بررسی منشاء و مکانیسم تشکیل گل‌فشان‌های منطقه سیوان در شمال غرب تبریز

مریم تیموری[۱]، رحیم کدخدائی*[۲] و نصیر عامل[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه علوم‌زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- استادیار گروه علوم‌زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳- دانشیار گروه علوم‌زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

نویسنده مسئول: kadkhodaie.r@tabrizu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۹ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۲۷
نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

گل‌فشان‌های منطقه سیوان از پدیده‌های منحصربفردی هستند که ارتباط تنگاتنگی با واحدهای رسوبی چین‌خورده و دانه‌ریز میوسن دارند. این گل‌فشان‌ها بصورت اشکال مخروطی فرسایش‌یافته و خاموش یا نیمه فعال و نیز حوضچه‌های گل در منطقه گسترش دارند. نتایج آنالیز نمونه‌های رسوب به لحاظ بافتی، آن‌ها را در گروه گل‌سنگ و سیلت رسی به ترتیب در طبقه‌بندی فولک و شپارد قرار می‌دهد. کوارتز، فلدسپات‌ها، میکاها، انواع کانی‌های سنگین، کانی‌های رسی (ایلیت و کلریت) و خرده‌سنگ‌ها (دگرگونی، کربناته و آتشفشانی) از اجزاء تشکیل‌دهنده این رسوبات هستند. شواهد کانی‌شناسی بیانگر منشاء رسوبات از سنگ‌های دگرگونی و احتمالا آتشفشانی منطقه است. میزان کربنات کلسیم در نمونه‌های گل بین ۱۹ تا ۴۵ درصد متغیر بوده و بر این اساس رسوبات گلفشان‌ها، از نوع گل آهکی، مارن رسی و مارن می‌باشند. تشکیل گلفشان‌های سیوان در ارتباط با عواملی مانند حضور رسوبات دانه‌ریز میوسن، ضخامت رسوبات منطقه و تاثیر فشارهای روباره و تکتونیک ناحیه‌ای می‌تواند باشد. همچنین حضور گنبد نمکی پنهان طبق نقشه زمین‌شناسی و نیز عوارض سطحی، می‌تواند از عوامل موثر در تشکیل و فعالیت گل‌فشان‌های این ناحیه بوده باشد. این گل‌فشان‌ها به لحاظ ترکیب رسوب، آب و مکانیسم تشکیل قابل مقایسه با گل‌فشان‌های حواشی حوضه خزر هستند که با شرایط تکتونیکی- رسوب‌گذاری حوضه آن‌ها می‌تواند مرتبط باشد.

واژگان کلیدی: گل‌فشان، گنبد نمکی، فشار روباره و تکتونیک، میوسن

پیشگفتار

گل‌فشان‌ها که از اعماق زمین سرچشمه می‌گیرند یک منبع مهم اطلاعات از رسوبات و شرایط زیرسطحی هستند (رنجبران و ستوهیان، ۲۰۱۵). مطالعه ژئوشیمیایی سیالات فوران شده از گلفشان‌ها، منابع سیال متعدد و فرآیندهای پیچیده مهاجرت زیرسطحی را نشان می‌دهد. سیالات خارج شده از گل‌فشان‌ها ممکن است نشان‌دهنده مخلوط پیچیده‌ای از آب‌های عمیق و کم‌عمق باشد (پلنکه و همکاران، ۲۰۰۳، لی‌یو و همکاران، ۲۰۱۴). گل‌فشان‌ها ارتباط نزدیکی با مناطق پویای زمین‌شناسی دارند، جایی که رسوب‌گذاری بسیار سریع با فعالیت زمین‌ساختی پیوسته ترکیب می‌شود (مارتینلی و پناهی، ۲۰۰۵). این عوارض در خشکی، فراساحل و در بسیاری از مکان‌های زمین شکل می‌گیرند. گل‌فشان‌ها گرچه در موقعیت‌های تکتونیکی مختلف رخ می‌دهند، عمدتا بر اساس ویژگی‌های شناخته شده تا به امروز، در موقعیت‌های تکتونیکی فشارشی قرار دارند (استوارت و دیویس، ۲۰۰۶). گل‌فشان‌ها هندسه متغیر (قطر تا ده‌ها کیلومتر و ارتفاع چند صد متر) و تنوع زیادی به لحاظ منشاء فازهای سیال و جامد نشان می‌دهند. تشکیل گل‌فشان‌ها اغلب با فشار تکتونیکی، آب‌زدایی کانی‌های رسی و ته‌نشینی سریع رسوبات همراه با زمین‌لغزش ارتباط دارد (لی یو و همکاران، ۲۰۰۹). بر این اساس، برای تشکیل گل‌فشان‌ها شرایط زیر ضروری است (هی و همکاران، ۲۰۱۶):

۱- وجود لایه‌های ضخیم از جنس سنگ‌های رسی پلاستیکی

۲- شرایط زمین‌ساختی مطلوب، مانند منشورهای برافزایشی که در مناطق فرورانش پدید می‌آیند. مثلا فوران‌های گلی در نواحی ساحلی و دور از ساحل منشور افزایشی مکران به همگرایی صفحات عربی و اوراسیا مرتبط

نسبت داده می‌شود (فرهادیان بابادی و همکاران، ۲۰۱۹). فشار یا کشش تکتونیکی جانبی نیز بسیار مهم است اما همیشه یک الزام نیست.

۳- شکستگی‌های تکتونیکی، به ویژه در مناطقی که با هم تلاقی می‌کنند. این شکستگی‌ها تا حدی مهم هستند که هیچ گل‌فشانی بدون ساختارهای تکتونیکی نمی‌تواند وجود داشته باشد.

۴ - ساختارهای دیاپیریک. در واقع، بیشتر، اما نه همه گلفشان‌ها به دیاپیرها محدود می‌شوند.

۵- گازهای داخل زمین. گازها به طور مداوم تحت حرکات تکتونیکی متضاد شکل می‌گیرند. جریان گاز، احتمالا همراه با آب عمیق، با نیروی زیادی به داخل شکاف‌ها نفوذ می‌کند و آن‌ها را می‌شکند و آب میان بافتی و مواد سنگی شکسته شده را با خود به سمت بالا می‌آورد. پس از خروج گاز، فشار در مخزن کاهش کاهش یافتــه و فــوران یک گل‌فشان متوقف می‌شود.

۶- فشار مایع منفذی بالا (فشار بیش از حد) به عنوان نیروی محرکه (روبرتس و همکاران، ۲۰۱۱، پانی یری و همکاران، ۲۰۱۳).

از این رو یکی از عوامل کلیدی ایجاد گل‌فشان گسل است (مارتینلی و پناهی، ۲۰۰۵). بر این اساس، مکانیسم تشکیل گل‌فشان بیشتر با نوع و منشاء فـشاری که بـه آن وارد می‌شود تا گل از درون زمین خارج شود ارتباط دارد. چهار نوع خاستگاه را برای گل‌فشان‌ها می‌توان در نظر گرفت (فصل بهار، ۱۳۹۰):

۱- گل‌فشان‌هایی با خاستگاه ماگمایی

۲- گل‌فشان‌هایی با خاستگاه تکتونیکی

۳- گل‌فشان‌هایی با خاستگاه تکتونیکی -رسوبی

۴- گل‌فشان‌هایی با خاستگاه مختلط

گل‌فشان‌ها با خاستگاه‌های مختلف معمولا پدیده‌ای با دمای پایین هستند و خیلی به ندرت با فعالیت آذرین مرتبط هستند. بجز گل‌فشان‌های با خاستگاه ماگمایی که مشخصه‌ی آن‌ها دمای زیادشان است، ریخــت‌شــناسی گل‌فشان تابع وزن مخصوص مواد یا گل خروجی و ترتیب فوران و یا جهش آن اسـت (نگارش، ۱۳۸۳). بعـضی از گل‌فشان‌ها شکل منظمی از مخروط‌ها را نشان می‌دهند که طول آن‌ها تا یک کیلومتر و ارتفاع آن‌ها تا صدمـتر می‌رسد. این گل‌فشان‌ها با انباشته‌شدن تدریجی (پیاپی، پیشرونده، دگرشکلی) جریانات گل و لای سطحی تشکیل می‌شوند و شکل و منظر کلی آن‌ها به طور کامل شبیه به آتشفشان‌های چینه‌ای ماگمایی است. گل‌فشان‌های دیگر مربوط به گنبدهای صاف یا سپرهای گلی هستند که در نتیجه فوران گسترده گل و لای گسترش یافته و می‌توانند در فاصله زیادی از دریچه جریان داشته باشند. برخی از موقعیت‌های گل‌فشان‌ها نیز با حوضچه‌ها یا دریاچه‌های گل وقتی که آب غالب است مطابقت دارند که از آن‌ها گل و گاز به طور مداوم خارج می‌شود (دویله، ۲۰۰۹). بیش از ۲۵۰۰ گل‌فشان در جهان شناسایی شده است که بیشتر آن‌ها (حدود ۳۵۳ گل‌فشان) و بزرگ‌ترین آن‌ها در کشور آذربایجان شکل گرفته است و حدود نیمی از گل‌فشان‌های کشور آذربایجان نیز در دریای خزر قرار دارند (بالوگلانو و همکاران، ۲۰۱۸؛ مولر، ۲۰۱۹).

گل‌فشان‌ها را می‌توان از نظر فعالیت و رفتار به سه دسته کلی رده‌بندی کرد (مازینی و همکاران، ۲۰۰۹):

۱- انفجاری[1]: فعالیت این نوع گلفشان به صورت دوره‌ای است و شدت این نوع فعالیت به میزان فشار وارده به مخزن گل‌فشان بستگی دارد.

۲- خاموش[2]: در این گونه گل‌فشان‌ها، در فاصله میان فوران‌ها گاز خارج نمی‌شود، یا به صورت حباب‌های کوچک و یا به صورت نقطه‌ای در سیال‌ها و یا رسوبات مشخص می‌شوند.

