویژگی‌های ژئوشیمیایی و مورفولوژی دانه کوارتز اشاره دارد (۹).

فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی و چرای دام نیز می‌توانند بر حمل‌ونقل رسوبات در حوضه سیستان تأثیر بگذارند. این فعالیت‌ها می‌توانند منجر به افزایش فرسایش خاک و افزایش رسوبات در حوضه شوند. تغییرات اقلیمی نیز می‌تواند بر دینامیک رسوبات در حوضه سیستان تأثیر بگذارد. افزایش دما و کاهش بارندگی می‌تواند منجر به افزایش فرسایش خاک و تغییر الگوهای باد شود که به‌نوبه خود بر حمل‌ونقل رسوبات در حوضه تأثیر می‌گذارد.

حوضه سیستان دارای دینامیک رسوبی پیچیده‌ای است که تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله باد، شیب، آب، منشأ رسوبات، فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی قرار دارد. درک این دینامیک برای مدیریت پایدار منابع آب‌وخاک در این منطقه ضروری است.

■ نتیجه‌گیری

بیشتر نمونه‌های برداشت‌شده از بستر تالاب هامون دارای ۹۰٪ ماسه می‌باشند که طبق نمودار فولک آن‌ها را ماسه می‌نامیم. برای جهت جریان حامل، دو جهت شمال به جنوب و غرب به شرق را می‌توان در نظر گرفت.

بررسی ویژگی‌های آماری رسوبی مانند جورشدگی، کشیدگی، کج‌شدگی و همچنین بررسی نمودارهای دانه‌بندی رسوبات محدوده مطالعاتی گویای این مطلب است که مکانیزم‌های متفاوتی بر حمل ذرات رسوبی بستر تالاب اثرگذار بوده‌اند و ذرات دارای منشأهای متفاوتی هستند و تک منشأیی نمی‌باشند.

ذرات کلوئیدی (کوچکتر از ۱۱۱) در جنوب محدوده موردبررسی در هامون هیرمند بیشترین فراوانی را در ذرات

■ References

1. 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 [In Persian].
2. 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. *Geomorphology*, 61(4): 315-326. DOI: 10.1127/zfg/2018/0451.

3. AghaNabati, A. (2004). *Geology of Iran*. Geological survey and Mineral Explorations of Iran [In Persian].
4. Akbari, Z., Kakuee, O., Shahbazi, R., Khatooni, J. D., & Mashal, M. (2022). Application of positive matrix factorization and pollutants tracing for identification of dust sources: A case study in Khuzestan, Iran. *Environmental Engineering Research*, 27(6). DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2021.365>.
5. Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2012). Feedback between windblown dust and planetary boundary layer characteristics: Sensitivity to boundary and surface layer parameterizations. *Atmosphere Environment*, 61, 294–304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.038>.
6. Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2013). Low level jet intensification by mineral dust aerosols. *Annales Geophysicae*, 31(4), 625–632. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-31-625-2013>
7. Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric Research*, 143, 328-341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.02.001>.
8. Behrooz, R. D., Gholami, H., Telfer, M. W., Jansen, J. D., & Fathabadi, A. (2019). Using GLUE to pull apart the provenance of atmospheric dust. *Aeolian research*, 37, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.12.001>
9. Chen, G., Dong, Z., Li, C., Shi, W., Shao, T., Nan, W., & 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.
10. Folk, R.L. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company Austin: Texas.
11. Folk, R.L. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company.
12. Fotoohi, S., Negaresh, H., Darvishi Khatooni, J., & Bayat, M. (2022). Investigating aeolian deposits in Hamun Lake located in east of Iran during Holocene period. *Environmental Earth Science*, 81, 12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10085-y>
13. Gholami, H., Mohammadifar, A., Pourghasemi, H. R., & Collins, A. L. (2020). A new integrated data mining model to map spatial variation in the susceptibility of land to act as a source of aeolian dust. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 42022-42039. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10168-6>.
14. 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: <https://doi.org/10.1029/2018JF004990>
15. Jooybari, S. A., Peyrowan, H., Rezaee, P., & Gholami, H. (2022). Evaluation of pollution indices, health hazards and source identification of heavy metal in dust particles and storm trajectory simulation using HYSPLIT model (Case study: Hendijan center dust, southwest of Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(2), 107. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09760-9>
16. Lancaster, N., Wolfe, S., Thomas, D., Bristow, C., Bubbenzer, O., Burrough, S., Duller, G., Halfen, A., Hesse, P., Roskin, J., Singhvi, A., Tsoar, H., Tripaldi, A., Yang, X., & Zárate, M. (2016). The INQUA dunes atlas chronologic database. *Quaternary International*, 410, 3–10. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.044>.
17. Masoudian, A. 2003. Climatic regions of Iran. *Journal of Geography and Development*, 1(2), 171-184. DOI: 10.22111/GDIJ.2003.3821 [In Persian].

18. McMahon, H. (1906). Recent survey and exploration in Seistan. *The Geographical Journal*, 28: 209-228. DOI: <https://doi.org/10.2307/1776729>
19. Middleton, N. (2019). Variability and Trends in Dust Storm Frequency on Decadal Timescales: Climatic Drivers and Human Impacts. *Geosciences*, 9: 261. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9060261>
20. Nazemosadat, M. J., & Cordery, I. (2018). On the relationships between ENSO and autumn rainfall in Iran. *International Journal of Climatology*, 20(1), 47-61. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(200001\)20:1<47::AID-JOC461>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(200001)20:1<47::AID-JOC461>3.0.CO;2-P)
21. Negaresh, H., Fotoohi, S., & khammar, E. (2018). The origin of kaloutaks sediments in old delta of Hirmand River. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 9(33), 83-102 [In Persian].
22. Rashki, A., Kaskaoutis, D., Rautenbach, C.J.D., & Eriksson, P. (2012 a). Changes of Permanent Lake Surface, and Their Consequences for Dust Aerosol and Air Quality: The Hamoun Lakes of the Sistan Area, Iran. *InTech*. DOI: 10.5772/48776.
23. Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Rautenbach, C.J.W., Eriksson, P.G., Qiang, M., & Gupta, P. (2012 b). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Research*, 5, 51–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.12.001>
24. Rashki, A., Rautenbach, C.J. deW., Eriksson, P.G., Kaskaoutis, D.G., & Gupta, P. (2013a). Temporal changes of particulate concentration in the ambient air over the city of Zahedan, Iran. *Air Quality, Atmosphere Health*, 6, 123–135. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-011-0152-5>
25. Rashki, A., Eriksson, P.G., Rautenbach, C.J. deW., Kaskaoutis, D.G., Grote, W., & Dykstra, J. (2013b). Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. *Chemosphere*, 90, 227–236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.059>
26. Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Goudie, A.S., & Kahn, R.A. (2013c). Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: The case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Science of The Total Environment*, 463(464), 552–564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.045>
27. Sharifikia, M. (2013). Environmental challenges and drought hazard assessment of Hamoun Desert Lake in Sistan region, Iran, based on the time series of satellite imagery. *Natural Hazard*, 65, 201–217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0353-8>
28. Vekerdy Z. Dost R. Reinink G. & Partow H. (2006). *History of Environmental Change in the Sistan Basin Based on Satellite Image Analysis: 1976–2005*. UNEP Post-Conflict Branch Geneva. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya. 56 p.
29. Whitney, JW. (2006). *Geology, water, and wind in the Lower Helmand Basin, Southern Afghanistan*. U.S. Geological Survey. Reston Virginia.