۳- غیرفعال[3]: یا خاموش که هیچ اثری از فوران سیال و یا خرده‌سنگی از آن ثبت نشده است

سیالات یکی از عوامل موثر در تشکیل گل‌فشان‌ها هستند و حامل گل گل‌فشان و خود عامل اصلی نیروی محرکه فوران است (ون و همکاران، ۲۰۱۷). سیالات آبی ممکن است از منابع مختلف و با مکانیسم‌ها و واکنش‌های مختلف به سیستم های گل‌فشان کمک کنند (کوپف، ۲۰۰۲). بطور کلی آب گل‌فشان‌ها از رودخانه‌های سطحی، آب زیرزمینی کم‌عمق و عمیق، آبزدایی کانی‌های رسی و دریا نـشات می‌گیرد (پلنکه و همکاران، ۲۰۰۳؛ لی یو و همکاران، ۲۰۰۹). مطالعه آب‌های گل‌فشان‌ها می‌تواند اطلاعات باارزشی در مورد رسوبات زیرسطحی، تجمع هیدروکربن‌ها، شیمی آب و فعالیت‌های نئوتکتونیک محلی را فراهم آورد

[1] Eruptive
[2] Dormant
[3] Extinct

(ون و همکاران، ۲۰۱۷). در ایران نیز بیشتر گل‌فشان‌ها در جلگه‌های ساحلی دریای عمان و دریای خزر دیده می‌شوند. در جنوب شرقی ایران نیز در سواحل دریای عمان (مکران) در استان‌های سیستان و بلوچستان و هرمزگان، ۳۰ گل‌فشان شناخته شده‌اند (نژاد افضلی و همکاران، ۱۳۹۵). از جمله گل‌فشان‌های مطالعه شده در ایران می‌توان گل‌فشان پیرگل واقع در شرق آتشفشان بزمان (نگارش، ۱۳۸۳)، گل‌فشان‌های حاشیه خاوری دریای مازندران (آرین و فصل بهار، ۱۳۹۴)، گل‌فشان گتان در جنوب شرقی بندرعباس (دهقانیان و همکاران، ۱۳۹۴) و گل‌فشان ناپک در ناحیه مکران (نژاد افضلی و همکاران، ۱۳۹۵) اشاره کرد. عمرانی و رقیمی (۲۰۱۸) با مطالعه منشاء گل‌فشان‌های جنوب شرق دریای خزر به این نتیجه رسیدند که این گل‌فشان‌ها در یک ناحیه فعال تکتونیکی قرار گرفته‌اند و از بخش‌های عمیق دشت گرگان نشات گرفته‌اند. کلانه و همکاران (۱۴۰۱) منشاء گل‌فشان‌های قارنیارق و نفتلیجه در دشت گرگان را بر اساس مطالعه و تفسیر مقاطع لرزه‌ای، با چین‌خوردگی‌های عمیق و توسعه گسل‌های کششی که مسیر را برای خروج گل فراهم نموده است نسبت داده‌اند. در این مطالعه نیز گل‌فشان‌های منطقه سیوان بر اساس مشخصه‌های سنگ‌شناسی، رسوبی و ژئوشیمیایی آن‌ها توصیف و تشریح می‌شوند.

داده ها و روش کار

طی مطالعات صحرایی در خرداد سال ۱۴۰۰، بازدید و بررسی‌های دقیق زمین‌شناسی از منطقه سیوان انجام گرفت و سپس رسوبات و سیالات گل‌فشان‌های منطقه مورد مطالعه نمونه برداری شد. در مجموع تعداد ۱۵ نمونه رسوب (S1 تا S15) و ۵ نمونه آب (W1 تا W5) جهت انجام آزمایش‌های مختلف جمع‌آوری گردید. نمونه‌های آب شامل سه نمونه از دهانه خود گلفشان‌ها و دو نمونه نیز از مکان‌هایی با خروج دوره‌ای و متناوب آب و گاز می‌باشد. ابتدا نمونه‌های رسوب برداشت شده به لحاظ بافتی مورد مطالعه قرار گرفتند. برای این منظور، آنالیز دانه‌سنجی با استفاده از الک مرطوب و هیدرومتر بر روی آن‌ها انجام شد و طبق طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴) و شپارد (۱۹۵۴) نام‌گذاری شدند. سپس آنالیز کلسیمتری برای تعیین میزان کربنات کلسیم آن‌ها صورت گرفت. تعداد ۳ نمونه رسوب برای بررسی دقیق‌تر ترکیب کانی‌شناسی و نیز نوع کانی‌های رسی در شرکت کانساران بینالود تحت پراش اشعه‌ایکس (XRD) قرار گرفتند. همچنین مطالعات میکروسکوپی (بیناکولار و پلاریزان) بر روی بخش‌های ماسه‌ای گل‌فشان صورت گرفت. با تلفیق نتایج حاصل از مطالعات صحرایی، بافتی و کانی‌شناسی، منشاء و نحوه تشکیل گل‌فشان‌های منطقه بحث و بررسی گردید.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، بخشی از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مرند و ۱/۲۵۰۰۰ صوفیان را شامل می‌شود. گل‌فشان‌های سیوان با مختصات جغرافیایی ″۵۶ ′۴۵ °۵۲ طول شرقی و ″۲۵ ′۱۹ °۳۸ عرض شمالی در مجاورت روستای سیوان از توابع شهرستان مرند در شمال غربی استان آذربایجان‌شرقی و در بخش شرقی کوه‌های میشو قرار دارند (شکل ۱). کوه‌های میشو به طول تقریبی ۸۰ کیلومتر از غرب شهرستان صوفیان تا شرق شهرستان سلماس ادامه دارد. مهم‌ترین ویژگی منطقه این است که قسمت اعظم پیکره سنگی آن مربوط به سنگ‌های پرکامبرین می‌باشد. بخش وسیعی از کوه‌های میشو نیز مربوط به سنگ‌های آذرین گابرو (با سن پس از پرکامبرین و قبل از پرمین) و گرانیت پس از کامبرین (سازند سلطانیه) و قبل از پرمین می‌باشد. بیشتر پوشش سنگی این ناحیه، کواترنری است اما سنگ‌های مربوط به تریاس، کرتاسه و میوسن نیز رخنمون دارند. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه، گل‌فشان‌های منطقه سیوان در ارتباط با توالی چین‌خورده میوسن بوده و درون رسوبات میوسن با سنگ‌شناسی شامل مارن‌های رنگارنگ گچ و نمک‌دار با میان لایه‌های ماسه‌سنگ خاکستری رنگ گسترش دارند (شکل ۲A). همچنین بر اساس نتایج حاصل از مطالعات صحرایی، رسوبات منطقه از نوع رسوبات دانه‌ریز مارن، گل‌سنگ، شیل و میان لایه‌های نازک تبخیری هستند. این رسوبات به صورت تپه‌های رنگی با عوارض شیاری و سطح ناهموار گسترش دارند (شکل ۲B). گل‌فشان‌ها که عمدتا بصورت عوارض مخروطی شکل و در مواردی به صورت حوضچه‌های گل در منطقه حضور دارند (شکل ۲C و ۲D) حالت غیرفعال داشته و در زمان خاصی از سال، به صورت نیمه فعال و با فعالیت محدود، از دهانه‌های کوچک آن‌ها گل خارج می‌شود. حضور دهانه‌های مخروطی برآمده و فرسایش‌یافته در منطقه، به

فعالیت گل‌فشان‌ها در گذشته اشاره دارد. خروج آب غنی از املاح از رسوبات در برخی قسمت‌های منطقه قابل مشاهده است که آثار آن بصورت بلورها و پوشش‌های نمکی در مسیر آبراهه‌ها دیده می‌شود (شکل ۲E). جدول ۱ مشخصات کلی گل‌فشان‌های منطقه را بطور خلاصه نشان می‌دهد.

شکل ۱. نقشه هوایی گل‌فشان‌های منطقه مورد مطالعه در حوالی روستای سیوان. موقعیت نقاط نمونه‌برداری (۱۵ نمونه) با علایم ستاره مشخص شده است.

Fig. 1. Satellite Map of mud volcanoes of the study area near the Seivan village. Location of sampling points (15 samples) are shown by star mark.

جدول ۱. مشخصه‌های کلی گل‌فشان‌های منطقه سیوان

Table 1. General characteristics of mud volcanoes in Seivan area.

شکل‌شناسی	قطر متوسط مخروط	زمان فعالیت	مشخصه بارز	عوارض زمین‌شناسی
عمدتا مخروطی شکل و در برخی قسمت‌های منطقه به صورت حوضچه‌های گل	عمدتا کمتر از یک متر	عمدتا غیرفعال یا فعالیت دوره‌ای و محدود متناسب با فصل‌های خشکسالی و بارش	برآمدگی‌های مخروطی شکل و فرسایش یافته در انواع قدیمی و غیرفعال و خروج گل همراه با آب شور در انوع فعال	حضور گل‌فشان‌ها بصورت پراکنده در سطح رسوبات قرمز و خاکستری رنگ شیلی و مارنی میوسن که بصورت چین‌خورده و با عوارض فرسایشی شیاری گسترش دارند.

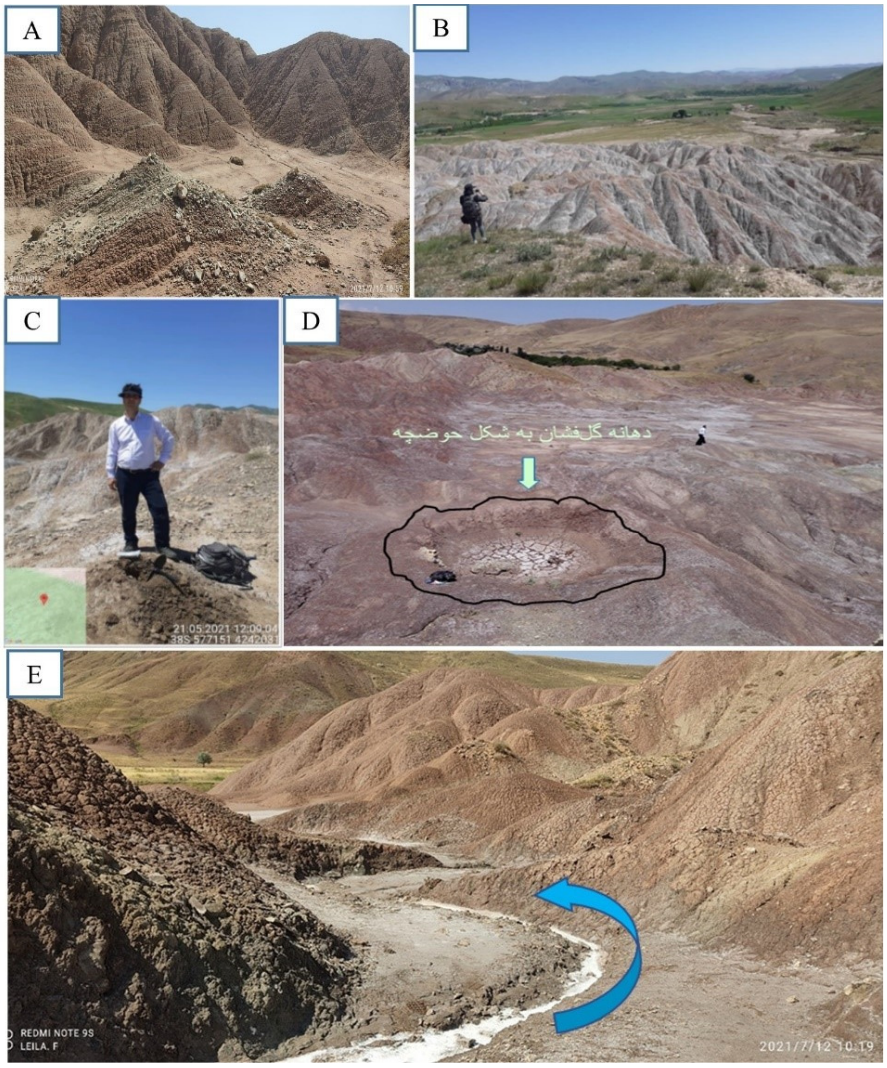
سنگ‌شناسی و بافت رسوبی

نمونه‌های رسوب برداشت شده از گل‌فشان‌های منطقه سیوان بر اساس نتایج حاصل از آنالیز دانه‌سنجی به روش الک و هیدرومتری، از نوع رسوبات دانه‌ریز با نسبت تقریبا مساوی از سیلت و رس هستند (شکل‌های ۳ و ۴) و طبق طبقه‌بندی فولک (۱۹۵۴) در رده گل‌سنگ قرار می‌گیرند (شکل ۵). ذرات در اندازه ماسه نیز درصد ناچیزی از کل رسوب را تشکیل می‌دهند. همچنین این رسوبات بر اساس طبقه‌بندی شپارد (۱۹۵۴) عمدتا از نوع سیلت رسی هستند (شکل ۶). بررسی آماری توزیع اندازه ذرات بر اساس نمودارهای درصد فراوانی و درصد تجمعی صورت گرفت (شکل ۷). نتایج بیانگر میانگین ذرات در اندازه سیلت خیلی‌ریز تا رس، جورشدگی ضعیف و کج شدگی مثبت رسوبات گل‌فشان است (جدول ۲).

کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی

ذرات در اندازه ماسه، بخش ناچیزی از نمونه‌های مرتبط با گلفشان‌های سیوان را تشکیل می‌دهند. بررسی ترکیب کانی‌شناسی بخش ماسه‌سنگی رسوبات گل‌فشان در زیر میکروسکوپ دوچشمی (بیناکولار)، به حضور دانه‌های تخریبی (کانی‌های سیلیکاته و خرده‌سنگ‌ها) به همراه انواع کانه‌های فلزی (پیریت، کالکوپیریت، مگنتیت و

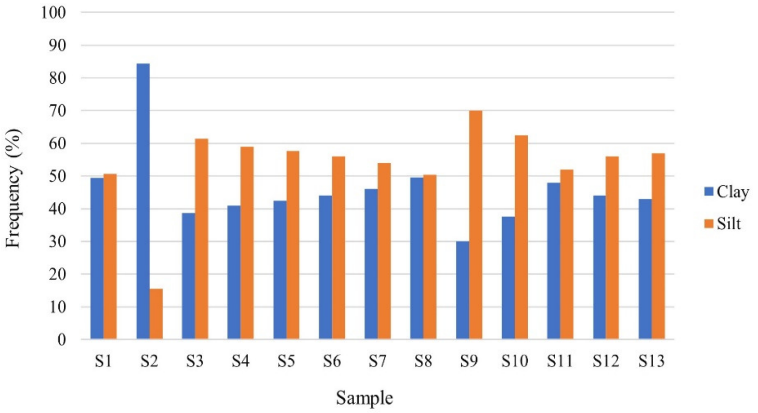
ایلمنیت) اشـــاره دارد (شـــکل ۸). برخی از این کانه‌های فلزی با توجه به خاصـــیت مغناطیســـی که دارند جذب آهنربا می‌شـوند. همچنین نتایج حاصـل از مطالعه مقاطع نازک میکروســکوپی نشــان می‌دهد که بخش عمده اجزاء تخریبی توسط کربنات کلسیم جانشین شده‌اند و در واقع کربنات کلســیم به شــکل دروغین دانه‌ها[1] حضــور دارد. از این رو شــناســایی آن‌ها در زیر میکروســکوپ به ســادگی امکان‌پذیر نیست. اما برخی شواهد میکروسکوپی همچون ماکل کتابی و پلی‌ســنتیک در برخی دانه‌ها بیانگر حضــور مقدار قابل‌توجهی دانه‌های فلدسپات است. حضور میکاها بویژه مسـکویت به همراه برخی خرده‌سـنگ‌های دگرگونی بیانگر حداقل یک منشاء دگرگونی برای این رسوبات است. خرده‌ســـنگهای آهکی ریزبلور (گل آهکی) نیز بصـــورت پراکنده مشاهده می‌شود (شکل ۹). حضور خرده‌سنگ‌های آتشـفشـانی درون این رسـوبات با ابهاماتی همراه اسـت که می‌تواند با سنگ‌های آتشفشانی منطقه مرتبط باشد.



شکل ۲. تصاویر صحرایی از A) رسوبات چین‌خورده میوسن مرتبط با گل‌فشان‌های منطقه سیوان، B) تپه‌های رنگی میوسن با سطح ناهموار و عوارض شیاری در منطقه سیوان، C) یکی از گل‌فشان‌های مخروطی شکل و غیرفعال منطقه سیوان، D) گل‌فشان‌های غیرفعال منطقه سیوان بصورت حوضچه گل و E) رسوبات نمکی تشکیل شده در مسیر آب‌های غنی از املاح (شور) خارج شده از رسوبات میوسن در منطقه سیوان.

Fig. 1. Field photos of A) folded sediments of the Miocene related to the mud volcanoes of Seivan area. B) Miocene colored hills with uneven and grooved features in Seivan area. C) One of the cone-shaped and inactive mud volcanoes of Seivan area. D) mud volcanoes of Seivan area as mud pool. E) Salt sediments formed in the path of waters rich in solutes derived from Miocene sediments in Seivan area.

[1] Pseudomorph

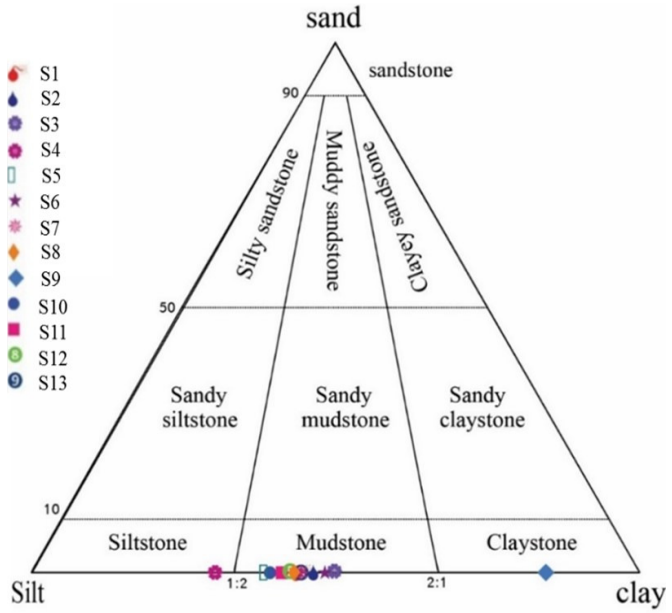


شکل ۳. هیستوگرام توزیع اندازه ذرات در رسوبات گل‌فشان‌های منطقه سیوان با نسبت تقریبا مساوی از سیلت و رس

Fig. 3. Histogram showing the grain size distribution of the sediments of mud volcanoes in Seivan area with relatively equal ratio of silt and clay

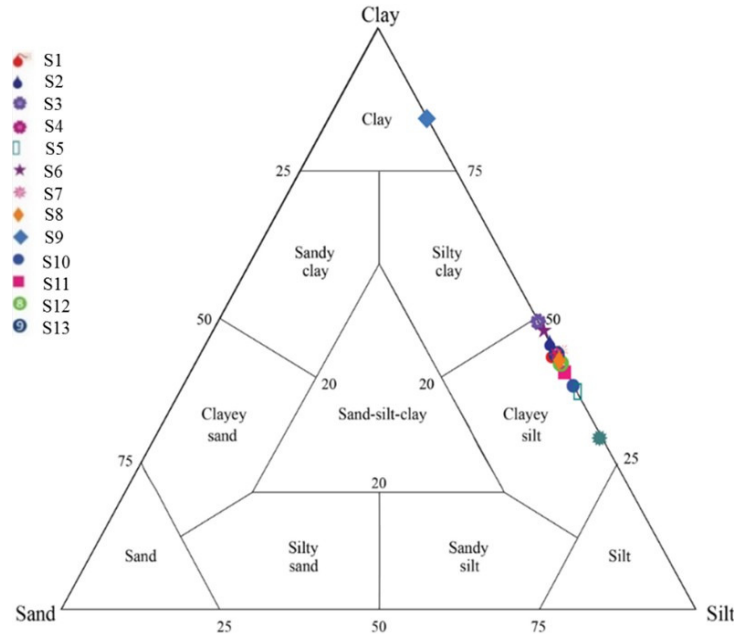
شکل ۴. تصاویر نمونه‌های گل خشک شده مرتبط با گل‌فشان‌های منطقه سیوان. خاصیت ورقه‌ای شدن بیانگر مقدار قابل‌توجهی رس درون نمونه‌ها است.

Fig. 4. Photos of dried mud samples related to mud volcanoes of Seivan area. Fissility indicates a significant amount of clays in samples.



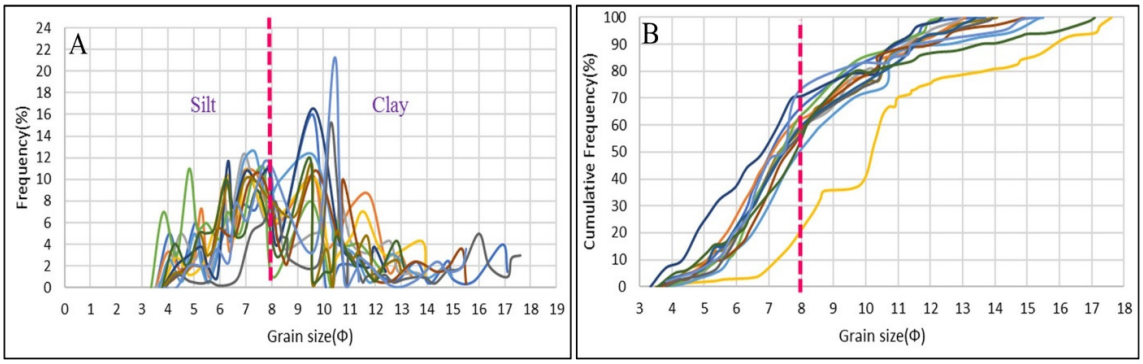
شکل ۵. نام‌گذاری رسوبات منطقه مورد مطالعه بر اساس مثلث طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴)

Fig. 5. Naming of sediments in the study area based on Folk (1974) triangle



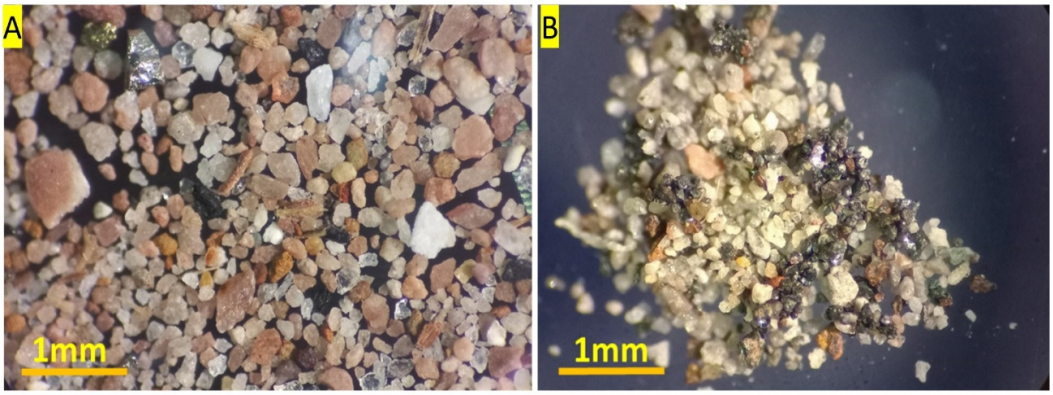
شکل ۶. نام‌گذاری رسوبات منطقه مورد مطالعه بر اساس مثلث طبقه‌بندی شپارد (۱۹۵۴)

Fig. 6. Naming of sediments in the study area based on Shepard (1954) triangle



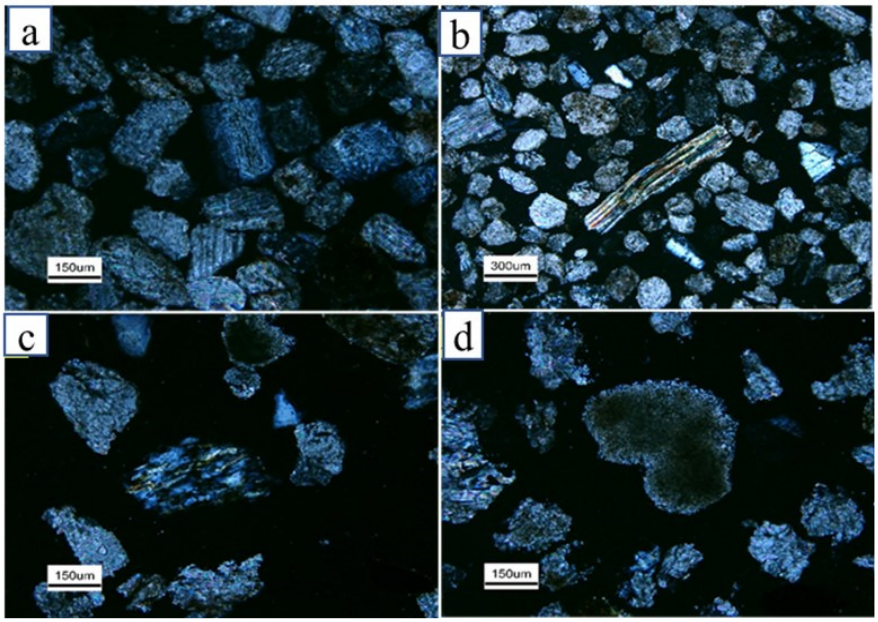
شکل ۷. نمودارهای درصد فراوانی (A) و درصد تجمعی (B) نمونه‌های رسوب گل‌فشان‌های منطقه سیوان

Fig. 7. Frequency and cumulative percent plots of the sediment samples of mud volcanoes in Seivan area.



شکل ۸. تصویر میکروسکوپی از ذرات در اندازه ماسه گل‌فشان‌های منطقه سیوان که بیانگر حضور اجزاء تخریبی به همراه برخی کانه‌های فلزی است.

Fig. 8. Photomicrographs of sand size grains of mud volcanoes in Seivan area showing the presence of clastic components associated with some metal ores.



شکل ۹. تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی از رسوبات در اندازه ماسه گل‌فشان‌های منطقه سیوان که بیانگر حضور اجزاء تخریبی مانند فلدسپات دارای رخ (a)، مسکویت در مرکز تصویر (b)، خرده‌سنگ دگرگونی در مرکز تصویر (c) و خرده‌سنگ آهکی در مرکز تصویر (d) در این رسوبات است. بخش عمده اجزاء تخریبی توسط کربنات کلسیم جانشین شده است.

Fig. 9. Thin section photos of sand size sediments of mud volcanoes in Seivan area showing the presence of clastic components, including feldspar with cleavage (a), muscovite in the center of photo (b), metamorphic rock fragment in the center of photo (c), and limestone rock fragment in the center of photo (d) in this sediments. A significant part of clastic components has been replaced by calcium carbonate.

جدول ۲. نتایج حاصل از آنالیز اندازه ذرات رسوب به روش هیدرومتری برای ۱۳ نمونه رسوب برداشت شده از منطقه سیوان

Table 2. The results of grain size analysis of sediment from hydrometer method for 13 samples gained from Seivan area

نمونه	انحراف معیار	کج‌شدگی	کشیدگی	میانگین (فی)
S1	2.60	0.38	1.19	8.25
S2	3.35	0.321	1.22	10.90
S3	2.45	0.34	0.96	7.60
S4	2.23	0.33	0.91	7.90
S5	2.10	0.34	1.02	7.60
S6	2.10	0.34	1.02	7.60
S7	2.70	0.29	1.12	7.90
S8	2.50	0.34	0.96	8.20
S9	2.94	0.3	1.08	7.30
S10	1.98	0.28	1.13	7.70
S11	3.30	0.31	1.76	8.25
S12	2.50	0.39	0.90	8.10
S13	2.60	0.30	0.92	8.00

نتایج حاصل از آنالیز کلسیمتری بر روی نمونه‌های رسوب گل‌فشان‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که این نمونه‌ها دارای مقادیر متغیری آهک بین ۱۹ تا ۴۵ درصد هستند. بنابراین این رسوبات به ترتیب فراوانی از نوع گل آهکی، مارن رسی و مارن می‌باشند. نتایج حاصل از آنالیز پراش اشعه‌ایکس (XRD) طبق جدول ۳ نشان می‌دهد که رسوبات به لحاظ ترکیب کانی‌های اصلی متشکل از کوارتز، کلسیت، دولومیت، مسکویت، آلبیت و کانی‌های رسی (ایلیت و کلریت) هستند و کانی‌های فرعی نیز شامل ارتوکلاز، هالیت، هماتیت و مقادیری از فازهای آمورف می‌باشند.

جدول ۳. نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس (XRD) برای رسوبات گل‌فشان‌های منطقه سیوان
Table 3. The results from x-ray diffraction for mud volcanoes sediments in Seivan area.

نمونه	کانی اصلی	کانی فرعی
S1	کوارتز، کلسیت، مسکویت-ایلیت، آلبیت و کلریت	دولومیت، هالیت، ارتوکلاز، هماتیت و آمورف
S2	دولومیت، کوارتز، مسکویت-ایلیت و کلریت	ارتوکلاز، هالیت، کلسیت و آمورف
S3	کوارتز، کلسیت، مسکویت-ایلیت، کلریت، آلبیت و دولومیت	ارتوکلاز، هماتیت و آمورف

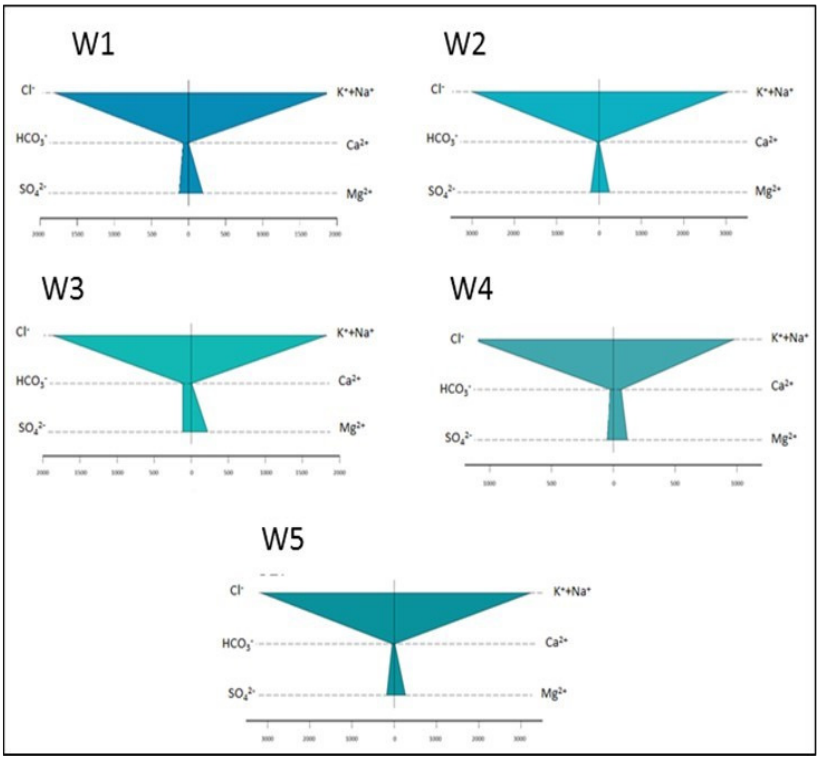
آنالیز نمونه‌های آب خارج شده از گلفشان

مطالعه مایعات خارج شده از گل‌فشان‌ها می‌تواند اطلاعات باارزشی در مورد رسوبات زیرسطحی، تجمع هیدروکربن‌ها، شیمی آب و فعالیت‌های نئوتکتونیک محلی را فراهم آورد (ون و همکاران، ۲۰۱۷). سیالات آبی ممکن است از منابع مختلف و با مکانیسم‌ها و واکنش‌های مختلف به سیستم‌های گل‌فشان کمک کنند (کوپف، ۲۰۰۲). این سیالات ممکن است از سیالات منافذ رسوبی و آب نمک عمیق، مخلوط‌شدگی با آب جوی در حال گردش به وجود آمده باشند و از نظر دیاژنتیکی توسط فعل و انفعالات آب و سنگ در عمق، تجزیه مواد آلی، اکسیداسیون هوازی و بی‌هوازی متان یا برهم‌کنش‌های شیمیایی بین سیالات و سنگ بستر، تغییر یافته باشند (لی یو و همکاران، ۲۰۱۴). در کل، آب گل‌فشان‌ها از رودخانه‌های سطحی، آب زیرزمینی کم‌عمق و عمیق، آبزدایی کانی‌های رسی و دریا نشات می‌گیرند (پلنکه و همکاران، ۲۰۰۳، لی یو و همکاران، ۲۰۰۹، چنگ و همکاران، ۲۰۱۲) پارامترهای هیدروشیمیایی اندازه‌گیری شده بر روی نمونه‌های جمع‌آوری شده از گل‌فشان‌های منطقه سیوان شامل هدایت الکتریکی (EC)، دما، کل مواد جامد محلول در آب (TDS)، اسیدیته (PH) و یون‌های اصلی تشکیل‌دهنده آب شامل کاتیون‌های Ca, Mg, Na, K و آنیون‌های $CO3^{-2}$, $Co3^{-1}$, Cl^{-1} و$SO4^{-2}$ هستند. نتایج این پارامترها نشان می‌دهد که دمای سیالات خارج شده از نقاط اطراف گل‌فشان‌ها در محدوده ۲۸-۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد و این دما برای گل‌فشان‌هایی با خاستگاه تکتونیکی صدق می‌کند. محدوده تغییرات PH بین ۷/۵۸ و ۸/۱۲ متغیر است که نشان‌دهنده PH قلیایی برای مایعات گل‌فشان می‌باشد. TDS سیالات گل‌فشان‌ها خیلی بالا است و در محدوده بین ۶۸/۵ تا ۲۳۳/۱ گرم بر لیتر تغییر می‌کند. TDS بالا حاکی از املاح فراوان در سیال گل‌فشان‌ها دارد و تشکیل بلورهای نمک در مکان‌های خروج و عبور آب، دلیلی بر این ادعاست. نقشه زمین‌شناسی منطقه نیز، به حضور یک گنبد نمکی پنهان در زیر گل‌فشان‌های منطقه سیوان اشاره دارد. از این رو شوری بالای آب‌های خارج شده از گل‌فشان‌های سیوان را می‌توان به گنبد نمکی پنهان در این منطقه مرتبط دانست. مشابه این وضعیت برای گل‌فشان قارنیارق تپه در حوالی دریای خزر در استان گلستان وجود دارد که بر اساس مطالعات لرزه‌ای به حضور دیاپیر نمکی پنهان همراه با یک گسل در نزدیک گل‌فشان اشاره شده است (رنجبران و ستوهیان، ۲۰۱۵). به منظور تعیین تیپ و رخساره آب‌های منطقه مورد مطالعه، نمودار استیف[1] و پایپر[2] توسط نرم‌افزار Aq-AQ با استفاده از غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های حاصل از آنالیز هیدروشیمیایی برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر رسم گردید (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). در نمودار استیف، برای انواع آب‌ها می‌توان سه تیپ بی‌کربناته، سولفاته و کلروره و سه رخساره سدیمی، منیزیمی و کلسیمی تشخیص داد. بررسی و مقایسه نمودار استیف نمونه‌های سیال منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که میزان کاتیون‌های سدیم و پتاسیم و همچنین آنیون کلر آن‌ها به طور چشمگیری بالا است (شکل ۱۰) و نمونه‌های آب حاصل، در منطقه یون‌های Na+K – Cl قرار می‌گیرند که این منطقه متعلق به محدوده آب دریا می‌باشد (مارتینلی و پناهی، ۲۰۰۵). این بدان معناست که آب دریا جزء اصلی این سیالات بوده با این تفاوت که آب‌های مورد مطالعه، در همه یون‌های اصلی غلظتی فراتر از آب دریا را نشان می‌دهند و مقدار غلظت‌شان مشابه غلظت آب شورابه‌ها و دریاچه‌های قلیایی می‌باشد. این امر به نوبه خود می‌تواند ناشی از واکنش‌های شیمیایی موجود بین آب‌های منفذی و رسوبات داخل حوضه باشد که در تبادل با یکدیگر هستند. نمودار پایپر، ترکیبی از مثلث‌های کاتیونی و آنیونی است که یک لوزی

[1] Stiff

[2] Piper

در بین دو مثلث قرار می گیرد. درصد آنیون ها و کاتیون‌ها در میدان‌های مثلثی و موقعیت ترکیبی آن‌ها در میدان لوزی شکل قرار می‌گیرد. با توجه به موقعیت نمونه‌ها روی محدوده لوزی شکل، می‌توان بر حسب مشخصات شیمیایی در دیاگرام پایپر به طور تجربی منشأ نمونه آب را تشخیص داد. طبق این نمودار، تمامی نمونه‌ها در اطراف یک رأس مثلث تمرکز دارند، بطوری که در دیاگرام سه‌وجهی مربوط به آنیون‌ها، در نزدیکی وجه Cl^- و در دیاگرام سه‌وجهی متعلق به کاتیون‌ها، در نزدیکی وجه Na+K قرار می‌گیرند (شکل ۱۱). بر این اساس تمامی نمونه‌ها در منطقه ۷ دیاگرام پایپر قرار می‌گیرند که جزء آب‌های قلیایی غیرکربناته بیش از ۵۰ درصد و برتری با قلیایی‌ها و اسیدهای قوی است که جزء ویژگی‌های آب اقیانوس و آب خیلی شور محسوب می‌شوند. با توجه به دیاگرام‌های استیف و پایپر بدست آمده از آنالیز نمونه‌های آب گل‌فشان‌های سیوان، تیپ و رخساره آب‌های منطقه مورد مطالعه از نوع Na-Cl تشخیص داده شد (جدول ۴) که با برخی گل‌فشان‌های سایر نقاط جهان از جمله گل‌فشان‌های فعال در آذربایجان (پلنکه و همکاران، ۲۰۰۳) و تایوان (لی یو و همکاران، ۲۰۱۳) قابل مقایسه است. با این تفاوت که میزان غلظت یون‌های اصلی بخصوص یون‌های Na^+ و Cl^- در گل‌فشان‌های سیوان خیلی بیشتر از گل‌فشان‌های مذکور است.



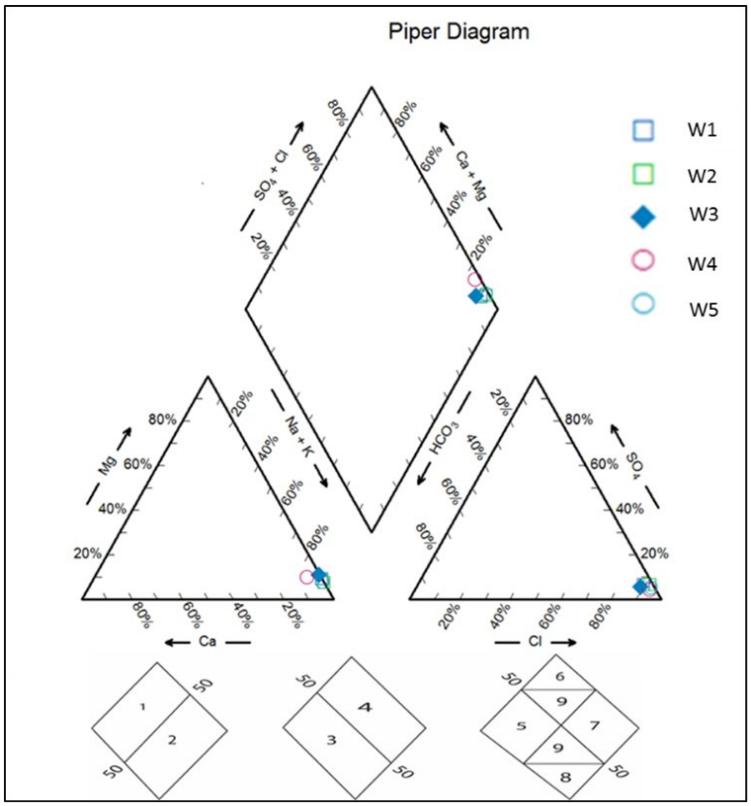
شکل ۱۰. نمودار استیف نمونه‌های آب گل‌فشان‌های سیوان

Fig. 10. Stiff diagram for water samples of mud volcanoes of Seivan

جدول ۴. تیپ و رخساره آب گل‌فشان‌های سیوان بر اساس نمودارهای پایپر و استیف

Table 4. Water type and facies of Seivan mud volcanoes based on Piper and Stiff diagrams.

نمونه	تیپ آب	رخساره آب	تیپ و رخساره	غلظت آنیون‌ها	غلظت کاتیون‌ها
W1	کلروره	سدیک	کلروسدیک(Na-Cl)	$Cl^->SO_4^{2-}>HCO_3^->CO_3^{2-}$	$Na^+>Mg^{2+}>K^+>Ca^{2+}$
W2	کلروره	سدیک	کلروسدیک(Na-Cl)	$Cl^->SO_4^{2-}>HCO_3^->CO_3^{2-}$	$Na^+>Mg^{2+}>K^+>Ca^{2+}$
W3	کلروره	سدیک	کلروسدیک(Na-Cl)	$Cl^->HCO_3^->SO_4^{2-}>CO_3^{2-}$	$Na^+>Mg^{2+}>K^+>Ca^{2+}$
W4	کلروره	سدیک	کلروسدیک(Na-Cl)	$Cl^->SO_4^{2-}>HCO_3^->CO_3^{2-}$	$Na^+>Mg^{2+}>Ca^{2+}>K^+$
W5	کلروره	سدیک	کلروسدیک(Na-Cl)	$Cl^->SO_4^{2-}>HCO_3^->CO_3^{2-}$	$Na^+>Mg^{2+}>K^+>Ca^{2+}$



شکل ۱۱. نمودار پایپر متعلق به نمونه‌های آب خارج شده از گل‌فشان‌های سیوان

Fig. 11. Piper diagram related to water samples of Seivan mud volcanoes

مقایسه‌ی پارامترهای محیطی و تغییرات ترکیب شیمیایی سیالات گل‌فشان‌های سیوان با گل‌فشان‌های نقاط مختلف جنوب ایران و آب دریا طبق جدول ۵ نشان می‌دهد که به غیر از گل‌فشان پیرگل که ترکیبی از نوع $Na\text{-}HCO3^{2-}$ دارد (فرهادیان بابادی و همکاران، ۲۰۱۹) نوع تیپ و رخساره سیالاتشان به مانند سیالات گل‌فشان‌های سیوان از نوع Na-Cl می‌باشد، با این تفاوت که گل‌فشان‌های سیوان در اکثر یون‌های اصلی نسبت به گل‌فشان‌های جنوب ایران بطور قابل‌توجهی غنی‌شدگی دارند. غلظت یون $HCO3^{-}$ در گل‌فشان‌های پیرگل و عین بیشتر از گل‌فشان‌های سیوان می‌باشد و در گل‌فشان ناپک تقریبا غلظتی برابر دارند. همچنین میزان یون Ca گل‌فشان‌های سیوان نسبت به یون کلسیم آب دریا کم است.

مکانیسم تشکیل گل‌فشان‌های سیوان

بیشتر گل‌فشان‌ها در ارتباط با ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه‌ای هستند که در آن رخ می‌دهند (کوپف، ۲۰۰۲). دیاپیرها و گل‌فشان‌ها هر دو ساختارهای زمین‌شناسی هستند که از رسوبات ضخیم شیل با چگالی کم و پلاستیسیته بالا تشکیل شده‌اند و توسط رسوبات روباره فشرده شده‌اند (هی و همکاران، ۲۰۱۶). گل‌فشان‌های منطقه سیوان ارتباط تنگاتنگی با رسوبات میوسن نشان می‌دهند. یکی از فاکتورهای ضروری برای تشکیل گل‌فشان‌ها، وجود رسوباتی از جنس رس می‌باشد. در واقع حضور رسوبات ضخیم مارنی، رسی و شیلی میوسن، بستر و شرایط لازم برای توسعه گل‌فشان‌های سیوان را فراهم آورده است. لایه‌های حاوی خاک رس دارای چگالی حجمی پایینی هستند. این خصوصیت رس باعث صعود توده گل رسی تحت فشار بالا به سمت بالا به دلیل وارونگی چگالی می‌شود. وارونگی چگالی ممکن است اولیه باشد که در نتیجه اختلاف چگالی بین ذرات رسوب و سنگ‌های اطراف و روباره بوجود می‌آید و یا ثانویه باشد مانند جریان جانبی سیالات با چگالی پایین، تغییر در شرایط دینامیکی حوضه رسوبی (مثلا اختلاف فشار در نقاط مختلف آن)، تولید هیدروکربن، فرایندهای دیاژنزی و دگرگونی و عملکرد فرایندهای تکتونیکی که باعث حذف برخی واحدهای رسوبی و تغییر فشار روباره می‌شود (کوپف، ۲۰۰۲).

جدول ۵. مقایسه‌ی ترکیب عناصر کاتیونی و آنیونی گل‌فشان‌های جنوب ایران (فرهادیان بابادی و همکاران، ۲۰۱۹) با گل‌فشان‌های سیوان (واحدها بر حسب mg/l) (توجه: گل‌فشان‌ها شامل انواع مخروطی (Gryphon)، چشمه گل (Salsa) و حوضچه گل (Pool) می‌باشد).

Table 5. Comparison of cation and anion elements of mud volcanoes of south of Iran (Farahdiyan-Babadi et al., 2019) with Seivan mud volcanoes (units in terms of mg/l) (Note: mud volcanoes include cone (Gryphon), mud springs (Salsa) and mud pool).

گل‌فشان	Type	Year	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	T(°c)
سیوان		2021	4130.90	89.60	7247.80	397.80	2849.90	56.30	1000.40	28.50
پیرگل	Pool	2016	8800	7.70	600	34	140	8.40	240	24.70
		2017	12300	8.50	1800	60	230	10.00	250	29.30
	Gryphon	2016	9900	7.50	1000	64	180	9.90	230	24.10
		2017	8900	6.20	1700	72	150	7.80	200	28.60
سند میرسوبان	Pool	2016	800	13.10	500	72	48	9.50	96	24.80
		2017	1100	13.90	1700	98	54	9.70	98	26.10
عین (آب غالب)	Salsa	2016	10200	52.50	1600	20	21	41.80	350	26.40
		2017	5800	32.60	4400	37	24	26.60	150	25.10
عین (گل غالب)	Salsa	2016	1200	7.80	700	11	7	6.00	48	26.40
		2017	1800	9.40	1700	16	10	7.60	52	23.50
ناپک	Pool	2016	4200	6.50	500	25	22	5.70	54	41.10
		2017	3400	6.80	-	28	19	5.60	67	24.30
بوربوروک	Gryphon	2016	1200	5.80	900	23	27	4.70	40	29.20
		2017	1500	4.80	1200	26	23	4.10	32	24.20
آب دریا			140	19.50	2600	412	1290	10.80	380	-

ساختمان‌های گل‌فشانی زمانی اتفاق می‌افتد که تشکیل گل‌فشان، تحت شرایط رسوب‌گذاری با سرعت بالا ایجاد شود. بخش‌های رسوبی ضخیم میوپلیوسن اساس تشکیل دیاپیرهای گلی و گل‌فشان‌ها هستند و گسل‌های کششی ایجاد شده در لایه‌های ضعیف اواخر دوره میوسن نیز شرایط زمین‌شناسی مطلوبی برای تشکیل دیاپیرهای گل و لای و گل‌فشان‌ها را بوجود آورده‌اند (هی و همکاران، ۲۰۱۶). دوران سنوزوییک به دلیل فعالیت شدید تکتونیکی، مستعد رسوب‌گذاری سریع و در پی آن تشکیل دیاپیرهای گلی و گل‌فشان‌ها بوده است. طی حرکات تکتونیکی و در پی آن فعال‌شدن گسل‌های منطقه (گسل تبریز یا صوفیان)، شکستگی‌هایی در بالا و اطراف مخزن گل‌فشان‌ها ایجاد می‌شود. بر اثر شکستگی‌های ایجاد شده، گل و لای موجود در مخزن با توجه به ویسکوزیته پایین شروع به نفوذ در داخل شکستگی‌های به وجود آمده می‌کند. شناوری بالای گل می‌تواند به دلیل چگالی حجمی پایین رس‌ها، فشار منفذی بیش از حد بالا، واکنش‌های آبزدایی کانی‌ها و تولید گاز (متان، دی‌اکسیدکربن و ...) ایجاد شود. با توجه به موارد بالا می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که گل‌فشان‌های سیوان تحت تاثیر ویژگی‌های رسوبی اولیه (بافت دانه‌ریز مارنی و رسی)، ضخامت بالای رسوبات و آب منفذی محبوس و فشردگی مرتبط با وزن روباره و تکتونیک شکل گرفته‌اند. ظهور گل‌فشان‌های سیوان از درون رسوبات چین‌خورده میوسن بیانگر تشکیل آن‌ها بعد از چین‌خوردگی و وقایع کوهزایی منطقه است. همچنین حضور گنبد نمکی پنهان طبق اطلاعات نقشه زمین‌شناسی منطقه و شواهدی مانند خروج آب‌های غنی از املاح و نمک، می‌تواند از عوامل محرک و موثر در تشکیل گل‌فشان‌های منطقه سیوان باشد. وضعیت کنونی این گل‌فشان‌ها که با فعالیت محدود تا خاموش هستند به تخلیه فشار، کاهش آب منفذی و خروج بخش قابل توجه مواد رسی می‌تواند مرتبط باشد. مقایسه کلی بین گل‌فشان‌های منطقه سیوان با برخی گل‌فشان‌های ایران مانند گل‌فشان‌های حواشی حوضه خزر و ناحیه مکران در جدول ۶ خلاصه شده است. نتایج این مقایسه بیانگر تشابه بیشتر این گل‌فشان‌ها با گل‌فشان‌های حواشی حوضه خزر به لحاظ ترکیب رسوب، آب و مکانیسم تشکیل آن‌ها می‌باشد.

جدول ۶. مقایسه‌ی کلی گل‌فشان‌های منطقه سیوان با گل‌فشان‌های حواشی حوضه خزر و حوضه مکران

Table 6. General comparison of mud volcanoes of Seivan area with mud volcanoes near the Caspian and Makran basins.

نام گل‌فشان	شکل‌شناسی	ترکیب کانی‌شناسی اصلی	ترکیب آب	مکانیسم و شرایط تشکیل	منبع
سیوان	مخروطی و حوضچه گل با فعالیت محدود و فصلی	کانی‌های سیلیکاته (کوارتز، فلدسپات و میکا) و کربناته (کلسیت و دولومیت) و کانی‌های رسی (ایلیت و کلریت)	غنی از یون‌های سدیم و کلر	تکتونیک و رسوب‌گذاری و حضور رسوبات ضخیم و دانه ریز میوسن	مطالعه حاضر
حوضه دریای خزر (قارنیاریق تپه و نفتلیجه)	حوضچه گل، مخروطی و گنبد گلی	کانی‌های سیلیکاته (کوارتز و فلدسپات) و کربناته (کلسیت و دولومیت) و کانی‌های رسی (اسمکتیت، ایلیت، کلریت و کائولینیت)	غنی از یون‌های سدیم و کلر	تکتونیک و رسوب‌گذاری و نرخ رسوب‌گذاری و فرونشست بالای پلیوسن و کواترنری حوضه خزر و فشار تکتونیکی	کلانه و همکاران، ۱۴۰۱
حوضه مکران (گنتان در شهرستان جاسک)	مخروطی	کانی‌های کربناته و کانی‌های رسی	غنی از یون سدیم	فرورانش پوسته اقیانوسی دریای عمان به زیر پوسته قاره‌ای مکران	نژاد افضلی و همکاران، ۱۳۹۰
حوضه مکران (ناپگ در چابهار)	مخروطی	کانی‌های سیلیکاته (کوارتز) و کربناته و کانی‌های رسی (ایلیت و مونتموریلونیت)	غنی از یون سدیم	فرورانش پوسته اقیانوسی دریای عمان به زیر پوسته قاره‌ای مکران	عباس‌نژاد و نگارش، ۱۳۸۹

نتیجه‌گیری

گل‌فشان‌های منطقه سیوان که در بستر رسوبات چین‌خورده میوسن نمود پیدا کرده‌اند به لحاظ بافتی از نسبت تقریبا مساوی از سیلت و رس تشکیل شده‌اند و طبق طبقه‌بندی فولک در گروه رسوبات گلی و در طبقه‌بندی شپارد در گروه سیلت رسی قرار می‌گیرند. رسوبات این گل‌فشان‌ها به لحاظ ترکیب کانی‌شناسی از انواع کانی‌های سیلیکاته (کوارتز، فلدسپات و میکا)، کربناته (کلسیت و دولومیت) و رسی (ایلیت و کلریت) تشکیل شده‌اند و آب خارج شده از آن‌ها بصورت شورابه غنی از سدیم و کلر است که می‌تواند به حضور یک گنبد نمکی پنهان در منطقه مورد مطالعه نسبت داده شود. این رسوبات با توجه به مشخصه‌های کانی‌شناسی، از سنگ‌های با منشاء دگرگونی و آذرین منطقه نشات گرفته‌اند. توسعه رسوبات دانه‌ریز مارنی، شیلی و رسی میوسن با ضخامت بالا در کنار فعالیت‌های تکتونیکی و کوهزایی، شرایط را برای تشکیل و فعالیت گل‌فشان‌های این منطقه به صورت عوارض مخروطی و حوضچه گل فراهم آورده است. با مقایسه گل‌فشان‌های سیوان با گل‌فشان‌های سایر نقاط ایران، یک تشابه کلی در ترکیب رسوب و آب و مکانیسم تشکیل آن‌ها با گل‌فشان‌های حواشی حوضه خزر مشاهده می‌شود که تحت تاثیر شرایط رسوبی- تکتونیکی حوضه تشکیل آن‌ها توسعه یافته‌اند.

References

Abbasnezhad, A., Negaresh, H (2010) Micromorpholy of mudflows of Napag mud volcano. Environmental Based Territorial Planning (Amayesh), 3 (8): 71-86 (in Persian).

Arian, M. A., Faslebahar, J (2015) Study of Mineralogy & Geochemistry of Mud Volcanoes in Southeast of Caspian Sea and Sediments of Caspian Sea Bed in its SE Margin. Geosciences Scientific Quarterly Journal, 24 Issue: 95: 383-392 (in Persian).

Baloglanov, E. E., Abbasov, O. R. Akhundov, R. V (2018) Mud volcanoes of the world: classifications, activities and environmental hazard (informational-analytical review). European Journal of Natural History, 5: 12-26.

Cheng, T., Chang, Y., Tang, S., Tseng, C., Chiang, P., Chang, K., Sun, C., Chen, Y., Kuo, H., Wang, C., Chu, P., Song, S., Wang, P., and Lin, L (2012) Metabolic stratification driven by surface and subsurface interactions in a terrestrial mud volcano: The ISME Journal, 6: 2280-2290. doi.org/10.1038/ismej.2012.61.

Dehghanian, M. S., Mirhosseini, S. M., Abidpour, Z (2014) Geochemistry of Getan mud volcano sediments, southeast of Bandar Abbas, Oman Sea coast. Second National Conference on Geology and Resource Exploration (in Persian).

Deville, E (2009) Mud volcano systems. Volcanoes: Formation, eruptions and modelling, 95-125.

Farhadian Babadi, M., Mehrabi, B., Tassi, F., Cabassi, J., Vaselli, O., Shakeri, A., Pecchioni, E., Venturi, S., Zelenski, M., Chaplygin, I (2019) Origin of fluids discharged from mud volcanoes in SE Iran, Marine and Petroleum

Nejadafzali, K., Lak, R., Bayatani, F (2011) Introuduction and study of Nezhad Afzali Mudvolcanoe Site, Gatan mud volcanoes and geotourism significance of them (Jask). Geosciences, 21 (82): 207-214 (in Persian).

Nejadafzali, K., Lak, R., Ghoreshi, M (2017) Investigation of geomorphological changes and sediment characteristics of Napag mud volcano, Makran, Iran. Geosciences, 26 (104): 261-266 (in Persian).

Omrani, H., Raghimi, M (2018) Origin of the mud volcanoes in the South East Caspian Basin, Iran: Marine and Petroleum Geology, 96: 615-626. dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.05.017.

Planke, S., Svensen, H., Hovland, M., Banks, D. A., Jamtveit, B (2003) Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan. Geo-Marine Letters, 23(3): 258-268. dx.doi.org/10.1007/s00367-003-0152-z.

Ranjbaran, M., Sotohian, F (2015) Environmental impact and sedimentary structures of mud volcanoes in southeast of the Caspian Sea basin, Golestan Province, Iran. Caspian Journal of Environmental Sciences, 13 (4): 391-405.

Shepard, F. P (1954) Nomenclature based on sand-silt-clay ratios: Journal of Sedimentary Petrology, 24: 151-158.

Stewart, S. A., Davies, R. J (2006) Structure and emplacement of mud volcano systems in the South Caspian Basin: AAPG Bulletin, 90: 753-770. dx.doi.org/10.1306/11220505045.

Wan, Z., Wang, X., Lu, Y., Sun, Y., Xia, B (2017) Geochemical characteristics of mud volcano fluids in the southern margin of the Junggar basin, NW China: implications for fluid origin and mud volcano formation mechanisms: Journal of International Geology Review, 59: 1723-1735.

Geology, 106: 190-205. doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.05.005.

Folk, R. L (1974) Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill Publishing Co., Austin, 170 p.

He, J., Wang, S., Zhang, W., Yan, W., Lu, Z (2016) Characteristics of mud diapirs and mud volcanoes and their relationship to oil and gas migration and accumulation in a marginal basin of the northern South China Sea: Journal of Environmental Earth Sciences, 75: 1-12.

Kalaneh, S., Ghaemi, F., Mousavi-Harami, S. R., Mohajer-Soltani, H (2023) Origin of the Gharnyaregh and Neftelijeh mud volcanoes in Gorgan plain, Iran. Iranian Journal of Geophysics, 17(1): 238-243. (in Persian). doi.org/10.30499/ijg.2022.346702.1435.

Kopf, A. J (2002) Significance of mud volcanism: Reviews of Geophysics, 40, 52 p. doi.org/10.1029/2000RG000093.

Liu, C. C., Jean, J. S., Nath, B., Lee, M. K., Hor, L. I., Lin, K. H., Maity, J. P (2009) Geochemical characteristics of the fluids and muds from two southern Taiwan mud volcanoes: implications for water–sediment interaction and groundwater arsenic enrichment. Applied Geochemistry, 24: 1793-1802.

Liu, C. C., Maity, J. P., Jean, J. S., Li, Z., Kar, S., Sracek, O., ... & Lee, C. Y (2014) The geochemical characteristics of the mud liquids in the Wushanting and Hsiaokunshui Mud Volcano region in southern Taiwan: Implications of humic substances for binding and mobilization of arsenic. Journal of Geochemical Exploration, 128: 62-71. doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.006.

Martinelli, G., Panahi, B. (Eds.) (2005) Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Mud Volcanism, Geodynamics and Seismicity, Baku, Azerbaijan, from 20 to 22 May 2003 (Vol. 51). Springer Science & Business Media.

Mazzini, A., Svensen, H., Planke, S., Guliyev, I., Akhmaniv, G, G., Fallik, T. Banks, D (2009) When mud volcanoes sleep: insight from seep geochemistry at the Dash gill mud volcanoes Azerbaijan: journal of Marine and Petroleum Geology, 26: 1704-1715. doi.org/10.1016/J.MARPETGEO.2008.11.003.

Müller, H. E (2019) The Mud Volcanoes of Azerbaijan–a Potential UNESCO World Heritage Site. World Heritage Watch Report, 2019, 28.

Negharesh, H (2004) A Survey of "Pir-Gel" Mud-Volcano Located in the East of Bazman Volcano and its Characteristics. Geography and Development, 2(4): 191-208. doi.org/10.22111/gdij.2004.3891 (in Persian).

Investigating the origin and formation mechanism of mud volcanoes of Seivan region in the northwest of Tabriz

M. Teymouri[1], R. Kadkhodaie[2]* and N. Amel[3]

1- M. Sc (graduated), Dept., of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Assist. Prof., Dept., of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- Assoc. Prof., Dept., of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* kadkhodaie.r@tabrizu.ac.ir

Recieved: 2023.12.29 Accepted: 2024.4.15

Abstract

The mud volcanoes of Sivan region are unique phenomena that are closely related to the folded and fine-grained sedimentary units of the Miocene. These mud volcanoes are in the form of eroded and inactive or semi-active cones, as well as mud ponds in the region. The results of the analysis of the sediment samples, in terms of texture, place them in the mudstone and clayey silt groups, in the Folk and Shepard classifications, respectively. Quartz, feldspars, mica, various heavy minerals, clay minerals (Illite and chlorite) and rock fragments (metamorphic, carbonate and volcanic) are the components of these sediments. Mineralogical evidence indicates the origin of sediments from metamorphic and possibly volcanic rocks of the region. The amount of calcium carbonate in the mud samples varies between 19 and 45%, and accordingly, the sediments of the mud volcanoes are calcareous mud, argillaceous marl, and marl. The formation of Sivan mud volcanoes can be related to some factors such as the presence of fine-grained sediments of Miocene, the thickness of sediments, and the influence of overburden pressures and regional tectonics. Also, the presence of a hidden salt dome according to the geological map as well as surface features can be effective factor in the formation and activity of the mud volcanoes in this area. In terms of the composition of sediment, water and formation mechanism, these mud volcanoes are comparable to mud volcanoes on the margins of the Caspian basin, which can be related to their sedimentation-tectonic conditions.

Keywords: Mud volcanoes, Salt dome, Overburden and tectonic pressure, Miocene

Introduction

Mud volcanoes that originate from the depths of the earth are an important source of information about sediments and subsurface conditions. The geochemical study of fluids erupted from mud volcanoes shows multiple fluid sources and complex subsurface migration processes. The fluids ejected from the mud volcanoes may represent a complex mixture of deep and shallow waters. Mud volcanoes are closely associated with geologically dynamic regions, where very rapid sedimentation is combined with continuous tectonic activity. These effects are formed on land, offshore and in many places on earth. In Iran, most of the mud volcanoes can be seen in the coastal plains of the Oman Sea and the Caspian Sea. In the southeast of Iran, on the shores of the Oman Sea (Makran) in the provinces of Sistan and Baluchistan and Hormozgan, 30 mud volcanoes are known. Among the studied mud volcanoes in Iran are Pirgol located in the east of Bozman volcano, on the eastern edge of Mazandaran sea, Getan in the southeast of Bandar Abbas and Napak in Makran district. Omrani and Raghimi (2018) studied the origin of mud volcanoes in the southeast of the Caspian Sea and came to the conclusion that these mud volcanoes are located in a tectonically active area and originated from the deep parts of the Gorgan Plain. Kalaneh et al. (2023) determined the origin of Qarniarq and Naftlije mud volcanoes in the Gorgan Plain based on the study and interpretation of seismic sections, with deep folds and the development of tensile faults that provide the path for the flow of mud. In this study, the mud volcanoes of Sivan region are described and explained based on their lithological, sedimentary and geochemical characteristics.

Data and methodology

During the field studies in June 1400, detailed geological investigations were carried out in the Sivan area, and then the sediments and fluids of the mud volcanoes of the studied area were sampled. In total, 15 sediment samples (S1 to S15) and 5 water samples (W1 to W5) were collected to perform various tests. The water samples include three samples from the mouth of the mud volcanoes and two samples from places with periodic and intermittent water and gas discharge. First, the collected sediment samples were studied in terms of texture. For this purpose, grain size analysis was performed using a wet sieve and a hydrometer, and they were named according to the classification of Folk (1974) and Shepard (1954). Then, calcimetry analysis was done to determine the amount of their calcium carbonate. 3 sediment samples were subjected to X-ray diffraction (XRD) for a more detailed examination of the mineralogical composition and the type of clay minerals in Kansaran Binalud company. Also, microscopic studies (binocular and polarizing) were carried out on the sandy samples of mud volcanoes. By combining the results of field, textural and mineralogical studies, the origin and formation of mud volcanoes in the region were discussed and investigated.

Geology of the study area: The studied area includes a part of the geological maps of 1/100,000 Marand and 1/25,000 Sufian. Sivan mud volcanoes are located with geographical coordinates of 52°52° 45′ east longitudes and 38° 25′ 19° north latitude in the vicinity of Seivan village of Marand county in the northwest of East Azarbaijan province and in the eastern part of Misho mountains.

Lithology and sedimentary texture: Sediment samples collected from mud volcanoes in Seivan region are fine-grained sediments with almost equal proportions of silt and clay, which based on the results of grain size analysis by sieve and hydrometric methods, and according to the classification of Folk (1954) are placed in mudstone group. Sand-sized particles also make up a small percentage of the total sediment. Also, these sediments based on the classification of Shepard (1954) are mainly clayey silt type. Statistical analysis of particle size distribution shows the average grain size of very fine silt to clay, poor sorting and positive skewness of the sediments.

Mineralogy and chemical composition

Sand-sized grains form a small part of the samples related to Seivan mud volcanoes. Examining the mineralogical composition of the sandstone part of mud volcanoes sediments under a binocular microscope shows the presence of clastic grains (silicate minerals and rock fragments) along with various types of metal ores (pyrite, chalcopyrite, magnetite and ilmenite). Some of these metal ores are attracted to magnets due to their magnetic properties. Also, the results obtained from the study of microscopic thin sections show that most of the clastic components have been replaced by calcium carbonate, and in fact, calcium carbonate is present in pseudomorph of grains. Therefore, their identification under the microscope is simply not possible. However, some microscopic evidence such as carlsbad and polysynthetic cleavage in some grains indicate the presence of a significant amount of feldspar grains. The presence of micas, especially muscovite, along with some metamorphic rock fragments indicates at least a metamorphic origin for these sediments. Microcrystalline limestone rock fragments (lime mud) are also observed. The presence of volcanic rock fragments in these sediments is associated with ambiguities, which, if any, could be related to the volcanic rocks of the region. The results of calcimetry analysis on the sediment samples of mud volcanoes in the study area show that these samples have variable amounts of calcium carbonate between 19 and 45%. Therefore, these sediments are calcareous mud, clayey marl and marl in order of abundance. The results of X-ray diffraction (XRD) analysis show that the sediments are composed of quartz, calcite, dolomite, muscovite, albite and clay minerals (illite and chlorite) in terms of composition. Minor phases also include orthoclase, halite, hematite and amounts of amorphous phases.

Analysis of water samples taken out of mud volcanoes: The analysis results of water samples show that the temperature of the fluids released from the points around the volcanoes is in the range of 28-30 degrees Celsius and this temperature applies to mud volcanoes with tectonic origin. The range of pH changes varies between 7.58 and 12.8, which indicates alkaline pH for volcanic fluids. The TDS of mud volcanoes fluids is very high and varies between 68.5 and 233.1 grams per liter. A high TDS indicates a lot of salts in the fluid of the

mud volcanoes, and the formation of salt crystals in the places of water exit and passage is a proof of this claim. The geological map of the region also indicates the presence of a hidden salt dome under the mud volcanoes of Seivan region. Therefore, the high salinity of the water coming out of the Seivan mud volcanoes can be related to the hidden salt dome in this area.

The formation mechanism of Sivan mud volcanoes: Due to intense tectonic activity, the Cenozoic era was prone to rapid sedimentation followed by the formation of mud diapirs and mud volcanoes. During tectonic movements and following the activation of faults in the region (Tabriz or Sufian faults), fractures were created above and around the mud volcano reservoir. As a result of the created fractures, the mud in the reservoir due to its low viscosity begins to penetrate inside the created fractures. The high buoyancy of mud can be caused by the low volume density of clays, excessively high pore pressure, mineral dehydration reactions and gas production (methane, carbon dioxide, etc.). Considering the above, it can be concluded that Seivan mud volcanoes are influenced by primary sedimentary characteristics (marl and clay fine-grained texture), high thickness of sediments and trapped pore water, and compaction related to overburden weight. The emergence of Seivan mud volcanoes from the Miocene folded sediments indicates their formation after the folding and orogenic events of the region. Geology of the region and some evidence such as the outflow of waters rich in salts can be motivating and effective factors in the formation of mud volcanoes in Seivan region. The current situation of these mud volcanoes, which are with limited to silent activity, can be related to the release of pressure, reduction of pore water and the release of a significant part of clay materials. A general comparison between the mud volcanoes of Seivan region with mud volcanoes of the Caspian and Makran basins show the greater similarity of them with ones of the Caspian basin in terms of the composition of sediment and water and the mechanism of their formation.

Conclusion

The mud volcanoes of Seivan region, which appeared in the Miocene folded sediments, are composed of almost equal proportions of silt and clay, and according to Folke's classification, they belong to the group of mud sediments and in the classification of Shepard belongs to the clayey silt group. In terms of mineralogical composition, the sediments of these mud volcanoes are composed of silicate (quartz, feldspar and mica), carbonate (calcite and dolomite) and clay (illite and chlorite) minerals, and the water released from them is rich in sodium and chloride, which can be attributed to the presence of a hidden salt dome in the studied area. According to mineralogical characteristics, these sediments originate from metamorphic and igneous rocks of the region. The development of high-thick Miocene marl, shale, and clay sediments, along with tectonic and orogenic activities, has provided the conditions for the formation and activity of mud volcanoes in this region in the form of conical features and mud ponds. By comparing Seivan mud volcanoes with ones from other parts of Iran, a general similarity in the composition of sediment and water and the mechanism of their formation is observed with mud volcanoes in margins of the Caspian basin, which under the influence of sedimentary-tectonic conditions of their basin have developed.